

Georgian Scientists

ქართველი მეცნიერები

ასოციაცია მეცნიერებისათვის

Association for Science

Journal DOI: <https://doi.org/10.52340/gs>

<https://journals.4science.ge/index.php/GS/index>

სარედაქციო საბჭო

თამარ ხახუტაშვილი - მთავარი რედაქტორი, კომპიუტერული მეცნიერებების მაგისტრი, ასოციატა მეცნიერებისათვის პრეზიდენტი; თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკის დირექტორი <https://orcid.org/0000-0003-0953-2073>

ნინო ბერიანიძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი, მთავარი რედაქტორის მოადგილე, კომპიუტერული მეცნიერებების მაგისტრი

მარიეტა სულაბერიძე - რედაქტორი, თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი, კომპიუტერული მეცნიერებების მაგისტრი

ომარ ლანჩავა - საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ტექნიკური მეცნიერებების დოქტორი, პროფესორი ; <https://orcid.org/0000-0003-4249-9404>

მალხაზ წიქარიშვილი - საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, რედაქტორი, პროფესორი

გელა ყიფიანი - საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, რედაქტორი, პროფესორი

მარინა ქურდაძე - საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, პროფესორი, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი

მარიამ კობერიძე - გორის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, პროფესორი

გიორგი გოროშიძე - ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ასოცირებული პროფესორი, <https://orcid.org/0000-0002-6244-2942>

ვახტანგ კვაჭაძე - ფიზიკის მეცნიერებათა დოქტორი, თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ანდრონიკაშვილის სახელობის ფიზიკის ინსტიტუტის სამეცნიერო საბჭოს წევრი; <https://orcid.org/0000-0002-3875-505X>

ლელა ბახტაძე - ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ასოცირებული პროფესორი

ავთანდილ ამირანაშვილი - მ. ნოდias სახელობის გეოფიზიკის ინსტიტუტი, ივ. ჯავახიშვილის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ფიზიკა-მათემატიკის დოქტორი

აგაევ რაუფ მაგსუდ ოღლუ - მედიცინის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი, აკადემიკოს მ. თოფჩუბაშევის სახელობის ქირურგიის სამეცნიერო ცენტრის დირექტორი, აზერბაიჯანის სამედიცინო უნივერსიტეტის ქირურგიული სნეულებათა დეპარტამენტის პროფესორი, კათედრის გამგე (ბაქო, აზერბაიჯანი)

ირაკლი ნადირაძე - მედიცინის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი, პათოლოგიისა და კანის სიმსივნეების ცენტრის ხელმძღვანელი, საქართველო ისრაელის ერთობლივი კლინიკა GIDMEDI: თბილისი, საქართველო; <https://orcid.org/0000-0002-4764-655X>

ელი კაკიაშვილი - მედიცინის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი, ქირურგი, გალილეის სამედიცინო ცენტრი, ნაჰარია, ისრაელი; მედიცინის ფაკულტეტი გალილეაში, ბარ ილანის უნივერსიტეტი, საფადი, (ისრაელი); <https://orcid.org/0000-0002-8796-9724>

ლუის მ. ალედორტი - მედიცინის მეცნიერებათა დოქტორი, მერი ვაინფელდი კლინიკური კვლევის პროფესორი ჰემოფილიაში, მოუნთ სინაის მედიცინის სკოლა, ნიუ იორკი

ნადეი ჰაკიმი - GCSJ, MD, PhD, FRCS, FRCSI, FACS, FICS(Hon), FASMB, FIMSA(Hon) მედიცინის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი, ტრანსპლანტაციის ქირურგი, ლონდონის საიმპერატორო კოლეჯი, ლონდონი, დიდი ბრიტანეთი; ზოგადი ქირურგი, კლივლენდის კლინიკა (ლონდონი, დიდი ბრიტანეთი); <http://orcid.org/0000-0001-9442-7950>

მამუკა ზოკუჩავა - პროფესორი, სისხლძარღვთა ქირურგი, ანგიოლოგი, მედიცინის დოქტორი, ნ. ბოხუას სახელობის სისხლძარღვთა და გულის დაავადებათა ცენტრის დირექტორის მოადგილე; <https://orcid.org/0000-0002-6719-1302>

მერაბ კილაძე - მედიცინის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი. აშშ-ს, საერთაშორისო, ევროპის და რუსეთის ქირურგთა ასოციაციების წევრი, ქირურგი, კლინიკა გიდმედის ქირურგიული სამსახურის უფროსი

გოგი (გიორგი) ბოჭორიშვილი - პროფესორი, მედიცინის მეცნიერებათა დოქტორი, უროლოგი, თბილისი, საქართველო

ნინო კიკნაძე - სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა დოქტორი, ქიმიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი, ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტი. აგრარული და მემბრანული ტექნოლოგიების ინსტიტუტის მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი. საქართველოს გარემოს დაცვის მეცნიერებათა აკადემიის ნამდვილი წევრი. ამერიკის ქიმიის საზოგადოების (ACS) წევრი, ბათუმი, საქართველო; <https://orcid.org/0000-0001-7864-3899>

ავთანდილ ბარდაველიძე - ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ტექსტის რედაქტორი:

მარიამ ჩაჩანიძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

მიხეილ ერგემიძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი, ინფორმატიკის ბაკალავრი

ვებ რედაქტორი:

გიორგი ბანეთიშვილი - თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ეროვნული სამეცნიერო ბიბლიოთეკა

სარჩევი

თეიმურაზ არევაძე - გრუნტში შემღწევი რადარის (GPR) გამოყენება საგზაო სამოსის არადესტრუქციულ კვლევაში-----	1-14
ლამარა სუხიტაშვილი, ნუცა ვახტანგაძე - ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება და დასაქმებულთა აღქმული შესრულება: ავტონომიისა და სამუშაოს წნეხის როლი-----	15-34
თინათინ ჩიგოგიძე, ნათია ქოიავა - მოლების არქიტექტურულ-მხატვრული და ურბანული როლი ქ. თბილისის განვითარებაში-----	35-43
ნინო გიორგიშვილი, ზურაბ კუტიბაშვილი - განხლებადი ენერგიის წყაროების ინტეგრაცია მოძველებულ ელექტროენერგეტიკულ ქსელებში: ოპერაციული მართვა და ტექნოლოგიური ადაპტაცია-----	44-57
კახაბერ ყავლაშვილი - ინტელექტუალური საკუთრების მართვა ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების პირობებში-----	58-71
Rati Alania, Roman Samkharadze, Lia Gachechiladze - Aspects of Integrating Artificial Intelligence Methods into Web Technology Infrastructure -----	72-82
Nino Karkashadze, Nana Tserodze, Rusudan Uridia, Nona Bolkvadze, Liparit Dolidze, Leila Tatiashvili, Rusudan Tsiskarishvili - Phenylglycosylamines in Melanoidin Reaction -----	83-89
თეიმურაზი ფაღავა, მანანა ბერიძე, დარეჯან ხოჭოლავა, მარინა შოგირაძე, ნონა ესიავა, ლალი ტურიაშვილი, მაია ჟღენტი - მაღალი გამტარობის მოუწესრიგებელი რეგიონების გავლენა, მაღალი ენერგიის პროტონებით დასხივებულ n-Si კრისტალებში რადიაციული დეფექტების გამოწვის კინეტიკაზე -----	90-103
ირაკლი კანკავა - ამიოტროფული გვერდითი სკლეროზით დაავადებული პაციენტების სიცოცხლის ხარისხის გაუმჯობესება, ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული თავის ტვინის პოტენციალების ამოცნობის სისტემის საშუალებით -----	104-110
მარინა ბასილაშვილი - ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მიტრალური რეგურგიტაციის ავტომატური დეტექცია და კლასიფიკაცია ----	111-116
Nino Khaindrava - Integration of Artificial Intelligence and Interdisciplinary Hybrid Models in Secondary Schools-----	117-126

Emeliane Gogilidze, Natia Gogilidze - The Challenge of the Modern World - Artificial Intelligence and its Role in Supply Chain Management-----	127-137
ოლიკო მურღულია, გიორგი თევდორაშვილი, ნინო მუსერიძე, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - ქრონიკული ენდომეტრიტის ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლები და პლაზმური უჯრედების იმუნოჰისტოქიმიური მარკერების კორელაცია ენდომეტრიუმის კიურეტაჟის ნიმუშებში-----	138-148
Marina Kuparadze, Giorgi Imedashvili, Nia Tarkhnishvili, Nino Gegeshidze, Khatuna Chaava, Giorgi Zhorzholiani, Tamila Silagadze, Mariam Guledani, Thakur Rishmita - Cold Hemolysis as the Initial Presentation of B-Cell Acute Lymphoblastic Leukemia: A Case Report-----	149-160
ნანა რაზმაძე, ლუკა კახიძე, ნინო რატიანი, ნუცა გუმბერიძე, მზია ქიტოშვილი - ექსკავაციის სამუშაოების წარმოებისას სოციალური და ტექნიკური უსაფრთხოების გამოწვევების დაძლევის მეთოდები-----	161-169
დარეჯან ხარაძე, თინა ოშიაძე, ლარისა ყირმელაშვილი, თემურ ქანთარია, რამაზ ქაცარავა - ბენზოილის ზეჟანგის შემცველი ბიონანოკომპოზიტები ფსევდოპროტეინების საფუძველზე-----	170-186
თამარი ჩიკვილაძე, ქეთევანი ბარამიძე, ნინო ჩაფიძე, მარიამი ტატანაშვილი, თამარი ოთარაშვილი - რძეში და რძის პროდუქტში აფლატოქსინ M1-ის განსაზღვრის ქრომატო-მას სპექტრომეტრული (LC MS/MS) მეთოდის შემუშავება და ვალიდაცია-----	187-202
ნანა შაშიაშვილი - სპორტული ღონისძიებების ლოჯისტიკური დაგეგმვის მოდელების ეფექტიანობის შედარებითი ანალიზი-----	203-217
ნანა შაშიაშვილი - მიწოდების ჯაჭვის მართვის როლი სპორტული ღონისძიებების ოპერაციულ პროცესებში-----	218-232
ნიკოლოზ სარაული, რემა ღვამიჩავა, ნინო მუსერიძე, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - CD163-პოზიტიური მაკროფაგების ექსპრესიის თავისებურებები საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების პერიტონეუმის იმპლანტებში: ციფრული პათოლოგიის რაოდენობრივი კვლევა-----	233-249
თეონა ელიზარაშვილი - ენერგიის შემნახველი ბატარეის როლი სასისტემო მომსახურებაში-----	250-267

ანზორი ტაველიშვილი - ე. მინდელის შახტის ველის დაყოფა სამთო- გეოლოგიურ და სამთო ტექნიკურ პირობების მქონე ბლოკებად ქაბურღილების მონაცემებზე დაყრდნობით-----	268-278
Tamriko Bulia, Tina Beruchashvili, Ioseb Abesadze, David Makhashvili, Lekso Toidze, Diana Zhamerashvili, Mariam Chkheidze, Ekaterine Abzianidze, Bakho Dvali - Financial Toxicity in Cancer Care-----	279-292
სალომე მახარაძე, თალიკო მიქავა - ახალი თაობის ინტელექტუალური ქსელები - 6G ტექნოლოგიის მიმოხილვა-----	293-309
ირაკლი გუჯაბიძე, გელა მაჩაიძე, ანზორ ტაველიშვილი - ქანების ნიმუშების დინამიკური რღვევა და სამთო დარტყმა-----	310-320
ანა ფანცხავა, ნიკოლოზ კინტრაია, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - ენდოცერვიქსის ატიპური ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიების იმუნოჰისტოქიმიური მახასიათებლები და დიაგნოსტიკური თავისებურებები-----	321-334
კობა მიქაძე, მაია კერესელიძე, რუსუდან ურიდია, შოთა ნებიერიძე, მარიკა ბოკუჩავა - მეცხოველეობის ისტორია საქართველოში - სათავეები, ჩამოყალიბება, განვითარება პრეისტორიიდან თანამედროვეობამდე-----	335-345
Tamar Azikuri, George Kamkamidze, Nikoloz Pruidze, Natia Kvaratskhelia - Factors Influencing Humoral Immunity Post COVID-19 Vaccination in Georgia----	346-355
ალექსანდრე დიაკონიძე, ნიკოლოზ კინტრაია, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე, რიმა ბერიაშვილი - ენდომეტრიუმის ენდომეტროიდული კარცინომების რეციდივთან ასოცირებული კლინიკურ-მორფოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური თავისებურებები-----	356-370
გიგო ჯანდიერი, ინგა ჯანელიძე - ინჟინერიაზე ფოკუსირებული STEM განათლების ტრანსფორმაცია სწავლებისადმი არსებული მიდგომის „Industry 5.0“ პარადიგმასთან შესაბამისობის უზრუნველსაყოფად-----	371-417
Lali Tabatadze, Mariam Mtchedlishvili, Darejan Gulbani, Nino Garsevanishvili, Tamuna Chipchiuri, Salome Dvali, Giorgi Gigauri - Synthesis and Research of Poly [methyl-3-(tetraacetyl mannoside) propyl] siloxane for use in industrial production	418-423
გელა ღვინევაძე, შორენა დეკანოსიძე, ნინო ჩორბაული - საუნივერსიტეტო სწავლების ხარისხის ამაღლების გზები-----	424-435

ქეთევან შენგელაია, ირაკლი კობხრიძე, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - ძუძუს ეპითელური სიმსივნეებისა და სიმსივნისწინარე მდგომარეობების პროლიფერაციულ-აპოპტოზურ აქტივობას, სიმსივნის „ზადებსა“ და სიმსივნის მაინფილტრირებელ ლიმფოციტებს შორის კორელაციური კავშირები: რეტროსპექტული იმუნოჰისტოქიმიური კვლევა-----	436-453
Lela Inaishvili, Nikoloz Pruidze, Lali Sharvadze, Elene Gotsiridze, Giorgi Silagadze, Sopio Giuashvili, Mariam Chakhnashvili, Elene Tsirdava, Tamriko Bulia - Hepatocellular Carcinoma in Chronic Hepatitis B: The Role of Ultrasound in Surveillance-----	454-468
თინათინ აიწურაძე - სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაცია საინჟინრო კომპანიაში :პრაქტიკული მიდგომა-----	469-474
ეკატერინე მგალობლიშვილი, ელენე ქართველიშვილი, ნინო თევზაძე, შოთა კეპულაძე, გიორგი ბურკაძე - სინოვიური გარსის უჯრედულ- მოლეკულური პროფილი, სისხლძარღვთა ცვლილებები რევმატოიდული ართრიტის დროს, დაავადების პროგრესიისა და ინდივიდუალური მკურნალობის შესაძლო მარკერები-----	475-491
ირინა ნახუცრიშვილი, ნატო ნაკუდაშვილი, შოთა კეპულაძე, გიორგი ბურკაძე - სინონაზალური პოლიპებისა და პაპილომების ფენოტიპური მახასიათებლები, რეციდივისა და პროგრესიის ფაქტორები-----	492-512
ანა გერგაული - მარკეტინგის სამსახურის თანამშრომლების შეფასების პარამეტრების სისტემის ჩამოყალიბება-----	513-525
ანა ბენიძე, თინათინ კილასონია, შოთა კეპულაძე, გიორგი ბურკაძე - კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანების ჰეტეროგენულობის, ფენოტიპური თავისებურებისა და პროგრესიის რისკის მახასიათებლები-----	526-547
გიორგი ბიბილეიშვილი, ლიანა ებანოიძე, ნანა გოგესაშვილი, მზია კეჟერაშვილი, ლიანა ყუფარაძე, მანანა მამულაშვილი - მემბრანების ზედაპირის სტრუქტურის კვლევა სხვადასხვა სივრცითი გარჩევადობის პირობებში და კონფორმაციული მდგომარეობათა კორელაციური ანალიზი- გიორგი ბიბილეიშვილი, მზია კეჟერაშვილი, ზაზა ჯავაშვილი, ნანა გოგესაშვილი, ლიანა ყუფარაძე, ელენე კაკაბაძე - ინტეგრირებული მიდგომა ბუნებრივი წყლების დამუშავებაში დაბინძურების კონტროლისთვის-----	548-557
	558-564

გიორგი ბიბილეიშვილი, ნანა გოგესაშვილი, მზია კეჟერაშვილი, ზაზა ჟავაშვილი, ლიანა ყუფარაძე, ნონა ბუთხუზი - განსხვავებული პოლიმერული კომპოზიციების ფაზური ინვერსიის და მემბრანული დაყოფის პროცესების კვლევა-----	565-572
გიორგი ბიბილეიშვილი, ნანა გოგესაშვილი, მანანა მამულაშვილი, ლიანა ებანოძე, ელენე კაკაბაძე, თინათინ ბუთხუზი - თანამედროვე სტატისტიკური მეთოდების გამოყენება ფორის ზომების მნიშვნელობების პიკური მონაცემების პროგნოზირებისათვის-----	573-580
გიორგი ბიბილეიშვილი, ზაზა ჟავაშვილი, ელენე კაკაბაძე, ლეილა თანანაშვილი, მანანა მამულაშვილი, ლიანა ებანოძე - ადგილობრივი და საერთაშორისო საპატენტო ნამუშევრების მოძიება და ანალიზი ყურძნისეული წარმოშობის სპირტიანი სასმელის - ქართული ჭაჭას - ნანოფილტრაციული პროცესისათვის, ცვალებადი ტემპერატურისა და სიბლანტის პირობებში-----	581-586
გიორგი ბიბილეიშვილი, ზაზა ჟავაშვილი, ელენე კაკაბაძე, ლეილა თანანაშვილი, მანანა მამულაშვილი, ლიანა ებანოძე - ადგილობრივი და საერთაშორისო საპატენტო ნამუშევრების მოძიება და ანალიზი ყურძნისეული წარმოშობის სპირტიანი სასმელის - ბრენდის - ნანოფილტრაციული პროცესისათვის, ცვალებადი ტემპერატურისა და სიბლანტის პირობებში-----	587-592
გიორგი ბიბილეიშვილი, მანანა მამულაშვილი, თინათინ ბუთხუზი, ელენე კაკაბაძე, ლიანა ებანოძე, ია გოგიბერიძე - ღვინისა და წყლის დამუშავების მემბრანული ფილტრაციის სისტემებიდან ამოღებული ნალექების მიკრობული ორგანიზმები და ბიოდაბინძურების მახასიათებლები-----	593-598
დიმიტრი წვერავა, მიხეილ წვერავა - სონოგრაფიის როლი ფილტვის კარდიოგენული შეშუპების დიაგნოსტიკაში-----	599-606
ირინა ელიავა, რემა ღვამიჩავა, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - კოლორექტული დისპლაზიური პოლიპებისა და ადენოკარცინომების ჰეტეროგენულობა: სიმსივნის მაინფილტრირებელი ლიმფოციტებისა და სიმსივნური მიკროკლასტერების ურთიერთკავშირი, პროგრესიისა და პროგნოზის თავისებურებები-----	607-624

ლაშა ჩინჩალაძე, თამარ სალაძე, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის თავისებურებები სხვადასხვა ტიპის კოლორექტულ პოლიპებში, მისი კავშირი პროლიფერაციულ- აპოპტოზური, ჰორმონული რეცეპტორების ექსპრესიასა და ღეროვან უჯრედულ მახასიათებლებთან-----	625-640
თამარ ყატაშვილი, ირაკლი კობრიძე, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - მელატონინის რეცეპტორების განაწილების თავისებურებები ძუძუს კიბოსა და კიბოსწინარე დაზიანებების სხვადასხვა ჰისტოლოგიურ ტიპებში-----	641-667
მარინა ქურდაძე, გივი მურჯიკნელი - კვანტური სისტემების დეტალური ანალიზი და ხარისხის კონტროლის მნიშვნელობა-----	668-675
ნინო იმერლიშვილი, ზაზა ბოხუა, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - მელატონინის MT1 რეცეპტორის იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის თავისებურებები საკვერცხის ეპითელიურ სიმსივნეებში-----	676-690
ნიკოლოზ შავერდაშვილი, ნანა რაზმაძე, ნინო რატიანი, მზია ქიტოშვილი, ნუცა გუმბერიძე - მიწის სამუშაოთა უსაფრთხოების ამაღლება გრუნტის კედლების გამაგრების ინოვაციური მეთოდების გამოყენებით-----	691-699
ზურაბ ტუსკია - 2024-2025 წლების საქართველოს მაკროეკონომიკური მაჩვენებლების პროგნოზირება, მანქანური სწავლების ჰიბრიდული მოდელის გამოყენებით-----	700-717
სალომე ჭეიშვილი - პომიდვრის შენახვის დინამიკის შეფასება α -ამინომჟავა L-ლეიცინზე დაფუძნებული ფსევდოპროტეინის (ფპ) 7%-იანი საკვები საფარით-----	718-723
Giorgi Patsatsia - The Science behind Wine and Food Pairing-----	724-733
ეკა გეგეშიძე, რუსუდან რუხაძე - საქართველოს საპენსიო რეფორმის მმართველობითი გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები-----	734-750
Maia Tetrushvili, Natia Kakhiashvili, Khatuna Barbakadze, Nato Kakashvili - The Impact of the Russia–Ukraine War on Georgia’s Financial System (2022–2025)–	751-758
ნინო ფუტყარაძე, ლეილა ხარდინა - სინონიმია საზღვაო ტერმინოლოგიაში–	759-764
ელენე მაღლაკელიძე, ზვიად ბობოქაშვილი, ვანო კაკაშვილი - „ნინფა“ გარგარის (<i>Prunus armeniaca</i> L.) ინტროდუცირებული ჯიშის აგრობიოლოგიური შეფასება შიდა ქართლის პირობებში-----	765-780

ბექა დანგაძე, გიორგი დიდავა, გიორგი ბურკაძე, შოთა კეპულაძე - იმუნოფენოტიპური ცვლილებები კუჭის კანცეროგენეზის დროს: CDX2, SOX2, Ki67 და p53-ის ექსპრესიის ნიმუშები კუჭის კიბოსწინარე დაზიანებებსა და ადენოკარცინომაში-----	781-798
Giorgi Patsatsia - Blockchain and Artificial Intelligence for Wine Industry Traceability and Recommendation: Current Trends and Research Gaps-----	799-811
ნატალია ბულია - ფსიქოსოციალური რისკების შეფასების საერთაშორისო მიდგომები ჯანდაცვაში-----	812-819
გიორგი გოროშიძე - მართლმსაჯულების ფსიქოანალიზი და გაუმჯობესების პერსპექტივები (კორუფციული მოტივაციის ტრანსფორმაცია)-----	820-840
გიორგი ჩხაიძე - ჰარმონიკული რიგების მიმდევრობების ვიზუალური ანალიზი ფაზორული და სინუსოიდური დიაგრამების საფუძველზე-----	841-859
თეიმურაზ ლომსიანიძე, რენიკო საკანდელიძე - მეცხრე კლასის ბავშვთა ფიზიკური განვითარების მაჩვენებლების განხილვა-----	860-864
ტატო ზუმბაძე, მაია ოკუჯავა, მანანა ღონღაძე - p-AMPK და TGF-β1 სასიგნალო გზების როლი სამმაგი ინკრეტინული აგონისტებით მიოკარდიუმის ფიბროზის რეგრესში-----	865-872
Tamriko Bulia, Lela Inaishvili, Diana Zhamerashvili, Vera Markhulia, Ioseb Abesadze, Tina Beruchashvili - Cancer Care Inequalities in Low- and Middle- Income Countries: Oncology, Palliative Care, and Public Health Perspectives-----	873-879
ლიკა ლატარია - პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური სერვისების კოლაბორაცია დაავადებათა პრევენციისთვის-----	880-890
მანანა კიკოლაშვილი, ნინო ნიკურაძე, გიგი გორგაძე - მწვავე შეძენილი შეუღლებული ეზოტროპია და ციფრული მოწყობილობების ჭარბი მოხმარება ბავშვებში: სამი კლინიკური შემთხვევის აღწერა-----	891-900
კობა მიქაძე, მაია კერესელიძე, ნინო მილაშვილი, რუსუდან ურიდია, მარიკა ბოკუჩავა, მარინე მაწკეპლაძე - მსხვილფეხა რქოსანი საქონლის დაავადებათა ზოგადი პროფილაქტიკური ვეტერინარულ-ჰიგიენური ლონისძიებების მნიშვნელობა თანამედროვე ეკოლოგიური გამოწვევების რეალობაში-----	901-907

გრუნტში შემღწევი რადარის (GPR) გამოყენება საგზაო სამოსის არადესტრუქციულ კვლევაში

თეიმურაზ არევაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის დოქტორანტი, temuri.arevadze@gmail.com

ანოტაცია

გრუნტში შემღწევი რადარი (GPR – Ground Penetrating Radar) წარმოადგენს საგზაო სამოსის არადესტრუქციული კვლევის თანამედროვე და ეფექტურ მეთოდს, რომელიც ეფუძნება მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღების გამოყენებას. აღნიშნული ტექნოლოგია საშუალებას იძლევა მიღებულ იქნას დეტალური ინფორმაცია გზის საფარის სტრუქტურის შესახებ, მათ შორის ფენების სისქის, მასალის თვისებების, ტენიანობის დონისა და სხვადასხვა ტიპის შიდა დეფექტების არსებობის შესახებ, დესტრუქციული ჩარევის გარეშე.

წარმოდგენილ ნაშრომში განხილულია GPR ტექნოლოგიის გამოყენება საგზაო სამოსის კვლევაში, კანადის 401-ე მაგისტრალის კონკრეტული მონაკვეთის მაგალითზე. კვლევის ფარგლებში განხორციელდა გზის საფარის მდგომარეობის შეფასება როგორც ტრადიციული მეთოდებით (ვიზუალური ინსპექტირება, კერნების ბურღვა და ლაბორატორიული ანალიზი), ასევე გეორადარის გამოყენებით მიღებული მონაცემების საფუძველზე. განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო GPR მონაცემების კალიბრაციას კერნების მონაცემებთან შედარებით, რაც უზრუნველყოფს მიღებული შედეგების სიზუსტის შეფასებას.

კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ GPR ეფექტურად განსაზღვრავს ასფალტისა და ცემენტბეტონის ფენების სისქეს მაღალი სიზუსტით, რაც დადასტურდა ბურღვით მიღებულ მონაცემებთან შედარებით მინიმალური გადახრით. ამასთანავე, ტექნოლოგიამ შესაძლებელი გახადა ისეთი ფარული სტრუქტურული ელემენტებისა და დაზიანებების გამოვლენა, როგორიცაა არმატურა, ბეტონის ნაკერები, ნაწილობრივი და სრული სიღრმის სარემონტო ზონები, აგრეთვე ბზარები, რომლებიც ვიზუალური ინსპექტირებისას არ ფიქსირდება.

მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ GPR წარმოადგენს მნიშვნელოვან ინსტრუმენტს საგზაო სამოსის კომპლექსური შეფასებისთვის, განსაკუთრებით კომპოზიტური სტრუქტურების შემთხვევაში, სადაც ტრადიციული მეთოდები შეზღუდულია. მისი გამოყენება მნიშვნელოვნად ზრდის დიაგნოსტიკის სიზუსტეს, ამცირებს კვლევის ხარჯებს და ხელს უწყობს რეაბილიტაციისა და რეკონსტრუქციის პროცესის ოპტიმალურ დაგეგმვას.

საკვანძო სიტყვები: გრუნტში შემღწევი რადარი (GPR), საგზაო სამოსი, არადესტრუქციული კვლევა, კომპოზიტური საფარი, ბზარები, ფენების სისქე, არმატურა, გზის რეაბილიტაცია

შესავალი

თანამედროვე საგზაო ინფრასტრუქტურის ეფექტური მართვა და ექსპლუატაცია მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული გზის საფარის ტექნიკური მდგომარეობის სწორ და დროულ შეფასებაზე. საგზაო სამოსის დაზიანებები, როგორიცაა ბზარები, დეფორმაციები, შიდა სტრუქტურული ცვლილებები და ფენების სისქის არაერთგვაროვნება, დროთა განმავლობაში იწვევს გზის გამტარუნარიანობის შემცირებას, მოძრაობის უსაფრთხოების გაუარესებასა და სარეაბილიტაციო ხარჯების ზრდას. შესაბამისად, აუცილებელია ისეთი კვლევითი მეთოდების გამოყენება, რომლებიც უზრუნველყოფს გზის საფარის მდგომარეობის სწრაფ, ზუსტ და ეკონომიკურად ეფექტურ შეფასებას.

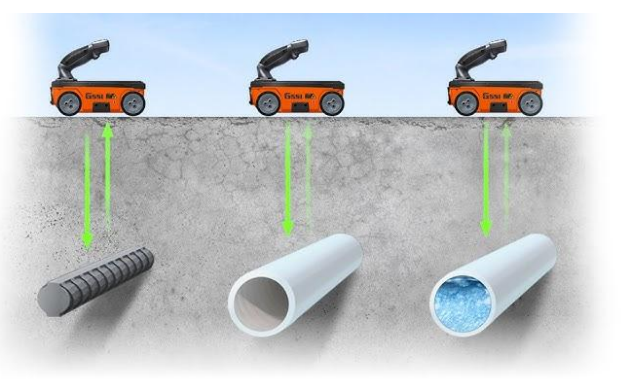
ტრადიციული კვლევის მეთოდები, როგორიცაა კერნების ბურღვა, ლაბორატორიული ანალიზი და ვიზუალური ინსპექტირება, მიუხედავად მათი სიზუსტისა, დაკავშირებულია გარკვეულ შეზღუდვებთან. კერძოდ, ისინი ხშირ შემთხვევაში მოითხოვს საფარის ნაწილობრივ დაზიანებას, არის დროისა და რესურსების მომთხოვნი და არ იძლევა გზის მთლიანი მონაკვეთის უწყვეტი შეფასების შესაძლებლობას. სწორედ ამ გამოწვევების დასაძლევად ფართოდ დაინერგა არადესტრუქციული კვლევის თანამედროვე მეთოდები, რომელთა შორის ერთ-ერთი ყველაზე ეფექტურია გრუნტში შემღწევი რადარი (GPR – Ground Penetrating Radar).

GPR წარმოადგენს გეოფიზიკურ მეთოდს, რომელიც ეფუძნება მაღალი სიხშირის ელექტრომაგნიტური ტალღების გავრცელებას სხვადასხვა დიელექტრიკული თვისებების მქონე მასალებში. ტალღების არეკვლისა და გავრცელების დროის ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია მიწისქვეშა სტრუქტურის დეტალური ვიზუალიზაცია, რაც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს საგზაო სამოსის ფენების სისქე, გამოვლინდეს შიდა

დეფექტები, ტენიანობის ცვლილებები და სხვადასხვა სტრუქტურული ელემენტები, მათ შორის არმატურა და კომუნიკაციები.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება GPR-ის გამოყენებას კომპოზიტური საგზაო სამოსის კვლევისას, სადაც ასფალტისა და ცემენტბეტონის ფენების კომბინაცია ქმნის რთულ სტრუქტურას. ასეთ პირობებში ვიზუალური ინსპექტირება და ლოკალური ბურღვითი კვლევები ხშირად არ იძლევა სრულ სურათს საფარის მდგომარეობის შესახებ. GPR ტექნოლოგია კი უზრუნველყოფს უწყვეტ და დეტალურ ინფორმაციას მთელი მონაკვეთის მასშტაბით, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის დიაგნოსტიკის სიზუსტეს.

მოცემული ნაშრომის მიზანია გრუნტში შემღწევი რადარის გამოყენების ეფექტურობის შეფასება საგზაო სამოსის კვლევაში, კომპოზიტური საფარის პირობებში. კვლევა განხორციელდა კანადის 401-ე მაგისტრალის კონკრეტულ მონაკვეთზე, სადაც GPR მონაცემები შედარებულ იქნა ტრადიციული მეთოდებით მიღებულ შედეგებთან. განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო ფენების სისქის განსაზღვრის სიზუსტეს, ფარული დაზიანებების იდენტიფიცირებასა და GPR ტექნოლოგიის პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობებს საგზაო ინფრასტრუქტურის მართვაში.



ნახ. 1. გრუნტში შემღწევი რადარი (GPR - Ground Penetrating Radar)

კვლევის ობიექტი

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს კანადის 401-ე ავტომაგისტრალის 1 კმ სიგრძის მონაკვეთი (კმ 11+800–დან 12+800–მდე), რომელიც შეირჩა გრუნტში შემღწევი რადარის (GPR) გამოყენების ეფექტურობის შესაფასებლად. აღნიშნული მონაკვეთი ხასიათდება კომპოზიტური საგზაო სამოსით, რაც ქმნის ხელსაყრელ პირობებს როგორც ტრადიციული, ასევე არადესტრუქციული კვლევის მეთოდების შედარებისთვის.

საგზაო სამოსის სტრუქტურა შედგება ასფალტბეტონის ზედა ფენებისა და არმირებული ცემენტბეტონის საფუძვლისგან, რომლის ქვემოთ განლაგებულია მარცვლოვანი ფენა. მსგავსი კომპოზიტური სტრუქტურა ხშირად გამოიყენება მაღალი დატვირთვის მქონე გზებზე და გამოირჩევა რთული შიდა სტრუქტურით, რაც ართულებს მისი მდგომარეობის შეფასებას მხოლოდ ვიზუალური მეთოდებით.

კვლევის მონაკვეთი შეირჩა ასევე იმის გამო, რომ მასზე არსებობდა სხვადასხვა ტიპის დაზიანებები, მათ შორის განივი და გრძივი ბზარები, აგრეთვე წარსულში შესრულებული სარემონტო სამუშაოების კვალი. აღნიშნული გარემოებები უზრუნველყოფს GPR ტექნოლოგიის შესაძლებლობების სრულფასოვან შეფასებას, განსაკუთრებით ფარული დეფექტებისა და სტრუქტურული თავისებურებების გამოვლენის კუთხით.

კვლევის ფარგლებში მონაკვეთში კერნები ამოღებული იყო რეგულარული ინტერვალებით, რაც გამოყენებულ იქნა ფენების სისქის განსაზღვრისა და GPR მონაცემების კალიბრაციისთვის.

კვლევის მეთოდოლოგია

კვლევის ფარგლებში გამოყენებულ იქნა როგორც ტრადიციული, ასევე არადესტრუქციული კვლევის მეთოდები, რაც უზრუნველყოფდა საგზაო სამოსის სტრუქტურის კომპლექსურ შეფასებას. კვლევა განხორციელდა კანადის 401-ე მაგისტრალის 1 კმ სიგრძის მონაკვეთზე (კმ 11+800–დან 12+800-მდე), რომელიც ხასიათდება კომპოზიტური საგზაო სამოსით.

- **საველე და ლაბორატორიული კვლევები**

კვლევის პირველ ეტაპზე განხორციელდა საგზაო სამოსის მდგომარეობის შეფასება ტრადიციული მეთოდების გამოყენებით, რაც მოიცავდა:

- ვიზუალურ ინსპექტირებას ზედაპირზე არსებული დაზიანებების ტიპის, სიმძიმისა და გავრცელების განსაზღვრის მიზნით;
- გეოტექნიკურ კვლევას, რომელიც მოიცავდა კერნების ამოღებას და ბურღვას საგზაო სამოსის სხვადასხვა მონაკვეთზე;
- ლაბორატორიულ ანალიზს, ამოღებული ნიმუშების კლასიფიკაციისა და მასალის მახასიათებლების დასადგენად.

კერნები ამოღებული იყო დაახლოებით 50 მეტრიანი ინტერვალებით, რაც გამოყენებულ იქნა როგორც ფენების სისქის განსაზღვრისთვის, ასევე GPR მონაცემების კალიბრაციისთვის.

- **GPR კვლევის მეთოდი**

არადესტრუქციული კვლევის მიზნით გამოყენებულ იქნა გრუნტში შემღწევი რადარი (GPR), კერძოდ **Noggin 1000 SmartCart** სისტემა, რომელიც მუშაობს 1000 MHz სიხშირეზე. აღნიშნული სიხშირე უზრუნველყოფს მაღალი გარჩევადობის გამოსახულებას და საკმარის სიღრმისეულ შეღწევადობას საგზაო სამოსის კვლევისთვის.

GPR მონაცემები შეგროვდა მოძრაობის მესამე ზოლის გარე საბურავის კვალზე, მონაკვეთზე 11+800–დან 12+700-მდე, ყოველ 0.01 მ ინტერვალით. მონაცემთა შეგროვების პროცესში გამოიყენებოდა სპეციალური საორიენტაციო მარკერები, რომლებიც აღნიშნავდა:

- ბზარების მდებარეობას
- კერნების ამოღების წერტილებს
- სხვა მნიშვნელოვან ზედაპირულ მახასიათებლებს

აღნიშნული მარკერები უზრუნველყოფდა GPR მონაცემების კორელაციას საველე დაკვირვებებსა და ლაბორატორიულ შედეგებთან.

- **მონაცემთა დამუშავება და ანალიზი**

GPR მონაცემების ინტერპრეტაცია განხორციელდა სპეციალიზებული პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით, რომლის მეშვეობითაც მოხდა:

- ასფალტისა და ცემენტბეტონის ფენების საზღვრების იდენტიფიცირება;
- ჰორიზონტების სიღრმის განსაზღვრა;
- ჰიპერბოლური ანომალიების ანალიზი (არმატურისა და სხვა ელემენტების იდენტიფიკაციისთვის);
- ბზარებისა და ნაკერების ლოკალიზაცია.

ფენების სიღრმის განსაზღვრა ეფუძნებოდა ელექტრომაგნიტური ტალღის გავრცელების სიჩქარის განსაზღვრას, რომელიც დადგინდა კერნების მონაცემების გამოყენებით. კვლევის ფარგლებში მიღებული საშუალო სიჩქარე შეადგენდა:

- 0.108 მ/ნწ — ასფალტის ფენისთვის
- 0.100 მ/ნწ — ცემენტბეტონის ფენისთვის

აღნიშნული პარამეტრები გამოყენებულ იქნა GPR მონაცემების კალიბრაციისთვის და სიღრმის ზუსტი განსაზღვრისთვის.

- **მეთოდების კომბინირებული გამოყენება**

კვლევის მნიშვნელოვანი ნაწილი იყო ტრადიციული და GPR მეთოდების კომბინირებული გამოყენება. კერნების ბურღვით მიღებული მონაცემები გამოყენებულ იქნა:

- GPR სიგნალების კალიბრაციისთვის
- ფენების სისქის სიზუსტის შესაფასებლად
- GPR ინტერპრეტაციის ვალიდაციისთვის

ამ მიდგომამ შესაძლებელი გახადა კვლევის სანდოობის გაზრდა და სხვადასხვა მეთოდით მიღებული შედეგების ურთიერთშედარება.

შედეგები

კვლევის ფარგლებში მიღებული შედეგები ეფუძნება როგორც გრუნტში შემღწევი რადარის (GPR), ასევე ტრადიციული საველე კვლევების (კერნების ბურღვა) მონაცემებს. მიღებული მონაცემების ანალიზმა შესაძლებელი გახადა საგზაო სამოსის სტრუქტურის დეტალური შეფასება, ფენების სისქის განსაზღვრა და ფარული დეფექტების იდენტიფიცირება.

• ფენების სისქე და სტრუქტურა

საველე კვლევებისა და კერნების ანალიზის საფუძველზე დადგინდა, რომ საგზაო სამოსი წარმოადგენს კომპოზიტურ სტრუქტურას, რომელიც შედგება ასფალტბეტონის, ცემენტბეტონისა და მარცვლოვანი საფუძვლის ფენებისგან.

მიღებული შედეგების მიხედვით:

- ასფალტის ფენის სისქე მერყეობდა **230–365 მმ** ფარგლებში;
- ცემენტბეტონის ფენის სისქე — **210–230 მმ** (საშუალოდ ~215 მმ);
- მარცვლოვანი საფუძვლის სისქე — **245–1020 მმ**.

ცხრილი 1. საგზაო სამოსის ფენების სისქეები კერნების მიხედვით

მდებარეობა	ასფალტბეტონის სისქე მმ.	ცემენტბეტონის სისქე მმ.	მარცვლოვანი ფენის სისქე მმ.	შენიშვნა
11+800	240	220	460	არმატურის სიღრმე 320 მმ
11+850	265	215	330	არმატურის სიღრმე 350 მმ
11+900	240	220	290	არმატურის სიღრმე 320 მმ
11+950	240	215	245	არმატურის სიღრმე 300 მმ
12+000	260	220	1,020	არმატურის სიღრმე 350 მმ
12+050	365	-	535	
12+100	240	220	400	არმატურის სიღრმე 310 მმ
12+150	270	220	500	არმატურის სიღრმე 410 მმ
12+200	275	215	450	არმატურის სიღრმე 345 მმ
12+250	310	215	625	არმატურის სიღრმე 385 მმ
12+300	255	215	500	არმატურის სიღრმე 400 მმ
12+350	240	215	445	არმატურის სიღრმე 325 მმ
12+400	250	210	640	არმატურის სიღრმე 365 მმ
12+450	250	215	445	არმატურის სიღრმე 350 მმ
12+500	230	230	420	არმატურის სიღრმე 320 მმ
12+550	240	215	445	არმატურის სიღრმე 315 მმ
12+600	245	210	405	არმატურის სიღრმე 340 მმ
12+650	260	215	365	არმატურის სიღრმე 410 მმ
12+700	250	210	350	არმატურის სიღრმე 305 მმ
საშუალო	245	205	445	

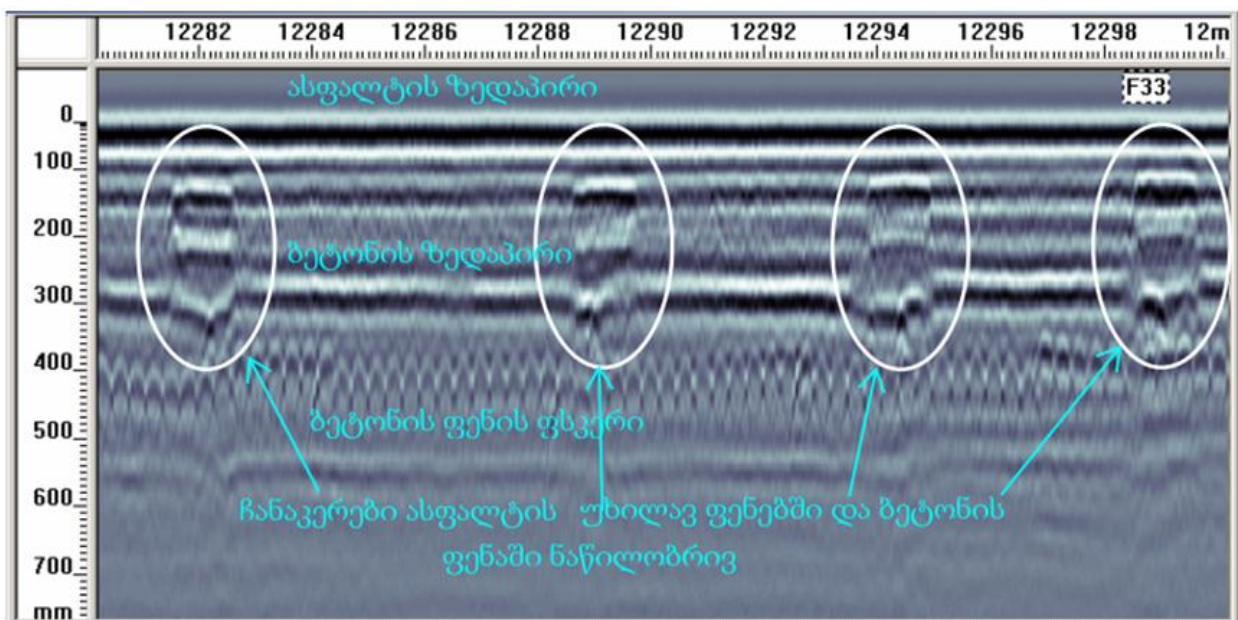
GPR მონაცემებით განსაზღვრული ფენების სისქეები მაღალი სიზუსტით დაემთხვა კერნების მონაცემებს. საშუალო გადახრა შეადგენდა:

- ასფალტის ფენისთვის — 3.1 მმ;
- ცემენტბეტონის ფენისთვის — 3.5 მმ.
- ფარული დეფექტებისა და სარემონტო ზონების გამოვლენა

GPR კვლევამ გამოავლინა მრავალი ისეთი სტრუქტურული თავისებურება, რომელიც ვიზუალური ინსპექტირებისას არ ფიქსირდებოდა. მათ შორის:

- დაფარული სარემონტო ზონები (ჩანაკერები);
- ნაწილობრივი და სრული სიღრმის შეკეთებები;
- ბზარების გავრცელება ქვედა ფენებში.

100-მეტრიან მონაკვეთში იდენტიფიცირდა 17 სარემონტო ზონა, რომელთა საშუალო სიგრძე შეადგენდა დაახლოებით 1 მ-ს. აღნიშნული ზონების უმეტესობა ზედაპირზე არ იყო ხილული და გამოვლინდა მხოლოდ GPR მონაცემების ანალიზით.



ნახ. 2. დაფარული სარემონტო ზონების იდენტიფიკაცია GPR მონაცემებით

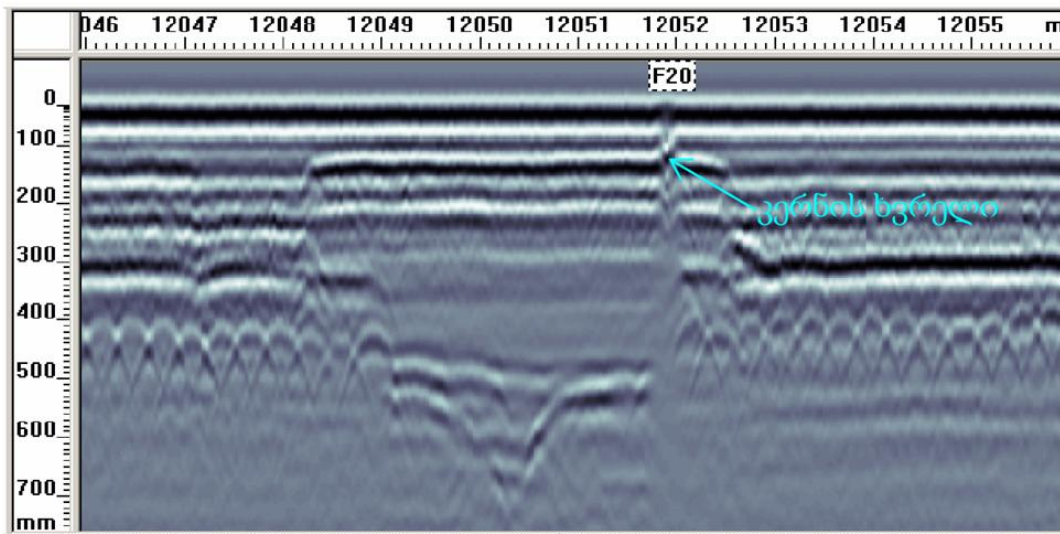
ერთ-ერთ მონაკვეთში (კმ 12+050) დაფიქსირდა სრული სიღრმის შეკეთება, სადაც ცემენტბეტონის ფენა მთლიანად იყო ამოღებული, რაც დადასტურდა როგორც კერნის ბურღვით, ასევე GPR გამოსახულებით.

არმირების დეტალები

GPR მონაცემებში მკაფიოდ ფიქსირდებოდა ფოლადის არმატურის მიერ წარმოქმნილი დიფრაქციული ჰიპერბოლები, რაც საშუალებას იძლეოდა მისი მდებარეობისა და სიღრმის განსაზღვრას.

მიღებული შედეგების მიხედვით:

- არმატურის საშუალო სიღრმე GPR-ით — **0.37 მ**;
- კერნების მიხედვით — **0.35 მ**;
- საშუალო სხვაობა — დაახლოებით **10 მმ**.



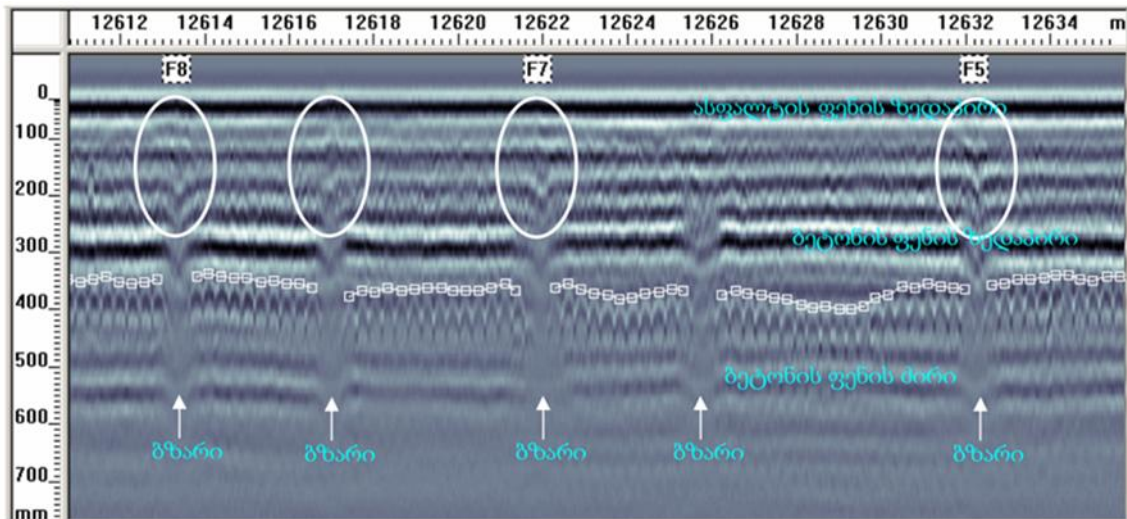
ნახ. 3. არმატურის ამსახველი ჰიპერბოლური ანომალიები GPR გამოსახულებაში

ბზარებისა და ნაკერების იდენტიფიკაცია

GPR მონაცემების ანალიზმა შესაძლებელი გახადა ბზარებისა და ნაკერების იდენტიფიცირება ცემენტბეტონის ფენაში. აღნიშნული მახასიათებლები გამოვლინდა:

- ჰორიზონტების წყვეტებით;
- სიგნალის დეფორმაციით;
- გაფანტული ჰიპერბოლური ანომალიებით.

ზოგიერთ შემთხვევაში დაფიქსირდა ასფალტის ფენაში არსებული რეფლექტორული ბზარები, რაც მიუთითებს ქვედა ბეტონის ფენაში არსებული ბზარების ზემოქმედებაზე.



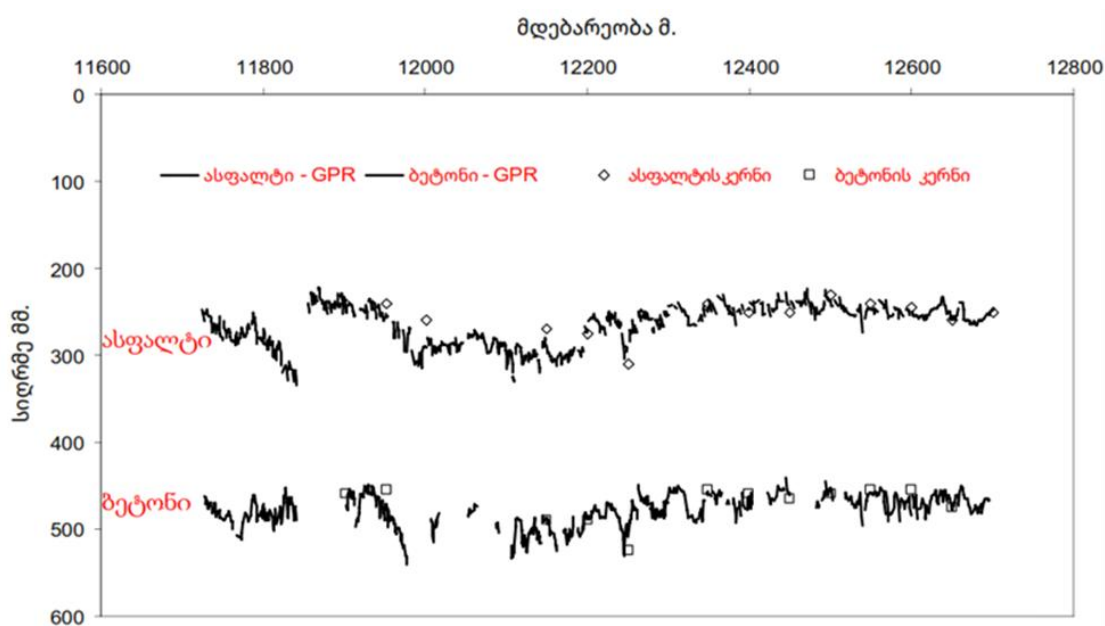
ნახ. 4. ბზარებისა და ნაკერების გამოვლენა GPR მონაცემებში

GPR მონაცემების ვიზუალიზაცია

GPR განივკვეთების გამოსახულებებში გამოიკვეთა სამი ძირითადი ჰორიზონტი:

- ასფალტის ზედაპირი;
- ცემენტბეტონის ფენის ზედა საზღვარი;
- ცემენტბეტონის ფენის ქვედა საზღვარი.

ამასთანავე, არმატურის ელემენტები წარმოქმნიდა დამახასიათებელ ჰიპერბოლურ სიგნალებს, რაც გამოიყენებოდა როგორც მათი იდენტიფიკაციისთვის, ასევე სიღრმის განსაზღვრისთვის.



ნახ. 5. GPR განივი კვეთის გამოსახულება საგზაო სამოსის სტრუქტურით

განხილვა

მიღებული შედეგები ნათლად მიუთითებს, რომ გრუნტში შემღწევი რადარი (GPR) წარმოადგენს ეფექტურ და სანდო ინსტრუმენტს საგზაო სამოსის კომპლექსური კვლევისთვის, განსაკუთრებით კომპოზიტური სტრუქტურების შემთხვევაში. კვლევის ფარგლებში მიღებული მონაცემების ანალიზმა აჩვენა, რომ GPR-ის გამოყენებით შესაძლებელია ისეთი სტრუქტურული მახასიათებლებისა და დეფექტების გამოვლენა, რომლებიც ტრადიციული მეთოდებით ან ვიზუალური ინსპექტირებით არ იდენტიფიცირდება.

ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი შედეგი იყო GPR მონაცემების მაღალი თანხვედრა კერნების ბურღვით მიღებულ მონაცემებთან. ფენების სისქის განსაზღვრისას დაფიქსირებული მცირე გადახრა (რამდენიმე მილიმეტრის ფარგლებში) ადასტურებს, რომ სწორად კალიბრირებული GPR უზრუნველყოფს მაღალი სიზუსტის შედეგებს. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია პრაქტიკული გამოყენებისას, რადგან ამცირებს დესტრუქციული კვლევების საჭიროებას და შესაბამისად - კვლევის ხარჯებსა და დროს.

კვლევამ ასევე ცხადყო GPR-ის მნიშვნელოვანი უპირატესობა ფარული დეფექტების გამოვლენაში. გამოვლენილი სარემონტო ზონების დიდი ნაწილი ვიზუალურად არ იყო იდენტიფიცირებადი, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ მხოლოდ ზედაპირული ინსპექტირება ვერ ასახავს საგზაო სამოსის რეალურ მდგომარეობას. GPR-ის საშუალებით შესაძლებელი გახდა როგორც ნაწილობრივი, ასევე სრული სიღრმის შეკეთებების იდენტიფიცირება, რაც კრიტიკულია გზის რეაბილიტაციის სწორად დაგეგმვისთვის.

არმირების ელემენტების იდენტიფიცირება და მათი სიღრმის განსაზღვრა კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი შედეგია. მიღებული მონაცემების თანხვედრა კერნების შედეგებთან მიუთითებს, რომ GPR ეფექტურად აფიქსირებს მეტალურ ელემენტებს და შეიძლება გამოყენებულ იქნას ბეტონის ფენის არსებობის ინდიკატორადაც. აღნიშნული განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია კომპოზიტური საფარების კვლევისას, სადაც ფენების სტრუქტურა რთულია და მათი ვიზუალური შეფასება შეზღუდულია.

ბზარებისა და ნაკერების იდენტიფიკაციამ აჩვენა, რომ GPR საშუალებას იძლევა შეფასდეს არა მხოლოდ არსებული დაზიანებები, არამედ პოტენციური პრობლემური ზონებიც. რეფლექტორული ბზარების დაფიქსირება მიუთითებს ქვედა ფენების დეფორმაციაზე და წარმოადგენს ადრეულ სიგნალს მომავალი დაზიანებების შესახებ. ეს შესაძლებლობა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია პრევენციული ტექნიკური მომსახურების დაგეგმვისთვის.

მიუხედავად ზემოთ აღნიშნული უპირატესობებისა, კვლევამ აჩვენა გარკვეული შეზღუდვებიც. ზოგიერთ შემთხვევაში ბეტონის ფენის ქვედა საზღვარი მკაფიოდ არ იკითხებოდა GPR გამოსახულებაში, რაც დაკავშირებულია მასალების დიელექტრიკული

თვისებების დაბალ კონტრასტთან. აღნიშნული გარემოება შეიძლება გავლენას ახდენდეს ფენების სისქის განსაზღვრის სიზუსტეზე, განსაკუთრებით ღრმა ფენებში.

საერთო ჯამში, მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ GPR წარმოადგენს ძლიერ ინსტრუმენტს საგზაო სამოსის დიაგნოსტიკისთვის და მისი გამოყენება მნიშვნელოვნად ზრდის კვლევის ეფექტურობას. ტრადიციულ მეთოდებთან კომბინაციაში GPR უზრუნველყოფს უფრო სრულ და სანდო სურათს გზის საფარის მდგომარეობის შესახებ, რაც აუცილებელია ინფრასტრუქტურის მართვისა და რეაბილიტაციის გადაწყვეტილებების მისაღებად.

დასკვნა

წარმოდგენილ კვლევაში შეფასდა გრუნტში შემღწევი რადარის (GPR) გამოყენების ეფექტურობა კომპოზიტური საგზაო სამოსის კვლევაში, კანადის 401-ე მაგისტრალის მაგალითზე. მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ GPR წარმოადგენს მაღალეფექტურ არადესტრუქციულ მეთოდს, რომელიც უზრუნველყოფს საგზაო სამოსის სტრუქტურის დეტალურ და სანდო ანალიზს.

კვლევის შედეგად დადგინდა, რომ GPR მაღალი სიზუსტით განსაზღვრავს ასფალტისა და ცემენტბეტონის ფენების სისქეს, რაც დადასტურდა კერნების ბურღვით მიღებულ მონაცემებთან შედარებით. ასევე, ტექნოლოგიამ შესაძლებელი გახადა ფარული დეფექტების, სარემონტო ზონების, ბზარებისა და არმირების ელემენტების ეფექტური იდენტიფიცირება, რომლებიც ვიზუალური ინსპექტირებისას არ ფიქსირდება.

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია GPR-ის შესაძლებლობა გამოავლინოს ისეთი სტრუქტურული ცვლილებები, რომლებიც დაკავშირებულია როგორც წარსულში ჩატარებულ სარემონტო სამუშაოებთან, ასევე პოტენციურ მომავალ დაზიანებებთან. აღნიშნული მნიშვნელოვნად ზრდის გზის საფარის მდგომარეობის შეფასების სიზუსტეს და ქმნის საფუძველს რეაბილიტაციისა და ტექნიკური მომსახურების ოპტიმალური დაგეგმვისთვის.

მიუხედავად გარკვეული შეზღუდვებისა, რომლებიც დაკავშირებულია მასალების ფიზიკურ თვისებებთან და სიგნალის ინტერპრეტაციის სირთულეებთან, GPR-ის გამოყენება ტრადიციულ მეთოდებთან კომბინაციაში უზრუნველყოფს მაქსიმალურად სრულყოფილ და სანდო შედეგებს.

საერთო ჯამში, გრუნტში შემღწევი რადარი წარმოადგენს პერსპექტიულ და პრაქტიკულად მნიშვნელოვან ინსტრუმენტს საგზაო ინფრასტრუქტურის მართვის სფეროში, რომლის გამოყენება მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს დიაგნოსტიკის ხარისხს,

ამცირებს კვლევის ხარჯებს და ხელს უწყობს მდგრადი და ეფექტური საინჟინრო გადაწყვეტილებების მიღებას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Daniels, David J. *Ground Penetrating Radar*. 2nd ed. London: Institution of Engineering and Technology, 2004.
2. Saarenketo, Timo, and Tom Scullion. "Road Evaluation with Ground Penetrating Radar." *Journal of Applied Geophysics* 43, no. 2–4 (2000): 119–138.
3. ASTM International. *ASTM D6432-11: Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.
4. Al-Qadi, Imad L., and Samuel Lahouar. "Measuring Layer Thicknesses with GPR – Theory to Practice." *Construction and Building Materials* 19, no. 10 (2005): 763–772.
5. Hugenschmidt, Jürgen. "Road Condition Evaluation Using Ground Penetrating Radar." *Journal of Applied Geophysics* 43, no. 2–4 (2000): 105–117.
6. Scullion, Tom, and Timo Saarenketo. *Ground Penetrating Radar Applications in Pavement Engineering*. Federal Highway Administration Report, 1998.
7. Wei, Shun, et al. "Study on Ground-Penetrating Radar Response and Void Detection in Concrete Pavements." *Sensors* 25, no. 18 (2025).
8. Xiong, Xuetao, et al. "Evaluation of Asphalt Pavement Internal Distresses Using Three-Dimensional Ground-Penetrating Radar." *International Journal of Pavement Research and Technology* (2024).
9. Xie, Shuo, et al. "GPR Feature Enhancement of Asphalt Pavement Hidden Defects Based on Image Processing Methods." *Sensors* (2025).
10. ალექსი ბურდულაძე, თეიმურაზ არევაძე. საგზაო სამოსის მდგომარეობის შეფასება და მდგომარეობის ინდექსის გამოყენება საგზაო ქსელის კვლევის პროცესში. *Georgian Scientists*. Vol. 8 Issue 1, 2026. <https://doi.org/10.52340/gs>. 2026. 08.01.19

Application of Ground Penetrating Radar (GPR) in Non-Destructive Pavement Investigation

Teimuraz Arevadze

Georgian Technical University PhD Student

Abstract

Ground Penetrating Radar (GPR) is a modern and effective non-destructive method for pavement investigation, based on the use of high-frequency electromagnetic waves. This technology enables the acquisition of detailed information about pavement structure, including layer thickness, material properties, moisture content, and the presence of various types of internal defects, without the need for destructive intervention.

This paper presents the application of GPR technology for pavement evaluation, using a case study from a selected section of Highway 401 in Canada. The study involved an assessment of pavement condition using both traditional methods (visual inspection, core drilling, and laboratory analysis) and data obtained from GPR measurements. Particular attention was given to the calibration of GPR data against core sample results, ensuring the accuracy and reliability of the obtained measurements.

The results demonstrated that GPR can accurately determine the thickness of asphalt and concrete layers, with minimal deviation when compared to data obtained from core drilling. In addition, the technology proved effective in identifying hidden structural elements and defects, such as reinforcement, concrete joints, partial and full-depth repairs, as well as cracks that are not visible during surface inspections.

The findings indicate that GPR is a valuable tool for comprehensive pavement assessment, particularly in the case of composite structures where traditional methods are limited. Its application significantly improves diagnostic accuracy, reduces investigation costs, and supports the optimal planning of rehabilitation and reconstruction processes.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR), pavement, non-destructive testing, composite pavement, cracks, layer thickness, reinforcement, pavement rehabilitation

ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება და დასაქმებულთა აღქმული შესრულება: ავტონომიისა და სამუშაოს წნეხის როლი

ლამარა სუხიტაშვილი¹; ნუცა ვახტანგაძე²

¹ფსიქოლოგიის დოქტორი, ²ფსიქოლოგიის მაგისტრი; ივ. ჯავახიშვილის სახელობის
თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ანოტაცია

წინამდებარე კვლევის მიზანია ორგანიზაციულ კონტექსტში დასაქმებულების მიერ ხელოვნური ინტელექტის (AI) გამოყენებასა და მათ მიერ აღქმულ შესრულებას შორის კავშირის შესწავლა. სამუშაო რესურსებისა და მოთხოვნების (JD-R) თეორიის ჩარჩოზე დაყრდნობით, ნაშრომი აანალიზებს ავტონომიის, როგორც სამუშაო რესურსის, და სამუშაოს წნეხის, როგორც სამუშაო მოთხოვნის როლს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებისა და შესრულების კავშირში. ხელოვნური ინტელექტის კონსტრუქტი შედარებით ახალია ორგანიზაციულ ფსიქოლოგიაში და მისი კვლევა საკმაოდ აქტუალურია, ვინაიდან არსებული კვლევები ცხადყოფს დასაქმებულების სამუშაოს შესრულებაზე მასშტაბურ გავლენას.

ონლაინ გამოკითხვის მეთოდით ჩატარებულ კვლევაში მონაწილეობა სხვადასხვა სექტორში და თანამდებობაზე დასაქმებულმა 178-მა პირმა მიიღო. კვლევის შედეგად დადგინდა, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება პირდაპირ არ მოქმედებს დასაქმებულის სამუშაოს შესრულებაზე. ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ირიბად უკავშირდება სამუშაოს შესრულებას ავტონომიის გზით: ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ზრდის დასაქმებულის დამოუკიდებლად მოქმედების უფლებამოსილებას, რაც თავის მხრივ, აუმჯობესებს შესრულების აღქმას. გარდა ამისა, დადასტურდა, რომ სამუშაოს წნეხის მაღალი დონე აძლიერებს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირს. კერძოდ, მაღალი დატვირთვის პირობებში ტექნოლოგია უფრო ეფექტურ რესურსად იქცევა შესრულების გასაუმჯობესებლად. ამგვარად, ნაშრომი ხაზს უსვამს, რომ ხელოვნური ინტელექტის დანერგვა ავტომატურად არ იწვევს ეფექტიანობის ზრდას, არამედ დამოკიდებულია სამუშაოსთან დაკავშირებულ ფაქტორებზე. პრაქტიკული თვალსაზრისით, ორგანიზაციებმა ყურადღება უნდა

გამახვილონ სამუშაო დიზაინზე, კერძოდ, თანამშრომელთა ავტონომიის ზრდაზე, რათა ხელოვნური ინტელექტის ტექნოლოგია ეფექტურ სამუშაო რესურსად გარდაიქმნას.

საკვანძო სიტყვები: ხელოვნური ინტელექტი (AI), ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება, აღქმული შესრულება, ავტონომია, სამუშაოს წნეხი, JD–R თეორია.

შესავალი

XXI საუკუნეში ხელოვნური ინტელექტი¹ (AI) ტრანსფორმაციულ ძალად ჩამოყალიბდა, რომელიც დინამიკურად ცვლის ინდუსტრიებს, მმართველობის სტრუქტურებსა და საზოგადოებრივ ცხოვრებას. მეცნიერთა ნაწილი ხელოვნური ინტელექტის გამოჩენით გამოწვეულ ცვლილებებს მეოთხე ინდუსტრიულ რევოლუციად მიიჩნევს (Soh & Connolly, 2020; Xu et al., 2018). 2022 წლიდან გენერაციული ხელოვნური ინტელექტის² ბოლოდროინდელმა განვითარებამ ეს ტენდენცია უპრეცედენტო ტემპით დააჩქარა (Sengar et al., 2024).

ხელოვნური ინტელექტი მიზნად ისახავს მანქანებმა იაზროვნონ ადამიანებისვით, თუმცა გადააჭარბონ მათ მუშაობის ხარისხითა და სისწრაფით (Misselhorn, 2018). ის მანქანებს აღჭურავს უნარით, ავტონომიურად შეაგროვონ და დაამუშაონ ინფორმაცია გარემოდან გადაწყვეტილებების მისაღებად, პრობლემების გადასაჭრელად და სხვა ისეთი ქმედებების შესასრულებლად, რომლებიც ადრე ადამიანურ აზროვნებას მოითხოვდა (Von Krogh, 2018).

თანამედროვე სამყაროში ციფრული ტექნოლოგიები ორგანიზაციული ეფექტიანობის, ინოვაციისა და კონკურენტუნარიანობის შენარჩუნებისთვის ცენტრალურ როლს იკავებენ. ამდენად, სამუშაო ადგილები ტექნოლოგიებზე ორიენტირებულ გარემოდ გარდაიქმნება (Valtonen et al. 2025). ხელოვნური ინტელექტი ხდება „ახალი ნორმა“ როგორც წარმოების, ისე მომსახურების სფეროებში (Müller et al., 2021). McKinsey & Company-ის 2025 წლის გლობალური ანგარიშის მიხედვით, რომელიც 105 ქვეყანაში შეგროვებულ მონაცემებს აჯამებს, ორგანიზაციების 88%-მა ხელოვნური ინტელექტი სულ მცირე ერთ ბიზნეს ფუნქციაში მაინც დანერგეს (McKinsey, 2025).

სამუშაო გარემოში ხელოვნური ინტელექტის დანერგვა სამუშაო პროცესზე, მის ბუნებასა და შინაარსზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს (Zirar 2023; Zhang & Jin, 2023). საწარმოო პროცესში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებას „ავტომატიზაცია“ ეწოდება და განისაზღვრება, როგორც „ახალი ტექნოლოგიების შემუშავება და დანერგვა, რომელიც

¹ „ქოლგა ტერმინი აღგორითმებზე დაფუძნებული ტექნოლოგიების ფართო სპექტრისთვის, რომლებიც წვეტენ რთულ ამოცანებს ისეთი ფუნქციების შესრულებით, რომლებიც ადრე ადამიანის აზროვნებას მოითხოვდა. ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებით მიღებული გადაწყვეტილებები შეიძლება იყოს სრულად ავტომატიზირებული ან ხორციელდებოდეს ადამიანის ჩართულობით“ (Leslie & Briggs, 2021).

² გენერაციული ხელოვნური ინტელექტი (GenAI) მოიცავს ისეთ სისტემებს, რომლებსაც გენერაციული მოდელების მეშვეობით ტექსტის, გამოსახულების ან სხვადასხვა სახის ახალი პროდუქტის შექმნა შეუძლიათ. ეს მოდელები შეისწავლიან სასწავლო მონაცემებში არსებულ კანონზომიერებებსა და სტრუქტურებს, რის საფუძველზეც ქმნიან ახალ მონაცემებს მსგავსი თვისებებითა და მახასიათებლებით (Sengar et al., 2024).

საშუალებას აძლევს ტექნოლოგიას ჩაანაცვლოს მთელი რიგი შრომითი ამოცანები“ (Acemoglu & Restrepo, 2019). წარმოების პროცესებში ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია უზრუნველყოფს წარმოების ხარჯების შემცირებას, რესურსების გამოყენების ოპტიმიზაციას, ნარჩენების მინიმიზაციასა და ახალი მომხმარებლების მოზიდვას. ის გამოწვევების ეფექტურად გადაჭრის, ხარისხისა და ინოვაციების გაუმჯობესების მთავარ ინსტრუმენტად იქცა (Kuligin et al., 2025).

ხელოვნური ინტელექტი ორგანიზაციებს და დასაქმებულებს ახალი რეალობისა და გამოწვევების წინაშე აყენებს. ორგანიზაციაში ხელოვნური ინტელექტის ტექნოლოგიის დანერგვა ცვლის ისეთ ფაქტორებს, როგორიცაა სამუშაოს მოთხოვნები, სამუშაო დიზაინი და სამუშაო პროცესები (Jia et al., 2024; Tang et al., 2022), თანამშრომლების კოგნიტური პროცესები და ქცევითი პატერნები (Raisch & Krakowski, 2021). სამუშაო პროცესში ხელოვნური ინტელექტის დანერგვა ხელახლა განსაზღვრავს დასაქმებულებსა და მათ სამუშაოს შორის ურთიერთქმედებას, ამ სამუშაოს შესრულების წესს და მის შესასრულებლად საჭირო კომპეტენციებს (Ban et al., 2024; Wang et al., 2023). ადრე თუ ორგანიზაციები ფოკუსირებული იყვნენ თანამშრომლების პროფესიულ ცოდნაზე, კომუნიკაციისა და ლიდერობის უნარებზე, დღეს ხელოვნური ინტელექტის ტექნოლოგიის ფართოდ გამოყენებასთან ერთად, სამუშაოსთვის საჭირო უნარ-ჩვევები ფუნდამენტურ ცვლილებებს განიცდის (Chowdhury et al. 2022). თანამედროვე სამყაროში არსებობს მოლოდინი, რომ თანამშრომლებს უნდა ჰქონდეთ მონაცემთა ანალიზის პლატფორმებთან ადაპტაციისა და გამოყენების (Cetindamar et al. 2024), ხელოვნური ინტელექტის ტექნოლოგიების (რობოტები, ავტომატიზებული პროცესები და ინტელექტუალური ასისტენტები) უწყვეტი სწავლისა და გამოყენების უნარები (Wang, 2023). ხელოვნური ინტელექტის დანერგვის მასშტაბების ზრდასთან ერთად, თანამშრომლისთვის სულ უფრო მნიშვნელოვანი ხდება ინოვაციური აზროვნებისა და ადამიანი-მანქანის თანამშრომლობის უნარები, რაც თანამშრომლების როლებს ხელახლა განსაზღვრავს (Kong et al. 2021).

ბოლო პერიოდში ხელოვნური ინტელექტი სწრაფად ინტეგრირდა სამუშაო პროცესში, რამაც სხვადასხვა მხარეს შორის მისი გავლენების შესახებ ცხარე კამათი გამოიწვია. ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების მხარდამჭერები ამტკიცებენ, რომ ხელოვნური ინტელექტი ზრდის თანამშრომლების პროდუქტულობას და ამცირებს სამუშაო დატვირთვას. მოწინააღმდეგეები კი შიშობენ, რომ ის უკავშირდება ხელოვნური ინტელექტის სტრესს და ამცირებს თანამშრომელთა ფსიქოლოგიურ კარგად ყოფნას (Chuang et al., 2025).

ემპირიული კვლევებით დასტურდება, რომ ერთი მხრივ, ხელოვნური ინტელექტი დაკავშირებულია ხელოვნური ინტელექტის სტრესთან, რომელმაც თავის მხრივ შეიძლება შეამციროს სამუშაოში ჩართულობა და კარიერული კმაყოფილება (Brougham & Haar, 2018), საფრთხე შეუქმნას დასაქმებულთა ფსიქოლოგიურ კარგად ყოფნას (Henkel et al., 2020), გაზარდოს სამსახურიდან წასვლის განზრახვა (Li et al., 2019), სამუშაოზე

დაუცველობა (Yam et al., 2023). მეორე მხრივ, ხელოვნური ინტელექტის ტექნოლოგია ზრდის სამუშაო ეფექტურობას, ამცირებს რუტინულ დავალებებს და ზრდის სამუშაოს ხარისხს (Klenert et al., 2023). ხელოვნური ინტელექტი უზრუნველყოფს ინდივიდზე მორგებულ სასწავლო გამოცდილებას, რაც ზრდის სამუშაო ადგილზე პროდუქტიულობას (Rozario et al., 2019). ამასთან, აღმოჩნდა, რომ ხელოვნური ინტელექტის დანერგვა ამცირებს სამუშაოდან გადინებას სამუშაოს ოპტიმიზაციის გზით (Zhou et al., 2024).

ხელოვნურ ინტელექტის პროგრამებს აქტიურად იყენებენ ისეთ ორგანიზაციულ პროცესებში, როგორიცაა, ლიდერობა, შეფასება, გადაწყვეტილების მიღება, რეკრუტინგი და ა.შ. კვლევების შედეგად აღმოჩნდა, რომ ხელოვნური ინტელექტის სისტემების დანერგვა აუმჯობესებს თანამშრომლების შესრულებას როგორც ინდივიდუალურ, ასევე გუნდის დონეზე (Górka et al., 2025). ადამიანური რესურსების მართვის პროცესებში ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაციამ შესაძლებელია გაზარდოს მენეჯერული გადაწყვეტილებების სისწორე (Liboni et al., 2019), თანამშრომლების დაქირავების პროცესი გაზარდოს უფრო ეფექტიანი (Reilly, 2019), გააუმჯობესოს სამსახურში სწავლების შედეგები (Hamilton & Sodeman, 2020) და თანამშრომლების შენარჩუნების მაჩვენებელი (Samarasinghe & Medis, 2020). პერსონალის შერჩევის პროცესში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ამცირებს კადრების დენადობას სამუშაო-თანამშრომლის შესაბამისობის გაზრდით (Hossain et al., 2025).

არსებული ემპირიული კვლევები ცხადყოფს, რომ ხელოვნური ინტელექტის სამუშაო პროცესში ინტეგრირება თავისთავად არ განაპირობებს არც ორგანიზაციული ეფექტურობის ზრდას და არც დასაქმებულთა შესრულებისა და კეთილდღეობის გაუმჯობესებას. მისი გავლენა მრავალმხრივია და შესაძლოა გამოვლინდეს როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი მიმართულებით, რაც მნიშვნელოვანწილად დამოკიდებულია ორგანიზაციულ და დასაქმებულების ინდივიდუალურ ფაქტორებზე (Mantello et al., 2023; Zhou et al., 2024), აგრეთვე დასაქმებულთა მიერ ხელოვნური ინტელექტის აღქმაზე (Valtonen et al., 2025).

აღნიშნული გარემოებები მიუთითებს იმაზე, რომ საკითხი საჭიროებს დამატებით ემპირიულ შესწავლას, განსაკუთრებით იმ კონტექსტში, თუ როგორ მოქმედებს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება დასაქმებულთა მიერ აღქმულ შესრულებაზე და რა ფაქტორები განსაზღვრავს ამ კავშირის მიმართულებასა და სიძლიერეს.

სწორედ ამ საკითხის გათვალისწინებით, მოცემული *კვლევის მიზანს დასაქმებულების მიერ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და მათ მიერ აღქმულ შესრულებას შორის კავშირში ავტონომიისა და სამუშაო წნეხის როლის შესწავლა წარმოადგენს*. კვლევებით დადასტურებულია, რომ სამუშაოს რესურსები და მოთხოვნები გავლენას ახდენენ დასაქმებულის შესრულებაზე (Bakker et al., 2005; Demerouti et al., 2001). აქედან გამომდინარე, კვლევაში ყურადღება გამახვილებულია იმაზე, თუ რა როლი აქვს

ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და აღქმული შესრულების კავშირზე სამუშაოს მოთხოვნას - სამუშაოს წნეხს, და სამუშაოს რესურსს - ავტონომიას.

კვლევაში სამუშაო მოთხოვნების და რესურსების შესასწავლად Bakker-ის და Demerouti-ის მიერ შემუშავებული სამუშაო რესურსებისა და მოთხოვნების - JD-R თეორიის ჩარჩო არის გამოყენებული, ვინაიდან ეფექტურად ხსნის სამუშაო გარემოში არსებული სტრესორებისა და მხარდამჭერი ფაქტორების გავლენას თანამშრომლების შესრულებაზე (Bakker & Demerouti, 2017). JD-R თეორიაში კლასიფიცირებული სამუშაო რესურსებიდან საკვლევად შეირჩა - ავტონომია, ხოლო სამუშაო მოთხოვნებიდან - სამუშაოს წნეხი. აღსანიშნავია, რომ ისევე როგორც შესრულების ცვლადი, ავტონომიისა და სამუშაოს წნეხის ცვლადებიც დასაქმებულების სუბიექტურ აღქმებს წარმოადგენს.

კვლევის ჰიპოთეზები

ემპირიული მტკიცებულებები მიუთითებს, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება კავშირშია დასაქმებულების ეფექტურობის და შესრულების ზრდასთან (Górka et al., 2025; Li et al., 2024). კვლევები ასევე მიუთითებს, რომ ხელოვნური ინტელექტის დანერგვამ შეიძლება გაზარდოს თანამშრომლების სამუშაო ავტონომია, რადგან ტექნოლოგია უზრუნველყოფს მათ დამატებითი ინფორმაციით და გადაწყვეტილებების დამოუკიდებლად მიღების უფრო მეტი შესაძლებლობით. ავტონომია ადამიანის ფუნდამენტური ფსიქოლოგიური საჭიროებაა და წარმოადგენს მნიშვნელოვან სამუშაო რესურსს, რომელიც გავლენას ახდენს მოტივაციაზე, ინოვაციურ ქცევასა და სამუშაო შედეგებზე. როდესაც თანამშრომლებს აქვთ მაღალი ავტონომია ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების პროცესში, ისინი ტექნოლოგიას აღიქვამენ არა როგორც კონტროლის ინსტრუმენტს, არამედ როგორც რესურსს, რომელიც ეხმარება მათ სამუშაო ამოცანების შესრულებაში. ავტონომიის შეზღუდვამ შეიძლება გამოიწვიოს კონტრპროდუქტიული ქცევა, რაც საბოლოოდ ნეგატიურად აისახება შესრულებაზე (Kellogg et al., 2020). Xavier-ის კვლევამ აჩვენა, რომ დემოგრაფიული ფაქტორების (სქესი, ასაკი, კულტურული ორიენტაცია) კონტროლის შემდეგაც კი, ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია მნიშვნელოვნად უკავშირდებოდა სამუშაო ავტონომიის ზრდას (Xavier et al., 2025). ავტონომიის მაღალი დონე, თავის მხრივ, დაკავშირებულია პროაქტიურ ქცევასთან, ინოვაციურობასთან და უკეთეს სამუშაო შედეგებთან (Parker & Knight, 2024). მაღალი ავტონომიის მქონე თანამშრომლები უფრო მეტად არიან მიდრეკილი ხელოვნური ინტელექტის სამუშაოში მორგებისკენ (AI Crafting), რაც გულისხმობს ტექნოლოგიის მორგებას კონკრეტულ სამუშაო ამოცანებზე და მნიშვნელოვნად პროგნოზირებს უფრო ეფექტურ შესრულებას (Wang et al., 2023). დამატებით, ავტონომია ხელს უწყობს თანამშრომლების მედეგობას, ზრდის პასუხისმგებლობის აღების და მიზნებისკენ სწრაფვის უნარს, რაც საბოლოოდ პოზიტიურად აისახება სამუშაო შესრულებაზე (Den Hartog & Belschak, 2012). აქედან გამომდინარე შემუშავდა ჰიპოთეზა:

H1: ავტონომიას გამაშუალებელი როლი აქვს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებისა და დასაქმებულის აღქმული შესრულების კავშირში.

სამუშაო ადგილზე სამუშაოს წნეხი გულისხმობს მდგომარეობას, როდესაც სამუშაოს მოთხოვნები აღემატება დასაქმებულის შესაძლებლობას, ეფექტიანად შეასრულოს დავალებები. ასეთ დროს ხშირია გადატვირთვა და უარყოფითი ემოციები. მკვლევრები თანხმდებიან, რომ ქრონიკული სამუშაოს წნეხი ასოცირდება კონცენტრაციის დაქვეითებასთან და შეცდომების სიხშირის ზრდასთან, განსაკუთრებით ისეთ სამუშაო გარემოში, სადაც თანამშრომლებს უწევთ მუდმივი დროითი შეზღუდვების პირობებში მუშაობა. დროითი ზეწოლა ამცირებს მუშაობის ხარისხს, ზრდის შეცდომების ალბათობას და ზღუდავს ღრმა კოგნიტურ დამუშავებას (Sonnentag & Frese, 2012).

ამავდროულად, ემპირიული კვლევები ადასტურებენ, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ზრდის დასაქმებულის ეფექტიანობასა და პროდუქტიულობას. ის სამუშაო პროცესში "გონებრივი საყრდენის" როლს ასრულებს. ხელოვნური ინტელექტის სისტემები ეხმარებიან თანამშრომლებს ინფორმაციის სწრაფ სინთეზში, ტექსტების გენერირებასა და მონაცემთა ანალიზში. ხელოვნური ინტელექტის მიერ რუტინული ამოცანების ავტომატიზაცია, ახდენს დასაქმებულების კოგნიტური უნარების მიმართვას უფრო მაღალი დონის დავალებებისკენ და კოგნიტური რესურსების ოპტიმიზაციის გზით ზრდის შესრულებას (Noy & Zhang, 2023). გარდა ამისა, ხელოვნური ინტელექტი უზრუნველყოფს მტკიცებულებებზე დაფუძნებულ რეკომენდაციებს, რაც ამცირებს ადამიანურ შეცდომებს და ზრდის სიზუსტეს კომპლექსურ გარემოში (Chen et al., 2023).

ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება მნიშვნელოვანწილად არის დაკავშირებული უკეთესი გადაწყვეტილებების მიღებასთან, მონაცემების სწრაფ დამუშავებასთან და შეცდომების რაოდენობის შემცირებასთან, რაც შესრულების ზრდაზე პირდაპირ აისახება (Jia et al., 2024).

სამუშაოს წნეხის პირობებში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება უზრუნველყოფს დასაქმებულებს რეკომენდაციებით, საშუალებას აძლევს მოახდინონ რუტინული და ავტომატიზებადი დავალებების დელეგირება, რაც ზრდის სამუშაოს შესრულებას.

JD-R მოდელის თანახმად, სამუშაო რესურსები განსაკუთრებულად მნიშვნელოვანი მაღალი მოთხოვნების პირობებში ხდება. შესაბამისად, ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება შეიძლება განსაკუთრებით ეფექტური იყოს მაღალი კოგნიტური მოთხოვნების და სამუშაოს წნეხის პირობებში. აქედან გამომდინარე შემუშავდა შემდეგი ჰიპოთეზა:

H2: სამუშაოს წნეხი აძლიერებს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებისა და დასაქმებულის აღქმული შესრულების კავშირს.

კვლევის მეთოდოლოგია

კვლევის პროცედურა და კვლევის მონაწილეები

კვლევის საველე ეტაპი ონლაინ გამოკითხვის მეთოდით 2025 წლის დეკემბერში განხორციელდა. კვლევის მონაწილეებს მონაცემთა შეგროვების მიზნით სტრუქტურირებული კითხვარი Google Forms-ის პლატფორმის გამოყენებით მიეწოდათ. მონაწილეთა შერჩევა ხელმისაწვდომობის პრინციპით განხორციელდა. კვლევაში ჩართვის წინაპირობას წარმოადგენდა მინიმუმ სამი თვის სამუშაო სტაჟი და სამუშაო პროცესში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების გამოცდილება. კვლევაში მონაწილეობა იყო სრულად ნებაყოფლობითი და ანონიმური. კითხვარის შევსებამდე მონაწილეებს მიეწოდათ ინფორმაცია კვლევის მიზნის შესახებ. კითხვარი შეავსეს მხოლოდ იმ პირებმა, რომლებმაც მზაობა გამოთქვეს კვლევაში მონაწილეობაზე.

კვლევაში მონაწილეობდა 178 დასაქმებული, რომელთა ასაკი 18-დან 65 წლამდეა ($M = 31.65$, $SD=9.8$). კვლევაში მონაწილეობა მიიღეს ძირითადად მდებრობითი სქესის წარმომადგენლებმა (ქალი: 74%, კაცი: 26%). განათლების, სამუშაოს სექტორის, თანამდებობის დონის, სამუშაო სტაჟის, ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების სტაჟისა და ორგანიზაციაში ხელოვნური ინტელექტის დანერგვის სტატუსის მიხედვით კვლევის მონაწილეთა პროფილი მრავალფეროვანია.

კვლევის ფარგლებში მონაცემები დამუშავდა სტატისტიკური პროგრამით SPSS (IBM SPSS Statistics 23). მოდერაციული და მედიაციური ანალიზისთვის გამოყენებულია ჰეისის (A. F. Hayes) მიერ შემუშავებული დამატებითი პროგრამა PROCESS Macro.

კვლევის ინსტრუმენტები

კვლევის ძირითად საკვლევ ცვლადს *ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება* წარმოადგენს. ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებას მკვლევრები სხვადასხვაგვარად განსაზღვრავენ იმის მიხედვით, ორგანიზაციულ დონეზე განიხილავენ თუ დასაქმებულის დონეზე. კვლევის ფარგლებში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებას ინდივიდუალურ დონეზე განვიხილავთ. წინამდებარე კვლევა ეფუძნება Tang-ის და კოლეგების განმარტებას, რომლის მიხედვითაც ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება გულისხმობს იმ *მასშტაბსა და დროს*, რომელსაც დასაქმებული უთმობს ხელოვნურ ინტელექტთან მუშაობას სამუშაო მიზნების მისაღწევად (Tang et al., 2022). კვლევის ფარგლებში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება იზომება Tang-ის და კოლეგების 4 დებულებიანი კითხვარით (Tang et al., 2022). კითხვარი აღნიშნულ კვლევაში გამოყენების მიზნით ითარგმნა, შინაარსობრივი ვალიდიზაციის მიზნით შეფასდა ექსპერტთა მიერ. სკალა ხასიათდება შინაგანი თანმიმდევრულობითა და სტაბილურობით (სკალის სანდოობა: $\alpha=.89$). დებულებები ფასდება 5 ქულიან სკალაზე, სადაც: 1 ნიშნავს სრულებით არ ვეთანხმები, 5 - სრულიად ვეთანხმები.

მოცემულ კვლევაში გამოყენებული *შესრულების* ცვლადი ოპერაციონალიზებულია როგორც აღქმული შესრულება, ვინაიდან იგი ეყრდნობა თავად დასაქმებულის თვითშეფასებას. აღქმული შესრულება გულისხმობს ინდივიდის სუბიექტურ შეფასებას საკუთარი სამუშაო ეფექტიანობის, პროდუქტიულობისა და მიზნების მიღწევის შესახებ. შესრულების ობიექტური მაჩვენებლებისგან განსხვავებით, რომელიც ეფუძნება გარე ინდიკატორებს (მაგ., ხელმძღვანელის შეფასება) აღქმული შესრულება ასახავს ინდივიდის პირად გამოცდილებასა და ინტერპრეტაციას საკუთარი საქმიანობის შესახებ (Katowa-Mukwato & Banda, 2016). ამდენად, კვლევის შედეგები უნდა ინტერპრეტირდეს სწორედ დასაქმებულის მიერ აღქმული და არა ობიექტურად გაზომილი შესრულების კონტექსტში.

დასაქმებულის მიერ აღქმული შესრულება იზომება Bakker-ის მიერ შემუშავებული სკალის როლით განსაზღვრული შესრულების 2 დებულების ქულების დაჯამებით (Bakker, 2014). (სკალის სანდოობა: $\alpha = 0.61$). ამ და მომდევნო სკალებზე დებულებები ფასდება 5 ქულიან სკალაზე, სადაც: 1 ნიშნავს - არასოდეს, 5 - ძალიან ხშირად.

სამუშაო მოთხოვნა-რესურსების მოდელის მიხედვით, *სამუშაოს წნეხი* ჩნდება, როდესაც სამუშაოს მოთხოვნები აღემატება დასაქმებულის შესაძლებლობას, გაუმკლავდეს მისთვის მიცემულ დავალებებს. ასეთ დროს დასაქმებულთან თავს იჩენს გადატვირთვა, გადაწვა, სტრესი და უარყოფითი ემოციები (Bakker & Demerouti, 2007). კვლევაში სამუშაოს წნეხი ფასდება Bakker-ის კითხვარის 4 დებულებიანი კითხვარის ქულების დაჯამებით (Bakker, 2014). (სკალის სანდოობა: $\alpha = 0.87$).

ავტონომია გულისხმობს დასაქმებულის თავისუფლების ხარისხს გადაწყვეტილებების მიღების პროცესში და შესაძლებლობას თავად განსაზღვროს როდის და როგორ შეასრულოს მისთვის მიცემული დავალებები (Bakker & Demerouti, 2007). ავტონომია კვლევაში ფასდებოდა ბეკერის მიერ შემუშავებული 3 დებულებიანი კითხვარის ქულათა დაჯამებით (Bakker, 2014). (სკალის სანდოობა: $\alpha = 0.81$).

კვლევის შედეგები

მონაცემების ანალიზის პირველ ეტაპზე შევაფასეთ ორგანიზაციაში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასთან დაკავშირებული ტენდენციები. კვლევის მონაწილეები ხელოვნურ ინტელექტს სამსახურის საქმეებისთვის სხვადასხვა ინტენსივობით იყენებენ. დაახლოებით 30% იყენებს იშვიათად, მონაწილეების ძირითადი ნაწილი - 50% იყენებს დროდადრო და მხოლოდ მცირე - 20% იყენებს ხშირად.

კვლევის მონაწილეთა ასაკისა და სქესის მიხედვით ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების მხრივ განსხვავება არ გამოვლინდა. სამუშაო სექტორის (საჯარო, კერძო, ე.წ. ფრილანსერი) მიხედვით ჯგუფებს შორის განსხვავება სტატისტიკურად არსებითია $p < 0.01$ დონეზე ($F(2, 175) = 6.226, p = 0.002$). ეფექტის ზომა (Effect size) უდრის 0.07-ს, რაც

Cohen-ის კლასიფიკაციის მიხედვით, საშუალო ეფექტია. საინტერესოა, რომ საჯარო სფეროში დასაქმებულები ყველაზე ნაკლებად იყენებენ ხელოვნურ ინტელექტს. Post-hoc (გამოთვლილი Tukey HSD-ის საშუალებით) გვიჩვენებს, რომ სტატისტიკურად არსებითი განსხვავება გამოვლინდა ე.წ. ფრილანსერების ($M = 14.91$, $SE = 1.18$) და კერძო ($M = 11.54$, $SE = 0.35$) და საჯარო ($M = 10.16$, $SE = 0.63$) სექტორში დასაქმებულებს შორის. კვლევაში მონაწილე ფრილანსერები როგორც კერძო, ასევე საჯარო სექტორში დასაქმებულებთან შედარებით ინტენსიურად იყენებენ ხელოვნურ ინტელექტს.

ის დასაქმებულები, რომლებსაც ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების მეტი გამოცდილება აქვთ, უფრო ინტენსიურად იყენებენ მას. ერთფაქტორიანი დისპერსიული ანალიზის (one-way ANOVA) შედეგად აღმოჩნდა, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების გამოცდილების მიხედვით ჯგუფებს შორის განსხვავება სტატისტიკურად არსებითია $p < 0.01$ დონეზე ($F(2, 175) = 5.808$, $p = 0.004$). ეფექტის ზომა (Effect size), უდრის 0.07-ს, რაც Cohen-ის კლასიფიკაციის მიხედვით, საშუალო ეფექტია. Post-hoc (გამოთვლილი Tukey HSD-ის საშუალებით) გვიჩვენებს, რომ სტატისტიკურად არსებითი განსხვავება გამოვლინდა 1 წელზე ნაკლები გამოცდილების მქონე ($M = 10.59$, $SE = 0.45$) და 3 წელზე მეტი გამოცდილების მქონე ($M = 14.19$, $SE = 0.93$) დასაქმებულებს შორის.

ავტონომიის როლი ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირში

ანალიზის პირველ ეტაპზე შევისწავლეთ პირდაპირი კავშირი ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და სამუშაო შესრულებას შორის. წრფივი რეგრესიული ანალიზის შედეგად დადგინდა, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებას შესრულების ქულების ვარიაციის ახსნაში სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი წვლილი არ შეაქვს ($R^2 = 0.000$, $F(1.176) = 0.017$, $p = 0.896$). ეს ნიშნავს, რომ დასაქმებულების ხედვით ხელოვნური ინტელექტის პროგრამების გამოყენება არ ზრდის მათ შესრულებას.

პირველი ჰიპოთეზის შემოწმების მიზნით, შევისწავლეთ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებისა და აღქმული შესრულების კავშირში ავტონომიის ცვლადის გამაშუალებელი როლი მოდერაციული და მედიაციური მოდელების გამოყენებით. პირველ რიგში, შევამოწმეთ ავტონომიის, როგორც მოდერატორის როლი ხელოვნური ინტელექტისა და აღქმული შესრულების კავშირში (Hayes, Model 1). აღმოჩნდა, რომ ინტერაქციის ეფექტი სტატისტიკურად არსებითი არ არის ($R^2 = 0.120$, $F(3.174) = 7.907$, $p < 0.001$, $\beta = 0.018$, $t = 1.869$ $p = 0.063$). შემდეგ ეტაპზე შევისწავლეთ ავტონომიის, როგორც მედიატორის როლი ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირში (Hayes, Model 4). მოდელი სტატისტიკურად არსებითი აღმოჩნდა: ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება სტატისტიკურად მნიშვნელოვნად უკავშირდება ავტონომიას ($\beta = 0.101$, $p < 0.05$). ავტონომია მნიშვნელოვნად პროგნოზირებს შესრულებას ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების კონტროლის პირობებში ($\beta = 0.194$, $p < 0.001$), ხოლო

ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების პირდაპირი ეფექტი არ აღმოჩნდა მნიშვნელოვანი ($\beta = -0.016$, $p > 0.05$). დადასტურდა ირიბი კავშირი ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და სამუშაო შესრულებას შორის ($\text{BootLLCI} = 0.002$, $\text{BootULCI} = 0.040$). ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება პირდაპირ კავშირს არ ავლენს სამუშაო შესრულებასთან, თუმცა ირიბად უკავშირდება მას ავტონომიის გზით. შესაბამისად, ჰიპოთეზა N1 დადასტურდა - ავტონომიას გამაშუალებელი როლი აქვს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებისა და დასაქმებულის აღქმული შესრულების კავშირში.

სამუშაოს წნეხის როლი ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირში

ანალიზის შემდგომ ეტაპზე შევამოწმეთ ჰიპოთეზა N2 და შევისწავლეთ სამუშაოს წნეხის როლი. როგორც უკვე მივუთითეთ, ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება არ უკავშირდება შესრულების ქულების ვარიაციას. წრფივი რეგრესიული ანალიზით დადგინდა, რომ სამუშაოს წნეხი აღქმული შესრულების ქულების ცვალებადობის 2.2%-ს ხსნის ($R^2 = 0.0220$, $F(1.176) = 3.881$, $p = 0.05$). სამუშაოს წნეხის ქულის ერთი სტანდარტული ერთეულით გაზრდა უკავშირდება შესრულების 0.15 ერთეულით ზრდას ($\beta = 0.147$, $p = 0.05$).

ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირში სამუშაოს წნეხის მოდერაციული მოდელი (Hayes, Model 1) სტატისტიკურად არსებითია და ქულების ვარიაციის უფრო მეტ - 4.5%-ს ხსნის ($R^2 = 0.045$, $F(3.174) = 2.719$, $p = 0.04$). ინტერაქციის ეფექტი სტატისტიკურად მნიშვნელოვანია ($\beta = 0.014$, $p = 0.04$).

Simple slopes ანალიზმა აჩვენა, რომ დაბალი (-1 SD) და საშუალო სამუშაოს წნეხის პირობებში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირი სუსტია და სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი არ არის, მაშინ როდესაც მაღალი სამუშაოს წნეხის პირობებში ($+1$ SD) ეს კავშირი დადებითი მიმართულებით ძლიერდება ($\beta = 0.062$, $p = 0.041$). აღნიშნული შედეგები მიუთითებს, რომ სამუშაოს წნეხის ზრდასთან ერთად ხელოვნური ინტელექტი შესაძლოა იქცეს მნიშვნელოვან რესურსად, რომელიც ხელს უწყობს შესრულების გაუმჯობესებას, მაშინ როდესაც დაბალი სამუშაო მოთხოვნების პირობებში მისი გავლენა ნაკლებია. ამდენად, ჰიპოთეზა N2 დადასტურდა.

კვლევის შედეგების განხილვა

მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ნაკლებად არის დაკავშირებული დასაქმებულთა დემოგრაფიულ მახასიათებლებთან (ასაკი, სქესი). ასაკის და სქესის მიხედვით განსხვავებების არარსებობა მიუთითებს, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება აღარ წარმოადგენს თაობათა ან სქესთა შორის განსხვავებაზე

დაფუძნებულ ქცევას და უფრო მეტად არის ორგანიზაციული და სამუშაოსთან დაკავშირებული ფაქტორების შედეგი.

კვლევამ გამოკვეთა, რომ ხელოვნური ინტელექტს ყველაზე ინტენსიურად ე.წ. ფრილანსერები იყენებენ, ყველაზე ნაკლებად კი — საჯარო სექტორში დასაქმებულები. ფრილანსერებისთვის ხელოვნური ინტელექტი შეიძლება იყოს ეფექტიანობის გაზრდის მნიშვნელოვანი ინსტრუმენტი, ვინაიდან მათ არ ჰყავთ დამხმარე გუნდი. ამასთან, ეს შედეგი შესაძლებელია უკავშირდებოდეს იმას, რომ ფრილანსერებს ორგანიზაციებში დასაქმებულებთან შედარებით მაღალი სამუშაო ავტონომია აქვთ. თავის მხრივ, ავტონომია სტატისტიკურად მნიშვნელოვნად უკავშირდება ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებას.

წინამდებარე კვლევის ცენტრალური დასკვნაა, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება თავისთავად არ აუმჯობესებს შესრულებას. კვლევამ გამოკვეთა, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებას და დასაქმებულის აღქმულ შესრულებას შორის კავშირი სტატისტიკურად არსებითი არ არის, არამედ ხელოვნური ინტელექტის ეფექტი შესრულებაზე დამოკიდებულია სამუშაოს რესურსებსა და მოთხოვნებზე. ეს დასკვნა თანხვედრაშია უახლეს სამეცნიერო პუბლიკაციებთან. ავტორები თანხმდებიან, რომ ხელოვნური ინტელექტის სამუშაო პროცესში დანერგვა თავისთავად არ გულისხმობს, რომ თანამშრომლები მას აქტიურად გამოიყენებენ (Valtonen et al., 2025) ან ის დადებითად აისახება ორგანიზაციის ეფექტურობაზე და დასაქმებულთა ფსიქოლოგიურ კარგად ყოფნაზე (Mantello et al., 2023; Zhou et al., 2024). მისი გავლენა შეიძლება იყოს როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი. ხელოვნური ინტელექტი არ არის „ჯადოსნური ჯოხი“, მის გავლენას შესრულებაზე მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ორგანიზაციული და სამუშაოსთან დაკავშირებული ფაქტორები.

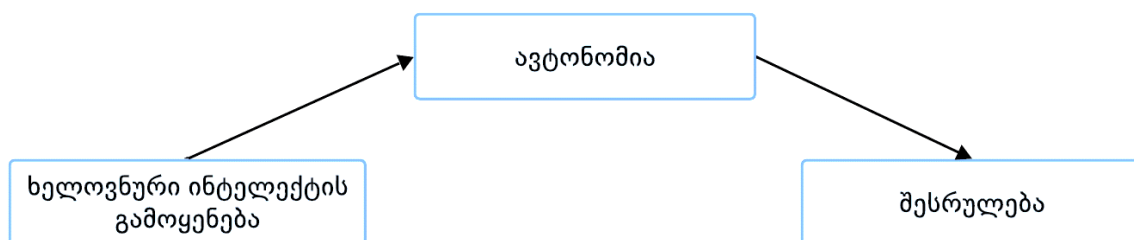
წინამდებარე კვლევის შედეგებით აღმოჩნდა, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და სამუშაოს შესრულებას შორის ვლინდება ირიბი კავშირი ავტონომიის გზით. როგორც ჩანს, ხელოვნური ინტელექტი დასაქმებულებისთვის საჭირო ინფორმაციის მიწოდების, გადაწყვეტილების ადგილობრივ დონეზე მიღების შესაძლებლობის და დიდი რაოდენობით ინფორმაციის ანალიზის შესაძლებლობის უზრუნველყოფით ზრდის სამუშაო ავტონომიას, ავტონომიის ზრდა კი უკავშირდება შესრულების ზრდას. Puranam და კოლეგები მიუთითებენ, რომ ავტონომია მნიშვნელოვნად აძლიერებს შინაგან მოტივაციას და ხელს უწყობს ინოვაციურ ქცევასა და შესრულების ზრდას (Puranam et al., 2006).

JD-R მოდელის მიხედვით, ავტონომია, როგორც სამუშაო რესურსი ასრულებს მოტივაციურ ფუნქციას და ხელს უწყობს შესრულების ზრდას. ავტონომია კლასიფიცირდება, როგორც ერთ-ერთი ცენტრალური სამუშაო რესურსი, რომელიც ზრდის შინაგან მოტივაციას, პასუხისმგებლობის განცდას და სამუშაოში ჩართულობას, რაც საფუძვლად ედება უკეთეს შესრულებას (Bakker et al., 2005).

თანამედროვე კვლევები ასევე მიუთითებენ, რომ ავტონომიის მაღალი დონე ხელს უწყობს თანამშრომლებს იყვნენ უფრო კრეატიულები, მოქნილები და გადაწყვეტილებებზე ორიენტირებულები სწრაფად ცვალებად და გაურკვეველ გარემოში (Parker & Knight, 2024). ხელოვნური ინტელექტის ეპოქაში, სადაც სამუშაო გარემო მუდმივად ტრანსფორმირდება, სწორედ თანამშრომლისთვის ავტონომიის მინიჭება შეიძლება იყოს ხელოვნური ინტელექტის ეფექტურად გამოყენების წინაპირობა. ვინაიდან ავტონომიის შემცირება შეასუსტებს კავშირს ხელოვნური ინტელექტის დანერგვასა და შესრულებას შორის. როდესაც თანამშრომლები ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებას აღიქვამენ, როგორც გადაწყვეტილებების მიღების პროცესში ჩარევის ან სამუშაოზე კონტროლის შემცირების მექანიზმს, მათში იკლებს მოტივაცია და იზრდება თავდაცვითი რეაქციები. ამგვარად, ხელოვნური ინტელექტი შეიძლება ტრანსფორმირდეს სამუშაო რესურსიდან მოთხოვნად, რაც JD-R მოდელის ლოგიკით გაზრდის სტრესს და შეამცირებს შესრულებას.

მოცემული შედეგი ასევე კარგად აიხსნება სამუშაო მახასიათებლების მოდელის (Hackman & Oldham, 1976) ჭრილობით, რომლის მიხედვითაც ავტონომია წარმოადგენს კრიტიკულ სამუშაო მახასიათებელს, რომელიც განსაზღვრავს პასუხისმგებლობის განცდას და გავლენას ახდენს შინაგან მოტივაციაზე. შესაბამისად, ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება სწორედ ავტონომიის გაძლიერების მეშვეობით შეიძლება უკავშირდებოდეს შესრულების ზრდას.

ილუსტრაცია N1. ავტონომია, როგორც მედიატორი ცვლადი ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის

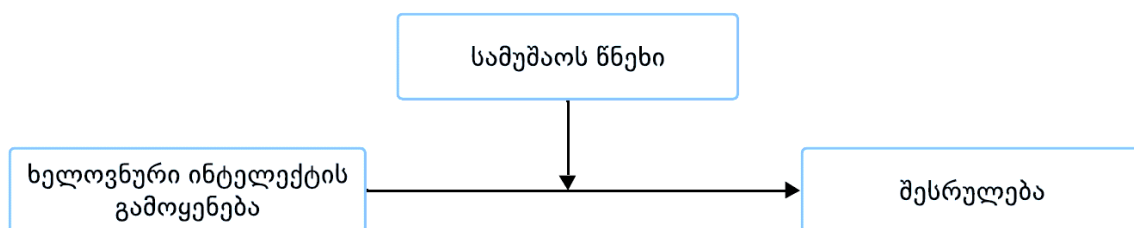


კვლევის შედეგები ასევე აჩვენებს, რომ სამუშაოს წნეხი აძლიერებს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირს. კერძოდ, მაღალი სამუშაოს წნეხის პირობებში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირი ძლიერდება, მაშინ როდესაც დაბალი წნეხის პირობებში ეს კავშირი ქრება. აღნიშნული მიგნება შეესაბამება JD-R მოდელის დაშვებას, რომლის მიხედვითაც სამუშაო რესურსების გავლენა განსაკუთრებით ძლიერდება მაღალი მოთხოვნების პირობებში (Bakker & Demerouti, 2001). როგორც ჩანს, მაღალი სამუშაო დატვირთვის პირობებში უფრო მნიშვნელოვანი ხდება ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების ბენეფიტები, როგორიცაა ინფორმაციის სწრაფი სინთეზი, ტექსტების გენერირება, მონაცემთა სწრაფი ანალიზი და კოგნიტური რესურსების ოპტიმიზაცია (Noy & Zhang, 2023).

ამასთან, შეგვიძლია ვივარაუდოთ, რომ სწორედ მაღალი სამუშაოს წნეხი აქცევს ხელოვნურ ინტელექტს ეფექტურ სამუშაო რესურსად. Zhou-ს და კოლეგების კვლევამ აჩვენა, რომ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებით ყველაზე მაღალი სარგებელი ყველაზე არაკომპეტენტურმა დასაქმებულებმა მიიღეს, ანუ იმათ ვისთვისაც სამუშაო ყველაზე მაღალ წნეხს ქმნიდა (Zhou et al., 2024).

ზოგიერთი ავტორი გამოთქვამს მოსაზრებას, რომ დასაქმებულებმა ხელოვნური ინტელექტის მხარდაჭერა სამუშაოს ზედაპირულად შესასრულებლად შეიძლება გამოიყენონ, შეამცირონ საკუთარი ძალისხმევა და ხელოვნური ინტელექტი სამუშაო საათებში სიზარმაცის მიზეზი გახდეს (Saluja et al., 2024). ასეთ პირობებში ტექნოლოგია აღარ ასრულებს მოტივაციური რესურსის ფუნქციას, არამედ შეიძლება იქცეს ძალისხმევის შემცირების ინსტრუმენტად. აღნიშნული „სიზარმაცე“ პოტენციურად დაკავშირებულია შეცდომების ზრდასთან, სამუშაოში ჩართულობის შემცირებასთან და ორგანიზაციული პროდუქტულობის კლებასთან (Tsai, 2023; Hessari et al., 2025). ასეთ პირობებში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება მიმართული იქნება არა შესრულების გაუმჯობესებაზე, არამედ ამოცანების მინიმალური ძალისხმევით შესრულებაზე. ეს ხსნის, თუ რატომ ძლიერდება კავშირი ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის სწორედ მაღალი სამუშაოს წნეხის პირობებში. სამუშაო წნეხი შეიძლება განსაზღვრავდეს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების ხარისხს. მაღალი სამუშაოს წნეხი აძლიერებს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების დადებით ეფექტს შესრულებაზე, რადგან თანამშრომლები მას იყენებენ როგორც პრობლემის გადაჭრის ინსტრუმენტს. დაბალი წნეხის პირობებში კი შესაძლებელია გამოვლინდეს ძალისხმევის შემცირების ტენდენცია, რაც ორგანიზაციული ეფექტიანობისთვის რისკს წარმოადგენს.

ილუსტრაცია N2. სამუშაოს წნეხი, როგორც მოდერატორი ცვლადი ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის



კვლევის შეზღუდვები და სამომავლო რეკომენდაციები

კვლევის შეზღუდვას წარმოადგენს მონაწილეთა რაოდენობა. მიუხედავად იმისა, რომ კვლევაში მონაწილეობა 178-მა ადამიანმა მიიღო, სასურველი იქნებოდა კვლევის ჰიპოთეზების დიდი მოცულობის შერჩევაზე შემოწმება. კვლევის მნიშვნელოვანი

შეზღუდვაა შერჩევაში რესპონდენტების სქესის დისბალანსი მდებრობითი სქესის სასარგებლოდ.

კიდევ ერთი შეზღუდვა უკავშირდება კვლევის ერთ-ერთი ცენტრალური ცვლადის შესრულების გაზომვას. კვლევაში დასაქმებულის შესრულების ობიექტურად გაზომვა ვერ მოხერხდა. რესპონდენტების მიერ აღქმული შესრულების გასაზომად კი გამოყენებული სკალის სანდოობა მისაღებია, თუმცა - არც თუ ისე მაღალია.

ასევე შეზღუდვას წარმოადგენს თვითშეფასების კითხვარების გამოყენება. კვლევის ყველა კონსტრუქტის, მათ შორის ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასთან დაკავშირებით შესაძლოა ადგილი ჰქონდა სოციალური სასურველობის ეფექტს, რომლის გაკონტროლების შესაძლებლობაც არ გვქონდა, ვინაიდან კვლევის პროცედურა - ონლაინ გამოკითხვის ფორმატი არ იძლეოდა ამის საშუალებას. გამომდინარე იქიდან რომ რესპონდენტები დისტანციურად ავსებდნენ თვითადმინისტრირებად კითხვარს, ჩვენთვის უცნობია რა ვითარებაში და რამდენად გულწრფელად პასუხობდნენ დებულებებს.

კვლევის შედეგები კიდევ ერთხელ უსვამს ხაზს სამუშაო მოთხოვნებისა და რესურსების მნიშვნელობას ხელოვნური ინტელექტის ტექნოლოგიის ეფექტურ სამუშაო რესურსად გარდაქმნის პროცესში. შესწავლილი კავშირების უფრო კომპლექსური ახსნისთვის სასურველია მომავალმა კვლევებმა შეამოწმონ ისეთი ფაქტორების როლი, როგორიცაა, დასაქმებულების პიროვნული მახასიათებლების როლი და ატიტუდები ხელოვნური ინტელექტის მიმართ, ფსიქოლოგიური უსაფრთხოება, აღქმული ორგანიზაციული მხარდაჭერა, ტექნოლოგიის აღქმული სარგებლიანობა, ცვლილებებისადმი მზადყოფნა და სხვა. ასევე მნიშვნელოვანი იქნება მომავალი კვლევები ფოკუსირდეს იმაზე, თუ როგორ ყალიბდება ნდობა ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების მიმართ და დასაქმებულის რომელი პიროვნული მახასიათებლები განაპირობებენ მას. დამატებით, საინტერესო შეიძლება იყოს ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების არა მხოლოდ ინტენსივობის, არამედ ეფექტურობისა და ხარისხის შეფასება. მაღალი ინტენსივობა არ გულისხმობს აუცილებლად ეფექტიან გამოყენებას. შესაძლოა, შესრულებაზე გავლენას ახდენდეს სწორედ ტექნოლოგიის ფუნქციური ინტეგრაციის დონე, უნარების შესაბამისობა და გამოყენების მიზნობრიობა.

კვლევის დასკვნები და პრაქტიკული ღირებულება

ქართულ სამეცნიერო ლიტერატურაში ორგანიზაციულ კონტექსტში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების დასაქმებულების შესრულებასთან მიმართებების შესახებ კვლევები მწირია. ლიტერატურაში ჯერ კიდევ არ მოიპოვება ვრცელი მასალა ორგანიზაციაში ხელოვნური ინტელექტის გავლენების შესახებ (Zhu & Hussain, 2025). წინამდებარე კვლევაში ნაცადია ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებასთან კავშირის შესწავლით ორგანიზაციულ ფსიქოლოგიაში უკვე არსებული

ემპირიული მტკიცებულებების გამდიდრება. კვლევამ გამოავლინა საინტერესო მიგნებები:

- ხელოვნური ინტელექტის (AI) გამოყენება თავისთავად არ წარმოადგენს დასაქმებულთა სამუშაო შესრულების გაუმჯობესების პირდაპირ გარანტს.
- ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ზრდის დასაქმებულის შესაძლებლობას, დამოუკიდებლად მიიღოს გადაწყვეტილებები და ეფექტურად დაამუშაოს სამუშაოსთან დაკავშირებული ინფორმაცია, რაც, თავის მხრივ, დადებითად აისახება სამუშაოს შესრულების აღქმაზე. ამრიგად, AI ეფექტურ რესურსად მხოლოდ მაშინ გვევლინება, როდესაც ის ხელს უწყობს დასაქმებულის ავტონომიის გაძლიერებას.
- ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებასა და შესრულებას შორის კავშირის სიძლიერეზე გავლენას ახდენს სამუშაოს წნეხი. კერძოდ, მაღალი სამუშაოს წნეხის, დატვირთვის პირობებში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება ზრდის აღქმულ შესრულებას, იმგვარად რომ AI ხდება კრიტიკულად მნიშვნელოვანი ინსტრუმენტი ინფორმაციის სწრაფი სინთეზისა და კოგნიტური რესურსების ოპტიმიზაციისთვის, რაც ზრდის შესრულებას.

პრაქტიკული კუთხით, მოცემული მიგნებები მნიშვნელოვანია თანამშრომლებისათვის ისეთი სამუშაო გარემოს შესაქმნელად, სადაც ხელოვნური ინტელექტი ეფექტურ სამუშაო რესურსად გადაიქცევა. გამომდინარე იქიდან, რომ ხელოვნური ინტელექტის დანერგვა სულ უფრო და უფრო მასშტაბური ხდება, მნიშვნელოვანია ორგანიზაციებმა იცოდნენ როგორ დანერგონ ხელოვნური ინტელექტი და რა ტიპის მხარდაჭერა აღმოუჩინონ დასაქმებულებს ხელოვნური ინტელექტის სამუშაოში ინტეგრაციის პროცესში. ვინაიდან დღესდღეობით ორგანიზაციების კონკურენტუნარიანობის შენარჩუნება, სულ უფრო და უფრო დამოკიდებული ხდება ხელოვნური ინტელექტის ეფექტურად დანერგვაზე.

ორგანიზაციებისთვის მნიშვნელოვანია იმის გათვალისწინება, რომ ხელოვნური ინტელექტის დანერგვა საკმარისი არ არის, რადგან ავტომატურად არ იწვევს თანამშრომელთა შესრულების ზრდას. ტექნოლოგიის დანერგვა უნდა მიმდინარეობდეს სტრუქტურირებულად და დაგეგმილად. ტექნოლოგიის დანერგვას თან უნდა ახლდეს სამუშაოს დიზაინის გადახედვა, რათა თავიდან იქნას აცილებული ოპტიმალურზე დაბალი სამუშაო დატვირთვა. ეს უზრუნველყოფს, რომ ახალი ტექნოლოგიის გამოყენება მოხდეს დასაქმებულის ეფექტურობის გასაზრდელად და არა ზედაპირული შესრულებისა და სიზარმაცის წასახალისებლად. გარდა ამისა, აუცილებელია სამუშაო დიზაინის ისეთი ტრანსფორმაცია, რომელიც უზრუნველყოფს თანამშრომელთა ავტონომიის შენარჩუნებასა და მხარდაჭერას, რათა ხელოვნური ინტელექტი რეალურ სამუშაო რესურსად გარდაიქმნას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2019), Automation and new tasks: How technology displaces and reinstates labor. *Journal of Economic Perspectives*, 33(2), 3–30;
- Bakker, A. B., & Demerouti, E. (2007), The Job Demands-Resources Model: State of the Art, *Journal of Managerial Psychology*, 309–328;
- Bakker, A. B., & Demerouti, E. (2017), Job demands-resources theory: Taking stock and looking forward, *Journal of Occupational Health Psychology*, 22(3), 273–285;
- Bakker, A. B., Demerouti, E., & Euwema, M. C. (2005), Job resources buffer the impact of job demands on burnout, *Journal of Occupational Health Psychology*, 10(2), 170–180;
- Bakker. (2014), *The Job Demands–Resources Questionnaire*. Rotterdam: Erasmus University;
- Ban, O., Maiorescu, I., Bucur, M., Sabou, G. C., & Tzedec, B. C. (2024), AI between threat and benefactor for the competencies of the human working force, *Amfiteatru Economic*, 26(67);
- Brougham, D., & Haar, J. (2018), Smart technology, artificial intelligence, robotics, and algorithms (STARA): Employees’ perceptions of our future workplace, *Journal of Management & Organization*, 24(2), 239–257;
- Cetindamar, D., Kitto, K., Wu, M., Zhang, Y., Abedin, B., & Knight, S. (2024), Explicating AI literacy of employees at digital workplaces, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 810–823;
- Chen, A., Yang, T., Ma, J., & Lu, Y. (2023), Employees’ learning behavior in the context of AI collaboration: A perspective on the job demand-control model, *Industrial Management & Data Systems*, 123(8), 2169–2193;
- Chowdhury, S., Budhwar, P., Dey, P. K., Joel-Edgar, S., & Abadie, A. (2022), AI-employee collaboration and business performance: Integrating knowledge-based view, socio-technical systems and organisational socialisation framework, *Journal of Business Research*, 144, 31–49;
- Chuang, Y.-T., Chiang, H.-L., & Lin, A.-P. (2025), Insights from the Job Demands–Resources model: AI’s dual impact on employees’ work and life well-being. *International Journal of Information Management*, 83;
- Demerouti E., (2022). Turn digitalization and automation to a job resource. *Applied Psychology: An International Review*, 71(4), 1205–1209
- Demerouti, E., Bakker, A. B., Nachreiner, F., & Schaufeli, W. B. (2001), The job demands-resources model of burnout, *Journal of Applied Psychology*, 86(3), 499–512;
- Den Hartog, D. N., & Belschak, F. D. (2012). When does transformational leadership enhance employee proactive behavior? The role of autonomy and role breadth self-efficacy. *Journal of Applied Psychology*, 97(1), 194–202.
- Górka, E., Baran, D., Wojak, G., Ćwiąkała, M., Zupok, S., Starkowski, D., Reśko, D., & Okrasa, O. (2025), The impact of artificial intelligence on enterprise decision-making process;

- Hackman, J. R., & Oldham, G. R. (1976). Motivation through the design of work: Test of a theory. *Organizational Behavior & Human Performance*, 16(2), 250–279
- Hamilton, R. H., & Sodeman, W. A. (2020). The questions we ask: Opportunities and challenges for using big data analytics to strategically manage human capital resources, *Business Horizons*, 63(1);
- Henkel, A., Marion, J., & Bourdeau, S. (2020). Artificial intelligence anxiety and technology adoption. *Technology in Society*.
- Hessari, H., Bai, A., & Daneshmandi, F. (2024). Generative AI: Boosting adaptability and reducing workplace overload. *Journal of Computer Information Systems*
- Hossain, M., Akter, S., & Dwivedi, Y. K. (2025). Artificial intelligence in recruitment and selection: A systematic review and future research agenda. *Human Resource Management Review*.
- Jia, N., Luo, X., Fang, Z., & Liao, C. (2024). When and how artificial intelligence augments employee creativity, *Academy of Management Journal*, 67(1), 5–32;
- Katowa-Mukwato, P., & Banda, S. (2016). Self-perceived versus objectively measured competence in performing clinical practical procedures by final year medical students. *International Journal of Medical Education*, 7, 122–129
- Kellogg, K.C.; Valentine, M.A.; Christin, A. Algorithms at work: The new contested terrain of control. *Academy of Management Annals*, 2020, 14,366–410.
- Klenert, D., Fernández-Macías, E., & Antón, J. I. (2023). Artificial intelligence and the future of work: Evidence and policy implications. *Economic and Industrial Democracy / ILO research reports*.
- Kong, H., Yuan, Y., Baruch, Y., Bu, N., Jiang, X. and Wang, K. (2021), Influences of artificial intelligence (AI) awareness on career competency and job burnout, *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 33 (2), 717-734;
- Kuligin, D. R., Savvina, E. A., Vasechkin, V. M., Chesnikov, L. S., & Zheltoukhova, E. Y. (2025), AI-enabled digitalization as a key factor in improving production efficiency and beer quality, *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 87(1), 123–129;
- Leslie, D., & Briggs, M. (2021). Explaining decisions made with AI: A workbook (Use case 1: AI-assisted recruitment tool). The Alan Turing Institute.
- Li, J. J., Bonn, M. A., & Ye, B. H. (2019). Hotel employees' artificial intelligence and robotics awareness and its impact on turnover intention, 73, 172-181
- Li, N., Zhou, H., & Mikel-Hong, K. (2024), Generative AI enhances team performance and reduces need for traditional teams;
- Liboni, L. B., Cezarino, L. O., Jabbour, C. J. C., Oliveira, B. G., & Stefanelli, N. O. (2019), Smart industry and the pathways to HRM 4.0: Implications for SCM, *Supply Chain Management: An International Journal*, 24(1), 124–146;
- Mantello, P., Ho, M. T., Nguyen, M. H., & Vuong, Q. H. (2023), Machines that feel: Behavioral determinants of attitude towards affect recognition technology—upgrading technology

- acceptance theory with the mindsponge model, *Humanities and Social Sciences Communications*, 10 (430);
- McKinsey & Company. (2025), *The state of AI in 2025: Agents, innovation, and transformation*, McKinsey Global Survey on Artificial Intelligence;
- Misselhorn, C. (2018), *Artificial morality: Concepts, issues and challenges*, *Society*, 55(2), 161–169;
- Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K.-I. (2021), *The role of absorptive capacity and innovation strategy in the design of Industry 4.0 business models: A comparison between SMEs and large enterprises*, *European Management Journal*, 39(3), 333–343;
- Noy, S., & Zhang, W. (2023), *Experimental evidence on the productivity effects of generative artificial intelligence*, *Science*, 381(6654), 187–192;
- Parker, S. K., & Knight, C. (2024). *The SMART model of work design: A higher order structure to help see the wood from the trees*, *Human Resource Management*, 63(2), 265–291
- Puranam, P., Singh, H., & Zollo, M. (2006). *Organizing for innovation: Managing the coordination–autonomy dilemma in technology acquisitions*. *Academy of Management Journal*, 49(2), 263–280.
- Raisch, S., & Krakowski, S. (2021). *Artificial intelligence and management: The automation–augmentation paradox*. *Academy of Management Review*, 46(1), 192–210;
- Ramaul, L., Ritala, P., Kostis, A., & Aaltonen, P. (2025). *Rethinking how we theorize AI in organization and management: A problematizing review of rationality and anthropomorphism*. *Journal of Management Studies*
- Reilly, P. (2019), *The impact of artificial intelligence on the HR function, Which way now for HR and organisational changes?*, *IES Perspectives on HR 2018*, 516, 41–58;
- Rozario, S. D., Venkatraman, S., & Abbas, A. (2019). *Challenges in recruitment and selection process: An empirical study*. *Journal of Management Development*.
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.).
- Saluja, S., Gupta, A., & colleagues. (2024). *Loafing in the era of generative AI*. *Organizational Dynamics*.
- Samarasinghe, K. R., & Medis, A. (2020), *Artificial intelligence based strategic human resource management (AISHRM) for Industry 4.0.*, *Global Journal of Computer Science and Technology*;
- Sengar, S. S., Hasan, A. B., Kumar, S., & Carroll, F. (2024), *Generative artificial intelligence: A systematic review and applications*;
- Soh, C., & Connolly, D. (2021), *New frontiers of profit and risk: The Fourth Industrial Revolution’s impact on business and human rights*, *New Political Economy*, 26(1), 168–185;
- Sonnentag, S., & Frese, M. (2012). *Stress in organizations*. In I. B. Weiner, N. W. Schmitt, & S. Highhouse (Eds.), *Handbook of psychology: Industrial and organizational psychology*, Second Edition, 560–584

- Tang P. M., Koopman, J., McClean S. T., Zhang J. H., Li, C. H., De Cremer, D., Lu, Y., & Ng C. T. S. (2022), When conscientious employees meet intelligent machines: An integrative approach inspired by complementarity theory and role theory, *Academy of Management Journal*, 65;
- Tsai, W.-H. (2023). Artificial intelligence use in organizations: Opportunities and potential behavioral risks for employees. *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*.
- Valtonen, A., Saunila, M., Ukko, J., Treves, L., & Ritala, P. (2025), AI and employee wellbeing in the workplace: An empirical study, *Journal of Business Research*, 199;
- von Krogh, G. (2018), Artificial intelligence in organizations: New opportunities for phenomenon-based theorizing, *Academy of Management Discoveries*, 4(4), 404–409;
- Wang, W., Chen, L., Xiong, M., & Wang, Y. (2023), Accelerating AI adoption with responsible AI signals and employee engagement mechanisms in health care, *Information Systems Frontiers*;
- Xavier DF, Korunka C, Reiter-Palmon R (2025) AI integration and workforce development: Exploring job autonomy and creative self-efficacy in a global context. *PLOS ONE* 20(6): e0319556
- Xu, M., David, J. M., & Kim, S. H. (2018), The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges, *International Journal of Financial Research*, 9(2), 90–95;
- Yam, K. C., Tang, P. M., Jackson, J. C., Su, R., & Gray, K. (2023). The rise of robots increases job insecurity and maladaptive workplace behaviors: Multimethod evidence. *Journal of Applied Psychology*, 108(5), 850–870
- Zhang, X., & Jin, H. (2023), How does smart technology, artificial intelligence, automation, robotics, and algorithms (STAARA) awareness affect hotel employees' career perceptions? A disruptive innovation theory perspective, *Journal of Hospitality Marketing & Management*, 32(2), 264–283;
- Zhou, Q., Chen, K., & Cheng, S. (2024), Bringing employee learning to AI stress research: A moderated mediation model, *Technological Forecasting and Social Change*, 209;
- Zhu, Y., & Wan Mohd Hirwani Wan Hussain. (2025), Artificial intelligence (AI) awareness (2019–2025): A systematic literature review using the SPAR-4-SLR protocol, *Social Sciences & Humanities*, 12;
- Zirar, A. (2023), Can artificial intelligence's limitations drive innovative work behaviour?, *Review of Managerial Science*, 17(6), 2005–2034.

AI Usage and Employees' Perceived Performance: The Role of Autonomy and Job Pressure

Lamara Sukhitashvili, Nutsa Vakhtangadze

Abstract

The aim of this study is to examine the relationship between employees' use of Artificial Intelligence (AI) and their perceived performance within an organizational context. Based on the Job Demands–Resources (JD–R) theory framework, this paper analyzes the role of autonomy as a job resource and job pressure as a job demand in the relationship between AI usage and performance. The construct of artificial intelligence is relatively new in the field of organizational psychology, and its investigation is highly relevant, as existing research indicates a substantial impact on the performance of the employees.

Using an online survey method, the study involved 178 participants employed in different sectors and positions. The findings revealed that the use of artificial intelligence does not have a direct effect on the performance of the employees. Instead, AI usage is indirectly related to the performance through autonomy: the use of AI increases employees' authority to act independently, which in turn improves perceived performance. Additionally, it was confirmed that high levels of job pressure strengthen the relationship between AI use and performance. Specifically, under conditions of high workload, technology becomes a more effective resource for improving performance. Thus, the paper emphasizes that the implementation of artificial intelligence does not automatically lead to increased efficiency; rather, it depends on work-related factors. From a practical perspective, organizations should focus on job design – particularly on increasing employee autonomy—to transform AI technology into an effective job resource.

Keywords: *Artificial Intelligence (AI), AI usage, perceived performance, autonomy, job pressure, JD–R theory.*

მოლების არქიტექტურულ-მხატვრული და ურბანული როლი ქ. თბილისის განვითარებაში

თინათინ ჩიგოგიძე¹; ნათია ქოიავა²

¹არქიტექტურის აკადემიური დოქტორი, პროფესორი, არქიტექტურის, ურბანისტიკისა და დიზაინის ფაკულტეტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი; 595 375 573, t.chigogidze@gtu.ge; ²დოქტორანტი, არქიტექტურის ურბანისტიკისა და გარემოს დიზაინის ფაკულტეტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სამუშაო ადგილი: თბილისის სახელმწიფო სამხატვრო აკადემია: 591 136 119, nat.koiava@yahoo.com

ანოტაცია

სტატიაში განხილულია მრავალფუნქციური ცენტრები, როგორც ახალი ტიპის ჰიბრიდული არქიტექტურული ფორმები, რომლებიც წარმოქმნიან ერთგვარ მიზიდულობის კერებს და გავლენას ახდენენ ქალაქის ყოველდღიურ ცხოვრებაზე. აღწერილი და ერთმანეთზე შედარებული ქ. თბილისის მსხვილი სავაჭრო ცენტრების („თბილისი მოლი“, „გალერია თბილისი“ და „ისტ ფოინტი“) არქიტექტურული და მხატვრული თავისებურებები, ასევე მათი ურბანული როლი ქალაქის განვითარებაში. გამოკვეთილია არსებული პრობლემები, მათ შორის ლოკალური არქიტექტურული იდენტობის ნაკლებობა, რაც გლობალიზაციასა და სტანდარტიზაციას უკავშირდება.

საკვანძო სიტყვები: ლოკალური არქიტექტურული იდენტობა; მოლი; მრავალფუნქციური ცენტრი; ურბანული ინტეგრაცია

შესავალი

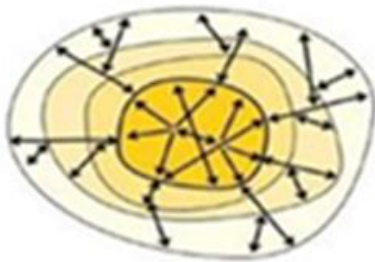
მოლები - მრავალფუნქციური სავაჭრო ცენტრები დღეს ერთ-ერთი აქტუალური თემაა არქიტექტურაში. გლობალიზაციის პროცესებმა, ურბანიზაციამ და მომხმარებლის საზოგადოების კულტურის ამადლებამ ხელი შეუწყო ისეთი არქიტექტურული ობიექტების განვითარებას, რომლებიც თავის თავში რამდენიმე ფუნქციას აერთიანებენ. დღეს მოლები არა მხოლოდ ვაჭრობისთვის განკუთვნილი ტერიტორია, არამედ ინფრასტრუქტურული კომპლექსებია, რომელებიც ვიზიტორთა მაქსიმალურ კომფორტსა და დროის სასიამოვნოდ გატარებაზეა ორიენტირებული. ისინი

გარდაიქმნენ ქალაქის შიდა კვანძებად, სადაც ერთდროულად მიმდინარეობს ყოველდღიური ცხოვრება, დასაქმება, კულტურული ღონისძიებები და სოციალური ურთიერთობები.

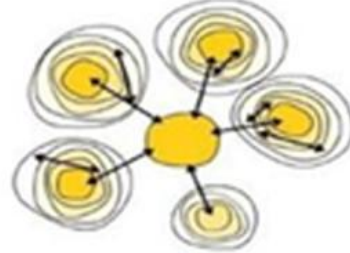
2025 წლის მონაცემებით თბილისში 30 - მდე სავაჭრო ცენტრი ფუნქციონირებს, რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ქალაქების სივრცის სტრუქტურაზე, დინამიკასა და იერსახეზე.

ძირითადი ნაწილი

XX საუკუნეში გაჩენილი, დიდი მასშტაბის სავაჭრო ცენტრები, რომლებიც იერსახისა და ფუნქციის მუდმივ ტრანსფორმაციას განიცდიდნენ, საბოლოოდ ჩამოყალიბდნენ ახალი ტიპის ჰიბრიდულ არქიტექტურულ ფორმად, რომელიც აერთიანებს სავაჭრო, გასართობ, კულტურულ და საზოგადოებრივ ფუნქციებს. მოლეები თანამედროვე ქალაქის ერთ-ერთ მთავარ ელემენტებად, ერთგვარ ახალი ტიპის შემკვრელ ბირთვებად იქცნენ. მათი გაჩენა ქალაქში ან მიმდებარე ტერიტორიაზე, ნიშნავს ურბანული მოდელის (ქალაქის ტრადიციული, მონოცენტრული მოდელიდან პოლიცენტრულზე გადასვლას) და ზოგადად ქალაქის ცხოვრების წესის ცვლას (სურ. 1, 2). ამ მოვლენას პოზიტიურთან ერთად, ნეგატიური გავლენის საშიშროებაც ახლავს. მაგალითად: არასწორი ურბანული დაგეგმარების შემთხვევაში მოლი შესაძლოა ვერ ჩაეწეროს ქალაქის ქსელში, შეიქმნას გადაადგილებასა და პარკირების პრობლემები, მოლში ზედმეტად კონცენტრირებულმა ფუნქციებმა შესაძლოა გამოიწვიოს ქალაქის ნაწილების არათანაბარი განვითარება და ა.შ.



სურ. 1 მონოცენტრული ქალაქის ურბანული მოდელი



სურ. 2 პოლიცენტრული ქალაქის ურბანული მოდელი

XXI საუკუნეში, სავაჭრო ცენტრები გადაიქცა კომპლექსურ, მრავალფუნქციურ სივრცეებად. მათ სტრუქტურაში გაჩნდა ისეთი ფუნქციები, როგორიცაა: კინოთეატრები, გასართობი, სპორტული და სილამაზის ცენტრები, ზოოპარკები, გოლფის მოედნები, გიგანტური აკვარიუმები და ა.შ. მოლი გახდა არა მხოლოდ სავაჭრო, არამედ სოციალური აქტივობის წერტილი და ფაქტიურად ქალაქის ცენტრის ფუნქცია შეითავსა. [1]

თანამედროვე მოლეები გამოირჩევიან მასშტაბური შიდა სივრცეებით და ორიგინალური ფასადებით, რომლებიც ხშირად გარკვეულ ასოციაციებს იწვევენ, რითაც უფრო ცნობადი და დასამახსოვრებელი ხდებიან. როგორც მაგალითად: **ტომას ხიზევიკის** დიზაინით შექმნილი კონსტრუქცია - „Vessel“, რომელიც ნიუ-იორკის ცენტრში, მრავალფუნქციურ ცენტრ „Hudson-Yards“ – ის წინ არის აღმართული და მნახველებში განსხვავებულ ასოციაციებს იწვევს. მას ადარებენ გემს, ბზიკების ბუდეს,

ეიფელის კოშკს და ა.შ. (სურ. 3) სინამდვილეში კი ის წარმოადგენს კიბეს, 80 ბაქნითა და ასვლის 154 ვარიანტით. ასევე შიძლება ვახსენოთ სავაჭრო ცენტრი „ემფორია“ (შვედეთი, არქიტექტორი გერტ ვინგარდი), რომელიც ცნობილია თავისი ორიგინალური, ოქროსფერი მინის ფასადებით, რომლებიც იწვევენ დამდნარი ქარვის ასოციაციას (სურ. 4). მსგავსი სივრცეების პროექტირებისას ხშირად გამოიყენება ატრიუმული ტიპის გეგმარება, რაც შიდა სივრცეთა ვიზუალურ გახსნილობას და ადამიანთა ნაკადების თავისუფალ გადაადგილებას უზრუნველყოფს, ასევე ბუნებრივი განათების მაქსიმალურად გამოყენების საშუალებასაც იძლევა. [2] ინფორმაციული ტექნოლოგიების ეპოქაში, მოქალაქეების ცხოვრების წესის, საქმიანობის სფეროების და კულტურული მოთხოვნილებების სწრაფი ცვლა იწვევს მუდმივ ცვლილებებს არქიტექტურაში და შიდა სივრცეების სხვაგვარ ორგანიზებას მოითხოვს. თანამედროვე ტენდენციებში დიდი ადგილი უკავია შიდა სივრცის ფუნქციურ ზონირებას ანუ სხვადასხვა დანიშნულების ობიექტების ერთიან სივრცით სისტემაში გაერთიანებას, ასევე პრიორიტეტია კომუნიკაციის პროცესის ხაზგასმა, შიდა სივრცის დინამიური, ვიზუალურად ეფექტური, ტექნოლოგიურად განვითარებული კომფორტული გარემოს შექმნა, სხვადასხვა დემოგრაფიული და სოციალური ფენების, ასევე კულტურის წარმომადგენლების მიმართ გახსნილობა, უსაფრთხოების განცდის შექმნა, ფასადისა და ინტერიერის დიზაინში ვიზუალური იდენტობის ელემენტების შეტანა და ა.შ. ამ და კიდევ მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული მოლის ცნობადობა, ფუნქციურობა და წარმატება.



სურ. 3 „Vessel“, „Hudson-Yards“, ნიუ-იორკი



სურ. 4 სავაჭრო ცენტრი „ემფორია“, შვედეთი

მსოფლიოში ამ კუთხით მიმდინარე პროცესები საქართველოზეც აისახა. ქვეყნის მასშტაბით მოლების მშენებლობა ინტენსიურად მიმდინარეობს. განსაკუთრებული ყურადღების ღირსია ქალაქი თბილისი, სადაც ბოლო წლებში ერთმანეთისგან განსხვავებული, რამდენიმე მსხვილი მრავალფუნქციური სავაჭრო ცენტრი აშენდა. მათ შორის შეიძლება გამოიყოს სამი, ყველაზე თვალსაჩინო მაგალითი: „თბილისი მოლი“, „გალერია თბილისი“ და „ისტ ფოინტი“. ცენტრები განსხვავდებიან, როგორც

არქიტექტურით, ასევე სივრცითი ორგანიზებით და ქალაქის ურბანულ გარემოსთან ურთიერთობით.

ტიპოლოგიური ტერმინი - „მოლი“ (რაც გულისხმობს: მთლიანად დახურულ შენობას, დერეფნულ გეგმარებას, ატრიუმს, კლიმატ კონტროლს და ა.შ.) ყველაზე მეტად, ჩამონათვალში თავისი მასშტაბურობით გამორჩეულ „თბილისი მოლს“ („Tbilisi Mall“) შეეფერება. ის საქართველოში პირველი თანამედროვე სავაჭრო ცენტრია, რომელიც 2012 წელს გაიხსნა და უდიდესი გავლენა მოახდინა დედაქალაქის ურბანულ განვითარებაზე. საქართველოში მანამდე არ არსებული, ახალი ტიპის სავაჭრო-გასართობი სივრცის ქალაქის ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილში (დავით აღმაშენებლის გზატკეცილი) განთავსება სტრატეგიული გადაწყვეტილება იყო, რასაც მოჰყვა ქალაქის პერიფერიული ზონის განვითარება (სურ. 5).



სურ. 5 ქალაქის პერიფერიული ზონის განვითარება წლების მიხედვით

გზატკეცილის ინფრასტრუქტურის განახლება და ტრანსპორტის გამტარიანობის გაზრდა, მიმდებარე უბნების გზების მოდერნიზაცია, ტერიტორიაზე გაჩენილი ახალი საცხოვრებელი კომპლექსები და სხვადასხვა კომერციული ობიექტები ქალაქის ამ მხარის განვითარებას და გაფართოვებას ადასტურებს. [3] სავაჭრო ცენტრების კლასიფიკაციის ევროპული სტანდარტების მიხედვით (ფართობი, მომხმარებელთა ნაკადი, სპეციალიზაცია, ადგილმდებარეობა) „თბილისი მოლი“ მიეკუთვნება **გარეუბნის ცენტრების** კატეგორიას. შენობა შედგება სხვადასხვა სიმაღლის და მოცულობის რამდენიმე ბლოკისგან და თანამედროვე არქიტექტურის ტიპიურ ნიმუშს წარმოადგენს. მოლის ფასადში მკაფიოდ ვლინდება ნეომოდერნისტული სტილი და გლობალური, ეგრეთ წოდებული „ნეიტრალური მოლის“ ვიზუალისთვის დამახასიათებელი დეტალები (სურ. 6). ვინაიდან შენობას აქვს ტიპიური იერსახე და არ არის მორგებული თბილისის სივრცით სტრუქტურაზე, თავისუფლად იქნებოდა შესაძლებელი მისი განთავსება ნებისმიერი სხვა ქალაქის გარეუბანშიც. ნაგებობა ატრიუმული ტიპისაა. მოლის სიმეტრიული და მარტივად გასაგები სტრუქტურა ადვილი ორიენტაციის საშუალებას იძლევა. დიდ ატრიუმში (მოლში სამი ატრიუმია) შექმნილია ეგრეთ წოდებული „ქალაქური მოედნის“ იმიტაცია (სურ. 7). ამ ეფექტს აძლიერებს ბუნებრივი განათებაც, რომელიც ვიზიტორთა ნაკადების გადაადგილების მიმართულებას არეგულირებს. ყველა მთავარი გადაადგილების ღერძი: ესკალატორები, ლიფტები,

გალერეები ატრიუმის ირგვლივაა განლაგებული. ვერტიკალურად გახსნილი სივრცეები კი მაქსიმალური ხილვადობის საშუალებას იძლევა.



სურ. 6 „თბილისი მოლი“



სურ. 7 „თბილისი მოლი“ - ატრიუმი

2023 წელს მოლის რენოვაციის ფარგლებში, მოხდა შიდა სივრცის განახლება. [4] ინტერიერში ნათელი ფერების შემოტანამ სივრცე ვიზუალურად გაზარდა და მეტად გამოკვეთა კვების, ბავშვთა კუთხის და კინოთეატრის ზონები, რომელიც მთლიანობაში არსებული სინათლისა და სისუფთავის ფონზე წარმოქმნის ერთგვარ ფერად ლაქებს და ქმნის სასიამოვნო, მიმზიდველ ინტიმურ სივრცეებს. [5]

მრავალფუნქციური ცენტრების სრულიად განსხვავებულ მოდელს წარმოადგენს სავაჭრო ცენტრი „ისტ ფოინტი“ (East point), ის ერთ-ერთი მასშტაბური, თანამედროვე, მრავალფუნქციური, კომპლექსია საქართველოში, რომელიც მდებარეობს ქალაქის აღმოსავლეთ ნაწილში და ისევე, როგორც „თბილისი მოლი“, აძლიერებს თბილისის პოლიცენტრულ სტრუქტურას. „ისტ ფოინტი“ ქალაქის სხვა მოღებისგან თავისი სივრცითი ორგანიზებით გამოირჩევა. მისი არქიტექტურული კონცეფცია ღია ტიპის სავაჭრო სივრცის, ე.წ. სავაჭრო სოფელის (Shopping Village) ტიპოლოგიურ მოდელს ეფუძნება, რაც გულისხმობს ღია ცის ქვეშ ორგანიზებულ სავაჭრო ობიექტს (სურ. 9). „ისტ ფოინტი“ თავისი სტრუქტურით, ქუჩის ტიპის სივრცეებით და მოედნებით უსაფრთხო უბნის/ქალაქის იმიტაციას ქმნის. სავაჭრო, თუ სხვა ობიექტები განლაგებულია დამოუკიდებელ შენობებში ფუნქციური ზონების მკაფიო გამიჯვნით, რაც კიდევ უფრო ამძაფრებს შეგრძნებას თითქოს ვიზიტორი არა სავაჭრო ცენტრში, არამედ პატარა ქალაქის ქუჩებში გადაადგილდება. კომპლექსის გეგმარებაში გათვალისწინებულია ფართო ავტოსადგომები, რომლებიც უსაფრთხოების გაზრდის მიზნით არ იკვეთება საფეხმავლო სივრცეებთან. ამგვარი გადაწყვეტებით „ისტ ფოინტი“ განსხვავდება ტრადიციული სავაჭრო ცენტრებისგან, რაც საბოლოო ჯამში იზიდავს მომხმარებელს, რაც ახალი ბრენდების მხრიდან ამ კონკრეტული მოლით დაინტერესებით და მისი სავაჭრო სივრცის გაფართოვების საჭიროებით მტკიცდება. (ლომინაძე, 2024) [6]



სურ. 9 მრავალფუნქციური სავაჭრო ცენტრი „ისტ ფოინტი“

კლასიფიკაციის მიხედვით სხვა კატეგორიაში ხვდება „გალერია თბილისი“. „თბილისი მოლის“ და „ისტ ფოინტისგან“ განსხვავებით ეს მრავალფუნქციური სავაჭრო ცენტრი მდებარეობს დედაქალაქის გულში, რუსთაველის გამზირზე, ქალაქის ისტორიულ და ადმინისტრაციულ ცენტრში (სურ. 10). „გალერია თბილისი“ აშენდა 2017 წელს ყოფილი უნივერსალის შენობის ადგილზე და თბილისის ერთ-ერთ ყველაზე პოპულარულ და ხალხმრავალ სავაჭრო ცენტრად იქცა, რაც მხოლოდ მისი ადგილმდებარეობის მხრივ მომგებიანი პოზიციის გამო არ მომხდარა. ადგილმდებარეობასთან ერთად ხალხს იზიდავს: ფუნქციური მრავალფეროვნება, პრესტიჟი, პრემიუმ ბრენდები, პრემიუმ კვების ობიექტები, აქ გამართული წარმოდგენები და ღონისძიებები. შენობაში მდებარეობს „თავისუფალი თეატრი“, „ალ. გრიბოედოვის სახელობის სახელმწიფო დრამატული თეატრი“, კინოთეატრი „კავკა“, ბოულინგის დარბაზი, საბავშვო გასართობი ცენტრი, სასტუმრო, სუპერმარკეტი, ავტოსადგომი, ასევე შენობაში ინტეგრირებულია მეტროსადგური „თავისუფლების მოედანი“, რაც ზრდის ხალხის მოძრაობის ინტენსიობას. „გალერია თბილისი“ ფოკუსირებულია ტურისტებზე და ბიზნეს სეგმენტზე.



სურ. 10 „გალერია თბილისი“

ექვს სართულიან შენობაში გალერეის ტიპის წყობაა გამოყენებული, სავაჭრო სივრცეები კი განლაგებულია გალერეის გასწვრივ. შენობა ინტეგრირებულია ქალაქის ისტორიულ ცენტრში და აქტიურად ურთიერთობს ქუჩასთან. შენობის ფასადი ადაპტირებულია რუსთაველის გამზირის მასშტაბსა და რიტმთან, თუმცა შესამჩნევია ლოკალური არქიტექტურული იდენტობის ნაკლებობა. მოლის არქიტექტურა და

ინტერიერი გლობალურ, სტანდარტულ მოდელს იმეორებს და ნაკლებად გამოხატავს ადგილობრივ კულტურას და ისტორიას. შიდა სივრცე ნაწილობრივ იზოლირებულია გარე სამყაროსგან, რაც ზღუდავს ქალაქთან პირდაპირ ვიზუალურ კავშირს. ინტერიერის დიზაინი თანამედროვე, მინიმალისტურ სტილშია გადაწყვეტილი. აქცენტი გაკეთებულია ატრიუმზე, რომელიც მოლის ბირთვს წარმოადგენს. ბუნებრივი და თანამედროვე ხელოვნური განათება, ნათელი ფერები, გამოყენებული მასალები, ვიზიტორებისთვის სასიამოვნო, კომფორტულ გარემოს შექმნას უწყობს ხელს.

დასკვნა:

თბილისში მრავალფუნქციური ცენტრების განვითარებამ დიდი გავლენა მოახდინა როგორც ეკონომიკურ, ასევე სოციალურ ცხოვრებაზე. თუმცა არის პრობლემები მათი ურბანული ინტეგრაციის, არქიტექტურულ იდენტობისა და საზოგადოებრივი სივრცეების ნაკლებობასთან დაკავშირებით. თბილისის ზოგიერთი სავაჭრო ცენტრი მდებარეობს პერიფერიულ ზონაში და არ არის ორიენტირებული ფეხით მოსიარულეთა ნაკადებზე, შესაბამისად ასეთი მოლები ნაკლებადაა ჩართული ქალაქის ურბანულ ქსელში. ასევე აღსანიშნავია, რომ თბილისის მოლების არქიტექტურა ძირითადად საერთაშორისო სტანდარტული მოდელების პრინციპებს ეფუძნება, რაც სივრცის სტანდარტიზაციას იწვევს და არ წარმოაჩენს მათ უნიკალობას. სტანდარტიზაცია შეიწინააღმდეგება ასევე თბილისის მოლების შიდა სივრცეებშიც, სადაც იგრძნობა დინამიურობის და ინდივიდუალიზმის დეფიციტი და ნაკლებად გვხვდება ინტერიერის ორიგინალური გადაწყვეტები.

ქ. თბილისის მოლების („თბილისი მოლი“, „ისთ ფოინტი“, „გალერია თბილისი“) მაგალითები ცხადყოფს, რომ თბილისის მოლების არქიტექტურა ვითარდება განსხვავებული სცენარებით. თბილისში არსებულ მრავალფუნქციურ ცენტრებს განსხვავებული ურბანული, არქიტექტურული თუ სხვა მახასიათებლები გააჩნიათ. „გალერია თბილისი“ ყველაზე მეტად არის ინტეგრირებული ქალაქთან, ის გახსნის დღიდანვე იქცა ქალაქის ცხოვრების ნაწილად, რასაც თავისი მიზეზები გააჩნია: ადგილმდებარეობა, უშუალო კავშირი ქუჩასთან, მოლი მოსახერხებელია შეხვედრებისთვის, დროის გასატარებლად და ა.შ. მისგან განსხვავებით „თბილისი მოლი“ წარმოადგენს ფუნქციურად გამართულ, თუმცა არქიტექტურულად შედარებით ნეიტრალურ მოდელს, რომლის მთავარი ღირებულება პრაქტიკულობისა და ეფექტურობაში მდგომარეობს. ის მთლიანად ორიენტირებულია კომერციულ აქტივობაზე, ხოლო „ისთ ფოინტი“ მართალია ქმნის ურბანული სივრცის იმიტაციას, თუმცა არანაირი კავშირი არ აქვს ქალაქის ისტორიულ ცენტრთან და ლოკალურ არქიტექტურულ იდენტობასთან. მიუხედავად ამ ორი დიდი მოლის ეკონომიკური მნიშვნელობისა, გარემოება, რომ ისინი მდებარეობენ ქალაქის პერიფერიაში და ნაკლები შეხება აქვთ ქალაქის ისტორიულ სოციალურ სივრცესთან განაპირობებს მათ გლობალიზაციას და ნეიტრალურობას.

ქალაქში სავაჭრო ცენტრების რაოდენობისა და მასშტაბის ზრდა ართულებს მომხმარებლის მიზიდვას. კონკურენტული გარემო მოითხოვს კომფორტის უფრო მაღალი დონის შეთავაზებას და ეგრეთ წოდებული „მომხმარებლის გზის“ („customer journey“) ახლებურად დაგეგმვას. ამ მიზნით მოლემში სავაჭრო ცენტრებისთვის დამახასიათებელი ტრადიციული აქტივობების პარალელურად ტარდება სხვა და სხვა საზოგადოებრივი ღონისძიებები, გამოფენები, კონცერტები, პრეზენტაციები და ა. შ.

ამგვარად, მოლების არქიტექტურულ-მხატვრული სახე პირდაპირ არის დაკავშირებული ურბანულ კონტექსტთან, ქალაქის განვითარების სტრატეგიასთან და საზოგადოებრივი სივრცეების საჭიროებებთან. საქართველოში ეს ტიპოლოგია ჯერ კიდევ ტრანსფორმაციის ეტაპზეა. მომავალში, მოლების განვითარება არა მხოლოდ ფუნქციურ ეფექტურობას, არამედ ესთეტიკურ, სოციალურ და ურბანულ პასუხისმგებლობასაც იგულისხმებს, რის საფუძველზეც ახალი არქიტექტურული ფორმა - „მოლი“, თანამედროვე ქალაქის იდენტობის სრულფასოვან ნაწილად იქცევა.

ლიტერატურა

1. ჯეიმისონი, ფ. (2016 წლის 25 09). მომავლის ქალაქი. "არილი" საზოგადოებრივ-ლიტერატურული ჟურნალი. (ლ. დორეული, რედ.) თბილისი, თბილისი, საქართველო: „არილი“ საზოგადოებრივ-ლიტერატურული ჟურნალი.
<https://arilimag.ge/>
2. Hachem, Hasan. (2015). Atrium.
https://surface.syr.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1293&context=architecture_theses
3. Broadcaster, პ. ა. (2019 წლის 15 03). თბილისის გენ. გეგმის მიმართულებები. (მ. სალუქვაძე, ინტერვიუერი) <https://www.youtube.com/watch?v=f22-nQ4otwk>
4. <https://lsg.solutions/project/tbilisi-mall-renovation/>
5. თბილისი მოლის ახალი სიცოცხლე იწყება. (2023). მოპოვებული marketer.ge:
<https://www.marketer.ge/tbilisi-mall-renovacia/>
6. ლომინაძე, Q. G.-ს. (2024 წლის 15 4). თბილისის რითეილ ბაზრით სულ უფრო მეტი საერთაშორისო ბრენდი ინტერესდება - Quadrum Georgia. (მ. მელიქიშვილი, ინტერვიუერი) <https://bp.ge/news/biznesi/tbilisis-riteil-bazrit-sul-ufro-meti-saertashoriso-brendi-interesdeba-quadrum-georgia>.

Architectural, Aesthetic and Urban Role of Malls in the Development of Tbilisi

Tinatin Chigogidze¹; Natia Koiava²

¹PhD in architecture, Faculty of Architecture, Urban Planning and Design, Georgian Technical University; ²PhD candidate, Faculty of Architecture, Urban Planning and Design, Georgian Technical University

Abstract

In this article we discuss multifunctional centers (shopping malls) as part of the modern city, emphasizing their significant role both in urban development and in the daily lives of citizens. We have reviewed big shopping centers in Tbilisi: “Tbilisi Mall,” “Galleria Tbilisi,” and “East Point.” We have categorized these Malls within relevant classification frameworks and have described and analyzed their architectural and artistic characteristics, spatial organization, and functional structure, etc. The article also addresses both the positive impacts and the challenges associated with the emergence of malls in Tbilisi, such as issues related to urban integration, architectural identity and lack of public spaces.

Keywords: local architectural identity; mall; multifunctional center; urban integration.

განახლებადი ენერგიის წყაროების ინტეგრაცია მოძველებულ ელექტროენერგეტიკულ ქსელებში: ოპერაციული მართვა და ტექნოლოგიური ადაპტაცია

ნინო გიორგიშვილი¹; ზურაბ კუტიბაშვილი²

¹საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ასოცირებული პროფესორი; ²რაუფ აბლიაზოვის აღმოსავლეთ ევროპის უნივერსიტეტის ბიზნეს-ადმინისტრირების (მენეჯმენტის) ფაკულტეტის მაგისტრი

ანოტაცია

განახლებადი ენერგიის წყაროების ინტეგრაცია არსებულ ელექტროენერგეტიკულ ქსელებში არა მხოლოდ ინფრასტრუქტურულ, არამედ ტექნოლოგიურ და ოპერაციულ გამოწვევებს წარმოშობს. განსაკუთრებით პრობლემურია მოძველებული ქსელები, რომლებიც არ არიან გათვლილნი განახლებადი ენერგიის გენერაციის ქსელში ინტეგრირებისას. სტატიაში გაანალიზებულია განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციის გავლენა ქსელის ოპერირებაზე, დისპეტჩერიზაციაზე და რეალურ დროში მართვის პროცესზე. განხილულია ინვენტორული გენერაციის თავისებურებები, ქსელის ინერციის პრობლემის მაქსიმალური შემცირება, დამცავი და საკონტროლო ალგორითმების ადაპტაციის საჭიროება. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ენერგიის დაგროვების სისტემებს და მოქნილ მართვის მექანიზმებს, როგორც ქსელის საიმედოობის გაზრდის ინსტრუმენტებს. კვლევის შედეგები ცალსახად გვიჩვენებს, რომ მოძველებულ ქსელის პირობებში განახლებადი ენერგიის ეფექტიანი მართვა მხოლოდ შესაძლებელია ტექნოლოგიური ადაპტაციის გზით.

საკვანძო სიტყვები: ქსელის ოპერირება, ოპერატიული გენერაცია განახლებადი ენერგია, ენერგიის დაგროვება.

შესავალი

ელექტროენერგეტიკული სისტემების ტრანსფორმაცია განახლებადი ენერგიის წყაროების მიმართულებით წარმოადგენს ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს პროცესს თანამედროვე ენერგეტიკაში. გლობალური კლიმატური ცვლილებები, ნახშირბადოვანი ემისიების შემცირების აუცილებლობა და ენერგეტიკული უსაფრთხოების გაძლიერების

მოთხოვნა ქვეყნებს აიძულებს, ტრადიციული გენერაციის ნაცვლად აქტიურად დაინერგოს მზის, ქარის, ჰიდრო და სხვა განახლებადი ენერგიის ტექნოლოგიები. აღნიშნული პროცესი არ შემოიფარგლება მხოლოდ გენერაციის წყაროების შეცვლით, არამედ ფუნდამენტურად ცვლის ელექტროენერგეტიკული სისტემების დაგეგმვის, ოპერირებისა და მართვის მოდელს. ტრადიციულ ენერგოსისტემებში გენერაციის ძირითადი ნაწილი ეფუძნებოდა სინქრონულ გენერატორებს, რომლებიც მუშაობდნენ სტაბილურ რეჟიმში და უზრუნველყოფდნენ სისტემის საკმარის ინერციას და სტაბილურობას. ასეთი სისტემები ხასიათდებოდა მაღალი პროგნოზირებადობით, რაც დისპეტჩერიზაციასა და ძაბვის რეგულირებას შედარებით მარტივ ამოცანად აქცევდა. ქსელის ოპერატორებს ჰქონდათ მკაფიო კონტროლი გენერაციისა და დატვირთვის ბალანსზე, ხოლო ავარიული სიტუაციების მართვა ძირითადად ხორციელდებოდა გამოცდილი და დამკვიდრებული მეთოდებით. განახლებადი ენერგიის წყაროების ფართო ინტეგრაციამ ეს სქემა არსებითად შეცვალა. ქარისა და მზის ელექტროსადგურები ხასიათდება არასტაბილური და ამინდის პირობებზე დამოკიდებული გამომუშავებით, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს ენერგოსისტემის ოპერირებას. განსაკუთრებით მწვავედ ეს პრობლემა გვხვდება მოძველებულ ელექტროქსელებში, რომლებიც თავდაპირველად არ იყო გათვლილი დეცენტრალიზებულ და ცვალებად გენერაციაზე. ასეთ პირობებში ოპერაციული მართვა ხდება ერთ-ერთი ყველაზე სუსტი რგოლი, რაც ზრდის ავარიული რეჟიმების, სისტემური არასტაბილურობის, გათიშვებისა და ენერგომომარაგების ხარისხის გაუარესების რისკს.

სტატიის მიზანია განიხილოს განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციის ძირითადი ოპერაციული გამოწვევები მოძველებულ ელექტროენერგეტიკულ ქსელებში, გაანალიზოს არსებული პრობლემები და გამოკვეთოს შესაძლო ტექნიკური და მართვითი გადაწყვეტილებები, რომლებიც ხელს შეუწყობს სისტემის სტაბილურობის, საიმედოობისა და ენერგომომარაგების ხარისხის გაუმჯობესებას.

მოძველებული ელექტროენერგეტიკული ქსელები ხშირად ხასიათდება შეზღუდული გამტარუნარიანობით, არასაკმარისი ავტომატიზაციითა და დაცვის მოძველებული სისტემებით. ამგვარ ინფრასტრუქტურაში განახლებადი ენერგიის წყაროების ინტეგრაცია იწვევს ახალი ტიპის ტექნიკურ გამოწვევებს, როგორიცაა ძაბვის მერყეობა, მოკლე ჩართვის დენების ცვლილება და სისტემის ინერციის შემცირება. აღნიშნული ფაქტორები პირდაპირ გავლენას ახდენს როგორც ქსელის საიმედოობაზე, ისე მომხმარებლებისთვის მიწოდებული ელექტროენერგიის ხარისხზე. ოპერაციული მართვის თვალსაზრისით განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს დისპეტჩერიზაციის ახალი მიდგომების დანერგვა. ტრადიციული ცენტრალიზებული მართვის მოდელები ხშირად ვერ პასუხობს დინამიკურ და სწრაფად ცვალებად პროცესებს, რომლებიც დამახასიათებელია მაღალი წილით განახლებადი გენერაციის მქონე სისტემებისთვის. შედეგად, იზრდება მოთხოვნა ციფრულ ტექნოლოგიებზე, პროგნოზირების

გაუმჯობესებულ ალგორითმებზე, რეალურ დროში მონიტორინგისა და ავტომატიზებული მართვის სისტემებზე. აღსანიშნავია, რომ განვითარებად ქვეყნებში, მათ შორის საქართველოში, განახლებადი ენერგიის ინტეგრაცია ხშირად ხორციელდება არსებული, მრავალი ათწლეულის წინ აგებული ქსელების გამოყენებით, რომლებიც ძირითადად სოფლებში და რაიონებში გვხვდება. ეს გარემოება კიდევ უფრო ამძაფრებს ტექნიკურ და ოპერაციულ სირთულეებს. მიუხედავად იმისა, რომ საქართველოს გააჩნია მნიშვნელოვანი ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალი, მზის და ქარის ენერგიის განვითარების მზარდი პერსპექტივა ქსელის მოდერნიზაციის ტემპი ხშირ შემთხვევაში ჩამორჩება გენერაციის განვითარებას. შედეგად, ენერგოსისტემა დგება გამოწვევის წინაშე, როგორ უზრუნველყოს განახლებადი ენერგიის უსაფრთხო და ეფექტური ინტეგრაცია ქსელის საიმედოობის შელახვის გარეშე. ამ კონტექსტში განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს ოპერაციული მართვის გაუმჯობესება, როგორც ტექნიკური, ისე ორგანიზაციული თვალსაზრისით. საჭირო ხდება ქსელის ოპერატორების კომპეტენციების გაძლიერება, ახალი რეგულაციური ჩარჩოების ჩამოყალიბება და თანამედროვე ტექნოლოგიების ინტეგრაცია. მხოლოდ კომპლექსური მიდგომით არის შესაძლებელი მოძველებული ელექტროქსელების ადაპტაცია განახლებადი ენერგიის მზარდი წილის პირობებში.

ძირითადი ნაწილი

ელექტროენერგეტიკული სისტემების ოპერაციული მართვა წარმოადგენს იმ ძირითად მექანიზმს, რომლის მეშვეობითაც უზრუნველყოფილია გენერაციისა და მოხმარების ბალანსი, სიხშირისა და ძაბვის ნორმალური პარამეტრების შენარჩუნება და ავარიული სიტუაციების მინიმიზაცია. თუმცა, მოძველებული ელექტროქსელების შემთხვევაში ეს პროცესი მნიშვნელოვნად განსხვავდება თანამედროვე, ციფრულად აღჭურვილი სისტემებისგან და მრავალი შეზღუდვით ხასიათდება. აღნიშნული თავისებურებები განსაკუთრებით თვალსაჩინო ხდება მაშინ, როდესაც ასეთი ქსელები განახლებადი ენერგიის ცვალებად გენერაციასთან ინტეგრაციას იწყებენ.

მოძველებული ელექტროენერგეტიკული ქსელების ოპერაციული მართვა, როგორც წესი, ეფუძნება ტრადიციულ დისპეტჩერიზაციის მოდელს, რომელიც ჩამოყალიბდა თანამედროვე მსოფლიოში. ამ მოდელის მთავარი მახასიათებელია ცენტრალური დისპეტჩერული პუნქტის მიერ გენერაციისა და დატვირთვის მართვა, სადაც გადაწყვეტილებები მიიღება შეზღუდული რაოდენობის მონაცემების საფუძველზე. ქსელის მუშაობა იგეგმება წინასწარ შედგენილი სტატიკური დატვირთვის გრაფიკების მიხედვით, რომლებიც ეყრდნობა ისტორიულ მონაცემებსა და პროგნოზებს. ცენტრალიზებული მართვის პირობებში გენერაციის ძირითადი ნაწილი წარმოდგენილია დიდი სიმძლავრის ელექტროსადგურებით, რომელთა ჩართვა და

გამორთვა შესაძლებელია დისპეტჩერის ბრძანებით. ასეთი მიდგომა ეფექტიანი იყო მაშინ, როდესაც სისტემაში გენერაციის წყაროები ხასიათდებოდა მაღალი პროგნოზირებადობითა და დაბალი დინამიკურობით. ქსელის ინერცია და სინქრონული გენერატორების ბუნებრივი რეგულირების შესაძლებლობები უზრუნველყოფდა სიხშირისა და ძაბვის სტაბილურობას მცირე გადახრების შემთხვევაშიც. თუმცა, ტრადიციული დისპეტჩერიზაციის მოდელი პრაქტიკულად არ ითვალისწინებს სწრაფად ცვალებად გენერაციას, რაც დამახასიათებელია მზისა და ქარის ენერგიისთვის. სტატიკური დატვირთვის გრაფიკები ვერ ასახავს რეალურ დროში მიმდინარე პროცესებს, ხოლო გადაწყვეტილებების მიღება ხშირად ხდება დაგვიანებული ან არასრული ინფორმაციის საფუძველზე. შედეგად, სისტემის რეაქცია გენერაციის ან დატვირთვის მოულოდნელ ცვლილებებზე ხდება არასაკმარისად ეფექტური. დამატებით პრობლემას წარმოადგენს ის ფაქტი, რომ მოძველებულ ქსელებში დისპეტჩერიზაცია ხშირად ხორციელდება ნახევრადავტომატურ ან სრულად ხელით რეჟიმში. ოპერატორებზე დაკისრებული მაღალი პასუხისმგებლობა და ინფორმაციის დეფიციტი ზრდის ადამიანური შეცდომის რისკს, განსაკუთრებით რთულ ავარიულ სიტუაციებში. ეს გარემოება კიდევ უფრო ამცირებს სისტემის მოქნილობას და ადაპტაციის უნარს თანამედროვე ენერგეტიკული გამოწვევების პირობებში.

მოძველებული ელექტროენერგეტიკული ქსელების ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი სისუსტე უკავშირდება მონიტორინგისა და მონაცემების დეფიციტს. ასეთი ქსელები, როგორც წესი, აღჭურვილია შეზღუდული რაოდენობის საზომი მოწყობილობებით, რომლებიც განლაგებულია მხოლოდ მთავარ ქვესადგურებსა და სტრატეგიულ კვანძებში. შედეგად, ქსელის დიდი ნაწილი რჩება „უხილავი“ ოპერატორებისთვის, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს მისი რეალური მდგომარეობის შეფასებას. გაზომვების იშვიათობა იწვევს იმას, რომ დისპეტჩერს არ აქვს სრული სურათი ძაბვის დონეების, დენების განაწილებისა და დატვირთვის ცვლილებების შესახებ. ეს განსაკუთრებით პრობლემურია დეცენტრალიზებული გენერაციის პირობებში, როდესაც მცირე სიმძლავრის განახლებადი წყაროები შეიძლება ლოკალურად იწვევდეს ძაბვის გადაჭარბებას ან უკუდენის წარმოქმნას. მონიტორინგის არარსებობის პირობებში ასეთი მოვლენები ხშირად გამოვლინდება მხოლოდ ავარიის ან მომხმარებლის ჩივილის შემდეგ. რეაგირების დრო მოძველებულ ქსელებში, როგორც წესი, მაღალია. ავარიული მდგომარეობის იდენტიფიკაცია ხშირად ხდება დაგვიანებით, ხოლო პრობლემის ლოკალიზაცია და აღმოფხვრა მოითხოვს მნიშვნელოვან დროსა და ადამიანურ რესურსს. თანამედროვე სენსორებისა და ავტომატური დიაგნოსტიკის სისტემების არარსებობა ნიშნავს, რომ ავარიებზე პასუხი დიდწილად დამოკიდებულია ოპერატორის გამოცდილებასა და ინტუიციას, რაც არ უზრუნველყოფს ოპტიმალურ შედეგს. გარდა ამისა, მონაცემების დეფიციტი ზღუდავს პროგნოზირების შესაძლებლობებს. განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციის პირობებში ეფექტიანი ოპერაციული მართვა მოითხოვს არა მხოლოდ მიმდინარე მდგომარეობის ცოდნას, არამედ მოკლევადიანი

პროგნოზების არსებობასაც. მოძველებულ ქსელებში არსებული მონაცემთა ნაკლებობა ხელს უშლის დატვირთვისა და გენერაციის ზუსტ პროგნოზირებას, რაც ზრდის რეზერვების საჭიროებას და ამცირებს სისტემის ეკონომიკურ ეფექტიანობას. მონიტორინგისა და მონაცემების დეფიციტი ასევე უარყოფითად აისახება ქსელის განვითარების დაგეგმვაზე. ელექტროენერგიის ოპერატორებს არ გააჩნიათ დეტალური ინფორმაცია ქსელის სუსტი წერტილების, დატვირთვის პიკებისა და რეალური დანაკარგების შესახებ. შედეგად, საინვესტიციო გადაწყვეტილებები ხშირად მიიღება ზოგადი შეფასებების საფუძველზე და არა ზუსტ ტექნიკურ ანალიზზე დაყრდნობით. საბოლოო ჯამში, მოძველებული ქსელების ოპერაციული მართვის თავისებურებები ტრადიციული დისპეტჩერიზაციის მოდელი და მონიტორინგისა და მონაცემების დეფიციტი ქმნის მნიშვნელოვან ბარიერებს განახლებადი ენერგიის ეფექტიანი ინტეგრაციისთვის. აღნიშნული პრობლემების დაძლევა შესაძლებელია მხოლოდ მართვის ფილოსოფიის შეცვლით, ციფრული ტექნოლოგიების დანერგვითა და ოპერაციული პროცესების მოდერნიზაციით.

განახლებადი ენერგიის თანამედროვე ელექტროსადგურების მნიშვნელოვანი ნაწილი ეფუძნება ინვერტორზე დაფუძნებულ გენერაციას. მზის ფოტოელექტრული სადგურები და ქარის ტურბინების უმრავლესობა იყენებს ენერგოელექტრონულ გარდამქმნელებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ გენერირებული ენერგიის შესაბამისობას ქსელის სიხშირისა და ძაბვის პარამეტრებთან. მიუხედავად ტექნოლოგიური პროგრესისა და მაღალი ეფექტიანობისა, ინვერტორული გენერაცია არსებითად განსხვავდება ტრადიციული სინქრონული გენერატორებისგან და მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ელექტროენერგეტიკული სისტემების დინამიკასა და სტაბილურობაზე. მოძველებული ელექტროენერგეტიკული ქსელების პირობებში ინვერტორული გენერაციის ინტეგრაცია განსაკუთრებულ გამოწვევებს ქმნის, ვინაიდან ასეთი ქსელები არ არის გათვლილი ენერგოელექტრონიკაზე დაფუძნებული წყაროების მაღალი წილისთვის. სისტემის ოპერაციული მართვა და დაცვის სქემები ხშირად ეყრდნობა იმ მახასიათებლებს, რომლებიც დამახასიათებელია სინქრონული გენერაციისთვის, რაც ინვერტორული წყაროების მასობრივ დანერგვას პრობლემურს ხდის.

ინვერტორზე დაფუძნებული გენერაციის ერთ-ერთი მთავარი თავისებურებაა ბუნებრივი ელექტრომექანიკური ინერციის არარსებობა. სინქრონული გენერატორების შემთხვევაში, როტორის მასა უზრუნველყოფს სისტემის ინერციას, რაც ამცირებს სიხშირის ცვლილების სიჩქარეს მოულოდნელი დისბალანსის დროს. ინვერტორები კი წარმოადგენს ენერგოელექტრონულ მოწყობილობებს, რომლებიც არ შეიცავს მბრუნავ მასებს და შესაბამისად ვერ ქმნიან ბუნებრივ ინერციას. ინვერტორული გენერაცია ასევე ზღუდავს მოკლე ჩართვის დენებს. ტრადიციული გენერატორებისგან განსხვავებით, რომლებიც ავარიული რეჟიმების დროს აწვდიან მაღალი მნიშვნელობის მოკლე ჩართვის

დენებს, ინვერტორები პროგრამულად ზღუდავენ დენებს საკუთარი დაცვის მიზნით. ეს თვისება დადებითად აისახება მოწყობილობების უსაფრთხოებაზე, თუმცა უარყოფითად მოქმედებს ქსელის დაცვის სისტემებზე, რომლებიც ხშირად გათვლილია მაღალი მოკლე ჩართვის დენების არსებობაზე. განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს იმ ფაქტს, რომ ინვერტორების მუშაობა მთლიანად დამოკიდებულია პროგრამულ ალგორითმებზე. ძაბვისა და სიხშირის რეგულირება, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის მართვა, ასევე ავარიულ რეჟიმებზე რეაგირება განისაზღვრება კონტროლის ალგორითმებით. მოძველებულ ქსელებში, სადაც სტანდარტები და მოთხოვნები ხშირად არ არის მორგებული ინვერტორული გენერაციისთვის, სხვადასხვა მწარმოებლის მოწყობილობებს შორის ალგორითმული შეუთავსებლობა შეიძლება გახდეს სისტემური პრობლემების წყარო. ინვერტორების უმრავლესობა მუშაობს „grid-following“ რეჟიმში, რაც ნიშნავს, რომ ისინი საჭიროებენ უკვე არსებულ სტაბილურ ქსელს, რათა მოახდინონ სინქრონიზაცია. ასეთ პირობებში ქსელის სუსტი ან არასტაბილური მდგომარეობა მნიშვნელოვნად ამცირებს ინვერტორული გენერაციის საიმედოობას და ზრდის გათიშვის ალბათობას.

ინვერტორული გენერაციის წილის ზრდა ენერგოსისტემაში გარდაუვლად იწვევს სინქრონული გენერატორების რაოდენობის შემცირებას. აღნიშნული პროცესი პირდაპირ აისახება ქსელის საერთო ინერციაზე. სისტემის ინერციის შემცირება ნიშნავს, რომ გენერაციისა და დატვირთვის დისბალანსის დროს სიხშირე იცვლება უფრო სწრაფად, ვიდრე ტრადიციულ სისტემებში. სიხშირის სწრაფი ცვლილებები (RoCoF – Rate of Change of Frequency) ქმნის სერიოზულ საფრთხეს როგორც გენერაციის, ისე მოხმარების მხარეს. მრავალი დაცვის სისტემა და ავტომატიკა გათვლილია სიხშირის შედარებით ნელ ცვლილებაზე და შესაძლოა არასწორად ამოქმედდეს მაღალი RoCoF-ის პირობებში. შედეგად, შესაძლებელია გენერაციის ან დატვირთვის გაუმართლებელი გათიშვები, რაც კიდევ უფრო ამწვავებს სისტემურ არასტაბილურობას. ქსელის ინერციის შემცირება ასევე ამცირებს სისტემის უნარს გაუძლოს დიდ ავარიებს, მაგალითად, მსხვილი გენერატორის ან გადამცემი ხაზის გათიშვას. ასეთ შემთხვევებში სიხშირის მკვეთრი ვარდნა შეიძლება მიაღწიოს კრიტიკულ მნიშვნელობებს მანამ, სანამ სარეზერვო მექანიზმები ამოქმედდება. მოძველებულ ქსელებში, სადაც სარეზერვო რესურსები და ავტომატიზაცია შეზღუდულია, ეს პრობლემა განსაკუთრებულად მწვავედ იჩენს თავს. დაცვის სისტემების არასწორი ამოქმედება წარმოადგენს კიდევ ერთ მნიშვნელოვან გამოწვევას. მოკლე ჩართვის დენების შემცირება და სიხშირის სწრაფი დინამიკა არღვევს ტრადიციული რელეს დაცვის ლოგიკას. დაცვის მოწყობილობები შესაძლოა ვერ ამოიცნოს ავარიული რეჟიმი ან, პირიქით, არასწორად იმუშაოს ნორმალური ოპერაციის დროს. ეს ზრდის როგორც მოწყობილობების დაზიანების, ისე ფართომასშტაბიანი გათიშვების რისკს, რომელიც ცუდ გავლენას მოახდენს მოსახლეობაზე. აღნიშნული პრობლემების ფონზე ცხადი ხდება, რომ ინვერტორზე დაფუძნებული გენერაციის ფართო ინტეგრაცია მოითხოვს ქსელის ოპერაციული მართვისა და დაცვის სისტემების

ფუნდამენტურ გადახედვას. თანამედროვე ენერგოსისტემებში სულ უფრო მეტი ყურადღება ექცევა ე.წ. „grid-forming“ ინვერტორებს, ვირტუალური ინერციის კონცეფციებსა და ადაპტირებულ დაცვის სქემებს, რომლებიც მიზნად ისახავს ინერციის შემცირების ნეგატიური ეფექტების კომპენსირებას. ამრიგად, ინვერტორული გენერაცია, მიუხედავად მისი ეკოლოგიური და ეკონომიკური უპირატესობებისა, არსებითად ცვლის ელექტროენერგეტიკული სისტემების ქცევას. მოძველებული ქსელების პირობებში მისი გავლენა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია და საჭიროებს როგორც ტექნიკურ, ისე ოპერაციულ ინოვაციებს

განახლებადი ენერგიის წყაროების ინტეგრაცია მოძველებულ ელექტროენერგეტიკულ ქსელებში არა მხოლოდ ტექნიკურ, არამედ მნიშვნელოვან ოპერაციულ სირთულეებს წარმოშობს. ოპერაციული მართვა ხდება უფრო დინამიკური, ნაკლებად პროგნოზირებადი და ძლიერ დამოკიდებული რეალურ დროში გადაწყვეტილებების მიღებაზე. ტრადიციული მართვის მიდგომები, რომლებიც ჩამოყალიბდა სტაბილური სინქრონული გენერაციის პირობებში, ხშირად ვერ უზრუნველყოფს სისტემის უსაფრთხო და ეფექტიან მუშაობას განახლებადი ენერგიის მაღალი წილის არსებობისას.

სიხშირის სტაბილურობა წარმოადგენს ელექტროენერგეტიკული სისტემის ერთ-ერთ უმთავრეს ოპერაციულ პარამეტრს. ტრადიციულ სისტემებში სიხშირის რეგულირება ხორციელდებოდა სინქრონული გენერატორების მექანიკური ინერციისა და ავტომატური სიმძლავრის რეგულატორების მეშვეობით. განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციის შედეგად, განსაკუთრებით ინვერტორზე დაფუძნებული გენერაციის ზრდის პირობებში, ეს მექანიზმები მნიშვნელოვნად სუსტდება. რეალურ დროში სიხშირის მართვის მთავარი პრობლემა უკავშირდება გენერაციისა და დატვირთვის სწრაფ დისბალანსს. მაგალითად, მზის ელექტროსადგურების მასობრივი ჩართვისას დილის საათებში ან მათი მოულოდნელი გათიშვისას ღრუბლიანობის გამო, სისტემაში წარმოიქმნება სიხშირის მკვეთრი ცვლილებები. მოძველებულ ქსელებში, სადაც სწრაფი რეგულირების რესურსები შეზღუდულია, დისპეტჩერს ხშირად არ აქვს საკმარისი ბერკეტები ასეთი ცვლილებების დასაბალანსებლად. ოპერაციული პრაქტიკიდან ცნობილია შემთხვევები, როდესაც სიხშირის დაცემისას ავტომატურად ირთვება დატვირთვის განტვირთვის სქემები, თუმცა მათი პარამეტრები არ არის მორგებული სწრაფ ცვლილებებზე. შედეგად, შესაძლებელია ზედმეტი დატვირთვის გათიშვა, რაც იწვევს მომხმარებლების უკმაყოფილებას და ენერგომომარაგების ხარისხის გაუარესებას. სიხშირის რეალურ დროში მართვა განახლებადი ენერგიის პირობებში მოითხოვს უფრო მოქნილ და ადაპტირებულ მიდგომებს, რაც მოძველებულ ქსელებში ხშირად მიუწვდომელია.

განახლებადი ენერგიის ინტეგრაცია მნიშვნელოვნად ართულებს დისპეტჩერიზაციის პროცესს. ტრადიციულ სისტემებში დისპეტჩერი მუშაობდა

შედარებით სტაბილური და პროგნოზირებადი გენერაციის პირობებში, სადაც დატვირთვის ცვლილებები ხდებოდა თანდათანობით. განახლებადი წყაროების შემთხვევაში გენერაცია შეიძლება შეიცვალოს წუთებში ან წამებშიც კი, რაც ზრდის ოპერაციული შეცდომის რისკს. დისპეტჩერიზაციის სირთულე განსაკუთრებით თვალსაჩინოა იმ ქსელებში, სადაც არ არსებობს განახლებადი გენერაციის ზუსტი პროგნოზირების ინსტრუმენტები. მაგალითად, ქარის ელექტროსადგურების გამომუშავება შეიძლება მნიშვნელოვნად შემცირდეს ქარის სიჩქარის მცირე ცვლილების შედეგად, ხოლო დისპეტჩერს არ ჰქონდეს წინასწარი ინფორმაცია ამის შესახებ. ასეთ პირობებში საჭიროა სწრაფი რეზერვების ჩართვა, რაც მოძველებულ სისტემებში ხშირად ტექნიკურად ან ეკონომიკურად შეუძლებელია. ოპერაციული მაგალითები აჩვენებს, რომ დისპეტჩერებს ხშირად უწევთ გადაწყვეტილებების მიღება არასრული მონაცემების საფუძველზე. ეს ზრდის როგორც გენერაციის არაეფექტიან გამოყენებას, ისე ავარიული რეჟიმების ალბათობას. დისპეტჩერიზაციის სირთულე კიდევ უფრო იზრდება დეცენტრალიზებული გენერაციის პირობებში, როდესაც ქსელში ჩართულია ასობით ან ათასობით მცირე სიმძლავრის წყარო, რომელთა ინდივიდუალური მართვა პრაქტიკულად შეუძლებელია ტრადიციული მეთოდებით.

ავარიული რეჟიმების პროგნოზირება წარმოადგენს ოპერაციული მართვის ერთ-ერთ ყველაზე რთულ ამოცანას განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციის პირობებში. მოძველებულ ქსელებში პროგნოზირება ძირითადად ეფუძნება ისტორიულ მონაცემებსა და სტატისტიკურ ანალიზს, რაც არ ასახავს სწრაფად ცვალებად რეალობას. განახლებადი ენერგიის ცვალებადობა მნიშვნელოვნად ზრდის სისტემის არაწრფივობას და ართულებს ავარიების წინასწარ იდენტიფიკაციას. ოპერაციულ პრაქტიკაში ხშირია შემთხვევები, როდესაც მცირე ლოკალური პრობლემა მაგალითად, ძაბვის გადაჭარბება დისტრიბუციულ ქსელში მზის სადგურის აქტიური მუშაობის გადადის უფრო ფართომასშტაბიან პრობლემაში. პროგნოზირების ინსტრუმენტების არარსებობის პირობებში ასეთი პროცესები შეუმჩნევლად ვითარდება, სანამ არ მიაღწევს კრიტიკულ დონეს. ავარიული რეჟიმების პროგნოზირების სირთულე განსაკუთრებით მწვავედ იჩენს თავს პიკური დატვირთვის პერიოდში. თუ ამ დროს მოულოდნელად მცირდება განახლებადი გენერაცია, ქსელი შეიძლება გადავიდეს არასტაბილურ რეჟიმში, ხოლო ოპერატორს არ ჰქონდეს საკმარისი დრო რეაგირებისთვის. მოძველებულ ქსელებში ეს ხშირად იწვევს ავარიულ გათიშვებს, რომლებიც შეიძლება თავიდან აცილებულიყო ადრეული გაფრთხილების სისტემების არსებობის შემთხვევაში.

განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციისას ერთ-ერთ ყველაზე სერიოზულ ოპერაციულ პრობლემას წარმოადგენს დაცვისა და ავტომატიკის სისტემების შეუსაბამობა. ტრადიციული დაცვის სქემები გათვლილია სინქრონული გენერატორების მაღალი მოკლე ჩართვის დენებისა და შედარებით ნელი დინამიკის პირობებში. ინვერტორზე დაფუძნებული გენერაცია კი ამ პარამეტრებს არსებითად ცვლის.

ოპერაციული მაგალითები აჩვენებს, რომ მოკლე ჩართვის დროს ინვერტორები ხშირად ზღუდავენ დენებს იმ დონემდე, რომ რელეს დაცვამ ვერ მოახდინოს ავარიული მონაკვეთის იდენტიფიკაცია. შედეგად, დაზიანებული ელემენტი რჩება ქსელში ჩართული უფრო ხანგრძლივი დროით, რაც ზრდის მოწყობილობების დაზიანების რისკს. მეორე მხრივ, სიხშირის ან ძაბვის სწრაფი ცვლილებების დროს დაცვის სისტემები შეიძლება არასწორად ამოქმედდეს და გამოიწვიოს არასაჭირო გათიშვები. ავტომატიკის შეუსაბამობა ასევე ეხება ავარიული აღდგენის პროცესებს. მოძველებულ ქსელებში ავტომატური აღდგენის ალგორითმები ხშირად არ ითვალისწინებს დეცენტრალიზებული გენერაციის არსებობას. შედეგად, ავარიის შემდეგ ქსელის ხელახალი ჩართვა შეიძლება იყოს არასტაბილური ან წარუმატებელი. ამ პრობლემების ერთობლიობა ცხადყოფს, რომ განახლებადი ენერგიის ინტეგრაცია მოძველებულ ქსელებში მნიშვნელოვნად ზრდის ოპერაციული რისკების დონეს. მათი ეფექტიანი მართვა მოითხოვს არა მხოლოდ ტექნიკურ მოდერნიზაციას, არამედ ოპერაციული პროცესების, დაცვის ფილოსოფიისა და დისპეტჩერიზაციის მიდგომების ფუნდამენტურ გადახედვას.

განახლებადი ენერგიის წყაროების ინტეგრაციის პირობებში ენერგიის დაგროვების სისტემები (Energy Storage Systems – ESS) სულ უფრო მნიშვნელოვანი ოპერაციული ინსტრუმენტი ხდება ელექტროენერგეტიკული სისტემების სტაბილურობისა და საიმედოობის უზრუნველსაყოფად. განსაკუთრებით მოძველებულ ქსელებში, სადაც ოპერაციული მოქნილობა შეზღუდულია, დაგროვების ტექნოლოგიები იძლევა შესაძლებლობას ნაწილობრივ მაინც დაკომპენსირდეს ინერციის შემცირება, გენერაციის ცვალებადობა და სწრაფი დისბალანსები. ენერგიის დაგროვების სისტემები წარმოადგენს იმ ერთ-ერთ იშვიათ ტექნოლოგიას, რომელიც ერთდროულად ასრულებს როგორც ტექნიკურ, ისე ოპერაციულ ფუნქციებს. ისინი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც სიხშირისა და ძაბვის რეგულირებისთვის, ასევე დისპეტჩერიზაციის გასამარტივებლად და ავარიული რეჟიმების მართვისთვის. აღნიშნული თვისებები განსაკუთრებით აქტუალურია იმ ენერგოსისტემებში, სადაც განახლებადი ენერგიის წილი იზრდება, ხოლო ქსელის ინფრასტრუქტურა და მართვის სისტემები ჯერ კიდევ ტრადიციულ მიდგომებზეა დაფუძნებული.

ბატარეებზე დაფუძნებული ენერგიის დაგროვების სისტემები (Battery Energy Storage Systems – BESS) გამოირჩევა ძალიან სწრაფი რეაგირების უნარით, რაც მათ ეფექტიან ინსტრუმენტად აქცევს სიხშირის რეგულირების პროცესში. სინქრონული გენერატორებისგან განსხვავებით, რომელთაც რეაგირებისთვის სჭირდებათ მექანიკური პროცესები, ბატარეები წამების ან თუნდაც მილიწამების განმავლობაში ახდენენ სიმძლავრის მიწოდებას ან შთანთქმას. სიხშირის რეგულირების თვალსაზრისით BESS-ს შეუძლია შეასრულოს როგორც პირველადი, ისე მეორადი რეგულირების ფუნქციები. მაგალითად, გენერაციის მოულოდნელი შემცირების შემთხვევაში ბატარეა მყისიერად იწყებს ენერგიის მიწოდებას ქსელში, რითაც ამცირებს სიხშირის ვარდნის სიჩქარეს. ეს

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დაბალი ინერციის მქონე სისტემებში, სადაც სიხშირის სწრაფი ცვლილებები შეიძლება კრიტიკულ მნიშვნელობებს მიაღწიოს მოკლე დროში. ოპერაციულ პრაქტიკაში ბატარეების გამოყენება ასევე ხელს უწყობს დატვირთვის დაბალანსებას. პიკური დატვირთვის საათებში დაგროვილი ენერგია შეიძლება გამოყენებულ იქნეს გენერაციის დეფიციტის კომპენსირებისთვის, ხოლო დაბალი დატვირთვის პერიოდში ბატარეების დამუხტვისთვის. ასეთი მიდგომა ამცირებს ქსელზე ზეწოლას და ზრდის სისტემის საერთო ეფექტიანობას. რეზერვის შექმნა წარმოადგენს ბატარეების კიდევ ერთ მნიშვნელოვან ოპერაციულ ფუნქციას. ტრადიციულ სისტემებში სარეზერვო სიმძლავრე ძირითადად წარმოდგენილია თბოსადგურებით ან ჰიდროელექტროსადგურებით, რომელთა ჩართვას სჭირდება გარკვეული დრო. ბატარეები კი უზრუნველყოფს ე.წ. „მყისიერ რეზერვს“, რაც განსაკუთრებით ღირებულია ავარიული სიტუაციების დროს. ოპერაციული მაგალითები აჩვენებს, რომ BESS-ის არსებობა მნიშვნელოვნად ამცირებს ავარიული გათიშვების სიხშირეს და მასშტაბს. მიუხედავად ამ უპირატესობებისა, ბატარეების გამოყენება სიხშირის რეგულირებაში მოითხოვს შესაბამის ოპერაციულ სტრატეგიებს. არასწორი მართვის შემთხვევაში შესაძლებელია ბატარეის სწრაფი დაცლა ან გადატვირთვა, რაც ზღუდავს მის ეფექტიანობას კრიტიკულ მომენტებში. ამიტომ აუცილებელია ბატარეების მუშაობის ინტეგრაცია ცენტრალურ დისპეტჩერიზაციის სისტემასთან და რეალურ დროში მონიტორინგი. დიდი ბრიტანეთის ენერგოსისტემაში ბატარეებზე დაფუძნებული ენერგიის დაგროვების სისტემის დანერგვამ მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა სიხშირის მართვა. NATIONAL GRID-ის პრაქტიკაში ბატარეები გამოიყენება როგორც სწრაფი რეზერვი, რაც საშუალებას იძლევა კომპენსირდეს ინერციის შემცირება და შემცირდეს სიხშირის გადახრების სიღრმე ავარიული რეჟიმების დროს.

ენერგიის დაგროვების სისტემების ინტეგრაცია მოძველებულ ელექტროენერგეტიკულ ქსელებში დაკავშირებულია რიგ ტექნიკურ და ოპერაციულ შეზღუდვებთან. პირველ რიგში, ძველი ქსელები ხშირად არ არის გათვლილი ორმხრივ ენერგოდენებზე. ბატარეების ჩართვა, რომლებიც როგორც იტვირთება, ისე აწვდის ენერგიას ქსელს, მოითხოვს ქსელის სქემების, დაცვის სისტემებისა და ოპერაციული წესების გადახედვას. ტექნიკური თვალსაზრისით პრობლემას წარმოადგენს ქსელის შეზღუდული გამტარუნარიანობა და ძაბვის რეგულირების შესაძლებლობები. ბატარეების ერთდროულმა ჩართვამ შეიძლება გამოიწვიოს ლოკალური ძაბვის გადაჭარბება ან გადატვირთვა, განსაკუთრებით დისტრიბუციულ დონეზე. მოძველებულ ქსელებში, სადაც ძაბვის ავტომატური რეგულატორები და რეაქტიული სიმძლავრის მართვის საშუალებები შეზღუდულია, ეს საკითხი განსაკუთრებულ ყურადღებას მოითხოვს. ოპერაციული შეზღუდვები ასევე უკავშირდება მართვის სისტემების სიმწიფეს. ბატარეების ეფექტიანი გამოყენება მოითხოვს რეალურ დროში მონაცემებს, პროგნოზირებას და ავტომატიზებულ გადაწყვეტილებებს. თუმცა,

მოდველებულ ქსელებში SCADA და ADMS სისტემები ხშირად არ არის სრულად დანერგილი ან არ უზრუნველყოფს საჭირო ფუნქციონალს. შედეგად, ბატარეების პოტენციალი სრულად ვერ გამოიყენება და ისინი მუშაობენ მხოლოდ შეზღუდულ რეჟიმებში. დამატებით გამოწვევას წარმოადგენს დაცვისა და ავტომატიკის ადაპტაცია. ბატარეებზე დაფუძნებული სისტემები, ისევე როგორც ინვერტორული გენერაცია, ზღუდავს მოკლე ჩართვის დენებს და ცვლის ქსელის დინამიკას. ეს მოითხოვს დაცვის პარამეტრების გადახედვას და ახალი ალგორითმების დანერგვას, რაც მოძველებულ ქსელებში ხშირად რთული და ხარჯიანი პროცესია. მიუხედავად არსებული შეზღუდვებისა, გამოცდილება აჩვენებს, რომ ენერგიის დაგროვების სისტემები შეიძლება გახდეს გარდამავალი გადაწყვეტა მოძველებული ქსელებისთვის. მათი ეტაპობრივი ინტეგრაცია, სწორად შერჩეული სიმძლავრეებითა და ოპერაციული სტრატეგიებით, საშუალებას იძლევა შემცირდეს განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციით გამოწვეული რისკები და გაიზარდოს სისტემის მოქნილობა. საბოლოოდ, ენერგიის დაგროვების სისტემები წარმოადგენს მნიშვნელოვან ოპერაციულ ინსტრუმენტს, რომელიც საშუალებას აძლევს მოძველებულ ელექტროენერგეტიკულ ქსელებს უფრო ეფექტიანად გაუმკლავდნენ განახლებადი ენერგიის გამოწვევებს. მათი წარმატებული დანერგვა დამოკიდებულია არა მხოლოდ ტექნიკურ გადაწყვეტილებებზე, არამედ ოპერაციული მართვის, რეგულაციური ჩარჩოსა და დისპეტჩერიზაციის ფილოსოფიის ადაპტაციაზე, რაც განსაზღვრავს ენერგოსისტემის მდგრად განვითარებას მომავალში.

საქართველოს ენერგოსისტემა გამოირჩევა უნიკალური სტრუქტურითა და ოპერაციული თავისებურებებით, რომლებიც მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციის პროცესს. ქვეყნის ელექტროენერგეტიკული სისტემა ისტორიულად განვითარებულია ჰიდროენერგეტიკაზე დაყრდნობით, რაც ერთდროულად წარმოადგენს როგორც უპირატესობას, ისე ოპერაციულ გამოწვევას. ჰიდროელექტროსადგურების მაღალი წილი ქმნის შედარებით დაბალ ემისიებსა და მოქნილ გენერაციას, თუმცა სისტემას ამყოფებს სეზონური ჰიდროლოგიური ფაქტორების ძლიერი გავლენის ქვეშ. საქართველოს ქსელის ოპერირების სპეციფიკა მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული წლიურ ჰიდროლოგიურ ციკლებზე. ზაფხულის პერიოდში, როდესაც მდინარეების წყალმოსავლიანობა მაღალია, ჰიდროგენერაცია სიჭარბით აწვდის ენერგიას სისტემას. ამ დროს შესაძლებელია ექსპორტის განხორციელება მეზობელ ქვეყნებში, თუმცა დისპეტჩერიზაცია საჭიროებს ზუსტ კოორდინაციას, რათა თავიდან იქნას აცილებული ქსელის გადატვირთვა და ძაბვის პრობლემები. ზამთრის პერიოდში კი, ჰიდროლოგიური რესურსების შემცირების ფონზე, საქართველო დგება ენერგოდეფიციტის წინაშე და მნიშვნელოვნად იზრდება იმპორტზე დამოკიდებულება. ოპერაციული მართვის თვალსაზრისით, ასეთი სეზონურობა ქმნის დამატებით სირთულეებს. დისპეტჩერებს უწევთ ხშირი რეჟიმების ცვლილება, გენერაციის სწრაფი გადანაწილება და სარეზერვო რესურსების მობილიზაცია. მოძველებული ქსელის პირობებში, სადაც ავტომატიზაცია და რეალურ დროში

მონიტორინგი შეზღუდულია, ეს პროცესი დაკავშირებულია გაზრდილ რისკებთან და ოპერაციულ სტრესთან. მზის და ქარის ენერგიის ინტეგრაცია საქართველოში ჯერ კიდევ განვითარების საწყის ეტაპზეა, თუმცა მისი ზრდის ტენდენცია უკვე აშკარაა. მზის ელექტროსადგურები ძირითადად კონცენტრირებულია ქვეყნის აღმოსავლეთ ნაწილში, სადაც მზიანობის მაღალი მაჩვენებლებია. მათი გამომუშავება პიკურია დღის საათებში, რაც გარკვეულწილად ემთხვევა ზაფხულის დატვირთვის ზრდას, თუმცა ქმნის ახალ გამოწვევებს ძაბვის მართვის თვალსაზრისით. დისტრიბუციულ ქსელებში მზის გენერაციის ზრდა ხშირად იწვევს ლოკალურ ძაბვის გადაჭარბებას, განსაკუთრებით იმ მონაკვეთებში, რომლებიც თავდაპირველად არ იყო გათვლილი დეცენტრალიზებულ გენერაციაზე.

ქარის ენერგიის ოპერაციული გამოწვევები კიდევ უფრო კომპლექსურია. ქარის სიჩქარის სწრაფი ცვლილებები იწვევს გენერაციის მერყეობას, რაც ართულებს დისპეტჩერიზაციას და ზრდის სარეზერვო რესურსების საჭიროებას. საქართველოს პირობებში, სადაც ქსელის ინერცია სეზონურად იცვლება ჰიდროსადგურების მუშაობის რეჟიმიდან გამომდინარე, ქარის გენერაციის ინტეგრაცია მოითხოვს განსაკუთრებულ ყურადღებას სიხშირის მართვის კუთხით. განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს საქართველოს ენერგოსისტემის ტრანზიტულ ფუნქციას. ქვეყანა წარმოადგენს მნიშვნელოვან კვანძს რეგიონულ ენერგეტიკულ ურთიერთობებში და ახორციელებს ელექტროენერგიის გაცვლას მეზობელ ქვეყნებთან. ეს გარემოება ზრდის ოპერაციული მართვის პასუხისმგებლობას, ვინაიდან შიდა ქსელში არსებული პრობლემები შეიძლება სწრაფად აისახოს რეგიონულ სისტემაზე. მოძველებული ინფრასტრუქტურის პირობებში ტრანზიტული ნაკადების მართვა დამატებით ტექნიკურ და ოპერაციულ გამოწვევებს ქმნის. საქართველოს ენერგოსისტემის ოპერაციული რეალობა ცხადყოფს, რომ განახლებადი ენერგიის ინტეგრაცია ვერ იქნება წარმატებული მხოლოდ ახალი გენერაციის დამატებით. აუცილებელია ქსელის ოპერაციული მართვის გაუმჯობესება, სეზონური ფაქტორების გათვალისწინებით მოქნილი სტრატეგიების შემუშავება და მზისა და ქარის გენერაციის პროგნოზირების შესაძლებლობების გაძლიერება. ენერგიის დაგროვების სისტემებისა და თანამედროვე დისპეტჩერიზაციის ინსტრუმენტების ეტაპობრივი დანერგვა შეიძლება გახდეს მნიშვნელოვანი ნაბიჯი სისტემის მდგრადობისა და საიმედოობის გასაზრდელად. საქართველოს ენერგოსისტემის მაგალითი რომ ავიღოთ დავინახავთ, რომ ის ხასიათდება ჰიდროგენერაციის მაღალი წილით, რაც ქმნის მკვეთრ სეზონურ ასიმეტრიას გამომუშავებაში. გაზაფხულსა და ზაფხულში მდინარეების მაღალი წყალმოვარდნის პირობებში ელექტროენერგიის ჭარბი გამომუშავება ფიქსირდება, მაშინ როდესაც ზამთარში ჰიდროლოგიური რესურსის შემცირება იწვევს იმპორტზე და თბოგენერაციაზე დამოკიდებულების ზრდას. აღნიშნული სტრუქტურა ოპერაციულად ახლოს დგას დაბალი ინერციის სისტემების პრობლემატიკასთან ზამთრის პერიოდში, როდესაც სისტემაში იზრდება თბოსადგურების წილი და მცირდება ბუნებრივი ჰიდრორეზერვის მოქნილობა.

ასეთ პირობებში მზისა და ქარის გენერაციის დამატება კიდევ უფრო ზრდის ბალანსირების მოთხოვნას რეალურ დროში. ენერგიის დაგროვების სისტემების არარსებობა ან შეზღუდული მოცულობა ამცირებს სისტემის შესაძლებლობას შთანთქმოს ჭარბი გამომუშავება ზაფხულში და კომპენსაცია გაუწიოს დეფიციტს პიკურ ზამთრის საათებში. აღნიშნული გარემოება ადასტურებს, რომ საქართველოს შემთხვევაში განახლებადი ენერგიის ინტეგრაცია პირველ რიგში მოითხოვს ოპერაციული მოქნილობის გაძლიერებას და არა მხოლოდ გენერაციის ზრდას.

საბოლოოდ, საქართველოს ენერგოსისტემა დგას გარდამავალ ეტაპზე, სადაც ტრადიციული ჰიდროენერგეტიკული მოდელი თანდათან ერწყმის ახალ, ინვერტორზე დაფუძნებულ გენერაციას. ამ პროცესის წარმატება დიდწილად დამოკიდებულია ოპერაციული მართვის ადაპტაციის სიჩქარეზე და ქსელის ტექნიკურ მზადყოფნაზე, რაც განსაზღვრავს ქვეყნის ენერგეტიკული უსაფრთხოების მომავალს.

დასკვნა

მოძველებული ელექტროენერგეტიკული ქსელების პირობებში განახლებადი ენერგიის ინტეგრაცია წარმოადგენს კომპლექსურ პროცესს, რომელიც სცდება მხოლოდ ახალი გენერაციის წყაროების დამატებას. ნაშრომში განხილულმა ანალიზმა ცხადყო, რომ ასეთი ინტეგრაციის მთავარი გამოწვევა დაკავშირებულია ოპერაციული მართვის ტრანსფორმაციასთან. ტრადიციული მართვის მოდელები, რომლებიც ეფუძნება ცენტრალიზებულ დისპეტჩერიზაციას, სტატიკურ დაგეგმვასა და შეზღუდულ მონიტორინგს, ვერ პასუხობს ინვერტორზე დაფუძნებული და ცვალებადი გენერაციის მოთხოვნებს. ინვერტორული ტექნოლოგიების ფართო დანერგვამ არსებითად შეცვალა ენერგოსისტემის დინამიკა. ბუნებრივი ინერციის შემცირება, მოკლე ჩართვის დენების შეზღუდვა და პროგრამულ ალგორითმებზე დამოკიდებულება ზრდის სიხშირისა და ძაბვის არასტაბილურობის რისკს და ამძაფრებს დაცვისა და ავტომატიკის სისტემების შეუსაბამობას. განსაკუთრებით მოძველებულ ქსელებში, სადაც ინფრასტრუქტურა და ოპერაციული წესები არ არის ადაპტირებული ახალ რეალობასთან, აღნიშნული ფაქტორები ქმნის სისტემური ავარიების და ენერგომომარაგების ხარისხის გაუარესების საფრთხეს. ნაშრომში ნაჩვენებია, რომ ოპერაციული პრობლემების მნიშვნელოვანი ნაწილი უკავშირდება რეალურ დროში მონაცემების დეფიციტს, დისპეტჩერიზაციის სირთულეს და ავარიული რეჟიმების პროგნოზირების შეზღუდულ შესაძლებლობებს. ამ პირობებში ენერგიის დაგროვების სისტემები იძენს განსაკუთრებულ მნიშვნელობას, როგორც ოპერაციული ინსტრუმენტი. ბატარეებზე დაფუძნებული სისტემები უზრუნველყოფს სწრაფ რეაგირებას, სიხშირის რეგულირებას და სარეზერვო სიმძლავრის შექმნას, რაც ნაწილობრივ კომპენსირებს ინერციის შემცირებას და ზრდის სისტემის მოქნილობას.

საქართველოს ენერგოსისტემის მაგალითზე განხილვამ აჩვენა, რომ ჰიდროენერგეტიკაზე დაფუძნებული სტრუქტურა, სეზონური ჰიდროლოგიური ფაქტორები, მზისა და ქარის გენერაციის მზარდი წილი ქმნის სპეციფიკურ ოპერაციულ გარემოს. ამ პირობებში განახლებადი ენერგიის წარმატებული ინტეგრაცია მოითხოვს არა მხოლოდ ტექნიკურ ინვესტიციებს, არამედ ოპერაციული მართვის, დისპეტჩერიზაციისა და დაცვის ფილოსოფიის ფუნდამენტურ გადახედვას.

საბოლოოდ, შეიძლება ითქვას, რომ განახლებადი ენერგიის ინტეგრაციის წარმატება მოძველებულ ელექტროენერგეტიკულ ქსელებში დამოკიდებულია ოპერაციული მართვის მოქნილობაზე, თანამედროვე ინვერტორული ტექნოლოგიების, ენერგიის დაგროვებისა და ციფრული მართვის სისტემების სინერგიულ გამოყენებაზე. მხოლოდ კომპლექსური და ეტაპობრივი მიდგომით არის შესაძლებელი სისტემის საიმედოობის, სტაბილურობისა და ენერგეტიკული უსაფრთხოების უზრუნველყოფა გრძელვადიან პერსპექტივაში.

გამოყენებული ლიტერატურა

- IEEE power & energy society (2018) IEEE guide for integration of energy storage
- ACKERMANN, T. WIND POWER IN POWER SYSTEMS
- KUNDER, P. POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL. MACGRAW- HILL.
- KUNDUR, P (1994) . POWER SYSTEM STABILITY AND CONTROL .

Integration of Renewable Energy Source Into Aging Power Grid : Operation Management and Technological Adaptation.

Nino Giorgishvili; Zurab Kutibashvili

Abstract

The integration of renewable energy sources into exiting power grids creates not only infrastructural, but also technological and operational challenges. The problem is especially serious for aging power grids that were not designed for the integration of renewable energy generation. The article analyzes the impact of renewable energy integration on grid operation, dispatching , and real-time control processes. It discusses the characteristics of inverter-based generation. The reduction of grid inertia, and the need to adapt protection and control algorithms. Special attention is giving to energy storage systems and flexible control mechanisms as important tools for increasing grid reliability. The research results clearly shows that, under the conditions of outdated power grids, effective management of renewable energy is possible only through technological adaptation.

Keywords: grid operation, operational generation, renewable energy ,energy storage .

ინტელექტუალური საკუთრების მართვა ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების პირობებში

კახაბერ ყავლაშვილი

სსიპ დავით აღმაშენებლის სახელობის საქართველოს ეროვნული თავდაცვის აკადემიის
შტაბის G-5 სამსახურის უფროსი

აბსტრაქტი

წინამდებარე ნაშრომში გაანალიზებულია ინტელექტუალური საკუთრების მენეჯმენტის სისტემური ტრანსფორმაცია ხელოვნური ინტელექტის სწრაფი განვითარების პირობებში. თანამედროვე სამყაროში ინტელექტუალური აქტივები იქცა ეკონომიკური განვითარების, კონკურენტუნარიანობისა და ინოვაციური პოტენციალის განმსაზღვრელ უმთავრეს რესურსად. კვლევა ფოკუსირებულია იმ საჭიროებაზე, რომ ინტელექტუალური კაპიტალი იყოს არა მხოლოდ სამართლებრივად დაცული, არამედ ეფექტიანად მართული როგორც კერძო, ისე საჯარო სექტორში. ნაშრომი განსაკუთრებულ ყურადღებას ამახვილებს ხელოვნურ ინტელექტზე, როგორც შემოქმედებით სუბიექტზე და აანალიზებს იმ სამართლებრივ და ეკონომიკურ გამოწვევებს, რომლებიც ტექნოლოგიური პროგრესის პარალელურად წარმოიშობა. ამასთანავე, განხილულია საქართველოს ევროკავშირთან და საერთაშორისო ბაზრებთან დაახლოების პროცესი, რაც მოითხოვს მენეჯმენტის თანამედროვე სისტემების დანერგვასა და ინტელექტუალური პროდუქტის შექმნის სტიმულირებას.

კვლევის ჰიპოთეზა: ხელოვნური ინტელექტი ინტელექტუალური საკუთრების მართვის პროცესებში ქმნის გაძლიერებულ ეფექტს, რომელიც ერთდროულად წარმოადგენს შემოქმედებითი საქმიანობის ახალ ობიექტს და, ამავდროულად, გვევლინება ინტელექტუალური აქტივების იდენტიფიცირების, დაცვისა და ოპტიმიზაციის უპრეცედენტო სიმძლავრის ინსტრუმენტად.

კვლევის მიზანია ინტელექტუალური საკუთრების მენეჯმენტის სისტემური სრულყოფის მექანიზმების იდენტიფიცირება და თეორიულ-პრაქტიკული რეკომენდაციების შემუშავება, რომლებიც უზრუნველყოფს ინტელექტუალური კაპიტალის მდგრად გამოყენებას ხელოვნური ინტელექტის განვითარების პირობებში.

კვლევის ამოცანა:

ხელოვნური ინტელექტის შემოქმედებითი და საგამომგონებლო პოტენციალის სამართლებრივი და ეკონომიკური ასპექტების, ავტორობის, ინტელექტუალური საკუთრების უფლებების განაწილებისა და ხელოვნური ინტელექტის, როგორც შემოქმედებითი სუბიექტის როლის კომპლექსური ანალიზი. ასევე, საერთაშორისო მარეგულირებელი მიდგომებისა და ეთიკური სტანდარტების შესწავლა მაღალტექნოლოგიური საწარმოების ინტელექტუალური საკუთრების მენეჯმენტის სტრატეგიული ოპტიმიზაციისა და საქართველოში ადაპტაციის მიზნით.

საკვანძო სიტყვები: ხელოვნური ინტელექტი, ინტელექტუალური საკუთრება, ინოვაციების მენეჯმენტი, ალგორითმული გენერაცია, საავტორო უფლებები, მაღალტექნოლოგიური საწარმოები.

შესავალი

თანამედროვე გლობალურ ეკონომიკურ სივრცეში ინტელექტუალური საკუთრების მენეჯმენტის სისტემური და მდგრადი განვითარება ერთ-ერთ უმთავრეს სტრატეგიულ გამოწვევას წარმოადგენს. ცოდნაზე დაფუძნებული ეკონომიკის პირობებში, სადაც ინოვაციური პოტენციალი ორგანიზაციული წარმატების მთავარი განმსაზღვრელია, ინტელექტუალური აქტივები პერიფერიული რესურსიდან ეკონომიკური ზრდისა და კონკურენტული უპირატესობის ცენტრალურ ძრავად გარდაიქმნა. დღეისათვის ინტელექტუალური კაპიტალი გლობალური კორპორაციების საბაზრო ღირებულების დაახლოებით 90%-ს შეადგენს, მაშინ როდესაც ტრადიციული მატერიალური აქტივების წილი მხოლოდ 10%-ით შემოიფარგლება. ეს ფუნდამენტური ცვლილება განსაკუთრებით თვალსაჩინოა მაღალტექნოლოგიურ ინდუსტრიებში, სადაც გლობალური ლიდერების (Apple, Microsoft, Alphabet, Amazon) წარმატება უშუალოდ არის დაკავშირებული მათი ინტელექტუალური საკუთრების პორტფოლიოების ეფექტურ და სტრატეგიულ მართვასთან.³

ინტელექტუალური საკუთრების ეფექტიანი მენეჯმენტი მოითხოვს კომპლექსურ და ინტეგრირებულ მიდგომას. ეს პროცესი მოიცავს ორგანიზაციული პოლიტიკის მკაფიო განსაზღვრას, ინტელექტუალური აქტივების სისტემურ აღრიცხვას, სამართლებრივი დაცვის მექანიზმების ოპტიმალურ გამოყენებასა და კომერციალიზაციის სტრატეგიების მიზანმიმართულ დანერგვას. აღნიშნულ პროცესში განსაკუთრებულ როლს თამაშობს თანამედროვე ციფრული ტექნოლოგიების ინტეგრაცია და ინტელექტუალური საკუთრების მნიშვნელობისადმი მაღალი ორგანიზაციული ცნობიერება, რომლებიც ერთობლივად ქმნიან წინაპირობას ინტელექტუალური კაპიტალის გრძელვადიანი და მდგრადი გამოყენებისთვის.

უკანასკნელი ათწლეულების განმავლობაში ინტელექტუალური საკუთრების მართვის ტრადიციული მოდელები უპრეცედენტო გამოწვევების წინაშე დადგა.

³ Ryan Abbott, *The Reasonable Robot: Artificial Intelligence and the Law* (Cambridge: Cambridge University Press, 2020).

ციფრული ეკონომიკის სწრაფი ზრდა ფუნდამენტურად ცვლის ინტელექტუალური საკუთრების ბუნებასა და დინამიკას. მონაცემები გარდაიქმნა ინტელექტუალური საკუთრების ახალ კატეგორიად, რომელიც ჯერ კიდევ არასრულყოფილადაა რეგულირებული, ხოლო ალგორითმები და ხელოვნური ინტელექტის მოდელები წარმოადგენს აქტივებს, რომლებიც ხშირად არ თავსდება ტრადიციულ სამართლებრივ ჩარჩოებში.⁴ პლატფორმული ბიზნეს-მოდელები ქმნიან ახალ რეალობას, სადაც ეკოსისტემური ღირებულება აღემატება ცალკეული პატენტების დაცვას. ეს ნიშნავს, რომ თანამედროვე ეპოქაში ინტელექტუალური საკუთრების მართვა უნდა გადავიდეს ცალკეული გამოგონებების დაცვიდან მთელი ინოვაციური ეკოსისტემის სტრატეგიულ მენეჯმენტზე.⁵

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ხელოვნური ინტელექტის სწრაფი განვითარებით გამოწვეული ორმაგი ეფექტი. ერთი მხრივ, ხელოვნური ინტელექტი თავად ხდება შემოქმედებითი საქმიანობისა და დაცვის ობიექტი, რაზეც მეტყველებს მასთან დაკავშირებული პატენტების რაოდენობის 62%-იანი ზრდა. მეორე მხრივ, იგი რადიკალურად ცვლის ინტელექტუალური საკუთრების შექმნის, იდენტიფიცირებისა და დაცვის პროცესებს. ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული ინსტრუმენტები აჩქარებს არსებული ტექნიკის ძიებას, ავტომატიზებს პატენტების მომზადებას და პროგნოზირებს აქტივების ღირებულებას. ამავდროულად, ხელოვნური ინტელექტის მიერ გენერირებული შინაარსის საკუთრების საკითხი და სასწავლო მონაცემების (training data) საავტორო უფლებრივი სტატუსი წარმოადგენს სრულიად ახალ, ჯერ კიდევ დაუწერელ სამართლებრივ მიმართულებას.⁶

პარალელურად, მწვავედ დგას ინტელექტუალური საკუთრების შეფასების მეთოდოლოგიების არაადეკვატურობის პრობლემა. ტრადიციული ფინანსური მეთოდები, რომლებიც მატერიალური აქტივებისთვის იყო შემუშავებული, ვერ ასახავს ციფრულ და ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული აქტივების ნამდვილ ღირებულებას, რაც იწვევს ე.წ. „ბუღალტრულ კრიზისს“. ვინაიდან ინტელექტუალური საკუთრების ფასი ხშირად ქსელური ეფექტებითა და მონაცემთა ხარისხით განისაზღვრება, მისი ეკონომიკური წონა ვერ თავსდება კლასიკური აღრიცხვის ჩარჩოებში.⁷ ციფრული და ხელოვნური ინტელექტის აქტივები ქმნიან თვითგადმიერებად ღირებულებას, სადაც მონაცემთა მოცულობა ზრდის ალგორითმების სიზუსტეს, რაც თავის მხრივ აძლიერებს პროდუქტს და ზრდის მომხმარებელთა რაოდენობას.

ამრიგად, წინამდებარე კვლევა ემსახურება ამ მეთოდოლოგიური და სამართლებრივი შეუსაბამოების კომპლექსურ ანალიზს. საქართველოსთვის, რომელიც საერთაშორისო ბაზრებთან და ევროკავშირთან დაახლოების პროცესშია, ინტელექტუალური

⁴ World Intellectual Property Organization (WIPO), WIPO Technology Trends 2019: Artificial Intelligence (Geneva: WIPO, 2019).

⁵ Mark A. Lemley and Bryan Casey, "Remedies for Robots," University of Chicago Law Review 86, no. 5 (2019).

⁶ European Patent Office, Guidelines for Examination in the European Patent Office (Munich: EPO, 2023).

⁷ U.S. Copyright Office, Copyright Registration Guidance: Works Containing Material Generated by Artificial Intelligence (Washington, DC: USCO, 2023).

საკუთრების მენეჯმენტის თანამედროვე მექანიზმების დანერგვა და მათი ახალ ტექნოლოგიურ რეალობასთან ადაპტაცია გადამწყვეტ მნიშვნელობას იძენს ეროვნული ინოვაციური პოტენციალისა და ეკონომიკური მდგრადობის უზრუნველსაყოფად.

ძირითადი ნაწილი

ხელოვნური ინტელექტის როლი ინოვაციურ პროცესებში და არსებითი ცვლილებები

ხელოვნური ინტელექტი თანამედროვე ეტაპზე აღარ განიხილება, როგორც მხოლოდ დამხმარე ტექნოლოგიური ინსტრუმენტი, იგი ახორციელებს ფუნდამენტურ ტრანსფორმაციას ინოვაციური ციკლის ყველა საფეხურზე, ფუნდამენტური კვლევა-განვითარებიდან (R&D) პროდუქტის საბოლოო კომერციალიზაციამდე. ხელოვნური ინტელექტის სისტემების ინტეგრაცია ისეთ სფეროებში, როგორიცაა ახალი მასალების აღმოჩენა, მოწინავე ინჟინერია და პროგრამული უზრუნველყოფის ავტონომიური გენერაცია, ცვლის თავად ინოვაციის არქიტექტურას. მანქანური სწავლების ალგორითმები ფლობენ უნარს, მყისიერად დაამუშაონ დიდი მოცულობითი მონაცემები და გამოავლინონ დამალული კანონზომიერებები, რაც ადამიანური კოგნიტური და ანალიტიკური შესაძლებლობების ფარგლებს მიღმაა.⁸

ხელოვნური ინტელექტის ტრანსფორმაციული ძალა განსაკუთრებით თვალსაჩინოა ფარმაცევტულ ინდუსტრიაში, რომელიც ისტორიულად ხასიათდებოდა მაღალი ფინანსური რისკებითა და ხანგრძლივი კვლევითი ციკლებით. ტრადიციული მეთოდებით ახალი მედიკამენტის ბაზარზე გატანა საშუალოდ 10-15 წელს და მილიარდობით დოლარის ინვესტიციას მოითხოვდა. თუმცა, ხელოვნური ინტელექტის სისტემები, რომლებიც სპეციფიკურად ორიენტირებულნი არიან მოლეკულური სტრუქტურების კომპიუტერულ პროგნოზირებასა და მიზანმიმართულ შემუშავებაზე, ამ პროცესს რადიკალურად აჩქარებენ. ალგორითმებს შეუძლიათ რამდენიმე თვეში დაამუშაონ ისეთი მოცულობის ბიოლოგიური კომბინაციები, რომელთა ანალიზსაც მეცნიერთა ჯგუფები ათწლეულებს ანდომებდნენ, რაც მკვეთრად ამცირებს როგორც კვლევის ბიუჯეტს, ისე წარუმატებელი ექსპერიმენტების ალბათობას.⁹

პარალელურად, ინდუსტრიაში შემოქმედებითი ხელოვნური ინტელექტის (Generative AI) გამოჩენამ წარმოშვა თვისობრივად ახალი რეალობა. ეს ტექნოლოგია აღარ შემოიფარგლება მხოლოდ არსებული მონაცემების კლასიფიკაციით, მას შეუძლია დამოუკიდებლად შექმნას ორიგინალური ვიზუალური შინაარსი, რთული მუსიკალური კომპოზიციები და ლიტერატურული ტექსტები, რომლებიც ხშირად განურჩეველია ადამიანის მიერ შექმნილი ნამუშევრებისგან. ეს პროცესი აჩენს ფუნდამენტურ სამართლებრივ და ეთიკურ კითხვებს ავტორობის ბუნებისა და შემოქმედებითი სუბიექტურობის შესახებ. თუკი ალგორითმი დამოუკიდებლად ახორციელებს შემოქმედებით არჩევანს, ტრადიციული „ადამიანზე კონცენტრირებული“

⁸ World Intellectual Property Organization (WIPO), WIPO Technology Trends 2019: Artificial Intelligence (Geneva: WIPO, 2019), 24-30.

⁹ Abbott, Ryan, The Reasonable Robot: Artificial Intelligence and the Law (Cambridge: Cambridge University Press, 2020), 45-52.

ინტელექტუალური საკუთრების სამართალი სერიოზული დილემის წინაშე დგება: როგორ განისაზღვროს საკუთრების უფლება იქ, სადაც ადამიანის როლი მხოლოდ საწყისი პარამეტრების განსაზღვრით შემოიფარგლება?¹⁰

ცხრილი 1. ინოვაციური პროცესების ტრანსფორმაცია

შედარების კრიტერიუმი	ტრადიციული მოდელი	ხელოვნური ინტელექტით მართული მოდელი
კვლევის ტემპი	ხაზოვანი, ადამიანურ რესურსზე დამოკიდებული და ხანგრძლივი	ავტომატიზებული, მყისიერი და რადიკალურად აჩქარებული
მონაცემთა ანალიზი	შეზღუდული მოცულობის ინფორმაციის დამუშავება	„დიდი მონაცემების“ და ფარული კანონზომიერებების ძიება
ფინანსური ეფექტიანობა	მაღალი ხარჯები და წარუმატებელი ექსპერიმენტების დიდი წილი	ოპტიმიზებული ბიუჯეტი და პროგნოზირებადი შედეგები
ინოვაციის ხასიათი	ადამიანური ინტუიცია და ფიზიკური ცდები	ალგორითმული პროგნოზირება და ციფრული სიმულაცია ¹¹

ამრიგად, ხელოვნური ინტელექტი გარდაიქმნა ინოვაციის „თანავტორად“, რაც მოითხოვს ინტელექტუალური საკუთრების მენეჯმენტის სრულიად ახალი სტრატეგიების შემუშავებას. მაღალტექნოლოგიური საწარმოებისთვის გადამწყვეტი ხდება არა მხოლოდ ტექნოლოგიის ფლობა, არამედ იმ სამართლებრივი ჩარჩოების მოძიება, რომლებიც დაიცავს ალგორითმულად გენერირებულ აქტივებს გლობალურ კონკურენტულ გარემოში.¹²

ადამიანისა და ხელოვნური ინტელექტის თანამშრომლობის ახალი პარადიგმა

ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია კვლევა-განვითარების პროცესებში აყალიბებს ფუნდამენტურად ახალ მეთოდოლოგიურ ჩარჩოს, რომელიც ცნობილია როგორც „ადამიანი-მანქანის კოლაბორაციული ინოვაცია“. ეს არ არის უბრალოდ ტექნოლოგიური წინსვლა, არამედ თვისობრივი ცვლილება ინოვაციების შექმნის არქიტექტურაში. ამ სისტემაში ხელოვნური ინტელექტი ფუნქციონირებს არა როგორც პასიური ტექნიკური

¹⁰ Lemley, Mark A., and Bryan Casey, "Remedies for Robots," University of Chicago Law Review 86, no. 5 (2019): 1320-1335.

¹¹ წყარო: შემუშავებულია ავტორის მიერ მსოფლიო ინტელექტუალური საკუთრების ორგანიზაციის (WIPO, Technology Trends: Artificial Intelligence, 2019) და მასაჩუსეტსის ტექნოლოგიის ინსტიტუტის (MIT, Artificial Intelligence in Drug Discovery, 2020) კვლევითი მონაცემების შეჯერების საფუძველზე.

¹² Bridges, Schuyler, "The Automated Inventor," Berkeley Technology Law Journal 33, no. 2 (2018): 341-360.

ინსტრუმენტი, არამედ როგორც ინტელექტუალური პროცესის აქტიური თანამონაწილე, რომელიც ახორციელებს ადამიანის თანაბარ, ზოგ შემთხვევაში კი უფრო მაღალი დონის შემოქმედებით წვლილს.¹³

ამ ახალი პარადიგმის რეალიზაცია ყველაზე მკაფიოდ სამ ძირითად მიმართულებაში ვლინდება:

ფარმაცევტული და მოლეკულური დიზაინი. ტრადიციული „ცდისა და შეცდომის“ მეთოდი ხელოვნური ინტელექტის მიერ მართულმა პროგნოზირებამ ჩაანაცვლა. მაგალითად, მასაჩუსეტსის ტექნოლოგიის ინსტიტუტის (Massachusetts Institute of Technology - MIT) ბიოინჟინერიისა და კომპიუტერული მეცნიერებების მკვლევრების მიერ ხელოვნური ინტელექტის გამოყენებით აღმოჩენილი ახალი ანტიბიოტიკი „ჰალიცინი“ კლასიკური მაგალითია იმისა, თუ როგორ გამოავლინა ალგორითმმა მოლეკულებში ისეთი ანტიბაქტერიული თვისებები, რომლებიც ადამიანური დაკვირვების მიღმა რჩებოდა. ამ პროცესში ხელოვნური ინტელექტი გვევლინება არა უბრალოდ გამომთვლელ ინსტრუმენტად, არამედ ახალი სამეცნიერო ჰიპოთეზების წარმომშობ პარტნიორად.¹⁴

საინჟინრო ოპტიმიზაცია და თვითწარმომშობი დიზაინი. საავტომობილო და აეროკოსმოსურ ინდუსტრიაში (მაგ. Autodesk-ის თვითწარმომშობი სისტემები) ინჟინერი აწესებს მხოლოდ განსაზღვრულ პარამეტრებს (წონა, გამძლეობა, მასალა), ხოლო ხელოვნური ინტელექტი დამოუკიდებლად ქმნის ათასობით ოპტიმალურ გეომეტრიულ ფორმას, რომელთა მოფიქრებაც ადამიანური წარმოსახვისთვის თითქმის შეუძლებელია. ამ შემთხვევაში, შემოქმედებითი აქტი სრულდება მანქანისა და ადამიანის ინტელექტუალური თანაქმედების საფუძველზე.¹⁵

დაგროვებითი ინოვაცია შემოქმედებით სფეროში. ახალი შინაარსის წარმომშობი მოდელები (მაგ. GPT-4, Midjourney, Claude) ახორციელებენ ლიტერატურული და ვიზუალური პროდუქტის დამოუკიდებელ შექმნას/გენერაციას. ამ პროცესში წარმოიშობა ავტორობის იდენტიფიცირების პრობლემა, ადამიანი იძლევა მხოლოდ მოკლე მითითებას, ხოლო საბოლოო პროდუქტის 90%-ს ალგორითმი ქმნის, პრაქტიკულად შეუძლებელი ხდება იმის ობიექტური განსაზღვრა, თუ ვის ეკუთვნის საბოლოო შემოქმედებითი შედეგი, ადამიანს, რომელმაც იდეა მიაწოდა, თუ სისტემას, რომელმაც ის განახორციელა.¹⁶

სამართლებრივი და ეთიკური დილემები

აღნიშნული თანამშრომლობის მოდელი აყენებს ფუნდამენტურ კითხვას, სად მთავრდება ინსტრუმენტი და სად იწყება ავტორი? ტრადიციული ინტელექტუალური

¹³ Ryan Abbott, *The Reasonable Robot: Artificial Intelligence and the Law* (Cambridge: Cambridge University Press, 2020), 112-128.

¹⁴ World Intellectual Property Organization (WIPO), *WIPO Technology Trends 2019: Artificial Intelligence* (Geneva: WIPO, 2019), 56-62.

¹⁵ Mark A. Lemley and Bryan Casey, "Remedies for Robots," *University of Chicago Law Review* 86, no. 5 (2019): 1340-1355.

¹⁶ European Patent Office (EPO), "Artificial Intelligence and the Patent System: Summaries of Case Law," Munich, 2023.

საკუთრების სამართალი აღიარებს მხოლოდ ადამიანურ კრეატიულობას. თუმცა, როდესაც ხელოვნური ინტელექტი ახორციელებს მონაცემებში დამალული კანონზომიერებების გამოვლენას და მათ საფუძველზე ქმნის ახალ ცოდნას, იგი სცილდება დამხმარე საშუალების ჩარჩოებს. სულ უფრო ბუნდოვანი ხდება ზღვარი სუბიექტსა (ადამიანი) და ობიექტს (მანქანა) შორის, რაც მოითხოვს უფლებათა განაწილების სრულიად ახალი სამართლებრივი მექანიზმების შემუშავებას.¹⁷

ამრიგად, ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია კვლევა-განვითარებაში აღარ არის მხოლოდ ეფექტიანობის ზრდის საშუალება, ეს არის ახალი კოგნიტური პარადიგმა, სადაც ადამიანური ინტუიცია და ალგორითმული სიმძლავრე გაერთიანებულია ერთიანი, ჰიბრიდული ინოვაციური მიზნის მისაღწევად.¹⁸

ხელოვნური ინტელექტით გენერირებული შინაარსისა და გამოგონებების სამართლებრივი სტატუსი

ხელოვნური ინტელექტის მიერ შექმნილი ობიექტების ინტელექტუალური საკუთრების სამართლებრივი სტატუსი წარმოადგენს თანამედროვე იურიდიული სისტემის ერთ-ერთ ყველაზე სადავო და კომპლექსურ საკითხს, რომელიც გლობალური მასშტაბით მწვავე აკადემიური დისკუსიებისა და საკანონმდებლო ინიციატივების საგნად იქცა, რადგან იგი ინტელექტუალური საკუთრების სამართლის ფუნდამენტურ საფუძვლებს ეხება.¹⁹

ისტორიულად, ინტელექტუალური საკუთრების სისტემები ადამიანზე ორიენტირებულ მოდელს ეფუძნება. ამ პრინციპის თანახმად, საავტორო უფლებები წარმოიშობა მხოლოდ და მხოლოდ ადამიანის შემოქმედებითი ან საგამომგონებლო საქმიანობის შედეგად. სამართლებრივი დოქტრინა აუცილებელ პირობად მიიჩნევს ადამიანის შეგნებული განზრახვის არსებობას, რაც იმას ნიშნავს, რომ ნებისმიერი ინოვაცია კონკრეტული პიროვნების ინტელექტუალური ძალისხმევის ნაყოფი უნდა იყოს.²⁰

თუმცა, როდესაც ხელოვნური ინტელექტის სისტემა დამოუკიდებლად ქმნის ობიექტს, რომელიც აკმაყოფილებს დაცვის ყველა კრიტერიუმს (ორიგინალურობა, სიახლე, სარგებლიანობა), ტრადიციული ჩარჩო გარდაუვალ კრიზისს განიცდის. წარმოიშობა კრიტიკული კითხვა, ვინ უნდა იქნას მიჩნეული უფლების სუბიექტად, სისტემის შემქმნელი, ოპერატორი თუ თავად მანქანა?

დღეისათვის მსოფლიოში არსებობს მკაფიო სამართლებრივი ფრაგმენტაცია. წამყვანი უწყებები, მათ შორის აშშ-ის საავტორო უფლებათა ოფისი (USCO) და ევროპის საპატენტო ოფისი (EPO), მკაცრ კონსერვატიულ პოზიციას ინარჩუნებენ. ამ მხრივ, განსაკუთრებით

¹⁷ U.S. Copyright Office, "Copyright Registration Guidance: Works Containing Material Generated by AI," Washington, DC, 2023.

¹⁸ Schmidt, Eric, and Jared Cohen, *The New Digital Age: Reshaping the Future of People, Nations and Business* (New York: Alfred A. Knopf, 2013).

¹⁹ Ryan Abbott, *The Reasonable Robot: Artificial Intelligence and the Law* (Cambridge: Cambridge University Press, 2020), 154-160.

²⁰ World Intellectual Property Organization (WIPO), *WIPO Technology Trends 2019: Artificial Intelligence* (Geneva: WIPO, 2019), 78-82.

აღსანიშნავია გახმაურებული საქმე „თალერი ვიდალის წინააღმდეგ“ (Thaler v. Vidal). საქმის არსი მდგომარეობდა შემდეგში: მკვლევარმა სტივენ თალერმა სცადა დაეპატენტებინა ორი გამოგონება (საკვების კონტეინერი და საავარიო შუქურა), სადაც გამომგონებლად არა საკუთარი თავი, არამედ მის მიერ შექმნილი ხელოვნური ინტელექტის სისტემა „DABUS“-ი მიუთითა. სტივენ თალერი ამტკიცებდა, რომ რადგან გამოგონების იდეა დამოუკიდებლად ალგორითმმა წარმოშვა, სამართლიანი იქნებოდა, უფლებაც მასზე გაცემულიყო. თუმცა, აშშ-ის სასამართლომ მხარი არ დაუჭირა ამ პოზიციას და განმარტა, რომ მოქმედი კანონმდებლობით, გამომგონებელი უნდა იყოს მხოლოდ „ფიზიკური პირი“. აღნიშნულმა გადაწყვეტილებამ კიდევ ერთხელ დაადასტურა, რომ თანამედროვე სამართალი ჯერჯერობით არ ცნობს მანქანის იურიდიულ სუბიექტურობას.²¹

ამ პოზიციის მთავარი არგუმენტი ეკონომიკური სტიმულირების თეორიაა. ინტელექტუალური საკუთრების უფლებები ადამიანთა შემოქმედებითი მოტივირებისთვის არსებობს, ხელოვნურ ინტელექტს კი არ გააჩნია არც ეკონომიკური ინტერესები და არც იურიდიული სუბიექტურობა. თუმცა, ეს მიდგომა წარმოშობს „საზოგადოებრივი საკუთრების პარადოქსს“. თუ ხელოვნური ინტელექტის მიერ შექმნილი ღირებული ინოვაცია (მაგალითად, ახალი ქიმიური ფორმულა) არ ექვემდებარება სამართლებრივ დაცვას, იგი ავტომატურად გადადის საზოგადოებრივ საკუთრებაში და ყველასთვის ხელმისაწვდომი ხდება. ეს რადიკალურად ამცირებს კომპანიების მოტივაციას, განახორციელონ ინვესტიციები ხელოვნური ინტელექტის კვლევის სისტემებში, რადგან მათ არ ექნებათ ექსკლუზიური უფლება შედეგის კომერციალიზაციაზე.²²

ტრადიციული სისტემებისგან განსხვავებით, ზოგიერთი სამართლებრივი სისტემა ცდილობს პრაგმატული გამოსავლის მოძებნას. ამ მხრივ განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დიდი ბრიტანეთის „სავტორო უფლების, დიზაინისა და პატენტების აქტი“ (1988). კანონი ადგენს, რომ კომპიუტერის მიერ გენერირებული ნაშრომის შემთხვევაში ავტორად ითვლება პირი, რომელმაც განახორციელა მისი შექმნისთვის აუცილებელი ორგანიზაციული და ტექნიკური ღონისძიებები.²³

ეს მოდელი საშუალებას იძლევა, რომ ინტელექტუალური საკუთრების მფლობელად მიჩნეულ იქნას ის პირი, ვინც:

- განსაზღვრა ხელოვნური ინტელექტის მუშაობის პარამეტრები;
- უზრუნველყო სისტემა სასწავლო მონაცემებით;
- ინიცირება გაუკეთა შექმნის პროცესს.

მიუხედავად პრაგმატიზმისა, აღნიშნული მიდგომაც ტოვებს გაურკვევლობას. რა მოცულობის ადამიანური ჩარევაა საკმარისი ავტორობის დასადგენად? არის თუ არა

²¹ U.S. Copyright Office, "Copyright Registration Guidance: Works Containing Material Generated by AI," Federal Register 88 (2023): 16190.

²² Mark A. Lemley and Bryan Casey, "Remedies for Robots," University of Chicago Law Review 86, no. 5 (2019): 1345-1350.

²³ Copyright, Designs and Patents Act 1988, Section 9(3), UK Legislation.

მხოლოდ ერთი მოკლე ინსტრუქციის ჩაწერა საკმარისი საფუძველი უფლების მოსაპოვებლად?²⁴

პასუხისმგებლობის განაწილება და ეთიკური გამოწვევები

ხელოვნური ინტელექტის მიერ გენერირებული ინტელექტუალური საკუთრების პასუხისმგებლობის საკითხი თანამედროვე მენეჯმენტის ცენტრალურ გამოწვევად იქცა. როდესაც სისტემა დამოუკიდებლად ქმნის პროდუქტს, აუცილებელია მკაფიოდ განისაზღვროს იურიდიული და ეთიკური პასუხისმგებლობის მატარებელი სუბიექტი იმ შემთხვევაში, თუ აღნიშნული შინაარსი არღვევს მესამე პირთა უფლებებს ან შეიცავს მავნე შინაარსს.

სუბიექტებს შორის პასუხისმგებლობები

პასუხისმგებლობის მართვა მოითხოვს დიფერენცირებულ მიდგომას სამ ძირითად რგოლს შორის:

1. ხელოვნური ინტელექტის შემმუშავებლები არიან კომპანიები, რომლებიც ქმნიან ალგორითმულ ჩარჩოს. მათი პასუხისმგებლობა მოიცავს სისტემის უსაფრთხოებასა და სასწავლო მონაცემების ლეგიტიმურობას.
2. ოპერატორები და მფლობელები არიან ორგანიზაციების წარმომადგენლები, რომლებიც იყენებენ და ამუშავებენ სისტემას. ისინი პასუხისმგებელნი არიან სისტემის მიზნობრივ გამოყენებასა და გამომავალი ინფორმაციის კონტროლზე.
3. საბოლოო მომხმარებლები კი არიან პირები, რომლებიც იყენებენ ხელოვნურ ინტელექტს კონკრეტული შედეგის მისაღებად. აქ მთავარია „ადამიანური ზედამხედველობის“ პრინციპის დაცვა.²⁵

გამჭვირვალობა, ავთენტურობა და მარკირება

ინტელექტუალური საკუთრების ეთიკური მართვისთვის გადამწყვეტია სამი ფუნდამენტური პრინციპის იმპლემენტაცია:

- **გამჭვირვალობა** - მაღალტექნოლოგიურმა საწარმოებმა უნდა უზრუნველყონ ხელოვნური ინტელექტის მუშაობის პრინციპებისა და იმ მონაცემთა ბაზების საჯაროობა, რომლებზეც მოხდა სისტემის წვრთნა. ეს აუცილებელია პლაგიატისა და უფლებების უკანონო გამოყენების პრევენციისთვის.²⁶
- **ავთენტურობა** - ადამიანისა და ხელოვნური ინტელექტის მიერ შექმნილი ნაშრომების გამიჯვნა კრიტიკულად მნიშვნელოვანია საზოგადოებრივი ნდობის შესანარჩუნებლად. ავთენტურობის კრიზისი საფრთხეს უქმნის შემოქმედებითი ინდუსტრიების ეკონომიკურ მდგრადობას.
- **მარკირება** - საერთაშორისო სტანდარტების თანახმად, ხელოვნური ინტელექტის მიერ გენერირებული ნებისმიერი ინტელექტუალური პროდუქტი უნდა იყოს

²⁴ European Patent Office (EPO), "Legal aspects of Artificial Intelligence," Munich, 2023.

²⁵ European Commission, Ethics Guidelines for Trustworthy AI (Brussels: High-Level Expert Group on AI, 2019), 12-25.

²⁶ Abbott, Ryan, The Reasonable Robot: Artificial Intelligence and the Law (Cambridge: Cambridge University Press, 2020), 178-185.

შესაბამისად მონიშნული. ეს არ არის მხოლოდ ეთიკური მოთხოვნა, არამედ სამართლებრივი აუცილებლობა მომხმარებელთა უფლებების დასაცავად.²⁷

ერთ-ერთი ყველაზე რთული ეთიკური დილემა უკავშირდება ე.წ. „სამართლიან გამოყენებას“. ხელოვნური ინტელექტის მოდელების წვრთნისთვის ხშირად გამოიყენება მილიონობით საავტორო უფლებით დაცული ნამუშევარი ავტორთა ნებართვის გარეშე. აქ წარმოიშობა ინტერესთა კონფლიქტი, ერთის მხრივ ინოვაციისთვის საჭიროა მონაცემთა დიდი მოცულობა, მეორეს მხრივ კი ავტორთა ინტერესებისთვის საკუთრების დაცვა. გამოსავალი შეიძლება იყოს საკუთარი ნამუშევრების გამოყენებაზე უარის თქმის მექანიზმების დანერგვა. ეს ავტორებს საშუალებას მისცემს, ოფიციალურად აუკრძალონ ხელოვნური ინტელექტის ალგორითმებს მათი შემოქმედების გამოყენება სასწავლო პროცესში და მოითხოვონ საკუთარი შემოქმედების ამოღება მონაცემთა ბაზებიდან.²⁸

ინტელექტუალური საკუთრების მართვის გამოწვევები და პერსპექტივები საქართველოში

საქართველოსთვის ინტელექტუალური საკუთრების მენეჯმენტის სისტემური სრულყოფა განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს ევროკავშირთან და საერთაშორისო ბაზრებთან ინტეგრაციის პროცესში. ქვეყანა ეტაპობრივად ახორციელებს ეკონომიკურ და სამართლებრივ რეფორმებს, თუმცა ხელოვნური ინტელექტისა და ახალი ტექნოლოგიების ეპოქაში მართვის თანამედროვე მექანიზმების დანერგვა კვლავ სერიოზულ გამოწვევად რჩება.

ევროკავშირთან ასოცირების შეთანხმების ფარგლებში, საქართველომ აიღო ვალდებულება, დაუახლოოს თავისი კანონმდებლობა ევროპულ სტანდარტებს. ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების მხრივ, ეს ნიშნავს არა მხოლოდ საავტორო და საპატენტო სამართლის დახვეწას, არამედ ევროკავშირის ხელოვნური ინტელექტის აქტთან (EU AI Act) შესაბამისობას. საქართველოსთვის კრიტიკულად მნიშვნელოვანია ისეთი სამართლებრივი ჩარჩოს შექმნა, რომელიც დაიცავს ადგილობრივ ინოვატორებს და, ამავდროულად, უზრუნველყოფს საერთაშორისო ნდობას ქართული ინტელექტუალური პროდუქტის მიმართ.²⁹

ინსტიტუციური გამოწვევები და ორგანიზაციული ცნობიერება

კვლევამ აჩვენა, რომ საქართველოში ინტელექტუალური საკუთრების მართვის კუთხით რამდენიმე ძირითადი ბარიერი არსებობს:

- ცნობიერების დაბალი დონე: ბევრ ადგილობრივ ორგანიზაციაში ინტელექტუალური საკუთრება ჯერ კიდევ აღიქმება როგორც მხოლოდ იურიდიული საკითხი და არა როგორც სტრატეგიული ბიზნეს-აქტივი.

²⁷ WIPO, "Revised Issues Paper on Intellectual Property Policy and Artificial Intelligence," Geneva, 2020.

²⁸ Lemley, Mark A., and Bryan Casey, "Remedies for Robots," University of Chicago Law Review 86, no. 5 (2019): 1356-1370.

²⁹ საქპატენტი (Sakpatenti), ინტელექტუალური საკუთრების ეროვნული სტრატეგია და მოქმედების გეგმა, თბილისი, 2023.

- მენეჯმენტის სისტემების არარსებობა: კომპანიების უმრავლესობას არ გააჩნია ინტელექტუალური აქტივების სისტემური აღრიცხვისა და შეფასების შიდა მექანიზმები.
- აკადემიურ-სამეცნიერო სექტორის კომერციალიზაცია: უნივერსიტეტებისა და კვლევითი ცენტრების მიერ გენერირებული ცოდნა ხშირად ვერ გარდაიქმნება პატენტებად ან კომერციულ პროდუქტებად მართვის სუსტი რგოლის გამო.³⁰

ხელოვნური ინტელექტი, როგორც განვითარების შესაძლებლობა

საქართველოსთვის, როგორც მზარდი ეკონომიკის მქონე ქვეყნისთვის, ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია ინტელექტუალური საკუთრების მართვაში წარმოადგენს ე.წ. „ნახტომისებური განვითარების“ უნიკალურ შესაძლებლობას. ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული მართვის თანამედროვე მოდელების დანერგვა ქართულ საწარმოებს საშუალებას მისცემს, მინიმალური რესურსების პირობებშიც კი მოახდინონ გლობალური ბაზრების სიღრმისეული ანალიზი და საკუთარი ინოვაციების ეფექტიანი დამკვიდრება, რაც მნიშვნელოვან ოპტიმიზაციას ნიშნავს. ამასთანავე, გამჭვირვალე და სამართლებრივად დაცული ინტელექტუალური საკუთრების პორტფოლიოს ჩამოყალიბება მკვეთრად გაზრდის საერთაშორისო ინვესტორების ნდობას, რაც ქვეყანაში კაპიტალის მოზიდვის წინაპირობაა. განსაკუთრებით აღსანიშნავია ლოკალური ინოვაციების სტიმულირების პერსპექტივაც, სადაც ხელოვნური ინტელექტის, როგორც „შემოქმედებითი პარტნიორის“ გამოყენება მცირე და საშუალო ბიზნესს დაეხმარება თვისობრივად ახალი, საერთაშორისო დონეზე კონკურენტუნარიანი პროდუქტების შექმნაში.³¹

ყოველივე ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე იკვეთება, რომ საქართველოს ინტელექტუალური საკუთრების სისტემის გაძლიერებისათვის კრიტიკულად აუცილებელია რამდენიმე სტრატეგიული მიმართულების რეალიზება. უპირველეს ყოვლისა, დღის წესრიგში დგას ეროვნული ინტელექტუალური საკუთრების სტრატეგიის ადაპტაცია, რაც გულისხმობს მასში ხელოვნური ინტელექტისა და ციფრული ტრანსფორმაციის კომპონენტების არსებით გაძლიერებას. ამასთანავე, განსაკუთრებული მხარდაჭერა უნდა მიენიჭოს ტექნოლოგიური ტრანსფერისა და კომერციალიზაციის ოფისების (TTO) განვითარებას როგორც საგანმანათლებლო-სამეცნიერო სივრცეში, ისე კერძო სექტორში, რათა შეიქმნას ცოდნის ეკონომიკურ აქტივად გარდაქმნის ეფექტიანი ჯაჭვი. პარალელურად, სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანია სპეციალიზებული საგანმანათლებლო პროგრამების დანერგვა, რომლებიც ინტელექტუალური საკუთრების მენეჯმენტის სწავლებას უზრუნველყოფენ არა მხოლოდ იურიდიული წრეებისთვის, არამედ მენეჯერებისა და ინჟინრებისთვის, რაც საფუძველს ჩაუყრის ქვეყანაში მაღალი ორგანიზაციული და ტექნოლოგიური ცნობიერების ჩამოყალიბებას.

³⁰ ევროკავშირი-საქართველოს ასოცირების შეთანხმება, თავი 9: ინტელექტუალური საკუთრების უფლებები, 2014.

³¹ World Intellectual Property Organization (WIPO), World Intellectual Property Indicators 2023 - Country Profile: Georgia, Geneva, 2023.

წინამდებარე ნაშრომში განხორციელებული კომპლექსური ანალიზი ცხადყოფს, რომ თანამედროვე სამყარო ინტელექტუალური საკუთრების მართვის ფუნდამენტური ტრანსფორმაციის მოწმეა. თუკი გასულ საუკუნეებში ინტელექტუალური აქტივები მხოლოდ იურიდიული დაცვის ობიექტებად განიხილებოდა, დღეს ისინი ეკონომიკური ზრდისა და კონკურენტუნარიანობის უმთავრეს სტრატეგიულ რესურსს წარმოადგენენ. ხელოვნური ინტელექტის სწრაფმა განვითარებამ ეს პროცესი კიდევ უფრო დააჩქარა და ჩვენთვის მნიშვნელოვად ახალი რეალობის წინაშე დაგვადგინა, სადაც ადამიანი და მანქანა ინოვაციური პროცესის თანასწორუფლებიან პარტნიორებად გვევლინებიან.

კვლევის ერთ-ერთი უმთავრესი მიგნება სწორედ ამ „ჰიბრიდულ“ შემოქმედებითობაში მდგომარეობს. ხელოვნური ინტელექტი აღარ არის მხოლოდ დამხმარე ტექნიკური ხელსაწყო, მან შეიძინა შემოქმედებითი სუბიექტის თვისებები, რაც პირდაპირ კონფლიქტში მოდის ტრადიციულ, ადამიანზე ორიენტირებულ სამართლებრივ მიდგომებთან. ამ ფუნდამენტურმა გარდატეხამ წარმოშვა ე.წ. საყოველთაო ხელმისაწვდომობის წინააღმდეგობრიობა, ვითარება, როდესაც უდიდესი ეკონომიკური ფასეულობის მქონე ალგორითმული გამოგონებები სამართლებრივი დაცვის მიღმა დარჩენის საფრთხის წინაშე დგანან. აღნიშნული გარემოება, თავის მხრივ, არსებითად აქვეითებს ინოვაციურ სექტორში ინვესტიციების მოზიდვის მოტივაციას. სწორედ ამიტომ, დღეს კრიტიკულად აუცილებელია პრაგმატული სამართლებრივი მოდელების ძიება, რომლებიც უზრუნველყოფენ გონივრულ ბალანსს ტექნოლოგიურ პროგრესსა და მესაკუთრის ეკონომიკურ ინტერესებს შორის.

პარალელურად, ნაშრომმა ნათლად აჩვენა, რომ ტრადიციული ფინანსური შეფასების მეთოდები უძლურია ციფრული და ხელოვნური ინტელექტზე დაფუძნებული აქტივების ნამდვილი ღირებულების დასადგენად. ვინაიდან ამ აქტივების ფასი ხშირად თვითგადმლიერებად ქსელურ ეფექტებზეა დამოკიდებული, მათი ეკონომიკური წონის იგნორირება საფრთხეს უქმნის კომპანიების რეალურ კაპიტალიზაციასა და გრძელვადიან სტრატეგიულ მდგრადობას.

საქართველოსთვის ეს გლობალური ძვრები არა მხოლოდ გამოწვევა, არამედ უნიკალური შესაძლებლობაა. ევროინტეგრაციის გზაზე მდგარი ქვეყნისთვის ინტელექტუალური საკუთრების მართვის საერთაშორისო სტანდარტებთან ჰარმონიზაცია სასიცოცხლო მნიშვნელობისაა. ეს არ არის მხოლოდ კანონების ფორმალური დაახლოება ევროპულ ჩარჩოებთან, ეს არის ახალი ორგანიზაციული კულტურის დანერგვა, სადაც ინოვაცია და მისი ეფექტიანი კომერციალიზაცია ეროვნული ეკონომიკის მდგრადობის გარანტი გახდება.

საბოლოო ჯამში, ინტელექტუალური საკუთრების სისტემა განიცდის არა დასუსტებას, არამედ ღრმა ევოლუციას. მიზანშეწონილია მომავლის მოდელი დაეფუძნოს სამ ძირითად მიმართულებას: სამართლებრივ მოქნილობას, ეკონომიკურ გამჭვირვალობასა და ეთიკურ პასუხისმგებლობას. ამ გზით იქნება შესაძლებელი ისეთი

გარემოს შექმნა, სადაც ხელოვნური ინტელექტი არა ადამიანის შემცვლელად, არამედ მისი შემოქმედებითი პოტენციალის უპრეცედენტო გამაძლიერებლად მოგვევლინება.

ბიბლიოგრაფია

- Abbott, Ryan. The Reasonable Robot: Artificial Intelligence and the Law. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- Bridges, Schuyler. "The Automated Inventor." Berkeley Technology Law Journal 33, no. 2 (2018).
- Copyright, Designs and Patents Act 1988. Section 9(3). UK Legislation.
- European Commission. Ethics Guidelines for Trustworthy AI. Brussels: High-Level Expert Group on AI, 2019.
- European Patent Office (EPO). Guidelines for Examination in the European Patent Office. Munich: EPO, 2023.
- European Patent Office (EPO). "Artificial Intelligence and the Patent System: Summaries of Case Law." Munich, 2023.
- European Patent Office (EPO). "Legal Aspects of Artificial Intelligence." Munich, 2023.
- ევროკავშირი-საქართველოს ასოცირების შეთანხმება. თავი 9: ინტელექტუალური საკუთრების უფლებები. 2014.
- Lemley, Mark A., and Bryan Casey. "Remedies for Robots." University of Chicago Law Review 86, no. 5 (2019).
- საქპატენტი (Sakpatenti). ინტელექტუალური საკუთრების ეროვნული სტრატეგია და მოქმედების გეგმა. თბილისი, 2023.
- Samuelson, Pamela. "Generative AI Meets Copyright." Science 381, no. 6654 (2023): 158-161.
- Schmidt, Eric, and Jared Cohen. The New Digital Age: Reshaping the Future of People, Nations and Business. New York: Alfred A. Knopf, 2013.
- Thaler v. Comptroller-General of Patents, Designs and Trade Marks. [2023] UKSC 49. United Kingdom Supreme Court, December 20, 2023.
- U.S. Copyright Office. Copyright Registration Guidance: Works Containing Material Generated by Artificial Intelligence. Washington, DC: USCO, 2023.
- U.S. Copyright Office. "Copyright Registration Guidance: Works Containing Material Generated by AI." Federal Register 88, no. 51 (March 16, 2023): 16190-16194.
- World Intellectual Property Organization (WIPO). WIPO Technology Trends 2019: Artificial Intelligence. Geneva: WIPO, 2019.
- World Intellectual Property Organization (WIPO). "Artificial Intelligence and Intellectual Property Policy." WIPO Magazine, December 2023.

- World Intellectual Property Organization (WIPO). "Revised Issues Paper on Intellectual Property Policy and Artificial Intelligence." Geneva, 2020.
- World Intellectual Property Organization (WIPO). World Intellectual Property Indicators 2023 - Country Profile: Georgia. Geneva: WIPO, 2023.

Management of Intellectual Property in the Era of Artificial Intelligence

Kakhaber Kavlashvili

Head of G-5 Service, Staff of the LEPL David Aghmashenebeli National Defence Academy of Georgia

Abstract

The present paper analyzes the systemic transformation of intellectual property management in the context of the rapid development of Artificial Intelligence. In the modern world, intellectual assets have become a primary resource defining economic development, competitiveness, and innovative potential. The research focuses on the necessity for intellectual capital to be not only legally protected but also efficiently managed across both private and public sectors. The paper places particular emphasis on Artificial Intelligence as a creative entity and analyzes the legal and economic challenges arising alongside technological progress. Furthermore, it discusses Georgia's process of approximation with the European Union and international markets, which necessitates the implementation of modern management systems and the stimulation of intellectual product creation.

Research Hypothesis: Artificial Intelligence creates an enhanced effect within intellectual property management processes, simultaneously representing a new object of creative activity and serving as an instrument of unprecedented power for the identification, protection, and optimization of intellectual assets.

Research Aim:

To identify mechanisms for the systemic improvement of intellectual property management and to develop theoretical-practical recommendations that ensure the sustainable utilization of intellectual capital under the conditions of AI development.

Research Objective:

A complex analysis of the legal and economic aspects of the creative and inventive potential of Artificial Intelligence, including authorship, the distribution of intellectual property rights, and the role of AI as a creative entity. Additionally, the study aims to examine international regulatory approaches and ethical standards for the strategic optimization of IP management in high-tech enterprises and its adaptation within the Georgian context.

Keywords: Artificial Intelligence, Intellectual Property, Innovation Management, Algorithmic Generation, Copyright, High-Tech Enterprises.

Aspects of Integrating Artificial Intelligence Methods into Web Technology Infrastructure

Rati Alania¹, Roman Samkharadze², Lia Gachechiladze³

¹Georgian Technical University, Department of Software Engineering, PhD Student; ²Georgian Technical University, Department of Software Engineering, Professor; ³Georgian Technical University, Department of Information Technologies, Associate Professor

Abstract

This paper proposes web performance evaluation metrics and their intelligent analysis. It demonstrates that the application of artificial intelligence approaches in this process ensures higher accuracy, flexibility, and scalability of performance assessment, thereby providing a solid foundation for targeted and effective improvement of website performance.

The paper also shows that artificial intelligence represents a significant technological enabler for improving website performance; however, its application requires a well-considered and balanced approach. The implementation of artificial intelligence models is associated with both technical and organizational challenges, making it necessary to evaluate the trade-offs between effectiveness, model complexity, and infrastructural costs. Maintaining this balance ultimately determines the successful integration of artificial intelligence into digital products.

Keywords: artificial intelligence, web technologies.

The formation and gradual development of modern web technologies are closely connected to the evolution of information technologies, the expansion of global services, and the transformation of digital communication. At the initial stage of web technologies, websites mainly represented static documents built on simple HTML structures, and their primary function was the one-way delivery of information. Under such conditions, website performance was considered a technical parameter determined by server resource capacity, network bandwidth, and browser capabilities. Accordingly, the main objective of performance optimization was to reduce page load time and ensure the most efficient use of available resources (Killelea, 2001).

In the early phase of web technology development, attention was primarily focused on simplifying code structure, minimizing the number of requests, and reducing delays occurring during data transmission. At that time, websites were characterized by relatively low functional complexity and a limited number of users. Consequently, performance was treated as a system engineering problem and was less associated with in-depth analysis of user behavior or experience. This approach fully corresponded to the technological reality and the level of website development of that period (Killelea, 2001).

Alongside the widespread adoption of the Internet and the growing popularity of web technologies, new challenges gradually emerged. Websites were no longer limited to passive information presentation and progressively evolved into dynamic and interactive platforms. In the early 2000s, the use of server-side scripting became common practice, enabling real-time responses to user requests. These changes expanded the concept of performance, as website speed was no longer defined solely by initial load time but also encompassed system responsiveness and continuity of interaction.

From the mid-2000s onward, the development of web technologies entered a new qualitative phase. Asynchronous data transfer mechanisms emerged, the role of JavaScript on the client side increased, and the functional complexity of web applications grew significantly. Under these conditions, web performance began to be viewed as a multidimensional concept that included not only technical metrics but also user perception and subjective experience. During this period, an approach was established according to which website optimization should be carried out on both the server and client sides, highlighting the complex nature of performance (Souders, 2007).

A significant turning point in web performance research was the recognition that user experience is directly linked to page speed. Analyses demonstrated that even a slight increase in load time can significantly affect user engagement and overall experience. In this context, web performance became not only a technical but also a strategic factor influencing the success of digital products. This trend was particularly evident in the development of commercial web platforms and large-scale online services (Souders, 2007).

Parallel to the evolution of web technologies, artificial intelligence developed as an independent scientific field. The early stages of artificial intelligence research were associated with theoretical studies aimed at modeling human cognitive processes. The core idea of artificial intelligence is based on enabling computer systems to imitate human-like intellectual behavior, including learning, logical reasoning, and problem solving (Russell & Norvig, 2023).

Initially, artificial intelligence systems relied on symbolic logic and predefined rules. While this approach proved effective for structured tasks, it was less adaptable to real-world, dynamic environments. Subsequently, the growth of data volumes and advances in computational resources facilitated the development of data-driven approaches, which became a prerequisite for the practical application of artificial intelligence across various domains. This

transition significantly expanded the scope of artificial intelligence and laid the foundation for its integration into modern digital systems (Russell & Norvig, 2023).

Since the 2010s, web technologies have acquired a large-scale, dynamic, and data-oriented character. Modern web applications operate on distributed architectures, utilize various external services, and process large volumes of data in real time. This technological complexity substantially increases the difficulty of performance management and necessitates more flexible and adaptive approaches (Grigorik, 2013).

At this stage, performance optimization gradually shifted from static rule-based techniques to solutions based on dynamic analysis. There emerged a need for systems capable of continuously analyzing user behavior, network conditions, and system load. These requirements created favorable conditions for the application of artificial intelligence tools in web technologies, as artificial intelligence enables data-driven prediction and adaptation (Wagner, 2017).

Thus, the historical development of web technologies and artificial intelligence demonstrates that these fields evolved independently; however, their parallel evolution naturally created the foundation for future integration. The increasing technical complexity of web technologies and the growth of data demanded more “intelligent” optimization mechanisms, while methodological advances in artificial intelligence made it possible to meet these demands. This historical and conceptual overview provides a solid theoretical background for understanding the importance of artificial intelligence in modern web technologies and forms the basis for its further applied analysis.

Artificial intelligence is regarded in modern science and technology as a multifaceted, dynamic, and conceptually complex phenomenon whose precise definition is difficult. This complexity arises from the fact that artificial intelligence encompasses both theoretical and applied aspects and is interpreted differently across disciplines. In general terms, artificial intelligence refers to the ability of computer systems to perform intellectual processes traditionally associated with human cognition, including learning, reasoning, problem solving, and adaptation to the environment (Russell & Norvig, 2023).

Academic literature identifies several major approaches to defining artificial intelligence. One common approach is based on behavioral criteria, according to which a system is considered intelligent if its behavior resembles human behavior in specific tasks. Another approach focuses on internal mechanisms and attempts to algorithmically model human thinking processes. The coexistence of these approaches indicates that artificial intelligence is not a homogeneous concept and that its interpretation depends on research objectives and application contexts (Warwick, 2012).

At a general level, artificial intelligence can be viewed as a technological tool, an autonomous system, and a scientific paradigm. As a technological tool, artificial intelligence serves as a means of solving specific tasks, increasing process efficiency and accuracy. The systems approach views artificial intelligence as a set of interconnected components that independently acquire, process, and act upon information. The paradigmatic approach considers artificial

intelligence as a research framework that integrates methods and theories for studying intelligent behavior (Warwick, 2012).

An important aspect of artificial intelligence development is the distinction between weak and strong artificial intelligence. Weak artificial intelligence is oriented toward performing specific, well-defined tasks and does not possess general intelligence. Most modern technological systems are examples of weak artificial intelligence. Strong artificial intelligence, by contrast, implies universal intelligence comparable to or exceeding human cognitive abilities. Although strong artificial intelligence remains largely theoretical, its discussion plays a significant role in ethical and philosophical debates surrounding artificial intelligence development (Warwick, 2012).

A stage-by-stage analysis of artificial intelligence development shows that the field did not evolve linearly. Early stages were dominated by symbolic and rule-based approaches relying on logical rules and knowledge bases. While effective for structured tasks, these methods proved less adaptable to real and unstable environments. Such limitations prompted the search for alternative approaches and the development of data-driven methods (Russell & Norvig, 2023).

The strengthening of data-driven approaches is associated with the application of statistical methods and probabilistic models. These approaches enabled systems to learn from experience and improve their behavior accordingly. In this context, machine learning emerged as one of the central directions of artificial intelligence. Machine learning is based on the idea that algorithms automatically identify patterns in data and use this knowledge for prediction and decision making (Domingos, 2015).

Within machine learning, several types of learning are distinguished based on how the learning process is organized. Supervised learning relies on labeled data and is widely used for classification and regression tasks. Another type focuses on discovering hidden structures in data and is often applied in clustering and anomaly detection. Reinforcement learning is also identified, which is based on analyzing experience gained through interaction with the environment and deriving conclusions from it (Domingos, 2015).

One of the most important stages in artificial intelligence development is the emergence of deep learning. Deep learning is based on multilayer neural networks and enables the processing of large volumes of unstructured data. This approach significantly expanded the application scope of artificial intelligence and made it possible to solve tasks that were previously difficult to address. The development of deep learning became particularly relevant with advances in computational resources and the growth of data volumes (Goodfellow et al., 2016).

When examining the stages of artificial intelligence development, it is important to note that each technological leap brought both new opportunities and new challenges. The increasing complexity of systems intensified issues related to transparency, reliability, and explainability of decisions. These challenges are especially critical in areas where artificial intelligence systems affect user experience and critical processes (Adarsh, 2025).

Thus, understanding the concept and main stages of artificial intelligence development provides a necessary theoretical framework for assessing its role and significance in the modern technological environment. This analysis lays the groundwork for discussing applied aspects of artificial intelligence and ensures a logical connection to subsequent sections, which examine specific artificial intelligence tools and their application in the context of web technologies.

The practical significance of artificial intelligence methods is particularly evident in the context of web technologies, where systems operate in dynamic, multi-user, and data-intensive environments. Modern web applications continuously process large volumes of data, respond to user behavior in real time, and must ensure high performance under varying technical and network conditions. This environment creates favorable conditions for the application of artificial intelligence methods, as they enable adaptation, prediction, and automated optimization (Smith & Anderson, 2020).

One of the most widely applied directions of artificial intelligence in web technologies is machine learning. Machine learning algorithms make it possible to analyze user behavior, server load, network latency, and resource utilization characteristics. Based on these data, models can be developed that predict performance degradation or the risk of system failures in advance. Such prediction forms the basis for practical optimization and represents a key factor in improving web application efficiency (Wagner, 2017).

Within machine learning, supervised and unsupervised learning are particularly important for web performance management. Supervised learning is often used for tasks such as predicting page load time or classifying user behavior. Unsupervised learning is effective for anomaly detection, such as identifying unusual traffic patterns or unexpected load spikes. These approaches enable web technologies to detect problems in a timely manner and reduce their impact on user experience (Smith & Anderson, 2020).

In the context of web technologies, reinforcement learning acquires particular importance, as it is based on continuous interaction with the environment and a feedback mechanism. This approach is effective in scenarios where the system independently selects optimal actions across different states. From a web performance perspective, reinforcement learning can be applied to the dynamic optimization of caching strategies, resource allocation, and content delivery mechanisms. Such an approach enables system self-adaptation and real-time decision making, thereby improving overall performance efficiency (Adarsh, 2025).

Deep learning is applied in web technologies in cases where large volumes of unstructured data must be processed. For example, user interaction logs, images, video content, and textual data form complex datasets whose analysis is challenging using traditional methods. Deep neural networks enable the identification of complex relationships within such data and allow more accurate predictions of web application performance and user behavior (Goodfellow et al., 2016).

The application of artificial intelligence methods in web technologies is not limited to data analysis alone. Recommendation systems based on machine learning and deep learning play a significant role in the personalization of user experience. Personalized content delivery directly

affects perceived website performance, as users receive relevant and optimized information within a shorter time frame. This factor also influences the subjective dimension of web performance evaluation (Stoyan & Pucella, 2019).

When applying artificial intelligence methods in web technologies, it is also important to consider algorithmic efficiency and infrastructural requirements. The deployment of complex models may introduce increased computational overhead, which can negatively affect overall system performance. Consequently, hybrid approaches that combine traditional optimization techniques with artificial intelligence methods are commonly adopted in practice. Maintaining this balance is critical for the successful integration of artificial intelligence into web technologies (Steiner, 2019).

Beyond technical considerations, the use of artificial intelligence methods in web technologies is associated with organizational and strategic challenges. Effective system management requires appropriate monitoring mechanisms, regular model updates, and systematic evaluation of outcomes. These processes ensure the reliability and long-term sustainability of artificial intelligence systems (Adarsh, 2025).

Thus, the examination of core artificial intelligence methods within the context of web technologies demonstrates that these technologies create significant opportunities for improving web application performance. Artificial intelligence enables data-driven, adaptive, and self-optimizing solutions, which represent one of the central trends in the evolution of modern web technologies. This analysis provides a logical transition to the subsequent subsection, which discusses the foundations for integrating artificial intelligence into web technologies.

The modern web technology environment is characterized by high dynamism, multilayered architectures, and the rapid evolution of user-centered services. Web applications no longer represent simple mechanisms for information exchange between client and server; instead, they function as complex, distributed systems that process large volumes of data in real time and support continuous interaction with millions of users. Under such conditions, website performance management becomes one of the most important technical and strategic challenges. It is within this context that the role of artificial intelligence emerges as an integrated component of web infrastructure rather than an isolated technological element (Wagner, 2017).

The integration of artificial intelligence into web infrastructure involves its incorporation across multiple system layers, including the client side (front-end), server side (back-end), and network layer. At each layer, artificial intelligence serves distinct functional purposes, while the overarching objective remains the same: improving overall web application performance, reliability, and user experience (Steiner, 2019).

On the client side, artificial intelligence integration is primarily associated with the analysis of user behavior and interface adaptation. Modern browser environments and JavaScript-based frameworks enable certain analytical and predictive functions to be executed directly on user devices. This approach reduces the number of requests sent to the server and improves system responsiveness. Dynamic adaptation of interface elements based on user behavior

enhances perceived performance, significantly influencing subjective evaluations of website speed (Stoyan & Pucella, 2019).

On the server side, artificial intelligence integration is related to data processing, resource management, and system-level decision making. Server infrastructure concentrates core computational resources and data flows. At this level, artificial intelligence algorithms are applied to request handling, load balancing, and optimization of caching strategies. Data-driven models allow for the prediction of peak load conditions and dynamic resource allocation, substantially reducing the risk of delays and service interruptions (Grigorik, 2013).

The third critical layer of web infrastructure is the network level, where the use of artificial intelligence is particularly relevant for large-scale and global services. Network communication efficiency directly affects page load times and overall performance. Artificial intelligence enables intelligent traffic routing, content delivery optimization, and prediction of network latency. These approaches are especially effective within content delivery networks (CDNs), where artificial intelligence selects the most optimal paths for data delivery (Grigorik, 2013).

Scalability represents a key consideration in the integration of artificial intelligence into web infrastructure. Modern web applications often operate within microservices architectures, which enhance flexibility but also complicate performance control. In such environments, artificial intelligence models are used to analyze interactions between services and identify problematic components. This analysis contributes to improved system stability and optimal resource distribution (Steiner, 2019).

The application of artificial intelligence in web infrastructure extends beyond technical dimensions and includes organizational and operational aspects. Effective integration requires appropriate monitoring systems, data governance policies, and regular model updates. These processes ensure the reliability of artificial intelligence systems and the long-term accuracy of their predictions. Ethical and security considerations are also critical, particularly when artificial intelligence participates in decision-making processes that directly affect users (Adarsh, 2025).

During the integration process, particular attention must be given to computational costs. Although artificial intelligence aims to improve performance, poorly selected or overly complex models may themselves become sources of performance degradation. Consequently, optimized and lightweight models are widely used in practice to maximize benefits while minimizing computational overhead. This approach underscores the necessity of balancing intelligent capabilities with overall system efficiency (Wagner, 2017).

In summary, the integration of artificial intelligence into web technology infrastructure represents a central direction in the development of modern web applications. Artificial intelligence is no longer an auxiliary or secondary component; it becomes an organic part of web architecture, enabling system adaptation, self-optimization, and sustained high performance in dynamic environments. This subsection completes the conceptual framework of the first chapter

and provides a solid foundation for subsequent chapters, which examine specific artificial intelligence tools and their application in improving website performance.

Effective management of website performance is impossible without objective and systematic evaluation. In modern web technologies, performance is no longer viewed as a single technical indicator; rather, it constitutes a multi-metric concept that integrates both system-level and user-oriented indicators. The increasing complexity and dynamism of web applications make performance evaluation a critical process, whose accuracy directly determines the effectiveness of optimization strategies.

Traditionally, website performance evaluation relied on technical metrics such as total page load time, server response time, and request processing speed. While these metrics provide valuable information about system operation, they fail to capture the full picture in the context of modern web applications. User experience often depends not only on overall load time but also on how quickly interactive elements become available and how seamless system interaction feels.

For this reason, user-centered performance metrics are widely employed in modern web technologies to reflect perceived website speed. These metrics focus on moments that are truly meaningful to users, such as the initial rendering of visual content, time to interactivity, and system response to user actions. This approach highlights the subjective dimension of web performance and demonstrates that technical optimization alone is not always sufficient to ensure user satisfaction.

Performance evaluation metrics gain particular importance in the context of artificial intelligence applications. Artificial intelligence models rely on data, and performance metrics serve as the primary signals upon which learning and adaptation are based. The quality, accuracy, and contextual relevance of these metrics directly determine the reliability and effectiveness of artificial intelligence-driven decisions.

The use of artificial intelligence for performance improvement requires continuous collection and analysis of metrics. Static or periodic measurements cannot provide sufficient insight in dynamic web environments, where network conditions, user behavior, and system load constantly change. Metrics collected in real time form the basis for models capable of prediction, anomaly detection, and automatic activation of optimization mechanisms.

Understanding the relationships between performance metrics is also critical. Improving a single indicator does not necessarily result in better overall performance. For example, reducing technical load time may not enhance perceived speed if interactive elements remain unavailable. In this context, artificial intelligence enables a comprehensive analysis of metric interdependencies and supports balanced decision making.

Artificial intelligence also reduces subjectivity in performance evaluation. Data-driven models can uncover hidden patterns that are difficult to detect through traditional analysis. This approach is particularly important for large-scale web applications, where performance issues may manifest only under specific conditions or within particular user segments.

The proper selection and interpretation of performance metrics represent a significant methodological challenge. Excessive numbers of metrics complicate analysis, while insufficient metrics fail to reflect actual system behavior. In this regard, artificial intelligence can serve as a supporting tool for identifying an optimal set of metrics and dynamically adjusting their relative importance across different contexts.

Thus, website performance evaluation metrics constitute a fundamental element for the application of artificial intelligence in web technologies. Their accurate definition, collection, and analysis provide the necessary foundation for effective intelligent optimization mechanisms. This subsection complements the theoretical framework of the first chapter and strengthens the link between conceptual analysis and subsequent applied research.

The diversity of data sources plays a crucial role in website performance evaluation. In modern web technologies, performance metrics are obtained both from controlled laboratory environments and from real user interactions. This distinction complicates the interpretation of evaluation results, as laboratory conditions cannot always reflect real-world load and network variability. In this context, artificial intelligence plays a key role in integrating data from multiple sources and ensuring consistent analysis.

Metrics derived from real user monitoring are particularly valuable, as they reflect website behavior across different devices, operating systems, and network environments. The volume and heterogeneity of such data complicate traditional analytical approaches. Artificial intelligence algorithms enable data segmentation, trend detection, and identification of distinct user scenarios, significantly improving evaluation accuracy.

Time represents another important dimension of performance evaluation. Performance is not static; it varies over both short and long periods. System updates, content changes, and seasonal user activity patterns significantly affect performance metrics. Artificial intelligence enables the analysis of temporal variations and the identification of trends indicating gradual performance degradation or improvement.

Artificial intelligence also facilitates the automation of performance evaluation processes. Automatically collected and processed metrics reduce the need for manual intervention and increase objectivity. Automation is particularly important for large-scale web applications, where manual performance monitoring is practically infeasible. This approach forms the basis for continuous monitoring systems.

Context awareness is essential when interpreting performance metrics. The same indicator may have different significance for different types of web applications. For example, acceptable performance thresholds differ between informational websites and real-time web services. Artificial intelligence models enable context-aware evaluation, reducing the risk of applying universal but inaccurate criteria.

The application of artificial intelligence in performance evaluation supports more informed decision making. Metric-based analysis allows the identification of optimization steps that genuinely affect system behavior, as well as changes that yield limited benefits. This

approach is especially important under resource constraints, where optimization priorities must be carefully determined.

Furthermore, artificial intelligence contributes to the standardization of performance evaluation. Comparing different metrics within a unified framework enables comparative analysis across systems. This is particularly important for large organizations and complex infrastructures, where consistent performance assessment across multiple services is required.

Conclusion

Thus, the paper presents an analysis of the main artificial intelligence methods in the context of web technologies, clearly demonstrating their practical role in website performance management. Machine learning, deep learning, and reinforcement learning are discussed not as abstract theoretical concepts, but as concrete tools applied to user behavior analysis, system load prediction, and dynamic resource management.

The analysis shows that artificial intelligence in modern web applications no longer functions as an additional or isolated component. Instead, it is integrated across different system layers—on the client side, within server infrastructure, and at the network level—and directly participates in ensuring website performance. Such an integrated approach creates the foundation for the development of self-optimizing systems, which represents one of the key trends in the evolution of modern web technologies.

Furthermore, the study demonstrates that the convergence of artificial intelligence and web technologies is a natural outcome of contemporary digital system development. This analysis once again highlights the importance of website performance improvement and its critical role within the modern technological environment.

References

1. Jeremy L. Wagner, Web Performance In Action (2017), Manning Publications - Jeremy L. Wagner, Web Performance In Action
2. Souders, S. (2007). High Performance Web Sites: Essential Knowledge for Front-End Engineers. O'Reilly Media.
3. Smith, J., & Anderson, C. (2020). Artificial Intelligence in Web Performance Optimization: A Survey. *Journal of Web Engineering*, 14(3), 234-247.
4. Adarsh M J, (2025) Optimizing Web Applications with AI: Ensuring Performance, Trust and Ethical Standards, Jawaharlal Nehru National College of Engineering - Optimizing Web Applications with AI: Ensuring Performance, Trust and Ethical Standards
5. Ilya Grigorik, (2013) High Performance Browser Networking, 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472 - High Performance Browser Networking
6. Patrick Killelea(2001), Web Performance Tuning , O'Reilly Media, Incorporated - Web Performance Tuning

7. Stuart J. Russell and Peter Norvig(2023),Artificial Intelligence Technology, Huawei Technologies Co., Ltd., Hangzhou, China
8. Kevin Warwick (2012), Artificial Intelligence. The Basics, Wearset Ltd, Boldon, Tyne and Wear, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN
9. Stoyan, P., & Lanza, M. (2021). *Essential Image Optimization: Your Guide to Optimizing Web Images for Faster Websites and Better User Experience*. Smashing Magazine.
10. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press.
11. Domingos, P. (2015). The Master Algorithm: How the Quest for the Ultimate Learning Machine Will Remake Our World. Basic Books.
12. Stoyan, P., & Pucella, R. (2019). Web Performance: From Start to Finish. Smashing Magazine.
13. Steiner, M. (2019). Web Performance in Practice: Optimizing the Modern Web for Speed and User Experience. Packt Publishing.
14. Dumont, M. (2018). Web Performance Optimization: A Comprehensive Guide to Building Fast and Scalable Web Applications. Apress.
15. Heffernan, R. (2020). Speed Up Your Site: Web Performance for Web Developers. O'Reilly Media.
16. Фомичев, А. (2020). Web-производительность. Практическое руководство. Эксмо.
17. Захаров, В. (2019). Машинное обучение. Теория и практика. ДМК Пресс.
18. Brock, A., & Smith, J. (2021). Building AI-Powered Web Applications: Using Machine Learning and Deep Learning to Improve User Experience. O'Reilly Media.
19. Bhatnagar, A. (2020). AI for Web Developers: Build Smarter Websites Using Artificial Intelligence Tools. Packt Publishing.
20. Soni, M. (2019). Artificial Intelligence for Web Development: Building Intelligent Websites with Python and JavaScript. Packt Publishing.

Phenylglycosylamines in melanoidin reaction

Karkashadze Nino¹, Tserodze Nana², Uridia Rusudan³, Bolkvadze Nona⁴, Dolidze Liparit⁵,
Tatiashvili Leila⁶, Tsiskarishvili Rusudan⁷

¹PhD in Chemistry sciences, Senior Researcher of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, P. Melikishvili Institute of Physical and Organic Chemistry, Tbilisi, Georgia. nino.karkashadze@tsu.ge; ²PhD in Chemistry sciences, Scientist of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, P. Melikishvili Institute of Physical and Organic Chemistry, Tbilisi, Georgia. nana.tserodze@tsu.ge; ³PhD in Biology sciences, Senior Researcher of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, P. Melikishvili Institute of Physical and Organic Chemistry, Tbilisi, Georgia; Associate Professor of European University, Tbilisi, Georgia; [Orcidhttps://orcid.org/0009-0002-0685-2813](https://orcid.org/0009-0002-0685-2813) rusudan.uridia@tsu.ge, rusudan.uridia@eu.edu.ge; ⁴PhD in Chemistry sciences, Associate Professor of Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia. nona.bolkvadze63@gmail.com; ⁵ PhD in Chemistry sciences, Senior Researcher of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, P. Melikishvili Institute of Physical and Organic Chemistry, Tbilisi, Georgia. liparit.dolidze@tsu.ge; ⁶PhD in Chemistry sciences, Scientist of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, P. Melikishvili Institute of Physical and Organic Chemistry, Tbilisi, Georgia. leila.tatiashvili@tsu.ge; ⁷PhD in Chemistry sciences, Senior Researcher of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, P. Melikishvili Institute of Physical and Organic Chemistry, Tbilisi, Georgia. rusudan.tsiskarishvili@tsu.ge

Abstract

By the example of N-carboxy-phenylglycosylamines and N-hydroxy-phenylglycosylamines we have studied the dependence of transformation of N-glucoside – a key product of Maillard reaction on reaction medium pH and temperature [1,2]. We have determined the intensity of the mentioned aryl-N-glucosamines' transformation into melanoidin according to number of formed melanoidin complexes ($\lambda = 470$), and we have compared this process to melanoidin formation from respective amine component and glucose. We have conducted reaction in phosphate buffer medium, at following pH values: 5,0; 7,0; 9,2; at 100°C during 2 hours, concentration of aryl-N-glucosamines or respective sugar-amine reacting mixture was 0.1 mole/l. Melanoidin reaction rate has been determined according to extinction of the formed melanoidin pigment ($\lambda = 470$ nm). According to our experiment, N-glucosides and their respective sugar-amine mixtures participate in melanoidin reaction in a similar fashion: they generate melanoidin with roughly similar intensity at identical pH. At that, some difference has been noted between aminobenzoic acids and aminophenols; in particular, N-hydroxy-phenylglycosylamines and their respective sugar-amine mixtures intensively generate melanoidin pigments at high pH (9,2) and melanoidin reaction intensity reduces with increase of acidity. This fact makes aminophenols similar to

aliphatic amino acids, which exactly in alkaline medium take more active part in melanoidin reaction [3].

Key Words: Aminobenzoic acid, Aminophenol, Toluidine, Phenylglycosylamines, Melanoidin reaction

According to ability to form melanoidin pigment, activity of aminophenols and their respective N-glucosides decreases in the following series: $p > o > m$. N-carboxy-phenylglycosylamines and their respective sugar-amine mixtures actively generate melanoidin pigment at low pH (5,0) and melanoidin reaction intensity reduces with decrease of acidity. Thus, in the context of participation in melanoidin reaction, aminobenzoic acids differ markedly from aminophenols and aliphatic amino acids. According to ability to form melanoidin pigment, the activity of aminobenzoic acids and their respective N-glycosides decreases in the following series: $m > o > p$. Experimental results are given in the Table 1.

Table 1: Melanoidin product formation during glucose and amine component interaction (phosphate buffer, 100°C, 2 hours; concentration of reacting components 0,1 mole/l)

Amine component	pH	Melanoidin product extinction λ 470 nm
o - aminobenzoic acid	5,0	1,38
	7,0	1,32
	9,2	1,23
m - aminobenzoic acid	5,0	*
	7,0	1,39
	9,2	1,32
p - aminobenzoic acid	5,0	0,67
	7,0	0,25
	9,2	0,20
o - aminophenol	5,0	1,53
	7,0	1,78
	9,2	1,88
m - aminophenol	5,0	0,92
	7,0	1,10
	9,2	1,18
p - aminophenol	5,0	1,60
	7,0	1,81
	9,2	2,10

* The reaction proceeds very vigorously and melanoidin pigment is released.

As we mentioned, the first stage of sugar-amine reaction is N-glycosylation of amine components, while this process of N-glycosylation is influenced by alkaline nature of the reacting amine. pKa value of o-, m- and p-aminobenzoic acids equals to 2.11; 3.12; 2.41, respectively.

During o-, m- and p-aminobenzoic acids' interaction with glucose, the carboxyl group, due to its negative inductive and negative mesomeric effect, reduces electron cloud density on nitrogen atom and, respectively, basic nature of nitrogen atom. In this case, N-glucoside, due to its high stability, is produced with higher yield. Relatively lower yield of N-glucoside in the event of o-aminobenzoic acid can be explained by presence of spatial factor. Due to presence of negative mesomeric effect of the carboxyl group, m-aminobenzoic acid is a stronger base, than o- and p-aminobenzoic acids, therefore N-m-carboxyphenyl-D-glucosylamine is a less stable compound and, respectively, its yield is low as well.

Thus, the stronger base the amine is, the easier it participates in N-glycosylation reaction, but also the easier are the following transformations (Amadori rearrangement, Maillard reaction, deamination, decarboxylation, furanose nucleus formation etc.) of the formed N-glucoside [4, 5, 6]. This circumstance is clearly seen from Figures 1-3, where the results of N-o-, -m- and -p-carboxyphenyl-glucosylamine hydrolysis process are given. Number of aminobenzoic acid generated resulting from hydrolysis of these N-glycosides in acid or neutral medium is higher in the case of o- and p- isomers, compared to m-isomer. This difference becomes more evident with rise of hydrolysis process temperature [7].

Figure 1

N-o-carboxyphenyl-glucosylamine (0,017 mole/l) hydrolysis in 0,1 M phosphate buffer, hydrolysis duration is 150 minutes: 1 – pH 5,0; 2 – pH 7,0; 3 – pH 9,2.

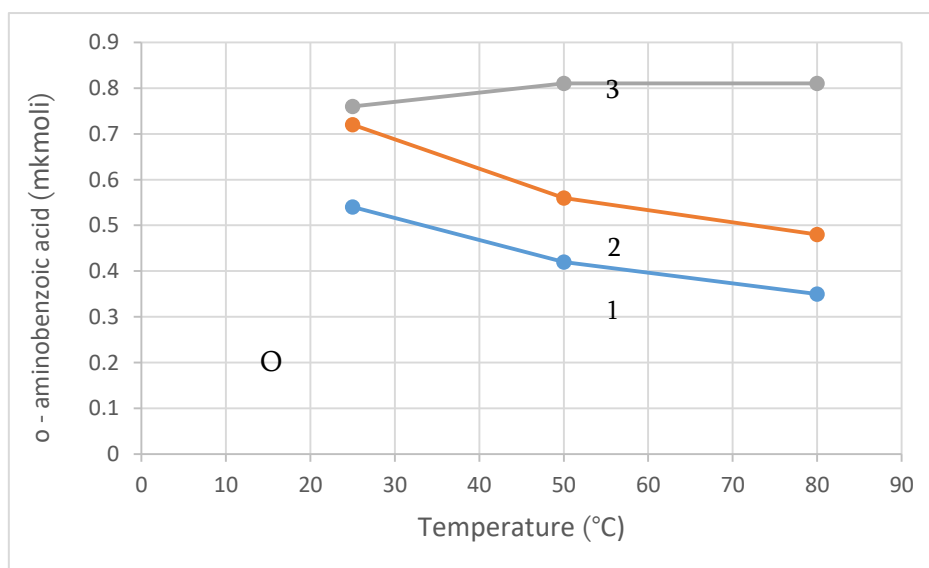


Figure 2

N-m-carboxyphenyl-glucosylamine (0,017 mole/l) hydrolysis in 0,1 M phosphate buffer, hydrolysis duration is 150 minutes: 1 – pH 5,0; 2 – pH 7,0; 3 – pH 9,2

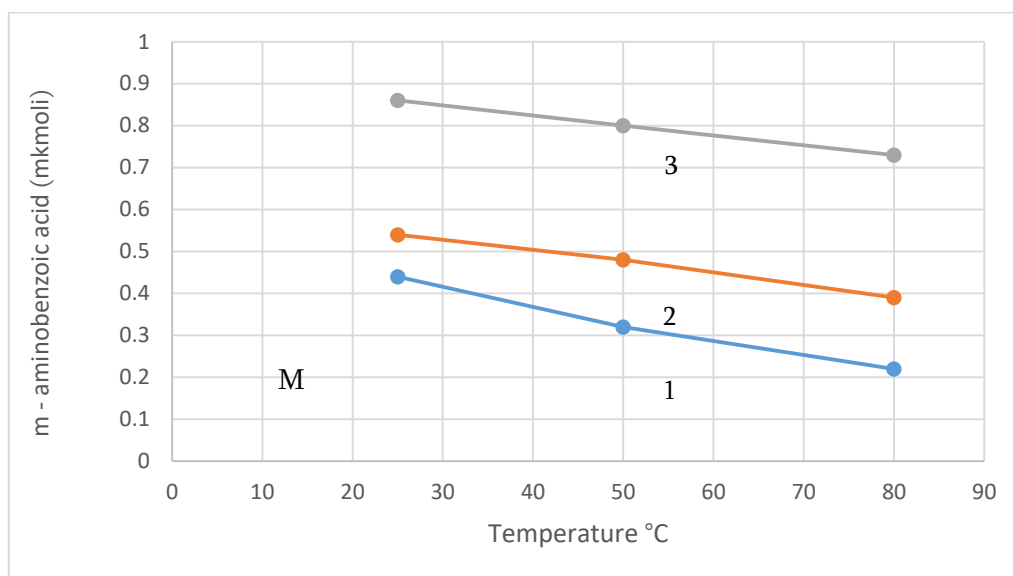
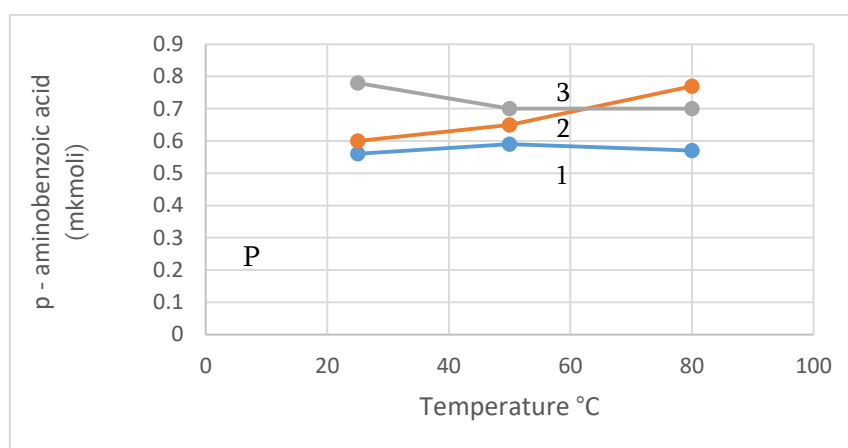


Figure 3

N-p-carboxyphenyl-glucosylamine (0,017 mole/l) hydrolysis in 0,1 M phosphate buffer, hydrolysis duration is 150 minutes: 1 – pH 5,0; 2 – pH 7,0; 3 – pH 9,2



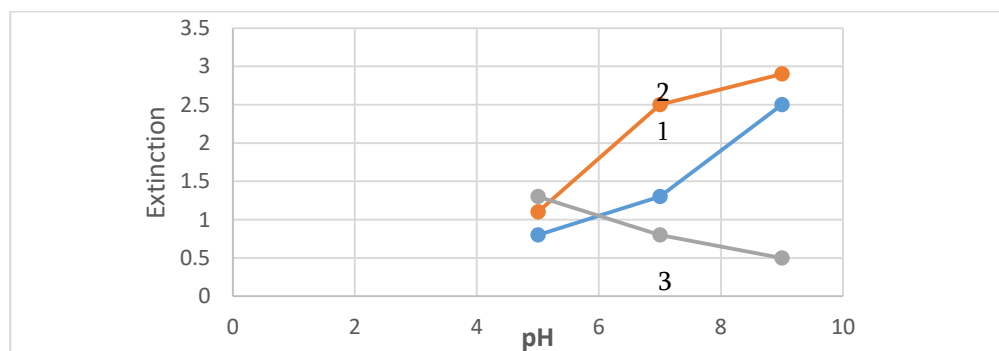
It is obvious, that in parallel with N-carboxyphenyl-glucosylamine hydrolysis process, aminobenzoic acid and glucose formed in the same medium, interacts again according to Maillard reaction scheme. This is evidenced by melanoidin pigment formation in the hydrolysis area, which is especially intense at high temperatures (80°C). Presence of hydroxymethyl-furfural in hydrolysis area also points at Maillard reaction. Identifying of the latter has been managed in area of hydrolysis carried out at 80°C, while in case of N-m-carboxyphenyl-glucosylamine – in the

hydrolysis area carried out at 50°C. Thus, the comparative analysis of results of N-carboxyphenyl-glucosylamine hydrolysis shows, that among isomeric aminobenzoic acids, m-isomere or its respective N-glucoside take especially active part in Maillard reaction. It should be noted that when heating in non-aqueous solutions, aminobenzoic acid N-glucosides form melanoidin pigments only under long-time heating conditions and then in negligible quantity, while, as we can see, hydroxymethylfurfural is not produced at all [8].

The obtained results show that in contradistinction from protein amino acids, which take more active part in Maillard reaction being in base medium, isomeric aminobenzoic acids react with more energy being in acid medium. In this regard, comparison of toluidines, aminophenols and aminobenzoic acids provide interesting picture.

Figure 4

Melanoidin reaction in the mixture of: (1) D-glucose + p toluidine; (2) D-glucose + p-aminophenol; (3) D-glucose + p-aminobenzoic acid; melanoidin products' formation is calculated on 353 sec (molar ratio 1:1, 0,1 M phosphate buffer, reaction temperature 100°C, duration 2 hours)



During this comparison a definite regularity has been noted: in particular, activity of toluidines and aminophenols in Maillard reaction increases with rise of pH, while in case of aminobenzoic acids this activity decreases, on the contrary. A case in point is represented in Figure 4, where activity of p-isomers of these compounds in Maillard reaction is compared under the same conditions.

This regularity in a certain way is associated with pKa values of the mentioned compounds, which are represented in Table 2. As is seen, among phenylamines, compounds with high ionization constant take more active part in Maillard reaction in weak acid medium, while compounds with lower ionization constant – in weakly alkaline medium, on the contrary [9].

Table 2

pKa values of substituted phenylamines

Compound	pKa
o -Toluidine	4,39
m -Toluidine	4,60
p -Toluidine	5,12
o - aminophenol	4,72
m - aminophenol	4,17
p - aminophenol	5,17
o - aminobenzoic acid	2,11
m - aminobenzoic acid	3,12
p - aminobenzoic acid	2,41

Reference:

1. Sopromadze T. T., Kublashvili R. I. On the participation of aromatic amino acids in the process of melanoidin formation. Problems of Theoretical and Experimental Chemistry Abstracts of Reports, Ekaterinburg, 2002, p. 221.1.
2. Kublashvili R., Sopromadze T. Synthesis of N-glucosides of Amino Benzooic Acids and Amino Phenols and Their Transformation into Melanoidin. – Bull. Georgian Acad. Sci., 2003, 167, 78-80.
3. Tserodze N., Tatiashvili L., Tsiskarishvili R., Dolidze L., Bolkvadze N., Karkashadze N., Uridia R. Fraction composition of melanoidin pigment. Georgian Scientises. Vol.7 Issue4, 2005 <https://doi.org/10.52340/gS.2025.07.04.13>. p. 241-247.
4. Belitz H.D., Grosch W. food Chemistry. Berlin, Heidelberg, New York. Springer-Verlag. 1999, 263-318.
5. Ikan R. The Maillard Reaction. Chichester, John Wiley and Sons, 1996, 7-29.
6. Yaylayan V.A., Huyghues-despointes A. Chemistry of Amadori Rearrangement Products: Analysis, Synthesis, Kinetics, Reactions, and Spectroscopic Properties. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 1994, 34, 321-369.
7. Kublashvili R., Chachua L., Samsonia Sh. Participation of free and N-glucosylated aminobenzoic acids in the Maillard reaction. Proc. Georg. Acad. Sci., 2005, 31, 64-69.
8. Kublashvili R. I., Ugrehelidze D. Sh. On the participation of N-carboxyaenyl glucosylamines in the melanoidin reaction. Communications of the Academy of Sciences of the Georgian SSR, 1979, 93, 457-459.
9. Albert A., Sergent E. Ionization constants of acids and bases. M.L., Chemistry, 1964, 133-144 p.

Влияние высокопроводящих разупорядоченных областей на кинетику отжига радиационных дефектов в облученных высокоэнергетическими протонами кристаллах n-Si

Теимураз Пагава¹, Манана Беридзе¹, Дареджан Хочолава¹, Марина Шогирадзе¹, Нона Есиава¹, Лали Туриашвили², Маиа Жгенти¹.

¹Грузинский технический университет, факультет информатики и систем управления, кафедра инженерной физики, проспект Мераба Коставы, 77, Тбилиси, 0160, Грузия.

²Тбилисский государственный университет имени Ивана Джавахишвили, факультет точных и естественных наук, кафедра химии, проспект Ильи Чавчавадзе, 3, Тбилиси, 0128, Грузия.

Аннотация

Исследовались монокристаллы кремния n-типа (n-Si), полученные зонной плавкой, с концентрацией электронов $n \approx 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Образцы облучались протонами с энергией 25 МэВ при 300 К. Изохронный отжиг (ИО) облученных кристаллов производился в интервале температур $T_{\text{ann}}=110\text{--}500^\circ\text{C}$. Исследования образцов проводились методом Холла в интервале температур 77–300 К. В образцах n-Si, облученных высокоэнергетическими протонами, наблюдаемое немонотонное изменение концентрации электронов n в зависимости от температуры измерения T объясняется изменением энергии ионизаций точечных радиационных дефектов (РД) под влиянием энергии электростатического взаимодействия $\&$ между различными РД. Осцилляционная зависимость холловской подвижности μ_n от температуры отжига и немонотонность кривых $\mu_n(T)$ определяется существованием высокопроводящих разупорядоченных областей (РО) в облученных кристаллах n-Si, образованием электрического поля на границе раздела высокопроводящих РО с матрицей кристалла и немонотонностью изменения электрического потенциала U высокопроводящих РО в зависимости от зарядового состояния последних. Высокопроводящие РО полностью отжигаются в интервале температур $T_{\text{ann}}=380\text{--}500^\circ\text{C}$. Работа описывает основные особенности изменения концентрации и подвижности основных носителей тока в облученных высокоэнергетическими протонами кристалла кремния n-типа в процессе изохронного отжига.

Ключевые слова: кремний, радиационный дефект, разупорядоченная область, холловская подвижность

1. Введение

Как известно, уменьшение холловской подвижности μ_n основных носителей тока в облученных низкоэнергетическими частицами кристаллах кремния в области низких температур обусловлено образованием заряженных точечных радиационных дефектов (РД). После облучения частицами высоких энергий в кристаллах n-Si образуются такие же точечные дефекты, как при облучения низкоэнергетическими, но при равных концентрациях этих дефектов, μ_n уменьшается сильнее. Исходя из этих фактов Вертгейм [1] предположил, что в исходном n-Si, помимо точечных РД, возникают разупорядоченные области (РО) р-типа, соединный размер которых соизмерим с длиной волны электронов проводимости. Такие образования не прозрачны для электронов, поскольку представляют собой квазидиэлектрические включения и приводят к резкому уменьшению μ_n .

Для объяснения изменения электрических свойств германия после облучения нейтронами Кроуфордом и Клелендом [2] впервые была предположена модель кластера.

Практически одновременно детальное описание модели кластера было сделано Госсиком [3]. По его мнению, кластер представляет собой микроскопическое включение сфероидальной формы, которое содержит большую концентрацию дефектов (10^{18} – 10^{20} см⁻³) и обладает проводимостью, отличной от проводимости неповрежденной матрицы. Вследствие диффузии носителей из окружающего неповрежденного материала, стремящейся выровнять разницу в электропроводности между кластером и матрицей, прилегающие области становятся заряженными. Это ведет к образованию сфероидальной области пространственного заряда, истощающей концентрацию основных носителей в матрице на определенном расстоянии от центра кластера.

По модели Госсика, области разупорядочения влияют на подвижность основных носителей двояко: с одной стороны, геометрически блокируя потоки основных носителей и тем самым уменьшая эффективное сечение образца, а с другой – электрически, проявляя себя запряженными включениями, в поле которых происходит дополнительное рассеяние свободных носителей тока.

Согласно модели, предложенной в работе [4], РО состоят из насыщенного мультивакансионными комплексами ядра и оболочки, содержащей комплексы моновакансий с примесными атомами. Оболочки РО формируются при диффузии моновакансий ядра РО в матрице, где они входят в квазихимические реакции с примесными атомами, расположенными вокруг РО. Глубина проникновения моновакансий в матрицу и, следовательно, размеры оболочек РО определяются концентрацией примесей в исследуемом образце.

На основе экспериментальных данных, полученных из холловских и фотохолловских измерений, авторы работ [5,6] доказали, что оболочка РО в образцах Si n- и р-типа проводимости, облученных протонами с энергиями 30 и 640 МэВ, соответственно, на самом деле состоит из вторичных РД (А-центры, комплексы бор+вакансия и т.д.). Анализ экспериментальных данных работ [5,6] авторами позволил сделать предположение, что

ядра РО образуются не только из мультивакансионных дефектов, но и из межузельных атомов и их ассоциатов, а их размеры зависят от энергии протонов.

Эти модели удовлетворительно описывают уменьшение подвижности в области низких температур, но не в состоянии объяснить наблюдаемое в работе [2] появление минимума на кривых температурной зависимости подвижности электронов проводимости в области низких температур.

Появление минимума на кривых $\mu_n(T)$ пытались объяснить в работе [7], в которой исследовались монокристаллы n-Si, полученные зонной плавкой, легированные фосфором до концентрации носителей тока $n=5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и содержанием кислорода $N_o \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Исследуемые образцы облучали сначала протонами с энергией 24 МэВ (доза 10^{11} см^{-2}), а затем электронами с энергией 2.2 МэВ (доза $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), что позволило получить минимум на кривой $\mu_n(T)$ при $T=100 \text{ К}$. В этой работе существование таких минимумов объясняется прилипанием электронов на электростатически взаимодействующих центрах (А-, Е-центры, дивакансии и т.д.) в оболочке вокруг РО.

Глубокий минимум на кривой зависимости $\mu_n(T)$ наблюдали авторы работы [8] в облученных электронами с энергией 15 МэВ образцах n-Ge. По их мнению, если резкое падение $\mu_n(T)$ в интервале 240–180 К можно связывать с наличием дрейфовых барьеров, остается неясным последующее возрастание μ_n с понижением температуры. Немонотонное изменение холловской подвижности от температуры в образцах германия n-типа, облученных быстрыми электронами, на их взгляд, не находит непротиворечивого объяснения в рамках изложенных теорий.

В кристаллах n-Si, облученных протонами с энергией 25 МэВ дозой $\Phi=8.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ значение подвижности электронов проводимости μ_n резко возрастает и становится выше исходного его значения [9,10]. По мнению авторов, это связано с образованием в облученных образцах высокопроводящих включений с омическим переходом на границах раздела с матрицей полупроводника.

Целью данной работы является изучение влияния высокопроводящих РО на кинетику изменения концентрации и подвижности основных носителей тока в процессе изохронного отжига (ИО) и установление температуры отжига высокопроводящих РО, в облученных высокоэнергетическими частицами кристаллах n-Si.

2. Эксперимент

Были исследованы изменения характера температурных зависимостей концентрацией n и холловской подвижности μ_n электронов в облученных кристаллах кремния, подвергшихся процессу ИО при различных температурных T_{ann} (рис. 1 и рис. 2). Исследуемые образцы с размерами $1 \times 3 \times 10 \text{ мм}$ представляли собой монокристаллы n-Si, легированные фосфором Р до концентрации $N_P \approx 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Образцы облучали протонами с энергией 25 МэВ при 300 К, доза облучения $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Облученные кристаллы подвергались ИО в интервале $T_{\text{ann}}=110\text{--}500^\circ\text{C}$ с шагом 10°C . Время выдержки при

фиксированной температуре – 10 мин. После каждого цикла ИО в полученных кристаллах постоянная Холла R_H и концентрация электронов n определялись методом Холла, а удельная проводимость σ – двухзондовым методом. Холловская подвижность вычислялась по формуле $\mu_H = \sigma R_H$. Измерения проводились в интервале температур $T=77-300$ К.

Омические контакты для измерений создавались путем втирания алюминия в поверхность исследуемого образца. Энергии ионизаций уровней дефектов E_i определялись по наклону зависимостей $\ln(1000/T)$. Температура образца при измерениях электрофизических параметров (в интервале $T=77-300$ К) контролировалась медь-константановой термопарой, а температура отжига (в интервале $T_{ann}=110-500^\circ\text{C}$) – хромель-алюмелевой. Погрешность измерения этих величин не превышала 10%.

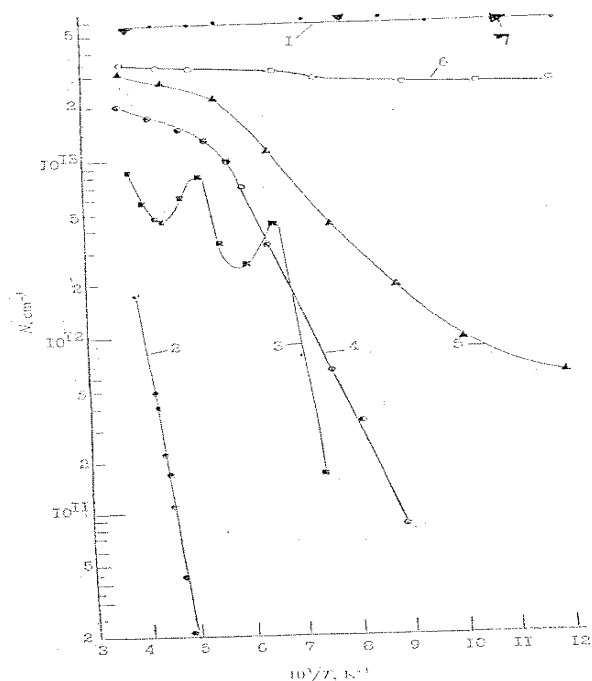


Рис. 1. Зависимости концентрации электронов n от обратной температуры в облученных протонами 25 МэВ кристаллах n-Si до облучения (1), после облучения (2), после отжигов облученного кристалла при 110 (3), 120 (4), 290 (5), 380 (6) и 500°C (7).

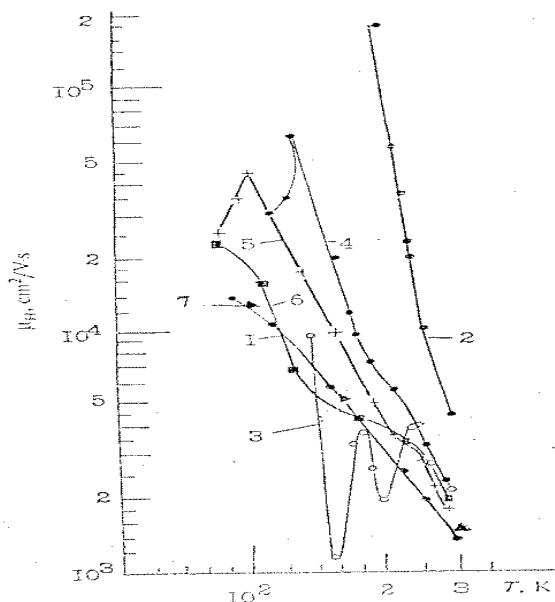


Рис. 2. Зависимости холловской подвижности электронов μ_H от температуры в облученных протонами 25 МэВ кристаллах n-Si до облучения (1), после облучения (2), после отжига облученного кристалла при 110 (3), 120 (4), 290 (5), 380 (6) и 500°C (7).

3. Результаты исследований и их обсуждение

Среди температурных зависимостей концентрации электронов $n(1000/T)$ кривая необлученного кристалла соответствует истощению атомов фосфора с концентрацией $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В результате облучения интегральным потоком $8.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ на соответствующей кривой зависимости $n(1000/T)$ наблюдается экспоненциальный участок, указывающий на истощение акцепторных центров с энергией ионизации $E_i = E_c - 0.36 \text{ эВ}$. Отжиг облученных образцов при 110°C приводит к появлению на кривой зависимости $n(1000/T)$ двух минимумов при температурах 177 и 244 К. После отжига Е-центров и дивакансий при $T_{\text{ann}} = 120$ и 290°C эти кривые показывают монотонный рост с температурой.

Как известно [7], энергия электростатического взаимодействия ε_s между заряженными центрами в облученных большими дозами высокоэнергетичных частиц образцах может достигать величины $\varepsilon_s \approx f\varepsilon_0$, где f – степень заполнения глубоких центров, а $\varepsilon_0 = e^2/\varepsilon d$, где e – заряд электрона, ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника, а d – расстояние между дефектами. Облучение n-Si протонами с энергией 25 МэВ увеличивает долю электростатически взаимодействующих центров (дивакансий, А- и Е-центров), так как создает первичные дефекты, расположенные вдоль треков пробега протонов и способные конденсироваться с образованием РО в форме близких вакансионных комплексов и кластеров.

По нашим оценкам [11], расстояние между электростатически взаимодействующих РД вдоль этих треков меняется в пределах 10^{-7} – 10^{-6} см и $\varepsilon_0 \approx 0.3 \text{ эВ}$. Так как f стремится к 1,

получается $\varepsilon \approx 0.3$ эВ. В таких образцах удается наблюдать изменение – уменьшение или увеличение – энергий ионизации центров, поскольку в исследуемых кристаллах n-Si, помимо отрицательно заряженных акцепторных РД, присутствуют также положительно заряженные атомы донорной примеси. Кроме того, характер взаимодействия между отрицательно заряженными РД, которым соответствуют различные уровни, зависит от направлений спина электронов, захваченных акцепторными центрами.

Сразу после облучения образцов все свободные электроны расположились на глубокие центры – об этом указывает соответствующая кривая. После их отжига при 110°C отжигается определенная часть Е-центров и заряжаются более мелкие уровни, которые проинантлежат А-центрам или дивакансиям. Обнаруживаемая при этом осцилляция величины концентрации электронов можно объяснить электростатическим взаимодействием между заряженными вторичными точечными РД (А- и Е-центров, дивакансий V_2 и т.д.), которые находятся вдоль треков прохождения высокоэнергетических протонов.

Энергия электронов на локальном уровне $E = E_{\Gamma} + \varepsilon$, где E_{Γ} – тепловая энергия, а ε – средняя энергия электростатического взаимодействия между близко расположенными заряженными точечными дефектами. E_{Γ} с увеличением температуры кристалла неуклонно растет, тогда как величина ε зависит от степени заполнения А-, Е-центров и V_2 . Эти центры заряжаются при различных температурах. Соответственно с изменением температуры ε меняется немонотонно.

Если $\varepsilon = 0$, тогда $E = E_{\Gamma} = E_i$, где E_i – энергия деионизации акцепторного центра, и электрон из локального уровня переходит в зону проводимости. Если же $\varepsilon \neq 0$, то тогда $E_i = E_{\Gamma} + \varepsilon$ и электрон из локального уровня в зону проводимости переходит при более низких температурах, чем при чисто тепловой ионизации. Например, если $E = E_{\Gamma} + \varepsilon \geq 0.17$ эВ, А-центры истощаются в области $T \leq 180$ К.

Прямолинейный участок на кривых зависимости $\ln(1000/T)$ в области 130–150 К связан с уровнем с энергией ионизации $E_c - 0.36$ эВ. Этот уровень, по-видимому, является гибридным и соответствует истощению электрически взаимодействующих между собой А- и Е-центров, а также V_2^- и V_2^{--} . Этим центрам соответствуют уровни $E_c - 0.17, 0.44, 0.39$ и 0.21 эВ. Их суперпозиция дает «уровень» с энергией ионизаций $E_c - 0.36$ эВ.

С увеличением T доля глубоких центров увеличивается. В самом деле, в области 300 К уровни $E_c - 0.17$ и 0.21 эВ истощены и кривая облученного образца является результатом деионизации Е-центров ($E_c - 0.44$ эВ) и дивакансий ($E_c - 0.39$ эВ), хотя в силу электростатического взаимодействия между ними их энергия деионизаций уменьшена и равняется $E_c - 0.36$ эВ.

При увеличении температуры измерения в силу электростатического взаимодействия в зону проводимости оттоженного при 110°C образца электроны переходят не только из А-центров, но и из более глубоких уровней, например, $E_c - 0.21$ или 0.39 эВ, которые принадлежат дивакансиям [12,13]. В результате концентрация электронов становится

больше равновесной. После деионизаций А-центров уменьшаются силы электростатического взаимодействия между различными РД и в зоне проводимости остаются только равновесные электроны и n уменьшается.

При дальнейшем увеличении температуры измерения начинается тепловая деионизация уровня $E_c-0.21\text{эВ}$, который принадлежит V_2 . Концентрация равновесных электронов возрастает и на кривой $n(1000/T)$ появляется первый минимум. Увеличение n связано не только с деионизацией уровня $E_c-0.21\text{эВ}$, но и с частичной деионизацией в силу электростатического взаимодействия более глубоких уровней, например, $E_c-0.39$ и 0.44эВ , которые принадлежат V_2^- и Е-центрам соответственно.

После деионизации уровня $E_c-0.21\text{эВ}$ уменьшается энергия электростатического взаимодействия ε_s между различными РД. В результате в зоне проводимости остаются только равновесные электроны и n уменьшается. При более высоких температурах измерения начинается тепловая деионизация уровня $E_c-0.39\text{эВ}$, растет n и на кривой $n(1000/T)$ появляется второй минимум. В данном температурном интервале (200–300 К) не исключена и деионизация определенной части Е-центров.

Следует отметить, что после отжига Е-центров ($T_{\text{ann}} \geq 120^\circ\text{C}$) и V_2 ($T_{\text{ann}} \geq 250^\circ\text{C}$) осцилляция n на кривых зависимости $n(1000/T)$ вовсе не наблюдается.

Температурная зависимость холловской подвижности электронов для исходного образца описывается выражением $\mu_n \sim 1/T^{2.6}$. Это свидетельствует о том, что в диапазоне температур измерений доминирует фононный механизм рассеяния электронов. В образцах, облученных дозой $8.1 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$, зависимость $\mu_n(T)$ смещена вверх, а показатель степени температурной зависимости подвижности достигает ~ 13 . После отжига облученных образцов при 110°C подвижность электронов резко уменьшается и на кривой зависимости $\mu_n(T)$ наблюдаются два минимума. В результате термообработки облученных кристаллов при 120 и 290°C кривые зависимости $\mu_n(T)$ опять смещаются вверх. На этих кривых при 125 и 100 К наблюдаются максимумы. После отжига образцов при 380°C кривая зависимости $\mu_n(T)$ меняется монотонно. А после отжига при 500°C μ_n практически полностью восстанавливается.

Как уже отмечалась в работе [10], увеличение μ_n связано с образованием в кристалле наноразмерных РО скоплений – собственных фоновых и донорных межузельных атомов с высокой проводимостью. Если РО пересыщены фоновыми, легирующими и собственными межузельными атомами, можно предположить, что избыточные атомы занимают несколько соседних междоузлий и связаны между собой также, как и регулярные атомы решетки. Формирующийся кластер можно рассматривать как маленький кремниевый «кристалл», помещенный в решетку основного кристалла [14]. По-видимому, высокая проводимость этих включений связана с обилием атомов фосфора в них ($N_P > 6 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$).

Согласно [14], потенциал высокопроводящей РО с радиусом R , помещенный в среду с диэлектрической проницаемостью ε равен $U=q/C$, где q – ее электрический заряд, а $C=\varepsilon R$ – емкость. Для РО размером в несколько нанометров емкость составляет $\sim 10^{-18}\text{ Ф}$. Поэтому

один носитель заряда – электрон или дырка – помещенный в такой РО, создает потенциал порядка 0.1 В. Такой потенциал может оказаться вполне достаточным для кулоновской блокады транспорта других носителей заряда. По нашим оценкам [11], радиус высокопроводящих РО, в облученные протонами с энергией 25 МэВ кристаллах n-Si, $R \approx 80$ нм. Вполне достаточно несколько десятков электронов для повышения энергетического потенциала РО с таким размером до $U=0.1$ В.

В облученных кристаллах n-Si между высокопроводящими РО и матрицей образуется градиент концентрации электронов. Поэтому электроны покидают РО с высокой концентрацией и переходят в матрицу, в области низкой концентрации основных носителей тока. Создаются т.н. изотипные переходы, которые практически не обладают выпрямляющими свойствами.

Следовательно, приповерхностный слой РО заряжается положительно, а поверхность РО равным по величине отрицательным зарядом. У поверхности РО возникает электрическое поле, которое препятствует дальнейшему переходу электронов из объема РО в матрицу. При этом электрический потенциал РО $U=0$, так как суммарная величина зарядов различного знака $q=0$.

Следует отметить, что подобно дислокациям, вокруг РО возникают также силы упругого напряжения F_{el} [7]. Под влиянием сил F_{el} неравновесные вакансии устремляются в сторону РО.

Таким образом, в кристаллах n-Si в процессе облучения высокоэнергетическими частицами при 300 К или ИО облученных образцов при $T_{ann}=110^\circ\text{C}$ у отрицательно заряженной поверхности высокопроводящих РО на отрицательные неравновесные вакансии, кроме тепловых сил F_{th} , действуют силы упругого напряжения F_{el} и кулоновские силы F_c . Видимо, в процессе облучения при 300 К вокруг РО $F_c > F_{el} + F_{th}$ и у поверхности РО, в силу кулоновского отталкивания между отрицательно заряженной поверхностью РО и V^- , не образуется отрицательно заряженная оболочка вокруг РО из А-, Е-центров, V_2 и т.д., не повышается потенциал.

U высокопроводящих РО мал для кулоновской блокады транспорта носителей тока и на эксперименте наблюдается резкое увеличение μ_n в облученном кристалле. Уменьшение подвижности электронов μ_n в облученных высокоэнергетическими частицами кристаллах n-Si в процессе ИО можно объяснить появлением примесно-дефектной оболочки вокруг высокопроводящих включений, что приводит к увеличению электрического потенциала U высокопроводящих РО. Источником неравновесных вакансий в облученных кристаллах n-Si является продукты распада вторичных вакансионных РД с низкой термостабильностью.

После низкотемпературной термообработки ($T_{ann}=110^\circ\text{C}$) начинается отжиг Е-центров. При этой температуре $F_c < F_{el} + F_{th}$. Поэтому фрагменты распада Е-центров – отрицательно заряженные вакансии, легко преодолевают силы кулоновского отталкивания, устремляются к высокопроводящим РО, вступают в квазихимическую реакцию с примесными атомами и вокруг них создают оболочку, которая состоит из Е-центров, А-

центров, V_2 и т.д. Эти дефекты заряжаются при различных температурах. Электрический потенциал U высокопроводящих РО периодически, в зависимости от температуры измерения T , степени заполнения РД f и энергии ε взаимодействия между ними, меняется, что приводит к появлению минимумов на соответствующей кривой зависимости $\mu_n(T)$.

Существование первого минимума в области 200 К связано с увеличением степени заполнения f уровней с энергиями $E_c-0.39$ и 44 эВ, которые принадлежат V^- и E^- -центрам [13]. С уменьшением T параметры f и U этих центров растут, что приводит к уменьшению μ_n . С увеличением f растет энергия ε взаимодействия между отрицательно заряженными центрами. При определенной температуре $E_{th}+\varepsilon=E\geq 0.44$ эВ и в оболочке вокруг РО с высокой проводимостью начинается деионизация V_2^- и E^- -центров, что приводит к уменьшению U . Следовательно, увеличивается μ_n и на кривой зависимости $\mu_n(T)$ появляется первый минимум при 200 К. С понижением температуры уменьшается E_{th} и опять начинается заполнение уровней $E_c-0.39$ и 44 эВ и растет U , что приводит к уменьшению μ_n . Заполнение уровней приводит к увеличению ε . Следовательно, $E_{th}+\varepsilon=E>0.44$ эВ и начинается деионизация V_2^- и E^- -центров. В результате уменьшается U , растет μ_n и на кривой $\mu_n(T)$ появляется второй минимум в области 160 К.

Как известно [13], отрицательно заряженным V_2 принадлежат два уровня – $E_c-0.39$ и 0.21 эВ. После полного отжига E^- -центров при $T_{ann}=120^\circ\text{C}$ однократно заряженное небольшое количество дивакансий в области 140 К не может привести к увеличению U и, следовательно, к уменьшению μ_n . Поэтому наклон кривой зависимости $\mu_n(T)$ резко возрастает, а уменьшение подвижности наблюдается при 130 К после захвата дивакансией второго электрона на уровне $E_c-0.21$ эВ.

После отжига V_2 при $T_{ann}=290^\circ\text{C}$ уменьшение μ_n наблюдается в интервале 100–85 К, в области заряжения A^- -центров. После полного отжига A^- , E^- -центров и V_2 при $T_{ann}=380^\circ\text{C}$ наклон кривой зависимости $\mu_n(T)$ сохраняется и уменьшение подвижности в интервале 77–300 К не наблюдается. Это свидетельствует о том, что степень экранирования высокопроводящих РО, т.е. U , равна нулю.

После термообработки на $T_{ann}=500^\circ\text{C}$ РО с высокой проводимостью окончательно отжигаются. Соответственно, значение μ_n и наклон кривой $\mu_n(T)$ полностью восстанавливаются.

В ранее проведенных исследованиях наблюдаемая существование минимумов на кривых зависимостей $\mu_n(T)$ в образцах $n\text{-Si}$, облученных электронами с энергией 2 МэВ или протонами – с энергией 25 МэВ [15]. В работе [7] обнаружено уменьшение глубины минимума на кривой $\mu_n(T)$ при подсветке инфракрасим светом в процессе измерения облученных протонами или пластически деформированных кристаллах $n\text{-Si}$.

Полученные в настоящей работе данные позволяют наблюдаемые в этих исследованиях результаты объяснить по другому. Наличие минимумов на кривых зависимостей $\mu_n(T)$ в облученных образцах $n\text{-Si}$ является признаком существования в них РО с высокой проводимостью. Минимумы на кривых зависимостей $\mu_n(T)$ наблюдается при различных

температурах измерения. С увеличением энергией и дозы облучения минимумы смещаются в сторону высоких температур [15].

В проведенных исследованиях методом фото-Холл-эффекта облученных протонами или деформированных образцах n-Si при инфракрасной подсветке с энергией фотонов $h\nu=0.4$ эВ наблюдается уменьшение глубины минимума на кривой зависимости $\mu_n(T)$ [7]. Это можно объяснить ионизацией Е-центров на поверхности высокопроводящих РО. Ионизация Е-центров приводит к уменьшению их электростатического потенциала U . Следовательно, увеличивается μ_n и уменьшается глубина минимума на кривой зависимости $\mu_n(T)$. Это доказывает, что точечные РД и высокопроводящие РО в образцах n-Si образуются как при облучении высокоэнергетическими частицами, так и в процессе пластической деформации с последующей термообработкой.

Среднее значение пороговой энергии образования РО не удалось установить [16], но с уверенностью можно сказать, что в высокопроводящих образцах n-Si РО с различными радиусами и концентрациями электронов образуются как при облучении протонами с энергией 25 МэВ, так и электронами с энергией 2 МэВ. Об этом свидетельствует существование минимумов на кривых зависимостей $\mu_n(T)$ [15].

4. Заключение

Таким образом, обнаруженная осцилляция величины концентрации электронов n в зависимости от температуры измерения T в облученных протонами с энергией 25 МэВ образцах n-Si после отжига при 110°C можно объяснить существованием электростатического взаимодействия между заряженными точечными РД, что может изменить энергию ионизаций РД, которые заряжаются при различных температурах.

Допущение, что в образцах n-Si, облученных протонами с энергией 25 МэВ, образуются высокопроводящие РО, позволяет объяснить: (1) Резкое увеличение холловской подвижности электронов проводимости μ_n сразу после облучения; (2) Резкое уменьшение μ_n после низкотемпературного отжига ($T_{\text{ann}}=80-110^\circ\text{C}$) или естественного старения (при 300 К) облученных образцов; (3) Существование минимума на кривой зависимости $\mu_n(T)$; (4) Наблюдаемое в ранее проведенных измерениях методом фото-Холл-эффекта [7], существование и уменьшение глубины минимума на кривой зависимости $\mu_n(T)$ влиянием инфракрасной подсветки с энергией фотонов $h\nu=0.4$ эВ; и (5) Наблюдаемое в работе [15], существование минимумов на кривых зависимостей $\mu_n(T)$ в образцах, облученных протонами с энергией 25 МэВ или электронами с энергией 2 мэВ, которое доказывает, что при этих энергиях в исследуемых кристаллах n-Si образуются высокопроводящие РО.

Следует отметить, что в облученных высокоэнергетическими образцами n-Si образуются РО различного типа проводимости [3,9,10,11,16].

Для полного понимания процессов, происходящих в облученных высокоэнергетическими частицами образцах n-Si, требуется дальнейшие исследования.

Список литературы

1. G. K. Werthein. Phys. Rev., 111, 1500 (1958).
2. J. H. Crawford, J. W. Clelend. J. Appl. Phys., 30, 1204 (1959).
3. B. R. Gossik. J. Appl. Phys., 30, 1214 (1959).
4. Н. А. Ухин. ФТП, 6, 931 (1972).
5. В. И. Кузнецов, П. Ф. Луганов. ФТП, 13, 625 (1979).
6. В. И. Кузнецов, П. Ф. Луганов. ФТП, 14, 1924 (1980).
7. Л. С. Милевский, Т. М. Ткачева, Т. А. Пагава. ЖЭТФ, 9, 2132 (1975).
8. С. В. Безлюдный, Н. В. Колесников. ФТП, 10, 1964 (1976).
9. Т. А. Пагава, Л. С. Чхартишвили. УФЖ, 49, 1007 (2004).
10. Т. А. Пагава, Н. И. Майсурадзе, М. Г. Беридзе. ФТП, 5, 582 (2011).
11. Т. А. Пагава, Н. И. Майсурадзе, М. Г. Беридзе. ФТП, 46, 1274 (2012).
12. В. В. Емцев, Т. В. Машовец. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках, Москва, Радио и связь (1981).
13. В. С. Вавилов, В. Ф. Киселев, Б. Н. Мукашев. Дефекты в кремнии и на его поверхности, Москва, Наука (1990).
14. М. Г. Мильвидский, В. В. Чалдышев. ФТП, 32, 513 (1998).
15. Т. А. Пагава, Л. С. Чхартишвили. УФЖ, 48, 232 (2003).
16. Р. Ф. Коноплев, В. Л. Литвинов, Н. А. Ухин. Особенности повреждения полупроводников частицами высокой энергией, Москва, Атомиздат (1971).

Influence of Highly Conductive Disordered Regions on Kinetics of Radiation

Defects Annealing in n-Si Crystals Irradiated with High-Energy Protons

Pagava Teimuraz¹, Beridze Manana¹, Khovholava Darejan¹, Shogiradze Marina¹, Esiava Nona¹,
Turiashvili Lali², Zhghenti Maia¹.

¹Georgian Technical University, Faculty of Informatics and Control Systems, Department of Engineering Physics, 77 Merab Kostava Avenue, Tbilisi, 0160, Georgia; ²Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Faculty of Exact and Natural Sciences, Department of Chemistry, 3 Ilia Chavchavadze Avenue, Tbilisi, 0128, Georgia

Abstract

Single crystals of n-type Si grown by the zone melting method with an electron concentration of $n=6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ were studied. The samples were irradiated with 25 MeV protons at room temperature (300 K). Isochronous annealing of the irradiated crystals was carried out in the temperature range $T_{\text{ann}}=110\text{--}500^\circ\text{C}$. The investigated samples were studied using the Hall effect method in the temperature range 77–300 K. In n-Si samples irradiated with high-energy particles, the observed non-monotonic variation in electron concentration n as a function of measurement temperature T is explained by changes in the ionization energies of point radiation defects (RDs) due to the influence of electrostatic interaction energy ε_s between different RDs. The oscillatory dependence of the Hall mobility μ_H on annealing temperature, as well as the non-monotonic behavior of the $\mu_H(T)$ curves, is attributed to the existence of highly conductive disordered regions (DRs) in the irradiated n-Si crystals, the formation of an electric field at the interface between the highly conductive DRs and the crystal matrix, and the non-monotonic variation of the electric potential U of the highly conductive DRs depending on their charge state. The highly conductive DRs are completely annealed out in the temperature range $T_{\text{ann}}=380\text{--}500^\circ\text{C}$. The work highlights the features of the variation in the concentration and mobility of the majority charge carriers in n-type silicon crystals irradiated with high-energy protons during isochronous annealing.

Keywords: silicon, radiation defect, disordered region, Hall mobility

მაღალი გამტარობის მოუწესრიგებელი რეგიონების გავლენა, მაღალი ენერგიის პროტონებით დასხივებულ n-Si კრისტალებში რადიაციული დეფექტების გამოწვის კინეტიკაზე.

ფაღავა თეიმურაზი¹, ბერიძე მანანა¹, ხოჭოლავა დარეჯან¹, შოგირაძე მარინა¹, ესიავა ნონა¹, ტურიაშვილი ლალი², ჟღენტი მაია¹;

¹საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი, საინჟინრო ფიზიკის დეპარტამენტი, მერაბ კოსტავას გამზირი 77, თბილისი, 0160, საქართველო; ²ზივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ზუსტი და საზუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი, ქიმიის დეპარტამენტი, ილია ჭავჭავაძის გამზირი 3, თბილისი, 0128, საქართველო.

რეზიუმე

შესწავლილი იქნა n-ტიპის სილიციუმის (n-Si) მონოკრისტალები, რომლებიც მიღებული იქნა ზონური დნობით, ელექტრონების კონცენტრაციით $n \approx 6 \times 10^{13} \text{ სმ}^{-3}$. ნიმუშები დასხივებული იქნა 25 MeV პროტონებით 300 K ტემპერატურაზე. დასხივებული კრისტალების იზოქრონული გახურება (IO) ჩატარდა ტემპერატურის დიაპაზონში $T_{ann} = 110\text{--}500^\circ\text{C}$. ნიმუშები შესწავლილი იქნა ჰოლის ეფექტის მეთოდით ტემპერატურის დიაპაზონში 77–300 K. მაღალი ენერგიის პროტონებით დასხივებულ n-Si ნიმუშებში, ელექტრონების კონცენტრაციის n-ში დაფიქსირებული არამონოტონური ცვლილება გაზომვის ტემპერატურა T-დან გამომდინარე, აიხსნება წერტილოვანი რადიაციული დეფექტების (RD) იონიზაციის ენერგიის ცვლილებით სხვადასხვა RD-ებს შორის ელექტროსტატიკური ურთიერთქმედების ენერგიის ϵ_s გავლენის ქვეშ. ჰოლის ძვრადობის μ_H ოსცილატორული დამოკიდებულება გამოწვის ტემპერატურაზე და $\mu_H(T)$ მრუდების არამონოტონურობა განისაზღვრება დასხივებულ n-Si კრისტალებში მაღალგამტარობის არარეგულარული რეგიონების (DR) არსებობით, მაღალგამტარობის DR-ებსა და კრისტალურ მატრიცას შორის საზღვარზე ელექტრული ველის წარმოქმნით და მაღალგამტარობის DR-ების ელექტრული პოტენციალის U არამონოტონური ცვლილებით, ამ უკანასკნელის დამუხტვის მდგომარეობიდან გამომდინარე. მაღალგამტარობის DR-ები სრულად გამოწვის ტემპერატურულ დიაპაზონში $T_{ann} = 380\text{--}500^\circ\text{C}$. ეს ნაშრომი აღწერს იზოქრონული გამოწვის დროს მაღალი ენერგიის პროტონებით დასხივებულ n-ტიპის სილიციუმის კრისტალებში უმრავლესობის მუხტის მატარებლების კონცენტრაციისა და მობილურობის ცვლილების ძირითად მახასიათებლებს.

როგორც ვხედავთ, n-Si კრისტალების დასხივებით 25 მეგე ენერგიის პროტონებით შესაძლებელია ნანოგანზომილებიანი ატომური კლასტერების ფორმირება, რომლებიც გამოიწვევიან 400°C -ზე. მათი რადიუსის ვარირება შეიძლება დასხივების ენერგიითა და გამოწვის ტემპერატურით, ხოლო კონცენტრაციისა – დასხივების გზით. გაზომვისა და გამოწვის ტემპერატურით შესაძლებელია ვცვალოთ მათი გამტარებლობა და

ელექტრონების გაბნევის უნარი. ეს საშუალებას იძლევა შევქმნათ სრულიად განსხვავებული თვისებების მქონე Si კრისტალი, რომლის ბაზაზე შესაძლებელია შევქმნათ ახალი ტიპის ოპტო-, მიკრო- და ნანოელექტრონული ხელსაწყოები.

საკვანძო სიტყვები: სილიციუმი, რადიაციული დეფექტი, მოუწესრიგებელი რეგიონი(არე), ჰოლის ძვრადობა.

ამიოტროფული გვერდითი სკლეროზით დაავადებული პაციენტების სიცოცხლის ხარისხის გაუმჯობესება, ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული თავის ტვინის პოტენციალების ამოცნობის სისტემის საშუალებით

ირაკლი კანკავა

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

kankava.irakli@gtu.ge

რეზიუმე

ამიოტროფული ლატერალური სკლეროზი (ALS) წარმოადგენს პროგრესირებად ნეიროდეგენერაციულ დაავადებას, რომელიც იწვევს მოტორული ფუნქციების თანდათანობით დაკარგვას და საბოლოოდ მნიშვნელოვნად ზღუდავს ვერბალურ და არავერბალურ კომუნიკაციას. დაავადების გვიან სტადიებზე პაციენტებს ხშირად შენარჩუნებული აქვთ ცნობიერება და კოგნიტიური ფუნქციები, თუმცა ისინი პრაქტიკულად კარგავენ გარესამყაროსთან ურთიერთობის შესაძლებლობას. აღნიშნული გარემოება აჩენს ისეთი ტექნოლოგიური სისტემების შექმნის აუცილებლობას, რომლებიც კომუნიკაციის აღდგენას ან კომპენსაციას უზრუნველყოფს ტვინის აქტივობის საფუძველზე.

ექსპერიმენტული კვლევა ჩატარდა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ბიოსამედიცინო ინჟინერის ლაბორატორიაში „CleaveLab“ შესაბამის ლაბორატორიაში BioRadio-ს უსადენო EEG სისტემის გამოყენებით. მონაცემები მიღებულ იქნა არაინვაზიური ელექტროენცეფალოგრაფიული რეგისტრაციის საშუალებით, 10–20 საერთაშორისო სისტემის მიხედვით განლაგებული ელექტროდებით. მიღებული სიგნალები დამუშავდა Excel-ისა და MATLAB-ის გარემოში, განხორციელდა წინასწარი დამუშავება, ნორმალიზაცია, მახასიათებლების ამოღება და კლასიფიკაციის მოდელების შედარებითი შეფასება.

კვლევის ფარგლებში შემოწმებულ იქნა რამდენიმე მანქანური სწავლების მოდელი, მათ შორის Decision Tree, Support Vector Machine და Naive Bayes. მიღებული შედეგების მიხედვით, საუკეთესო სიზუსტე 72.8% აჩვენა Naive Bayes კლასიფიკატორმა. შედეგები მიუთითებს, რომ EEG სიგნალების საფუძველზე „კი/არა“ ტიპის კოგნიტიური

პასუხების ამოცნობა შესაძლებელია და მსგავსი მიდგომა პერსპექტიულია ALS-ის მქონე პაციენტებისთვის საკომუნიკაციო სისტემების შექმნის მიმართულებით.

საკვანძო სიტყვები: ამიოტროფული გვერდითი სკლეროზი, ელექტროენცეფალოგრამა, ტვინ-კომპიუტერული ინტერფეისი, მანქანური სწავლება, ნაივ ბეიზის კლასიფიკატორი, კომუნიკაცია.

შესავალი

ამიოტროფიული ლატერალური სკლეროზი (ALS) არის პროგრესირებადი, მძიმე ნეიროდეგენერაციული დაავადება, რომელიც აზიანებს თავისა და ზურგის ტვინში მდებარე მოტორულ ნეირონების იმ ნერვულ უჯრედებს, რომლებიც აკონტროლებენ ნებაყოფლობით მოძრაობებს. ამ ნეირონების დაზიანებისა და დაღუპვის შედეგად ვითარდება კუნთების სისუსტე, ატროფია, მოძრაობის, მეტყველების, ყლაპვისა და მოგვიანებით სუნთქვის გაძნელება. დაავადება დროთა განმავლობაში პროგრესირებს, თუმცა მიუხედავად მოტორული ფუნქციის სირთულეებისა, კოგნიტიური უნარები და ცნობიერი აქტივობა ჩვეულებრივად ნარჩუნდება.

დაავადების გვიან სტადიებზე, მისი პროგრესირების შედეგად, პაციენტი თითქმის სრულად კარგავს მოტორულ ფუნქციებს. მიუხედავად იმისა, რომ კოგნიტიური შესაძლებლობები ხშირად შენარჩუნებულია და ადამიანს ცნობიერება უცვლელი აქვს, მას უკვე აღარ შეუძლია გარესამყაროსთან კომუნიკაცია და საკუთარი სურვილების, საჭიროებებისა თუ აზრების გამოხატვა. სწორედ ეს ქმნის დაავადების ერთ-ერთ ყველაზე მძიმე ასპექტს, რადგან პაციენტი ყველაფერს აცნობიერებს, მაგრამ ფიზიკურად ვეღარ აგებინებს სხვებს, რა სურს ან რას გრძნობს.

ჩვენი კვლევის მიზანი იყო ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული კომპიუტერული სისტემის შექმნა, რომელიც შეძლებდა თავის ტვინიდან მიღებული ელექტროენცეფალოგრაფიული სიგნალების საფუძველზე დაედგინა, პაციენტმა გაიფიქრა თუ არა „კი“ ან „არა“. ასეთი სისტემის არსებობის შემთხვევაში შესაძლებელი გახდება გარკვეული ტიპის კომუნიკაციის დამყარება: პაციენტისთვის სხვადასხვა შეკითხვის დასმა და მისგან თანხმობის ან უარყოფის შესახებ ინფორმაციის მიღება.

ექსპერიმენტული კვლევა ჩატარდა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ბიოსამედიცინო ინჟინერიის ლაბორატორიაში „CleaveLab“. კვლევის ფარგლებში ჯამრთელ მოხალისეებზე (მამრობითი სქესის 2 ჯანმრთელი 40 და 25 წლის მამაკაცი) EEG სიგნალების რეგისტრაციისთვის გამოყენებულ იქნა BioRadio-ს უსადენო სისტემა. ექსპერიმენტის მიმდინარეობისას მოხალისეები განთავსებულნი იყვნენ მშვიდ და მყუდრო გარემოში, EEG სიგნალების რეგისტრაციის მიზნით გამოყენებული იყო არაინვაზიური ელექტროენცეფალოგრაფიული მეთოდი, სადაც ელექტროდები განთავსდა 10–20 საერთაშორისო სისტემის მიხედვით Fp1, Fp2, O1, O2.

მასალა და მეთოდები

ექსპერიმენტის ფარგლებში მოხალისეებს (იხ. სურათი #1) ეძლეოდა კითხვები, რომლებზეც მათ უნდა ჩამოეყალიბებინა შიდა კოგნიტიური პასუხი „კი“ ან „არა“.



სურათი #1 მოხალისეები

თითოეული ჩანაწერი გრძელდებოდა დაახლოებით 3–4 წამის ინტერვალით და მრავალჯერ (800-ზე მეტი) მეორდებოდა მონაცემთა სანდოობის უზრუნველსაყოფად. აღნიშნული პროცედურა მიმდინარეობდა მყუდრო გარემოში და დაბალი ხმაურის პირობებში. ამასთანავე, ექსპერიმენტის მიმდინარეობისას BioRadio-ს უსადენო სისტემის პროგრამა Capture Lite-ის მეშვეობით ხდებოდა სიგნალის ამპლიტუდის სისუფთავის მონიტორინგი, რაც გვაძლევდა შესაძლებლობას შეგვემცირებინა ზედმეტი არტეფაქტების წარმოქმნის ალბათობა მონაცემებში. ეს კი მნიშვნელოვანი დახმარება იყო მონაცემთა შემდგომი ფილტრაციის პროცესში.

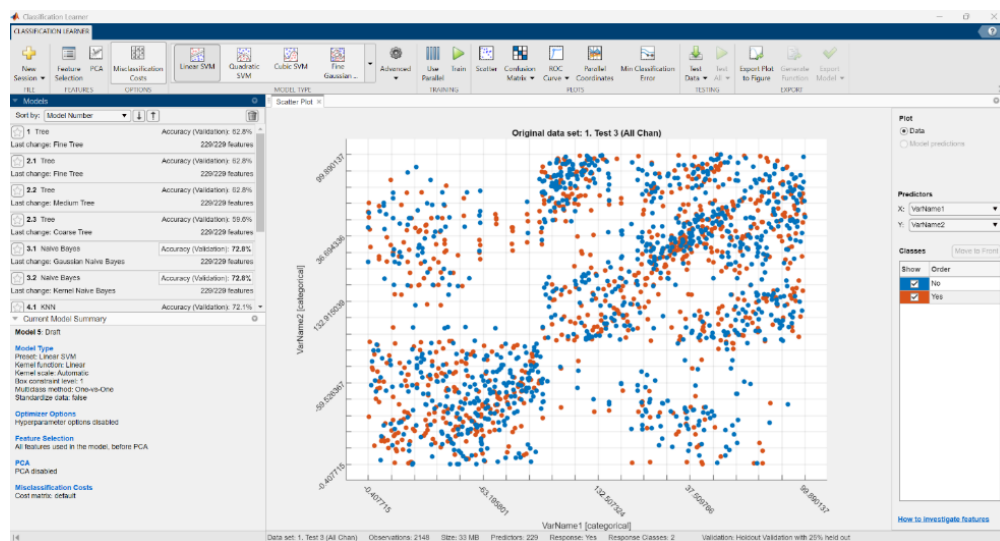
მიღებული მონაცემები თავდაპირველად ჩაიწერა BioRadio-ს უსადენო სისტემის პროგრამაში Capture Lite, ხოლო შემდგომ გადატანილ იქნა Excel-ისა და MATLAB-ის გარემოში. პირველ ეტაპზე განხორციელდა მონაცემთა წინასწარი დამუშავება: თითოეული ჩანაწერი სათითაოდ გადამოწმდა და ფილტრაციის მეშვეობით ამოღებულ იქნა ის მონაცემები, რომლებიც სტანდარტული მონაცემებისგან მკვეთრად განსხვავდებოდა.

შემდგომ ეტაპზე გავითვალისწინეთ ის ფაქტორი, რომ სიგნალების რეგისტრაცია ხდებოდა 3–4 წამიან ინტერვალში, 100 მონაცემი/წამში სიხშირით, და ეს პროცედურა მრავალჯერ მეორდებოდა (800-ზე მეტი). შედეგად, მიღებული სიგნალების მონაცემთა სვეტების რაოდენობა ერთმანეთისგან განსხვავდებოდა. ამიტომ, Excel-ში გადატანის შემდეგ, თითოეული მიღებული სიგნალის მონაცემთა სვეტი გადაყვანილ იქნა სტრიქონად და ყველა სტრიქონი დაყვანილ იქნა ერთსა და იმავე ზომამდე, აგრეთვე ბოლოს თითოეულ სტრიქონზე გავაკეთეთ ჩანაწერი ან „Yes“ ან „No“, რათა შესაძლებელი ყოფილიყო მათი გამოყენება მანქანური სწავლების პროცესში.

მანქანური სწავლების კვლევის ჩასატარებლად ჩვენ გამოვიყენეთ Matlab-ის ინსტრუმენტი Classification learner-ი, სადაც დავაიმპორტეთ/ავტვირთეთ ჩვენი ექსელი მონაცემთა ბაზა (ყველა ელექტროდზე, ცალ-ცალკე ელექტროდებზე, სხვადასხვა შესაძლო ვარიანტებიც მაგ: 1,2 ელექტროდი, 1,3 ელექტროდი, 1,2,3 ელექტროდი და ა.შ), რის შემდგომაც Classification learner-მა ავტომატურად ჩვენი მონაცემები, სადაც ჩვენგან საჭირო იყო განზომილების დაფიქსირება ჩვენ მონაცემებზე, რიცხვით მონაცემებზე ჩვენ ავირჩიეთ - Number, ხოლო განსაზღვრულ ფაქტორზე („Yes“ და „NO“) ავირჩიეთ Categorical, რომ Classification learner-ს სწორედ ამ Categorical მონაცემებზე გაეკეთებინა დატრენინგება, შერჩევის ვალიდაცია ავრჩეულ იქნა 25% რადგანაც დიდი მონაცემთა ბაზა გვაქვს.

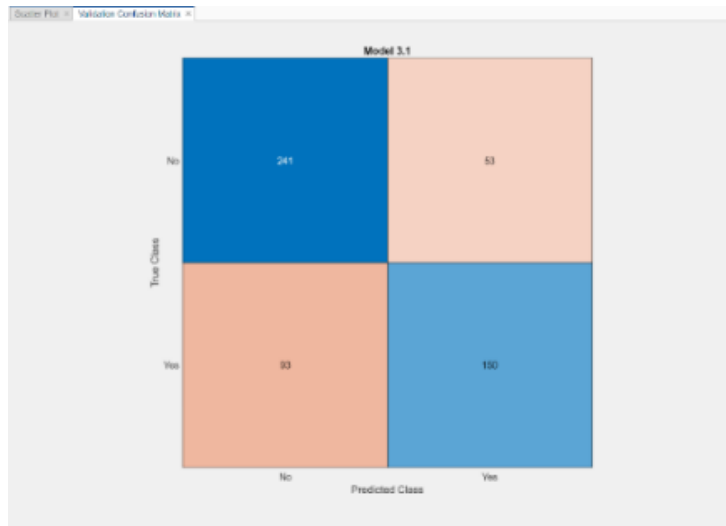
შედეგები და განხილვა

მოვახდინეთ Classification Learner-ის კლასიფიკაციის ალგორითმები და მოვახდინეთ მოდელის დატრენინგება შემდეგი მოდელების გამოყენებით: Decision Tree, Naive Bayes Classifiers, Support Vector Machines, Nearest Neighbor Classifiers, Ensemble Classifiers, Neural Network Classifiers, რის შედეგადაც დავადგინეთ, რომ ყველაზე კარგი შედეგი 72.8% მივიღეთ შემდეგი მოდელის გამოყენებით Naive Bayes (იხ. სურათი #2).



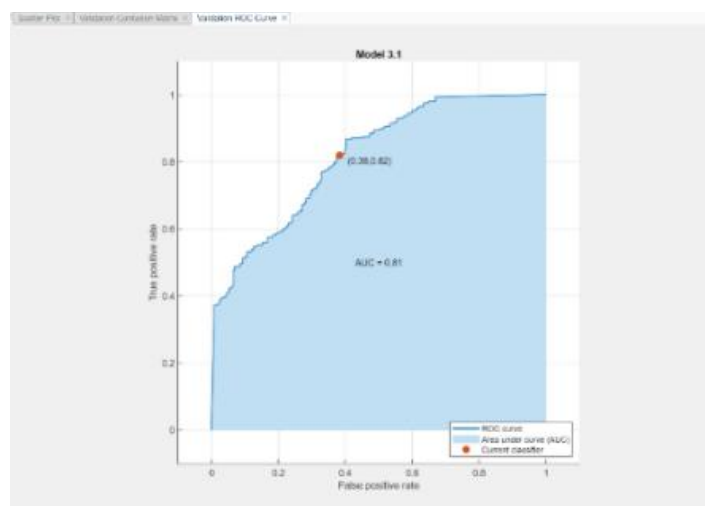
სურათი #2 (Naive Bayes 72.8%)

საუკეთესო შედეგის მქონე **Naive Bayes** მოდელზე, რომელმაც 72.8% სიზუსტე აჩვენა, განხორციელდა დამატებითი ანალიზი, კერძოდ, Validation Confusion Matrix (იხ. სურათი #3) (ეს არის ვალიდაციის მონაცემებზე არსებული შეცდომების მატრიცა. ის აჩვენებს: რამდენი ობიექტი ამოიცნო მოდელმა სწორად სად აღიარა კლასები),



სურათი #3 Validation Confusion Matrix

Validation ROC Curve (იხ. სურათი #4) (ეს არის ვალიდაციის ნაკრების ROC მრუდი. ის გვიჩვენებს, თუ რამდენად კარგად განასხვავებს მოდელი ერთ კლასს მეორისგან სხვადასხვა გადაწყვეტილების ზღურბლზე.)



სურათი #4 Validation ROC Curve

Parallel Coordinates Plot (ეს არის პარალელური კოორდინატების დიაგრამა. ის სასარგებლოა მონაცემთა მახასიათებლების ვიზუალიზაციისა და შემდეგი საკითხების გასაგებად: როგორ განსხვავდებიან სხვადასხვა კლასები მახასიათებლებით რომელი მახასიათებლებს ცალკეულ კლასებს კარგად სად არის კლასები ძლიერ შერეული).

დასკვნა

წინამდებარე კვლევამ აჩვენა, რომ EEG სიგნალებზე დაფუძნებული ხელოვნური ინტელექტის მოდელების გამოყენებით შესაძლებელია „კი/არა“ ტიპის კოგნიტიური პასუხების კლასიფიკაცია. ექსპერიმენტული მონაცემების საფუძველზე Naive Bayes

კლასიფიკატორმა აჩვენა საუკეთესო შედეგი 72.8% სიზუსტე, რაც მიუთითებს მისი გამოყენების პერსპექტიულობაზე ALS-ის მქონე პაციენტების საკომუნიკაციო სისტემების განვითარების მიმართულებით.

კვლევის პრაქტიკული მნიშვნელობა მდგომარეობს იმაში, რომ ასეთი მიდგომა შეიძლება გახდეს მინიმალური, მაგრამ რეალური კომუნიკაციის საშუალება იმ პაციენტებისთვის, რომლებიც დაკარგული აქვთ მეტყველებისა და მოძრაობის უნარი, თუმცა შენარჩუნებული აქვთ ცნობიერება და გადაწყვეტილების მიღების უნარი. მომავალ კვლევებში მიზანშეწონილია მონაცემთა ბაზის გაფართოება, დამატებითი მახასიათებლების გამოყენება, უფრო რთული მოდელების შემოწმება და უკვე დატრენინგებული მოდელის რეალურ ტესტურ მონაცემებზე შემოწმება.

გამოყენებული ლიტერატურა

- Brown, R. H., & Al-Chalabi, A. (2017). Amyotrophic lateral sclerosis. *The New England Journal of Medicine*, 377(2), 162–172.
- Craik, A., He, Y., & Contreras-Vidal, J. L. (2019). Deep learning for electroencephalogram classification tasks: A review. *Journal of Neural Engineering*, 16(3), 031001.
- Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371–375.
- Kübler, A., & Birbaumer, N. (2008). Brain–computer interfaces and communication in paralysis. *Current Opinion in Neurology*, 21(6), 634–638.
- Lotte, F., et al. (2018). A review of classification algorithms for EEG-based brain–computer interfaces: A 10 year update. *Journal of Neural Engineering*, 15(3), 031005.
- Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning*. McGraw-Hill.
- Nicolas-Alonso, L. F., & Gomez-Gil, J. (2012). Brain computer interfaces, a review. *Sensors*, 12(2), 1211–1279.
- Niedermeyer, E., & Lopes da Silva, F. (2005). *Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Teplan, M. (2002). Fundamentals of EEG measurement. *Measurement Science Review*, 2(2), 1–11.
- Wolpaw, J. R., & Wolpaw, E. W. (2012). *Brain–computer interfaces: Principles and practice*. Oxford University Press.

Improving the quality of life of patients with amyotrophic lateral sclerosis through an artificial intelligence-based brain potential recognition system

Irakli Kankava

Georgian Technical University
kankava.irakli@gtu.ge

Abstract

Amyotrophic lateral sclerosis (ALS) is a progressive neurodegenerative disease that causes a gradual loss of motor functions and ultimately severely limits both verbal and nonverbal communication. In the later stages of the disease, patients often retain consciousness and cognitive functions; however, they practically lose the ability to interact with the outside world. This situation creates the need for technological systems that can restore or compensate for communication based on brain activity.

The experimental study was conducted in the biomedical engineering laboratory “CleaveLab” of Georgian Technical University using the BioRadio wireless EEG system. The data were obtained through noninvasive electroencephalographic recording with electrodes placed according to the international 10–20 system. The recorded signals were processed in Excel and MATLAB, including preprocessing, normalization, feature extraction, and comparative evaluation of classification models.

Several machine learning models were tested in the course of the study, including Decision Tree, Support Vector Machine, and Naive Bayes. According to the obtained results, the Naive Bayes classifier demonstrated the best accuracy, achieving 72.8%. The results indicate that it is possible to recognize “yes/no” type cognitive responses based on EEG signals, and that this approach is promising for the development of communication systems for patients with ALS.

Keywords: ALS, EEG, Brain–Computer Interface, Machine Learning, Naive Bayes, Communication.

ხელოვნური ინტელექტზე დაფუძნებული მიტრალური რეგურგიტაციის ავტომატური დეტექცია და კლასიფიკაცია

მარინა ბასილაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების
ფაკულტეტი, mariambasilashvili@yahoo.com

აბსტრაქტი

მიტრალური რეგურგიტაცია წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ სარქვლოვან პათოლოგიას, რომლის სიხშირე იზრდება ასაკის მატებასთან ერთად. მკურნალობის გარეშე მძიმე მიტრალური რეგურგიტაცია ასოცირებულია კარდიოვასკულური გართულებებისა და მაღალი სიკვდილიანობის რისკთან, მათ შორის გულის უკმარისობასთან, არითმიებთან და ფილტვის ჰიპერტენზიასთან. ტრანსკატერალური ექოკარდიოგრაფია წარმოადგენს დიაგნოსტიკის წამყვან არაინვაზიურ მეთოდს, თუმცა მისი შედეგების ინტერპრეტაცია მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ექსპერტის გამოცდილებაზე და დაკავშირებულია დროის მნიშვნელოვან დანახარჯთან.

წარმოდგენილი კვლევის მიზანია ღრმა სწავლების მეთოდებზე დაფუძნებული სრულად ავტომატიზირებული სისტემის შემუშავება მიტრალური რეგურგიტაციის დეტექციისა და სიმძიმის შეფასებისთვის ფერადი დოპლერული ექოკარდიოგრაფიის სურათებზე. კვლევაში გამოყენებულია 2017–2025 წლებში შეგროვებული ექოკარდიოგრაფიული მონაცემები (>3600 ვიდეო), საიდანაც მიღებულია 761 ანოტირებული სურათი.

მოდელი გაწვრთნილია MATLAB გარემოში R-CNN არქიტექტურის გამოყენებით. ტესტირების შედეგებმა აჩვენა მიტრალური რეგურგიტაციის დეტექციის >95% სიზუსტე და კლასიფიკაციის >80% სიზუსტე. მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია მნიშვნელოვნად ამცირებს ანალიზის დროს და აუმჯობესებს კლინიკური გადაწყვეტილების მიღების პროცესს.

საკვანძო სიტყვები: მიტრალური რეგურგიტაცია, ექოკარდიოგრაფია, რეგიონზე დაფუძნებული კონვოლუციური ნეირონული ქსელი, ღრმა სწავლება, კომპიუტერული ხედვა ხელოვნური ინტელექტი

შესავალი

მიტრალური რეგურგიტაცია ფართოდ გავრცელებული სარქვლოვანი პათოლოგიაა, რომლის შემთხვევების სიხშირე მატულობს ასაკის მატებასთან ერთად. მკურნალობის გარეშე მძიმე მიტრალურმა რეგურგიტაციამ შეიძლება გამოიწვიოს კარდიო-ვასკულური გართულებები, მათ შორის არითმიები, გულის უკმარისობა და ფილტვის არტერიაში წნევის მატება.

ტრანსთორაკალური ექოკარდიოგრაფია მისი არაინვაზიური მახასიათებლების, ხელმისაწვდომობის და იონიზირებული გამოსხივების არარსებობის გამო კარდიოლოგიაში დიაგნოსტიკის წამყვანი მეთოდია. იგი იძლევა გულის ფუნქციისა და სტრუქტურის სწრაფი შეფასების საშუალებას და უზრუნველყოფს მაღალი სივრცითი და დროითი გარჩევადობის სურათებსა და ვიდეოებს.

ექოკარდიოგრაფიული შედეგების ანალიზი რთული პროცესია და ამჟამად ძირითადად ხელით ხორციელდება, რაც დამოკიდებულია ექსპერტის გამოცდილებაზე და ხშირად იწვევს ინტერპრეტაციის ცვალებადობას.

ბოლო წლებში ხელოვნური ინტელექტის გამოყენება მედიცინაში, განსაკუთრებით გულ-სისხლძარღვთა დაავადებების დიაგნოსტიკაში, მნიშვნელოვნად გაიზარდა. ავტომატიზირებულმა ინტერპრეტაციამ შესაძლოა მნიშვნელოვნად შეცვალოს კლინიკური პრაქტიკა.

წარმოდგენილი კვლევა მიზნად ისახავს ღრმა სწავლების მეთოდებზე დაფუძნებული სისტემის შემუშავებას, რომელიც უზრუნველყოფს მიტრალური რეგურგიტაციის დეტექციასა და სიმძიმის შეფასებას ტრანსთორაკალური ექოკარდიოგრაფიის სურათებზე.

მასალა და მეთოდები

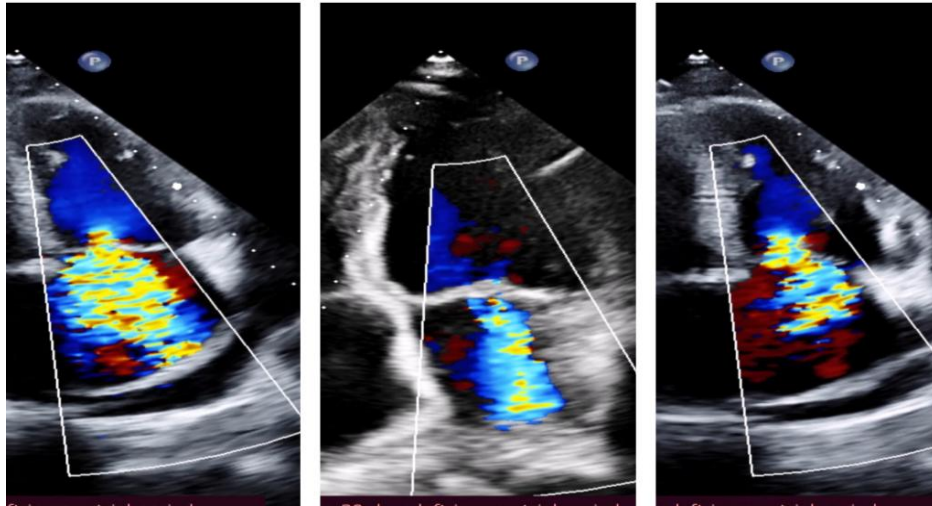
კვლევაში გამოყენებულ იქნა აკადემიკოს გ. ჩაფიძის სახელობის კარდიოლოგიის ცენტრის მონაცემთა ბაზა. გაანალიზდა 2017–2025 წლებში ჩატარებული >3600 ექოკარდიოგრაფიული ვიდეო

შერჩეული იქნა 761 სურათი:

- 121 — მსუბუქი რეგურგიტაცია
- 191 — საშუალო რეგურგიტაცია
- 449 — მძიმე რეგურგიტაცია

დაბალი ხარისხის სურათები გამოირიცხა.

მიტრალური რეგურგიტაციის გამოვლენა და სიმძიმის შეფასება განხორციელდა MATLAB-ში ღრმა სწავლების მეთოდების გამოყენებით, კერძოდ გამოყენებულ იქნა კომპიუტერული ხედვის (Computer Vision) ტექნიკა.



სურათი 1. გამოსახულია ექოკარდიოგრაფიული ვიდეოებიდან მიღებული ფოტოები მძიმე, ზომიერი და მსუბუქი მიტრალური რეგურგიტაციით

მოდელის ტრენინგი

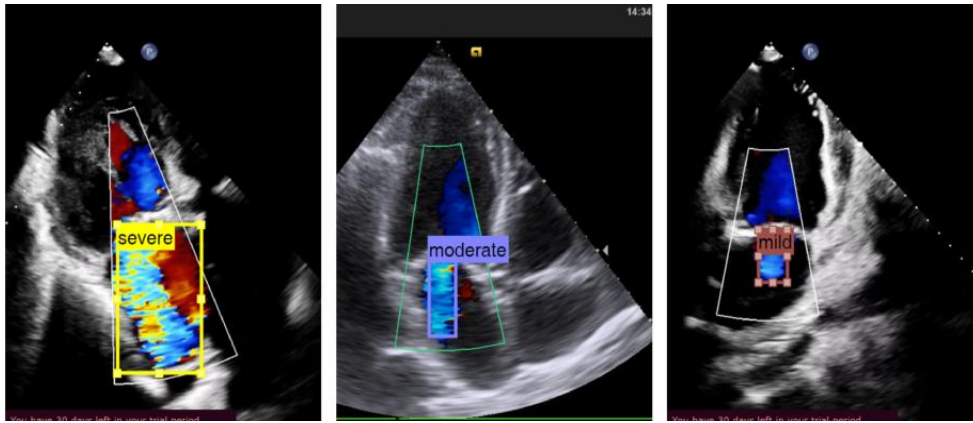
გამოყენებული იქნა R-CNN არქიტექტურაზე დაფუძნებული ობიექტის დეტექტორი, რომელიც უზრუნველყოფს:

- ობიექტის აღმოჩენას
- სეგმენტაციას
- კლასიფიკაციას

კვლევაში გამოყენებულ იქნა მანქანური სწავლების მეთოდი „კომპიუტერული ხედვა“(Computer vision). მოდელის ტრენინგისთვის საჭირო იყო მონაცემებზე რეგურგიტაციის მონიშვნა, რომელიც განხორციელდა Matlab-ის ინსტრუმენტი imageLabeler.

განისაზღვრა ინტერესის რეგიონი (ROI), მსუბუქი რეგურგიტაციისთვის გამოყენებული იქნა ნარინჯისფერი ოთხკუთხა პოლიგონი, ზომიერი რეგურგიტაციისთვის -იასამნისფერი პოლიგონი, მძიმე პათოლოგიისთვის -მწვანე.

მოდელის ტრენინგის პროცესი მოიცავდა მრავალსაფეხურიან სამუშაოს, რომელიც უზრუნველყოფდა რეგურგიტაციის ზონის იდენტიფიკაციას და მისი სიმძიმის განსაზღვრას.



სურათი 2. ასახულია მძიმე, ზომიერი და მსუბუქი მიტრალური რეგურგიტაციით გამოსახულებები განისაზღვრული ინტერესის რეგიონით (ROI)

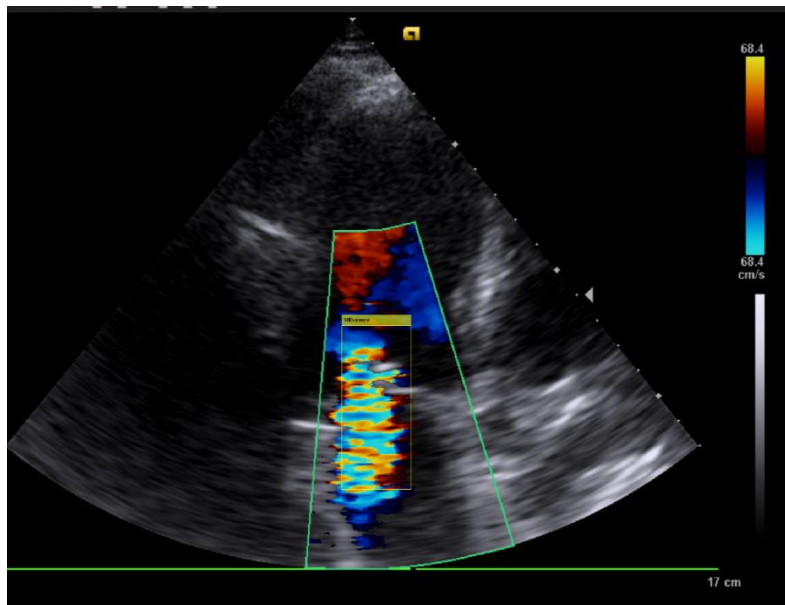
მოდელის ტესტირება

ტრენინგის დასრულების შემდეგ მოდელი ექსპორტირებული იქნა და დატესტილი ახალი მონაცემებზე.

შედეგები

ტესტირების შედეგად მოდელმა აჩვენა:

- მიტრალური რეგურგიტაციის დეტექცია - >95% სიზუსტით
- სიმძიმის კლასიფიკაცია - >80% სიზუსტით.



სურათი 3. მოდელის შემოწმება ახალ მონაცემებზე

მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ მოდელი ეფექტურად ასრულებს როგორც რეგურგიტაციის აღმოჩენას, ისე მისი სიმძიმის შეფასებას.

დასკვნა

ეფექტური კლინიკური მკურნალობისთვის აუცილებელია მიტრალური რეგურგიტაციის სიმძიმის ზუსტი შეფასება. წარმოდგენილ კვლევაში ღრმა სწავლების მოდელმა მაღალი სიზუსტით მოახდინა მიტრალური რეგურგიტაციის დეტექცია და კლასიფიკაცია.

ექოკარდიოგრაფიისა და ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაცია ამცირებს ანალიზის დროს და ხელს უწყობს კლინიკური გადაწყვეტილების მიღების პროცესის დაჩქარებას.

აღნიშნული სისტემა წარმოადგენს პერსპექტიულ ინსტრუმენტს, რომელიც შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას როგორც მაღალტექნოლოგიურ კლინიკებში, ასევე შეზღუდული რესურსების მქონე გარემოში.

ბიბლიოგრაფია

1. Zoghbi W.A. et al. *Recommendations for evaluation of valvular regurgitation*. JASE, 2017.
2. Otto C.M. *Textbook of Clinical Echocardiography*. Elsevier, 2018.
3. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. *Deep learning*. Nature, 2015.
4. Litjens G. et al. *A survey on deep learning in medical image analysis*. Medical Image Analysis, 2017.
5. Girshick R. et al. *Rich feature hierarchies for object detection (R-CNN)*. CVPR, 2014.
6. He K. et al. *Deep residual learning for image recognition*. CVPR, 2016.

Artificial intelligence-based automatic detection and classification of mitral regurgitation

Marina Basilashvili

Georgian Technical University, Faculty Of Informatics and Control Systems;

mariambasilashvili@yahoo.com

Abstract

Mitral regurgitation is among the most prevalent valvular pathologies, with incidence rising with age. If left untreated, severe mitral regurgitation carries a substantial risk of cardiovascular complications and mortality, including heart failure, arrhythmias, and pulmonary hypertension. Transthoracic echocardiography remains the primary noninvasive diagnostic tool; however, its interpretation relies heavily on expert experience and requires considerable time investment.

This study aims to develop a fully automated system utilizing deep learning techniques for the detection and severity assessment of mitral regurgitation in color Doppler echocardiography images. Echocardiographic data collected between 2017 and 2025, comprising over 3,600 videos, were used to obtain 761 annotated images.

The model was trained in the MATLAB environment utilizing the R-CNN architecture. Detection and severity assessment of mitral regurgitation were conducted using deep learning methods implemented in MATLAB, with a focus on computer vision techniques.

Test results demonstrated greater than 95% accuracy in mitral regurgitation detection and over 80% accuracy in classification. These findings suggest that integrating artificial intelligence substantially reduces analysis time and enhances clinical decision-making.

Keywords: Mitral regurgitation, Echocardiography, Deep learning, R-CNN, Computer vision, Artificial intelligence

Integration of artificial intelligence and interdisciplinary hybrid models in secondary schools

Nino Khaindrava

Georgian Technical University Faculty of Informatics and Control Systems (PhD Student)

khaindrava.nino@gtu.ge

Abstract

The integration of artificial intelligence (AI) into the comprehensive school system requires the transformation of traditional teaching methods and adaptation to a dynamic educational environment. The paper examines the role of interdisciplinary hybrid models, specifically the AI-PBL (AI Problem Solving Learning) model, in developing students' critical thinking, logical reasoning, and problem-solving skills.

The article presents the possibilities and challenges of integrating artificial intelligence (AI) technologies and interdisciplinary hybrid learning models in general education schools. The study is based on a mixed methodology and includes an empirical study conducted in 12 public and private schools with over 450 students (grades 5-12) and 95 teachers. The results showed that hybrid models using AI significantly increase student motivation to learn (by 38%), develop critical and creative thinking (by 44%), and increase the level of achievement of learning outcomes defined by the national curriculum (by 31%) compared to traditional teaching methods. The study highlights the critical importance of institutional readiness, digital infrastructure, teacher professional development, and an inclusive learning environment.

Keywords: artificial intelligence, AI-PBL, hybrid learning, interdisciplinary approach, teacher competence, ethics.

I. Introduction

The digital age of the 21st century fundamentally redefines the function of schools as institutions. The rapid development of artificial intelligence, machine learning, and adaptive technology creates a learning environment where each student can receive an education tailored to their individual needs, pace and style. This opportunity has remained an unattainable ideal for the teaching community for decades.

Interdisciplinary hybrid models overcoming the fragmented nature of traditional subject learning, combined with artificial intelligence, provide an opportunity for schools to implement a new pedagogical paradigm. This approach prepares students not only to memorize knowledge, but also to analyze it, establish connections and solve real problems.

The hybrid learning model combines the best practices of face-to-face and online learning, providing flexibility and accessibility of the educational process. The AI-based architecture in this environment operates in a continuous loop where data, outcomes, "data → evaluation → intervention → monitoring → rescheduling (bare-metal rescheduling)," allowing for personalized learning and dynamic tracking of student progress.

The paper highlights a fundamental shift in the role of the educator - transforming it from information provider to facilitator, consultant and "cognitive coach." This process requires new competencies from educators, such as AI literacy, data literacy, and digital pedagogy.

There is a particular focus on the ethical aspect of integration, including data privacy, algorithmic bias, and the risk of an "inverted AI gap." In conclusion, recommendations are formulated based on the "person in a cycle" approach, in which technology increases the teacher's autonomy and contributes to improving the quality of training while respecting human values.

II. Relevance

The relevance of the study is determined by a number of interrelated factors. First, the global context: according to the OECD's Education in Review 2023 report, by 2030, 85% of the professions that today's schoolchildren will be engaged in do not yet exist. This means that the school's task is to prepare adaptive, critical-thinking, technologically competent citizens, and not for a specific specialty.

Secondly, the specific context of the Georgian education system. The national school curriculum provides for the development of digital competence as a horizontal competence in all subject groups. However, according to research, 72% of Georgian schools do not have modern digital infrastructure, and 68% of teachers say that they have not received adequate training in the use of artificial intelligence tools.

Thirdly, the lessons of the COVID-19 pandemic. In 2020-2022, Georgian schools received the first experience of mass online learning. This experience has illustrated the critical importance of hybrid learning models, digital infrastructure, and digital teacher competence. Systematically analysing these lessons and translating them into policy is an urgent task for the education sector.

Fourth, the new reality of digital socialization. The daily use of TikTok, YouTube, ChatGPT, Minecraft, and other digital platforms is typical for 89% of Georgian schoolchildren (Mediaskills Georgia, 2023). A school that ignores this digital reality is losing touch with a student's everyday world [1-6].

While the integration of AI tools into students' daily lives is already a reality — as evidenced by the 89% digital platform usage rate cited above — Georgian schools currently operate without clear institutional guidelines governing the pedagogical use of AI, student data protection, or algorithmic accountability. At the European level, the EU AI Act (2024) has established binding obligations for AI systems deployed in educational contexts, yet no equivalent national framework exists in Georgia. This regulatory gap creates conditions in which AI adoption proceeds unevenly and without safeguards, exposing students to risks of data misuse, algorithmic bias, and uncritical dependence on generative tools. Addressing this gap is therefore not only a pedagogical priority but a matter of educational equity and digital rights.

III. Research methods

The study used a mixed approach based on a combination of quantitative and qualitative methods. The study included 12 schools from different regions of Georgia: 8 in Tbilisi, 5 in other cities, and in rural areas to ensure geographical and socio-economic diversity.

3.1. quantitative methods. Structured survey: The 5-point Likert scale questionnaire was completed by 450 students (grades 5-12), 95 teachers, and 54 parents. Data analysis was performed using the SPSS 28.0 statistical package. Descriptive statistics, analysis of variance (ANOVA), and Pearson correlation analysis were used for the analysis.

Quasi-experimental study: A "before and after" design was used to measure the impact of hybrid methods using AI on learning outcomes. Control (n = 56) and experimental (n = 62) groups were formed in 6 schools. For one semester (20 weeks), the experimental group was trained on a hybrid model with integrated AI, and the control group was trained using traditional methods.

Learning Analytics: Anonymous metadata on student learning behavior was collected from AI platforms (Canvas, Google Classroom, Khan Academy) - attendance, task completion rate, return visit rate, and average scores.

3.2. qualitative methods. In-depth interviews: 52 semi-structured interviews were conducted with 20 teachers, 18 students (grades 7-12), 8 school principals and 6 parents. Interviews were recorded, transcribed, and analyzed using thematic analysis.

Learning observation: 28 lessons were assessed using a structured observation map reflecting the extent of AI tool use, the level of student engagement, and the frequency of interdisciplinary connections.

Focus groups: 10 focus groups were conducted - 5 with students (by age groups: 10-12 years old, 13-15 years old, 16-18 years old) and 5 with teachers by subject groups.

IV. Methodology

The methodological basis of the study is based on several mutually reinforcing theoretical paradigms. Constructivist learning theory (Vygotsky, 1978; Piaget, 1972) proposes a framework in which the AI-supported environment is seen as the optimal space of the proximal development zone. Adaptive AI algorithms are able to accurately determine the dose of cognitive load required by each specific student for optimal development.

To classify hybrid learning tasks using AI, Bloom's revised taxonomy was used (Anderson and Kratwol, 2001): at the memorization-comprehension level, AI performs adaptive learning; at the application-analysis level, problem-solving tasks; and at the level of synthesis-evaluation, support for creative projects.

Universal Learning Design (UDL) principles (CAST, 2018) have been integrated into hybrid model development to ensure that AI integration can foster inclusive learning environments. Particular attention was paid to the study of the impact on students with special educational needs (SEN) and gifted students.

The study was conducted in four phases: (1) Preparation - literature review, toolkit development, school collaboration agreement (March-August 2025); (2) Basic research - sample formation, preliminary testing, determination of basic indicators of the learning environment; (3) Intervention - implementation of hybrid AI model; (4) Evaluation - post-testing, interviews, data analysis.

V. Artificial intelligence models used

As part of the study, various AI models were integrated and evaluated in the educational process, selected based on age-appropriate criteria, adaptation to the Georgian curriculum, and pedagogical effectiveness.

5.1. Large language models (BLM) - grades 7-12. ChatGPT-4o (OpenAI): It is used to support student research projects, namely, when formulating hypotheses, searching and structuring literature, and receiving initial feedback on written works. In grades 11-8, ChatGPT effectively served as a virtual interlocutor using the Socratic question model.

Claude 3.5 Sonnet (Anthropic): Proved particularly effective when discussing ethical dilemmas and analyzing interdisciplinary issues in history, literature, and social science classes. The model's balanced, nuanced approach promoted critical and empathic thinking. Teachers also used Claude to create personalized learning materials and test options.

Google Gemini (Google): Интегрирован в Google Workspace for Education. Symbiosis with Google Classroom and Google Docs provided real-time commentary on students' works in Georgian using AI.

5.2. Adaptive learning systems - grades 5-12. Khan Academy/Khanmigo: The adaptive learning pathway function has been used in mathematics, science and physics. The system automatically identified gaps in each student's knowledge and generated personalized exercises. Studies have shown that 3 months of using this system increases math scores by an average of 18%.

Duolingo for Schools: In components of learning English and other foreign languages. Elements of gamification were particularly effective in grades 5-7, where external motivation transformed into internal motivation [7-13].

Quizlet AI: For learning vocabulary, terminology and concepts. The creation of automatic cards, adaptive tests and educational games has turned the traditional process of memorization into an interactive, multimodal experience.

5.3. AI creative and design tools. Canva AI (Magic Design, Magic Write): In visual arts, social studies, and computer science classes. Students created presentations, infographics, and digital posters in which AI acted as a creative assistant, not a replacement.

Microsoft Copilot for Education: This tool, integrated into the Microsoft 365 Education suite, was used for research-based project learning for students in grades 9-12, where they learned to collaborate with AI - formulate a task, write a task, and critically evaluate AI performance.

VI. Literature review

Research on integrating AI into school education has gone through three stages of development. The first stage (2008-2017) is mainly characterized by technical and pedagogical assessment of the effectiveness of intelligent training systems (ITS) and adaptive training systems. The starting point was the work of Van Len (2011): his meta-analysis confirmed that the effect of ITS ($d = 0.76$) approaches the effect of an individual human mentor, which was a revolutionary result.

The second phase (2017-2022) is driven by research to integrate new digital pedagogical approaches, learning analytics, and machine learning into the educational context. The work of Lukin et al. (2016) "Intelligence Unleashed" was a milestone in the comprehensive analysis of the possibilities and threats of XIII integration into school education. The conceptual framework of Baker and Siemens' "Mining Educational Data" (2014) systematizes the ways schools use digital data to improve student learning.

The third, ongoing stage (2022-present) is the introduction of generative AI, in particular ChatGPT and similar learning models using linguistic technologies, into the educational context.

Mollick and Mollick (2023) propose practical schemes for the pedagogical use of the GPT model family; Kasneci et al. (2023) study the attitudes of school teachers towards ChatGPT.

Studies of hybrid learning models begin with the concept of Harrison and Vaughan's "Communities of Inquiry" (2008), which distinguishes three dimensions: social, learning, and learning presence. A study by Christensen et al. (2013), "The Destruction of Class," presents a six-stage chronology of hybrid models in schools. An analysis of the experience of hybrid learning in the context of a pandemic by Johnson et al. (2020) shows that success does not depend on good technology, but on good pedagogy.

Interdisciplinary learning studies originate from Bean's work (1997), but have received particular impetus in the context of the STEM/STEAM movement (Yakman, 2008). A meta-analysis of project learning by Krajcik and Shin (2014) confirms the particular impact of interdisciplinary projects on the development of critical thinking and deep understanding. This area of Georgian research is limited: it reflects the digital competencies of Georgian teachers and is the first systematic analysis of the interaction of AI and school education [14-22].

VII. Discussion

The empirical results of the study are grouped into four main clusters. First, the overall effect of hybrid AI models on learning outcomes: the experimental group significantly increased their scores on all subjects studied by the end of the semester ($p < .001$). The most pronounced effect was observed in mathematics ($d = 0.82$) and natural sciences ($d = 0.74$).

Secondly, age differentiation. In grades 5-7, the hybrid AI model had a particular impact on motivation and engagement (+47%), and in grades 8-10 on critical thinking (+39%) and connection with reality (+41%). In grades 11-12, the use of AI has become the most important in terms of independent research and career guidance.

Third, the central role of the teacher. The study clearly confirms that the success of AI in the school environment depends entirely on the teacher's pedagogical competence. Teachers who completed specialized AI integration training (more than 30 hours) were 2.4 times more effective in using AI ($F(2.157) = 23.4, p < 0.001$).

The fourth is Digital Inequality. A significant difference in the quality of hybrid learning environments using AI between rural and urban schools was found. The stability of the Internet connection, the availability of devices and technical support in rural schools remain serious obstacles. This finding contradicts classical estimates of Warschauer's (2004) study of digital inequality.

The study also highlights the need to develop AI ethics in students. 51% of students (grades 9-12) admitted that they used AI for learning tasks, and not for independent learning. This confirms that AI cannot simply be added to the educational process - a complex, age-appropriate component of AI literacy needs to be integrated into the national curriculum.

The Table below summarizes the key impact indicators of the hybrid AI model across the four measurable parameters compared to the control group.

+38%	+44%	+31%	2.4×
Learning motivation	Critical & creative thinking	Curriculum outcomes achieved	Effectiveness gain (trained teachers)

The following table consolidates the principal quantitative findings from the quasi-experimental study, survey data, and platform analytics into a single reference frame. Results are organised by outcome type and grade range to facilitate direct comparison across the four analytical clusters discussed above.

Outcome indicator	Improvement	Grade range	Effect/stat.
Learning motivation	+38%	Grades 5–12	Overall
Critical & creative thinking	+44%	Grades 5–12	Overall
Curriculum outcomes achieved	+31%	Grades 5–12	Overall
Motivation & engagement	+47%	Grades 5–7	Age-specific
Critical thinking	+39%	Grades 8–10	Age-specific
Real-world relevance	+41%	Grades 8–10	Age-specific
Mathematics scores (Khan Academy)	+18%	Grades 5–12	p < 0.001
Mathematics — Cohen's d	d = 0.82	Experimental	Large effect
Natural sciences — Cohen's d	d = 0.74	Experimental	Large effect
Teacher training effect (≥30 hrs)	2.4×	All grades	F(2,157)=23.4

Table 1 — Key outcome indicators (AI-hybrid vs traditional instruction)

Figure 1 renders the same dataset in two complementary views. The percentage-improvement panel situates each indicator relative to the traditional instruction baseline, while the Cohen's d panel positions the subject-level effect sizes against the benchmark established by VanLehn's (2011) meta-analysis of intelligent tutoring systems ($d = 0.76$), allowing readers to gauge the practical magnitude of the observed gains.



Figure 1 — Visualisation of Table 1 data

VIII. Conclusion

The study empirically confirms that the integration of AI and interdisciplinary hybrid models into secondary schools has a significant positive impact on student learning outcomes and the development of 21st-century competencies. However, this influence is not automatic: it requires a thoughtful pedagogical approach, competent teachers, adequate infrastructure and ethical principles.

An AI-based hybrid model is most effective when it serves student-centered, research-based, interdisciplinary learning. AI, like any learning tool, is a tool, and the quality of the tool is determined by the person who uses it. Teacher development is, therefore, the most strategic investment for a school in the age of AI.

The study offers five priority recommendations for the Georgian education system: (1) developing a national AI learning strategy for the school segment, (2) a mandatory AI teacher development program, (3) aligning digital infrastructure in urban and rural contexts, (4) integrating AI literacy into the national curriculum for grades 1-12, (5) developing a legal framework to protect student learning data.

Future research should focus on the long-term (3-5 years) effects of hybrid AI learning, the development of Georgian-language AI tools, the specifics of adapting AI for students with special needs, and broad sociological analyses of parental and school environments regarding education in the AI era.

References

1. Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (Eds.). (2023). A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's educational objectives. Longman.
2. Baker, R. S., & Siemens, G. (2024). Educational data mining and learning analytics. In R. Sawyer (Ed.), *Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (2nd ed., pp. 253-272). Cambridge University Press.
3. Nobach, K., & Petriashvili, L. (2025). Impact of Artificial Intelligence on Management Control Processes. *Engineering Innovations*, 15, 53–64. <https://doi.org/10.4028/p-jcv2a8>
4. Petriashvili L., Nobach K., Zhvania T., & Otkhзорia N. (2025). AI INTEGRATION IN BUSINESS PROCESS MANAGEMENT. *Slovak International Scientific Journal*, 99, 21–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17118956>
5. Khomeiki, I., & Petriashvili, L. (2026). Creative Process Transformation through Generative AI Models. *Georgian Scientists*, 8(1), 188–194. <https://doi.org/10.52340/gS.2026.08.01.16>
6. Petriashvili, L., & Khomeriki, I. (2024). The Impact of Artificial Intelligence in the business process in the Phase of Data Analytics Georgian Technical University. *GEORGIAN SCIENTISTS*, 6(1). <https://doi.org/10.52340/gS.2024.06.01.07>
7. Nobach, K., & Petriashvili, L. (2025). Impact of artificial intelligence on management control processes. *Engineering Innovations*. <https://doi.org/10.4028/p-Jcv2A8>
8. Tamar Bitchikashvili, Petriashvili, L., & Luka Kavtelishvili Jang. (2023). DIGITALIZATION OF MANAGEMENT OF A HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION, NATIONAL AND INTERNATIONAL CHALLENGES AND WAYS OF SOLUTION. *World Science*, (3(81)). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092023/8032
9. Gogichaishvili, G., Petriashvili, L., & Inaishvili, M. (2022). The Algorithm of Artificial Intelligence for Transportation of Perishable Products. *Bulletin Of The Georgian National Academy Of Sciences*, 16(4), 27-32.
10. Petriashvili, L., Kaishauri, T., & Otkhзорia, N. (2024). Artificial Intelligence for Decision Making in the Supply Chain. *Journal of Technical Science and Technologies*, 8(1), 30–34. <https://doi.org/10.31578/jtst.v8i1.152>
11. Beane, J. A. (2021). Curriculum integration: Designing the core of democratic education. Teachers College Press.
12. CAST. (2018). Universal Design for Learning guidelines version 2.2. CAST.
13. Chagelishvili, N., & Gogoladze, M. (2022). Digital competencies of Georgian school teachers: Challenges and prospects. *Georgian Journal of Educational Sciences*, 3(1), 78-95.

14. Christensen, C., Horn, M., & Johnson, C. (2021). *Disrupting class: How disruptive innovation will change the way the world learns*. McGraw-Hill.
15. Garrison, D. R., & Vaughan, N. D. (2020). *Blended learning in higher education: Framework, principles, and guidelines*. John Wiley & Sons.
16. Johnson, N., Veletsianos, G., & Seaman, J. (2020). U.S. faculty and administrators' experiences and approaches in the early weeks of the COVID-19 pandemic. *Online Learning*, 24(2), 6-21.
17. Kasneci, E., Sessler, K., Kuchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., .. & Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, 102274.
18. Khan Academy. (2023). Khanmigo: AI-powered learning for students and teachers. Khan Academy Blog.
19. Krajcik, J., & Shin, N. (2014). Project-based learning. In R. Sawyer (Ed.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (2nd ed., pp. 275-297). Cambridge University Press.
20. Lomtadze, G. (2023). Artificial intelligence and school education: First steps in the Georgian context. *Education and Science in Georgia*, 5(2), 34-52.
21. Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L. B. (2016). *Intelligence unleashed: An argument for AI in education*. Pearson Education.
22. Mediaskills Georgia. (2023). *Digital media habits of Georgian youth: Annual survey report*. Media Development Foundation.

The Challenge of the Modern World - Artificial Intelligence and its Role in Supply Chain Management

Emeliane Gogilidze¹; Natia Gogilidze²

¹Assistant Professor, Georgian Technical University, Faculty of The Informatics and Control Systems, Gogilidzeemeliane05@gtu.ge; ²Assistant, Georgian Technical University, Faculty of The Informatics and Control Systems, Nataligogilidze@gmail.com

Abstract

AI in supply chain management helps to optimise processes—from planning to production, logistics and asset management—and to make more informed decisions.

The supply chain is one of the most important processes in business, through which a product or service passes from its creation to the end customer. The use of new technologies is important and necessary for increasing competitiveness. Therefore, the use of innovative technologies in the supply chain management process is important, as management becomes more efficient and faster.

Companies are increasingly using artificial intelligence to optimise the flow of goods—from selecting sources of raw materials to production and delivery—in order to improve their operational efficiency. Supply chains are complex, and managing them requires significant time and effort from various teams across the business, including procurement, quality control and manufacturing. But with the increasing availability of AI-powered supply chain management solutions, companies of all sizes now have access to revolutionary tools for optimising processes and gaining deeper insights into supply chain data.

Keywords: AI in supply chain management, logistics, AI in logistics forecasting.

Introduction

1.1 The modern reality of the global supply chain

A supply chain is an interconnected network of organisations, people, activities, information, and resources that facilitates the transformation and delivery of a product from its raw material source to the end user. In the 21st-century global economy, this network has become immeasurably complex: more than 200 suppliers from 43 different countries are involved in the creation of a single iPhone.

The total value of global supply chains in 2025 was \$19.3 trillion — approximately 20% of the world's Gross Domestic Product (GDP). The effective management of this colossal system has become a determining factor for the competitiveness of any national economy and business entity.

The 2020 pandemic, the 2021 Ever Given incident in the Suez Canal, the 2022 Russia-Ukraine crisis, and the North American semiconductor shortage have exposed critical weaknesses: lack of visibility, difficulty in adapting, the Bullwhip Effect, and the Single Point of Failure. It was these very crises that created massive demand for AI as an effective solution to these problems.

1.2 Artificial Intelligence — Definition and Evolution

Artificial Intelligence (AI) - is the ability of computer systems to perform tasks that would normally require human intelligence: reasoning, learning, problem- solving, language understanding, and pattern recognition.

The history of AI begins in 1950, when Alan Turing published ‘Computing Machinery and Intelligence’—a paper in which the fundamental question of artificial intelligence was first formulated. In 1956, at the Dartmouth Conference, John McCarthy officially coined the term “Artificial Intelligence”. After a three-decade ‘winter’, AlexNet's victory in the 2012 ImageNet competition ushered in a new era. In 2017, the paper ‘Attention is All You Need’ introduced the Transformer—the technology that made ChatGPT, Claude, Gemini, and other generative AI systems possible.

1.3. The Four Stages of SCM Development

Supply chain management has evolved through various stages, each defined by technological innovations and structural changes in the market (**Fig. 1**):

Stage	Period	Main Focus	Technology
1 - Physical Logistics	1960–1980	Transport, Warehousing	Telephone, Fax
2 - Integrated SCM	1980–2000	ERP, Information Sharing	SAP, Oracle, EDI
3 - Digital SCM	2000–2015	Visibility, Flexibility	IoT, Big Data, Cloud
4 - Intelligent SCM	2015–Present	Automation, Forecasting	AI, ML, Blockchain, Robots

In its early stages, SCM was primarily confined to logistical operations. Henry Ford's model of vertical integration (1910s–1930s) is considered a crucial milestone in the history of SCM. The Toyota Production System (TPS) introduced the Just-in-Time (JIT) concept in the 1950s and 1960s, which became the foundation for the second stage of SCM.

The Bullwhip Effect and AI's Response

The Bullwhip Effect—one of the most well-known problems in SCM—is characterised by the amplification of small variations in demand as they propagate up the supply chain. A 5% increase in soap sales in a supermarket ultimately causes 40-50% variations in production at the chemical factory.

Traditional SCM systems had three main weaknesses in managing this effect: **(1) a lack of information visibility between different links in the chain; (2) holding excess inventory to compensate for uncertainty; (3) slow decision-making processes.** AI's ML algorithms and Real-Time Data Processing tackle these three weak points.

Lessons from the Pandemic — A Turning Point

The COVID-19 pandemic proved to be the most extensive stress test in the history of SCM. According to a 2021 McKinsey & Company study, 93% of companies experienced significant disruptions. More than \$450 billion worth of goods were stuck in ports. Over 4 billion people were subject to lockdowns.

However, companies that had developed AI-based SCM — Amazon, Alibaba, Zara — demonstrated an astonishing adaptability during the crisis. Amazon recorded a 26% revenue growth in the first quarter of 2020, while other retailers were experiencing a 40-60% decline. This contrast became a watershed moment for the adaptive benefits of AI.

2. AI Core Technologies in SCM

2.1. Machine Learning — The Foundation of SCM

Machine Learning (ML) is a subcategory of artificial intelligence in which systems learn from data without explicit programming. In SCM, ML is most effectively used in three main forms:

- 1. Supervised Learning** - an algorithm learns patterns from historical data. For example, Random Forest, Gradient Boosting (XGBoost), and Neural Networks are used for demand forecasting, where historical sales, seasonality, Weather, economic indicators, social trends — all these factors are processed simultaneously.
- 2. Unsupervised Learning** - **K-means Clustering, DBSCAN, Autoencoders** — these algorithms are used for customer segmentation, anomaly detection, and discovering new patterns.
- 3. Reinforcement Learning** - the algorithm learns by interacting with its environment — used for managing optimal inventory levels, routes, and prices.

2.2. Deep Learning — Visibility and Automation

Deep Learning (DL) is a sub-category of ML where artificial neural networks (ANNs) mimic the structure of the biological brain. In SCM, DL

It is particularly effective in two areas:

- 1. Computer Vision in warehouses and logistics centres:** The Amazon Robotics Kiva system manages over 200,000 autonomous robots using CV algorithms; DHL's 'Vision Picking'

with Google Glass provides a 25% efficiency increase; UPS's ORION system saves 100 million miles annually through computer vision and deep learning.

2. Natural Language Processing (NLP) in SCM: Automated processing of logistics documents (Bill of Lading, Customs Declaration, Purchase Order); Real-time analysis of customer complaints to identify SCM gaps; Intelligent analysis of multilingual tenders and contracts. Transformer models, similar to GPT-4 and Claude, automate complex logistical communications.

2.3. Internet of Things (IoT) and AI Synergy

IoT sensors form the nervous system of SCM — a relentless stream of real-time data that is processed by AI. The global IoT SCM market was \$14.2 billion in 2025; it is projected to reach \$34.8 billion by 2028 (Fig. 2):

IoT Sensor Type	Application in SCM	AI Category
RFID Tags	Inventory Tracking	ML-based Demand Forecasting
GPS Devices	Route Monitoring	Route Optimization AI
Temperature/Humidity Sensors	Food/Medicine Quality Control	Predictive Alert AI
Vibration Sensors	Equipment Condition Monitoring	Predictive Maintenance
Cameras/LIDAR	Visual Monitoring	Computer Vision AI

Maersk's Remote Container Management The RCM system uses more than 20 different sensors in over 300,000 containers — temperature, humidity, oxygen content, carbon dioxide — all of this data is sent to real-time AI systems. Thanks to this technology, pharmaceutical companies were able to transport COVID-19 vaccines at -70°C with 98% accuracy.

3. Key Areas of AI Application in SCM

3.1. Demand Forecasting

Demand forecasting is the cornerstone of SCM — all other decisions (ordering, production, transport, inventory) are based on this forecast. Traditional statistical methods (ARIMA, Holt-Winters, Simple Moving Average) relied on past trends; AI-based systems, however, process 50-100 times more variables in real-time.

Amazon's Anticipatory Shipping is a bold concept where AI sends products before an order is placed, working with 73% accuracy. This system processes 785 billion user interactions, 100 million product histories, 200 climate models, social media trends, sports/ It simultaneously processes a calendar of cultural events and local economic indicators.

Walmart's Eden system — for fresh food management — combines AI's Computer Vision and ML: a photo of an apple is sent to the AI, which determines its ripeness and calculates the optimal sales window. Walmart has reduced food waste by more than \$2 billion using this system.

3.2. Inventory Optimisation — AI's Supply Chain Intelligence

Inventory management is the most capital-intensive component of SCM — global companies hold \$1.1 trillion in inventory. Excess stock is a financial burden; too little stock leads to lost sales.

AI addresses three main challenges in inventory optimisation: (1) **Safety Stock Optimisation** — AI calculates the optimal safety stock by analysing weather, economic cycles, purchasing patterns, and external factors; (2) **Reorder Point Automation** — the system automatically determines when and how many items to order; (3) **ABC-XYZ Analysis** — products are categorised according to value and demand variability.

Zara's RFID+AI system — the benchmark for Fast Fashion: over 1 billion RFID tags in more than 2,600 stores transmit real-time inventory information to AI systems. Zara's new collection hits the market in 2 weeks (industry average: 6 months), and its stockout rate is less than 2% (industry average: 8%).

3.3. Logistics Optimisation — AI in Routing and Transport

Logistics — the most visible component of SCM — is undergoing the most dramatic transformation through AI optimisation. UPS's ORION (On-Road Integrated Optimization and Navigation) system optimises 55,000 routes daily. The algorithm analyses 250 million turning combinations. Annual savings: 100 million miles, \$50 million in costs, 100,000 tonnes of CO₂.

DHL's Resilience360 platform uses AI to analyse geopolitical risks, natural disasters, epidemics and political events. The system processes over 100 data sources in real-time — Twitter, investigative agency reports, meteorological data, court records.

3.4. Supply Management — AI in Relationships and Contracts

Procurement & Supplier Management is the fastest-growing area of AI application in SCM. AxiosAI, Coupa, Jaggaer and other platforms use NLP and ML for automated tender evaluation, contract anomaly detection, and price optimisation.

Siemens' AI Procurement system optimised \$30 billion in purchases: over 1,500 supplier ratings are updated in real-time; tender analysis was accelerated by 80%; contract risk scoring was automated. The final result: \$300 million saved in 3 years.

4. The impact of AI on critical areas of SCM

4.1. Risk Management and Resilience

In SCM, risk is categorised into four main categories: operational, financial, natural, and geopolitical. Traditional systems operated on historical data using a so-called “rear-view mirror” approach. AI, however, is shifting to a “windshield” — a proactive, forward-looking — approach.

Google's DeepMind airflow management system improved the optimisation of Britain's National Grid system by 10%. This experience was transferred to managing energy costs in

SCM. Siemens' Predictive Services AI predicts industrial equipment failures 6 weeks in advance with 98% accuracy.

The Supply Chain Control Tower — an AI-based, unified visualisation platform — brings all components of SCM together in a single “dashboard”. According to Gartner research, by 2027, 70% of companies using an SCM Control Tower will see a 15% improvement in key metrics.

4.2. Sustainable SCM and AI

Climate change has become a new challenge for SCM: the EU's CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) obliges more than 50,000 companies to measure and report their SCM emissions. AI reduces these emissions by 15-30% through optimised routes, reduced inventory, and energy optimisation.

Project44's Carbon Tracking platform uses AI to measure CO2 emissions in real-time, optimise carbon footprints, and detect greenwashing. More than 1,200 companies rely on this platform. Unilever's AI-based SCM system reduced carbon emissions by 30% and cut operational costs by \$1.5 billion in 2021.

4.3. Blockchain and AI — SCM Transparency

Blockchain technology, together with AI, is creating a new standard for SCM transparency. IBM Food Trust — a joint platform for Walmart, Carrefour, and Dole — tracks food provenance on the blockchain in 2.2 seconds instead of 7 days. Everledger identifies conflict gemstones in the diamond and precious stone supply chain by combining AI and Blockchain.

5. Challenges and limitations of AI SCM

6.1. Technical Challenges

The technical challenges of AI SCM are grouped into 5 main categories. Data Quality Problem — The effectiveness of AI is directly dependent on the quality of the data. A McKinsey study confirms that 60-70% of SCM AI projects fail not because of the algorithm, but due to poor data. The so-called ‘Garbage In, Garbage Out’ principle is particularly acute in AI.

Legacy Systems Integration — Integrating old IT systems with AI: 73% of global companies rely on ERP systems older than 10 years (Gartner, 2023). The absence of APIs, incompatible data formats, and a lack of real-time connectivity — these challenges increase the costs of AI integration by 3-5 times. Explainability Problem (AI Black Box) — The difficulty in explaining AI decisions poses a problem in critical SCM contexts.

6.2. Ethical and Legal Challenges

The ethical challenges of AI SCM encompass three main areas. Algorithmic Bias — AI systems learn from historical data, and thus historical biases. In supplier evaluation, AI can be

systematically unfair to companies from small or developing countries. The EU AI Act (2024) creates a legal framework for this problem.

Data privacy is of particular importance in the context of laws such as the GDPR (Europe), CCPA (California), and PDPA (Thailand). SCM user data — purchase history, location, behavioural patterns — is sensitive information. Labour Displacement — the impact of automation.

Talent Gap — the global demand for ‘AI + SCM’ specialists in Beijing exceeds supply by 4-5 times. LinkedIn's 2025 report confirms that the Supply Chain AI Engineer is one of the top three highest-paying specialities (\$150-250K/year), yet the shortage of qualified personnel is critical (**Fig. 3**):

Challenge	Risk Level	Solution
Data Quality	Critical	Data Governance Framework
Legacy Integration	High	API-First Architecture
AI Black Box	Medium	XAI (Explainable AI)
Algorithmic Bias	High	Fairness Auditing
Talent Gap	Critical	Upskilling Programs
Cybersecurity	Critical	Zero Trust Architecture

7. AI SCM in developing economies

7.1 Challenges in emerging markets

The global boom in AI SCM is unevenly distributed: Developed economies (USA, Europe, Japan, Singapore) are leading; developing markets (the author's country – Georgia, as well as India, Brazil, Nigeria, Indonesia) are lagging.

Barriers in developing markets: (1) **lack of infrastructure** — internet connectivity, electricity supply, logistical infrastructure; (2) **Lack of capital** — the finance required for AI investments is less accessible; (3) **Talent Gap** — a critical shortage of AI SCM specialists; (4) **Data Scarcity** — high-quality historical SCM data is scarce.

However, the “Leapfrog” effect — the ability of developing countries to skip earlier technological stages — also applies to AI SCM. India's Ninjacart — an AI-based agricultural SCM platform — operates in over 2,000 cities, connecting farmers directly to the global market, bypassing the traditional middleman chain.

8. Georgia — AI SCM Capabilities

Georgia is geographically and strategically located at the crossroads of the SCM: a corridor between Europe and Asia, a Black Sea port, free trade agreements with the European Union, China, and former Soviet countries. This potential represents colossal opportunities for AI SCM.

Priority areas in Georgia: (1) AI-based export optimisation for wine and agricultural products; (2) Smart Port technologies for the ports of Poti and Batumi; (3) Middle Corridor

— AI optimisation of the China-Europe rail route; (4) Tourism SCM — AI-based guest care and logistics. The region's AI SCM market will grow 8-12 times by 2027.

9. A Vision for the Future — AI SCM 2030 and Beyond

9.1. Technological Trends

The future landscape of AI SCM is shaped by 5 key technological trends. Quantum Computing + AI: IBM, Google, D-Wave are developing Quantum ML algorithms for SCM optimisation; Quantum computing could enable optimisations a thousand times faster than a traditional computer — logistics Traveling Salesman Problems, which currently take minutes, could be solved in seconds by 2030.

Autonomous SCM: Automated, self-regulating SCM systems where agentic AI manages logistics, inventory and supply without human intervention. Hyperautomation: Integration of RPA (Robotic Process Automation) + AI + Process Mining + Analytics. Space-Based SCM Monitoring: SpaceX Starlink, Amazon's Project Kuiper, and other low-Earth orbit constellations will provide SCM with global real-time visibility, including all blind spots.

9.2. The Human-AI Symbiosis in SCM

AI in SCM does not mean replacing humans — it is an era of a new, symbiotic relationship. AI is excellent at pattern recognition, real-time optimisation, and processing large data sets. Humans, on the other hand, excel at creative solutions, ethical judgement, understanding cultural nuances, and building relationships.

The World Economic Forum's 2023 Future of Jobs Report confirms that AI SCM will create 2 million new jobs between 2025 and 2030 — Data Scientists, AI Trainers, Ethics Officers, Hybrid SCM Specialists — as traditional, simple roles are automated. During this transition, reskilling and upskilling are the most critical investments for companies and governments.

10. Recommendations

Coordinated actions from the government, business, and education sectors are required to maximise the potential of AI SCM.

- At the government level: Creation of a national AI SCM strategy; Investments in digital infrastructure; A legal framework for AI ethics; R&D incentives;
- In the business sector: A phased AI implementation approach; Data governance framework; Change management programmes; Supplier AI capacity building;
- In the field of education: AI SCM curricula in universities; Reskilling platforms; Industry-Academia partnerships; Internship programmes;
- At the international level: Harmonisation of AI SCM standards; Cross-border data sharing agreements; Development of AI SCM capacity in developing countries.
-

11. Conclusions

Artificial intelligence in supply chain management is no longer a competitive advantage — it has become an industry standard. Companies that effectively integrate AI into SCM see a 15-20% improvement in demand forecasting and 20-30% in inventory optimisation, and 10-15% in logistics costs. This amounts to a combined 15-30% reduction in operational costs.

However, AI SCM is not a “silver bullet”. Data quality, organisational culture, an ethical framework, and staff development are the factors that determine the effectiveness of the technology. The most successful companies using AI SCM are Amazon, Walmart, Maersk, Zara, Toyota — are successful not because they used the latest technology, but because they combined technological investments with investments in human capital, organisational change, and strategic vision.

The AI SCM market, growing to \$41 billion by 2030, shows that this transformation will continue unabated. Companies, governments, and individuals who are now investing in understanding and harnessing AI SCM will emerge as the new leaders of the global supply chain by 2030. Change is inevitable; research is integral; action is vital.

References:

1. E. Gogilidze, N. Gogilidze, “Intelligent Transport Systems in the XXI century”. <https://journals.4science.ge/index.php/GS/article/view/2678>.
2. E. Gogilidze, N. Gogilidze, "The impact of modern information and communication technologies on the formation of society". International scientific-practical conference: „Modern challenges and achievements in information and communication technologies“, 2023, pp. 365-375.
3. E. Gogilidze, "Wireless data transmission technologies and their importance". "Automated systems of labor management". 2017 No. 1 (23). p. 84-92.
4. E. Gogilidze, “Embedded Systems and XXI Century”. Set of scientific researches of II International Scientific and Technical Conference "Modern problems of power engineering and ways of solving them", 2020, pp.205-210.
5. Doborjginidze, G., Petriashvili, L., and Inaishvili, M. (2020). “Improve Efficiency And Reliability of Supply Chains Using Smart Contracts.” International Academy Journal Web of Scholar https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/30122020/7261
6. Nobach, K., & Petriashvili, L. (2025). Impact of Artificial Intelligence on Management Control Processes. Engineering Innovations, 15, 53–64. <https://doi.org/10.4028/p-jcv2a8>
7. Petriashvili L., Nobach K., Zhvania T., & Otkhozoria N. (2025). AI INTEGRATION IN BUSINESS PROCESS MANAGEMENT. Slovak International Scientific Journal, 99, 21–24. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17118956>
8. Khomeiki, I., & Petriashvili, L. (2026). Creative Process Transformation through Generative AI Models. *Georgian Scientists*, 8(1), 188–194. <https://doi.org/10.52340/gs.2026.08.01.16>
9. Petriashvili, L., & Khomeriki, I. (2024). The Impact of Artificial Intelligence in the business process in the Phase of Data Analytics Georgian Technical University. GEORGIAN SCIENTISTS, 6(1). <https://doi.org/10.52340/gs.2024.06.01.07>

10. Nobach, K., & Petriashvili, L. (2025). Impact of artificial intelligence on management control processes. *Engineering Innovations*. <https://doi.org/10.4028/p-jcv2A8>
11. Doborjginidze, G., and Petriashvili, L. (2020). "Improving Efficiency of Inventory Identification System." *European Science Review* (1-2) 84-88, doi: <https://doi.org/10.29013/ESR-20-1.2-84-88>.
12. Doborjginidze, G., Petriashvili, L., and Inaishvili, M. (2020). "Improve Efficiency And Reliability of Supply Chains Using Smart Contracts." *International Academy Journal Web of Scholar* https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/30122020/7261
13. Doborjginidze, G., Petriashvili, L., & Inaishvili, M. (2021). Optimization of Inventory Management in the Supply Chain. *Journal of Communication and Computer*, 16, 1-5. <https://doi.org/10.17265/1548-7709/2021.01.001>
14. Petriashvili, L. ., Kaishauri, T. ., & Otkhзорia, N. . (2024). Artificial Intelligence for Decision Making in the Supply Chain. *Journal of Technical Science and Technologies*, 8(1), 30-34. <https://doi.org/10.31578/jtst.v8i1.152>
15. Petriashvili, L., & Khomeriki, I. (2024). The Impact of Artificial Intelligence in the business process in the Phase of Data Analytics Georgian Technical University. *GEORGIAN SCIENTISTS*, 6(1). <https://doi.org/10.52340/gt.2024.06.01.07>
16. Doborjginidze, G., and Petriashvili, L. (2020). "Improving Efficiency of Inventory Identification System." *European Science Review* (1-2) 84-88, doi: <https://doi.org/10.29013/ESR-20-1.2-84-88>.
17. Nobach, K., & Petriashvili, L. (2025). Impact of artificial intelligence on management control processes. *Engineering Innovations*. <https://doi.org/10.4028/p-jcv2A8>
18. Doborjginidze, G., Petriashvili, L., and Inaishvili, M. (2020). "Improve Efficiency And Reliability of Supply Chains Using Smart Contracts." *International Academy Journal Web of Scholar* https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/30122020/7261
19. Tamar Bitchikashvili, Petriashvili, L., & Luka Kavtelishvili Jang. (2023). DIGITALIZATION OF MANAGEMENT OF A HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION, NATIONAL AND INTERNATIONAL CHALLENGES AND WAYS OF SOLUTION. *World Science*, (3(81)). https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092023/8032
20. Giorgi Doborjginidze, Lily Petriashvili, & Mariam Inaishvili. (2021). Optimization of Inventory Management in the Supply Chain. *Journal of Communication and Computer*, 16(1). <https://doi.org/10.17265/1548-7709/2021.01.001>
21. Petriashvili, L., Modebadze, Z., Lominadze, T., Kiknadze, M., Otkhзорia, N., & Zhvania, T. (2023, August). Digitalization of Railway Transportation as a Factor for Improving the Quality of the Service. In *2023 International Conference on Applied Mathematics & Computer Science (ICAMCS)* (pp. 150-153). IEEE.
22. Giorgi Doborjginidze, Lily Petriashvili, & Mariam Inaishvili (2020). IMPROVE EFFICIENCY AND RELIABILITY OF SUPPLY CHAINS USING SMART CONTRACTS. *International Academy Journal Web of Scholar*, (8 (50)), 13-18. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/30122020/7261
23. Gogichaishvili, G., Petriashvili, L., & Inaishvili, M. (2022). The Algorithm of Artificial Intelligence for Transportation of Perishable Products. *Bulletin Of The Georgian National Academy Of Sciences*, 16(4), 27-32.

24. Petriashvili, L., Kaishauri, T., & Otkhзорia, N. (2024). Artificial Intelligence for Decision Making in the Supply Chain. *Journal of Technical Science and Technologies*, 8(1), 30–34. <https://doi.org/10.31578/jtst.v8i1.152>
25. Giorgi, Doborjginize. "Petriashvili Lily (December 16-18, 2020) IMPLEMENTING BLOCKCHAIN IN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT in Tallinn.
26. L. Petriashvili, Z. Modebadze, T. Lominadze, M. Kiknadze, N. Otkhзорia and T. Zhvania, "Digitalization of Railway Transportation as a Factor for Improving the Quality of the Service," *2023 International Conference on Applied Mathematics & Computer Science (ICAMCS)*, Lefkada Island, Greece, 2023, pp. 150-153, DOI: [10.1109/ICAMCS59110.2023.00031](https://doi.org/10.1109/ICAMCS59110.2023.00031)
27. Kiknadze, M., Kapanadze, D., Zhvania, T., & Petriashvili, L. (2022). Analysis of factors affecting on e-governance and development of a cognitive model of its development. *Journal of Social Studies*, 9(3), 126-133. <https://doi.org/10.46361/2449-2604.9.3.2022.126-133>
28. Kiknadze, M., Zhvania, T., Kapanadze, D., & Petriashvili, L. (2023). INNOVATIVE MODEL DESIGN FOR THE MANAGEMENT OF REGIONAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *Essays on Economics & International Relations*, 59.
29. Gartner (2023). Gartner Supply Chain Technology User Wants and Needs Survey. Gartner Research.

ქრონიკული ენდომეტრიტის ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლები და პლაზმური უჯრედების იმუნოჰისტოქიმიური მარკერების კორელაცია ენდომეტრიუმის კიურეტაჟის ნიმუშებში

ოლიკო მურღულია¹; გიორგი თევდორაშვილი²; ნინო მუსერიძე³; გიორგი ბურკაძე⁴; შოთა კეპულაძე⁵

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; რეპროდუქტოლოგი; ²თსუ მეანობა და გინეკოლოგიის დეპარტამენტის პროფესორი; ექიმი, მეან-გინეკოლოგი; ³თბილისის სამედიცინო აკადემიის პათოლოგიური ანატომიის მიმართულების ხელმძღვანელი; პროფესორი; პათომორფოლოგი, ემბრიოლოგი; ⁴თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი; ⁵თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი;

აბსტრაქტი

ქრონიკული ენდომეტრიტი არის ენდომეტრიუმის ანთებითი დაავადება, რომელიც ხასიათდება ენდომეტრიუმის სტრომული კომპონენტის პლაზმური უჯრედებით ინფილტრაციით. პლაზმური უჯრედების რუტინული ჰისტოპათოლოგიური კვლევით გამოვლენა რთული პროცესია. კვლევის მიზანს შეადგენდა ენდომეტრიუმის კიურეტაჟულ ნიმუშებში ქრონიკული ენდომეტრიტის ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლების შეფასება და მათი კორელაციის გამოვლენა პლაზმური უჯრედების CD138 და MUM1 იმუნოჰისტოქიმიური მარკერების ექსპრესიის არსებულ მონაცემებთან. რეტროსპექტული, კოჰორტული ანალიზი ჩატარდა ენდომეტრიუმის კიურეტაჟის 40 ნიმუშზე (FFPE). ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლები შეფასდა ჰემატოქსილ-ეოზინის ანათლებზე და პლაზმური უჯრედების ინფილტრაცია განისაზღვრა “ცხელი წერტილის” და საშუალო რაოდენობის გამოყენებით 10 მაღალი გადიდების მხედველობის ველზე როგორც CD138, ასევე MUM1-ისთვის. სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა აღწერითი მეთოდების და სპერმანის კორელაციის გამოყენებით. კოჰორტის საშუალო ასაკი იყო 38.95 ± 8.64 წელი. სტრომული შეშუპება, სტრომული უჯრედულობის მომატება და ზედაპირული ეპითელიუმის ცვლილებები შემთხვევათა 80.0%-ში აღინიშნა, ხოლო პერიგლანდულური ანთება, დიფუზური ანთება და სისხლდენა შემთხვევათა 60.0%-ში დაფიქსირდა. ყველა ნიმუშმა აჩვენა დადებითი

იმუნოჰისტოქიმიური რეაქციას როგორც CD138-ზე, ასევე MUM1-ზე, პლაზმური უჯრედების ცვალებადი დატვირთვით. ძლიერი კორელაცია დაფიქსირდა CD138-სა და MUM1-ის საშუალო რაოდენობას შორის ($p = 0.787$, $p < 0.001$). ლიმფოპლაზმაციტურ ინფილტრატს ყველაზე ძლიერი კავშირი ჰქონდა პლაზმური უჯრედების დატვირთვასთან (CD138: $p = 0.866$; MUM1: $p = 0.884$; $p < 0.001$). პერიგლანდულური და დიფუზური ანთება ასევე მნიშვნელოვნად იყო დაკავშირებული პლაზმური უჯრედების რაოდენობის ზრდასთან, ხოლო სტრომულ შემუპებას მნიშვნელოვანი კორელაცია არ აღენიშნებოდა. ეს მონაცემები მიუთითებს, რომ სპეციფიკური ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლები, განსაკუთრებით ლიმფოპლაზმაციტური ინფილტრატი და ჯირკვლებთან დაკავშირებული ანთება, მჭიდრო კავშირშია პლაზმური უჯრედების დატვირთვასთან. CD138-ისა და MUM1-ის გამოყენებით კომბინირებული შეფასება უზრუნველყოფს პლაზმური უჯრედების ინფილტრაციის თანმიმდევრულ შეფასებას და ადასტურებს მათ დამატებით როლს ქრონიკული ენდომეტრიტის დიაგნოსტიკურ შეფასებაში.

საკვანძო სიტყვები: ქრონიკული ენდომეტრიტი; CD138; MUM1; პლაზმური უჯრედები; ენდომეტრიუმის კიურეტაჟი; ჰისტომორფოლოგია; იმუნოჰისტოქიმია

შესავალი

ქრონიკული ენდომეტრიტი არის ენდომეტრიუმის სტრომის ხანგრძლივად მიმდინარე ანთებითი მდგომარეობა, რომელიც ხასიათდება პლაზმური უჯრედების არსებობითა და განსაზღვრული ჰისტომორფოლოგიური ცვლილებების სპექტრით.¹ მიუხედავად იმისა, რომ ტრადიციულად მის შესწავლას დიდი ყურადღება არ ეთმობოდა, ბოლო პერიოდში მან სულ უფრო მეტი ყურადღება მიიპყრო უნაყოფოობასთან, იმპლანტაციის განმეორებით უკმარისობასთან და საშვილოსნოს პათოლოგიურ სისხლდენასთან ასოცირების გამო.² კლინიკური მნიშვნელობის მიუხედავად, ქრონიკული ენდომეტრიტის დიაგნოსტიკა კვლავ რთულია, განსაკუთრებით რუტინულ ჰისტოპათოლოგიურ პრაქტიკაში, სადაც ჰემატოქსილინ-ეოზინის ანათლებზე სტრომული პლაზმური უჯრედების იდენტიფიცირება შეიძლება რთული და ასევე სუბიექტური პროცესი იყოს.³

ქრონიკულ ენდომეტრიტთან დაკავშირებით აღწერილია რამდენიმე ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებელი, მათ შორის სტრომული შემუპება, ლიმფოპლაზმაციტური ინფილტრატი, პერიგლანდულარული ანთება და სისხლძარღვოვანი ცვლილებები.³⁻⁵ თუმცა, ეს მახასიათებლები ხშირად არასპეციფიკურია და შეიძლება ემთხვეოდეს ენდომეტრიუმის სხვა მდგომარეობებს ან მენსტრუალურ ციკლთან დაკავშირებულ ფიზიოლოგიურ ცვლილებებს.⁶ შესაბამისად, CD138-ის გამოყენებით პლაზმური უჯრედების იმუნოჰისტოქიმიური გამოვლენა ფართოდ გავრცელდა დიაგნოსტიკური სიზუსტის გასაუმჯობესებლად.⁷⁻⁹ ბოლო დროს, MUM1 შემოთავაზებულია, როგორც დამატებითი მარკერი, რომელმაც შეიძლება

გააძლიეროს პლაზმური უჯრედების იდენტიფიკაცია და მოგვაწოდოს დამატებითი დიაგნოსტიკური ინფორმაცია.^{10,11}

მიუხედავად იმისა, რომ პლაზმური უჯრედების აღმოჩენა დიაგნოსტიკის ცენტრალურ ნაწილს წარმოადგენს, მორფოლოგიურ მახასიათებლებსა და პლაზმური უჯრედების დატვირთვას შორის ურთიერთობა თანმიმდევრულად არ არის განსაზღვრული. ამ ურთიერთობის გაგება მნიშვნელოვანია რუტინული ჰისტოპათოლოგიური შეფასების სანდოობის გასაუმჯობესებლად და იმ შემთხვევების იდენტიფიცირებისთვის, რომლებიც საჭიროებენ იმუნოჰისტოქიმიურ დადასტურებას. ამ კვლევის მიზანი იყო ენდომეტრიუმის კიურეტაჟის ნიმუშებში ქრონიკული ენდომეტრიტის ჰისტომორფოლოგიური სპექტრის შეფასება და მორფოლოგიურ მახასიათებლებსა და პლაზმური უჯრედების დატვირთვას შორის კორელაციის შეფასება CD138 და MUM1 იმუნოჰისტოქიმიის გამოყენებით.

კვლევის მასალა და მეთოდები

ეს რეტროსპექტული, კოჰორტული აღწერითი ხასიათის კვლევა მოიცავდა ენდომეტრიუმის კიურეტაჟის 40 ნიმუშს, რომლებიც წარმოადგენდა ფორმალინში ფიქსირებულ და პარაფინში ჩაყალიბებულ ბლოკებს. შემთხვევები შეირჩა ქსოვილის ადეკვატურობისა და როგორც ჰისტოლოგიური, ასევე იმუნოჰისტოქიმიური მასალის ხელმისაწვდომობის საფუძველზე. ჰემატოქსილინ-ეოზინით შეღებილი ანათლები განხილული იქნა დამოუკიდებლად ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლების შესაფასებლად, მათ შორის სტრომული შეშუპება, სტრომული უჯრედულობა, ფიბრობლასტური ცვლილება, ლიმფოპლაზმაციტური ინფილტრატი, პერიგლანდულარული ანთება, დიფუზური ანთება, სისხლძარღვოვანი შეგუბება, სისხლდენა, ზედაპირული ეპითელიუმის ცვლილებები, ჯირკვლოვანი დარღვევები, სტრომული ფიბროზი, კაპილარული პროლიფერაცია და მიკროპოლიპების არსებობა.

იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზი ჩატარდა CD138-ისა და MUM1-ის საწინააღმდეგო ანტისხეულების გამოყენებით. თითოეული შემთხვევისთვის, პლაზმური უჯრედების ინფილტრაცია შეფასდა “ცხელი წერტილების” რაოდენობის განსაზღვრით, რომელიც განისაზღვრება, როგორც დადებითი უჯრედების მაქსიმალური რაოდენობა ყველაზე მჭიდროდ ინფილტრირებული უბნებში და საშუალო რაოდენობა, გამოთვლილი წარმომადგენლობითი მაღალი გადიდების მხედველობის ველებიდან. ასევე დაფიქსირდა ნახევრად რაოდენობრივი შეფასება. სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა აღწერითი სტატისტიკის გამოყენებით და ჰისტომორფოლოგიურ მახასიათებლებსა და პლაზმური უჯრედების დატვირთვას შორის კორელაცია შეფასდა სპერმანის რანგული კორელაციის კოეფიციენტის გამოყენებით. CD138 და MUM1 ნახევრად რაოდენობრივ ქულებს შორის შესაბამისობა შეფასდა კაპას სტატისტიკის გამოყენებით. 0.05-ზე ნაკლები p-მნიშვნელობა სტატისტიკურად სარწმუნოდ ჩაითვა.

კვლევის შედეგები

კვლევის ფარგლებში გაანალიზდა ენდომეტრიუმის კიურეტაჟის სულ 40 ნიმუში. პაციენტების საშუალო ასაკი იყო 38.95 ± 8.64 წელი, საშუალო ასაკი 40.5 წელი. პაციენტების უმეტესობა რეპროდუქციული ასაკის იყო, რაც შემთხვევათა 60.0%-ს შეადგენდა. კლინიკური და დემოგრაფიული მახასიათებლები შეჯამებულია ცხრილში 1-ში.

კლინიკური პარამეტრი რაოდენობრივი მნიშვნელობა

შემთხვევების რაოდენობა	40
ასაკი (საშუალო $\pm$ SD)	38.95 ± 8.64
ასაკი (მედიანა)	40.5
რეპროდუქციული ასაკი	24 (60.0%)
პერიმენოპაუზა	16 (40.0%)

ცხრილი 1. კლინიკური და დემოგრაფიული მახასიათებლები;

ჰისტომორფოლოგიურმა შეფასებამ აჩვენა, რომ სტრომული შეშუპება, სტრომული უჯრედულობის მომატება და ზედაპირული ეპითელიუმის ცვლილებები ყველაზე ხშირად დაფიქსირებული ჰისტოპათოლოგიური ცვლილებები იყო, კერძოდ თითოეული შემთხვევათა 80.0%-ში. ნიმუშების 60.0%-ში გამოვლინდა ჯირკვლების გარშემო ანთება, დიფუზური ანთება და სისხლდენა. შემთხვევათა 40.0%-ში დაფიქსირდა ფიბრობლასტური ცვლილებები, სტრომული ფიბროზი და კაპილარული პროლიფერაცია, ხოლო 20.0%-ში - სისხლძარღვთა შეგუბება, ჯირკვლების არარეგულარულობა და მიკროპოლიპები (ცხრილი 2).

ჰისტოპათოლოგიური მახასიათებელი შემთხვევები (n) პროცენტი (%)

სტრომის შეშუპება	32	80.0
სტრომის უჯრედულობის ზრდა	32	80.0
ზედაპირული ეპითელიუმის ცვლილებები	32	80.0
პერიგლანდულარული ანთება	24	60.0
დიფუზური ანთება	24	60.0
ჰემორაგია	24	60.0
ფიბრობლასტური ცვლილება	16	40.0
სტრომის ფიბროზი	16	40.0
კაპილარების პროლიფერაცია	16	40.0
ვასკულარული შეგუბება	8	20.0
ჯირკვლების არარეგულარულობა	8	20.0
მიკროპოლიპები	8	20.0

ცხრილი 2. ჰისტომორფოლოგიური ნიშნების განაწილება საკვლევ კოჰორტაში;

იმუნოჰისტოქიმიურმა ანალიზმა აჩვენა CD138 დადებითობა ყველა შემთხვევაში, “ცხელი წერტილების” საშუალო რაოდენობით 26.65 ± 11.19 უჯრედი 10 მაღალი გადიდების მხედველობის ველში და საშუალო რაოდენობით 24.70 ± 8.76 უჯრედი. MUM1 ასევე დადებითი იყო ყველა შემთხვევაში, “ცხელი წერტილების” საშუალო რაოდენობით 14.20 ± 6.17 უჯრედი და საშუალო რაოდენობით 13.30 ± 6.31 უჯრედი (ცხრილი 3).

მარკერი	პარამეტრი	საშუალო $\pm$ SD
CD138	ჰოტსპოტის რაოდენობა (უჯრედები/10 HPF)	26.65 ± 11.19
CD138	საშუალო რაოდენობა (უჯრედები/10 HPF)	24.70 ± 8.76
MUM1	ჰოტსპოტის რაოდენობა (უჯრედები/10 HPF)	14.20 ± 6.17
MUM1	საშუალო რაოდენობა (უჯრედები/10 HPF)	13.30 ± 6.31

ცხრილი 3. კვლევის ფარგლებში განხორციელებული იმუნოჰისტოქიმიური მონაცემები;

კორელაციურმა ანალიზმა აჩვენა ძლიერი დადებითი კავშირი CD138-სა და MUM1 პლაზმური უჯრედების დატვირთვის შორის (ცხრილი 4). CD138-ის საშუალო რაოდენობა კორელაციაში იყო MUM1-ის საშუალო რაოდენობასთან ($\rho = 0.787$, $p < 0.001$) და ცხელი წერტილების რაოდენობამაც აჩვენა მნიშვნელოვანი კორელაცია ($\rho = 0.679$, $p < 0.001$).

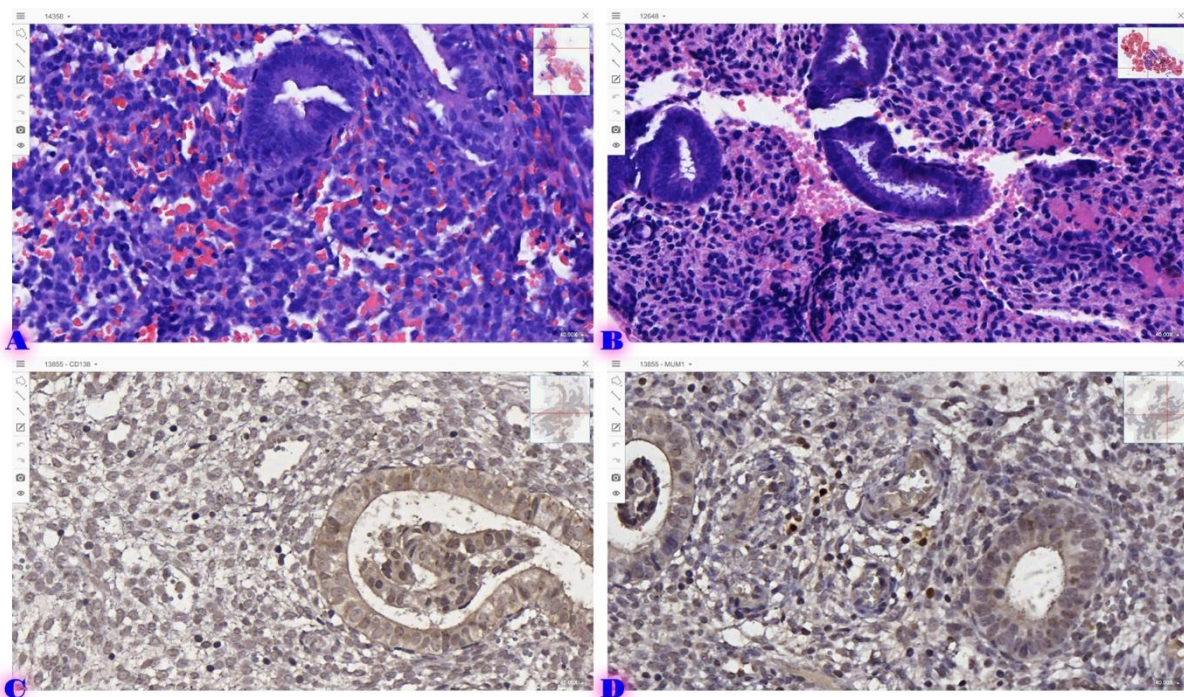
შედარება	Spearman ρ	p-მნიშვნელობა
CD138 საშუალო vs MUM1 საშუალო	0.787	<0.001
CD138 ჰოტსპოტი vs MUM1 ჰოტსპოტი	0.679	<0.001

ცხრილი 4. კორელაცია პლაზმური უჯრედების მარკერებს შორის;

ლიმფოპლაზმაციტურ ინფილტრატს ყველაზე ძლიერი კავშირი ჰქონდა პლაზმური უჯრედების დატვირთვისასთან, რაც მნიშვნელოვნად კორელაციაში იყო როგორც CD138-ის, ასევე MUM1-ის რაოდენობასთან. პერიგლანდულარული ანთება და დიფუზური ანთება ასევე მნიშვნელოვნად იყო დაკავშირებული CD138-ის რაოდენობის ზრდასთან. ამის საპირისპიროდ, სტრომულმა შეშუპებამ სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი კორელაცია არ აჩვენა. CD138-ისა და MUM1-ის ნახევრად რაოდენობრივ ქულებს შორის შესაბამისობა ზომიერი იყო, კაპას მნიშვნელობით 0.571 (ცხრილი 5).

მახასიათებელი	CD138 საშუალო (ρ)	MUM1 საშუალო (ρ)	p- მნიშვნელობა
ლიმფოპლაზმაციტური ინფილტრატი	0.866	0.884	<0.001
პერიგლანდულარული ანთება	0.722	—	<0.001
დიფუზური ანთება	0.722	—	<0.001
სტრომის შემუპება	0.177	—	0.275
მიკროპოლიპები	არ იყო სტატისტიკურად სარწმუნო	—	>0.05

ცხრილი 5. ჰისტომორფოლოგიური ნიშნებისა და პლაზმური უჯრედების კავშირის ანალიზი;



სურათი 1. სურათზე ნაჩვენებია: A. ქრონიკული ენდომეტრიტის შემთხვევა H&E, 400X გამოხატული ჭარბი რაოდენობით ანთებითი ინფილტრაციით პერიგლანდულურ სტრომაში; B. ქრონიკული ენდომეტრიტის შემთხვევა H&E, 400X გამოხატული მცირე რაოდენობით ანთებითი ინფილტრაციით პერიგლანდულურ სტრომაში; C. ქრონიკული ენდომეტრიტის შემთხვევა CD138 ანტისხეულის ექსპრესია პერიგლანდულურ სტრომაში „ცხელი წერტილი“ 400X, IHC; D. ქრონიკული ენდომეტრიტის შემთხვევა MUM1 ანტისხეულის ექსპრესია პერიგლანდულურ სტრომაში „ცხელი წერტილი“ 400X, IHC;

კვლევის შედეგების განსჯა

ამ კვლევის შედეგები აჩვენებს, რომ ქრონიკული ენდომეტრიტის სპეციფიკური ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლები მჭიდრო კავშირშია პლაზმური უჯრედების დატვირთვასთან, როგორც ეს შეფასებულია CD138-ისა და MUM1-ის იმუნოჰისტოქიმიით. ამ მახასიათებლებს შორის, ლიმფოპლაზმაციტურმა ინფილტრატმა აჩვენა ყველაზე ძლიერი კორელაცია, რაც ადასტურებს მის როლს, როგორც ქრონიკული ენდომეტრიტის ყველაზე საიმედო ჰისტოლოგიური ინდიკატორის. ეს დაკვირვება შეესაბამება წინა კვლევის შედეგებს, რომლებიც ხაზს უსვამენ პლაზმური უჯრედებით მდიდარი ანთებითი ინფილტრატების მნიშვნელობას ცერებროვასკულური დაავადების დიაგნოზში.¹⁰⁻¹⁵

პერიგლანდულარული და დიფუზური ანთებითი ნიმუშები ასევე მნიშვნელოვნად იყო დაკავშირებული პლაზმური უჯრედების დატვირთვის მატებასთან, რაც მიუთითებს, რომ ჯირკვლევთან ასოცირებული ანთება წარმოადგენს დაავადების პროცესის მნიშვნელოვან კომპონენტს.¹²⁻¹⁴ მსგავსი დასკვნები აღწერილია ადრეულ კვლევებში, რომლებმაც ხაზი გაუსვეს პერიგლანდულარული ანთებითი რეაქციების მნიშვნელობას ენდომეტრიუმის პათოლოგიაში.^{3,6} ამის საპირისპიროდ, სტრომული შეშუპება, თუმცა ხშირად შეინიშნებოდა, არ ავლენდა მნიშვნელოვან კორელაციას პლაზმური უჯრედების დატვირთვასთან, რაც მიუთითებს მის შეზღუდულ სპეციფიკურობაზე, როგორც დიაგნოსტიკურ მახასიათებელზე.

CD138-სა და MUM1-ს შორის ძლიერი კორელაცია ადასტურებს ორმაგი მარკერის შეფასების გამოყენებას პლაზმური უჯრედების ინფილტრაციის შეფასებისას. მიუხედავად იმისა, რომ CD138 პლაზმური უჯრედების ყველაზე ფართოდ გამოყენებად მარკერად რჩება, MUM1 შემოთავაზებულია, როგორც ალტერნატიული ან დამატებითი მარკერები, რომლებსაც გარკვეულ კონტექსტებში პოტენციური უპირატესობები აქვთ. ამ კვლევაში ნახევრად რაოდენობრივ შეფასებას შორის დაფიქსირებული ზომიერი თანხვედრა მიუთითებს, რომ ორივე მარკერი ასახავს საერთო ბიოლოგიურ პროცესს, თუმცა ისინი შეიძლება განსხვავდებოდნენ მგრძნობელობის ან შედეგის მახასიათებლებით.

საკონტროლო ჯგუფის არარსებობა და CE-უარყოფით შემთხვევებად ფორმალური კლასიფიკაციის არარსებობა წარმოადგენს ამ კვლევის შეზღუდვებს. შესაბამისად, დასკვნები უნდა იქნას განმარტებული, როგორც აღწერითი და ჰიპოთეზური. პლაზმური უჯრედების დატვირთვის კლინიკურად მნიშვნელოვანი ზღურბლების დასადგენად და ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლების დიაგნოსტიკური ღირებულების შემდგომი გარკვევისთვის საჭიროა უფრო ფართომასშტაბიანი კვლევები, მათ შორის საკონტროლო ჯგუფები და სტანდარტიზებული დიაგნოსტიკური კრიტერიუმები.

დასკვნა

ქრონიკულ ენდომეტრიტს ახასიათებს ძირითადი ჰისტომორფოლოგიური მახასიათებლებისა და პლაზმური უჯრედების დატვირთვის შორის რეპროდუცირებადი

კავშირი. ლიმფოპლაზმაციტური ინფილტრატი და ჯირკვლებთან ასოცირებული ანთება იმუნოჰისტოქიმიურ მონაცემებთან ყველაზე ძლიერ კორელაციას იმუნოჰისტოქიმიურ მონაცემებთან ავლენს. CD138-ისა და MUM1-ის გამოყენებით კომბინირებული შეფასება პლაზმური უჯრედების ინფილტრაციის თანმიმდევრულ და სანდო შეფასებას უზრუნველყოფს. ეს შედეგები ადასტურებს ჰისტომორფოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზის ინტეგრაციას ქრონიკული ენდომეტრიტის რუტინულ დიაგნოსტიკურ შეფასებაში და ქმნის საფუძველს დიაგნოსტიკური კრიტერიუმების დახვეწისკენ მიმართული სამომავლო კვლევებისთვის.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Kitaya K, Yasuo T. Immunohistochemical and Clinicopathological Characterization of Chronic Endometritis. *American Journal of Reproductive Immunology* [homepage on the Internet] 2011 [cited 2026 Apr 20]; 66(5):410–415. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0897.2011.01051.x>
2. Kitaya K, Takeuchi T, Mizuta S, Matsubayashi H, Ishikawa T. Endometritis: new time, new concepts. *Fertil Steril* 2018; 110(3):344–350.
3. Miguel RDV, Chivukula M, Krishnamurti U, et al. Limitations of the criteria used to diagnose histologic endometritis in epidemiologic pelvic inflammatory disease research. *Pathol Res Pract* 2011; 207(11):680–685.
4. Kitaya K, Yasuo T, Yamaguchi T. Bridging the Diagnostic Gap between Histopathologic and Hysteroscopic Chronic Endometritis with Deep Learning Models. *Medicina (B Aires)* [homepage on the Internet] 2024 [cited 2026 Apr 20]; 60(6):972. Available from: <https://www.mdpi.com/1648-9144/60/6/972>
5. Kitaya K, Yasuo T, Yamaguchi T. Bridging the Diagnostic Gap between Histopathologic and Hysteroscopic Chronic Endometritis with Deep Learning Models. *Medicina (Lithuania)* 2024; 60(6).
6. Miguel RDV, Chivukula M, Krishnamurti U, et al. Limitations of the criteria used to diagnose histologic endometritis in epidemiologic pelvic inflammatory disease research. *Pathol Res Pract* [homepage on the Internet] 2011 [cited 2026 Apr 20]; 207(11):680–685. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0344033811002044>
7. Li Y, Xu S, Yu S, et al. Diagnosis of chronic endometritis: How many CD138+ cells/HPF in endometrial stroma affect pregnancy outcome of infertile women? *American Journal of Reproductive Immunology* 2021; 85(5).
8. Dang J, Xiao X, Li M. Correlation of hysteroscopic findings of chronic endometritis with CD138 immunohistochemistry and their correlation with pregnancy outcomes. *J Assist Reprod Genet* [homepage on the Internet] 2024 [cited 2026 Apr 20]; 41(9):2477–2483. Available from: <https://link.springer.com/10.1007/s10815-024-03204-8>

9. Dang J, Xiao X, Li M. Correlation of hysteroscopic findings of chronic endometritis with CD138 immunohistochemistry and their correlation with pregnancy outcomes. *J Assist Reprod Genet* 2024; 41(9):2477–2483.
10. Falini B, Fizzotti M, Pucciarini A, et al. A monoclonal antibody (MUM1p) detects expression of the MUM1/IRF4 protein in a subset of germinal center B cells, plasma cells, and activated T cells. *Blood* 2000; 95(6):2084–2092.
11. Falini B, Fizzotti M, Pucciarini A, et al. A monoclonal antibody (MUM1p) detects expression of the MUM1/IRF4 protein in a subset of germinal center B cells, plasma cells, and activated T cells. *Blood* [homepage on the Internet] 2000 [cited 2026 Apr 20]; 95(6):2084–2092. Available from: <https://ashpublications.org/blood/article/95/6/2084/139568/A-monoclonal-antibody-MUM1p-detects-expression-of>
12. Bayer-Garner IB, Korourian S. Plasma cells in chronic endometritis are easily identified when stained with syndecan-1. *Modern Pathology* 2001; 14(9):877–879.
13. Bayer-Garner IB, Korourian S. Plasma Cells in Chronic Endometritis are Easily Identified When Stained with Syndecan-1. *Modern Pathology* [homepage on the Internet] 2001 [cited 2026 Apr 20]; 14(9):877–879. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0893395222037061>
14. Crum CP, Egawa K, Fenoglio CM, Richart RM. Chronic endometritis: The role of immunohistochemistry in the detection of plasma cells. *Am J Obstet Gynecol* 1983; 147(7):812–815.
15. Crum CP, Egawa K, Fenoglio CM, Richart RM. Chronic endometritis: The role of immunohistochemistry in the detection of plasma cells. *Am J Obstet Gynecol* [homepage on the Internet] 1983 [cited 2026 Apr 20]; 147(7):812–815. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0002937883900455>

Chronic Endometritis: Histomorphologic Features and Plasma Cell Marker

Correlation in Endometrial Curettage Specimens

Oliko Murghulia - PhD student at Tbilisi State Medical University; Doctor; Reproductive specialist;
Giorgi Tevdorashvili - Professor of the Department of Obstetrics and Gynaecology, Tbilisi State Medical University;

Nino Museridze - Head of the Pathological Anatomy Department of the Tbilisi Medical Academy;
Professor; Pathomorphologist, Embryologist;

Giorgi Burkadze - Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University;
Professor;

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Doctor, Pathologist;

Abstract

Chronic endometritis is a subtle inflammatory disorder of the endometrium characterized by stromal plasma-cell infiltration, the recognition of which remains challenging in routine histopathologic evaluation. The present study aimed to evaluate the histomorphologic features of chronic endometritis in endometrial curettage specimens and to assess their correlation with plasma-cell burden using CD138 and MUM1 immunohistochemistry. A retrospective analysis was performed on 40 endometrial curettage specimens. Histomorphologic features were assessed on hematoxylin-eosin sections, and plasma-cell infiltration was quantified using hotspot and average counts per 10 high-power fields for both CD138 and MUM1. Statistical analysis was performed using descriptive methods and Spearman correlation. The mean age of the cohort was 38.95 ± 8.64 years. Stromal edema, increased stromal cellularity, and surface epithelial changes were each present in 80.0% of cases, while periglandular inflammation, diffuse inflammation, and hemorrhage were observed in 60.0% of cases. All specimens demonstrated positivity for both CD138 and MUM1, with variable plasma-cell burden. A strong correlation was observed between CD138 and MUM1 average counts ($\rho = 0.787$, $p < 0.001$). Lymphoplasmacytic infiltrate showed the strongest association with plasma-cell burden (CD138: $\rho = 0.866$; MUM1: $\rho = 0.884$; $p < 0.001$). Periglandular and diffuse inflammation were also significantly associated with increased plasma-cell counts, whereas stromal edema did not demonstrate a significant correlation. These findings indicate that specific histomorphologic features, particularly lymphoplasmacytic infiltrate and gland-associated inflammation, are closely related to plasma-cell burden. Combined assessment using CD138 and MUM1 provides a consistent evaluation of plasma-cell infiltration and supports their complementary role in the diagnostic assessment of chronic endometritis.

Keywords: chronic endometritis; CD138; MUM1; plasma cells; endometrial curettage; histomorphology; immunohistochemistry

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ოლიკო მურგულია - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; რეპროდუქტოლოგი;

Oliko Murgulia - PhD student at Tbilisi State Medical University; Doctor; Reproductive specialist;
oliko_murgulia@yahoo.com

გიორგი თევდორაშვილი - თსუ მეანობა და გინეკოლოგიის დეპარტამენტის პროფესორი;

Giorgi Tevdorashvili - Professor of the Department of Obstetrics and Gynecology, Tbilisi State Medical University;
g.tevdorashvili@tsmu.edu

ნინო მუსერიძე - თბილისის სამედიცინო აკადემიის პათოლოგიური ანატომიის მიმართულების ხელმძღვანელი; პროფესორი; პათომორფოლოგი, ემბრიოლოგი;

Nino Museridze - Head of the Pathological Anatomy Department of the Tbilisi Medical Academy; Professor; Pathomorphologist, Embryologist;
n_museridze@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-4526-2505>

გიორგი ბურკაძე - თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი;

Giorgi Burkadze - Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Professor;

<https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

burkadze@yahoo.com

შოთა კეპულაძე - თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Doctor of Pathology;

Shota.kepuladze@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

Cold Hemolysis as the Initial Presentation of B-Cell Acute Lymphoblastic Leukemia: A Case Report

Marina Kuparadze^{1,2}, Giorgi Imedashvili^{1,3}, Nia Tarkhnishvili³, Nino Gegeshidze^{1,4},
Khatuna Chaava^{1,5}, Giorgi Zhorzholiani¹, Tamila Silagadze¹, Mariam Guledani¹,
Thakur Rishmita⁶.

¹Tbilisi State Medical University, Tbilisi, Georgia; ²Cardiology Clinic "Guli", Tbilisi, Georgia;
³High Technology Medical Center, University Clinic, Tbilisi, Georgia; ⁴Emergency Neurology
Clinic – Neurologist, Tbilisi, Georgia; ⁵Clinic "Redi", Tbilisi, Georgia; ⁶Teaching University
Geomedi

ABSTRACT

Objectives

Cold hemolysis is a rare but potentially life-threatening condition that may occur as an early manifestation of hematologic malignancies. Prompt recognition is crucial, especially in patients presenting with severe anemia and neurological symptoms, as delayed diagnosis may worsen outcomes.

Methods

A 39-year-old Lebanese woman was admitted to the emergency department in critical condition with severe generalized weakness, fatigue, marked loss of strength, and anosmia. Laboratory evaluation showed leukocytosis with lymphocytosis and monocytosis, elevated lactate dehydrogenase, and increased indirect bilirubin. Coagulation studies revealed mild hyperfibrinogenemia and hypoprothrombinemia. Abdominal ultrasonography demonstrated no organomegaly or lymphadenopathy but identified a 70-mm hemorrhagic cyst of the right ovary. Peripheral blood smear showed critical pancytopenia with a left shift toward blast cells (~10%). Bone marrow aspiration with cytological and flow cytometric analysis in October 2024 confirmed precursor B-cell acute lymphoblastic leukemia (B-ALL). Hemoglobin was critically low (1.88 g/dL). A bedside temperature-dependent test confirmed cold hemolysis.

Results

The patient was transferred to the intensive care unit and received warmed intravenous fluids and blood component transfusions, resulting in stabilization. She was then transferred to the Onco-Hematology Department. Due to the life-threatening presentation, protocol-based chemotherapy with Hyper-CVAD Part A and B was initiated. She required eight hospitalizations. Hematologic remission was achieved, and at discharge her condition was stable with improved blood counts (hemoglobin 9.96 g/dL). Outpatient therapy was recommended.

Conclusion

Cold hemolysis may represent a rare but severe initial manifestation of precursor B-cell acute lymphoblastic leukemia. Early recognition and prompt intensive management are essential for patient survival and improved prognosis.

Keywords:

Cold hemolysis; Acute lymphoblastic leukemia; B-cell acute lymphoblastic leukemia; Severe anemia; Intensive care unit; Hyper-CVAD chemotherapy; Blood transfusion.

Introduction

Cold hemolysis is a rare but potentially life-threatening immunohematologic condition caused by the lysis of red blood cells upon exposure to low temperatures. It is most commonly associated with cold agglutinin disease, infectious processes, or lymphoproliferative disorders; however, its occurrence during the initial stages of acute hematologic malignancies has rarely been reported. [1,2]

Acute lymphoblastic leukemia (ALL) is a hematologic malignancy characterized by uncontrolled proliferation of lymphoid progenitor cells in the bone marrow. It often presents with anemia, thrombocytopenia, and an increased risk of infectious complications. Although hemolytic anemia may accompany lymphoproliferative disorders, cold hemolysis as the initial clinical manifestation of ALL is extremely rare. [3,4]

The clinical significance of cold hemolysis lies in its rapid progression, severe anemia, and potential neurological complications, which may necessitate intensive care management. Timely diagnosis and temperature-adapted blood component therapy are essential for patient survival and for the safe initiation of disease-specific treatment. [1,2,5]

The present case describes a 39-year-old woman admitted to the emergency department in severe clinical condition, presenting with generalized weakness, decreased strength, and neurological dysfunction. Initial clinical and laboratory findings indicated severe anemia. Timely diagnostic

evaluation, including peripheral blood examination and bone marrow studies, confirmed precursor B-cell acute lymphoblastic leukemia. Appropriate blood transfusion therapy followed by protocol-based chemotherapy resulted in clinical stabilization. Hematologic remission was achieved through stepwise treatment, underscoring the critical importance of early diagnosis and rapid, coordinated management in the successful treatment of such severe clinical presentations. [3,6]

Case Description

The patient was brought to the Emergency Department by the Emergency Medical Service. According to the emergency team, on the morning of admission the patient gradually developed pronounced pallor of the skin, accompanied by adynamia and generalized weakness. The intensity of symptoms progressively increased, prompting hospitalization. A detailed medical history could not be obtained due to the language barrier and the severity of the patient's general condition.

Upon arrival, the patient was admitted to the Emergency Department and placed under continuous cardiac monitoring. Initial vital signs were as follows: heart rate (HR) 88 beats/min, blood pressure (BP) 90/60 mmHg, body temperature 36.3°C, respiratory rate (RR) 21 breaths/min, and oxygen saturation (SpO₂) 92%. Neurological examination revealed spontaneous eye opening with round and equal pupils. Intermittent clinical signs of encephalopathy were observed; however, no pathological reflexes were elicited.

Cardiac examination demonstrated regular rhythm with clear heart sounds. Pulmonary auscultation revealed vesicular breath sounds bilaterally with symmetric air entry. The tongue was dry and non-tender, and swallowing was intact. Abdominal examination showed a soft, non-tender abdomen, with audible bowel sounds on auscultation; the liver and spleen were not palpably enlarged.

A nasogastric tube was inserted, and gastric lavage was performed. Peripheral venous access was established, and blood samples were collected for laboratory analysis. An electrocardiogram demonstrated sinus rhythm without acute ischemic changes. Digital rectal examination revealed no evidence of melena. Intravenous infusion therapy was initiated, and the patient remained under close monitoring and observation.

Analysis of arterial blood gases and electrolytes indicated metabolic acidosis. In order to correct homeostasis, sodium bicarbonate infusion was started. Coagulation tests revealed hyperfibrinogenemia and hypoprothrombinemia. (The results of the coagulation screening tests are shown in Table 2).

Statistical Analysis

No statistical analysis was performed in this single patient case report. Descriptive data presentation was carried out without the use of statistical software.

Results

On admission, laboratory investigations revealed critical anemia and cytopenia (Complete blood count results are summarized in Table 1).

Table 1.

Test	Value	Units	Reference Range
WBC	13.60	$10^9/L$	4.49- 12.69
RBC	0.86	$10^{12}/L$	3.92 – 5.08
HGB	1.88	g/dl	11.90 – 14.60
HCT	5.70	%	36.60 – 44.00
MCV	66.80	fl	82.90 – 98.00
MCH	21.90	pg	27.00 – 32.30
MCHC	33.00	g/dl	31.80 – 34.70
SD	48.20	fl	38.20 – 49.20
CV	31.00	%	12.10 – 14.30
PLT	101.10	$10^9/L$	173.00 – 390.00
PCT	0.12	$10^{-2} L/L$	0.18 – 0.39
MPV	11.59	fl	9.10 – 11.90
PDW	15.20	fl	9.90 – 15.40
P-LCR	25.10	%	17.50 – 42.30
NEUT	43.46	%	42.90 – 74.30
NEUT	5.91	$10^9/L$	2.10 – 8.89
LYMPH	31.94	%	18.30 – 45.70
LYMPH	4.34	$10^9/L$	1.26 – 3.35
MONO	20.88	%	4.20 – 11.80

MONO	2.84	10 ⁹ /L	0.25 – 0.84
EO	2.78	%	0.20 – 5.30
EO	0.38	10 ⁹ /L	0.01 – 0.40
BASO	0.94	%	0.10 – 1.00
BASO	0.13	10 ⁹ /L	0.01 – 0.07
IG	–	%	≤ 0.60
IG	–	10 ⁹ /L	≤ 0.06

Table 1: Laboratory findings from the complete blood count

WBC – White Blood Cell Count, RBC – Red Blood Cell Count, HGB – Hemoglobin, HCT – Hematocrit, MCV – Mean Corpuscular Volume, MCH – Mean Corpuscular Hemoglobin, MCHC – Mean Corpuscular Hemoglobin Concentration, SD – Red Cell Distribution Width – Standard Deviation (RDW-SD), CV – Red Cell Distribution Width – Coefficient of Variation (RDW-CV), PLT – Platelet Count, PCT – Plateletcrit, MPV – Mean Platelet Volume, PDW – Platelet Distribution Width, P-LCR – Platelet Large Cell Ratio, NEUT – Neutrophils, NEUT – Neutrophils, LYMPH – Lymphocytes, LYMPH – Lymphocytes, MONO – Monocytes, MONO – Monocytes, EO – Eosinophils, EO – Eosinophils, BASO – Basophils, BASO – Basophils, IG – Immature Granulocytes, IG – Immature Granulocytes.

Analysis of arterial blood gases and electrolytes indicated metabolic acidosis. In order to correct homeostasis, sodium bicarbonate infusion was started. Coagulation tests revealed hyperfibrinogenemia and hypoprothrombinemia. (The results of the coagulation screening tests are shown in Table 2).

Table 2.

Parameter	Value	Unit	Reference Range
PT	18.40	sec	9.10 – 12.10
PT %	48.21	%	70.00 – 140.00
INR	1.61	–	0.90 – 1.20
APTT	27.80	sec	24.30 – 36.90
TT	15.60	sec	13.00 – 21.00
Fibrinogen	4.08	g/L	2.00 – 4.00

Table 2: Coagulation Hemostasis Laboratory Findings

PT – Prothrombin Time, PT % – Prothrombin Time Percentage, INR – International Normalized Ratio, APTT – Activated Partial Thromboplastin Time, TT – Thrombin Time, Fibrinogen – Fibrinogen.

Marked elevation of lactate dehydrogenase (LDH ↑ 1291.00 U/L), together with increased direct bilirubin levels (D.BIL ↑ 13.70 μmol/L), supported the suspicion of an active hemolytic process.

To confirm cold hemolysis, a bedside diagnostic test was performed. A small amount of freshly collected venous blood was applied to two sterile test tubes: one pre-cooled and the other maintained in a warm environment. Immediate and rapid hemolysis was observed upon contact with the cold test tube, whereas no hemolysis occurred in the warm tube. These findings were consistent with the diagnostic criteria for cold hemolysis.

Warmed 0.9% sodium chloride infusion was initiated immediately, resulting in partial improvement of the patient's neurological status. Following consultation with a hematologist, transfusion of ABO- and Rh-compatible packed red blood cells and fresh frozen plasma was performed in combination with low-molecular-weight heparin. Metabolic acidosis was corrected. Follow-up laboratory analysis revealed leukopenia (WBC $1.80 \times 10^9/L$), while erythrocyte and hemoglobin levels showed partial improvement (RBC $2.26 \times 10^{12}/L$, HGB 5.80 g/dL).

Abdominal and pleural ultrasonography revealed no significant pathological findings. Gynecological ultrasound demonstrated a 70-mm hemorrhagic cyst of the right ovary with reduced vascularization, without evidence of active bleeding.

The patient's general condition remained severe, prompting transfer to the general intensive care unit for continued treatment. In the ICU, the patient was conscious and responsive, although she intermittently answered questions inappropriately. Breathing was spontaneous, with oxygen saturation reaching 98% on supplemental oxygen. Hemodynamic parameters remained stable. Intensive treatment, continuous monitoring, and correction of metabolic disturbances were continued.

Subsequently, blast cells were detected on peripheral blood smear, raising suspicion of acute leukemia. On the recommendation of a hematologist, bone marrow aspiration was planned. At this stage, the patient's condition was assessed as severe but stable, without signs of clinical deterioration, and she was transferred to the oncology and hematology unit for further diagnostic evaluation and treatment.

Treatment was continued in the hematology department. To accurately verify the diagnosis, cytological examination of the peripheral blood smear was performed, revealing critical pancytopenia and a left shift of the leukocyte differential toward blast cells (~10%). Cytological analysis of the bone marrow aspirate demonstrated severe hypocellularity (Figure 1), with blast cells accounting for 8.5% and lymphocytes for 38% (The laboratory findings of bone marrow cytology are summarized in Table 3).

Table 3.

Cellular Elements	%				
	Before Chemo	Relapse	Remission	Final	Reference range
Blast cells	8.5%%	8.0%	1.0%	1.5%	0.5-1.5%
Myeloblast	-	-	-	-	0.5-1%
Neutrophil promyelocyte	-	2.0%	2.0%	2.5%	0.75-1.5%
Neutrophil myelocyte	0.75%	10.0%	15.0%	8.0%	8.5-13%
Neutrophil Metamyelocyte	33.0%	11.0%	14.0 %	10.0 %	11-14.5%
Sticky Neutrophil Segmental	5.0 %	13.0%	12.0%	13.0%	13-16%
Neutrophil Eosinophil Promyelocyte	27.25%	4.25%	14.25%	17.15%	17-27%
Eosinophil promyelocyte	-	-	-	-	-
Eosinophil Myelocyte	0.5%	-	1.0%	-	1.0%
Eosinophil metamyelocyte	1.0 %	-	-	-	0.25-0.5%
Eosinophil. Sticky Eosinophil	-	-	-	-	0.5-1.0%
Segment Nucleated Basophil.	0.5%	0.5%	1.0%	0.5%	1-2%
Segment Nucleated	1.25%	-	-	-	0-0.25%
Lymphoblast	-	-	-	-	-
Prolymphocyte	-	-	-	-	-
Lymphocyte	38.0%	12.0%	15.0%	11.0%	9-14.5%
Monocyte	14.5%	4.5%	2.0%	5.5%	0.5-2%
White blood mitosis	-	0.25%	0.25%	-	0.25%
Reticular cell	-	-	-	-	0-0.25%
Plasm cell	-	-	-	-	0-0.5%
Macrophage	-	-	-	-	0-0.25%
Basophil megaloblastic	-	-	-	-	-
polychromatophilic	-	-	-	-	-
Oxyphilic	-	-	-	-	-
proerythroblast	-	-	-	-	0-0.5%

Basophil macroblast	1.5%	2.0%	2.0%	1.5%	1.5-2%
Polychromatophilic	-	-	-	-	2-4%
Oxyphilic	3.75 %	-	-	-	0.5-2.75%
Basophil normoblast	1.5%	4.0%	3.5%	1.5%	1-1.5%
Polychromatophilic	0.75%	24.0%	15.0%	0.75%	1.5-4.5%
Oxyphilic	-	4.0%	4.0%	-	0.5-1%
Red blood cell mitosis polychromatophilic	-	0.5%	-	-	0-0.25%
Red blood cell mitosis oxyphilic	-	-	-	-	0-0.25%
megakaryocyte	-	-	-	-	0-0.25%
Osteoblast	-	-	-	-	-
Osteoclast	-	-	-	-	-
Comment	Severe hypocellularity	The bone marrow shows cellularity	Normocellular	Normocellular	-

Table 3: Comparison of Bone Marrow Cytological Findings at Diagnosis and After Completion of Treatment

Figure 1.

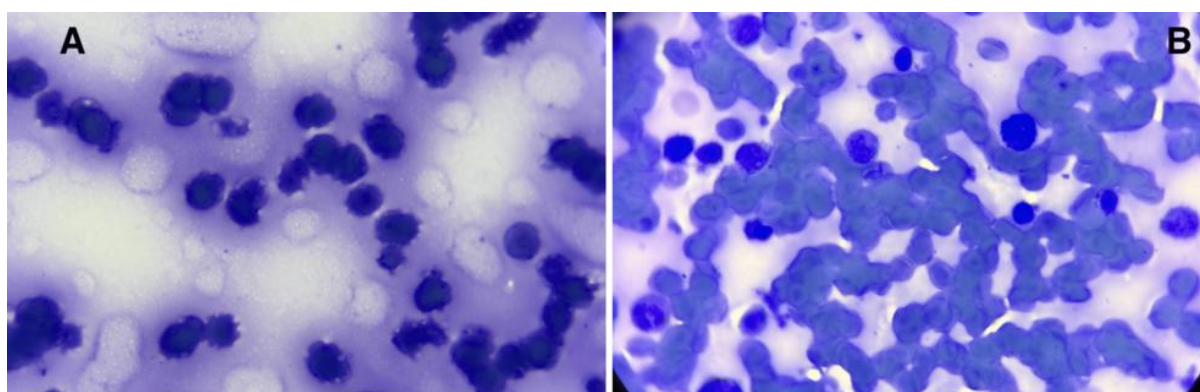


Figure 1: Comparative analysis of bone marrow cytology before chemotherapy and after completion of treatment.

Giemsa–Romanowsky–stained bone marrow smears. The image A, obtained prior to the initiation of chemotherapy, demonstrates severe hypocellularity. The image B shows a representative microscopic cytological view of the bone marrow after completion of treatment, revealing marked restoration with abundant cellular elements

Flow cytometric analysis was performed on bone marrow material using appropriate monoclonal antibodies on a flow cytometer. The study revealed an atypical cell population comprising approximately 48% of cells, characterized by moderate CD45 expression. A significant proportion of the analyzed cells consisted of CD19-positive B-lymphoblasts. Transient surface expression of CD66c (21%), CD20 (32%), and CD10 (48%) was observed on the blasts, along with strong expression of CD34 (95%) and CD38 (100%). Intracellular staining demonstrated cytoplasmic expression of CD79a in 69% of cells, while CyCD3, CyCD22, CyIgM, and myeloperoxidase (MPO) were not detected in the majority of cells. This immunophenotypic profile was consistent with the Common ALL subtype of precursor B-cell acute lymphoblastic leukemia.

Additional molecular genetic testing was performed to evaluate chromosomal aberrations associated with acute leukemias. The analysis did not confirm the presence of an RNA transcript of the chimeric gene characteristic of the t(9; 22)(q34; q11) chromosomal aberration in the examined material.

The patient continued to receive blood transfusions based on biological compatibility testing and appropriate premedication, while maintaining stable hemodynamic parameters. Considering the patient's age, degree of malignancy, and the results of clinical and laboratory investigations, inpatient chemotherapy was initiated on life-threatening indications in an urgent-delayed setting. Treatment was administered according to the following protocol: cyclophosphamide 200 mg; methotrexate (MTX) 15 mg, intrathecal; doxorubicin 50 mg; vincristine 2 mg; cytarabine 100 mg; filgrastim 48 MU; and mesna 400 mg.

Follow-up laboratory evaluation revealed profound leukopenia, with persistent anemia: white blood cell count (WBC) $1.87 \times 10^9/L$, hemoglobin (HGB) 8.19 g/dL, and hematocrit (HCT) 24.10%. Coagulation parameters showed improvement.

Taking into account the patient's somatic status, the extent of chemotherapy administered, and laboratory findings, continued inpatient treatment according to the international cytopenia protocol was deemed appropriate. Concurrent intrathecal chemotherapy was maintained.

In total, the patient underwent four courses of intrathecal chemotherapy. Several chemotherapy-related complications were observed during treatment. Following intrathecal therapy, the patient experienced common chemotherapy-related symptoms, including adynamia, generalized weakness, dizziness, fever, and bone pain. These symptoms were transient and managed with symptomatic therapy.

Cerebrospinal fluid samples obtained prior to each intrathecal chemotherapy session were sent for laboratory analysis. The patient remained under continuous observation, with regular monitoring of laboratory parameters and vital signs.

Over a six-month period from the initiation of treatment, the patient received protocol-based chemotherapy along with supportive symptomatic therapy. Despite periodic chemotherapy-related complications, the patient's overall clinical condition gradually and significantly improved. At present, the patient reports no complaints.

Based on the clinical outcome, the patient was provided with appropriate prescriptions and recommendations to continue treatment on an outpatient basis under the supervision of an onco-hematologist.

Prognosis: Long-term outcomes are difficult to assess due to the patient's underlying disease and comorbidities. At present, hematologic remission has been achieved, and no additional complications are observed.

Discussion

The presented clinical case describes cold hemolysis as a rare and life-threatening initial manifestation of B-cell acute lymphoblastic leukemia. Although hemolytic anemia is commonly described in lymphoproliferative disorders, cold hemolysis as the first clinical manifestation of acute leukemia is exceedingly rare and has been reported only in isolated cases. [1,2]

Cold hemolysis is an immune-mediated process associated with activation of cold agglutinins and intravascular destruction of erythrocytes through complement activation. This mechanism is most frequently observed in chronic lymphoproliferative disorders, infectious diseases, or primary cold agglutinin disease, whereas its occurrence at the initial stage of acute leukemia is rarely reported. In the present case, immune dysregulation associated with early leukemia development likely contributed to the formation of pathological cold agglutinins and rapid hemolysis. [1,2,7]

Clinically, the patient presented in a severe general condition with critical anemia and neurological symptoms related to profound anemia and metabolic acidosis. These features complicated the diagnostic process at the initial stage and required rapid clinical decision-making. In this context, bedside diagnostic testing proved particularly valuable, allowing timely recognition of cold hemolysis and initiation of appropriate thermoadapted infusion and transfusion therapy. [1,2,8]

Without prompt therapeutic intervention, cold hemolysis may progress rapidly and result in fatal outcomes, especially in patients with severe underlying hematologic disease. In this case, close

interdisciplinary collaboration between emergency medicine, intensive care, and hematology teams played a decisive role in patient survival. [1,2,5,9]

After confirmation of leukemia, the patient underwent protocol-based chemotherapy according to the Hyper-CVAD regimen. Despite treatment-related complications, hematologic remission was achieved. This outcome demonstrates that even in cases with an extremely severe initial presentation, favorable results may be obtained through timely diagnosis and an appropriately selected therapeutic strategy. [6,10,11]

This clinical case underscores the importance of considering acute hematologic malignancy in patients presenting with severe anemia and signs of hemolysis, even when the initial clinical presentation is atypical. Early recognition and appropriate management of cold hemolysis are essential for improving patient prognosis and enabling safe and effective treatment of the underlying malignancy. [5,6,12,13]

Conclusions

This clinical case illustrates the complexity and multifactorial nature of the initial presentation of acute hematological disease. The patient was admitted in a critical condition with severe anemia, metabolic disturbances, and neurological symptoms, necessitating rapid and coordinated management. Early recognition of cold hemolysis through clinical reasoning and a simple bedside diagnostic test was essential, allowing prompt initiation of temperature-adapted infusion and transfusion therapy and stabilization of the patient's condition. Subsequent laboratory and diagnostic investigations led to the timely diagnosis of acute leukemia.

The patient's management required intensive care, repeated hospitalizations, and disease-specific onco-hematological treatment. Despite complications related to chemotherapy and intrathecal therapy, hematological remission was achieved with continuous monitoring and supportive care. This case underscores the importance of considering underlying hematological malignancy in patients presenting with severe anemia and hemolysis, particularly when the clinical picture is atypical. Early diagnosis, interdisciplinary collaboration, and an appropriate therapeutic strategy are critical factors in achieving favorable clinical outcomes.

References

1. Berentsen S, Sundic T: Red blood cell destruction in autoimmune hemolytic anemia: Role of complement and potential new targets for therapy. *Biomed Res Int.* 2015;363278. 10.1155/2015/363278
2. Swiecicki PL, Hegerova LT, Gertz MA: Cold agglutinin disease. *Blood.* 2013, 122:1114-1121. 10.1182/blood-2013-02-474437

3. Barcellini W: New insights in autoimmune hemolytic anemia: From pathogenesis to therapy. *Int J Lab Hematol.* 2015, 37:14-22. 10.1111/ijlh.12349
4. Bain BJ: Diagnosis from the blood smear. *N Engl J Med.* 2005, 353:498-507. 10.1056/NEJMra043442
5. Berentsen S: How I manage patients with cold agglutinin disease. *Br J Haematol.* 2018, 181:320-330. 10.1111/bjh.15109
6. Terwilliger T, Abdul-Hay M: Acute lymphoblastic leukemia: A comprehensive review and 2017 update. *Blood Cancer J.* 2017, 7:577. 10.1038/bcj.2017.53
7. Barcellini W, Fattizzo B: Clinical applications of hemolytic markers in autoimmune hemolytic anemia. *Dis Markers.* 2015:635670. 10.1155/2015/635670
8. Bain BJ: *Blood Cells: A Practical Guide.* 2015.
9. McClure RF, Kaur P, Pagel E: Flow cytometric immunophenotyping in acute leukemia. *Clin Lab Med.* 2017, 37:753-769. 10.1016/j.cll.2017.07.006
10. Pui CH, Robison LL, Look AT: Acute lymphoblastic leukaemia. *Lancet.* 2008, 371:1030-1043. 10.1016/S0140-6736(08)60457-2
11. Kantarjian H, Thomas D, O'Brien S, et al.: Long-term follow-up of the Hyper-CVAD regimen in adult acute lymphoblastic leukemia. *Cancer.* 2004, 101:2788-2801. 10.1002/cncr.20668
12. Arber DA, Orazi A, Hasserjian R, et al.: The 2016 WHO classification of acute leukemias. *Blood.* 2016, 127:2391-2405. 10.1182/blood-2016-03-643544
13. Jabbour E, O'Brien S, Ravandi F, Kantarjian H: Monoclonal antibodies in acute lymphoblastic leukemia. *Blood.* 2015, 125:4010-4016. 10.1182/blood-2014-08-596403

Contact Information:

Giorgi Imedashvili - <https://orcid.org/0009-0008-7056-3796>

mob: 591 40 15 06

Email: gimedashvili7@gmail.com

ექსკავაციის სამუშაოების წარმოებისას სოციალური და ტექნიკური უსაფრთხოების გამოწვევების დაძლევის მეთოდები

ნანა რაზმაძე¹, ლუკა კახიძე², ნინო რატიანი³, ნუცა გუმბერიძე⁴, მზია კიტოშვილი⁵

¹საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის“ დეპარტამენტი, პროფესორი, n.razmadze@gtu.ge; ²საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის“ დეპარტამენტი, დოქტორანტი, Luka.kakhidze@gmail.com; ³საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის“ დეპარტამენტი, პროფესორი, n.ratiani@gtu.ge; ⁴საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „ფილოსოფიისა და საზოგადოებასთან ურთიერთობის“ დეპარტამენტი, ასოცირებული პროფესორი, nutsa.gumberidze@gmail.com; ⁵საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის“ დეპარტამენტი, ასოცირებული პროფესორი, m.qitoshvili@gtu.ge

რეზიუმე

ექსკავაციის (გათხრების) სამუშაოები სამშენებლო პროექტების აუცილებელი კომპონენტია, მაგრამ მათ თან ახლავს უსაფრთხოების თანდაყოლილი რისკები, რომლებიც ეფექტურად უნდა იქნას მართული. ეს სტატია განიხილავს გათხრების სამუშაოებში უსაფრთხოების როგორც სოციალურ, ასევე ტექნიკურ ასპექტებს, ფოკუსირებულია პოზიტიური სამუშაო გარემოს შექმნასა და აუცილებელი ტექნიკური უსაფრთხოების ზომების განხორციელებაზე. სოციალური ასპექტები მოიცავს მუშაკთა კეთილდღეობის უზრუნველყოფას, პასუხისმგებლობის გრძნობის გაღვივებას და გამჭვირვალე კომუნიკაციის, თანამშრომელთა კმაყოფილებისა და ფსიქოლოგიური მხარდაჭერის გზით ჩართულობის გაძლიერებას. ამავდროულად, ტექნიკური უსაფრთხოება მოიცავს რისკების შეფასებას, დამცავ სისტემებს, საფრთხეების მართვას და უსაფრთხოების პროტოკოლების გამოყენებას. სტატია ხაზს უსვამს ყოვლისმომცველი დაგეგმვის, დროული კომუნიკაციის, თანამშრომელთა ჩართულობის და უსაფრთხოების ზომების მკაცრი დაცვის მნიშვნელობას გათხრების ოპერაციებში უსაფრთხო და პროდუქტიული სამუშაო გარემოს უზრუნველსაყოფად.

საკვანძო სიტყვები: ექსკავაციის უსაფრთხოება; შრომის უსაფრთხოება; რისკების შეფასება; დამცავი სისტემები; თანამშრომელთა კეთილდღეობა; ორგანიზაციული კულტურა; საფრთხეების მართვა.

ექსკავაცია სამშენებლო პროექტების მნიშვნელოვანი კომპონენტია და მოიცავს ნიადაგის, ქანების ან სხვა მასალების ამოღებას მიწისმთხრელი მანქანებისა და მექანიზმების გამოყენებით. ექსკავაციის სამუშაოები ქმნის უამრავ საფრთხეს, მოითხოვს ზედმიწევნით დაგეგმვასა და უსაფრთხოების ზომების მიღებას ავარიების, დაზიანებებისა და სასიკვდილო ტრავმების თავიდან ასაცილებლად.

ქვეყნის განვითარების კვალდაკვალ საჭიროა დამსაქმებელმა გაითვალისწინოს, რომ დღეისათვის უმნიშვნელოვანესია მომუშავეთა არა მხოლოდ ტრავმატიზმისა და პროფესიული დაავადებებისაგან დაცვა, არამედ მათთვის ღირსეული სამუშაო პირობების შექმნა, რაც უპირველესად სოციალური უსაფრთხოების საკითხებს მოიცავს. თუ ადამიანი ცხოვრებაში დგება სოციალური რისკების პირისპირ - კარგავს სამსახურს, ავადობის გამო ვერ მუშაობს, არ აქვს სათანადო დაზღვევა, ხელფასი მის მიერ შესრულებული სამუშაოს არაადექვატურია, მუშაობს ზეგანაკვეთურად ანაზღაურების გარეშე, არ აქვს პროფესიული ზრდის შესაძლებლობა, ყველა ეს საკითხი არა მხოლოდ დასაქმებულის, არამედ მთლიანად საზოგადოების დაბალ სოციალურ კულტურაზე მიანიშნებს და სახელმწიფოს პრობლემაა როგორც მორალური, ასევე მატერიალური თვალსაზრისით. ასეთი გამოწვევის წინაშე დგანან ექსკავაციის სამუშაოებზე დასაქმებული პირებიც.

დღევანდელ დინამიურ ორგანიზაციულ ლანდშაფტში კომპანიები სულ უფრო მეტად აცნობიერებენ პოზიტიური სამუშაო გარემოს შექმნის მნიშვნელობას, საკუთარი თანამშრომლების კმაყოფილებისა და ჩართულობის მიღწევის და პროდუქტიულობის გაზრდის მიზნით. მიჩიგანის უნივერსიტეტის პროფესორები Cameron K.S და Quinn R.E. ერთობლივ წიგნში „ორგანიზაციული კულტურის დიაგნოსტიკა და შეცვლა: დაფუძნებული კონკურენტული ღირებულებების ჩარჩოზე“, გვთავაზობენ კონკურენტული ღირებულების ჩარჩოს (CVF) მიხედვით ორგანიზაციის კვლევას და შიდა ორგანიზაციული კულტურის, სტრატეგიული მიზნებისა და ღირებულებების საფუძველზე შესაბამისი საჭირო ცვლილებების განხორციელებას. CVF ერთ-ერთი ყველაზე პოპულარული აკადემიური თეორიაა დღესაც, რომელიც მარტივი მატრიცის გამოყენებით, ემპირიულად დადასტურებული გზით ორგანიზაციის ლიდერებს აძლევს შესაძლებლობას სწორად და ორგანიზაციული კულტურის შესაცვლელად შესაბამისი სტრატეგიები დაგეგმონ [1]. გლობალური ბიზნესის განვითარებასთან ერთად გაიზარდა თანამშრომელთა მიმართ ყურადღების გამახვილება, მათ კეთილდღეობაზე ზრუნვა, განვითარება, შენარჩუნება და ეფექტური სამუშაო გარემოს შექმნა, რაც პირდაპირ ახდენს გავლენას ორგანიზაციის წარმატებაზე. ადამიანური ძალის მნიშვნელობის გაცნობიერება დაიწყო მე-20 საუკუნის ბოლოს, როცა ორგანიზაციები გადავიდნენ იერარქიული

მიდგომიდან მეტად ადამიანზე ორიენტირებულ მოდელზე, რაც ორგანიზაციული კულტურის, თანამშრომელთა ჩართულობისა და კომუნიკაციის მნიშვნელობას უსვამდა ხაზს. დღესდღეობით ორგანიზაციებისთვის თანამშრომლები განიხილება, როგორც ღირებული აქტივი სამუშაო შესრულების გასაუმჯობესებლად [2].

ცნობილი ამერიკელი ფსიქოლოგი და პროფესორი ფრედ ლუთანსი, რომელიც ორგანიზაციული ქცევის სფეროში მოღვაწეობით არის ცნობილი, განსაკუთრებით პოზიტიური ფსიქოლოგიის, ფსიქოლოგიური კაპიტალისა და ორგანიზაციული განვითარების სფეროებში კვლევებზე დაყრდნობით ამტკიცებს, რომ ფსიქოლოგიური კაპიტალი (PsyCap) სამუშაო კმაყოფილების, შესრულების და კეთილდღეობის მიღწევაში გადამწყვეტ როლს თამაშობს. ორგანიზაციებს, რომლებსაც მაღალი PsyCap მქონე თანამშრომლები ჰყავთ სამუშაო შესრულების და ინოვაციების მაჩვენებლის მაღალი შედეგი აქვთ. მაღალი PsyCap-ის მქონე პირები უფრო მეტ ჩართულობას ამჟღავნებენ, რაც მაღალი პროდუქტიულობისა და სამუშაოთი კმაყოფილების მაჩვენებელია. ეს პირები მიდრეკილნი არიან სამუშაოს მიმართ ოპტიმისტური დამოკიდებულებისკენ, რთული დავალებების შესრულებისკენ, რომელსაც ორგანიზაცია მაღალი წარმატებისკენ მიჰყავს და ეფექტურად გამოდიან სტრესული სიტუაციებიდან. პოზიტიური ფსიქოლოგიური კაპიტალი მოიცავს ოთხ ფსიქოლოგიურ რესურსს: თვითეფექტურობა, ოპტიმიზმი, იმედი და მდგრადობა, რომლებიც ეხმარება თანამშრომელთა ჩართულობისა და საერთო კმაყოფილების მიღწევას [3].

უსაფრთხო სამუშაო გარემო მოიცავს არა მხოლოდ ფიზიკური პირობების გაუმჯობესებასა და დაცვას (მუშაკთა სიმაღლეზე მუშაობისას, მიწის დამუშავებისას და მძიმე დანადგარების გამოყენებისას), არამედ მათ ფსიქოლოგიურ მდგომარეობასაც, რაც თანამშრომლებს სტრესის შემცირებას და თავდაჯერებულობის ჩამოყალიბებას უზრუნველყოფს. იმისთვის, რომ თანამშრომლებმა თავი უსაფრთხოდ, დაცულად, მნიშვნელოვნად და დაფასებულად იგრძნონ აუცილებელია ორგანიზაციაში კორპორაციული კულტურა არსებობდეს, რომელიც უნდა მოიცავდეს:

დროულ და გამჭვირვალე კომუნიკაციას – დროული და გამჭვირვალე კომუნიკაცია სამუშაო ადგილებზე კრიტიკულად მნიშვნელოვანია. განსაკუთრებით ექსკავაციის სამუშაოების დროს ნებისმიერი შეცდომა ან გაუგებრობა შეიძლება საფრთხეს უქმნიდეს როგორც მემანქანესა და სხვა თანამშრომლებს, ისე პროცესის ეფექტურობას. თანამშრომლების დროული და სრულყოფილი ინფორმირება საფრთხეებზე, სამუშაო პირობებზე, უსაფრთხოების წესებზე, რისკების შემცირებაში მნიშვნელოვან როლს თამაშობს ისევე, როგორც თითოეული თანამშრომლის ინფორმირება ორგანიზაციის მისიის, ხედვის, ღირებულებების შესახებ, რაც ერთიანობის განცდას და ნდობას აყალიბებს. მნიშვნელოვანია, რომ ყველა თანამშრომელს, რანგის მიუხედავად, ჰქონდეს სრულყოფილი ინფორმაცია როგორც სამუშაო პროცესის, ისე ორგანიზაციის სიახლეების შესახებ, რათა არ მოხდეს შეცდომების, უსაფრთხოების დარღვევების, დემოტივაციისა და უკმაყოფილებების პროვოცირება. გამჭვირვალე კომუნიკაციის უზრუნველყოფა და თანამშრომლების მხარდაჭერა ასევე უაღრესად

მნიშვნელოვანია ორგანიზაციაში კრიზისული პერიოდების დროს, როგორცაა გათავისუფლება, ან რესტრუქტურირაცია.

თანამშრომლების ჩართულობისა და მოტივაციის ზრდას - სოციალური უსაფრთხოების უნარების განვითარება ორიენტირებული უნდა იყოს არა მხოლოდ ინდივიდუალური პასუხისმგებლობის ამაღლებაზე, არამედ თანამშრომელთა აქტიურ ჩართულობაზეც. როდესაც მუშები ხედავენ, რომ სამუშაო ადგილზე მათ აზრსა და ინიციატივებს იზიარებენ და აფასებენ, ეზრდებათ მოტივაცია და პასუხისმგებლობა. ამ გზით, თანამშრომლები ახერხებენ არა მხოლოდ საკუთარ უსაფრთხოებასა და ჯანმრთელობაზე ზრუნვას, არამედ ობიექტის უსაფრთხოებაზე საერთო პასუხისმგებლობის განცდას, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს სამუშაო ადგილებზე ავარიების და ტრავმების რისკს.

თანამშრომლის კმაყოფილებას - სამუშაო პირობებით კმაყოფილება პირდაპირ კავშირშია სამუშაოს შესრულებაზე. სტაბილური და უსაფრთხო სამუშაო გარემო ხელს უწყობს დასაქმებულთა პროფესიონალიზმის ზრდას. კომპანიები, რომლებიც საკუთარ თანამშრომლებს სთავაზობენ ისეთ პირობებს, რაც მათ კომფორტულ სამუშაო გარემოში მუშაობას უწყობს ხელს, აყალიბებენ ერთგულ დამოკიდებულებას. როდესაც კომპანიის ხელმძღვანელობა აქტიურად მუშაობს თანამშრომლების კეთილდღეობაზე და მათთვის საუკეთესო სამუშაო პირობების შექმნაზე, ეს აისახება ზოგად შრომის კმაყოფილებაზე, რაც საბოლოოდ ხელს უწყობს საწარმოს წარმატებას.

პოზიტიური სამუშაო გარემო არის საწარმოს ეფექტურობის და თანამშრომლების უსაფრთხოების საწინდარი. ექსკავაციის სამუშაოებში ეს გარემო, როგორც ფიზიკური, ისე ფსიქოლოგიური თვალსაზრისით, არამარტო ინჟინრული და ტექნიკური ამოცანების შესრულებას უწყობს ხელს, არამედ მნიშვნელოვან როლს ასრულებს მუშახელის ჯანმრთელობასა და კეთილდღეობაში. უსაფრთხო სამუშაო გარემო ზრუნავს არა მხოლოდ ფიზიკურ პირობებზე, არამედ ფსიქოლოგიურ მხარესაც, რაც თანამშრომლებს უზრუნველყოფს სტრესის შემცირებაში და მათ თავდაჯერებულობას უყალიბებს.

პოზიტიური სამუშაო გარემოს შექმნა პირდაპირ გავლენას ახდენს როგორც ორგანიზაციის ეფექტურობაზე, ისე თანამშრომლების კეთილდღეობაზე. გამჭვირვალე კომუნიკაცია, თანამშრომლების ჩართულობა და უსაფრთხოების სტანდარტების დაცვა ქმნის ძლიერ ორგანიზაციულ კულტურას, რომელიც უზრუნველყოფს სტაბილურობას, პროდუქტიულობას და საერთო წარმატებას.

ექსკავაციის ტექნიკური უსაფრთხოება იწყება ტერიტორიის საფუძვლიანი შეფასებითა და დაგეგმვით. ნებისმიერი ექსკავაციის სამუშაოების დაწყებამდე უნდა ჩატარდეს ადგილის დეტალური შეფასება პოტენციური საფრთხის გამოსავლენად. ეს მოიცავს ობიექტის ისტორიის განხილვას, ნიადაგის ტესტირებას და მიწისქვეშა კომუნიკაციების შეფასებას. ნიადაგის შემადგენლობისა და მდგრადობის გაგება გადამწყვეტია, რადგან ნიადაგის სხვადასხვა ტიპი დატვირთვებს არაერთნაირად უძლებს, შესაძლოა ჩამოიშალოს და ქვეშ მოიყოლოს დასაქმებულები.

დაგეგმვა ასევე მოიცავს ექსკავაციის მეთოდის განსაზღვრას, შესაბამისი აღჭურვილობის შერჩევას და დამცავი სისტემების დიზაინს, როგორიცაა საყრდენი, ფარი ან ფერდამცავი ღობე. გათხრების დეტალური გეგმა უნდა ასახავდეს სამუშაოს მასშტაბურობას, უსაფრთხოების ნორმებს და საგანგებო სიტუაციებზე რეაგირების პროცედურებს. ეს გეგმა უნდა ეცნობოს პროექტში ჩართულ ყველა დასაქმებულს, რათა ყველამ იცოდეს პოტენციური რისკები, საფრთხეები და პრევენციული ღონისძიებები.

დამცავი სისტემები აუცილებელია ექსკავაციასთან დაკავშირებული სხვა ავარიების თავიდან ასაცილებლად. ეს სისტემები მოიცავს საყრდენს, ფერდამცავ ღობეებსა და დახრილობის კონტროლს, რადგან ყველა ექსკავაციისას აუცილებელია მიმდინარეობდეს 45 გრადუსის დახრით (იხ სურ.1), ან ხდებოდეს მათი საყრდენებით გამაგრება მიწის ჩამოშლის პრევენციისათვის, საყრდენი მოიცავს საყრდენების გამოყენებას ნიადაგის გადაადგილებისა და მოწყვეტის თავიდან ასაცილებლად, ხოლო ფერდამცავ ღობეებს იყენებენ ისეთი სახის გრუნტებთან სადაც დიდი ალბათობაა მიწის ჩამოშლის და ადამიანის დაზიანებისათვის, რათა დაიცვას დასაქმებულები ექსკავაციის მიმდინარეობისას.



სურათი 1. მძიმე ტექნიკის დგომისა და ამოღებული ნიადაგის სწორად დაყრის ნიმუში.

შესაბამისი დამცავი სისტემის შერჩევა დამოკიდებულია ისეთ ფაქტორებზე, როგორიცაა ნიადაგის ტიპი, ექსკავაციის სიღრმე და გამდინარე წყლების არსებობა. მნიშვნელოვანია დაცულ იქნას მარეგულირებელი გაიდლაინები, როგორიცაა ოკუპაციური უსაფრთხოებისა და ჯანმრთელობის ადმინისტრაციის (OSHA) მიერ ან სხვა უშუალოდ ქვეყნების შიდა რეგულაციებით განსაზღვრული საჭირო დამცავი ზომების განსაზღვრა კონკრეტული ექსკავაციის პირობებზე დაყრდნობით.

უბედური შემთხვევების გამომწვევ ძირითად მიზეზები მიწის სამუშაოების წარმოების დროს შემდეგია:

- ნათხარის (ქვაბულის, თხრილის) კედლების ჩამოშლის შედეგად მუშაკების დაფარვა ჩამონაქცევით;

- ნათხარში იმ სხვადასხვა მასალებისა და ნივთების ჩავარდნა, რომლებმაც მუშაკებს შეიძლება მიაყენონ ტრავმა;
- თანამშრომელთა ჩავარდნა ნათხარში;
- ჩამარხვისას ადგილზე მიღწევის უსაფრთხო და ევაკუაციისთვის არასაკმარისი საშუალებები;
- ნათხარის კედლების ჩამოშლა სატრანსპორტო საშუალების ნათხარში ჩასვლისას ან სატრანსპორტო საშუალების ნათხარის კიდებთან სახიფათო მიახლოებისას, განსაკუთრებით უკუსვლის დროს;
- კვამლისა და აირისაგან გაგუდვა, ან მოწამვლა ნათხარში დაღეჭილი კვამლით ან აირით, იმის გამო, რომ ისინი ჰაერზე მძიმე არიან (მაგალითად, დიზელის ან ბენზინის გამონაბოლქვი აირი).

საფრთხის იდენტიფიცირება და მართვა უწყვეტი პროცესია ექსკავაციის პროექტის მიმდინარეობაში. აუცილებელია ექსკავაციის ადგილის, დამცავი სისტემებისა და აღჭურვილობის რეგულარული ინსპექტირება პოტენციური საკითხების იდენტიფიცირებისთვის, სანამ ისინი საფრთხის შემცველი გახდებიან. ატმოსფერული პირობების მონიტორინგი ასევე გადამწყვეტია, განსაკუთრებით დახურულ სივრცეებში, ტოქსიკური აირების ან ჟანგბადის არასაკმარისი დონის დასადგენად (იხ. სურ.2). აირის დეტექტორებისა და ვენტილაციის სისტემების გამოყენებამ შეიძლება ხელი შეუწყოს უსაფრთხო სამუშაო გარემოს შენარჩუნებას.



სურათი 2. ტოქსიკური აირების დეტექტორები

კომპეტენტური პირის დანიშვნა ექსკავაციის უსაფრთხო მიმდინარეობის ზედამხედველობისთვის არის მსოფლიო სტანდარტებით განსაზღვრული მარეგულირებელი მოთხოვნა, რასაც კომპანია შიდა რეგულაციით ანუ ბრძანებით განსაზღვრავს. ამ ინდივიდს უნდა ჰქონდეს ცოდნა და უფლებამოსილება, გამოავლინოს

საფრთხეები და მიიღოს მაკორექტირებელი ქმედებები. რეგულარულად განახლებადი სწავლებები კი ხელს შეუწყობს თანამშრომლების ინფორმირებულობისა და მზადყოფნის მაღალი დონის შენარჩუნებას. უბედური შემთხვევები მაინც შეიძლება მოხდეს, რაც აუცილებელს ხდის საგანგებო სიტუაციებზე რეაგირების კარგად განსაზღვრულ გეგმას. ეს გეგმა უნდა ასახავდეს საფრთხეში მყოფი დასაქმებულების გადარჩენას, პირველადი დახმარების გაწევისა და ადგილის ევაკუაციის პროცედურებს. ეფექტური რეაგირებისთვის გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს სამაშველო აღჭურვილობის ხელმისაწვდომობას და პერსონალის სწავლებას მის გამოყენებაში.

ექსკავაციის უსაფრთხოება და დაგეგმვა უმნიშვნელოვანესია ავარიების თავიდან ასაცილებლად და დასაქმებულთა უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად. შრომის უსაფრთხოება მოიცავს დამცავი სისტემების დანერგვას, საფრთხის მუდმივ იდენტიფიკაციას და რისკების მინიმუმამდე დაყვანას, სათანადო ტრენინგს და საგანგებო სიტუაციებზე რეაგირების გეგმების შემუშავებასა და იმპლემენტაციას. მარეგულირებელი ორგანოს მიერ გაცემული დადგენილებებისა და სახელმძღვანელოების მითითებების დაცვა აუცილებელია ექსკავაციის უსაფრთხო გარემოს შესაქმნელად.

გათხრების მიმდინარეობისას საფრთხის თავიდან ასაცილებლად საუკეთესო პრაქტიკაა:

- ტერიტორიის დეტალური შეფასებების ჩატარება პოტენციური რისკებისა და ნიადაგის პირობების გამოსავლენად.
- შესაბამისი დამცავი სისტემების დაყენება უბნის სპეციფიკურ ფაქტორებზე დაყრდნობით.
- ტერიტორიის, აღჭურვილობისა და დამცავი ზომების რეგულარული შემოწმება.
- ყოვლისმომცველი ტრენინგის უზრუნველყოფა და დასაქმებულთა კომპეტენტურობის უზრუნველყოფა.
- საგანგებო სიტუაციებზე რეაგირების ეფექტური გეგმის შემუშავება და იმპლემენტირება.

ამგვარად, ექსკავაციის პროექტები შეიძლება განხორციელდეს უსაფრთხოდ, ავარიების რისკის მინიმუმამდე დაყვანით და დასაქმებულთა სრული ჩართულობით.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Cameron, K. S., & Quinn, R. E. (2006). Diagnosing and Changing Organizational Culture: Based on the Competing Values Framework.
2. Nor A.I. Enhancing employee performance through human resource management practices: a review of literature. Eur J Hum Resour Manag Stud. (2018). pp.52-59.
3. Luthans, F., Avolio, B. J., Avey, J. B., & Norman, S. M. (2007). Positive Psychological Capital: Measurement and Relationship with Performance and Satisfaction. Personnel Psychology, 60(3), 541-572.
4. ნ. რაზმაძე, ნ. რატიანი „შრომის უსაფრთხოება მშენებლობაში“. გამ-ბა „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. ISBN 978-9941-28-841-8. 2023 წ.
5. N. Razmadze, N. Ratiani, A. Korkotadze. „Improvement of safety measures in construction by using modern railing and fall arrest systems“. TASHKENT INTERNATIONAL CONGRESS ON MODERN SCIENCES - III. TASHKENT CHEMICAL-TECHNOLOGICAL INSTITUTE. April 22-23, 2024. Tashkent, Uzbekistan. ნ.რაზმაძე ნ. რატიანი, ა. კორკოტაძე. „მშენებლობაზე უსაფრთხოების ღონისძიებათა გაუმჯობესება თანამედროვე მოაჯირული და საჭერი სისტემების გამოყენებით“. ტაშკენტის ინტერნაციონალური კონგრესი თანამედროვე მეცნიერებებში-III.
6. ნ. რაზმაძე, ნ.რატიანი მ.ქიტოშვილი, ა.კორკოტაძე. „უბედური შემთხვევების და პროფდაავადებათა რისკ-ფაქტორები მშენებლობაში“. ქართულენოვანი მრავალდარგობრივი სამეცნიერო რეფერირებადი ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“ #1 (744). 2024 წ. ISSN 0130-7061 Index 76127
7. ნ. რაზმაძე, ნ. რატიანი, მ. ქიტოშვილი. ნ. მაჭავარიანი. „უსაფრთხოებისა და ჯანმრთელობის რისკების შეფასება მშენებლობაში“. ქართულენოვანი მრავალდარგობრივი სამეცნიერო რეფერირებადი ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“. #1 (747). 2025 წ.
8. N. Ratiani, M. Darakhvelidze. N. Razmadze. “Establishing a system of hazard identification and risk assessment and existing flaws”. Georgian Engineering News. #2, vol.101, 2024. 14-20 pg. ნ. რატიანი, მ. დარახველიძე, ნ.რაზმაძე „საფრთხის იდენტიფიცირებისა და რისკის შეფასების სისტემის ჩამოყალიბება და არსებული ხარვეზები“.
9. ნ. რაზმაძე, ა. კორკოტაძე, ნ.რატიანი . “სიმაღლეზე მუშაობის შესაძლო საფრთხეების კონტროლი მოაჯირული და საჭერი სისტემების მაგალითზე“. სტუ, შრომების კრებული #1 (531). 2024 წ. UDS 658. 382. SCOPUS CODE 2213.
10. ნ. რაზმაძე, ნ.რატიანი, ა. კორკოტაძე. „სიმაღლეზე მომუშავეთა ფიზიკური საფრთხეების მინიმიზაციის საშუალებები“ (მოხსენება და სტატია ინგლ. ენაზე) მეოთხე საერთაშორისო კონფერენცია: „ინოვაციური ტექნოლოგიები მშენებლობაში“. სტუ. სამშენებლო ფაკულტეტი. 15-16 თებერვალი, 2024 წ. „Means of minimizing physical hazards of workers at height“.

11. N. Razmadze, N. Ratiani, A. Korkotadze. "IMPROVING SAFETY MEASURES FOR WORKERS AT HEIGHT". International Marmara scientific research and innovation congress. ISTANBUL, JANUARY 27-28. 2024. ნ. რაზმაძე, ნ. რატიანი, ა. კორკოტაძე. "სიმაღლეზე მომუშავეთა უსაფრთხოების ღონისძიებების გაუმჯობესება". საერთაშორისო სამეცნიერო კვლევებისა და ინოვაციების კონგრესი. სტამბოლი, 27-28 იანვარი, 2024წ.
12. რატიანი ნ., რაზმაძე ნ., & დარახველიძე მ. (2024). შრომის უსაფრთხოების სისტემის დანერგვა და განვითარება საქართველოსა და სხვა ქვეყნებში. ქართველი მეცნიერები, 6(4), 150–166. <https://doi.org/10.52340/gs.2024.06.04.15>

Strategies for Mitigation Social and Technical Safety Challenges During Excavation Works

Nana Razmadze, Luka Kakhidze, Nino Ratiani, Nutsa Gumberidze, Mzia Kitoshvili

Abstract

Excavation work is an essential component of construction projects but carries inherent safety risks that must be managed effectively. This article examines both the social and technical aspects of safety in excavation work, focusing on creating a positive work environment and implementing necessary technical safety measures. Social aspects include addressing workers' well-being, fostering a sense of responsibility, and enhancing engagement through transparent communication, employee satisfaction, and psychological support. Meanwhile, technical safety covers risk assessments, protective systems, hazard management, and the use of safety protocols. The article emphasizes the importance of comprehensive planning, timely communication, employee involvement, and the strict adherence to safety measures to ensure a safe and productive work environment in excavation operations.

Keywords: Excavation Safety; Occupational Safety; Risk Assessment; Protective Systems; Employee Well-being; Organizational Culture; Hazard Management.

ბენზოილის ზეჟანგის შემცველი ბიონანოკომპოზიტები ფსევდოპროტეინების საფუძველზე

დარეჯან ხარაძე¹, თინა ომიაძე¹, ლარისა ყირმელაშვილი¹, თემურ ქანთარია², რამაზ
ქაცარავა²

¹ი. ბერიტაშვილის ექსპერიმენტული ბიომედიცინის ცენტრი, თბილისი 0160, გოთუას ქ. 14, საქართველო; ²ქიმიისა და მოლეკულური ინჟინერიის ინსტიტუტი, საქართველოს აგრარული უნივერსიტეტი, კახა ბენდუქიძის საუნივერსიტეტო კამპუსი, თბილისი 0159, დავით აღმაშენებლის ხეივანი # 240, საქართველო;

აბსტრაქტი:

ახალი ბიოსამედიცინო ტექნოლოგიების შემუშავება მედიცინაში მკურნალობის ახალი მეთოდების დანერგვის შესაძლებლობას იძლევა. მათ შორის ერთ-ერთი საინტერესო და პერსპექტიულია ზეჟანგების ან/და ჟანგბადის კონტროლირებადი, მდგრადი პროლონგირებული) გამოყოფისა და მიწოდების ტექნოლოგია ჰიპოქსიის მკურნალობისათვის, უჯრედების სიცოცხლისუნარიანობისა და ქსოვილების ფუნქციების გასაუმჯობესებლად. ოქსიგენაციის გაზრდას მრავალი დაავადება თუ სამედიცინო პროცედურა საჭიროებს. ჟანგბადის მიწოდებას შეუძლია შეამციროს უჯრედების აპოპტოზი, ნეკროზი და ქსოვილების ფორმირების წარუმატებლობა (განსაკუთრებით ტრანსპლანტაციისას).

წარმოდგენილი ნაშრომი ეძღვნება ახალი სტრუქტურის ჟანგბადის მიწოდების უნარის მქონე კომპოზიტების მიღებას ფსევდოპროტეინების საფუძველზე. ჩვენს მიერ ადრე სინთეზირებულ მრავალრიცხოვან ფსევდოპროტეინებს შორის შევარჩიეთ პოლიესტერამიდური კლასის ორი პოლიმერი აბრევიატურით **4F4** და **8L6**, ბუნებრივი α -ამინომჟავების - ფენილალანინისა და ლეიცინის საფუძველზე (იხ. სქემა 1 ქვემოთ) და მათი გამოყენებით მივიღეთ და დავახასიათეთ ბენზოილის ზეჟანგის შემცველი ნანოკომპოზიტები. შევისწავლეთ სხვადასხვა ფაქტორების გავლენა ნანოკომპოზიტების ფორმირებაზე, ასევე მათი მდგრადობა შენახვისას.

საძიებო სიტყვები: ფსევდოპროტეინები, ნანოკომპოზიტები, ბენზოილის ზეჟანგი, ჟანგბადის გამოყოფის სისტემები;

შესავალი:

ჟანგბადის *in situ* გენერაციის უნარის მქონე მასალების გამოყენება ჰიპოქსიის მკურნალობის პერსპექტიული მეთოდია. ჟანგბადი უჯრედის შეუფერხებელი ფუნქციონირებისთვის ერთერთი მნიშვნელოვანი ნივთიერებაა. იგი გამოიყენება როგორც თერაპიული აგენტი უჯრედების სიცოცხლისუნარიანობისა და ქსოვილების ფუნქციის გასაუმჯობესებლად. ჰიპოქსია ვითარდება იშემიის, ტრამვების, ანემიის, მოწამლვის, ქირურგიული ჩარევების, იმპლანტაციისას და სხვ. შედეგად. ძირითადი წინააღმდეგობა ქსოვილების ინჟინერინგში, განსაკუთრებით მაღალი მეტაბოლიზმის უჯრედების იმპლანტაციისას, მდგომარეობს არასაკმარის ოქსიგენაციაში, რაც იწვევს მათ დისფუნქციას, აპოპტოზს ან ნეკროზს.

ჟანგბადის გენერაცია *in situ* შესაძლებელია აირადი ჟანგბადის, ჟანგბადით მდიდარი ნაერთების (მაგალითად, ზეჟანგების), ასევე მათი კომპოზიტების გამოყენებით. აღნიშნული პროცესის განხორციელება აირადი ჟანგბადის გამოყენებით შეძლეს

β-ციკლოდექსტრინის ნანოღრუბელ/ჰიდროგელის კომბინირებული სისტემის გამოყენებით [1]. მიღებული სისტემები გამოსცადეს *in vitro*, ნანოღრუბლის უსაფრთხოება კი Vero-ს (თირკმელი) უჯრედებზე. მიღებული შემადგენლობა სავარაუდოდ გამოსადეგი უნდა იყოს ჟანგბადის მიწოდების პოტენციური სისტემის სახით, თუმცა ამ შემთხვევაში გამოყოფის პროცესის (ჟანგბადის) კონტროლი საკმაოდ რთული აღმოჩნდა.

ჟანგბადის მიწოდების მიზნით უშუალოდ მყარი ზეჟანგების გამოყენება იწვევს ჰიპეროქსიურ მდგომარეობას და ჰიდროქსილის (OH^-) რადიკალების დაგროვებას სწრაფი ჰიდრატაციის გამო. უფრო პერსპექტიულად გვესახება ჟანგბადის მიწოდებისათვის მყარი ზეჟანგების შემცველი კომპოზიტების გამოყენება [2], რაც მოიცავს ზეჟანგების ან მათი ნაწარმების ბიოკომპოზიტში ჩართვას ისე, რომ შესაძლებელი იყოს მათი გამოთავისუფლება სასურველ გარემოში და კონტროლირებადი სიჩქარით. ჟანგბადის წყაროდ შესაძლებელია როგორც ორგანული, ასევე არაორგანული ზეჟანგების გამოყენება.

ორგანული ზეჟანგებიდან სამედიცინო მიზნებისათვის პერსპექტიულია ბენზოილის ზეჟანგი. მისი ინკაფსულირება განახორციელეს [3] ცხიმოვანი მჟავების მარილების გამოყენებით და მიიღეს ნანონაწილაკები ზომით ≤ 10 მკმ. ბენზოილის ზეჟანგის მიკროზომის კომპოზიტები მიიღეს ეთილცელულოზას საფუძველზე [4]. განახორციელეს ასევე ბენზოილის ზეჟანგის და ანტიბიოტიკ ქლორამფენიკოლის ინკაფსულირება ლიპოსომაში [5]. შევნიშნავთ, რომ ერთზე მეტი აქტიური ფარმაცოლოგიური ინგრედიენტის ინკაფსულირება ნანო ან მიკროზომის კონტეინერებში მიმზიდველი მიდგომაა წამლების სინერგიული ეფექტის მიღწევისა და რამდენიმე სამკურნალო პრეპარატით მკურნალობისას დოზირების ნაკლებად რთული სქემების განხორციელებისათვის. აღწერილია წყლიან არეში (მაგალითად, პაციენტის სხეულში ან სისხლის მიმოქცევის სისტემაში) არაორგანული ზეჟანგების საფუძველზე

მიღებულია ჟანგბადის კონტროლირებადი და პროლონგირებული გამოყოფის კომპოზიტები [6]. ინკაფსულირებისათვის გამოყენებულია წყალბადის, კალციუმის, თუთიის, ნატრიუმის, მაგნიუმის ზეჟანგები. მოახდინეს ზეჟანგების დისპერგაცია მათი სუსპენდირებით ჰიდროფობურ, პერფორირებულ ნაერთებში, მაგალითად, პერფთორდეკლინში. სუსპენდირებული ზეჟანგები გამოსცადეს ინკაფსულირებული ღვიძლის (HepG2) [7] და β TC-tet ინსულინომის უჯრედებისათვის [8], რბილი ქსოვილების ვასკულარიზაციისათვის მათი ტრამვირებისას [9].

ქსოვილურ ინჟინერიაში ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი გამოწვევაა სისხლძარღვების ჩამოყალიბებამდე 3D სკაფოლდში ჩართული უჯრედების გადარჩენა. წყალბადის ზეჟანგის პერფტოროქტანში ემულსიფიცირებული მიკრონაწილაკები (PFO-HP) გამოსცადეს [10] როგორც *in vitro* უჯრედების კულტურაში, ასევე ექსპერიმენტში *in vivo*. დაადგინეს, რომ PFO-HP-ებზე დათესილი უჯრედები ინარჩუნებდნენ სიცოცხლისუნარიანობას 10 დღის განმავლობაში სისხლძარღვების ინფილტრაციამდე.

უადრესად პერსპექტიულია ზეჟანგების ჩართვა ბიოდეგრადირებად მიკროკონტეინერებში. არაორგანული ზეჟანგების (წყალბადის, Ca, Mg ზეჟანგები, ნატრიუმის პერკარბონატი) ინკაფსულირებისთვის ბიოდეგრადირებად კონტეინერებად (მატრიქსად) უმეტესწილად გამოიყენება პოლი(D,L-ლექტიდ-გლიკოლიდი) (PLGA), ასევე ჟელატინი და ქიტოზანი [11-15]. მიღებული პრეპარატები გამოიყენეს იშემიურ ქსოვილებში აპოპტოზის შემცირებისათვის [11,12], სამგანზომილებიანი კონსტრუქციის ფოროვან კარკასებში [12-14] მიოკარდიუმის ინფარქტით დაზიანებული გულის ქსოვილის ღეროვანი უჯრედებით რეგენერაციისათვის [15], ოსტეოგენური დიფერენციაციისა და ძვლოვანი ქსოვილის ინჟინერიისთვის [16]. ყველა შემთხვევაში შედეგი დადებითი იყო, თუმცა ჟანგბადის გამოყოფის კინეტიკა ნაკლებად კონტროლირებადი აღმოჩნდა PLGA-ს სწრაფი ჰიდროლიზური დეგრადაციის გამო. გარდა ამისა პრეპარატების ციტოტოქსიკურობის შემცირებისთვის საჭირო აღმოჩნდა ფერმენტ კატალაზას დამატება, ჭარბი ზეჟანგის დასაშლელად [17].

PLGA/MgO₂ მიკროსფეროებით დატვირთული თიოლირებული ალგინატ (AlgT)/ჟელატინის მეტაკრილოილის ჰიდროგელი, მიღებული ფოტოშეკერვის კლიკ-რეაქციით [16] ეფექტური აღმოჩნდა ოსტეოგენური დიფერენციაციისა და ძვლოვანი ქსოვილის ინჟინერიისთვის. Ca²⁺-ით შეკერილი კალციუმის ზეჟანგის შემცველი ალგინატის ჰიდროგელზე ძვლის ტვინის მეზენქიმური სტრომალური უჯრედების კულტივირებით [18] მიიღეს უჯრედების ზრდისა და ქსოვილის რეგენერაციის გაუმჯობესება. ძვლოვანი ქსოვილის რეგენერაციის დამატებით პოტენციალს ჰიდროგელს ანიჭებდა Ca²⁺ იონების გამოყოფა.

მატრიქსად პოლილიზინის, პოლიაკრილამიდის, პოლიმეტაკრილატის, პოლიესტერის, პოლიურეთანის, ნაილონის, გაკერილი დექსტრანის და არაჟელირებადი პოლისაქარიდის გამოყენებით შექმნილია [19] წყალბადის, ამონიუმის, ნატრიუმის ზეჟანგის, მათ შორის აირადი ჟანგბადის შემცველი კომპოზიტები (ფირების და

ჰიდროგელების სახით). ეს კომპოზიტები გამოიყენეს უშუალოდ ჭრილობაში ჟანგბადის მიწოდების მიზნით.

მიღებულია [20] პოლიდიმეთილსილოქსანში (PMDS) ინკაფსულირებული კალციუმის ზეჟანგის კომპოზიტი PDMS-CaO₂ (ფირები), რომლებიც გამოყოფდნენ ჟანგბადის 0.026 მმოლი/24 სთ სიჩქარით და ერთ კვირაზე მეტი გამოყოფის პერიოდით. ფირების აქტიურობა შეისწავლეს ვირთაგვების β-უჯრედებსა და პანკრეასის კუნძულებზე. ვარაუდობენ მიღებული მიღწევების განვრცობას სხვა სახის იმპლანტირებულ უჯრედებსა და იმემიურ ქსოვილებზე.

აღწერილია წყალბადის ზეჟანგით დატვირთული პოლიმეთილმეტაკრილატის მიკროკაფსულები (ზომით 5-30 მკმ) [21], რომლებიც მიიღეს ე.წ. ზეთი/წყალი ემულსიფიკაციის მეთოდით. მიკროკაფსულებიდან ზეჟანგის 70% გამოიყო 24 საათის განმავლობაში. შენახვისას მიკროკაფსულები ინარჩუნებენ ჩატვირთული ზეჟანგის 84% 10 თვის განმავლობაში 2-8 °C-ზე, რაც მნიშვნელოვანია მათი კლინიკური გამოყენების თვალსაზრისით. მიღებული მიკროკაფსულები პერსპექტიულია პროლონგირებული მოქმედების ანტიმიკრობული აგენტების სახით.

პაროდონტიტის სამკურნალდ (რომლითაც დაავადებულია მსოფლიოს მოსახლეობის 50%-80%), გამოიყენეს 1.7% წყალბადის ზეჟანგის და ვიბრამიცილის შემცველი გელი პოლოქსამერ-407-ის საფუძველზე (Perio Gel), რომელიც თავსდება პაროდონტულ ჯიბეში [22]. აქვე ინტერესს მოკლებული არ იქნება შევნიშნოთ, რომ გარდა სამედიცინო მიზნებისა, ჟანგბადის მიწოდების კომპოზიტები მნიშვნელოვანია გარემოს დაცვის - ბიორემედიაციისათვის in situ [23].

გაწეული ძალისხმევით მიუხედავად, დღეისათვის პრობლემად რჩება ორგანიზმისთვის ჟანგბადის უსაფრთხო, კონტროლირებადი და მდგრადი (უწყვეტი) მიწოდება. ყოველივე ზემოაღნიშნულის გათვალისწინებით მიზნად დავისახეთ მიგვეღო ბენზოილის ზეჟანგის კომპოზიტები ჩვენს მიერ ადრე სინთეზირებული ბიოდეგრადირებადი, α-ამინომჟავური ბიომიმეტიკების - ფსევდოპროტეინების [24,25] გამოყენებით, დაგვედგინა მათ მიერ ნანოკონტეინერების წარმოქმნის პირობები და შეგვესწავლა მიღებული ნაწილაკების მახასიათებლები და მდგრადობა.

ექსპერიმენტული ნაწილი

მასალები და მეთოდები

PEA-ები დავასინთეზეთ სამი საშენი ბლოკისგან, როგორებიცაა α-ამინომჟავები, დიოლები და ალიფატური დიკარბოქსილის მჟავები. კვლევაში გამოვიყენეთ ორი α-ამინომჟავა - L-ფენილალანინი (F) და L-ლეიცილი (L), ორი დიოლი - 1,4-ბუტანდიოლი (4) და 1,6-ჰექსანდიოლი (6), და ორი დიაცილდიქლორიდი - ადიპოილქლორიდი და სებაცილქლორიდი (გამოვიყენეთ გააქტიურებული დი-პ-ნიტროფენილ დიესტერების მისაღებად). სხვა ქიმიკატები და გამხსნელები იყო: p-ტოლუოლსულფომჟავას მონოჰიდრატი, პ-ნიტროფენოლი, N,N-დიმეთილ-ფორმამიდი (დმფ), დიმეთილსულფოქსიდი (დმსო), აცეტონი, ბენზოლი, ეთილაცეტატი, ტრიეთილამინი

და პირიდინი. ყველა გამხსნელი და მესამეული ამინები გამოყენებამდე გაიწმინდა სტანდარტული მეთოდებით, ხოლო სხვა ქიმიკატები, როგორცაა პ-ტოლუოლსულფომჟავას მონოჰიდრატი, p-ნიტროფენოლი, α-ამინომჟავები, დიოლები და დიკარბოქსილის აცილქლორიდები, ბენზოლის ზეჟანგი (ბზ), არაიონური ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები (ზან) **Tween-20** და **Tween-40** (ყველა Sigma-Aldrich) გამოვიყენეთ შემდგომი გაწმენდის გარეშე.

მონომერების სინთეზი

ფსევდოპროტეინებისთვის საჭირო ბის-ნუკლეოფილური მონომერები - ბის-(ფენილალანინ)-1,4-ბუტილენდიესტერის დი-პ-ტოლუოლსულფონატი (**F4**) და ბის-(ლეიცინ)-1,4-ბუტილენდიესტერის დი-პ-ტოლუოლსულფონატი (**L6**) დავასინთეზეთ ამინომჟავების (2 მოლი) პირდაპირი კონდენსაციით შესაბამის დიოლებთან (1 მოლი) მდუღარე ბენზოლის არეში პ-ტოლუოლსულფომჟავას (2 მოლი) თანაობისას, ადრე აღწერილი მეთოდიკის შესაბამისად [25] და გავასუფთავეთ გადაკრისტალებით წყლიდან. ბის-ელექტროფილური მონომერები - დი-პ-ნიტროფენილადიპინატი (**NP-4**) და დი-პ-ნიტროფენილსეზაციინატი (**NP-8**) მივიღეთ პ-ნიტროფენოლის (2 მოლი) ურთიერთქმედებით შესაბამის დიაცილდიქლორიდთან (1 მოლი) აცეტონის არეში პირიდინის (2 მოლი) თანაობისას, როგორც აღწერილია [25]-ში. **NP-4** და **NP-8** მონომერები გავასუფთავეთ გადაკრისტალებით ეთილაცეტატიდან.

ფსევდოპროტეინების სინთეზი და დახასიათება. ნანოკომპოზიტების მიღების მიზნით მატრიქსებად გამოვიყენეთ პოლიესტერამიდის კლასის ორი ფსევდოპროტეინი - **4F4** ადიპინის მჟავას, L-ფენილალანინის და ბუტანდიოლის საფუძველზე და **8L6** სეზაციინის მჟავას, L-ლეიცინის და ჰექსანდიოლის საფუძველზე. მათი სინთეზი განვახორციელეთ ზემოთ აღწერილი ბიფუნქციური მონომერების პოლიკონდენსაციით N,N-დიმეთილაცეტამიდის ხსნარში ტრიეთილამინის როგორც პ-ტოლუოლსულფომჟავას აქცეპტორის თანაობისას [25] - მოყვანილი მეთოდიკების შესაბამისად მივიღეთ - **4F4**: **F4**-ის ურთიერთქმედებით **NP-4**-თან, **8L6**: **L6**-ის ურთიერთქმედებით **NP-8**-თან.

ფსევდოპროტეინების სტრუქტურა რიგი ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდების (იწ და ბმრ სპექტროსკოპია, დიფერენციალური მასკანირებელი კალორიმეტრია). გამოყენებით შესწავლილია ჩვენს ადრეულ კვლევაში [25]. დადგენილია, რომ **4F4** სემიკრისტალური პოლიმერია გამინების ტემპერატურით 59°C და ლლობის ტემპერატურით 104°C, ხოლო **8L6** ამორფული პოლიმერია გამინების ტემპერატურით 37°C. ახლადსინთეზირებული პოლიმერებისთვის მნიშვნელოვანია განისაზღვროს მოლეკულურ-მასური მახასიათებლები - საშუალო წონითი (M_w) მოლეკულური მასები და დისპერსიულობა (P). გაზომვები ჩავატარეთ ადრე აღწერილი გელ-შელწევადი ქრომატოგრაფიის მეთოდით (ქრომატოგრაფი Waters Associates, Inc. Milford, United States). მივიღეთ შემდეგი მახასიათებლები - **4F4**: M_w 32,600 და $P=1.56$, **8L6** - M_w 62,400 და $P=1.74$ რაც ოპტიმალურია კვლევაში დასახული ნანოკომპოზიტების მისაღებად.

4F4 და **8L6** ფსევდოპროტეინების ბიოდეგრადაცია შესწავლილი იყო ორი მეთოდით - პოტენციომეტრული ტიტრაციით [26] და ნიმუშების წონის კლებით [27]. მათი ბიოდეგრადაციის სიჩქარე იმ ზღვრებშია, რომლებიც ოპტიმალურია ჩვენს მიერ დაგეგმილი კონტროლირებადი გამოყოფის ნანოკომპოზიტების შესაქმნელად.

ნანოკომპოზიტების მიღება (ზოგადი პროცედურა). ბენზოილის ზეჟანგის (**ბზ**) ინკაფსულირება ფსევდოპროტეინულ ნანონაწილაკში ჩავატარეთ ერთ პროცედურად: ნანოკომპოზიტები (**ნკ**) მივიღეთ ე.წ. პოლიმერის გამოლექვის/გამხსნელის ჩანაცვლების ანუ ნანოპრეციპიტაციის მეთოდით [28]. ტიპურ ექსპერიმენტში წინასწარ განსაზღვრული რაოდენობის ფსევდოპროტეინს ვხსნიდით წყალთან შერევად ორგანულ გამხსნელში (**დმფ ან დმსო**, **8L6**-ის შემთხვევაში ასევე აცეტონი) და ვამატებდით სხვადასხვა რაოდენობის **ბზ**-ს (ფსევდოპროტეინის მასის 10, 20 და 30 %-ს). მიღებულ ხსნარს (ე.წ. ორგანული ფაზა) ვარირებადი მორევის სიჩქარის პირობებში ვაწვეთებდით **ზან**-ის შემცველ წყალში, სადაც ხდებოდა ნანონაწილაკების გამოილექვა. ჩაწვეთების სიჩქარე ყველა ექსპერიმენტში იყო 12 წვეთი/წთ - ოპტიმალური ადრე ჩატარებული კვლევის შესაბამისად [28]. **ზან**-ბად გამოვიყენეთ **Tween-20** და **Tween-40**. ორგანული და წყლის ფაზების თანაფარდობა ყველა ექსპერიმენტში იყო 1:10, ასევე ადრეული კვლევის შესაბამისად [28]. მიღებულ ნანოსუსპენზიას ვასუფთავებდით ორგანული გამხსნელისა და ჭარბი **ზან**-ისგან დიალიზით გამოხდილი წყლის მიმართ 48 სთ-ის განმავლობაში. წყალს ცვლიდით ყოველი 8 სთ-ის განმავლობაში. სადიალიზე პარკი: Dialysis membrane (MWCO 25 kDa), Nominal Flat Width: 34 mm, Diameter: 22 mm, Vol/Length: 3.7 mL/cm, Length: 10 m/ 33 ft;

მიღებული ნანონაწილაკების ზომებს (MPD), დისპერსიულობას (PDI) და ზედაპირულ მუხტს (Z-პოტენციალს) ვაფასებდით დინამიკური ლაზერული შუქგაბნევის (DLS) მეთოდით (Laser Nanozetasizer Nano ZS ZEN 3600, Malvern Instruments, UK).

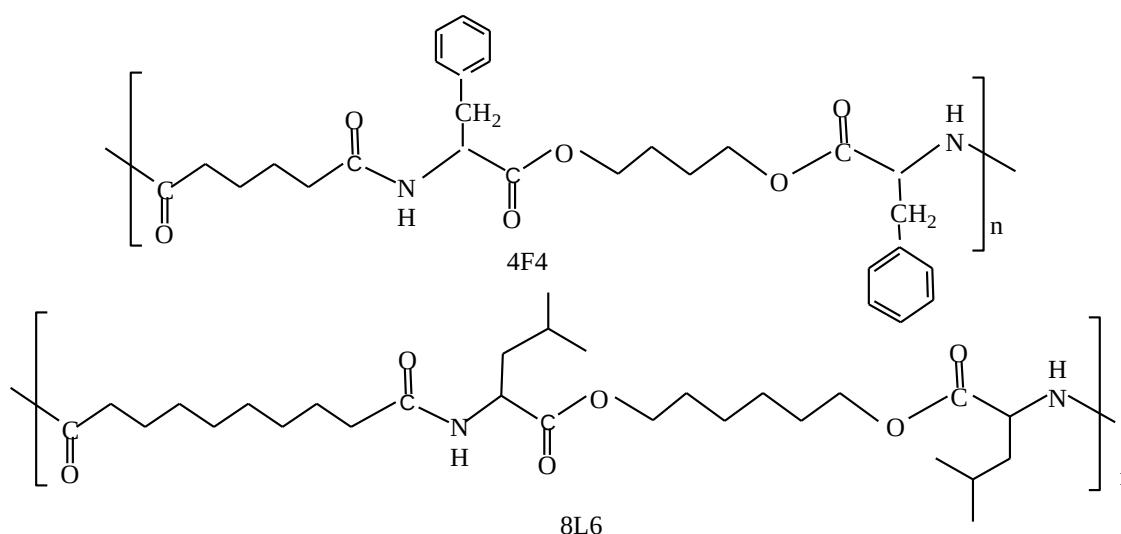
შედეგები და მათი განსჯა

ფსევდოპროტეინული მატრიქსების სინთეზი

ნანოკომპოზიტებისათვის მისაღები მატრიქსების შერჩევა განვახორციელეთ ლიტერატურული მასალის ანალიზის საფუძველზე: დასახული მიზნის მისაღწევად პოლიმერულ მატრიქსებს უნდა ახასიათებდეს ჰიდროფობურობა (რათა გამოირიცხოს პრეპარატის დიფუზიური გამორეცხვა წყლით), კარგი ხსნადობა ორგანულ გამხსნელებში, რათა ადვილად ჩამოყალიბდეს ნაწილაკები ნანოპრეციპიტაციის მეთოდით. უმნიშვნელოვანესია ასევე მატრიქსების ბიოდეგრადაციის სიჩქარე, რათა მიღწეულ იქნეს პრეპარატის გამოყოფის საჭირო პროფილი. ზეჟანგების კაფსულირებისათვის ყველაზე ფართოდ გამოყენებული მატრიქსების უმეტესობა (მაგ., PLGA) ვერ უზრუნველყოფს ზეჟანგების კონტროლირებადი, დაბალი სიჩქარით გამოყოფის სასურველ პროფილს.

ნანოკომპოზიტების მისაღებ პერსპექტიულ მატრიქსებად მივიჩნიეთ ჩვენს მიერ ადრე მიღებული AAB-ტიპის, პოლიკონდენსაციური პოლიმერები ბუნებრივი α -

ამინომჟავების საფუძველზე ე.წ. ფსევდოპროტეინები, რომელთაც დღეისათვის მიღებულ სხვადასხვა კლასის ბიოდეგრადირებად პოლიმერებს შორის თავისი მახასიათებლებით უდავოდ ერთ-ერთი მოწინავე პოზიცია უკავიათ [24,29]. ფსევდოპროტეინების მრავალფეროვან წარმომადგენლებს შორის შევარჩიეთ ორი პოლიესტერამიდური კლასის წარმომადგენელი - მაღალჰიდროფობური და სემიკრისტალური **4F4** ადიპინის მჟავას, L-ფენილალანინის და ბუტანდიოლის საფუძველზე და ნაკლებად ჰიდროფობური და ამორფული **8L6** სებაცინის მჟავას, L-ლეიცინის და ჰექსანდიოლის საფუძველზე. კვლევისთვის შერჩეული ფსევდოპროტეინების სტრუქტურა მოყვანილია სქემა 1-ზე.



სქემა 1. ფსევდოპროტეინების **4F4** და **8L6** სტრუქტურები

განმარტების თანახმად, ფსევდოპროტეინებს ვუწოდებთ ჰეტეროჯაჭვურ პოლიმერებს დიამინო-დიესტერების საფუძველზე [29]. მათ სტრუქტურაში თავიდან (მონომერების სინთეზის ეტაპზე) ჩადებულია ორი, შედარებით ადვილჰიდროლიზებადი ესტერული ბმა, რომლებიც უზრუნველყოფენ ფსევდოპროტეინების ჰიდროლიზურ დეგრადაციას [26,27,30].

მიზნობრივი **4F4** და **8L6** დავასინთეზეთ ადრე შემუშავებული ე.წ. აქტივირებული პოლიკონდენსაციის მეთოდით [25], რომლის შესაბამისადაც პოლიკონდენსაციის რეაქცია ხორციელდება რბილ პირობებში. ეს პროცესი უზრუნველყოფს თანამდებარე რეაქციების მაქსიმალურ დათრგუნვას და სტრუქტურულად ერთგვაროვანი აღნაგობის პოლიმერების სინთეზს, რაც მნიშვნელოვანია მათი გამოყენებისათვის ბიოსამედიცინო დანიშნულების მასალებად. ამ მოსაზრებითაა გამოწვეული ის ფაქტი, რომ ჰოლანდიური კომპანია Royal DSM სამედიცინო დანიშნულების ფსევდოპროტეინის მისაღებად (რომელიც უკვე დანერგილია პრაქტიკაში) დღემდე იყენებს ჩვენს მიერ შემუშავებულ აქტივირებული პოლიკონდენსაციის მეთოდს [30,31].

ფსევდოპროტეინები **4F4** და **8L6** დახასიათებული იყო რიგი ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდებით (იწ და ბმრ სპექტროსკოპია, დიფერენციალური მასკანირებელი კალორიმეტრია) ჩვენს ადრეულ კვლევაში [25]. დავადგინეთ, რომ **4F4** სემიკრისტალური პოლიმერია გამინების ტემპერატურით 59°C და ლღობის ტემპერატურით 104°C, ხოლო **8L6** - ამორფული პოლიმერი გამინების ტემპერატურით 37°C. ახლადსინთეზირებული პოლიმერებისთვის შევისწავლეთ მოლეკულურ-მასური მახასიათებლები - საშუალო წონითი (M_w) მოლეკულური მასები და დისპერსიულობა (D). გაზომვები ჩავატარეთ ადრე აღწერილი [25] გელ-შელწევადი ქრომატოგრაფიის მეთოდით. მივიღეთ შემდეგი მახასიათებლები - **4F4**: M_w 32,600 და $D=1.56$, **8L6** - M_w 62,400 და $D=1.74$. რაც შეეხება ბიოდეგრადაციას ცდებში in vitro, პოლიესტერამიდური კლასის ფსევდოპროტეინების ბიოდეგრადაცია ადრე შესწავლილი იყო სხვადასხვა მეთოდებით [26,27,30]. მნიშვნელოვანია, რომ ამ კლასის ბიოდეგრადირებადი პოლიმერების ბიოდეგრადაციის სიჩქარე იმ ზღვრებშია, რომლებიც ოპტიმალურია ჩვენს მიერ დაგეგმილი კონტროლირებადი გამოყოფის ნანოკომპოზიტების შესაქმნელად.

კვლევაში გამოყენებულ ფსევდოპროტეინებს ახასიათებს კარგი ხსნადობა ორგანულ გამხსნელებში, რაც მნიშვნელოვანია მათი გადამუშავებისათვის: **4F4** იხსნება დმფ-ში, დმა-ში, დმსო-ში, ქლოროფორმში, დიქლორმეთანში; გაცილებით მაღალი ხსნადობით გამოირჩევა ლეიცილის საფუძველზე მიღებული **8L6**, რომელიც ჩამოთვლილი გამხსნელების გარდა იხსნება ასევე მეთანოლში, ეთანოლში, აცეტონში და ტეტრაჰიდროფურანში. ორივე პოლიმერი უხსნადია დიეთილეთერში და ეთილაცეტატში. ბიოდეგრადაციისას პოლიესტერული კლასის ფსევდოპროტეინები გამოყოფენ ნეიტრალურ და ორგანიზმისთვის უვნებელ პროდუქტებს, როგორებიცაა ამინომჟავები, არატოქსიკური ალიფატური დიოლები და სუსტი დიკარბომჟავები, რაც კრიტიკული მნიშვნელობისაა მათი გამოყენებისათვის ბიომედიცინაში, განსაკუთრებით ისეთი ქსოვილებისთვის, რომლებიც მგრძნობიარეა ბიოდეგრადაციის ძლიერმჟავა პროდუქტების მიმართ (რომლებსაც გამოყოფენ ბიოკომპოზიტებში მატრიქსების სახით ხშირად გამოყენებული პოლიგლიკოლის და პოლირმის მჟავები). დასასრულს შევნიშნავთ, რომ დასახული ამოცანების რეალიზაციისთვის უმნიშვნელოვანესია ის გარემოება, რომ შერჩეულ ფსევდოპროტეინებს გააჩნიათ სტაბილური ნაწილაკების წარმოქმნის უნარი [28].

ნანოკომპოზიტების მიღება

ჩვენს მიერ დასახული ამოცანების მისაღწევად, შევიმუშავეთ ბენზოილის ზეჟანგის (**ბზ**-ის) ნანოკაფსულირების მეთოდი, რომელიც მნიშვნელოვანწილად ეფუძნება ფსევდოპროტეინული ნაწილაკების ფორმირების ჩვენს ადრეულ კვლევებს [28]. **ბზ** მყარი ნივთიერებაა, სტაბილური ოთახის ტემპერატურაზე. იგი ძლიერი, არატოქსიკური დამჟანგველია [32], რომელიც გამოსადეგია ეფექტურ ანტიბაქტერიულ და კერატოლიტურ საშუალებად აკნეს, დამწვრობების, ვარიკოზის მკურნალობისათვის. **ბზ** ოფიციალურად დამტკიცდა აშშ-ში აკნეს სამკურნალო საშუალებად 1960 წელს [33].

თუმცა უნდა აღვნიშნოთ, რომ **ბზ** იწვევს კანის სიმშრალეს და გაღიზიანებას, ცუდად იხსნება წყალში და ქიმიურად არამდგრადია, რაც გარკვეულად ზრუდავს მის გამოყენებას. გაცილებით პერსპექტიულია სამკურნალო საშუალებად **ბზ**-ის შემცველი პოლიმერული კომპოზიტების გამოყენება.

კვლევის ობიექტად შერჩეული, **ბზ**-ის შემცველი, პოლიმერული ნანოკომპოზიტები მივიღეთ ზემოაღნიშნული ფსევდოპროტეინების საფუძველზე. გამოვიყენეთ ე.წ. ნანოპრეციპიტაციის (გამოლექვის) მეთოდი [28], **ზან**-ის, როგორც ნანონაწილაკების სტაბილიზატორების, თანაობისას. **ზან**-ებად შევარჩიეთ არაიონური **Tween-20** და **Tween-40**. **ზან**-ის შერჩევას გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ფორმირებადი ნანონაწილაკების ზომების თვალსაზრისით - სასურველია, სამედიცინი დანიშნულების ბიოკომპოზიტური ნანონაწილაკების ზომები იყოს ≤ 100 ნმ; კვლევაში გამოყენებული ორივე **ზან**-ი აკმაყოფილებს ამ პირობას.

ნანოკომპოზიტების მიღების ყველა ექსპერიმენტი ჩავატარეთ ოთახის ტემპერატურაზე. ბიოკომპოზიტური ნარევის მოსამზადებლად წინასწარ განსაზღვრული რაოდენობის ფსევდოპროტეინს ვხსნიდით 2 მლ წყალთან შერევად ორგანულ გამხსნელში, რომელშიც იხსნება ასევე **ბზ**, ვამატებდით ამ უკანასკნელს ფსევდოპროტეინული მატრიქსის მასის 10, 20 ან 30 %-ის ოდენობით და ვურევდით ნარევის სრულ ჰომოგენიზაციამდე. პარალელურად **ზან**-ს (**Tween-20** ან **Tween-40**) ვხსნიდით გამოხდილ წყალში და მიღებული ხსნარის 10 მლ-ს წვეთობით ვამატებდით 1 მლ ბიოკომპოზიტური ნარევის ხსნარს. მიღებულ ნანოსუსპენზიას ვათავსებდით სადიალიზე პარკში და ვატარებდით დიალიზს გამოხდილი წყლის მიმართ.

მიღებული ნანოსუსპენზიას ვსწავლობდით დინამიკური ლაზერული შუქგაბნევის მეთოდით და ვახასიათებდით შემდეგი პარამეტრებით: ნაწილაკების საშუალო დიამეტრით (MPD), პოლიდისპერსიულობის ინდექსით (PDI) და Z-პოტენციალით.

შევისწავლეთ აღნიშნულ პარამეტრებზე ისეთი ფაქტორების გავლენა, როგორებიცაა მატრიქსის სტრუქტურა და ორგანული ფაზის (გამხსნელის) ბუნება, **ზან**-ის ბუნება, ორგანული ფაზის კონცენტრაცია და არაორგანული ფაზის მორევის სიჩქარე.

გამოვიყენეთ ორი პოლარული, წყალთან შერევადი გამხსნელი - **დმფ** და **დმსო**, რომელშიც იხსნება ორივე ფსევდოპროტეინი **4F4** და **8L6**, ასევე აცეტონი, რომელშიც დამატებით იხსნება **8L6**. ორგანული ფაზის კონცენტრაცია ყველა შემთხვევაში იყო 3 მგ/მლ (ბიოკომპოზიტური ნარევის მიხედვით), რაც დადგინდა, რომ არის ოპტიმალური (იხ. ქვემოთ). ექსპერიმენტები ჩავატარეთ ბიოკომპოზიტში **ბზ**-ის შუალედური შემცველობისას (20%) გამოვიყენეთ რა **ზან**-ად **Tween-20**. არაორგანული ფაზის მორევის სიჩქარე იყო 500 ბრუნ/წთ (რომელიც მისაღებია 100 ნმ-ზე გაცილებით მცირე ნანონაწილაკების ფორმირებისათვის, იხ. ქვემოთ). შევნიშნავთ, რომ თუ ნანოპრეციპიტაციას ვახდენდით სუფთა წყალში (**ზან**-ის გარეშე), ყველა შემთხვევაში ადგილი ჰქონდა ნაწილაკების აგრეგაციას და პოლიმერის გამოლექვას.

შედეგები, მიღებული ორივე ფსევდოპროტეინისათვის (ცხრ.1), გვიჩვენებს, რომ ნანონაწილაკების ზომების გათვალისწინებით (MPD $\ll 100$ ნმ) საუკეთესოა **დმსო**, თუმცა

ნაწილაკების დისპერსიულობის (PDI) თვალსაზრისით ჩამორჩება სხვა გამოყენებულ გამხსნელებს. მივანიჭეთ რა პრიორიტეტი ნაწილაკების ზომებს, შემდგომი ექსპერიმენტები ჩავატარეთ დმსო-ში.

შევისწავლეთ ნანონაწილაკების ფორმირების პროცესი ბზ-ის სხვადასხვა კონცენტრაციისას (ფსევდოპროტეინის მატრიქსის 10, 20, 30%). მიღებული ნანოკომპოზიტების მახასიათებლები. მოყვანილია ცხრ. 2-ში. შედეგებიდან ჩანს, რომ ორივე ფსევდოპროტეინის შემთხვევაში ნანონაწილაკების საშუალო დიამეტრი (MPD) და პოლიდისპერსიულობის ინდექსი (PDI) მნიშვნელოვნად არ არის დამოკიდებული ბიოკომპოზიტურ ნარევეში ბზ-ის შემცველობაზე. შევნიშნავთ, რომ ბზ-ის კონცენტრაციის მატება იწვევს ნანონაწილაკების Z-პოტენციალის გაზრდას,

ცხრილი 1. ორგანული ფაზის (გამხსნელი+ფსევდოპროტეინი) ბუნების გავლენა ნანონაწილაკების ზომებზე *

გამხსნელი	MPD (nm) $\pm$ SD	PDI $\pm$ SD	MPD (nm) $\pm$ SD	PDI $\pm$ SD
	ფსევდოპროტეინი 4F4		ფსევდოპროტეინი 8L6	
დმფ	138.00 $\pm$ 0.31	0.116 $\pm$ 0.011	117.00 $\pm$ 0.4	0.180 $\pm$ 0.006
დმსო	50.29 $\pm$ 0.40	0.480 $\pm$ 0.012	39.55 $\pm$ 0.20	0.309 $\pm$ 0.010
აცეტონი	-	-	192.00 $\pm$ 0.50	0.105 $\pm$ 0.003

* ორგანული ფაზის კონცენტრაცია 3.0 მგ/მლ, ბზ-ის შემცველობა 20%; არაორგანული ფაზის მორევის სიჩქარე 500 ბრუნ/წთ, ზან-ი Tween-20;

MPD - ნაწილაკის საშუალო დიამეტრი, PDI - პოლიდისპერსიულობის ინდექსი, SD - სტანდარტული გადახრა. სამი გაზომვის საშუალო.

ცხრილი 2. ფსევდოპროტეინების ბაზაზე მიღებული ნანონაწილაკების მახასიათებლები ბიოკომპოზიტში ბზ-ის სხვადასხვა % კონცენტრაციისას *

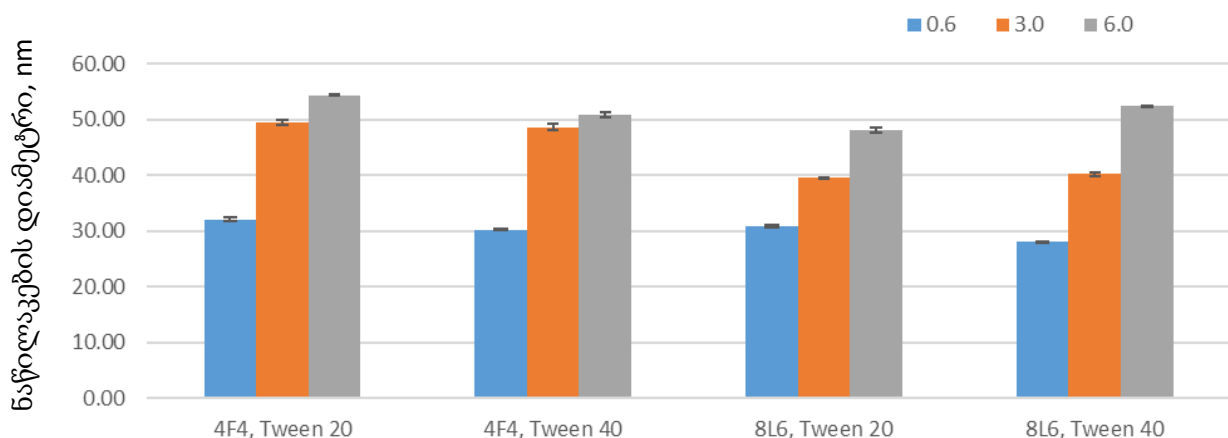
ბზ-ის % შემცველობა ბიოკომპო- ზიტში	MPD (nm) $\pm$ SD	PDI $\pm$ SD	Z-პოტენცი- ალი, mV	MPD (nm) $\pm$ SD	PDI $\pm$ SD	Z- პოტენცი ალი, mV
	ფსევდოპროტეინი 4F4			ფსევდოპროტეინი 8L6		
10	49.51 $\pm$ 0,2	0.404 $\pm$ 0,010	-17.9 $\pm$ 0,4	45.90 $\pm$ 0,4	0.476 $\pm$ 0.010	14.93 $\pm$ 0.2
20	49.54 $\pm$ 0,4	0.470 $\pm$ 0,012	-18.7 $\pm$ 0,6	39.50 $\pm$ 0,1	0.316 $\pm$ 0,008	17.90 $\pm$ 0,2
30	53.05 $\pm$ 0,4	0.490 $\pm$ 0,010	-21.2 $\pm$ 0,3	42.52 $\pm$ 0,2	0.505 $\pm$ 0,014	20.46 $\pm$ 0,4

* ორგანული ფაზის კონცენტრაცია 3.0 მგ/მლ დმსო. არაორგანული ფაზის მორევის სიჩქარე 500 ბრუნ/წთ, ზან-ი Tween-20;
MPD - ნაწილაკის საშუალო დიამეტრი, PDI-პოლიდისპერსიულობის ინდექსი, SD-სტანდარტული გადახრა. სამი გაზომვის საშუალო .

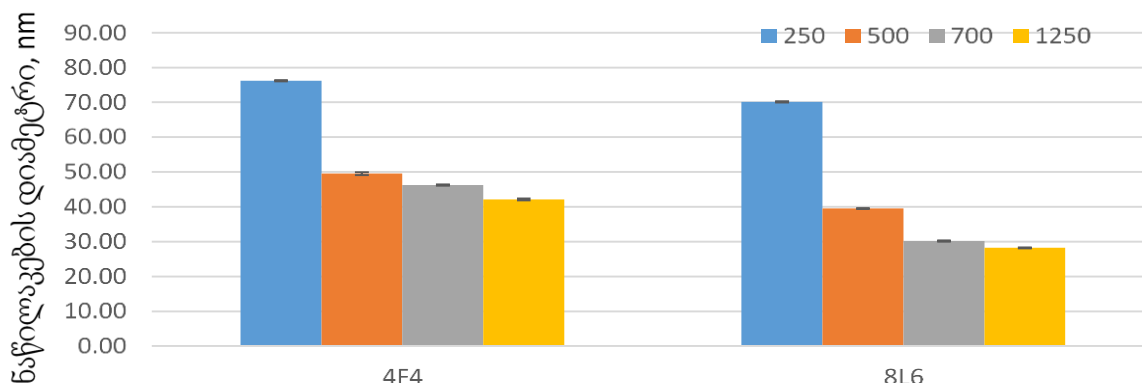
რაც დადებითი ფაქტორია ნანოსუსპენზიების მდგრადობის თვალსაზრისით. შემდეგომ ექსპერიმენტებში, ნანონაწილაკების ყველა მახასიათებლის გათვალისწინებით, სამუშაო კონცენტრაციად ავირჩიეთ 20% ზზ.

შევისწავლეთ ორგანულ ფაზაში ბიოკომპოზიტის კონცენტრაციის გავლენა ფორმირებადი ნანონაწილაკების ზომებზე. ნახ. 1-ზე მოყვანილია მიღებული შედეგები ორივე მარტიქსისათვის (4F4 და 8L6) და ორივე ზან-ის (Tween-20 და Tween-40) გამოყენებით. ფსევდოპროტეინული მატრიქსებიდან უფრო მცირე ზომის ნანონაწილაკებს იძლევა 8L6. ორგანულ ფაზაში ბიოკომპოზიტის ყველა კონცენტრაციისას მიღებული ნანონაწილაკების ზომები სასურველ ფარგლებშია (< 100 ნმ), თუმცა ოპტიმალურად მივიჩნიეთ 3.0 მგ/მლ, რამეთუ 0.6 მგ/მლ კონცენტრაციისას აქტიური პროდუქტის შემცველობა ნანოსუსპენზიაში ძალიან დაბალია, ხოლო 6.0 მგ/მლ შემთხვევაში მოსალოდნელია ნანონაწილაკების კოაგულაცია. რაც შეეხება ზან-ებს, ორივე შემთხვევაში მიღებული შედეგები პრაქტიკულად იდენტურია. უპირატესობა მივანიჭეთ Tween-20-ს, როგორც უფრო ჰიდროფილურ ზან-ს - Tween-40-ის ჰიდროფილურ-ლიპოფილური ბალანსი (HLB) უდრის 15.6, ხოლო Tween-20-ის ≈ 16.7 ; ჩავთვალეთ, რომ ამ უკანასკნელის მოცილება ნარევიდან დიალიზით წყლის მიმართ, უფრო სრულყოფილი იქნებოდა

დავადგინეთ ასევე, რომ, ორგანული ფაზის დამატებისას, ბიოკომპოზიტური ნანონაწილაკების ზომებზე გავლენას ახდენს არაორგანული ფაზის მორევის სიჩქარე (ნახ. 2). ამ მონაცემების თანახმად, არაორგანული ფაზის მორევის სიჩქარისას 500-1250 ბრ/წთ ნაწილაკების ზომები სასურველ ფარგლებშია (50 ნმ და ქვემოთ).



ნახ. 1. ორგანული ფაზის კონცენტრაციის (მგ/მლ) გავლენა ნანოკომპოზიტების ზომებზე **Tween-20** და **Tween-40** -ის თანაობისას. კონცენტრაციები: 0.6, 3, 6.0 მგ/მლ **დმსო**-ში; არაორგანული ფაზის მორევის სიჩქარე 500 ბრ/წთ; **ბზ**-ის შემცველობა ბიოკომპოზიტში 20%.



ნახ.2. წყლის ფაზის მორევის სიჩქარის გავლენა ნაწილაკების ზომებზე **Tween-20**-ის თანაობისას. მორევის სიჩქარე: 250, 500, 700 და 1250 ბრ/წთ. ორგანული ფაზის კონცენტრაცია 3.0 მგ/მლ **დმსო**-ში; **ბზ**-ის შემცველობა ბიოკომპოზიტში 20%;

ნანოკომპოზიტების მდგრადობა.

ნანოპრეპარატების პერსპექტული გამოყენების თვალსაზრისით მბიშვებლოვანია ნანოსუსპენზიების მდგრადობა, მათი შენახვის პირობების დადგენა. შევისწავლეთ ნანოსუსპენზიების მდგრადობა ოთახის ტემპერატურაზე და მაცივარში. სტაბილურობას ვაფასებდით ნანანაწილაკების ზომების (MPD) ცვლილებით დროში. მიღებული შედეგები მოყვანილი ცხრ. 3-ში გვიჩვენებს, რომ უფრო მაღალი მდგრადობით გამოირჩევა ფსევდოპროტეინ 8L6-ის საფუძველზე მიღებული ნანოსუსპენზიები, რომელთა ნაწილაკების ზომები არ იცვლება 3 თვის განმავლობაში ოთახის ტემპერატურაზეც კი, მაშინ როდესაც 4F4-ის საფუძველზე მიღებული ნანოსუსპენზიები, 3 თვის განმავლობაში განიცდიან სრულ აგრეგაციას და ამ პერიოდის განმავლობაში მდგრადობას ინარჩუნებენ მხოლოდ მაცივარში შენახვისას.

ცხრილი 3. ფსევდოპროტეინების საფუძველზე მიღებული ნანოკომპოზიტების სტაბილურობა შენახვისას.

დრო	ოთახის ტემპ.	მაცივარი	ოთახის ტემპ.	მაცივარში
	4F4 , MPD (nm) $\pm$ SD *		8L6, MPD (nm) $\pm$ SD *	
ახლად-მიღებული	49.54 $\pm$ 0,4	49.54 $\pm$ 0,4	39.50 $\pm$ 0,1	39.50 $\pm$ 0,1
ერთი კვირა	51.20 $\pm$ 0.3	49.70 $\pm$ 0,4	39.59 $\pm$ 0.2	40.25 $\pm$ 0.3
ერთი თვე	55.24 $\pm$ 0.4	52.15 $\pm$ 0.3	42.24 $\pm$ 0.4	40.90 $\pm$ 0.2
სამი თვე	სრული აგრეგაცია	54.64 $\pm$ 0.4	45.14 $\pm$ 0.5	42.50 $\pm$ 0.3

* მიღებულია **Tween 20**-ის თანაობისას.

დასკვნა

განხორციელებული კვლევის საფუძველზე მიღებულია **ბზ**-ის შემცველი ნანოკომპოზიტები. მატრიქსებად გამოყენებულია ამინომჟავური ბიოდეგრადირებადი პოლიმერები ე.წ. ფსევდოპროტეინები. შესწავლილია როგორც ნანოკომპოზიტების ფორმირების პირობები, ასევე მათი მდგრადობა შენახვისას.

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე **ბზ**-ის შემცველი ბიოკომპოზიტური ნანოპრეპარატის მისაღებად საუკეთესოდ მივიჩნიეთ:

- მატრიქსად ფსევდოპროტეინი - **8L6**;
- გამხსნელად (ორგანულ ფაზად) - **დმსო**;
- ორგანული ფაზის კონცენტრაციად - 3.0 მგ/მლ;
- ბენზოილის ზეჟანგის შემცველობად ორგანულ ფაზაში - 20%;
- ზედაპირულად აქტიური ნაერთად - **Tween-20**.
- არაორგანული ფაზის მორევის სიჩქარედ - 500 - 1250 ბრუნი/წთ.

ვვარაუდობთ, რომ მიღებული ნანოკომპოზიტები პერსპექტიულია სამკურნალო პრეპარატებად ჰიპოქსიით მიმდინარე სხვადასხვა დაავადებათა (იშემიის, ტრამვების და სხვ.), ასევე სიმსივნეების და ინფექციური დაავადებების სამკურნალოდ [33,34], რის მისაღწევადაც საჭიროა ხანგრძლივი, კომპლექსური *in vitro* და *in vivo* კვლევები. კვლევის შემდეგ ეტაპად დაგეგმილი გვაქვს ნანოკომპოზიტებიდან ჰიდროლაზებით კატალიზებული **ბზ**-ის ელუცია ცდებში *in vitro*.

ლიტერატურა

1. Cavalli, R., Akhter, A.K., Bisazza, A., Giustetto, P., Trotta, F., Vavia, P. 2010. Nanosponge formulations as oxygen delivery systems. *Int. J Pharm*, 402 (1-2), 254–257.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.09.025>.
2. Northup, A., Cassidy, D. 2008. Calcium peroxide (CaO₂) for use in modified Fenton chemistry. *J Hazard Mater*, 152, 1164–1170. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.096>
3. Dluzneski, P.R., Salvador, T., Kozel, T.H. 2017. Encapsulation of peroxides for skin applications. Patent # CA3016436A (Canada).
4. Jelvehgari, M., Siah-Shadbad, M.R., Azarmi, S., Martin, G.P., Nokhodchi, A. 2006. The microsphere delivery system of benzoyl peroxide: Preparation, characterization and release studies. *Intern. J. of Pharmac.*, 308(1–2), 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2005.11.001>.
5. Ingebrigtsen, S.G., Škalko-Basnet, N., Cavalcanti Jacobsen, C., Holsæter, A.M. 2017. Successful co-encapsulation of benzoyl peroxide and chloramphenicol in liposomes by a novel manufacturing method - dual asymmetric centrifugation. *Eur. J. Pharm. Sci.*, 97, 192–199.

<https://doi.org/10.1016/j.ejps.2016.11.017>.

6. Ward, K., Huvard, G., Carpenter, E., Sandhu, G., Barbee, R., Spiess, B. 2007. Methods and Compositions for Controlled and Sustained Production and Delivery of Peroxides and/or Oxygen for Biological and Industrial Applications. United States Patent # 20090169630A1.
7. Chin, K., Khattak, S.F., Bhatia, S.R., Roberts, S.C. 2008. Hydrogel-perfluorocarbon composite scaffold promotes oxygen transport to immobilized cells. *Biotechnol. Prog.*, 24, 358–366. <https://doi.org/10.1021/bp070160f>.
8. Goh, F., Gross, J.D., Simpson, N.E., Sambanis, A. 2010. Limited beneficial effects of perfluorocarbon emulsions on encapsulated cells in culture: Experimental and modeling studies. *J. Biotechnol.* 150, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.08.013>.
9. Ward, C.L., Corona, B.T., Yoo, J.J., Harrison, B.S., Christ, G.J. 2013. Oxygen generating biomaterials preserve skeletal muscle homeostasis under hypoxic and ischemic conditions. *PLOS One*, 8(8), e72485.
10. Lee, H.Y., Kim, H.W., Lee, J.H., Oh, S.H. 2015. Controlling oxygen release from hollow microparticles for prolonged cell survival under hypoxic environment. *Biomaterials*, 53, 583–591. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.02.117>.
11. Harrison, B.S., Eberli, D., Lee, S. J., Atala, A., Yoo, J. J. 2007. Oxygen producing biomaterials for tissue regeneration. *Biomaterials*, 28 (31), 4628–4634. <https://doi.org/10.1016/j.bj.biomaterials.2007.07.003>.
12. Oh, S.H., Ward, C.L., Atala A., Yoo J.J., Harrison B.S. 2009. Oxygen generating scaffolds for enhancing engineered tissue survival. *Biomaterials*, 30, 757–762. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.09.065>.
13. Steg, H., Buizer, A.T., Woudstra, W., Veldhuizen, A.G., Bulstra, S.K., Grijpma, D.W., Kuijer, R. 2015. Control of oxygen release from peroxides using polymers. *J. Mat. Sci., Materials in Medicine*, 26, 207. <https://doi.org/10.1007/s10856-015-5542-z>
14. Dehghani, F., Annabi, N. 2011. Engineering porous scaffolds using gas-based techniques. *Curr. Opin. Biotechnol*, 22(5), 661–666. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.04.005>.
15. Li, Z., Guo, X., Guan, J. 2012. An oxygen release system to augment cardiac progenitor cell survival and differentiation under hypoxic condition. *Biomaterials*, 33(25), 5914–5923. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2012.05.012>
16. Seyyed, Nasrollah, S.A., Karimi-Soflou, R., Karkhaneh, A. 2023. Photo-click crosslinked hydrogel containing MgO₂-loaded PLGA microsphere with concurrent magnesium and oxygen release for bone tissue engineering. *Materialstoday Chemistry*, 28, 101389. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101389>

17. Tiedge, M., Lortz, S., Drinkgern, J., Lenzen, S. 1997. Relation between antioxidant enzyme gene expression and antioxidative defense status of insulin-producing cells. *Diabetes*, 46, 1733–1742. <https://doi: 10.2337/diab.46.11.1733>
18. Gao, C., Huang, Y., Zhang, L., Wei, P., Jing, W., Wang, H., Yuan, Z., Zhang, D., Yu, Y., Yang, X., Cai, Q. 2022. Self-reinforcement hydrogel with sustainable oxygen-supply for enhanced cell ingrowth and potential tissue regeneration. *Biomater. Advan.*, 141, 213105. <https://doi: 10.1016/j.bioadv.2022.213105>.
19. Gibbins, B.L. Hopman, L. D. 2007. Matrices/dressing for oxygen delivery to tissues – are useful only for localized delivery of oxygen directly to tissues. US Patent #7,160,553.
20. Pedraza, E., Coronel, M.M., Fraker, C.A., Ricordi, C., Stabler, C.L. 2012. Preventing hypoxia-induced cell death in betacells and islets via hydrolytically activated, oxygen-generating biomaterials. *PNAS*, 109 (11), 4245–4250. <https://doi: 10.1073/pnas.1113560109>.
21. Mallepally, R.R., Parrish, Ch.C., Hugh, M.M.Mc., Ward, K.R. 2014. Hydrogen peroxide filled poly(methyl methacrylate) microcapsules: Potential oxygen delivery materials. *Int. J. Pharm.*, 475 (1–2), 130–137.
22. Keller, D.C., Buechel, M. 2017. Periodontal Treatment with Direct Medication Delivery of Hydrogen Peroxide and Oxygen. *Oral health case Rep.*, 3,133. <https://doi: 10.4172/ 2471-8726.1000133>
23. Waite, A.J., Bonner, J.S. 1999. Autenrieth R. Kinetics and stoichiometry of oxygen release from solid peroxides. *Environ Eng Sci.*, 6, 187–199. <https://doi:10.1089/ees.1999.16.187>
24. Yousefzade. O., Katsarava, R., Puiggali, J. 2020. Biomimetic Hybrid Systems for Tissue Engineering. *Biomimetics*, 5, 49; doi:10.3390/biomimetics5040049.
25. Katsarava, R., Beridze, V., Arabuli, N., Kharadze, D., Chu, C.C., Won, C.Y. 1999. Amino acid-based Bioanalogous polymers. Synthesis, and study of regular poly(ester amide)s based on bis(α -amino acid)- ω -alkylene diesters, and aliphatic dicarboxylic acids. *J. Polymer Sci., pol.chem.*, 37, 391–407.
26. Tsitlanadze, G., Kviria, T., Chu, C.C., Katsarava, R. 2004. Biodegradation of amino acid based poly(ester amide)s: in vitro study using potentiometric titration. *J Mater Sci.: Mater in Medicine* 15, 185–190.
27. Tsitlanadze, G., Machaidze, M., Kviria, T., Djavakhishvili, N., Chu, C.C., Katsarava. R. 2004. Biodegradation of amino acid based poly(ester amide)s: in vitro weight loss and preliminary in vivo studies. *J. Biomater. Sci., Polym. Ed.*, 15 (4), 1–24.
28. Kantaria, T., Kantaria, T., Kobauri, S., Ksovreli, M., Kachlishvili, T., Kulikova, N., Tugushi, D., Katsarava, R. 2016. Biodegradable Nanoparticles Made of Amino-Acid-Based Ester Polymers:

Preparation, Characterization, and in Vitro Biocompatibility Study. Appl. Sci., 6, 444; <https://doi.org/10.3390/app6120444>

29. Katsarava, R., Kantaria, Ten., Kobauri, S. 2021. Pseudo-proteins and related synthetic amino acid based polymers (Review). J. Mater. Educ., 43 (1-2), 33-80.

30. Ghaffar, A., Draaisma, G.J.J., Mihov, G., Dias, A.A., Schoenmakers, P.J., van der Wal, S.J. 2011. Monitoring the in Vitro Enzyme-Mediated Degradation of Degradable Poly(ester amide) for Controlled Drug Delivery by LC-ToF-MS. Biomacromolecules, 12, 3243–3251.

31. Sun, H., Meng, F., Dias, A.A., Hendriks, M., Feijen, J., Zhong, Z. 2011. α -Amino Acid Containing Degradable Polymers as Functional Biomaterials: Rational Design, Synthetic Pathway, and Biomedical Applications. Biomacromolecules, 12, 1937–1955.

32. Kastle, J.H., Loevenhart, A.S. 1901. On the Nature of Certain Oxidizing Ferments. American Chemical Journal, 2, 539–566.

33. Plewig, G., Kligman, A.M. 2012. Acne and Rosacea (3 ed.). Springer Science & Business Media., p. 613.

34. Chen, Q., Espey, M.G., Krishna, M.C., Mitchell, J.B., Corpe, C.P., Buettner, G.R., Shacter, E., Levine, M. 2005. Pharmacologic ascorbic acid concentrations selectively kill cancer cells: Action as a pro-drug to deliver hydrogen peroxide to tissues. PNAS, 102 (38) 13604–3609.

Pseudoprotein-Based Bionanocomposites Containing Benzoyl Peroxide

Abstract:

The development of new biomedical technologies provides an opportunity to introduce new methods of treatment in medicine. Among them, one of the interesting and promising is the technology of controlled/sustainable release and supply of peroxides and/or oxygen in hypoxia, to improve cell viability and tissues' functions. Many diseases or medical procedures require increased oxygenation. Oxygen delivery can reduce cell apoptosis, necrosis and failure of tissue formation (especially during transplantation). The presented work deals with the preparation of new nanocomposites based on pseudoproteins with the purpose to provide delivery of oxygen in sustained/controlled release fashion. Among the numerous pseudoproteins previously obtained by us, two poly(ester amide)s labelled as **4F4** and **8L6** and made on the basis of natural α -amino acids phenylalanine and leucine were selected as biodegradable matrices for making the goal nanocomposites containing benzoyl peroxide as a source of oxygen. The influence of various factors on the fabrication of nanocomposites has been studied along with the stability of the obtained composites upon storage.

Keywords:: pseudoproteins, nanocomposites, benzoyl peroxides, oxygen-releasing systems;

ავტორები:

დარეჯან ხარაძე - ი. ბერიტაშვილის ექსპერიმენტული ბიომედიცინის ცენტრის მთავარი მეცნიერ თანამშრომელი, ქიმიის მეცნიერებათა დოქტორი; ელ.ფოსტა: mn.kharadze@gmail.com

თინა ოშიაძე - ი. ბერიტაშვილის ექსპერიმენტული ბიომედიცინის ცენტრის უფროსი მეცნიერ თანამშრომელი, ქიმიის მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი

ლარისა ყირმელაშვილი - ი. ბერიტაშვილის ექსპერიმენტული ბიომედიცინის ცენტრის მეცნიერ თანამშრომელი, ქიმიის მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი

თემურ ქანთარია -- საქართველოს აგრარული უნივერსიტეტის ქიმიისა და მოლეკულური ინჟინერიის ინსტიტუტის მეცნიერ თანამშრომელი, ქიმიის მეცნიერებათა აკადემიური დოქტორი

რამაზ ქაცარავა - საქართველოს აგრარული უნივერსიტეტის ქიმიისა და მოლეკულური ინჟინერიის ინსტიტუტის დირექტორი, აკადემიკოსი, ქიმიის მეცნიერებათა დოქტორი;

რძეში და რძის პროდუქტში აფლატოქსინ M_1 -ის განსაზღვრის ქრომატო-მას სპექტრომეტრული (LC MS/MS) მეთოდის შემუშავება და ვალიდაცია

ჩიკვილაძე თამარი¹, ზარამიძე ქეთევანი², ჩაფიძე ნინო², ტატანაშვილი მარიამი¹,
ოთარაშვილი თამარი¹

თსუ ფარმაცევტული, ტოქსიკოლოგიური და სამედიცინო ქიმიის დეპარტამენტი¹
„გლობალტესტის“ საგამოცდო ლაბორატორია²

აბსტრაქტი

სოფლის მეურნეობის პროდუქტზე მზარდი ობის სოკოს მრავალი სახეობა გამოყოფს ტოქსიკურ ნივთიერებებს, რომლებსაც მიკოტოქსინები ეწოდება.

აფლატოქსინი B_1 ყველაზე გავრცელებული, ძლიერ ტოქსიკური და კანცეროგენულია. მას წარმოქმნის *Aspergillus*-ის გვარის სოკოები, რომლებიც იზრდება ცხელ და ნოტიო პირობებში შენახულ მარცვლეულზე, თესლსა და ნაყოფზე.

აფლატოქსინი M_1 არის აფლატოქსინ B_1 -ის ჰიდროქსილირებული ფორმა, მისიტოქსიკური მეტაბოლიტი, წარმოიქმნება იმ ცხოველების ღვიძლში, რომლებიც იღებენ აფლატოქსინ B_1 -ით დაბინძურებულ საკვებს.

აფლატოქსინი M_1 გროვდება ცხოველის ორგანიზმში და გამოიყოფა რძესთან ერთად, რაც საფრთხეს უქმნის მიმღები სახეობის - ადამიანის ჯანმრთელობას. აფლატოქსინი M_1 ძლიერი კანცეროგენია, იწვევს აგრეთვე ღვიძლის და იმუნური სისტემის დაზიანებას.

მაღალი ტოქსიკურობის და ჰეპატოკანცეროგენული პოტენციალის გამო, რძესა და რძის პროდუქტებში აფლატოქსინ M_1 - ის დასაშვები დონე მკაცრად რეგულირდება განვითარებულ ქვეყნებში, მათ შორის საქართველოშიც. ჩვენს ქვეყანაში აფლატოქსინ M_1 - ის დასაშვებ ზღვრად დადგენილია **0.05 მკგ/კგ**.

კვლევის მიზანი იყო აფლატოქსინ M_1 -ის განსაზღვრისთვის ქრომატო - მას - სპექტრომეტრული მეთოდის შემუშავება და ვალიდაცია.

ჩვენ მიერ შემუშავებული და ვალიდირებულია რძეში და რძის პროდუქტში აფლატოქსინ M_1 -ის განსაზღვრის ქრომატო მას სპექტრომეტრული მეთოდი;
აფლატოქსინ M_1 -ის თვისობრივი განსაზღვრის ზღვარად განისაზღვრა: რძეში - 0.003 მკგ/კგ, რძემჟავა პროდუქტში - 0.0034 მკგ/კგ, ყველში - 0.0038 მკგ/კგ, ნალებში - 0.0036 მკგ/კგ;

აფლატოქსინ M_1 -ის რაოდენობრივი განსაზღვრის ზღვარად განისაზღვრა: რძეში - 0.03 მკგ/კგ, რძემჟავა პროდუქტში - 0.034 მკგ/კგ, ყველში - 0.038 მკგ/კგ, ნალებში - 0.036 მკგ/კგ;

მიღებული შედეგები მიუთითებს ანალიზური მეთოდების მიმართ წაყენებული მოთხოვნებისადმი შერჩეული მეთოდის შესაბამისობაზე.

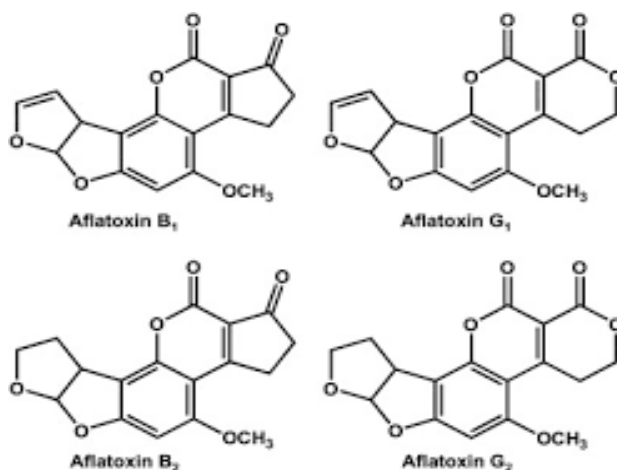
საკვანძო სიტყვები: მიკოტოქსინები, აფლატოქსინი, რძის პროდუქტები, მაღალეფექტური სითხური ქრომატოგრაფია, მას-სპექტრომეტრია

სოფლის მეურნეობის პროდუქტზე მზარდი ობის სოკოს მრავალი სახეობა გამოყოფს ტოქსიკურ ნივთიერებებს, რომლებსაც მიკოტოქსინები ეწოდება.

მიკოტოქსინები სხვადასხვა სახეობის სოკოს მეორადი მეტაბოლიტებია. ერთმანეთისგან განსხვავდება როგორც ქიმიური სტრუქტურით ასევე ბიოლოგიური ეფექტებით.

მიკოტოქსინების ერთ-ერთი ყველაზე შესწავლილი ჯგუფია აფლატოქსინები, რომლებსაც *Aspergillus* -ის გარკვეული სახეობები წარმოქმნის. ეს ტოქსიკური მეტაბოლიტები გვხვდება სასოფლო-სამეურნეო საკვებში, თხილში, მარცვლეულში, სოიოსა და ცხოველთა საკვებში. დაბინძურება, როგორც წესი, ხდება მაღალი ტემპერატურის და ტენიანობის პირობებში, ანუ ნიადაგზე, თესლზე, მარცვლეულსა და ღობის პროცესში მყოფ მცენარეზე ობის სოკოს ზრდისთვის ხელსაყრელ გარემოში. აფლატოქსინები მიეკუთვნება დიფურანოკუმარინების კლასს, ისინი კუმარინის მაღალჩანაცვლებული ნაერთებია, შეიცავს კონდენსირებულ დიჰიდროფუროფურანის ციკლს.

არსებობს აფლატოქსინების ოთხი ძირითადი ტიპი: B_1 , B_2 , G_1 და G_2 . [6.7]



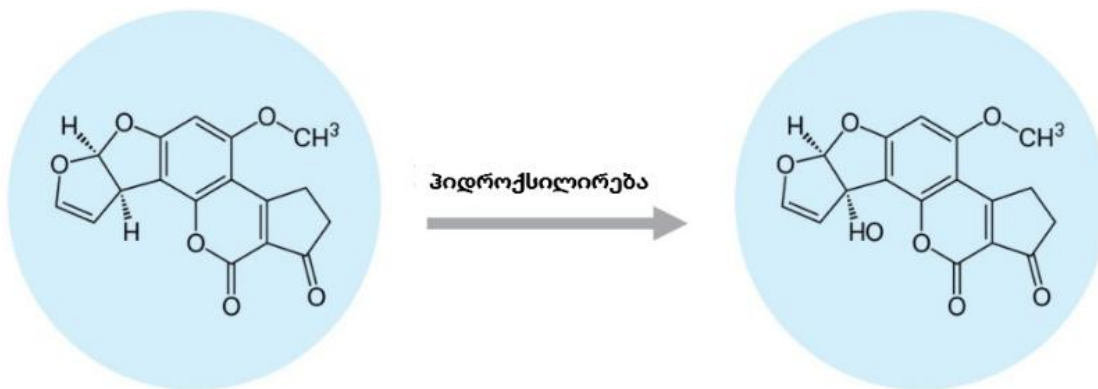
სურ.1 აფლატოქსინების ძირითადი ტიპები

აფლატოქსინები გავლენას ახდენენ იმუნიტეტზე სუბკლინიკური კონცენტრაციებით. აფლატოქსინური ინფექციები მძიმეა, ნაკლებად ექვემდებარება მკურნალობას და გართულებების მაღალი რისკი აქვთ. ეს ნაერთები შეიძლება გადაეცეს შთამომავლობას

ორსულობის ან ლაქტაციის პერიოდში. დადასტურებულია ამ ნაერთების კანცეროგენული, მუტაგენური, ტერატოგენული და იმუნოსუპრესიული ეფექტები ცხოველებსა და ადამიანებზე. ღვიძლი კი მთავარ სამიზნე ორგანოდ განსაზღვრა. კიბოს კვლევის საერთაშორისო სააგენტომ (IARC) აფლატოქსინები აღიარა კანცეროგენულად (ჯგუფი 1) და პოტენციურად კანცეროგენულად ადამიანისთვის. მთავარ სამიზნე ორგანოდ განისაზღვრა ღვიძლი.

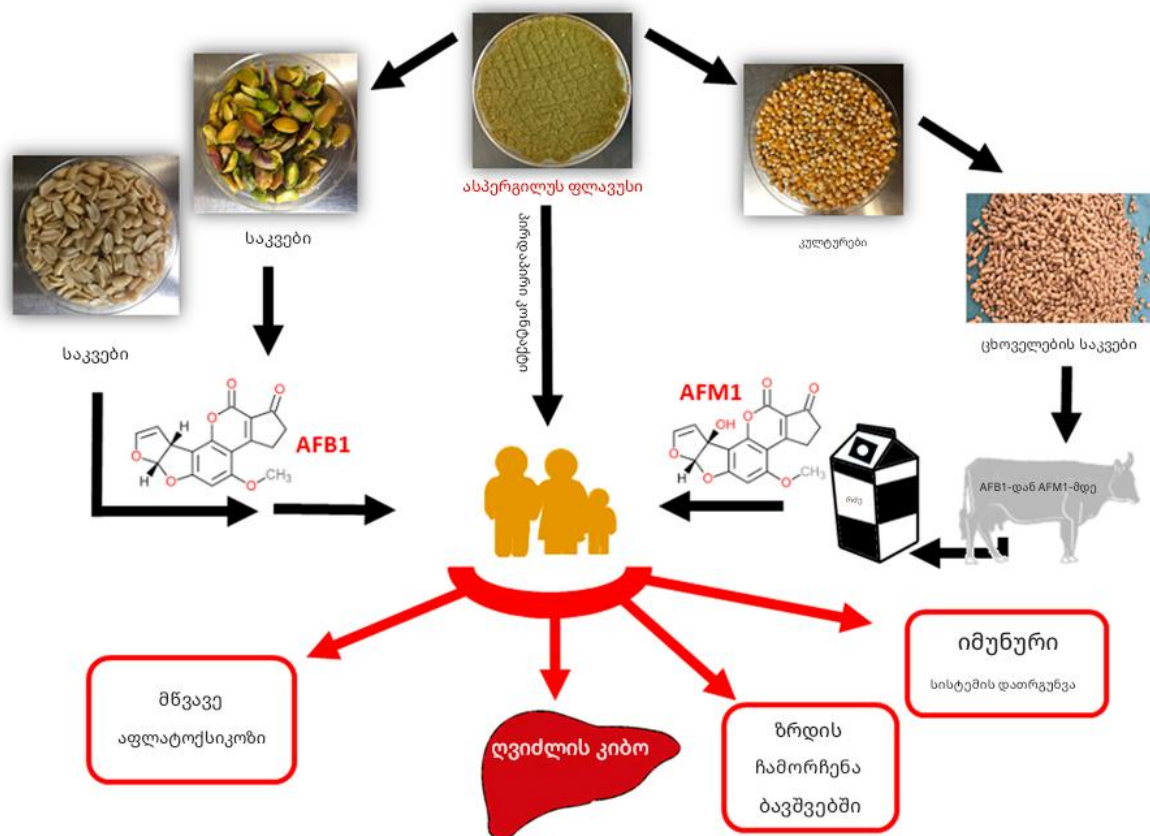
აფლატოქსინი B₁ ყველაზე გავრცელებული, ძლიერ ტოქსიკური და კანცეროგენულია. მას წარმოქმნის *Aspergillus*-ის გვარის სოკოები, რომლებიც იზრდება ცხელ და ნოტიო პირობებში შენახულ მარცვლეულზე, თესლსა და ნაყოფზე.

აფლატოქსინი M₁ არის აფლატოქსინ B₁-ის ჰიდროქსილირებული ფორმა (სურ. 1) მისი ტოქსიკური მეტაბოლიტი, წარმოიქმნება ციტოქრომ P450 1A2 (CYP1A2) მოქმედებით იმ ცხოველების ღვიძლში, რომლებიც იღებენ აფლატოქსინ B₁-ით დაბინძურებულ საკვებს.



სურ. N2 აფლატოქსინი B₁ და მისი მეტაბოლიტი - აფლატოქსინ M₁

აფლატოქსინი M₁ გროვდება ცხოველის ორგანიზმში და გამოიყოფა რძესთან ერთად, რაც საფრთხეს უქმნის მიმღები სახეობის - ადამიანის ჯანმრთელობას. აფლატოქსინი M₁ ძლიერი კანცეროგენია, იწვევს აგრეთვე ღვიძლის და იმუნური სისტემის დაზიანებას, ონკოგენების გააქტივებას.



სურ. N3 AFB1 -ის და AFM1 -ის ორგანიზმში მოხვედრის გზები და ტოქსიკურობა

ორივე ტოქსინს მსგავსი ქიმიური თვისებები აქვს: ისინი მცირედ ხსნადია წყალში, უხსნადია არაპოლარულ გამხსნელებში და კარგად ხსნადია პოლარულ ორგანულ გამხსნელებში. აფლატოქსინებს ახასიათებთ მაღალი თერმული სტაბილურობა ($>100^{\circ}\text{C}$). რძიდან და რძის პროდუქტებიდან მათი მოცილება ძნელია, განმეორებითი დამუშავების, მათ შორის პასტერიზაციის და ულტრაპასტერიზაციის შემდეგაც კი. ამიტომ, აფლატოქსინი M_1 გვხვდება არა მხოლოდ ნედლ რძეში, არამედ ულტრაპასტერიზებულ და პასტერიზებულ რძეში, იოგურტში, ყველში, რძის ფხვნილში, ჩვილ ბავშვთა საკვებში [6.7.9]

მაღალი ტოქსიკურობის და ჰეპატოკანცეროგენული პოტენციალის გამო, AFM1 ერთადერთი მიკოტოქსინია, რომლის დასაშვები დონე (MRLs) რძესა და რძის პროდუქტებში მკაცრად რეგულირდება, თუმცა ზღვრული მაჩვენებლები განსხვავდება ქვეყნების მიხედვით [4].

ცხრილი N1: სხვადასხვა ქვეყნებისთვის აფლატოქსინ M₁ - ის მაქსიმალური დასაშვები
ზღვრები (MPL)

ქვეყანა	აფლატოქსინ M ₁ - ის მაქსიმალური დასაშვები ზღვარი, მკგ/კგ	მატრიცა
ევროკავშირი	0.05	რძე/წედლი რძე
	0.25	ყველი
აშშ	0.5	რძე/წედლი რძე
შვეიცარია	0.05	რძე/წედლი რძე
	0.25	ყველი
	0.02	კარაქი
ავსტრალია	0.05	რძე/წედლი რძე
გერმანია	0.05	რძე/წედლი რძე
ბელგია	0.05	რძე/წედლი რძე
შვეცია	0.05	რძე/წედლი რძე
საფრანგეთი	0.05	რძე/წედლი რძე
იტალია	0.05	რძე/წედლი რძე
ირანი	0.05	რძე/იოგურტი/ნაყინი
	0.2	ყველი
	0.02	კარაქი
ჩინეთი	0.5	რძე/წედლი რძე
თურქეთი	0.05	რძე/წედლი რძე/იოგურტი
	0.025	ყველი
ნიდერლანდები	0.02	კარაქი
	0.2	ყველი
ბრაზილია	0.5	რძე
არგენტინა	0.5	რძე/წედლი რძე
პერუ	0.5	რძე/წედლი რძე
მექსიკა	0.5	რძე/წედლი რძე

ეკვადორი	0.5	რმე/წედლი რმე
ჩილი	0.05	რმე/წედლი რმე
იაპონია	0.5	რმე
ინდოეთი/პაკისტანი	0.5	რმე/წედლი რმე
მაროკო	0.05	რმე
	0.5	რმის ფხვნილი
ისრაელი	0.05	რმე/წედლი რმე
მალაიზია/სინგაპური	0.5	რმე/წედლი რმე
ვიეტნამი	0.5	რმე/წედლი რმე
სამხრეთ აფრიკა	0.05	რმე/წედლი რმე
კენია	0.5	რმე/წედლი რმე

სურსათში მიკოტოქსინების შემცველობა რეგულირდება საქართველოშიც [1.2.3]

ტექნიკური რეგლამენტის – „ცოცხალ ცხოველებსა და ცხოველური წარმოშობის სურსათში ზოგიერთი ნივთიერებისა (სუბსტანციის) და მათი ნარჩენების მონიტორინგის წესის დამტკიცების შესახებ“ საქართველოს მთავრობის 2016 წლის 18 იანვრის N22 დადგენილების დანართი N1 შესაბამისად, მიკოტოქსინები მიეკუთვნება ვეტერინარული პრეპარატების და დამაბინძურებლების „ბ ჯგუფს“ და აფლატოქსინ M₁ - ის დასაშვებ ზღვრად დადგენილია **0.05 მკგ/კგ** [1.]

აფლატოქსინ M₁-ის განსაზღვრისთვის ძირითადად გამოიყენება ისეთი მეთოდები, როგორიცაა ELISA (იმუნოფერმენტული მეთოდი) და მაღალეფექტური სითხური ქრომატოგრაფია ულტრაიისფერი დეტექტორით[4.5.8].

აფლატოქსინ M₁-ის ძალიან დაბალი დასაშვები ზღვარის გათვალისწინებით, განსაზღვრისთვის გამოყენებული მეთოდი უნდა იყოს ზედმიწევნით მგრძნობიარე. ამიტომ, „ტექნიკური რეგლამენტის – სასურსათო დანიშნულების ცხოველებში ფარმაცოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების (სუბსტანციების) ნარჩენების ანალიზის მეთოდების განხორციელების, ნიმუშის აღებისა და შედეგების ინტერპრეტაციის წესის დამტკიცების შესახებ საქართველოს მთავრობის 2023 წლის 5 ივნისის N212 დადგენილებების მოთხოვნების შესაბამისად, აფლატოქსინ M₁-ის განსაზღვრისთვის დამადასტურებელ მეთოდად განსაზღვრულია ქრომატო - მას სპექტრომეტრული მეთოდი[2].

კვლევის მიზანი: აფლატოქსინ M₁-ის განსაზღვრისთვის ქრომატო - მას - სპექტრომეტრული მეთოდის შემუშავება და ვალიდაცია.

კვლევის ობიექტები:

მიკოტოქსინების სტანდარტული ნიმუშები:

- აფლატოქსინი B₁ - (Sigma (Aldrich Chemical Company - გერმანია)
 - აფლატოქსინი M₁ - (Sigma (Aldrich Chemical Company - გერმანია)
- ლაბორატორიაში საანალიზოდ შემოსული რძე და რძის პროდუქტები:

რძე (ნედლი რძე, პასტერიზებული რძე, რძის ფხვნილი),

რძემჟავა პროდუქტები (იოგურტი, მაწონი, კეფირი, არაჟანი, ხაჭო),

ყველი,

ნაღები,

კარაქი

სულ 2000- მდე ნიმუში

კვლევის მეთოდები:

მაღალეფექტური სითხური ქრომატოგრაფია მას სპექტრომეტრული დეტექტორით

ექსპერიმენტული ნაწილი

ცხრილი N2: ანალიზის მეთოდების კლასიფიკაცია სპეციფიკაციათა მიხედვით

სპეციფიკაცია	დადასტურება		სკრინინგი		
	თვისებრი ვი	რაოდენობრი ვი	თვისებრი ვი	ნახევრად რაოდენობრივი	რაოდენობრი ვი
ნივთიერება (სუბსტანცია)	A	A, B	A, B	A, B	A, B
იდენტიფიკაცია	X	X			
CC α	X	X			
CC β			X	X	X
სარწმუნოება		X			
პრეციზიულობა		X		(X)	X
ფარდობითი მატრიცის ეფექტი/აბსოლუტური აღდგენა*		X			X

სელექტიურობა/სპეცი ფიურობა		X	X	X	X
სტაბილურობა**		X	X	X	X
მდგრადობა		X	X	X	X

X – საჭიროა ვალიდაციით დადასტურდეს, რომ სპეციფიკაციის მიმართ მოთხოვნები დაკმაყოფილებულია;

(X) –სიზუსტის მოთხოვნები არ საჭიროებს დაკმაყოფილებას ნახევრად რაოდენობრივი სკრინინგის მეთოდებისთვის. თუმცა, პრეციზიულობა უნდა იქნეს განსაზღვრული, რათა ანალიზის ცრუ შედეგების თავიდან აცილების მიზნით დადასტურდეს მეთოდის ვარგისობა;

A – აკრძალული ანუ დაუშვებელი/არაავტორიზებული ნივთიერებები (სუბსტანციები);

B – დაშვებული/ავტორიზებული ნივთიერებები (სუბსტანციები);

* თუ მატრიცაში არსებული საანალიზო ნივთიერების სტაბილურობის მონაცემები ხელმისაწვდომია სამეცნიერო ლიტერატურიდან ან სხვა ლაბორატორიიდან, ეს მონაცემები არ საჭიროებს ხელახლა განსაზღვრას შესაბამისი ლაბორატორიის მიერ. თუმცა, ხსნარში საანალიზო ნივთიერების სტაბილურობის ხელმისაწვდომ მონაცემებზე მითითება მისაღებია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ გამოყენებულია იდენტური პირობები.

** რელევანტურია MS მეთოდებისთვის, ვალიდაციის საშუალებით იმის დასადასტურებლად, რომ სამუშაო მახასიათებლების მოთხოვნები დაკმაყოფილებულია. მეთოდის ფარდობითი მატრიცული ეფექტი უნდა განისაზღვროს, თუ ეს ეფექტი არ იქნა შეფასებული ვალიდაციის პროცედურის დროს. მეთოდის აბსოლუტური აღდგენა უნდა განისაზღვროს, როდესაც დაკალიბრებისთვის არ არის გამოყენებული შიდა სტანდარტი ან მატრიცით ფორტიფიცირებული სტანდარტი.

ცხრილი N2-ს შესაბამისად, გამოკვლეულია შემდეგი პარამეტრები:

1. სპეციფიურობა;
 2. სისტემის ვარგისობა;
 3. თვისობრივი განსაზღვრის ზღვარი (LOD);
 4. რაოდენობრივი განსაზღვრის ზღვარი (LOQ);
 5. სწორხაზოვნება;
 6. სისწორე (პრეციზიულობა);
- შიდალაბორატორიული სისწორე;

7. სიზუსტე;

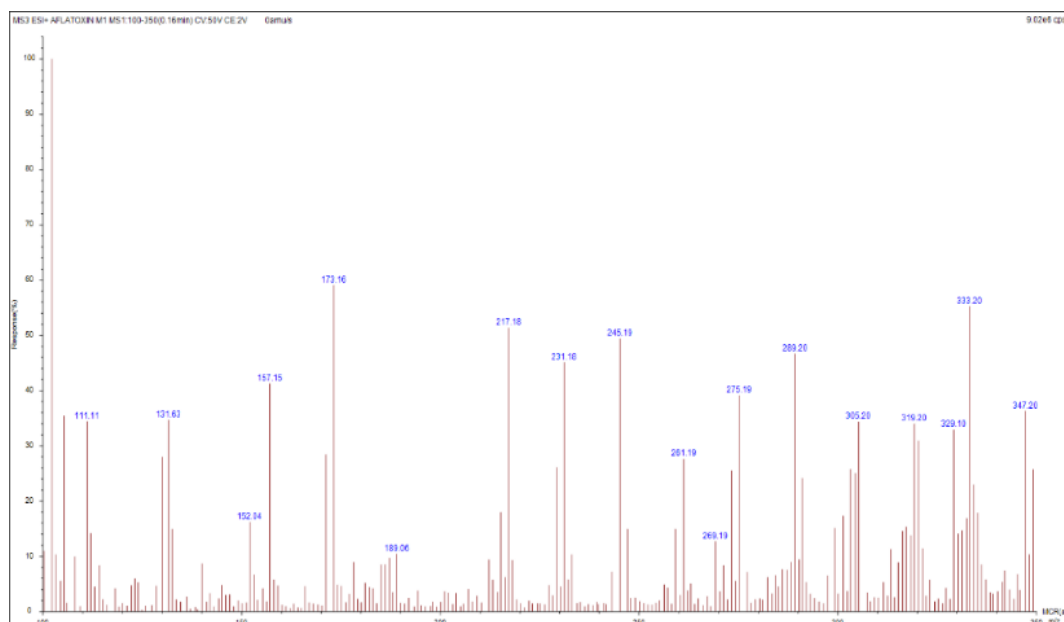
განსაზღვრა აგრეთვე:

- ფორტიფიცირებული მატრიციდან აღდგენის საშუალო მნიშვნელობა;
- შიდალაბორატორიული განმეორებადობა;
- მატრიცის ფაქტორი;
- მატრიცის ეფექტი;
- აფლატოქსინი M1-ის სტანდარტული ნიმუშის ხსნარის სტაბილურობა;
- ფორტიფიცირებული მატრიცის ექსტრაქტის სტაბილურობა;
- გაზომვის განუსაზღვრელობა თითოეული მატრიცისთვის;
- გადაწყვეტილების მიღების ზღვარი (CCA) და აღმოჩენის შესაძლებლობა (CCB) თითოეული მატრიცისთვის.

მას სპექტრომეტრული დეტექტირების პირობების შერჩევა:

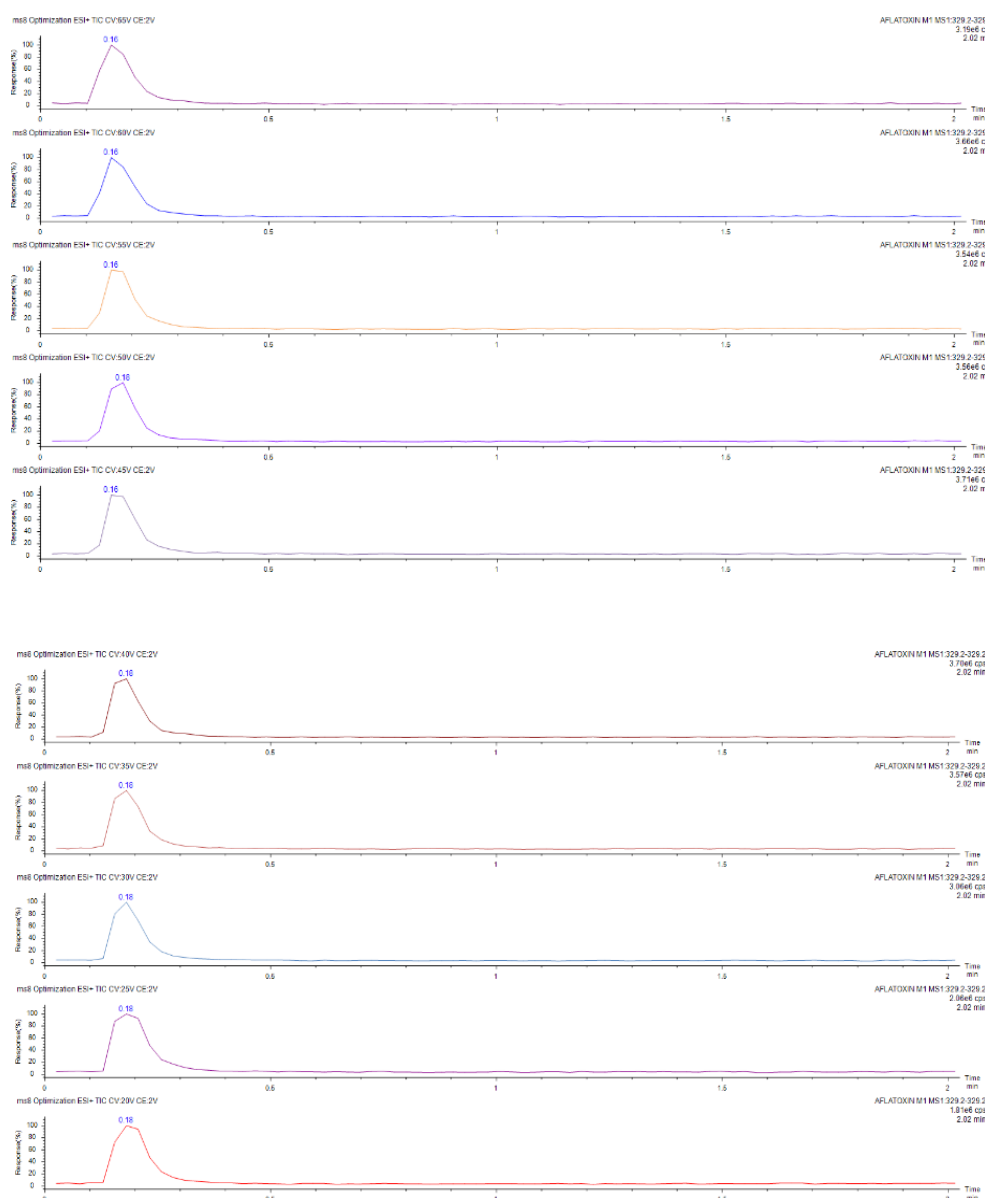
აფლატოქსინ M1-ის იონიზაცია ტარდებოდა ელექტროგაფრქვევის მეთოდით, დადებითად დამუხტული იონების რეგისტრაციის რეჟიმში.

საწყისი იონის განსასაზღვრად, უშუალოდ მას-სპექტრომეტრულ დეტექტორში გაიშვებოდა აფლატოქსინ M1-ის აცეტონიტრილიანი ხსნარი 10 მკგ/მლ და ხდებოდა სრული სპექტრის რეგისტრაცია (სურ. N2).



სურ. N4. აფლატოქსინ M1-ის აცეტონიტრილიანი ხსნარის (10 მკგ/მლ) მას - სპექტრი

პრეკურსორ იონის ზუსტი მასის განსაზღვრად, საჭიროა განმეორებითი სკანირება უფრო ვიწრო მასათა დიაპაზონში. ამ შემთხვევაში სკანირება ჩატარდა 324–332 დალტონის ფარგლებში. რის შედეგად დადგინდა ზუსტი მასა m/z 329.16. გამოხმაურების სიდიდეზე დიდ გავლენას ახდენს მას - სპექტრომეტრის პარამეტრები. ფრაგმენტატორზე ძაბვის აწევა იწვევს პირველ კვადრუპოლში იონების გადაცემის გაუმჯობესებას, თუმცა ძაბვის ზედმეტი მომატების დროს საანალიზო ნივთიერების საწყისი იონი შეიძლება დაიშალოს ფრაგმენტებად ისე, რომ ვერ მიაღწიოს პირველ კვადრუპოლურ ფილტრს. ოპტიმალური ძაბვის დასადგენად შესწავლილ იქნა საწყისი იონის m/z 329.2 გამოხმაურებაზე ძაბვის გავლენა 20–65 ვ-ის დიაპაზონში. მაქსიმალურ გამოხმაურება მიიღება 45ვ ძაბვის მნიშვნელობაზე და ის წარმოადგენს $3.71e6$ -ს.



სურ. N5. აფლატოქსინ M₁-ის პრეკურსორ იონის სიგნალის ინტენსივობა სხვადასხვა ძაბვის პირობებში

იონური რეაქციების საუკეთესო წყვილის შესარჩევად შესწავლილ იქნა დაჯახების ბლოკში აფლატოქსინ M₁-ის საწყისი იონის ფრაგმენტაციაზე დაჯახების ენერგიის სიდიდის გავლენა.

აფლატოქსინ M₁-ის პროტონირებული მოლეკულის ფრაგმენტაციის შედეგად მიიღება 2 დომინირებადი იონი: m/z 175 და m/z 131, რომელთაგან აფლატოქსინ M₁-ის რაოდენობრივი განსაზღვრისთვის გამოყენებული იქნა იონ-პროდუქტი m/z 131 (30ვ).

მითითებული რეაქციების მონიტორინგის რეჟიმში აფლატოქსინ M₁-ის მას სპექტრომეტრული დეტექტირების პარამეტრები უარყოფითად დამუხტული იონების რეგისტრაციით მოცემულია ცხრილში N5.

ცხრილი N3: აფლატოქსინ M₁-ის მას - სპექტრომეტრული დეტექტირების პარამეტრები

ნივთიერება	საწყისი იონი m/z	იონ-პროდუქტები m/z	დაჯახების ენერგია
აფლატოქსინი M ₁	329.2	259.0/273.0	25ვ/25ვ

მეთოდის შესამუშავებლად შერჩეულ იქნა შებრუნებულფაზიანი ქრომატოგრაფიული სვეტი-Sharpasil-AP C18, რამდენადაც ის არის უნივერსალური, pH-ის ფართო დიაპაზონში მდგრადი და მოსახერხებელია სერიული ანალიზებისთვის.

ქრომატოგრაფიული დაყოფის პირობები:

- ქრომატოგრაფიული სვეტი Sharpasil-AR C18 (100მმ × 4.6მმ, 3მკმ),
- მოძრავი ფაზა **A** - წყალი : 0.1% ჰიანჰველამჟავა (მეთანმჟავა)
- მოძრავი ფაზა **B**- აცეტონიტრილი
- ნაკადის სიჩქარე 0,5 მლ/წთ
- სვეტის თერმოსტატის ტემპერატურა 35° C
- სინჯის მოცულობა 10 მკლ.

მას სპექტრომეტრული დეტექტირების პარამეტრები:

იონიზაცია ელექტრონების გაფრქვევით დადებითი იონების რეგისტრაციის რეჟიმში, დესოლვატაციის აირის სიჩქარე 15 დმ³/წთ, დესოლვატაციის აირის ტემპერატურა 500°C, ძაბვა კაპილარზე 4500ვ, დაჯახების ენერგია 25 ვოლტი, აფლატოქსინ M₁-ისთვის მითითებული რეჟიმის მონიტორინგი m/z 329. → 273

მას-სპექტრომეტრული დეტექცია განხორციელდა სრული სკანირებით (FS – full scan) მას-სპექტრების ჩაწერით და შერჩეული რეაქციის მონიტორინგით (SRM – Selected Reaction Monitoring);

საანალიზო ნივთიერების იდენტურობის დასადასტურებლად, ყველა სადიაგნოსტიკო იონის მასის გადახრა არის 5 ppm-ზე ნაკლები; შერჩეული პრეკურსორ იონი წარმოადგენს პროტონირებულ მოლეკულას;

Instrument parameters

Ion source: ESI+ Current ion source: ESI

☒ ESI ☐ Analyzer

Voltage

Capillary(kV)	4.48	4.5	
Sampling cone(V)	39.78	40	
TR1 shell (V)	60.42	60	
Transfer rod(V)	34.74	35	
Transfer lens1(V)	14.92	15	
Transfer rod2(V)	9.97	10	
Transmission2(V)	9.96	10	
Transfer rod3(V)	0.00	0	
Transfer lens3(V)	0	0	
Q0 exit(V)	—	-30	
Curtain plate(V)	619.28	600	

Temperature

Desolvation gas(°C)	500.00	500	
Vacuum interface(°C)	Open	Off	开启中

Gas control

Nebulizer gas(L/Min)	1.60	1.6	
Desolvation gas(L/Min)	12.00	12	
Blowback gas(L/Min)	2.00	2	

Exhaust valve

Open Close

Instrument parameters

Ion source: ESI+ Current ion source: ESI

☐ ESI ☒ Analyzer

MS1

Low quality resolution	164	
High Quality Resolution	134	
Ion Energy (eV)	0	
Pre-rod voltage (V)	-19.7	20

Scan Mode: ☐ MS ☒ MSMS

Collision chamber

Inlet voltage (V)	-26.91	2
Collision energy (eV)	-24.55	2
Collision energy gradient	Edit...	☐ Enabled
Outlet voltage (V)	-26.62	2
Collision gas (mL/Min)	0.45	0.45
Collision Pool (Torr)	1.30e-2	

MS2

Pre-rod voltage (V)	-39.51	15
Low quality resolution	169	
High Quality Resolution	110	
Ion Energy (eV)	3	

CEM

Inlet voltage (V)	-5981.6	6000
Deflection voltage (V)	-395.16	400
Multiplier Voltage (V)	2197.85	2200

სურ. 6. მას-სპექტრომეტრული დეტექტირებისთვის შერჩეული პარამეტრები

საანალიზო ნივთიერებაში, იონების თანაფარდობა შეესაბამება იონების თანაფარდობას სტანდარტით ფორტიფიცირებულ მატრიცაში, რომელიც გაზომილია იგივე პირობებში და ფარდობითი გადახრა არ აჭარბებს $\pm 40\%$;

ექსტრაქტში საანალიზო ნივთიერების შეკავების დრო შეესაბამება როგორც დაკალიბრების სტანდარტს, ასევე მატრიცის შესაბამის სტანდარტს და სტანდარტით ფორტიფიცირებულ მატრიცას ± 0.1 წუთის დაშვების ფარგლებში;

მობილური ფაზის, გამხსნელის და არაფორტიფიცირებული მატრიცის სიგნალი აფლატოქსინ M₁ - ის შეკავების დროის ფარგლებში არის ნულთან ახლოს და შესაბამისად, <30%-ზე;

ცხრილი N4: ვალიდაციის შეჯამებული შედეგები

მატრიცა	განმეორებადობა (RSD _r , %)	შიდალაბორატორიული განმეორებადობა (RSD _r , %)	CC α მკგ/კგ	LOQ მკგ/კგ	აღდგენა %	მატრიცის ეფექტი %	გაფართოებული განუსაზღვრელობა მკგ/კგ
რძე	8.45 $\pm$ 0.10	9.24 $\pm$ 0.99	0.0098	0.03	95.04 $\pm$ 1.55	6.10 $\pm$ 0.08	0.18
რძემჟავა პროდუქტი	3.82 $\pm$ 0.05	9.26 $\pm$ 0.15	0.01	0.034	93.17 $\pm$ 0.38	10.88 $\pm$ 0.13	0.14
ყველი	4.13 $\pm$ 0.06	9.37 $\pm$ 0.14	0.014	0.038	90.38 $\pm$ 0.68	4.13 $\pm$ 0.06	0.16
ნაღები	7.86 $\pm$ 0.09	2.29 $\pm$ 0.02	0.014	0.036	88.85 $\pm$ 1.07	7.86 $\pm$ 0.09	0.13

აფლატოქსინ M₁ - ის, როგორც კონტროლირებადი ნივთიერებისთვის, CC α არის გონივრულ ფარგლებში, კერძოდ, 0.0098 – 0.014;

ექსტრაგირება ყველა დონის კონცენტრაციისთვის იყო $\geq 80.0\%$, 20%-ზე ნაკლები განმეორებადობის RSD%-ით (4.13%–8.45%) და 12%-ზე ნაკლები შიდალაბორატორიული აღწარმოებადობის RSD%-ით (2.29 % – 9.37%) რაც <20%-ზე;

გაფართოებული განუსაზღვრელობა გამოთვლილ იქნა 5.0 მკგ/კგ კონცენტრაციისთვის დაფარვის კოეფიციენტით 2, რაც სანდოობას უზრუნველყოფს 95%-ით;

მატრიცის ეფექტის გამოთვლილი იონური დათრგუნვა აფლატოქსინ M₁-ისთვის (ყველა მატრიცისთვის) არ აჭარბებს 11% რაც მისაღებია ვალიდირებული მეთოდისთვის;

თითოეული არაფორტიფიცირებული მატრიცის 20-20 ანალიზის შედეგად არ გამოვლინდა აფლატოქსინ M_1 - ის განსაზღვრის სპეციფიურობისთვის ხელისშემშლელი ფაქტორი.

დასკვნები:

- ჩვენს მიერ შემუშავებული და ვალიდირებულია რძეში და რძის პროდუქტში აფლატოქსინ M_1 -ის განსაზღვრის ქრომატო მას სპექტრომეტრული მეთოდი;
- ვალიდირებული მეთოდი არის დამადასტურებელი მეთოდი LC MS/MS (ქრომატოგრაფია მას-სპექტრომეტრული დეტექციით) და ამდენად, უზრუნველყოფს ინფორმაციის მოწოდებას საანალიზო ნივთიერების სტრუქტურულ-ქიმიურ შემადგენლობაზე;
- მეთოდის ვალიდაციით დადასტურდა, რომ ანალიზის მეთოდი შეესაბამება კრიტერიუმებს, რომლებიც გამოიყენება შესაბამისი სამუშაოს მახასიათებლებისთვის;
- აფლატოქსინ M_1 -ის თვისობრივი განსაზღვრის ზღვარად განისაზღვრა: რძეში - 0.003 მკგ/კგ, რძემჟავა პროდუქტში - 0.0034 მკგ/კგ, ყველში - 0.0038 მკგ/კგ, ნალებში - 0.0036 მკგ/კგ;
- აფლატოქსინ M_1 -ის რაოდენობრივი განსაზღვრის ზღვარად განისაზღვრა: რძეში - 0.03 მკგ/კგ, რძემჟავა პროდუქტში - 0.034 მკგ/კგ, ყველში - 0.038 მკგ/კგ, ნალებში - 0.036 მკგ/კგ;
- კარგი სწორხაზოვნება ოთხივე მატრიცისთვის ($R^2=1$) მიღებულ იქნა 0.03 – 10.0 მკგ/კგ კონცენტრაციების დიაპაზონში;

მიღებული შედეგები მიუთითებს ანალიზური მეთოდების მიმართ წაყენებული მოთხოვნებისადმი შერჩეული მეთოდის შესაბამისობაზე.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. საქართველოს მთავრობის 2016 წლის 18 იანვრის დადგენილება N22 ტექნიკური რეგლამენტი - ცოცხალ ცხოველებსა და ცხოველური წარმოშობის სურსათში ზოგიერთი ნივთიერებისა (სუბსტანციის) და მათი ნარჩენების მონიტორინგის წესის დამტკიცების შესახებ;
2. საქართველოს მთავრობის 2023 წლის 5 ივნისის დადგენილება №212, ტექნიკური რეგლამენტი – სასურსათო დანიშნულების ცხოველებში ფარმაკოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების (სუბსტანციების) ნარჩენების ანალიზის მეთოდების განხორციელების, ნიმუშის აღებისა და შედეგების ინტერპრეტაციის წესის დამტკიცების შესახებ;
3. საქართველოს მთავრობის 2023 წლის 13 ივნისის დადგენილება №225, ტექნიკური რეგლამენტი – ცხოველური წარმოშობის სურსათში აკრძალულ/დაუშვებელ ფარმაკოლოგიურად აქტიურ ნივთიერებებთან (სუბსტანციებთან) დაკავშირებით მოქმედებისათვის საცნობარო მაჩვენებლების (RPA) შესახებ დამტკიცების თაობაზე;
5. Andreia Vaz 1, Ana C Cabral Silva 1, Paula Rodrigues, Armando Venâncio. Detection Methods for Aflatoxin M1 in Dairy Products, Microorganisms, NCBI,2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137775>
6. ISO 14501:2021, Milk and milk powder — Determination of aflatoxin M1 content — Clean-up by immunoaffinity chromatography and determination by high-performance liquid chromatography (edition 3, 2021); Volume 436, 15 March 2024
7. Kamkar A, Yazdankhah S, Nafchi AM, Nejad AS. Aflatoxin M1 in raw cow and buffalo milk in Shush city of Iran. Food Addit Contam Part B Surveill. 2014; 7(1):21-24
8. Kumar P, Mahato DK, Kamle M, Mohanta TK, Kang SG. Aflatoxins: A Global Concern for Food Safety, Human Health and Their Management. Front Microbiol. 2016; 7:2170. [
9. Yaser Almasoud, Manar Alwelaie, Zeyad Aldosari, Sarah Alotaibi, Abdullah Alsayari, Ghada Alzyadi, Mohammed Almutairi, Sulaiman Alajel, Abdullah Al Tamim, Hibah Alharbi * An assessment of the prevalence of Aflatoxin M1 level in milk and milk powder based on high performance liquid chromatography and dietary risk assessmentToxicol Rep 2024 Nov 9; 13:101787. doi: 10.1016/j.toxrep.2024.101787
10. Viola O. Okechukwu, Oluwasola A. Adelusi, Abidemi P. Kappo, Patrick B. Njobeh, Messai A. Mamo .Aflatoxins: Occurrence, biosynthesis, mechanism of action and effects, conventional/emerging detection techniques. Food Chemistry Volume 436, 15 March 2024, 137775

Development and Validation of a High Performance Liquid Chromatography-Mass Spectrometric(LCMS/MS) Method for the Determination of Aflatoxin M₁ in Milk and Dairy Products

Chikviladze tamar¹., Baramidze Ketevan²., Chafidze nino²., Tatanashvili Mariam¹., Otarashvili Tamar.

TSMU Department of Pharmaceutical Toxicological and Medical Chemistry¹,

GlobalTest Examination Laboratory²

Many types of mold growing on agricultural products produce toxic substances called mycotoxins. Aflatoxin B₁ is the most common, highly toxic, and carcinogenic of them. It is produced by fungi of the *Aspergillus* genus, which grow on stored grains, seeds, and fruits under hot and humid conditions.

Aflatoxin M₁ is the hydroxylated form and toxic metabolite of aflatoxin B₁. It is formed in the liver of animals that consume feed contaminated with aflatoxin B₁.

Aflatoxin M₁ accumulates in the animal's body and is excreted in milk, posing a risk to the health of the consuming species — humans. Aflatoxin M₁ is a strong carcinogen and also causes liver and immune system damage. Because of its high toxicity and hepatocarcinogenic potential, the permissible level of aflatoxin M₁ in milk and dairy products is strictly regulated in developed countries, including Georgia.

In Georgia, the maximum allowable limit for aflatoxin M₁ is 0.05 µg/kg.

The aim of this study was to develop and validate a chromato-mass spectrometric method for the determination of aflatoxin M₁. We have developed and validated a chromato-mass spectrometric method for determining aflatoxin M₁ in milk and dairy products.

The limit of qualitative detection of aflatoxin M₁ was determined as follows: in milk – 0.003 µg/kg, in fermented milk products – 0.0034 µg/kg, in cheese – 0.0038 µg/kg, in cream – 0.0036 µg/kg.

The limit of quantitative determination of aflatoxin M₁ was determined as follows: in milk – 0.03 µg/kg, in fermented milk products – 0.034 µg/kg, in cheese – 0.038 µg/kg, in cream – 0.036 µg/kg.

The obtained results indicate that the selected method meets the requirements established for analytical procedures.

Keywords: Mycotoxins, Aflatoxin, Dairy products, High-performance liquid chromatography (HPLC), Mass spectrometry (MS)

სპორტული ღონისძიებების ლოჯისტიკური დაგეგმვის მოდელების ეფექტიანობის შედარებითი ანალიზი

ნანა შაშიაშვილი

საქართველოს სპორტის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, სპორტის მენეჯმენტისა და
ადმინისტრირების ფაკულტეტი, +995 577 93 50 94, Nana.shashiashvili@sportuni.ge ORCID:
0009-0003-5239-5905

აბსტრაქტი

სტატია მიზნად ისახავს სპორტული ღონისძიებების ლოჯისტიკური დაგეგმვის ორი ძირითადი მოდელის — კლასიკური და სისტემური მიდგომების — ეფექტიანობის შედარებით ანალიზს. კვლევა ეფუძნება თეორიული წყაროების მიმოხილვასა და მასშტაბური საერთაშორისო სპორტული ღონისძიებების, მათ შორის Olympic Games და FIFA World Cup, პრაქტიკული მაგალითების შეფასებას. ნაშრომში გაანალიზებულია ლოჯისტიკური რისკები დაგეგმვის ეტაპზე, როგორცაა სატრანსპორტო შეფერხებები, რესურსების დეფიციტი, კომუნიკაციის ჩავარდნები და ინფრასტრუქტურული შეზღუდვები.

კვლევის შედეგები მიუთითებს, რომ კლასიკური მოდელი ეფექტიანია სტაბილურ და ნაკლებად კომპლექსურ გარემოში, თუმცა შეზღუდულია დინამიკურ პირობებში. სისტემური მოდელი, რომელიც ეფუძნება პროცესების ინტეგრაციას, უკუკავშირის მექანიზმებსა და რეალურ დროში მართვას, უზრუნველყოფს მაღალ მოქნილობას და რისკების ეფექტიან მართვას. დადგენილია, რომ სისტემური ლოჯისტიკური დაგეგმვა მნიშვნელოვნად ზრდის ოპერაციულ ეფექტიანობას, აუმჯობესებს მომხმარებლის კეთილგანწყობას და ამცირებს ფინანსურ დანახარჯებს. შესაბამისად, თანამედროვე სპორტული ღონისძიებების მართვაში სისტემური მიდგომის გამოყენება წარმოადგენს წარმატების ერთ-ერთ მთავარ წინაპირობას.

საკვანძო სიტყვები: სპორტული ღონისძიებები, ლოჯისტიკა, რისკები, ლოჯისტიკური დაგეგმვა.

შესავალი

თანამედროვე სპორტული ღონისძიებები, განსაკუთრებით ისეთი მასშტაბური მოვლენები, როგორცაა Olympic Games და FIFA World Cup, წარმოადგენს კომპლექსურ

სისტემებს, რომელთა წარმატება დიდწილად დამოკიდებულია ლოჯისტიკური დაგეგმვის ხარისხზე. ათასობით მონაწილე, მილიონობით მაყურებელი და მრავალფეროვანი რესურსების კოორდინაცია მოითხოვს ეფექტიან, წინასწარ გააზრებულ და სტრუქტურირებულ მიდგომას. ლოჯისტიკური დაგეგმვა არ შემოიფარგლება მხოლოდ ტრანსპორტირებით ან რესურსების განაწილებით; იგი მოიცავს პროცესების ინტეგრაციას, რისკების მართვას და ოპერაციული ეფექტიანობის უზრუნველყოფას. ამ კონტექსტში განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს დაგეგმვის მოდელების შერჩევა.

ლოჯისტიკური დაგეგმვა თანამედროვე მენეჯმენტის ერთ-ერთ ფუნდამენტურ კომპონენტად განიხილება და სხვადასხვა ავტორის მიხედვით იგი წარმოადგენს რესურსების ოპტიმალური განაწილების, დროის მართვისა და პროცესების კოორდინაციის ინტეგრირებულ მექანიზმს [1]. განსაკუთრებით სპორტის სფეროში, სადაც ოპერაციები ხასიათდება მაღალი დინამიკითა და მრავალფაქტორიანობით, ლოჯისტიკური დაგეგმვა გადამწყვეტ როლს ასრულებს ღონისძიებების წარმატებაში.

კლასიკური ლოჯისტიკური დაგეგმვის მიდგომა ეფუძნება ტრადიციულ, ხაზოვან მოდელს, სადაც პროცესები იყოფა ცალკეულ ეტაპებად და იმართება თანმიმდევრულად [2]. აღნიშნული მიდგომა გამომდინარეობს მეცნიერული მენეჯმენტის პრინციპებიდან და ორიენტირებულია სტაბილურ, პროგნოზირებად გარემოზე. მისი მთავარი უპირატესობა მდგომარეობს სტრუქტურირებულობასა და კონტროლის სიმარტივეში, რაც ორგანიზაციებს საშუალებას აძლევს წინასწარ განსაზღვრული გეგმის მიხედვით იმოქმედონ. თუმცა, თანამედროვე კვლევები მიუთითებს, რომ ასეთი მიდგომა შეზღუდულია მაღალი გაურკვევლობის პირობებში, რაც განსაკუთრებით დამახასიათებელია მასშტაბური სპორტული ღონისძიებებისთვის. მაგალითად, ისეთი გლობალური ღონისძიებები, როგორიცაა Olympic Games და FIFA World Cup, მოითხოვს მრავალდონიან კოორდინაციას, სადაც მცირე შეფერხებაც კი შეიძლება გადაიზარდოს სისტემურ პრობლემაში [3].

სისტემური მიდგომა ლოჯისტიკურ დაგეგმვაში ეფუძნება ზოგადი სისტემების თეორიას და განიხილავს ლოჯისტიკას, როგორც ურთიერთდაკავშირებული ელემენტების კომპლექსურ ქსელს [4,5]. ამ მიდგომის ფარგლებში, თითოეული კომპონენტი (ტრანსპორტი, მარაგები, ინფორმაციული ნაკადები და სხვა) განიხილება როგორც ერთიანი სისტემის ნაწილი. სისტემური მიდგომის ერთ-ერთი მთავარი მახასიათებელია უკუკავშირის მექანიზმების არსებობა, რაც საშუალებას იძლევა რეალურ დროში მოხდეს პროცესების მონიტორინგი და კორექტირება [6]. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სპორტულ ღონისძიებებში, სადაც გარემო მუდმივად იცვლება.

თანამედროვე აკადემიური კვლევები ადასტურებს, რომ სისტემური მიდგომა მნიშვნელოვნად ზრდის ლოჯისტიკური პროცესების ეფექტიანობას. მაგალითად, Christopher (2016) აღნიშნავს, რომ ინტეგრირებული ლოჯისტიკური სისტემები უზრუნველყოფს რესურსების უკეთ გამოყენებას და ამცირებს ოპერაციულ დანახარჯებს [7]. სპორტული ღონისძიებების მართვაში სისტემური დაგეგმვა აუცილებელია

სხვადასხვა სტრუქტურული ერთეულების ეფექტიანი კოორდინაციისთვის [7,8]. ამასთანავე, ტექნოლოგიური პროგრესი კიდევ უფრო აძლიერებს სისტემური მიდგომის მნიშვნელობას. ინფორმაციული სისტემების, მონაცემთა ანალიტიკისა და რეალურ დროში მონიტორინგის გამოყენება შესაძლებელს ხდის ლოჯისტიკური პროცესების ოპტიმიზაციას [9-11].

კვლევის მიზანი

კვლევის მიზანია სპორტული ღონისძიებების ლოჯისტიკური დაგეგმვის ორი ძირითადი მოდელის — კლასიკური და სისტემური მიდგომების — შედარებითი ანალიზი და მათი ეფექტიანობის შეფასება თანამედროვე მასშტაბური სპორტული ღონისძიებების მართვის კონტექსტში.

კვლევის ამოცანები:

- კლასიკური და სისტემური ლოჯისტიკური მოდელების თეორიული საფუძვლების შესწავლა;
- მასშტაბური საერთაშორისო სპორტული ღონისძიებების (მაგ., Olympic Games, FIFA World Cup) ლოჯისტიკური პრაქტიკის ანალიზი;
- ლოჯისტიკური რისკების იდენტიფიკაცია დაგეგმვის ეტაპზე (სატრანსპორტო შეფერხებები, რესურსების დეფიციტი, კომუნიკაციის პრობლემები, ინფრასტრუქტურული შეზღუდვები);
- ორი მოდელის შედარება მოქნილობის, რესურსების ეფექტიანობის, რისკების მართვისა და ოპერაციული სტაბილურობის კრიტერიუმების მიხედვით;
- სისტემური მიდგომის გავლენის შეფასება ღონისძიებების საერთო ეფექტიანობაზე და მომხმარებლის დამოკიდებულებაზე.

კვლევა ეფუძნება შემდეგ მეთოდოლოგიურ მიდგომებს:

- შედარებითი ანალიზი — კლასიკური და სისტემური ლოჯისტიკური მოდელების თეორიული და პრაქტიკული შედარება;
- შემთხვევების ანალიზი (case study) — მასშტაბური საერთაშორისო სპორტული ღონისძიებების გამოცდილება;
- კონტენტ-ანალიზი — თეორიული ლიტერატურისა და სამეცნიერო წყაროების მიმოხილვა;
- სისტემური ანალიზი — ლოჯისტიკური პროცესების ურთიერთდამოკიდებულების და მართვის მექანიზმების შეფასება;
- კრიტერიუმებზე დაფუძნებული შეფასება — მოქნილობის, რესურსების გამოყენების ეფექტიანობის, რისკების მართვის უნარისა და ოპერაციული სტაბილურობის მიხედვით.

კლასიკური მოდელის თავისებურებები

კლასიკური ლოჯისტიკური დაგეგმვა წარმოადგენს ტრადიციულ, რაციონალისტურ მიდგომას, რომელიც ეფუძნება წინასწარ განსაზღვრულ გეგმებს, მკაცრ სტრუქტურას და პროცესების ხაზოვან ორგანიზებას. მისი თეორიული საფუძველი დაკავშირებულია მეცნიერული მენეჯმენტის და ოპერაციული დაგეგმვის კლასიკურ სკოლებთან, სადაც მთავარი აქცენტი კეთდება ეფექტიანობაზე, სტანდარტიზაციასა და კონტროლზე.

კლასიკური მოდელის ერთ-ერთი ძირითადი მახასიათებელია ეტაპობრივი დაგეგმვა, რაც გულისხმობს პროცესების დაყოფას ცალკეულ ფაზებად (მაგ., რესურსების მობილიზაცია → ტრანსპორტირება → განაწილება → კონტროლი). ასეთი სტრუქტურა უზრუნველყოფს პროცესების ლოგიკურ თანმიმდევრობას და ამცირებს ქაოსის ალბათობას. თუმცა, აღნიშნული მიდგომა ნაკლებად ითვალისწინებს პროცესებს შორის დინამიკურ კავშირებს, რაც რეალურ პირობებში მნიშვნელოვან პრობლემას ქმნის.

მეორე მნიშვნელოვანი მახასიათებელია პროცესების დამოუკიდებელი მართვა. თითოეული ლოჯისტიკური ფუნქცია (ტრანსპორტი, მარაგები, ინფრასტრუქტურა) განიხილება როგორც ცალკეული ერთეული, რაც ამარტივებს მართვას, მაგრამ ამავედროულად იწვევს „სილოსურ ეფექტს“ (silo effect), როდესაც ინფორმაციის ნაკადები იზოლირებულია და კოორდინაცია სუსტდება.

კლასიკური მოდელი ასევე ორიენტირებულია პროგნოზირებადობაზე, რაც გულისხმობს მომავალი მოთხოვნის, რესურსების და პროცესების წინასწარ განსაზღვრას. ეს მიდგომა ეფექტიანია სტაბილურ გარემოში, სადაც ცვლადები მინიმალურია და შესაძლებელია მაღალი სიზუსტით პროგნოზირება. თუმცა სპორტული ღონისძიებები, განსაკუთრებით ისეთი მასშტაბური, როგორიცაა Olympic Games, ხასიათდება მაღალი გაურკვევლობით, რაც ამცირებს კლასიკური მოდელის პრაქტიკულ ეფექტიანობას.

კლასიკური ლოჯისტიკური დაგეგმვის მოდელი წარმოადგენს ტრადიციულ მიდგომას, რომელიც ეფუძნება პროცესების ხაზოვან სტრუქტურას, მკაცრ კონტროლს და წინასწარ განსაზღვრულ გეგმებს. მისი ეფექტიანობის შეფასება მნიშვნელოვანია იმის გასაგებად, თუ რამდენად შეესაბამება აღნიშნული მოდელი თანამედროვე სპორტული ღონისძიებების მოთხოვნებს, სადაც მაღალი დინამიკა და გაურკვევლობა ხშირი ფაქტორია. ქვემოთ წარმოდგენილია კლასიკური მოდელის ძირითადი დადებითი და უარყოფითი მახასიათებლების ანალიტიკური შეჯამება.

ცხრილი N1. კლასიკური ლოჯისტიკური მოდელის ძლიერი და სუსტი მხარეების
სისტემური ანალიზი

ასპექტი	მახასიათებელი	განმარტება
დადებითი მხარეები	Simplicity (ოპერაციული სიმარტივე)	ამცირებს ორგანიზაციულ დანახარჯებს (organizational costs) და ამარტივებს გადაწყვეტილების მიღების პროცესს (decision-making process)
	High level of control (კონტროლის მაღალი დონე)	უზრუნველყოფს პროცესების მკაცრ მონიტორინგს (strict process monitoring) და ოპერაციულ ზედამხედველობას (operational supervision)
	Efficiency in stable environments (ეფექტიანობა სტაბილურ გარემოში)	უზრუნველყოფს მაღალი შესრულების დონეს (high performance) პროგნოზირებად და ნაკლებად დინამიკურ პირობებში
უარყოფითი მხარეები	Low flexibility (დაბალი მოქნილობა)	სისტემის შეზღუდული ადაპტაციის უნარი (limited adaptability) სწრაფი და მოულოდნელი ცვლილებების მიმართ (სატრანსპორტო შეფერხებები, ამინდის ცვალებადობა)
	Delayed responsiveness (დაგვიანებული რეაგირება)	ცვლილებებზე რეაგირების დაგვიანება (slow response time), რადგან საჭიროებს მთლიანი გეგმის გადახედვას (full plan reconfiguration)

შედეგად, კლასიკური მოდელი უფრო მეტად შეესაბამება მცირე მასშტაბის ან სტაბილურ ოპერაციებს, ვიდრე დინამიკურ, მრავალფაქტორიან სპორტულ ღონისძიებებს.

სისტემური მოდელის თავისებურებები

სისტემური ლოჯისტიკური დაგეგმვა წარმოადგენს თანამედროვე მიდგომას, რომელიც ეფუძნება კომპლექსური სისტემების თეორიას და განიხილავს ლოჯისტიკას როგორც ურთიერთდაკავშირებული ელემენტების ერთიან ქსელს. ამ მოდელში თითოეული კომპონენტი არა დამოუკიდებლად, არამედ მთლიან სისტემასთან კავშირში ფუნქციონირებს. მისი ერთ-ერთი მთავარი მახასიათებელია ინტეგრირებული პროცესები, რაც გულისხმობს, რომ ტრანსპორტი, მარაგები, ინფორმაციული ნაკადები და ადამიანური რესურსები ერთიან სისტემაშია გაერთიანებული. ეს ამცირებს რესურსების დუბლირებას და ზრდის საერთო ეფექტიანობას. მნიშვნელოვანი

კომპონენტია ასევე უკუკავშირის მექანიზმები, რომლებიც უზრუნველყოფს ინფორმაციის მუდმივ მიმოცვლას სისტემის სხვადასხვა ნაწილებს შორის. ეს იძლევა შესაძლებლობას რეალურ დროში გამოვლინდეს პრობლემები და მოხდეს მათი სწრაფი კორექცია. მაგალითად, FIFA World Cup-ის ტიპის ღონისძიებებში, სადაც ლოჯისტიკური ოპერაციები მიმდინარეობს მრავალ ქალაქში ერთდროულად, ასეთი მექანიზმები კრიტიკულად აუცილებელია. სისტემური მოდელი ასევე ეფუძნება დინამიკურ მართვას, რაც გულისხმობს გარემოს ცვლილებებზე მუდმივ ადაპტაციას. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სპორტულ ღონისძიებებში, სადაც ფაქტორები (მაყურებელთა რაოდენობა, ტრანსპორტის დატვირთვა, უსაფრთხოების მოთხოვნები) სწრაფად იცვლება.

სისტემური ლოჯისტიკური დაგეგმვის მოდელი თანამედროვე სპორტული მენეჯმენტის ერთ-ერთ ყველაზე ეფექტიან მიდგომად განიხილება, რომელიც ეფუძნება პროცესების ინტეგრაციას, უკუკავშირის მექანიზმებსა და დინამიკურ მართვას. მისი შეფასება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ კონტექსტში, სადაც ლოჯისტიკური გარემო ხასიათდება მაღალი გაურკვევლობითა და მრავალფაქტორიანობით. ქვემოთ წარმოდგენილია სისტემური მოდელის ძირითადი დადებითი და უარყოფითი მახასიათებლების ანალიტიკური შეჯამება.

ცხრილი 2. სისტემური ლოჯისტიკური დაგეგმვის მოდელის დადებითი და უარყოფითი მხარეების ანალიტიკური შეფასება

ასპექტი	მახასიათებელი	განმარტება
დადებითი მხარეები	High flexibility (მაღალი მოქნილობა)	უზრუნველყოფს სწრაფ ადაპტაციას გაუთვალისწინებელ სიტუაციებზე და გარემოს ცვლილებებზე
	Fast responsiveness (სწრაფი რეაგირება)	ამცირებს ოპერაციულ რისკებს და ზრდის რეაგირების ეფექტიანობას კრიზისულ სიტუაციებში
	Resource optimization (რესურსების ოპტიმიზაცია)	მიიღწევა სისტემის მთლიანობის გათვალისწინებით და პროცესების ინტეგრირებული მართვით
უარყოფითი მხარეები	Management complexity (მართვის სირთულე)	ინტეგრირებული სისტემა მოითხოვს მაღალ კვალიფიკაციას და ტექნოლოგიურ მხარდაჭერას
	High coordination requirements (მაღალი კოორდინაციის მოთხოვნა)	სხვადასხვა სტრუქტურული ერთეულების ეფექტიანი თანამშრომლობა კრიტიკულია სისტემის გამართულ ფუნქციონირებაში

სისტემური მოდელის წარმატება დიდწილად დამოკიდებულია ინფორმაციულ ტექნოლოგიებზე და მონაცემთა მართვაზე. თანამედროვე პირობებში, ციფრული

პლატფორმების გარეშე ასეთი სისტემის ეფექტიანი ფუნქციონირება პრაქტიკულად შეუძლებელია.

მოდელის შედარებითი შეფასება

ორივე მოდელის შედარება ცხადყოფს, რომ მათი ეფექტიანობა დამოკიდებულია გარემოს ტიპზე და ღონისძიების მასშტაბზე. კლასიკური მოდელი უზრუნველყოფს სტაბილურობას და კონტროლს, ხოლო სისტემური მოდელი — მოქნილობას და ადაპტაციას. მასშტაბური სპორტული ღონისძიებების შემთხვევაში, სადაც გაურკვევლობა მაღალია და პროცესები მჭიდროდ არის დაკავშირებული, სისტემური მიდგომა აშკარად დომინირებს. იგი არა მხოლოდ აუმჯობესებს ოპერაციულ ეფექტიანობას, არამედ ზრდის ორგანიზაციის უნარს გაუმკლავდეს კრიზისულ სიტუაციებს.

ამრიგად, თანამედროვე სპორტული ლოჯისტიკის კონტექსტში სისტემური მოდელი წარმოადგენს არა მხოლოდ ალტერნატივას, არამედ აუცილებელ სტრატეგიულ არჩევანს.

ლოჯისტიკური რისკები დაგეგმვის ეტაპზე

სპორტული ღონისძიებების ლოჯისტიკური დაგეგმვა დაკავშირებულია მრავალრიცხოვან გაურკვევლობებთან, რაც მას მაღალი რისკის შემცველ პროცესად აქცევს. განსაკუთრებით მასშტაბურ ღონისძიებებში, როგორიცაა Olympic Games და FIFA World Cup, დაგეგმვის ეტაპზე დაშვებული მცირე შეცდომაც კი შეიძლება გადაიზარდოს სისტემურ კრიზისში, რომელიც გავლენას მოახდენს როგორც ოპერაციულ პროცესებზე, ასევე ორგანიზაციის რეპუტაციაზე. ლოჯისტიკური რისკები ამ ეტაპზე არ არის მხოლოდ ოპერაციული ხარვეზები — ისინი წარმოადგენს კომპლექსურ, ურთიერთდაკავშირებულ მოვლენათა ერთობლიობას, რომელიც საჭიროებს სისტემურ ანალიზს და პროაქტიულ მართვას.

1. სატრანსპორტო შეფერხებები

სატრანსპორტო ლოჯისტიკა წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე კრიტიკულ კომპონენტს სპორტული ღონისძიებების დაგეგმვაში. იგი მოიცავს სპორტსმენების, ოფიციალური პირების, აღჭურვილობისა და მაყურებლების გადაადგილებას. ძირითადი რისკებია:

- ტრანსპორტის გადატვირთვა (traffic congestion)
- დაგვიანებები ფრენებში ან ადგილობრივ გადაადგილებაში
- არასწორი მარშრუტების დაგეგმვა
- ტრანსპორტის არასაკმარისი რაოდენობა

ამ რისკების სპეციფიკა მდგომარეობს იმაში, რომ ისინი ხშირად კასკადურ ეფექტს იწვევს. მაგალითად, ერთი გუნდის დაგვიანებამ შეიძლება გამოიწვიოს მთელი შეჯიბრის გრაფიკის დარღვევა.

კლასიკური დაგეგმვის პირობებში ტრანსპორტი ხშირად განიხილება როგორც იზოლირებული ფუნქცია, რაც ზრდის ასეთი შეფერხებების ალბათობას. სისტემური

მიდგომა კი აერთიანებს ტრანსპორტს სხვა პროცესებთან (დროის მართვა, ინფრასტრუქტურა, უსაფრთხოება), რაც ამცირებს რისკებს და ზრდის რეაგირების სისწრაფეს.

2. რესურსების დეფიციტი

რესურსების მართვა მოიცავს როგორც მატერიალურ (ინვენტარი, ტექნიკა), ასევე არამატერიალურ (ადამიანური რესურსი, დრო) ელემენტებს. რესურსების დეფიციტი ხშირად გამოწვეულია მოთხოვნის არასწორი პროგნოზირებით, მარაგების არაეფექტიანი მართვით, მიწოდების ჯაჭვის შეფერხებებით, ფინანსური შეზღუდვებით.

სპორტული ღონისძიებების შემთხვევაში რესურსების დეფიციტი განსაკუთრებით კრიტიკულია, რადგან დროის რესურსი მკაცრად შეზღუდულია და შეცდომის გამოსწორების შესაძლებლობა მინიმალურია. კლასიკური მოდელი აქ ძირითადად ეყრდნობა წინასწარ დაგეგმილ რაოდენობებს, რაც პრობლემატურია დინამიკურ გარემოში. სისტემური მიდგომა კი იყენებს ალტერნატიულ სცენარებს (contingency planning) და რეალურ დროში მონაცემებს, რაც საშუალებას იძლევა რესურსების გადანაწილება მოხდეს ოპტიმალურად.

3. კომუნიკაციის პრობლემები

ლოჯისტიკური პროცესების ეფექტიანობა დიდწილად დამოკიდებულია ინფორმაციის დროულ და ზუსტ გადაცემაზე. კომუნიკაციის პრობლემები შეიძლება აისახოს ინფორმაციის დაგვიანებაში, არაზუსტ ან არასრულ მონაცემებში, კოორდინაციის ნაკლებობაში სხვადასხვა ერთეულებს შორის ან ტექნოლოგიური სისტემების გაუმართაობაში. სპორტულ ღონისძიებებში, სადაც ჩართულია მრავალი ორგანიზაცია, უწყება და პერსონალი, კომუნიკაციის როლი კრიტიკულად იზრდება. ერთმა არასწორმა ინფორმაციამ შეიძლება გამოიწვიოს შეუსაბამო გადაწყვეტილების მიღება, რაც გავლენას მოახდენს მთელ პროცესზე. კლასიკური მოდელი კომუნიკაციას ხშირად განიხილავს როგორც დამხმარე ფუნქციას, მაშინ როცა სისტემური მიდგომა მას საზღვრავს, როგორც ცენტრალურ ელემენტს, რომელიც აკავშირებს მთელ სისტემას. სწორედ ამიტომ, სისტემურ მოდელში აქტიურად გამოიყენება ციფრული პლატფორმები და რეალურ დროში კომუნიკაციის საშუალებები.

4. ინფრასტრუქტურული შეზღუდვები

ინფრასტრუქტურა (სტადიონები, გზები, ტრანსპორტის ჰაბები, საცხოვრებელი სივრცეები) წარმოადგენს ლოჯისტიკური სისტემის ფიზიკურ საფუძველს. მისი შეზღუდვები შეიძლება გამოიხატოს არასაკმარის გამტარუნარიანობაში, ტექნიკურ გაუმართაობაში, გეოგრაფიულად არათანაბარ განაწილებაში ან მოძველებულ ინფრასტრუქტურაში. ასეთი პრობლემები განსაკუთრებით მწვავეა განვითარებად ქვეყნებში ან იმ ქალაქებში, რომლებიც პირველად მასპინძლობენ დიდ სპორტულ ღონისძიებებს. კლასიკური დაგეგმვა ინფრასტრუქტურას აღიქვამს როგორც ფიქსირებულ მოცემულობას, ხოლო სისტემური მიდგომა ცდილობს მის ოპტიმიზაციას

სხვადასხვა საშუალებით (დროის გადანაწილება, ალტერნატიული მარშრუტები, დროებითი ინფრასტრუქტურის შექმნა).

5. ინტეგრირებული რისკების ეფექტი

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ზემოთ ჩამოთვლილი რისკები იშვიათად მოქმედებს დამოუკიდებლად. ისინი ქმნიან ურთიერთდაკავშირებულ რისკების ქსელს, სადაც ერთი პრობლემის წარმოშობა ავტომატურად ზრდის სხვა პრობლემების ალბათობას. მაგალითად:

- სატრანსპორტო შეფერხება → რესურსების დაგვიანება → ღონისძიების გრაფიკის დარღვევა
- კომუნიკაციის ჩავარდნა → არასწორი რესურსების განაწილება → ოპერაციული ხარვეზები

კლასიკური vs სისტემური მიდგომა რისკების მართვაში

კლასიკური მოდელი რისკების მართვაში ძირითადად რეაქტიულია — პრობლემის გამოვლენის შემდეგ ხდება მისი გადაჭრა. იგი ვერ უზრუნველყოფს რისკების წინასწარ იდენტიფიკაციას, რადგან არ ითვალისწინებს პროცესებს შორის კავშირს. სისტემური მიდგომა კი პროაქტიულია და ეფუძნება რისკების წინასწარ მოდელირებას, სცენარების ანალიზს, რეალურ დროში მონიტორინგს და სწრაფ ადაპტაციას. ამ მიდგომის ფარგლებში შესაძლებელია არა მხოლოდ რისკების შემცირება, არამედ მათი გარდაქმნა მართვად პროცესებად. უნდა აღინიშნოს, რომ ლოჯისტიკური რისკები სპორტული ღონისძიებების დაგეგმვის განუყოფელი ნაწილია და მათი სრულად აღმოფხვრა შეუძლებელია. თუმცა, მათი ეფექტიანი მართვა მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია დაგეგმვის მოდელზე. ანალიზი ცხადყოფს, რომ სისტემური მიდგომა უზრუნველყოფს რისკების ადრეულ იდენტიფიკაციას, პროცესებს შორის კავშირის გათვალისწინებას და ოპერატიულ რეაგირებას.

ამგვარად, თანამედროვე სპორტული ლოჯისტიკის პირობებში, რისკების მართვის ეფექტიანობა პირდაპირ არის დაკავშირებული სისტემური დაგეგმვის გამოყენებასთან, რაც მას სტრატეგიულ აუცილებლობად აქცევს.

დაგეგმვის გავლენა ღონისძიების წარმატებაზე

ლოჯისტიკური დაგეგმვა სპორტული ღონისძიებების მართვაში წარმოადგენს იმ სტრატეგიულ ბირთვს, რომელიც განსაზღვრავს არა მხოლოდ ოპერაციულ პროცესებს, არამედ მთლიანად ღონისძიების შედეგს, მის აღქმას და გრძელვადიან გავლენას. რეალურად, დაგეგმვა არ არის მხოლოდ ტექნიკური აქტივობა — იგი არის სისტემური გადაწყვეტილებების კომპლექსი, რომელიც აერთიანებს დროს, რესურსებს, ინფრასტრუქტურას და ადამიანურ ფაქტორს ერთიან ოპერაციულ ჩარჩოში. მასშტაბური ღონისძიებების შემთხვევაში, როგორცაა Olympic Games და FIFA World Cup, ლოჯისტიკური დაგეგმვა პირდაპირ განსაზღვრავს წარმატების სამ ძირითად

განზომილებას: დროის მართვას, მომხმარებლის კეთილგანწყობას და ფინანსურ შედეგებს.

ა) **ლონისძიების დროულ მიმდინარეობაზე გავლენა.** დრო სპორტულ ღონისძიებებში წარმოადგენს კრიტიკულ და არარეგენერირებად რესურსს. ნებისმიერი შეჯიბრი, მატჩი ან ცერემონია მკაცრად არის მორგებული კონკრეტულ გრაფიკზე, რომლის დარღვევა იწვევს არა მხოლოდ ოპერაციულ პრობლემებს, არამედ ფართო სისტემურ ეფექტს. ლოჯისტიკური დაგეგმვა უზრუნველყოფს:

- პროცესების სინქრონიზაციას (ტრანსპორტი, განთავსება, ღონისძიების დაწყება)
- რესურსების დროულ მიწოდებას
- სხვადასხვა აქტივობის კოორდინაციას.

დაგეგმვის სისუსტე ამ მიმართულებით იწვევს ე.წ. დროის დისინტეგრაციას, როდესაც ერთი პროცესის დაგვიანება ავტომატურად აზიანებს სხვა პროცესებს. მაგალითად, სპორტსმენების დაგვიანებამ ტრანსპორტირების პრობლემის გამო შეიძლება გამოიწვიოს შეჯიბრის გადადება, რაც თავის მხრივ აზიანებს სატელევიზიო ტრანსლაციის გრაფიკს და სპონსორულ ვალდებულებებს. განსაკუთრებით Olympic Games-ის ტიპის მრავალსპორტულ ღონისძიებებში, სადაც პარალელურად მიმდინარეობს ათობით შეჯიბრი, დროის მართვის ნებისმიერი ჩავარდნა სწრაფად იღებს სისტემურ ხასიათს.

ბ) **მონაწილეთა და მაყურებელთა კმაყოფილება.** თანამედროვე სპორტული ღონისძიებები აღარ არის მხოლოდ სპორტული შეჯიბრებები — ისინი წარმოადგენს მომხმარებელზე ორიენტირებულ პროცესებს. შესაბამისად, ლოჯისტიკური დაგეგმვა პირდაპირ მოქმედებს მონაწილეთა (სპორტსმენები, ოფიციალური პირები) და მაყურებელთა კმაყოფილებაზე. მაყურებლის განწყობა დამოკიდებულია ისეთ ფაქტორებზე, როგორიცაა:

•ტრანსპორტის ხელმისაწვდომობა და სისწრაფე	
•ბილეთების მართვა და შესვლის პროცედურები	
•ინფრასტრუქტურის კომფორტი	
•უსაფრთხოების დონე	

ლოჯისტიკური ხარვეზები (მაგ., გრძელი რიგები, ტრანსპორტის შეფერხება, ინფორმაციის ნაკლებობა) პირდაპირ იწვევს უკმაყოფილებას, რაც აისახება როგორც

მედიის შეფასებებში, ასევე სოციალურ ქსელებში. მაგალითად, FIFA World Cup-ის დროს ტრანსპორტისა და ორგანიზაციის პრობლემები ხშირად ხდება საერთაშორისო კრიტიკის საგანი, რაც აზიანებს არა მხოლოდ კონკრეტულ ღონისძიებას, არამედ მასპინძელი ქვეყნის იმიჯს. სპორტსმენებისთვის კი ლოჯისტიკური პრობლემები შეიძლება პირდაპირ აისახოს მათ სპორტულ შედეგებზე (დაღლილობა, დაგვიანება, არასათანადო პირობები).

გ) ფინანსურ ეფექტიანობაზე გავლენა

ლოჯისტიკური დაგეგმვა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ღონისძიების ფინანსურ შედეგებზე. ფინანსური ეფექტიანობა დამოკიდებულია როგორც ხარჯების ოპტიმიზაციაზე, ასევე შემოსავლების მაქსიმიზაციაზე. ცუდი დაგეგმვა იწვევს გაუთვალისწინებელ ხარჯებს (emergency costs), რესურსების არაეფექტიან გამოყენებას და შემოსავლების შემცირებას (დაბალი დასწრება, სპონსორების უკმაყოფილება).

მაგალითად:

- ტრანსპორტის პრობლემები → მაყურებელთა ნაკლები დასწრება → ბილეთების შემოსავლის შემცირება
- ინფრასტრუქტურული ხარვეზები → დამატებითი ინვესტიციები → ბიუჯეტის გადაჭარბება

სისტემური დაგეგმვა უზრუნველყოფს ხარჯების უკეთ კონტროლს, რესურსების ოპტიმალურ განაწილებას და ფინანსური რისკების შემცირებას.

ამგვარად, ლოჯისტიკა ხდება არა მხოლოდ ოპერაციული, არამედ ფინანსური სტრატეგიის ნაწილი.

დ) იმიჯი და რეპუტაციული ეფექტი

სპორტული ღონისძიებების წარმატება არ იზომება მხოლოდ ოპერაციული მაჩვენებლებით — იგი მნიშვნელოვანწილად განისაზღვრება საზოგადოებრივი აღქმით. ლოჯისტიკურ პრობლემებთან დაკავშირებული ინფორმაცია სწრაფად ვრცელდება მედიის საშუალებით, ქმნის ნეგატიურ ნარატივს და აზიანებს ორგანიზატორებისა და ქვეყნის იმიჯს. განსაკუთრებით გლობალური მოვლენების შემთხვევაში, როგორიცაა Olympic Games, ნებისმიერი ლოჯისტიკური პრობლემა შეიძლება გახდეს საერთაშორისო დისკუსიის თემა და პირიქით, ეფექტიანი დაგეგმვა აძლიერებს ქვეყნის იმიჯს და ზრდის ტურისტულ მიმზიდველობას.

სისტემური დაგეგმვის როლი წარმატებაში

კვლევები და პრაქტიკული გამოცდილება აჩვენებს, რომ სისტემური ლოჯისტიკური დაგეგმვა მნიშვნელოვნად ამცირებს რისკებს და ზრდის წარმატების ალბათობას. მისი უპირატესობები მოიცავს პროცესების ინტეგრაციას, რეალურ დროში მონიტორინგს, სცენარებზე დაფუძნებულ დაგეგმვას და სწრაფ ადაპტაციას ცვლილებებზე. სისტემური მიდგომა ქმნის მდგრად (resilient) ლოჯისტიკურ სისტემას, რომელიც არა მხოლოდ რეაგირებს პრობლემებზე, არამედ წინასწარ ამცირებს მათ ალბათობას.

ამგვარად, ლოჯისტიკური დაგეგმვა წარმოადგენს სპორტული ღონისძიებების წარმატების ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან განმსაზღვრელ ფაქტორს. იგი გავლენას ახდენს ოპერაციულ ეფექტიანობაზე, მომხმარებლის გამოცდილებაზე, ფინანსურ შედეგებზე და რეპუტაციულ ეფექტზე. ანალიზი ცხადყოფს, რომ თანამედროვე, მაღალი სირთულის სპორტულ გარემოში წარმატება შეუძლებელია სისტემური დაგეგმვის გარეშე. სწორედ ეს მიდგომა უზრუნველყოფს არა მხოლოდ პრობლემების გადაჭრას, არამედ მათი პრევენციას, რაც საბოლოოდ განსაზღვრავს ღონისძიების ხარისხსა და მის გრძელვადიან წარმატებას.

დასკვნა. შედეგები ნათლად აჩვენებს, რომ სპორტული ღონისძიებების ლოჯისტიკური დაგეგმვა აღარ შეიძლება განიხილებოდეს როგორც მხოლოდ ოპერაციული ან ტექნიკური ფუნქცია. იგი წარმოადგენს სტრატეგიულ მექანიზმს, რომელიც განსაზღვრავს ღონისძიების წარმატების ხარისხს, მის ეფექტიანობას და გრძელვადიან გავლენას. ამ კონტექსტში, კლასიკური და სისტემური მოდელების შედარებითი ანალიზი ცხადყოფს, რომ თანამედროვე, მაღალი სირთულის გარემოში სისტემური მიდგომა არა მხოლოდ უპირატესია, არამედ ფაქტობრივად გარდაუვალი არჩევანია.

კლასიკური ლოჯისტიკური მოდელი, თავისი სტრუქტურირებულობითა და პროგნოზირებადობაზე ორიენტაციით, კვლავ ინარჩუნებს მნიშვნელობას იმ გარემოში, სადაც პროცესები შედარებით სტაბილურია და გაურკვევლობა მინიმალურია. მისი გამოყენება ეფექტიანია მცირე მასშტაბის სპორტულ ღონისძიებებში, ლოკალურ ტურნირებში ან ისეთ შემთხვევებში, სადაც ოპერაციები არ საჭიროებს მრავალდონიან კოორდინაციას. თუმცა, აღნიშნული მოდელის მთავარი შეზღუდვა ვლინდება მაშინ, როდესაც გარემო ხდება დინამიკური, მრავალფაქტორიანი და გაურკვევლობით დატვირთული — რაც ზუსტად შეესაბამება თანამედროვე საერთაშორისო სპორტული ღონისძიებების რეალობას.

სისტემური ლოჯისტიკური დაგეგმვა ამ შეზღუდვებზე პასუხობს კომპლექსური, ინტეგრირებული მიდგომით, რომელიც ეფუძნება პროცესების ურთიერთკავშირს, უკუკავშირის მექანიზმებს და რეალურ დროში გადაწყვეტილებების მიღებას. მისი მთავარი უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ იგი არ განიხილავს ლოჯისტიკურ ელემენტებს იზოლირებულად, არამედ აერთიანებს მათ ერთიან, დინამიკურ სისტემაში. ეს უზრუნველყოფს რესურსების უფრო ეფექტიან გამოყენებას, რისკების ადრეულ იდენტიფიკაციას და ოპერატიულ რეაგირებას მოულოდნელ ცვლილებებზე.

მნიშვნელოვანია, რომ ლოჯისტიკური რისკები — სატრანსპორტო შეფერხებები, რესურსების დეფიციტი, კომუნიკაციის პრობლემები და ინფრასტრუქტურული შეზღუდვები — არ არის დამოუკიდებელი მოვლენები. ისინი ქმნიან ურთიერთდაკავშირებულ ქსელს, სადაც ერთი პრობლემის წარმოშობა ავტომატურად ზრდის სხვა პრობლემების ალბათობას. სწორედ ამ გარემოში ხდება სისტემური მიდგომის კრიტიკული მნიშვნელობა, რადგან იგი უზრუნველყოფს რისკების არა მხოლოდ მართვას, არამედ მათ პრევენციას.

კვლევის ფარგლებში ასევე გამოიკვეთა, რომ ლოჯისტიკური დაგეგმვა პირდაპირ გავლენას ახდენს ღონისძიების წარმატების ოთხ ძირითად განზომილებაზე:

•ოპერაციული ეფექტიანობა (დროისა და პროცესების მართვა)

•მომხმარებლის გამოცდილება (მაყურებელი და მონაწილეები)

•ფინანსური შედეგები (ხარჯები და შემოსავლები)

•რეპუტაციული ეფექტი (საერთაშორისო იმიჯი)

ამ ფაქტორების ერთობლიობა განსაკუთრებით თვალსაჩინოა ისეთი მასშტაბური ღონისძიებების შემთხვევაში, როგორიცაა Olympic Games და FIFA World Cup, სადაც ლოჯისტიკური სისტემის ეფექტიანობა პირდაპირ განსაზღვრავს არა მხოლოდ კონკრეტული ღონისძიების, არამედ მასპინძელი ქვეყნის წარმატებას. გარდა ამისა, თანამედროვე ტექნოლოგიური განვითარება (ინფორმაციული სისტემები, მონაცემთა ანალიტიკა, რეალურ დროში მონიტორინგი) კიდევ უფრო აძლიერებს სისტემური მიდგომის მნიშვნელობას. ციფრული ინსტრუმენტები საშუალებას იძლევა ლოჯისტიკური პროცესები გახდეს უფრო გამჭვირვალე, პროგნოზირებადი და ადაპტირებადი, რაც ზრდის მთლიან სისტემის მდგრადობას (resilience).

შეჯამების სახით შეიძლება ითქვას, რომ თანამედროვე სპორტული მენეჯმენტის პირობებში კლასიკური მოდელი წარმოადგენს შეზღუდულ, კონტექსტზე დამოკიდებულ ინსტრუმენტს, ხოლო სისტემური მოდელი წარმოადგენს უნივერსალურ და მდგრად გადაწყვეტას. მხოლოდ ასეთი მიდგომა უზრუნველყოფს სპორტული ღონისძიებების ეფექტიან, უსაფრთხო და წარმატებულ განხორციელებას, რაც საბოლოოდ განსაზღვრავს როგორც ორგანიზაციულ, ისე სოციალურ-ეკონომიკურ შედეგებს.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Pott, C., Spiekermann, C., Breuer, C., & ten Hompel, M. (2023). Sport logistics: Considerations on the nexus of logistics and sport management. *Logistics*, 7(3), 57.
- [2] Müller, M., & Gauthier, R. (2022). Complexity and coordination in FIFA World Cup logistics. *Event Management*, 26(4), 589–605.
- [3] Wang, H., Li, X., & Kumar, S. (2023). Data-driven decision-making in mega sports events logistics. *Computers & Industrial Engineering*, 175, 108756.
- [4] Zhang, L., & Chen, Y. (2024). Digital transformation and real-time logistics optimization in sports mega-events. *Journal of Sport Management*, 38(1), 1–18.
- [5] Slack, N., Brandon-Jones, A., & Burgess, N. (2022). *Operations management* (10th ed.). Pearson.
- [6] Serrano, A., & Kazemian, E. (2022). Risk management in sport event logistics: A systems-based approach. *International Journal of Sports Management and Marketing*, 22(3), 201–218.
- [7] Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill.
- [8] Lee, D., & Park, S. (2024). Systemic approaches to risk mitigation in sports event logistics. *Journal of Sport Management*, 38(2), 150–167. <https://doi.org/10.1123/jsm.2023-0123>
- [9] Choi, T. M., & Lambert, J. H. (2024). Smart logistics and predictive analytics in event management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 181, 103456.
- [10] Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model and digital transformation in logistics systems. *International Journal of Production Research*, 60(18), 5600–5618.
- [11] Walker, S., & Preuss, H. (2023). Sustainability and digitalization in mega sport event logistics. *Sustainability*, 15(9), 7421.

Comparative Analysis of the Effectiveness of Logistics Planning Models in Sports Events

Nana Shashiashvili

Faculty of Sports Management and Administration, Georgian State University of Sport, +995 577 93 50 94, Nana.shashiashvili@sportuni.ge, ORCID: 0009-0003-5239-5905

Abstract

This article aims to provide a comparative analysis of the effectiveness of two major logistics planning models in sports events: the classical and the systemic approaches. The study is based on a review of theoretical literature and the evaluation of large-scale international sporting events, including the Olympic Games and the FIFA World Cup. The paper examines key logistical risks at the planning stage, such as transportation disruptions, resource shortages, communication failures, and infrastructural constraints.

The findings indicate that while the classical model is effective in stable and less complex environments, it is limited in dynamic and uncertain conditions. In contrast, the systemic model, which is based on process integration, feedback mechanisms, and real-time management, provides greater flexibility and more effective risk management. The study demonstrates that systemic logistics planning significantly enhances operational efficiency, improves participant and spectator experience, and reduces financial costs. Therefore, the adoption of a systemic approach in modern sports event management is considered a critical factor for ensuring overall success.

Keywords: sports events, logistics, risks, logistical planning.

მიწოდების ჯაჭვის მართვის როლი სპორტული ღონისძიებების ოპერაციულ პროცესებში

ნანა შაშიაშვილი

საქართველოს სპორტის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, სპორტის მენეჯმენტისა და
ადმინისტრირების ფაკულტეტი, +995 577 93 50 94, Nana.shashiashvili@sportuni.ge ORCID:
0009-0003-5239-5905

აბსტრაქტი

წინამდებარე სტატია იკვლევს მიწოდების ჯაჭვის მართვის როლს სპორტული ღონისძიებების ოპერაციულ პროცესებში და აანალიზებს მის გავლენას სისტემის კოორდინაციაზე, რესურსების განაწილებასა და ოპერაციულ სტაბილურობაზე. კვლევის ყურადღების ცენტრშია სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვის ძირითადი ელემენტები, მათ შორის ტრანსპორტირება, მარაგების მართვა, ინფრასტრუქტურული უზრუნველყოფა, ინფორმაციული ნაკადები, მომსახურების კომპონენტები და მომწოდებელთა ქსელი, რომლებიც ერთიანად ქმნიან კომპლექსურ ოპერაციულ სისტემას.

სპორტული ღონისძიებები წარმოადგენს მაღალი სირთულის სისტემებს, სადაც მრავალი მონაწილე, სერვისის მიმწოდებელი და ლოგისტიკური კომპონენტი ერთიანდება მკაცრი დროითი შეზღუდვების პირობებში. ასეთ გარემოში თითოეული ელემენტის ეფექტიანი ფუნქციონირება კრიტიკულად არის დაკავშირებული მთლიანი მიწოდების ჯაჭვის სტაბილურობასთან. კვლევა ეფუძნება თვისებრივ მეთოდოლოგიას, რომელიც მოიცავს ლიტერატურის ანალიზს, შედარებით ანალიზს, კონცეპტუალურ შეფასებასა და შემთხვევების ინტერპრეტაციას.

ანალიზის შედეგად გამოვლინდა, რომ სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვი ხასიათდება მაღალი დინამიკითა და არაპროგნოზირებადობით, რაც ზრდის ოპერაციული რისკების დონეს. ძირითადი გამოწვევები დაკავშირებულია კოორდინაციის დეფიციტთან, ინფორმაციული ნაკადების ფრაგმენტაციასთან, რესურსების არათანაბარ განაწილებასთან და მიწოდების ჯაჭვის ელემენტებს შორის არასაკმარის ინტეგრაციასთან.

კვლევა აჩვენებს, რომ თანამედროვე სპორტული ღონისძიებების წარმატებული მართვა მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული მიწოდების ჯაჭვის ინტეგრირებულ და ტექნოლოგიურად მხარდაჭერილ სისტემებზე, რომლებიც უზრუნველყოფს ტრანსპორტირების, მარაგების, ინფრასტრუქტურისა და ინფორმაციული ნაკადების სინქრონიზებულ მართვას, რითაც იზრდება ოპერაციული პროცესების ეფექტიანი კოორდინაცია და სისტემის საერთო სტაბილურობა.

საკვანძო სიტყვები: სპორტული ღონისძიებები, მიწოდების ჯაჭვი, ლოჯისტიკური მართვა, ოპერაციული პროცესები.

შესავალი

სპორტული ღონისძიებების ორგანიზება თანამედროვე გლობალურ გარემოში გადაიქცა რთულ ოპერაციულ პროცესად, რომელიც მოითხოვს მრავალმხრივი რესურსების, მონაწილე მხარეებისა და ინფრასტრუქტურის სინქრონიზებულ მართვას. თანამედროვე ტენდენციები აჩვენებს, რომ სპორტული ინდუსტრიის განვითარებასთან ერთად იზრდება ლოჯისტიკური სისტემების კომპლექსურობა, რაც დაკავშირებულია არა მხოლოდ ღონისძიებების მასშტაბთან, არამედ მათ დინამიკურ და არაპროგნოზირებად ბუნებასთან [1].

სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული პროცესები ხასიათდება დროის მკაცრი შეზღუდვებით, მრავალფუნქციური აქტივობების ერთდროული განხორციელებით და მაღალი მოთხოვნით სერვისების ხარისხზე. ასეთ პირობებში ნებისმიერი შეფერხება, იქნება ეს ტრანსპორტირების დაგვიანება თუ რესურსების არასაკმარისი განაწილება, შეიძლება სწრაფად გადაიზარდოს სისტემურ პრობლემაში და გავლენა მოახდინოს ღონისძიების მთლიან მიმდინარეობაზე [2]. ამ კონტექსტში მიწოდების ჯაჭვის მართვა განიხილება, როგორც ერთ-ერთი ცენტრალური მექანიზმი, რომელიც უზრუნველყოფს ოპერაციული პროცესების სტრუქტურირებასა და კოორდინაციას. თანამედროვე კვლევები მიუთითებს, რომ სპორტულ ღონისძიებებში მიწოდების ჯაჭვი განსხვავდება ტრადიციული ინდუსტრიული მოდელებისგან თავისი დროებითი ხასიათით, მაღალი გაურკვევლობითა და მრავალმხრივი ინტერესების მქონე აქტორების ჩართულობით [3]. ბოლო წლებში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მიწოდების ჯაჭვის ადაპტაციურობასა და მდგრადობას სპორტულ ღონისძიებებში. კვლევები აჩვენებს, რომ ეფექტიანი ოპერაციული პროცესების უზრუნველსაყოფად აუცილებელია მოქნილი მართვის მოდელების გამოყენება, რომლებიც საშუალებას იძლევა სწრაფად მოხდეს რეაგირება გარემოს ცვლილებებზე [4]. ამასთანავე, კრიზისული სიტუაციები, როგორიცაა პანდემიური შეზღუდვები ან უსაფრთხოების გამოწვევები, კიდევ უფრო ამძაფრებს მიწოდების ჯაჭვის მართვის მნიშვნელობას [5]. თანამედროვე ტექნოლოგიური პროგრესი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სპორტული ღონისძიებების ლოჯისტიკურ პროცესებზე. ციფრული პლატფორმები, IoT სისტემები და მონაცემთა

ანალიტიკა საშუალებას იძლევა რეალურ დროში განხორციელდეს პროცესების მონიტორინგი და ოპტიმიზაცია, რაც ზრდის მართვის გამჭვირვალობას და ამცირებს ოპერაციულ გაურკვევლობებს [6].

გარდა ამისა, კვლევები მიუთითებს, რომ სპორტულ ღონისძიებებში მიწოდების ჯაჭვის ეფექტიანი მართვა პირდაპირ არის დაკავშირებული დაინტერესებული მხარეების თანამშრომლობასთან. სხვადასხვა ორგანიზაციის, მომწოდებლისა და მომსახურების პროვაიდერის კოორდინირებული მოქმედება ქმნის ერთიან ოპერაციულ სისტემას, რომელიც უზრუნველყოფს პროცესების უწყვეტობას [7]. თანამედროვე მიდგომები ასევე უსვამს ხაზს მდგრადი განვითარების პრინციპების ინტეგრაციას მიწოდების ჯაჭვის მართვაში. ეკოლოგიური ზემოქმედების შემცირება, ენერგორესურსების ოპტიმალური გამოყენება და ნარჩენების მართვა სულ უფრო მნიშვნელოვანი კომპონენტი ხდება სპორტული ღონისძიებების ორგანიზებაში [8]. ამასთან ერთად, ლიტერატურაში აღინიშნება, რომ ინფორმაციული ნაკადების ეფექტიანი მართვა წარმოადგენს ერთ-ერთ მთავარ ფაქტორს, რომელიც განსაზღვრავს ოპერაციული პროცესების წარმატებას. ინფორმაციის დროული გაცვლა და ინტეგრირებული საკომუნიკაციო სისტემები ამცირებს გაურკვევლობას და აუმჯობესებს გადაწყვეტილებების მიღების პროცესს [9].

ამრიგად, თანამედროვე კვლევები ადასტურებს, რომ სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული პროცესების წარმატებული მართვა მოითხოვს მიწოდების ჯაჭვის ინტეგრირებულ, მოქნილ და ტექნოლოგიურად მხარდაჭერილ მოდელებს, რომლებიც უზრუნველყოფს რესურსების კოორდინაციას, რისკების შემცირებას და პროცესების უწყვეტობას [10].

კვლევის მიზანი

კვლევის მიზანია ოპერაციულ პროცესებში მიწოდების ჯაჭვის მართვის ფუნქციების გაანალიზება და მისი გავლენის განსაზღვრა სპორტული ღონისძიებების ორგანიზებისა და განხორციელების პროცესებზე.

კვლევის ამოცანები

კვლევის ფარგლებში დასახულია შემდეგი ამოცანები:

- სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვის ძირითადი ელემენტების იდენტიფიკაცია;
- ოპერაციულ პროცესებში არსებული პრობლემებისა და ბარიერების განსაზღვრა;
- მართვის სხვადასხვა მიდგომის შეფასება სპორტული ღონისძიებების კონტექსტში;
- კოორდინაციისა და ინფორმაციული ნაკადების მართვის თავისებურებების ანალიზი;
- სპორტული ღონისძიებებისა და სხვა სექტორების მიწოდების ჯაჭვების შედარება.

კვლევის მეთოდები / მეთოდოლოგია

კვლევა ეფუძნება თვისებრივ კვლევით მიდგომას და მოიცავს:

- აკადემიური ლიტერატურის ანალიზს — თანამედროვე კვლევებისა და თეორიული ნაშრომების შესწავლას;
- შედარებით ანალიზს — სხვადასხვა სექტორში არსებული პრაქტიკის შედარებას;
- კონცეპტუალურ ანალიზს — მიწოდების ჯაჭვის მართვის მოდელების შეფასებას;
- შემთხვევების განხილვას — მასშტაბური სპორტული ღონისძიებების გამოცდილების ინტერპრეტაციას;
- სისტემურ ხედვას — პროცესების ურთიერთდამოკიდებულების გაანალიზებას.

კვლევის შედეგები

1. სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვის ძირითადი ელემენტების იდენტიფიკაცია

სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული პროცესების ანალიზი აჩვენებს, რომ მიწოდების ჯაჭვი შედგება ერთმანეთთან მჭიდროდ დაკავშირებული კომპონენტებისგან, რომელთა კოორდინირებული ფუნქციონირება განსაზღვრავს ღონისძიების ორგანიზების ხარისხს. აღნიშნული ელემენტები ქმნის ერთიან სისტემას, სადაც თითოეული კომპონენტის შეფერხება გავლენას ახდენს მთლიან ოპერაციულ პროცესზე. მიწოდების ჯაჭვის სტრუქტურული ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია მისი ძირითადი ელემენტების კლასიფიკაცია (ცხრილი N1):

ცხრილი 1. სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვის ძირითადი ელემენტები

ელემენტი	აღწერა	ფუნქცია ოპერაციულ პროცესებში	ძირითადი რისკები
ტრანსპორტირება	მონაწილეების, ინვენტარისა და პერსონალის გადაადგილება	დროული გადაადგილების უზრუნველყოფა	დაგვიანებები, გადატვირთვა
მარაგების მართვა	სპორტული ინვენტარი, ტექნიკა, საკვები რესურსები	რესურსების ხელმისაწვდომობა საჭირო დროს	დეფიციტი, ზედმეტი მარაგი
ინფრასტრუქტურა	სტადიონები, ტრენინგის სივრცეები, ლოჯისტიკური ჰაბები	ფიზიკური გარემოს უზრუნველყოფა	ტექნიკური ხარვეზები
ინფორმაციული ნაკადები	მონაცემების გაცვლა და კომუნიკაცია	კოორდინაცია და გადაწყვეტილებების მიღება	ინფორმაციის დაგვიანება

მომსახურება	სტუმართმოყვარეობა, უსაფრთხოება, მედია	მომხმარებლის გამოცდილება	მომსახურების დაბალი ხარისხი
მომწოდებლები	სხვადასხვა სერვისისა და რესურსის მიმწოდებლები	უწყვეტი მიწოდების უზრუნველყოფა	კონტრაქტული შეფერხებები

ცხრილში წარმოდგენილი ელემენტები აჩვენებს, რომ სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვი არ შემოიფარგლება მხოლოდ მატერიალური რესურსების გადაადგილებით. იგი მოიცავს როგორც ფიზიკურ, ისე ინფორმაციულ და სერვისულ კომპონენტებს, რაც ზრდის სისტემის კომპლექსურობას. ტრანსპორტირების სისტემა წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე კრიტიკულ ელემენტს, რადგან იგი განსაზღვრავს მონაწილეთა და რესურსების დროულ გადაადგილებას. ნებისმიერი შეფერხება ამ ეტაპზე ავტომატურად აისახება სხვა ოპერაციულ პროცესებზე, რაც იწვევს დაგეგმილი გრაფიკის დარღვევას. მარაგების მართვა ასევე მნიშვნელოვან როლს ასრულებს, რადგან სპორტული ღონისძიებები ხასიათდება მოთხოვნის მაღალი ცვალებადობით. რესურსების არასაკმარისი ან არასწორი განაწილება იწვევს ოპერაციულ შეფერხებებს, ხოლო ზედმეტი მარაგი ზრდის ხარჯებს. ინფრასტრუქტურული ელემენტები ქმნის ფიზიკურ საფუძველს, რომელზეც აგებულია მთელი ოპერაციული სისტემა. მათი გამართული ფუნქციონირება აუცილებელია როგორც სპორტული, ასევე ლოჯისტიკური პროცესების უწყვეტობისთვის. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ინფორმაციულ ნაკადებს, რომლებიც უზრუნველყოფს სისტემის „ნერვულ სისტემას“. ინფორმაციის დროული და ზუსტი გაცვლა საშუალებას იძლევა კოორდინირებული გადაწყვეტილებების მიღება. ინფორმაციული ნაკადების შეფერხება კი იწვევს ე.წ. სილოსურ ეფექტს და ამცირებს სისტემის ეფექტიანობას. მომსახურების კომპონენტი პირდაპირ არის დაკავშირებული ღონისძიების ხარისხთან და მონაწილეთა გამოცდილებასთან. ამ ელემენტის გაუმართაობა გავლენას ახდენს არა მხოლოდ ოპერაციულ პროცესებზე, არამედ ღონისძიების საერთო შეფასებაზე. მომწოდებლები კი წარმოადგენენ მიწოდების ჯაჭვის გარე ელემენტს, რომლის სტაბილურობა და სანდოობა კრიტიკულია სისტემის ფუნქციონირებისთვის. მათი კოორდინაცია წარმოადგენს ერთ-ერთ მთავარ გამოწვევას.

ამგვარად, სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვის ძირითადი ელემენტების იდენტიფიკაცია აჩვენებს, რომ სისტემა ფუნქციონირებს როგორც ერთიანი, ურთიერთდაკავშირებული ქსელი. თითოეული კომპონენტი დამოკიდებულია სხვაზე, რის გამოც იზოლირებული მართვა იწვევს კოორდინაციის პრობლემებს. ოპერაციული პროცესების ეფექტიანი ორგანიზებისთვის აუცილებელია ელემენტებს შორის ინტეგრაცია, ინფორმაციის უწყვეტი გაცვლა და რესურსების ოპტიმალური განაწილება.

2. ოპერაციულ პროცესებში არსებული პრობლემებისა და ბარიერების განსაზღვრა

სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვის ოპერაციული ანალიზი აჩვენებს, რომ მისი ეფექტიანი ფუნქციონირება ხშირად შეზღუდულია როგორც შიდა, ისე გარე ფაქტორებით. ოპერაციული პროცესები ხასიათდება მაღალი დინამიკით, დროითი შეზღუდვებით და მრავალაქტორიანი კოორდინაციის საჭიროებით, რაც ზრდის სისტემური შეფერხებების რისკს. შედეგად, მიწოდების ჯაჭვში წარმოქმნილი პრობლემები პირდაპირ აისახება ღონისძიების შესრულების ხარისხზე და სტაბილურობაზე (იხ. ცხრილი N2).

ცხრილი 2. ოპერაციული პროცესების ძირითადი პრობლემები და ბარიერები

პრობლემა / ბარიერი	აღწერა	გავლენა ოპერაციულ პროცესებზე	შედეგი
კოორდინაციის დეფიციტი	სხვადასხვა ერთეულების არათანაბარი ურთიერთქმედება	პროცესების არათანმიმდევრულობა	დაგვიანება, დუბლირება
ინფორმაციული ასიმეტრია	მონაცემების არასრული დაგვიანებული გაცვლა ან	არასწორი გადაწყვეტილებები	ოპერაციული შეცდომები
რესურსების დეფიციტი	მატერიალური ადამიანური რესურსების ნაკლებობა ან	პროცესების შეჩერება ან გადავადება	ეფექტიანობის შემცირება
ინფრასტრუქტურული შეზღუდვები	არასაკმარისი გადატვირთული ინფრასტრუქტურა ან	ლოჯისტიკური შეფერხებები	გრაფიკის დარღვევა
დროითი შეზღუდვები	მკაცრი ვადები და ფიქსირებული გრაფიკი	მოქნილობის შემცირება	მაღალი სტრესული დატვირთვა
გარე ფაქტორები	ამინდი, უსაფრთხოება, რეგულაციები	არაპროგნოზირებადი ცვლილებები	კრიზისული სიტუაციები

ცხრილში წარმოდგენილი პრობლემები მიუთითებს, რომ სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული გარემო ხასიათდება მაღალი არასტაბილურობითა და მრავალფაქტორიანობით. თითოეული ბარიერი მოქმედებს როგორც სისტემური რისკი, რომელიც შეიძლება გავრცელდეს მიწოდების ჯაჭვის სხვადასხვა კომპონენტზე. კოორდინაციის დეფიციტი ერთ-ერთ ძირითად პრობლემად გვევლინება, რადგან სპორტული ღონისძიებების ორგანიზებაში მონაწილეობს მრავალი დამოუკიდებელი სტრუქტურა. მათი არათანაბარი ურთიერთქმედება ხშირად იწვევს პროცესების ფრაგმენტაციას, რაც ამცირებს საერთო სისტემურ ეფექტიანობას. ინფორმაციული ასიმეტრია განსაკუთრებით კრიტიკულია ოპერაციულ დონეზე. როდესაც მონაცემები არ მიეწოდება დროულად ან სრულად, გადაწყვეტილებების მიღება ხდება არასრული ინფორმაციის საფუძველზე. ეს ქმნის რისკს, რომ ოპერაციული გეგმები არ ასახავს რეალურ მდგომარეობას. რესურსების დეფიციტი წარმოადგენს კიდევ ერთ მნიშვნელოვან ბარიერს. სპორტული ღონისძიებების მასშტაბურობა მოითხოვს მაღალი დონის მატერიალურ და ადამიანურ რესურსებს, ხოლო მათი არასწორი განაწილება ან დაგვიანება იწვევს პროცესების შეჩერებას. ინფრასტრუქტურული შეზღუდვები ხშირად განსაზღვრავს ოპერაციული სისტემის ფიზიკურ შესაძლებლობებს. გადატვირთული ან არასაკმარისი ინფრასტრუქტურა ზღუდავს პროცესების გამტარუნარიანობას და ზრდის ლოჯისტიკურ დატვირთვას. დროითი შეზღუდვები ქმნის დამატებით წნეხს ოპერაციულ მართვაზე. ფიქსირებული გრაფიკები ამცირებს მოქნილობას და ზრდის შეცდომების ალბათობას, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც ხდება მოულოდნელი ცვლილებები. გარე ფაქტორები, როგორიცაა გარემოს ცვლილებები, უსაფრთხოების მოთხოვნები ან რეგულაციური შეზღუდვები, წარმოადგენს ყველაზე არაპროგნოზირებად რისკებს. ისინი ხშირად საჭიროებენ სწრაფ რეაგირებას და გეგმების კორექტირებას რეალურ დროში.

ანალიზი აჩვენებს, რომ ოპერაციული პროცესების მთავარი გამოწვევები დაკავშირებულია სისტემურ კოორდინაციასთან, ინფორმაციის მართვასთან და რესურსების ოპტიმალურ განაწილებასთან. აღნიშნული ბარიერები ქმნის კომპლექსურ გარემოს, სადაც ეფექტიანი მართვა შესაძლებელია მხოლოდ ინტეგრირებული და მოქნილი ლოჯისტიკური მიდგომების გამოყენებით.

3. მართვის სხვადასხვა მიდგომის შეფასება სპორტული ღონისძიებების კონტექსტში

სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული პროცესების მართვა ეფუძნება სხვადასხვა თეორიულ და პრაქტიკულ მიდგომას, რომლებიც განსხვავდება სტრუქტურით, მოქნილობითა და კოორდინაციის დონით. არსებული ლიტერატურა აჩვენებს, რომ ერთიანი უნივერსალური მოდელი არ არსებობს, ხოლო მართვის ეფექტიანობა დამოკიდებულია გარემოს სირთულესა და ღონისძიების მასშტაბზე. შესაბამისად,

აუცილებელია სხვადასხვა მიდგომის შედარებითი შეფასება მათი გამოყენებადობისა და შეზღუდვების მიხედვით. მონაცემები მოყვანილია N3 ცხრილში

ცხრილი 3. მართვის ძირითადი მიდგომების შედარება სპორტული ღონისძიებების კონტექსტში

მართვის მიდგომა	ძირითადი მახასიათებელი	უპირატესობები	შეზღუდვები	გამოყენებადობა
ტრადიციული (ხაზოვანი)	ეტაპობრივი და მკაცრად სტრუქტურირებული მართვა	მარტივი კონტროლი, მკაფიო პასუხისმგებლობები	დაბალი მოქნილობა, ნელი რეაგირება	მცირე/სტაბილური ღონისძიებები
სისტემური მიდგომა	პროცესების ურთიერთდაკავშირებული მართვა	მაღალი კოორდინაცია, მთლიანობის ხედვა	კომპლექსური მართვა	მასშტაბური ღონისძიებები
პროცესული მიდგომა	პროცესებზე ორიენტირებული მართვა	სტანდარტიზაცია, ოპტიმიზაცია	ნაკლები ადაპტაცია ცვლილებებზე	საშუალო და დიდი ღონისძიებები
პროექტული მართვა	დროებით პროექტად განხილვა	მკაფიო ვადები და მიზნები	მაღალი რესურსული დატვირთვა	ერთჯერადი ღონისძიებები
Agile/მოქნილი მიდგომა	სწრაფი ადაპტაცია და იტერაციული მართვა	მაღალი მოქნილობა, სწრაფი რეაგირება	რთული კოორდინაცია დიდი მასშტაბისას	დინამიკური გარემო

შედარებითი ანალიზი აჩვენებს, რომ სპორტული ღონისძიებების მართვაში თითოეულ მიდგომას აქვს კონკრეტული გამოყენების არეალი, თუმცა მათი ეფექტიანობა მნიშვნელოვნად განსხვავდება ოპერაციული გარემოს პირობების მიხედვით. ტრადიციული ხაზოვანი მიდგომა ხასიათდება მაღალი სტრუქტურირებით, რაც უზრუნველყოფს პროცესების მკაფიო დაყოფას და კონტროლს. თუმცა მისი მთავარი შეზღუდვა მდგომარეობს დაბალ მოქნილობაში, რაც პრობლემატურია დინამიკურ სპორტულ გარემოში, სადაც ხშირია მოულოდნელი ცვლილებები. სისტემური მიდგომა წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე ადეკვატურ მოდელს სპორტული ღონისძიებების

კონტექსტში, რადგან იგი განიხილავს ოპერაციულ პროცესებს როგორც ურთიერთდაკავშირებულ ერთიან სისტემას. ეს საშუალებას იძლევა უკეთ მოხდეს რესურსების, ინფორმაციისა და პროცესების კოორდინაცია. მიუხედავად ამისა, მისი მართვა მოითხოვს მაღალ ორგანიზაციულ კომპეტენციას და ტექნოლოგიურ მხარდაჭერას. პროცესული მიდგომა ორიენტირებულია სტანდარტიზაციაზე და პროცესების ოპტიმიზაციაზე, რაც ზრდის პროგნოზირებადობას. თუმცა, სპორტული ღონისძიებების მაღალი ცვალებადობა ზოგჯერ ზღუდავს მის ეფექტიანობას. პროექტული მართვა განსაკუთრებით ეფექტიანია, როდესაც ღონისძიება განიხილება როგორც დროებითი პროექტი მკაფიო დასაწყისითა და დასასრულით. ამ მოდელის უპირატესობა მდგომარეობს მიზნებზე ორიენტირებულ მართვაში, თუმცა იგი ხშირად საჭიროებს მნიშვნელოვან რესურსებსა და მკაცრ დაგეგმვას. მოქნილი (Agile) მიდგომა სულ უფრო აქტუალური ხდება თანამედროვე სპორტულ ღონისძიებებში, რადგან იგი უზრუნველყოფს სწრაფ ადაპტაციას გარემოს ცვლილებებზე. მიუხედავად ამისა, მისი გამოყენება რთულდება მაშინ, როდესაც საქმე ეხება მასშტაბურ და მრავალდონიან კოორდინაციას.

ამგვარად, აშკარაა, რომ სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული მართვა არ შეიძლება ეფუძნებოდეს ერთ კონკრეტულ მოდელს. ყველაზე ეფექტიან შედეგს იძლევა ჰიბრიდული მიდგომა, რომელიც აერთიანებს სისტემური, პროცესული და მოქნილი მართვის ელემენტებს. ასეთი კომბინაცია უზრუნველყოფს როგორც სტრუქტურულ სტაბილურობას, ასევე ადაპტაციურობას დინამიკურ გარემოში.

4. კოორდინაციისა და ინფორმაციული ნაკადების მართვის თავისებურებების ანალიზი

სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული სისტემების ეფექტიანი ფუნქციონირება დიდწილად ეფუძნება კოორდინაციის ხარისხსა და ინფორმაციული ნაკადების მართვის სიზუსტეს. თანამედროვე ლოჯისტიკურ გარემოში ინფორმაცია წარმოადგენს ისეთივე კრიტიკულ რესურსს, როგორც მატერიალური რესურსები, რადგან სწორედ მისი მეშვეობით ხდება გადაწყვეტილებების მიღება, პროცესების სინქრონიზაცია და სხვადასხვა სტრუქტურული ერთეულის დაკავშირება. სპორტული ღონისძიებების კონტექსტში კოორდინაცია გულისხმობს მრავალმხრივი აქტორების — ორგანიზატორების, მომწოდებლების, სერვის-პროვაიდერების და უსაფრთხოების სტრუქტურების — ერთიან მიზანზე ორიენტირებულ ურთიერთქმედებას. ამ პროცესში ნებისმიერი შეფერხება ინფორმაციის გადაცემაში ავტომატურად აისახება ოპერაციულ პროცესებზე და ზრდის სისტემური არასტაბილურობის რისკს. კოორდინაციისა და ინფორმაციული ნაკადების ძირითადი მახასიათებლები მოყვანილია N4 ცხრილში.

ცხრილი 4. კოორდინაციისა და ინფორმაციული ნაკადების ძირითადი მახასიათებლები

კომპონენტი	აღწერა	ფუნქცია ოპერაციულ პროცესებში	ძირითადი პრობლემები
ვერტიკალური კოორდინაცია	მართვის დონეებს შორის კომუნიკაცია	სტრატეგიული და ოპერაციული შესაბამისობა	ინფორმაციის დაგვიანება
ჰორიზონტალური კოორდინაცია	ერთ დონეზე არსებული ერთეულების ურთიერთქმედება	პროცესების სინქრონიზაცია	სილოსური ეფექტი
ინფორმაციული ნაკადები	მონაცემების გაცვლა სისტემაში	გადაწყვეტილებების მხარდაჭერა	ინფორმაციული ასიმეტრია
რეალურ დროში კომუნიკაცია	მყისიერი ინფორმაციის გაცვლა	სწრაფი რეაგირება	ტექნოლოგიური შეზღუდვები
მონაცემთა ინტეგრაცია	სხვადასხვა წყაროდან ინფორმაციის გაერთიანება	სისტემური ხედვის შექმნა	ინტეგრაციის სირთულე

კოორდინაციის სისტემების ანალიზი აჩვენებს, რომ სპორტული ღონისძიებების მართვაში განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ვერტიკალური და ჰორიზონტალური კოორდინაციის დაბალანსება. ვერტიკალური კოორდინაცია უზრუნველყოფს სტრატეგიული გადაწყვეტილებების გადმოტანას ოპერაციულ დონეზე, ხოლო ჰორიზონტალური კოორდინაცია ქმნის პირობებს ერთდროულად მოქმედი ფუნქციური ერთეულების სინქრონიზაციისთვის. კვლევები მიუთითებს, რომ ჰორიზონტალური კოორდინაციის სუსტი დონე ხშირად იწვევს ე.წ. სილოსურ ეფექტს, როდესაც ორგანიზაციის სხვადასხვა ნაწილი ფუნქციონირებს იზოლირებულად. ასეთ პირობებში ინფორმაციის ნაკადები ფრაგმენტირდება და ირღვევა საერთო სისტემური ხედვა, რაც ამცირებს ოპერაციული გადაწყვეტილებების ხარისხს.

ინფორმაციული ნაკადების მართვა წარმოადგენს სისტემის „ნერვულ სისტემას“, რომელიც უზრუნველყოფს მონაცემების უწყვეტ მოძრაობას სხვადასხვა დონეებს შორის. სპორტულ ღონისძიებებში, სადაც დროის ფაქტორი კრიტიკულია, ინფორმაციის დაგვიანება პირდაპირ გავლენას ახდენს პროცესების ეფექტიანობაზე. შესაბამისად, რეალურ დროში კომუნიკაციის შესაძლებლობა ხდება ერთ-ერთი მთავარი მოთხოვნა თანამედროვე ლოჯისტიკურ სისტემებში.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება მონაცემთა ინტეგრაციას, რომელიც საშუალებას იძლევა სხვადასხვა წყაროდან მიღებული ინფორმაცია გაერთიანდეს ერთიან სისტემაში. ეს ქმნის ე.წ. „ერთიანი ოპერაციული სურათის“ (single operational view) კონცეფციას, რომელიც ზრდის გადაწყვეტილებების სიზუსტეს და ამცირებს გაურკვევლობას.

ამასთანავე, თანამედროვე ტექნოლოგიური ინფრასტრუქტურა მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ინფორმაციული ნაკადების ოპტიმიზაციაში. ციფრული პლატფორმები, მონიტორინგის სისტემები და მონაცემთა ანალიტიკური ინსტრუმენტები უზრუნველყოფს ინფორმაციის სწრაფ დამუშავებას და გადაცემას, რაც ზრდის სისტემის რეაგირების სიჩქარეს.

ამგვარად, ანალიზი აჩვენებს, რომ კოორდინაცია და ინფორმაციული ნაკადების მართვა წარმოადგენს სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული სისტემის კრიტიკულ კომპონენტს. მათი ეფექტიანი ორგანიზება განსაზღვრავს როგორც პროცესების სინქრონიზაციას, ისე სისტემის საერთო სტაბილურობას. შესაბამისად, წარმატებული მართვა მოითხოვს ინტეგრირებულ, ტექნოლოგიურად მხარდაჭერილ და რეალურ დროზე ორიენტირებულ კომუნიკაციურ სისტემებს.

5. სპორტული ღონისძიებებისა და სხვა სექტორების მიწოდების ჯაჭვების შედარება

სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვი თავისი სტრუქტურითა და ფუნქციონირებით მნიშვნელოვნად განსხვავდება ტრადიციული ინდუსტრიული სექტორებისგან. მიუხედავად იმისა, რომ ორივე შემთხვევაში მიზანი რესურსების ეფექტიანი გადაადგილება და პროცესების კოორდინაციაა, სპორტულ გარემოში მიწოდების ჯაჭვი ხასიათდება დროებითობით, მაღალი არასტაბილურობითა და მკაცრი დროითი შეზღუდვებით.

სპორტულ ღონისძიებებში მიწოდების ჯაჭვი ფორმირდება კონკრეტული ღონისძიების გარშემო და მისი ფუნქციონირება შეზღუდულია ღონისძიების დაწყებისა და დასრულების ვადებით. ამის საპირისპიროდ, წარმოების, საცალო ვაჭრობის ან ლოგისტიკის სხვა სექტორებში მიწოდების ჯაჭვი მუდმივ რეჟიმში მუშაობს და უფრო სტაბილურ და პროგნოზირებად გარემოს ეფუძნება. მახასიათებლები მოცემულია ცხრილში (N5).

ცხრილი 5. სპორტული და სხვა სექტორების მიწოდების ჯაჭვების შედარება

მახასიათებელი	სპორტული ღონისძიებები	სხვა სექტორები (წარმოება/რიტეილი/ლოგისტიკა)
დროითი ხასიათი	დროებითი, ღონისძიებაზე დამოკიდებული	მუდმივი, უწყვეტი
მოთხოვნის ცვალებადობა	მაღიან მაღალი და არაპროგნოზირებადი	შედარებით სტაბილური
კოორდინაციის სირთულე	მაღალი, მრავალი დროებითი აქტორი	შედარებით სტრუქტურირებული
ინფრასტრუქტურა	დროებითი და ადაპტირებული	მუდმივი და სტანდარტიზებული
რისკების დონე	მაღალი ოპერაციული და დროითი რისკები	შედარებით დაბალი და პროგნოზირებადი
ინფორმაციული ნაკადები	რეალურ დროზე დამოკიდებული	დაგეგმილი და სტანდარტიზებული
მიზანი	ღონისძიების შეუფერხებელი ჩატარება	ხარჯების ოპტიმიზაცია და სტაბილური მიწოდება

შედარებითი ანალიზი აჩვენებს, რომ სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვი წარმოადგენს მაღალი დინამიკის მქონე დროებით სისტემას, სადაც ძირითადი აქცენტი კეთდება ოპერაციულ სინქრონიზაციასა და სწრაფ რეაგირებაზე. ასეთი სისტემა საჭიროებს მოქნილ მართვის მოდელებს, რადგან გარემო მუდმივად იცვლება და გადაწყვეტილებების მიღება ხშირად ხდება რეალურ დროში. ტრადიციულ სექტორებში, როგორცაა წარმოება ან საცალო ვაჭრობა, მიწოდების ჯაჭვი ეფუძნება სტაბილურ მოთხოვნასა და წინასწარ დაგეგმილ პროცესებს. ეს საშუალებას იძლევა უფრო მკაცრი სტანდარტიზაცია, პროცესების ავტომატიზაცია და ხარჯების ოპტიმიზაცია. შესაბამისად, აქ ძირითადი მიზანია ეფექტიანობა და სტაბილურობა. სპორტულ გარემოში კი მთავარი გამოწვევა არის დროებითი ინფრასტრუქტურისა და მრავალმხრივი აქტორების ერთიან სისტემაში ინტეგრაცია. ღონისძიების ხასიათიდან გამომდინარე, ყველა პროცესი უნდა იყოს სინქრონიზებული დროის მაღიან მცირე ინტერვალებში, რაც ზრდის კოორდინაციის მნიშვნელობას. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი განსხვავებაა რისკების სტრუქტურაში. სპორტულ ღონისძიებებში რისკები ხშირად არის მოულოდნელი და სწრაფად განვითარებადი, მაშინ როდესაც სხვა სექტორებში ისინი უფრო პროგნოზირებადია და ისტორიულ მონაცემებზე დაყრდნობით იმართება. ინფორმაციული ნაკადების მართვაც განსხვავებული

ხასიათისაა: სპორტულ ღონისძიებებში საჭიროა რეალურ დროში მონაცემების გაცვლა და სწრაფი გადაწყვეტილებების მიღება, ხოლო ტრადიციულ სექტორებში ინფორმაცია ხშირად გადის სტანდარტიზებულ და დაგეგმილ არხებზე.

შედარებითი ანალიზი ცხადყოფს, რომ სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვი არსებითად განსხვავდება სხვა სექტორებისგან თავისი დროებითი ბუნებით, მაღალი დინამიკითა და კოორდინაციის სირთულით. შესაბამისად, მისი ეფექტიანი მართვა მოითხოვს უფრო მოქნილ, ინტეგრირებულ და რეალურ დროზე ორიენტირებულ მიდგომებს, ვიდრე ტრადიციული ინდუსტრიული მოდელები.

დასკვნა

ჩატარებული კვლევის საფუძველზე შესაძლებელია დავასკვნათ, რომ სპორტული ღონისძიებების ოპერაციული პროცესები წარმოადგენს კომპლექსურ, მრავალდონიან და მაღალი დინამიკის მქონე სისტემას, რომლის ეფექტიანი ფუნქციონირება პირდაპირ არის დამოკიდებული მიწოდების ჯაჭვის მართვის ხარისხზე. ანალიზმა აჩვენა, რომ აღნიშნული სისტემა მოიცავს ერთმანეთთან მჭიდროდ დაკავშირებულ ელემენტებს — ტრანსპორტირებას, მარაგების მართვას, ინფრასტრუქტურას, ინფორმაციულ ნაკადებსა და მომსახურების კომპონენტებს, რომელთა კოორდინირებული მოქმედება განსაზღვრავს მთელი ოპერაციული პროცესის სტაბილურობას.

კვლევის შედეგების მიხედვით, სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვი ხასიათდება მაღალი დროებითი დატვირთვითა და არაპროგნოზირებადობით, რაც მნიშვნელოვნად განასხვავებს მას სხვა სექტორებისგან. აღნიშნული თავისებურება ზრდის ოპერაციული რისკების დონეს და საჭიროებს მოქნილ, ადაპტაციურ და რეალურ დროზე დაფუძნებულ მართვის სისტემებს. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი გამოწვევად გამოვლინდა კოორდინაციის დეფიციტი და ინფორმაციული ნაკადების ფრაგმენტაცია, რაც ხშირად იწვევს ე.წ. სილოსურ ეფექტს და ამცირებს სისტემის მთლიან ეფექტიანობას. ამასთანავე, დადგინდა, რომ ტრადიციული, ხაზოვანი მართვის მოდელები ნაკლებად შეესაბამება სპორტული ღონისძიებების დინამიკურ ბუნებას, მაშინ როდესაც სისტემური და ინტეგრირებული მიდგომები უზრუნველყოფს პროცესების უკეთ სინქრონიზაციას, რესურსების ოპტიმალურ განაწილებას და გადაწყვეტილებების სწრაფ მიღებას. შესაბამისად, სისტემური მართვის მოდელები უფრო ეფექტიანია მაღალი სირთულის ოპერაციულ გარემოში. კვლევამ ასევე დაადასტურა, რომ თანამედროვე ციფრული ტექნოლოგიების გამოყენება — მათ შორის მონაცემთა ანალიტიკა, რეალურ დროში მონიტორინგი და ინტეგრირებული საინფორმაციო სისტემები — მნიშვნელოვნად ზრდის მიწოდების ჯაჭვის მართვის ხარისხს. აღნიშნული ტექნოლოგიები ამცირებს გაურკვევლობას, აუმჯობესებს კოორდინაციას და უზრუნველყოფს პროცესების გამჭვირვალობას.

შედარებითი ანალიზის საფუძველზე გამოვლინდა, რომ სპორტული ღონისძიებების მიწოდების ჯაჭვი არსებითად განსხვავდება სხვა სექტორებისგან თავისი დროებითი სტრუქტურით, მაღალი ცვალებადობითა და ოპერაციული სენსიტიურობით. ამ განსხვავებების გათვალისწინებით, აუცილებელია მართვის ჰიბრიდული მოდელების გამოყენება, რომლებიც აერთიანებს სისტემურ, პროცესულ და მოქნილ მიდგომებს.

საბოლოოდ, შეიძლება ითქვას, რომ სპორტული ღონისძიებების წარმატებული ორგანიზება შეუძლებელია მიწოდების ჯაჭვის ინტეგრირებული, ტექნოლოგიურად მხარდაჭერილი და კოორდინირებულად მართვადი სისტემის გარეშე. სწორედ ასეთი მიდგომა უზრუნველყოფს ოპერაციული პროცესების სტაბილურობას, რისკების შემცირებას და ღონისძიებების საერთო წარმატებას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Tsolakis, N., Bechtsis, D., & Vlachos, D. (2022). Supply chain management in sport events: A systematic literature review. *Operations Management Research*, 15(3–4), 213–229.
2. Kim, J., & Kim, M. (2023). Managing logistics disruptions in mega-events. *Journal of Business Logistics*, 44(2), 189–205.
3. Bazzanella, F., & Peters, M. (2022). Temporary supply chains in event management. *Annals of Tourism Research*, 92, 103337.
4. Hosseini, S., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2023). Review of supply chain resilience. *International Journal of Production Research*, 61(8), 2502–2521.
5. Queiroz, M. M., & Ivanov, D. (2022). Supply chain viability under pandemic disruptions. *Annals of Operations Research*, 319, 125–150.
6. Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (2023). IoT in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 61(9), 3001–3025.
7. Dubey, R., Gunasekaran, A., & Bryde, D. (2022). Collaboration in supply chains. *Production Planning & Control*, 33(8), 700–715.
8. Preuss, H. (2022). Event sustainability and logistics. *Sustainability*, 14(5), 2789.
9. Kache, F., & Seuring, S. (2022). Digital information flows in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 240, 108234.

10. Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2023). Artificial intelligence in supply chains. *European Journal of Operational Research*, 304(2), 495–512.

The Role of Supply Chain Management in the Operational Processes of Sports Events

Nana Shashiashvili

Faculty of Sports Management and Administration, Georgian State University of Sport, +995 577 93 50 94, Nana.shashiashvili@sportuni.ge, ORCID: 0009-0003-5239-5905

Abstract

This article examines the role of supply chain management in the operational processes of sports events and analyzes its impact on system coordination, resource allocation, and operational stability. The study focuses on the key elements of the sports event supply chain, including transportation, inventory management, infrastructure provision, information flows, service components, and supplier networks, which together form a complex operational system.

Sports events represent highly complex temporary systems in which numerous participants, service providers, and logistical components are integrated under strict time constraints. In such an environment, the efficient functioning of each element is critically linked to the stability of the overall supply chain. The research is based on a qualitative methodology, including literature review, comparative analysis, conceptual evaluation, and case study interpretation.

The analysis reveals that the supply chain of sports events is characterized by high dynamism and unpredictability, which increases the level of operational risks. The main challenges are related to coordination deficiencies, fragmentation of information flows, uneven resource allocation, and insufficient integration between supply chain components.

The study demonstrates that the successful management of modern sports events largely depends on integrated and technologically supported supply chain systems, which ensure synchronized management of transportation, inventory, infrastructure, and information flows, thereby improving operational coordination and enhancing overall system stability.

Keywords: Sports events, supply chain, logistics management, operational processes.

CD163-პოზიტიური მაკროფაგების ექსპრესიის თავისებურებები საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების პერიტონეუმის იმპლანტებში: ციფრული პათოლოგიის რაოდენობრივი კვლევა

ნიკოლოზ სარაული¹; რემა ღვამიჩავა²; ნინო მუსერიძე³; გიორგი ბურკაძე⁴; შოთა
კეპულაძე⁵

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; ქირურგი; გინეკოლოგი; ²თსუ ონკოლოგიის დეპარტამენტის პროფესორი; ³თბილისის სამედიცინო აკადემიის პათოლოგიური ანატომიის მიმართულების ხელმძღვანელი; პროფესორი; პათომორფოლოგი, ემბრიოლოგი; ⁴თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი; ⁵თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი

აბსტრაქტი

სიმსივნის პერიტონური დისემინაცია საკვერცხის ეპითელიური სიმსივნეების კრიტიკულად მნიშვნელოვანი მახასიათებელია და განსაზღვრულ როლს ასრულებს დაავადების პროგრესირებასა და არახელსაყრელ კლინიკურ გამოსავალში. სულ უფრო მეტი მტკიცებულება მიუთითებს, რომ სიმსივნის მიკროგარემო, განსაკუთრებით სიმსივნესთან ასოცირებული მაკროფაგები, მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს მეტასტაზურ ქცევას. CD163 არის M2-პოლარიზებული მაკროფაგების კარგად დამკვიდრებული მარკერი, რომელიც დაკავშირებულია იმუნოსუპრესიასთან და სიმსივნის ხელშეწყობასთან. თუმცა, CD163-დადებითი მაკროფაგების სივრცითი განაწილება და რაოდენობრივი მახასიათებლები საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების პერიტონურ იმპლანტებში ჯერ კიდევ არასაკმარისად არის შესწავლილი.

ამ კვლევის მიზანი იყო CD163-დადებითი მაკროფაგების ინფილტრაციის შეფასება საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების სპექტრში და მათი სივრცითი განაწილების ანალიზი პერიტონურ იმპლანტებში. რეტროსპექტულად გაანალიზდა სულ 42 შემთხვევა, მათ შორის სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნეები, დაბალი ხარისხის სეროზული კარცინომა და მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა. CD163-ის გამოსავლენი იმუნოჰისტოქიმიური კვლევა ჩატარდა ფორმალინით ფიქსირებულ, პარაფინში ჩაყალიბებულ ქსოვილის ანათომიურ სლაიდის ვიზუალიზაცია (WSI) და რაოდენობრივი ანალიზი გამოყენებული იქნა მაკროფაგების სიმკვრივის (უჯრედები/მმ²) შესაფასებლად წინასწარ განსაზღვრულ კომპარტმენტებში,

მათ შორის სტრომულ უბნებში, სიმსივნის ცენტრში, ინვაზიურ ფრონტზე და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისში.

CD163-დადებითი მაკროფაგების სიმკვრივის სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი ზრდა დაფიქსირდა მთელ ჰისტოლოგიურ სპექტრში, ყველაზე დაბალი მაჩვენებლებით მოსაზღვრე სიმსივნეებში და ყველაზე მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში. ყველაზე გამოხატული განსხვავებები გამოვლინდა სტრომულ კომპარტმენტში, ინვაზიურ ფრონტზე და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისში ($p < 0.001$). სივრცულმა ანალიზმა აჩვენა მაკროფაგების უპირატესი დაგროვება პერიმსივნურ რეგიონებში, რომლებიც დაკავშირებულია ინვაზიასთან, ხოლო სიმსივნის ცენტრის რეგიონებში დაფიქსირდა შედარებით დაბალი სიმკვრივე. გამოვლინდა ძლიერი კორელაცია მაკროფაგების სიმკვრივეებს შორის სტრომულ და ინვაზიურ კომპარტმენტებში, რაც მიუთითებს კოორდინირებულ მიკროგარემოს რემოდელირებაზე.

ეს დასკვნები აჩვენებს CD163-დადებითი მაკროფაგების პროგრესულ მატებას და სივრცით გადანაწილებას საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების პერიტონურ იმპლანტანტებში. კვლევის შედეგები ადასტურებს მაკროფაგებით განპირობებული იმუნური მოდულაციისა და სტრომული ურთიერთქმედების როლს სიმსივნის პროგრესირებასა და მეტასტაზურ გავრცელებაში. CD163-დადებითი მაკროფაგების სივრცითი რაოდენობრივი შეფასება შეიძლება ღირებულ ინფორმაციას გვაწვდიდეს სიმსივნის ბიოლოგიის შესახებ და წარმოადგენს პოტენციურ მიდგომას საკვერცხის კიბოს მიკროგარემოზე დაფუძნებული რისკების სტრატეგიკაციისთვის.

საკვანძო სიტყვები: CD163; სიმსივნესთან ასოცირებული მაკროფაგები; საკვერცხის კიბო; სეროზული კარცინომა; პერიტონური იმპლანტები; სიმსივნის მიკროგარემო;

შესავალი

საკვერცხის ეპითელური ავთვისებიანი სიმსივნე ქალის რეპროდუქციული სისტემის ერთ-ერთ ყველაზე აგრესიულ ავთვისებიან სიმსივნეს წარმოადგენს და მსოფლიოში გინეკოლოგიური კიბოთი გამოწვეული სიკვდილიანობის წამყვან მიზეზად რჩება.¹ არახელსაყრელი პროგნოზი ძირითადად განპირობებულია იმიტომ, რომ პაციენტთა უმრავლესობას დიაგნოზი გვიან სტადიაზე დიაგნოსტირდება, როდესაც დაავადება უკვე საკვერცხის მიღმა გავრცელებულია.² ჰემატოგენურად მეტასტაზირებული მრავალი სოლიდური სიმსივნისგან განსხვავებით, საკვერცხის ეპითელური სიმსივნეებისათვის დამახასიათებელია ტრანსცელომური დისემინაციის გზით გავრცელების გზა, რაც იწვევს პერიტონური და ომენტური იმპლანტების წარმოქმნას.³ ეს მეტასტაზური დეპოზიტები არ არის მხოლოდ პირველადი სიმსივნის პასიური გაგრძელება, არამედ წარმოადგენს ბიოლოგიურად აქტიურ წარმონაქმნებს, სადაც სიმსივნე-მიკროგარემოს ურთიერთქმედება კრიტიკულ როლს ასრულებს დაავადების პროგრესირებაში, თერაპიულ რეზისტენტობასა და რეციდივში.^{3,4}

საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების ბიოლოგიური ქცევა მოიცავს კარგად შესწავლილ და დამკვირდებულ სპექტრს, სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნეებიდან დაწყებული დაბალი და მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომებამდე. სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნეები ხასიათდება ეპითელიური პროლიფერაციით დესტრუქციული სტრომული ინვაზიის გარეშე, მაშინ როდესაც დაბალი ხარისხის სეროზული კარცინომა ავლენს ინდოლენტურ ზრდას ინვაზიური პოტენციალით, ხოლო მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა ავლენს გამოხატულ გენომურ არასტაბილურობას, მაღალ პროლიფერაციულ აქტივობას და აგრესიულ კლინიკურ ქცევას. მნიშვნელოვანია, რომ ამ ტიპის სიმსივნის პერიტონური იმპლანტები ასევე ავლენენ განსხვავებულ მორფოლოგიურ და ბიოლოგიურ მახასიათებლებს.^{5,6} არაინვაზიური იმპლანტები, როგორც წესი, ასოცირდება მოსაზღვრე სიმსივნეებთან, ხოლო ინვაზიური იმპლანტები უფრო ხშირად შეინიშნება კარცინომებში, განსაკუთრებით მაღალი ხარისხის დაზიანებებში. ეს პროგრესირება ასახავს არა მხოლოდ შინაგან სიმსივნურ უჯრედულ ცვლილებებს, არამედ მიმდებარე მიკროგარემოს დინამიურ ცვლილებებსაც.

კვლევების შედეგად დაგროვილი მზარდი მტკიცებულებები მიუთითებს, რომ სიმსივნის მიკროგარემო ცენტრალურ როლს ასრულებს საკვერცხის კიბოს გავრცელებასა და პროგრესირებაში.^{6,7} მუცლის ღრუ ქმნის უნიკალურ გარემოს, რომელიც შედგება მეზოთელიური უჯრედების, ფიბრობლასტების, იმუნური უჯრედების, უჯრედგარე მატრიქსის კომპონენტებისა და ხსნადი ფაქტორებისგან, რომლებიც ერთობლივად გავლენას ახდენენ სიმსივნური უჯრედების გადარჩენაზე, ადჰეზიაზე, ინვაზიასა და პროლიფერაციაზე. ამ კომპონენტებს შორის, იმუნური უჯრედები - განსაკუთრებით მაკროფაგები - წარმოიშვნენ სიმსივნის ქცევის ძირითად რეგულატორებად.⁸⁻¹⁰ სიმსივნესთან ასოცირებული მაკროფაგები (TAM) მაღალი პლასტიურობის უჯრედებია, რომლებსაც შეუძლიათ ფუნქციური ფენოტიპების სპექტრის მიღება მიკროგარემოს სიგნალების საპასუხოდ. მაკროფაგები კატეგორიზებულია კლასიკურად გააქტიურებულ (M1-ის მსგავს) მაკროფაგებად, რომლებიც ავლენენ პროანთებით და სიმსივნის საწინააღმდეგო ეფექტებს, და ალტერნატიულად გააქტიურებულ (M2-ის მსგავს) მაკროფაგებად, რომლებიც ხელს უწყობენ ქსოვილების აღდგენას, იმუნური სისტემის დათრგუნვას და სიმსივნის პროგრესირებას.¹⁰⁻¹²

CD163 არის M2-პოლარიზებული მაკროფაგების კარგად დამკვიდრებული მარკერი და ფართოდ გამოიყენება სიმსივნის ხელშემწყობი მაკროფაგების პოპულაციების იდენტიფიცირებისთვის სხვადასხვა ავთვისებიან სიმსივნეებში.¹³⁻¹⁵ CD163-დადებითი მაკროფაგები ასოცირდება ანთების საწინააღმდეგო ფუნქციებთან, შემაკავებელ აქტივობასთან და ციტოკინებისა და ზრდის ფაქტორების სეკრეციასთან, რომლებიც ხელს უწყობენ სიმსივნის ზრდას და იმუნური სისტემისგან თავის არიდებას.^{16,17} საკვერცხის კიბოს დროს, CD163-დადებითი მაკროფაგების გაზრდილი ინფილტრაცია დაკავშირებულია დაავადების შორსწასულ სტადიასთან, ცუდ პროგნოზთან და ქიმიოთერაპიის მიმართ რეზისტენტობასთან.¹ ეს მაკროფაგები ხელს უწყობენ იმუნოსუპრესიული მიკროგარემოს შექმნას ციტოტოქსიური T-უჯრედული რეაქციების

ინჰიბირებით, T-უჯრედული მარეგულირებელი აქტივობის ხელშეწყობით და ანგიოგენეზისა და სტრომის რემოდელირების გაძლიერებით.

საკვერცხის კიბოს დროს პერიტონური იმპლანტაციის პროცესი მოიცავს რამდენიმე თანმიმდევრულ ეტაპს, მათ შორის სიმსივნური უჯრედების პირველადი დაზიანებიდან გამოყოფას, პერიტონურ სითხეში გადარჩენას, მეზოთელურ ზედაპირთან ადჰეზიას, სუბმეზოთელურ სტრომაში შეჭრას და ახალ მიკროგარემოს ფარგლებში პროლიფერაციას. მაკროფაგები აქტიურად არიან ჩართულნი ამ პროცესების რამდენიმე ეტაპზე, განსაკუთრებით სიმსივნური უჯრედების ადჰეზიის ხელშეწყობაში, მეზოთელური ბარიერების გაწმენდასა და უჯრედგარე მატრიქსის რემოდელირებაში.¹ გარდა ამისა, ინვაზიური ფრონტისა და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისზე არსებული მაკროფაგები სტრატეგიულად არიან განლაგებული სიმსივნურ უჯრედებსა და მიმდებარე ქსოვილებს შორის ურთიერთქმედების შუამავლად, რითაც გავლენას ახდენენ მეტასტაზური კოლონიზაციის ეფექტურობაზე.

საკვერცხის კიბოს ბიოლოგიაში მაკროფაგების აღიარებული მნიშვნელობის მიუხედავად, პერიტონურ იმპლანტებში CD163-დადებითი მაკროფაგების სივრცითი განაწილება და რაოდენობრივი მახასიათებლები ჯერ კიდევ არასაკმარისად არის დახასიათებული. აქამდე არსებული კვლევების უმეტესობა ფოკუსირებულია პირველად სიმსივნურ ქსოვილზე ან აფასებს იმუნურ ინფილტრაციას არაკომპარტმენტალიზებული მეთოდით, სიმსივნის ცენტრის, სტრომული რეგიონებისა და ინვაზიური ფრონტების განსხვავების გარეშე. თუმცა, ციფრული პათოლოგიისა და სივრცითი ანალიზის ტექნიკის ახალი მონაცემები მიუთითებს, რომ იმუნური უჯრედების ლოკალიზაციას სიმსივნის კონკრეტულ კომპარტმენტებში მნიშვნელოვანი ბიოლოგიური და პროგნოზული შედეგები მოაქვს. მაგალითად, იმუნური უჯრედების სიმკვრივე ინვაზიურ კიდეზე უფრო მჭიდრო კორელაციაშია კლინიკურ შედეგებთან, ვიდრე სიმსივნის საერთო ინფილტრატი.

ამ კვლევის მიზანია საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების პერიტონურ იმპლანტებში CD163-დადებითი მაკროფაგების ინფილტრაციის რაოდენობრივი შეფასება, განსაკუთრებული ყურადღება გამახვილებულია სივრცით განაწილებასა და ჰისტოლოგიურ ჯგუფებს შორის განსხვავებებზე. სტრომაში, სიმსივნის ცენტრში, ინვაზიურ ფრონტზე და სიმსივნე-სტრომას ინტერფეისის კომპარტმენტებში მაკროფაგების სიმკვრივის ანალიზით, ეს კვლევა ცდილობს გამოავლინოს იმუნური უჯრედების ლოკალიზაციის ნიმუშები, რომლებიც შეიძლება იყოს სიმსივნის პროგრესირებისა და მეტასტაზური ქცევის საფუძველი. გარდა ამისა, კვლევის ერთერთი მიზანია პასუხი გასცეს კითხვას, შეიძლება თუ არა მაკროფაგების სიმკვრივე იყოს განმსაზღვრელი პარამეტრი მოსაზღვრე, დაბალი ხარისხის და მაღალი ხარისხის დაზიანებებს შორის, რითაც ხელს უწყობს სიმსივნის ჰეტეროგენულობის უფრო დახვეწილ გაგებას.

მასალები და მეთოდები

კვლევა წარმოადგენს რეტროსპექტულ, კოჰორტულ კვლევას, რომელიც ჩატარდა ფორმალინით ფიქსირებულ, პარაფინში ჩაყალიბებულ (FFPE) ქსოვილის ნიმუშებზე, რომლებიც მიღებული იქნა პაციენტებისგან, რომლებსაც დიაგნოსტიკური ჰქონდათ პერიტონური და/ან ომენტალური იმპლანტებით მიმდინარე საკვერცხის სეროზული სიმსივნეები. კვლევა ჩატარდა თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტში. ყველა პროცედურა განხორციელდა ინსტიტუციური კვლევის კომიტეტის ეთიკური სტანდარტებისა და ჰელსინკის დეკლარაციის პრინციპების შესაბამისად. კვლევის პროტოკოლი დამტკიცებული იყო თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ინსტიტუციური მიმოხილვის საბჭოს - ეთიკის კომისიის მიერ.

შემთხვევების შერჩევა და კვლევის დიზაინი: კვლევაში ჩართული იყო სულ 42 შემთხვევა. შემთხვევები შეირჩა პათოლოგიის ლაბორატორიის საარქივო მასალებიდან განსაზღვრული კვლევის პერიოდის განმავლობაში, წარმომადგენლობითი პერიტონური ან ომენტალური იმპლანტის ქსოვილის ხელმისაწვდომობისა და იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზისთვის ადეკვატური შენახვის საფუძველზე. ჩართული იყო მხოლოდ შემთხვევები, რომლებსაც ჰქონდათ დადასტურებული საკვერცხის სეროზული სიმსივნის ჰისტოპათოლოგიური დიაგნოზი.

კოჰორტაში შედიოდა სამი დიაგნოსტიკური ჯგუფი: სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნეები იმპლანტებით, დაბალი ხარისხის სეროზული კარცინომა და მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა. ჰისტოლოგიური კლასიფიკაცია ჩატარდა თანამედროვე დიაგნოსტიკური კრიტერიუმების მიხედვით, ჰმატოქსილინითა და ეოზინით (H&E) შეღებილი ანათლების საფუძველზე.

ჰისტოპათოლოგიური შეფასება: ყველა სლაიდი დამოუკიდებლად განხილულ იქნა ბრმად ორი დამოუკიდებელი პათოლოგანატომის მიერ დიაგნოზის დასადასტურებლად და იმპლანტების მორფოლოგიური მახასიათებლების შესაფასებლად. განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო იმპლანტის მახასიათებლებს, მათ შორის არქიტექტურულ ნიმუშს, სტრომულ რეაქციას და ინვაზიის მახასიათებლებს. შემდგომი იმუნოჰისტოქიმიური და ციფრული ანალიზისთვის საინტერესო რეგიონები შეირჩა მორფოლოგიური კრიტერიუმების საფუძველზე და მოიცავდა სიმსივნის ცენტრს, სტრომულ უბნებს, ინვაზიურ ფრონტს და სიმსივნე-სტრომას ინტერფეისს.

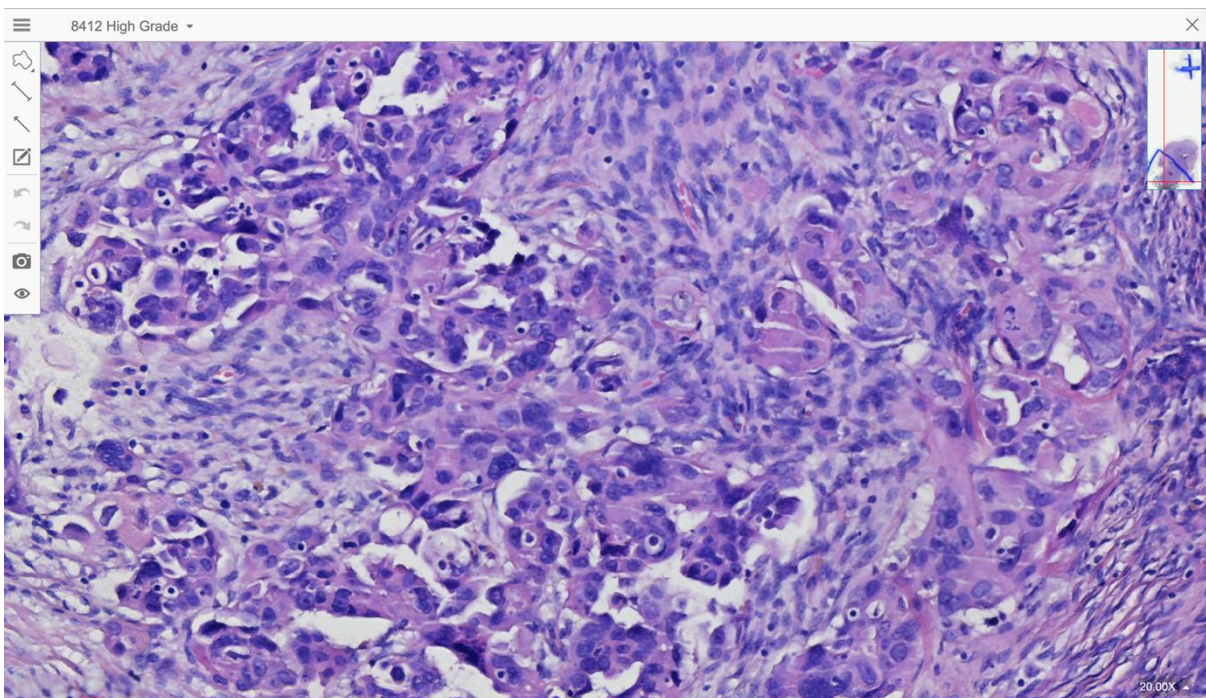
იმუნოჰისტოქიმიური კვლევა: CD163-ის იმუნოჰისტოქიმიური შეღებვა ჩატარდა FFPE ქსოვილის ანათლებზე ავტომატური შეღებვის პლატფორმის გამოყენებით (Leica Bond-Max, Leica Biosystems, გერმანია). 3-4 μm სისქის ანათლები დაიჭრა პარაფინის ბლოკებიდან და ფიქსირება მოხდა დადებითად დამუხტულ სლაიდებზე. დეპარაფინიზაციისა და რეჰიდრატაციის შემდეგ, ანტიგენის აღდგენა ჩატარდა

შესაბამისი ბუფერული პირობების გამოყენებით, მწარმოებლის პროტოკოლის მიხედვით.

CD163-ის საწინააღმდეგო პირველადი ანტისხეული (კლონი 10D6, Leica Biosystems) გამოყენებული იქნა სტანდარტიზებული განზავებით, რასაც მოჰყვა ინკუბაცია და აღდგენა პოლიმერზე დაფუძნებული დეტექციის სისტემის გამოყენებით, დიამინობენზიდინის (DAB) ქრომოგენის სახით. ანატოლები შეღებილი იქნა ჰემატოქსილინით. ანალიზის სანდოობის უზრუნველსაყოფად, თითოეულ შემთხვევაში ჩართული იყო შესაბამისი დადებითი და უარყოფითი კონტროლი.

CD163 ექსპრესია იდენტიფიცირებული იქნა, როგორც ციტოპლაზმური შეღებვა მაკროფაგებში. რაოდენობრივი ანალიზისთვის განხილული იქნა მხოლოდ უჯრედები მაკროფაგების მკაფიო მორფოლოგიური მახასიათებლებითა და დადებითი შეღებვით.

სლაიდის ციფრული ანალიზი: ყველა შეღებილი ანათალი ციფრული გახდა/დიგიტალიზდა მთელი სლაიდის სკანერის (Motic) გამოყენებით მაღალი გარჩევადობით. ციფრული სურათები გაანალიზდა გამოსახულების ანალიზის პროგრამული უზრუნველყოფის (QuPath/ImageJ) გამოყენებით, რაც საშუალებას იძლევა CD163-დადებითი უჯრედების სტანდარტიზებული და რეპროდუცირებადი რაოდენობრივი განსაზღვრის.



სურათი 2. სურათზე ნაჩვენებია კვლევაში ჩართული შემთხვევის ციფრული გამოსახულება (WSI) H&E ტექნოლოგიით, საკვლევი ჯგუფი საკვერცხის მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომის იმპლანტი, 200X;

თითოეული შემთხვევისთვის განისაზღვრა ინტერესის მრავალი რეგიონი (ROI), მათ შორის სიმსივნის ცენტრი, სტრომული კომპარტმენტი, ინვაზიური ფრონტი და

სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისი. გარდა ამისა, იდენტიფიცირებული იქნა ცხელი წერტილების არეალი CD163-დადებითი მაკროფაგების ყველაზე მაღალი სიმკვრივით.

რაოდენობრივი ანალიზი ჩატარდა თითოეულ კომპარტმენტში CD163-დადებითი უჯრედების რაოდენობის გამოთვლით კვადრატულ მილიმეტრზე (უჯრედები/მმ²). დაფიქსირდა შემდეგი ცვლადები:

- CD163_ST_უჯრედები_მმ² (სტრომული კომპარტმენტი)/ CD163_ST_cells_mm² (stromal compartment);
- CD163_ცხელი წერტილის_უჯრედები_მმ² (ყველაზე მაღალი სიმკვრივის რეგიონები)/ CD163_Hotspot_cells_mm² (highest-density regions);
- CD163_სიმსივნური ცენტრის_უჯრედები_მმ²/ CD163_TumorCenter_cells_mm²;
- CD163_ინვაზიური წინა ფრონტი_უჯრედები_მმ²/ CD163_InvasiveFront_cells_mm²;
- CD163_ინტერფეისის_უჯრედები_მმ² (სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისი)/ CD163_Interface_cells_mm² (tumor-stroma interface);

მონაცემთა შეგროვება: კლინიკოპათოლოგიური მონაცემები ამოღებული იქნა სამედიცინო ჩანაწერებიდან და პათოლოგიის მომართვის ფურცლებიდან/ანგარიშებიდან. ეს მოიცავდა პაციენტის ასაკს, ჰისტოლოგიურ დიაგნოზს და დამატებით კლინიკურ პარამეტრებს. თუმცა, ზოგიერთ შემთხვევაში არასრული კლინიკური მონაცემების გამო, ანალიზის ძირითადი აქცენტი იყო იმუნოჰისტოქიმიურ და სივრცულ რაოდენობრივ ცვლადებზე.

ყველა მონაცემი შეყვანილი იქნა სტატისტიკური ანალიზისთვის შექმნილ სტრუქტურირებულ მონაცემთა ნაკრებში, სადაც თითოეულ შემთხვევას მინიჭებული ჰქონდა უნიკალური იდენტიფიკატორი.

სტატისტიკური ანალიზი: სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა SPSS პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით (ვერსია 26.0). უწყვეტი ცვლადები გამოიხატა მედიანებით და კვარტილთაშორისი დიაპაზონებით, CD163 სიმკვრივის მნიშვნელობების აბნორმალური განაწილების გათვალისწინებით.

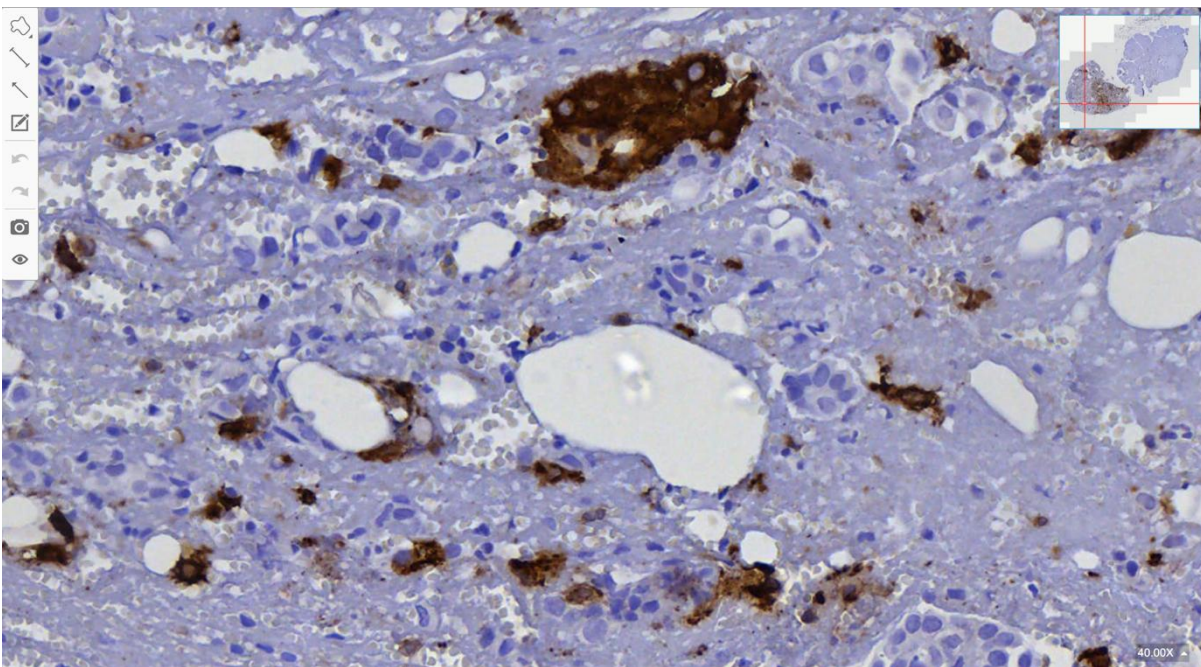
სამ დიაგნოსტიკურ ჯგუფს შორის შედარება ჩატარდა კრუსკალ-ვალის ტესტის გამოყენებით. როდესაც სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი განსხვავებები გამოვლინდა, წყვილური შედარებები ჩატარდა მან-უიტნის U ტესტის გამოყენებით, მრავლობითი ტესტირებისთვის შესაბამისი კორექტირებით.

CD163 სიმკვრივეს შორის კორელაცია სხვადასხვა სივრცითი კომპარტმენტებში შეფასდა სპერმანის რანგის კორელაციის კოეფიციენტის გამოყენებით. 0.05-ზე ნაკლები p-მნიშვნელობა სტატისტიკურად მნიშვნელოვნად ჩაითვა.

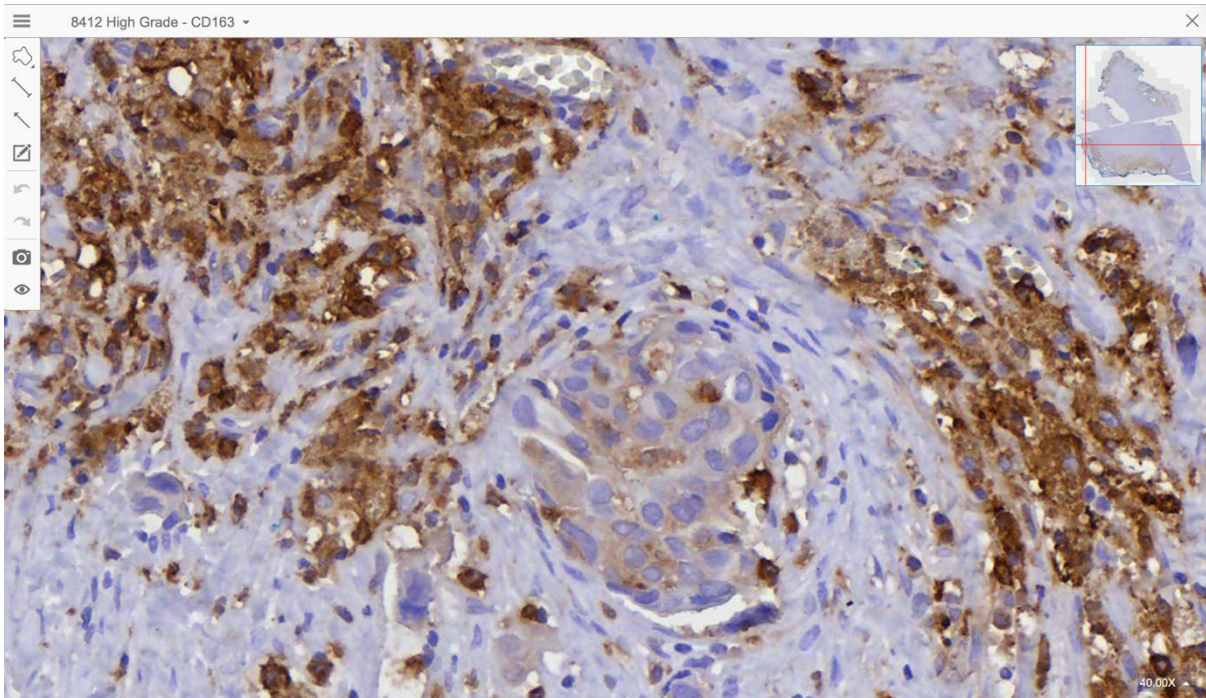
კვლევის შედეგები

კვლევა მოიცავდა პერიტონური და ომენტალური იმპლანტების მქონეს საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების 42 შემთხვევას. კოჰორტაში შედიოდა სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნეები, დაბალი ხარისხის სეროზული კარცინომა და მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა, რაც საშუალებას იძლეოდა შეფასებულიყო CD163-დადებითი მაკროფაგების ინფილტრაცია სეროზული სიმსივნის პროგრესირების მთელ სპექტრში. რაოდენობრივი შეფასება ჩატარდა ციფრული გამოსახულების ანალიზის გამოყენებით, მაკროფაგების სიმკვრივე გამოითვალა უჯრედებით მმ²-ზე წინასწარ განსაზღვრული სივრცითი კომპარტმენტების ჩათვლით, მათ შორის სტრომული უბნები, სიმსივნის ცენტრი, ინვაზიური ფრონტი და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისი.

ყველა შემთხვევაში, CD163-დადებითმა მაკროფაგებმა აჩვენეს არათანაბარი სივრცითი განაწილება, უპირატესი ლოკალიზაციით სტრომულ და პერისიმსივნურ კომპარტმენტებში, სიმსივნის უჯრედების სიმკვრივის რეგიონების ნაცვლად. მაკროფაგების ყველაზე მაღალი სიმკვრივე მუდმივად დაფიქსირდა ინვაზიურ ფრონტზე და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისზე, ხოლო ყველაზე დაბალი სიმკვრივეები გამოვლინდა სიმსივნის ცენტრში.



სურათი 3. სურათზე ნაჩვენებია საკვერცხის დაბალი ხარისხის სეროზული კარცინომის პერიტონუმის იმპლანტში CD163-ის ექსპრესია, IHC, 400X, WSI;



სურათი 4. სურათზე ნაჩვენებია საკვერცხის მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომის პერიტონეუმის იმპლანტში CD163-ის ექსპრესია, IHC, 400X, WSI;

CD163-დადებითი მაკროფაგების ინფილტრაციის მკაფიო და სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი გრადიენტი გამოვლინდა სამ ჰისტოლოგიურ ჯგუფში. სტრომულ კომპარტმენტში, CD163_ST-უჯრედების_მმ² საშუალო მნიშვნელობები აჩვენებდა პროგრესულ ზრდას დაახლოებით 82 უჯრედიდან/მმ²-დან სეროზულ მოსაზღვრე სიმსივნის იმპლანტებში 285 უჯრედამდე/მმ²-მდე დაბალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში და 520 უჯრედამდე/მმ²-მდე მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში. ეს განსხვავება ძალიან მნიშვნელოვანი იყო (კრუსკალ-უოლისის $H = 38.59$, $p < 0.001$), რაც მიუთითებს მაკროფაგების სიმკვრივესა და სიმსივნის ხარისხს შორის ძლიერ კავშირზე.

ცხელი წერტილების ანალიზმა გამოავლინა მსგავსი ნიმუში, სადაც CD163_ცხელი წერტილების_უჯრედები_მმ² აჩვენებდა მნიშვნელოვან ზრდას ჯგუფებს შორის. მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომის იმპლანტებში გამოვლინდა ყველაზე მაღალი ცხელი წერტილების სიმკვრივე, რომელიც 900 უჯრედს/მმ²-ზე მეტ მნიშვნელობებს აღწევდა, ხოლო მოსაზღვრე იმპლანტები მნიშვნელოვნად დაბალი დარჩა. ეს დასკვნა ასახავს CD163-დადებითი მაკროფაგების ფოკალურ კლასტერიზაციას აგრესიულ სიმსივნის მიკროგარემოში.

სივრცითი კომპარტმენტის ანალიზმა კიდევ უფრო გამოავლინა მნიშვნელოვანი განსხვავებები მაკროფაგების განაწილებაში. CD163_InvasiveFront_cells_mm²-მა აჩვენა მკვეთრი ეტაპობრივი ზრდა მოსაზღვრედან მაღალი ხარისხის იმპლანტებამდე ($H = 37.49$, $p < 0.001$), მაღალი ხარისხის სიმსივნეებში კი აღინიშნა მაკროფაგების მკვეთრი დაგროვება ინვაზიურ ფრონტზე. ანალოგიურად, CD163_Interface_cells_mm²-მა აჩვენა ძალიან მნიშვნელოვანი განსხვავებები ჯგუფებს შორის, საშუალო მნიშვნელობებით

დაახლოებით 165 უჯრედი/მმ² მოსაზღვრე იმპლანტებში, 470 უჯრედი/მმ² დაბალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში და 995 უჯრედი/მმ² მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში ($H = 37.49$, $p < 0.01$).

ამის საპირისპიროდ, CD163_TumorCenter_cells_mm²-მა აჩვენა შედარებით დაბალი მნიშვნელობები ყველა ჯგუფში, თუმცა თანდათანობითი ზრდა მაინც დაფიქსირდა მოსაზღვრედან მაღალი ხარისხის სიმსივნეებამდე. ეს მიუთითებს, რომ მაკროფაგების ინფილტრაცია სივრცით ჰეტეროგენულია და უპირატესად ასოცირდება სტრომულ ურთიერთქმედების ზონებთან და არა სიმსივნური უჯრედებით მდიდარ უბნებთან.

კორელაციის ანალიზმა აჩვენა ძლიერი დადებითი კორელაცია CD163 სიმკვრივებს შორის სხვადასხვა სივრცულ კომპარტმენტებში. კერძოდ, CD163_ST_cells_mm²-მა აჩვენა მნიშვნელოვანი კორელაცია CD163_InvasiveFront_cells_mm²-თან, ხოლო CD163_Interface_cells_mm²-მა აჩვენა ძლიერი კავშირი როგორც სტრომულ, ასევე ინვაზიურ წინა კომპარტმენტებთან, რაც მიუთითებს მაკროფაგების კოორდინირებულ მოზიდვასა და დაგროვებაზე სიმსივნის მიკროგარემოში.

საერთო ჯამში, ჰისტოლოგიურ ჯგუფებს შორის ყველაზე განმასხვავებელი ცვლადები იყო CD163_ST_cells_mm², CD163_InvasiveFront_cells_mm² და CD163_Interface_cells_mm², რომელთაგან ყველამ აჩვენა სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი განსხვავებები და თანმიმდევრული ბიოლოგიური გრადიენტები. ეს დასკვნები მიუთითებს CD163-დადებითი მაკროფაგების პროგრესულ გამდიდრებაზე მოსაზღვრედან მაღალი ხარისხის საკვერცხის სეროზული სიმსივნის იმპლანტებამდე, უპირატესი ლოკალიზაციით სიმსივნის ინვაზიურ წინა ნაწილზე და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისზე.

დაკვირვებული სივრცითი და რაოდენობრივი ნიმუშები ადასტურებს მოდელს, რომელშიც CD163-დადებითი მაკროფაგები ხელს უწყობენ სტრომის რემოდელორებას, სიმსივნის ინვაზიასა და საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების პერიტონურ იმპლანტებში მეტასტაზური მიკროგარემოს შექმნას.

პარამეტრი	მოსაზღვრე (მედიანა [IQR])	დაბალი ხარისხის (მედიანა [IQR])	მაღალი ხარისხის (მედიანა [IQR])	P- მნიშვნელობა
CD163_ST_cells_mm ² (სტრომა)	82	285	520	<0.001
CD163_Hotspot_cells_mm ²	170	410	920	<0.001

CD163_TumorCenter_cells_mm ²	45	160	340	<0.001
CD163_InvasiveFront_cells_mm ²	120	380	850	<0.001
CD163_Interface_cells_mm ²	165	470	995	<0.001

ცხრილი 6. CD163-პოზიტიური მაკროფაგების რაოდენობრივი შეფასება სხვადასხვა იმპლანტებში;

კვლევის შედეგების ანალიზი

კვლევის შედეგმა აჩვენა CD163-დადებითი მაკროფაგების მკაფიო და პროგრესული მატება საკვერცხის სეროზული სიმსივნური იმპლანტების მთელ სპექტრში, ყველაზე მაღალი სიმკვრივით აღინიშნება მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომა და ყველაზე დაბალი - მოსაზღვრე დაზიანებები. მნიშვნელოვანია, რომ ეს ზრდა არ არის ერთგვაროვანი, მაგრამ აჩვენებს მკაფიო სივრცულ ნიმუშს, უპირატესი აკუმულაციით სტრომულ კომპარტმენტში, ინვაზიურ ფრონტზე და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისში. ეს დასკვნები ადასტურებს იმ კონცეფციას, რომ ქცევასთან პერიტონურ იმპლანტებში მაკროფაგებით განპირობებული მიკროგარემოს რემოდელირება მჭიდრო კავშირშია სიმსივნის პროგრესირებასთან და მეტასტაზურ.^{18,19}

CD163 ფართოდ არის აღიარებული, როგორც M2-პოლარიზებული სიმსივნესთან ასოცირებული მაკროფაგების მარკერი, რომლებიც მონაწილეობენ იმუნური სისტემის დათრგუნვაში, უჯრედგარე მატრიქსის რემოდელირებაში, ანგიოგენეზსა და სიმსივნის ინვაზიაში.²⁰⁻²² მოსაზღვრიდან მაღალი ხარისხის დაზიანებებამდე გამოვლენილი გრადიენტი მიუთითებს, რომ მაკროფაგების პოლარიზაცია იმუნოსუპრესიული ფენოტიპისკენ ძლიერდება სიმსივნის აგრესიულობის ზრდასთან ერთად. მოსაზღვრე იმპლანტებში, CD163-ის შედარებით დაბალი სიმკვრივე შეესაბამება შეზღუდულ ინვაზიურ პოტენციალსა და ნაკლებად ჰეტეროგენულ მიკროგარემოს. ამის საპირისპიროდ, მაღალი ხარისხის იმპლანტები ავლენენ მაკროფაგებით გამოხატულ გამდიდრებას, რაც მიუთითებს ბიოლოგიურად აქტიური მეტასტაზური ნიშის ჩამოყალიბებაზე.

CD163-დადებითი მაკროფაგების სივრცითი განაწილება დამატებით ინფორმაციას გვაწვდის მათი ფუნქციური როლის შესახებ. ინვაზიური ფრონტისა და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისზე ყველაზე მაღალი სიმკვრივე მიუთითებს, რომ ეს რეგიონები სიმსივნე-მასპინძლის ურთიერთქმედების კრიტიკულ ზონებს წარმოადგენს. ამ კომპარტმენტებში მაკროფაგები, სავარაუდოდ, მონაწილეობენ სიმსივნური უჯრედების შეჭრის ხელშეწყობაში პროტეოლიზური ფერმენტების სეკრეციის, სტრომული ფიბრობლასტების მოდულაციისა და ანგიოგენეზის ხელშეწყობის გზით. სიმსივნის ცენტრში მაკროფაგების შედარებით დაბალი სიმკვრივე კიდევ უფრო ხაზს უსვამს იმას, რომ მათი ძირითადი როლი არ არის თავად სიმსივნური უჯრედების კლასტერებში,

არამედ მიმდებარე მიკროგარემოს ფორმირებაში სიმსივნის გაფართოებისა და გავრცელების მხარდასაჭერად.

სტრომულ, ინვაზიურ ფრონტსა და CD163 ინტერფეის სიმკვრივეს შორის დაფიქსირებული ძლიერი კორელაცია მიუთითებს მაკროფაგების კოორდინირებულ მოზიდვასა და გააქტიურებაზე სივრცულ კომპარტმენტებში. ეს ადასტურებს ჰიპოთეზას, რომ მაკროფაგების ინფილტრაცია არ არის შემთხვევითი, არამედ წარმოადგენს სიმსივნიდან მიღებული სიგნალებითა და სტრომული ურთიერთქმედებებით განპირობებულ რეგულირებად პროცესს. ასეთი კოორდინირებული სივრცითი ორგანიზაცია აღწერილია სხვა მყარ სიმსივნეებში და სულ უფრო მეტად აღიარებულია, როგორც სიმსივნის პროგრესირების დამახასიათებელი ნიშანი.^{21,22}

კვლევას აქვს რამდენიმე შეზღუდვა. პირველ რიგში, ის რეტროსპექტულია დიზაინით და შემოიფარგლება ერთი მარკერის ანალიზით. მიუხედავად იმისა, რომ CD163 მაკროფაგების პოლარიზაციის შესახებ ღირებულ ინფორმაციას გვაწვდის, ის იმუნური მიკროგარემოს სრულ სირთულეს ვერ ასახავს. მეორეც, სრული კლინიკური დაკვირვების მონაცემების ნაკლებობა ზღუდავს გადარჩენის სანდო ანალიზის ჩატარების და მაკროფაგების სიმკვრივის პაციენტის შედეგებთან პირდაპირი კორელაციის შესაძლებლობას.

ამ შეზღუდვების მიუხედავად, კვლევას რამდენიმე ძლიერი მხარე აქვს. რამდენობრივი ციფრული პათოლოგიის გამოყენება საშუალებას იძლევა მაკროფაგების სიმკვრივის ზუსტი და რეპროდუცირებადი გაზომვისა სივრცულ კომპარტმენტებში. სხვადასხვა ჰისტოლოგიური ჯგუფის ჩართვა უზრუნველყოფს მკაფიო ბიოლოგიურ გრადიენტს, ხოლო პერიტონურ იმპლანტებზე ფოკუსირება ეხება საკვერცხის კიბოს ბიოლოგიის კლინიკურად მნიშვნელოვან, მაგრამ ნაკლებად შესწავლილ ასპექტს. ჯგუფებს შორის დაფიქსირებული თანმიმდევრული და მნიშვნელოვანი განსხვავებები მიუთითებს, რომ CD163-დადებითი მაკროფაგები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ სიმსივნის პროგრესირებაში.

მომავალმა კვლევებმა უნდა გააფართოვოს ეს მიდგომა დამატებითი იმუნური მარკერების, როგორცაა CD8 და FOXP3, ჩართვით, რათა უკეთ დახასიათდეს ბალანსი იმუნურ აქტივაციასა და დათრგუნვას შორის.

დასკვნა

CD163-დადებითი მაკროფაგები ავლენენ პროგრესულ ინფილტრაციას საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების პერიტონურ იმპლანტებში, ყველაზე მაღალი სიმკვრივე შეინიშნება მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში და ყველაზე დაბალი - მოსაზღვრე

დაზიანებებში. რაოდენობრივმა ციფრულმა ანალიზმა აჩვენა, რომ მაკროფაგების სივრცითი ინფილტრაცია ჰეტეროგენულია და უპირატესად ლოკალიზებულია სტრომულ კომპარტმენტებში, ინვაზიურ ფრონტებსა და სიმსივნე-სტრომის ინტერფეისულ რეგიონებში, სიმსივნის ცენტრების ნაცვლად.

CD163-დადებითი მაკროფაგების სიმკვრივის გამოვლენილი ეტაპობრივი ზრდა ჰისტოლოგიურ სპექტრში მიუთითებს მაკროფაგებით განპირობებულ მიკროგარემოს რემოდელირებასა და სიმსივნის პროგრესირებას შორის მჭიდრო კავშირზე. ინვაზიურ ფრონტზე და ინტერფეისულ რეგიონებში მაკროფაგების განსაკუთრებით მაღალი დაგროვება ადასტურებს CD163-დადებითი მაკროფაგების როლს სტრომულ ურთიერთქმედებაში, ადგილობრივ ინვაზიასა და მეტასტაზურ დისემინაციაში.

ეს დასკვნები მიუთითებს, რომ CD163-დადებითი მაკროფაგების სივრცული რაოდენობრივი შეფასება შეიძლება წარმოადგენდეს სასარგებლო მიდგომას საკვერცხის სეროზული სიმსივნეების პერიტონეური იმპლანტების ბიოლოგიური ქცევის დასახასიათებლად. კვლევა კიდევ უფრო ხაზს უსვამს სიმსივნის მიკროგარემოს მნიშვნელობას საკვერცხის კიბოს პროგრესირებაში და ადასტურებს საკვერცხის სეროზული ნეოპლაზიის შორსწასული სტადიის შემთხვევების დროს მაკროფაგებზე ორიენტირებული თერაპიული სტრატეგიების პოტენციურ მნიშვნელობას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Devadze R, Gvenetadze A, Burkadze G, Kepuladze S. Distribution of tumor-associated macrophages and M1/M2 polarization in different types and grades of ovarian tumors. Indian Journal of Pathology and Oncology Journal homepage: www.ijpo.co.in Original Research Article [homepage on the Internet] 2022 [cited 2026 Apr 30]; 9(4):318–321. Available from: <https://doi.org/10.18231/j.ijpo.2022.076>
2. Heidarpour M, Hoseini-Beheshti M-S, Id M, Derakhshan ID. Evaluation of the relationship between CD163 positive macrophages and prognostic factors in serous ovarian tumors. Immunopathol Persa [homepage on the Internet] 2020 [cited 2026 Apr 30]; 6(2):23. Available from: www.immunopathol.com
3. Hagemann T, Wilson J, Burke F, et al. Ovarian Cancer Cells Polarize Macrophages Toward A Tumor-Associated Phenotype. The Journal of Immunology 2006; 176(8):5023–5032.
4. Duluc D, Corvaisier M, Blanchard S, et al. Interferon- γ reverses the immunosuppressive and protumoral properties and prevents the generation of human tumor-associated macrophages. Int J Cancer 2009; 125(2):367–373.

5. Alvero AB, Montagna MK, Craveiro V, Liu L, Mor G. Distinct Subpopulations of Epithelial Ovarian Cancer Cells Can Differentially Induce Macrophages and T Regulatory Cells Toward a Pro-Tumor Phenotype. *American Journal of Reproductive Immunology* 2012; 67(3):256–265.
6. Alvero AB, Chen R, Fu HH, et al. Molecular phenotyping of human ovarian cancer stem cells unravel the mechanisms for repair and chemo-resistance. *Cell Cycle* 2009; 8(1):158–166.
7. Biswas SK, Gangi L, Paul S, et al. A distinct and unique transcriptional program expressed by tumor-associated macrophages (defective NF- κ B and enhanced IRF-3/STAT1 activation). *Blood* 2006; 107(5):2112–2122.
8. Schutyser E, Struyf S, Proost P, et al. Identification of biologically active chemokine isoforms from ascitic fluid and elevated levels of CCL18/pulmonary and activation-regulated chemokine in ovarian carcinoma. *Journal of Biological Chemistry* 2002; 277(27):24584–24593.
9. Kryczek I, Zou L, Rodriguez P, et al. B7-H4 expression identifies a novel suppressive macrophage population in human ovarian carcinoma. *Journal of Experimental Medicine* 2006; 203(4):871–881.
10. No JH, Moon JM, Kim K, Kim YB. Prognostic significance of serum soluble CD163 level in patients with epithelial ovarian cancer. *Gynecol Obstet Invest* 2013; 75(4):263–267.
11. Chen R, Alvero AB, Silasi DA, Mor G. Inflammation, cancer and chemoresistance: Taking advantage of the toll-like receptor signaling pathway. *American Journal of Reproductive Immunology* 2007; 57(2):93–107.
12. Kulbe H, Chakravarty P, Leinster DA, et al. A dynamic inflammatory cytokine network in the human ovarian cancer microenvironment. *Cancer Res* 2012; 72(1):66–75.
13. Reinartz S, Schumann T, Finkernagel F, et al. Mixed-polarization phenotype of ascites-associated macrophages in human ovarian carcinoma: Correlation of CD163 expression, cytokine levels and early relapse. *Int J Cancer* 2014; 134(1):32–42.
14. Torroella-Kouri M, Silvera R, Rodriguez D, et al. Identification of a subpopulation of macrophages in mammary tumor-bearing mice that are neither M1 nor M2 and are less differentiated. *Cancer Res* 2009; 69(11):4800–4809.
15. Zhang M, He Y, Sun X, et al. A high M1/M2 ratio of tumor-associated macrophages is associated with extended survival in ovarian cancer patients. *J Ovarian Res* 2014; 7(1).

16. Robinson-Smith TM, Isaacsohn I, Mercer CA, et al. Macrophages mediate inflammation-enhanced metastasis of ovarian tumors in mice. *Cancer Res* 2007; 67(12):5708–5716.
17. Neyen C, Plüddemann A, Mukhopadhyay S, et al. Macrophage Scavenger Receptor A Promotes Tumor Progression in Murine Models of Ovarian and Pancreatic Cancer. *The Journal of Immunology* 2013; 190(7):3798–3805.
18. Tomšová M, Melichar B, Sedláková I, Šteiner I. Prognostic significance of CD3+ tumor-infiltrating lymphocytes in ovarian carcinoma. *Gynecol Oncol* 2008; 108(2):415–420.
19. Mantovani A, Sozzani S, Locati M, Allavena P, Sica A. Macrophage polarization: Tumor-associated macrophages as a paradigm for polarized M2 mononuclear phagocytes. *Trends Immunol* 2002; 23(11):549–555.
20. Zhorzholiani P, Bokhua Z, Kepuladze S, Burkadze G. The Role of M1 and M2 Macrophages in the Progression of Endometrial Hyperplasia to Endometrioid Adenocarcinoma. *Georgian Scientists* [homepage on the Internet] 2025 [cited 2026 Apr 30]; 7(1):24–37. Available from: <https://journals.4science.ge/index.php/GS/article/view/3371>
21. Takaishi K, Komohara Y, Tashiro H, et al. Involvement of M2-polarized macrophages in the ascites from advanced epithelial ovarian carcinoma in tumor progression via Stat3 activation. *Cancer Sci* 2010; 101(10):2128–2136.
22. Kawamura K, Komohara Y, Takaishi K, Katabuchi H, Takeya M. Detection of M2 macrophages and colony-stimulating factor 1 expression in serous and mucinous ovarian epithelial tumors. *Pathol Int* 2009; 59(5):300–305.

CD163-Positive Macrophage Enrichment in Peritoneal Implants of Serous Ovarian Tumors: A Quantitative Digital Pathology Study

Abstract

Peritoneal dissemination is a defining feature of epithelial ovarian cancer and plays a central role in disease progression and poor clinical outcome. Increasing evidence suggests that the tumor microenvironment, particularly tumor-associated macrophages, contributes significantly to metastatic behavior. CD163 is a well-established marker of M2-polarized macrophages associated with immune suppression and tumor promotion. However, the spatial distribution and quantitative characteristics of CD163-positive macrophages in peritoneal implants of serous ovarian tumors remain insufficiently characterized.

This study aimed to evaluate CD163-positive macrophage infiltration across the spectrum of serous ovarian tumors and to analyze their spatial distribution within peritoneal implants. A total of 42 cases, including serous borderline tumors, low-grade serous carcinoma, and high-grade serous carcinoma, were retrospectively analyzed. Immunohistochemical staining for CD163 was performed on formalin-fixed, paraffin-embedded tissue sections. Digital whole-slide imaging and quantitative analysis were used to assess macrophage density (cells/mm²) in predefined compartments, including stromal areas, tumor center, invasive front, and tumor–stroma interface.

A statistically significant increase in CD163-positive macrophage density was observed across the histological spectrum, with the lowest values in borderline tumors and the highest in high-grade serous carcinoma. The most pronounced differences were identified in the stromal compartment, invasive front, and tumor–stroma interface ($p < 0.001$). Spatial analysis demonstrated preferential accumulation of macrophages in peritumoral regions associated with invasion, while tumor center regions showed comparatively lower densities. Strong correlations were identified between macrophage densities in stromal and invasive compartments, indicating coordinated microenvironmental remodeling.

These findings demonstrate progressive enrichment and spatial redistribution of CD163-positive macrophages in peritoneal implants of serous ovarian tumors. The observed patterns support the role of macrophage-mediated immune modulation and stromal interaction in tumor progression and metastatic dissemination. Quantitative spatial assessment of CD163-positive macrophages may provide valuable insight into tumor biology and represents a potential approach for microenvironment-based stratification in ovarian cancer.

Keywords: CD163; tumor-associated macrophages; ovarian cancer; serous carcinoma; peritoneal implants; tumor microenvironment;

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ნიკოლოზ სარაული - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი;
ექიმი; ქირურგი; გინეკოლოგი;
Nikoloz Sarauli - PhD student at Tbilisi State Medical University; Doctor; Surgeon; Gynaecologist;
nsarauli.mmc@gmail.com
[+995 577 780 977](tel:+995577780977)

რემა ღვამიჩავა - თსსუ ონკოლოგიის დეპარტამენტის პროფესორი;
Rema Ghvamichava - Professor of the Department of Oncology, Tbilisi State Medical University;
r.gvamichava@tsmu.edu

ნინო მუსერიძე - თბილისის სამედიცინო აკადემიის პათოლოგიური ანატომიის მიმართულების
ხელმძღვანელი; პროფესორი; პათომორფოლოგი, ემბრიოლოგი;
Nino Museridze - Head of the Pathological Anatomy Department of the Tbilisi Medical Academy;
Professor; Pathomorphologist, Embryologist;
n_museridze@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-4526-2505>

გიორგი ბურკაძე - თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;
პროფესორი;
Giorgi Burkadze - Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University;
Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>
burkadze@yahoo.com

შოთა კეპულაძე - თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული
პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;
თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი
Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical
University; Doctor of Pathology;
Shota.kepuladze@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

ენერგიის შემნახველი ბატარეის როლი სასისტემო მომსახურებაში

თეონა ელიზარაშვილი

დოქტორანტი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. ენერგეტიკის ფაკულტეტი.
სადოქტორო პროგრამა: ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია

რეზიუმე

წინამდებარე ნაშრომი შეისწავლის ენერგიის შემნახველი ბატარეების ინტეგრაციას ქარის ელექტრო სადგურებთან, როგორც ქარის არასტაბილური და ცვალებადი გენერაციის მიერ გამოწვეული რყევების დაბალანსების საშუალებას. PSCAD/EMTDC სიმულაციური პროგრამის გამოყენებით, მოდელირებულია 60 მგვტ სიმძლავრის ქარის ელექტრო სადგური (ქესი). ქესი მიერთებულია 110 კვ-იან ელექტროგადამცემის ქსელთან ლითიუმ-რკინა-ფოსფატის (LiFePO_4) ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული ბატარეებთან ერთად. კვლევის მიზნებისთვის შესწავლილია სამი სხვადასხვა სცენარი 24-საათიანი პერიოდის განმავლობაში: ბატარეის გარეშე და ბატარეასთან ერთად, ასევე გენერაციის შეზღუდვებისა და რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირების პირობებში. კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ ბატარეები ეფექტურად ასწორებს ქარის სიმძლავრის რყევებს, უზრუნველყოფს ენერგიის დროში დაძვრას და ახორციელებს დამხმარე სერვისებს, მათ შორის სიხშირის სწრაფ (დაახლოებით 100 მიკროწამი) და რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირებას. კვლევის შედეგები ადასტურებს, რომ ბატარეების ინტეგრაცია ქესთან უზრუნველყოფს ცვალებადი ენერგეტიკული რესურსის გარდაქმნას კონტროლირებად ენერგეტიკულ რესურსად, ზრდის ქსელის სტაბილურობასა და ქარის სადგურის სიმძლავრის კოეფიციენტს. ასევე, კონვერტორული სადგურის მიერ გამოწვეული ასიმეტრიების დაბალანსებით, და დამხმარე სერვისების ბაზრებზე მონაწილეობის გზით აქვს დამატებითი ეკონომიკური სარგებელის ზრდის შესაძლებლობა.

საკვანძო სიტყვები: ბატარეის ენერგიის შენახვის სისტემები, ქარის ელექტროსადგურების ინტეგრაცია, სიხშირის რეგულირება, რეაქტიული სიმძლავრის კონტროლი, ენერგიის დროში გადატანა.

1 შესავალი

გლობალური დათბობა და კლიმატის ცვლილება ხაზს უსვამს ნულოვან ეკონომიკაში გადასვლის აუცილებლობას. პარიზის შეთანხმება, გაეროს მდგრადი განვითარების მიზნები (SDG) და ახლახანს გამოქვეყნებული ევროკავშირის მწვანე გარიგება ხელს უწყობს და მხარს უჭერს ქვეყნებს, შექმნან სამოქმედო გეგმები 2050 წლისთვის ნახშირბადის ემისიების ნულოვანი მიზნების მისაღწევად.

სათბურის გაზების ემისიის შემცირებაში მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ცვალებადი გენერაციის განახლებადი ენერგორესურსები, როგორცაა ქარის ელექტროსადგურები. თუმცა ქარის სიჩქარისთვის დამახასიათებელია უეცარი ცვალებადობა დიდ ფარგლებში, რაც თავის მხრივ, იწვევს მათ მიერ გენერირებული ელექტროენერგიის ცვალებადობას. ცვალებადი გენერაცია თავის მხრის, სისტემაში იწვევს უბალანსობას ელექტროენერგიის გამომუშავებასა და მოხმარებას შორის და ქარის სადგურების დიდი რაოდენობით ინტეგრაციის დროს მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სისტემის საიმედო და მდგრად მუშაობაზე. შესაბამისად, სისტემის ოპერატორები ზღუდავენ ამ ტიპის ელექტროსადგურებისთვის გენერაციის ცვალებადობის დიაპაზონს, ტვირთის აღება-მოხსნის დროს და ავალდებულებენ გენერაციის ადეკვატურობის დაცვის პირობას, წინააღმდეგ შემთხვევაში, ხდება ამ სადგურის გაჩერება და ჯარიმის დაკისრება გამოწვეული უბალანსობის აღმოსაფხვრელად.

ამასთან, ქარის ენერგიაზე დაფუძნებული ელექტროსადგურები, ქმნიან ენერგიის ხარისხის სხვადასხვა პრობლემას. მათ შორისაა სინუსოიდური მრუდების დამახინჯება, სამფაზა სისტემის ასიმეტრიულობა და ძაბვის სწრაფი ფლუქტუაციები. ყოველივე აღნიშნული ზრდის ხარისხის პარამეტრების დასაშვები ზღვრებიდან გამოსვლის რისკს, რაც ყველაზე კრიტიკულად თავს იჩენს ელექტრული ქსელის შესუსტებულ ტოპოლოგიურ სცენარებში.

ქარის ელექტროსადგურების ცვალებადი გენერაციით გამოწვეული რყევების გასაგლუვებლად და გენერაციის ადეკვატურობის პირობის უზრუნველსაყოფად აუცილებელია სწრაფმოქმედი რეზერვების მობილიზება. ენერგიის შემნახველი ბატარეები განიხილება როგორც ერთ-ერთი საუკეთესო რეზერვის წყარო ვინაიდან, აღნიშნულ რეზერვს მოეთხოვება ძალიან მცირე აღება-მოხსნის დრო და გენერაციის დროში დაძვრის შესაძლებლობა.

ამ მიზნისთვის, ენერგიის შემნახველი ბატარეების მიერთება შესაძლებელია ქსელთან ორი ძირითადი კონფიგურაციით. ერთ შემთხვევაში, შესაძლებელია რამდენიმე დიდი სიმძლავრის ენერგიის შემნახველი ბატარეის მიერთება ქსელის კრიტიკულ კვანძებში, რათა უზრუნველყოს ზოგადად სისტემის სიხშირის ბალანსის დაცვა. მეორე შემთხვევაში შესაძლებელია ბატარეა მიერთდეს იმავე კვანძში სადაც კონკრეტული ქარის

ელექტროსადგური და უზრუნველყოს ამ სადგურის ცვალებადი გენერაციის გაგლუვება და დროში დაძვრა სისტემის ოპერატორის მოთხოვნის შესაბამისად.

ამ ნაშრომში განხილულია ერთ სალტეზე მიერთებული ქარის ელექტროსადგურისა და ენერგიის შემნახველი ბატარეის ერთობლივი მუშაობის შემთხვევა. მოდელირებისა და სიმულაციის საშუალებით შესწავლილია რამდენად შეუძლია ენერგიის შემნახველ ბატარეას უზრუნველყოს სასისტემო მომსახურების სერვისები, გაზარდოს ქარის ელექტროსადგურის სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტი და უზრუნველყოს ამ ტიპის ელექტროსადგურის უსაფრთხო ინტეგრაცია ქსელში.

2 ენერგიის შემნახველი სისტემების მიმოხილვა

ენერგიის შემნახველი სისტემები, ელექტრული ენერგიის გარდაქმნისა და შენახვის ტექნოლოგიების მიხედვით შეიძლება დაიყოს ხუთ ძირითად ჯგუფად, შესაბამისი დიაგრამა ნაჩვენებია სურათი 1-ზე.

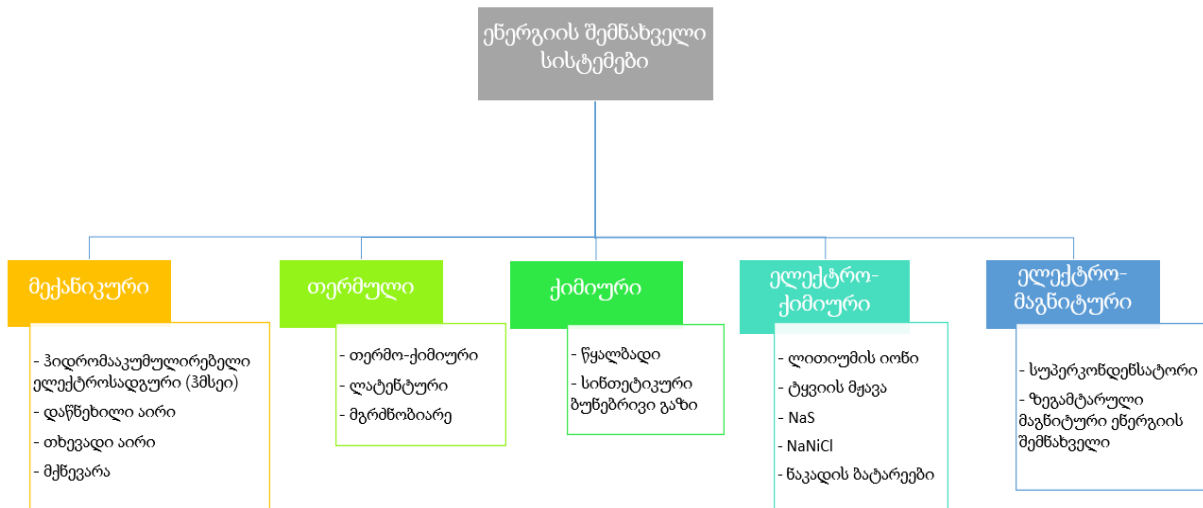
პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება მექანიკური ენერგიის შემნახველი სისტემები, რომელშიც ერთიანდებიან ჰიდრომაკუმულირებელი ელექტროსადგური (ჰმესი), დაწნეხილი აირი (მიწისქვეშა მარილის საცავი), თხევადი აირი და მქნევარა.

მეორე ჯგუფს მიეკუთვნება თერმული ენერგიის შემნახველები, რომლებიც ძირითადად გამოიყენება შენობების გათბობა-გაგრილებისთვის. კერძოდ, თერმო-ქიმიური (ბატარეის მსგავსია შენობის კონდიციონერის სისტემისთვის. თერმული ენერგია გამოიყენება შექცევადი ენდოთერმული ქიმიური რეაქციის მართვისთვის, ენერგიის შესანახად, როგორც ქიმიური პოტენციალი. მაგ. მზის მაღალი გამოსხივების დროს ის ინახავს თერმულ ენერგიას ქიმიურში; როდესაც მზის ინტენსივობა დაბალია, მიმდინარეობს საპირისპირო რეაქცია საჭირო ენერგია მიეწოდება სისტემას). ასევე ამავე ჯგუფს მიეკუთვნებიან ლატენტური და მგრძნობიარე თერმული ენერგიის შემნახველები.

მესამე ჯგუფში გაერთიანებულია ქიმიური ენერგიის შემნახველები, როგორიცაა წყალბადი და სინთეტიკური ბუნებრივი აირი.

მეოთხე ჯგუფში თავმოყრილია ელექტრო-ქიმიური ენერგიის შემნახველი ბატარეები. ამ ჯგუფში გაერთიანებული ბატარეები ელექტრულ ენერგიას გარდაქმნიან ქიმიურ ენერგიად. ასეთებია: ლითიუმის იონი, ტყვიის მჟავა, NaS, NaNiCl და ნაკადის ბატარეები.

ხოლო, მეხუთე ჯგუფში გაერთიანებულია ელექტრო-მაგნიტური ენერგიის შემნახველები. ასეთებია სუპერკონდენსატორი და ზეგამტარული მაგნიტური ენერგიის შემნახველი.

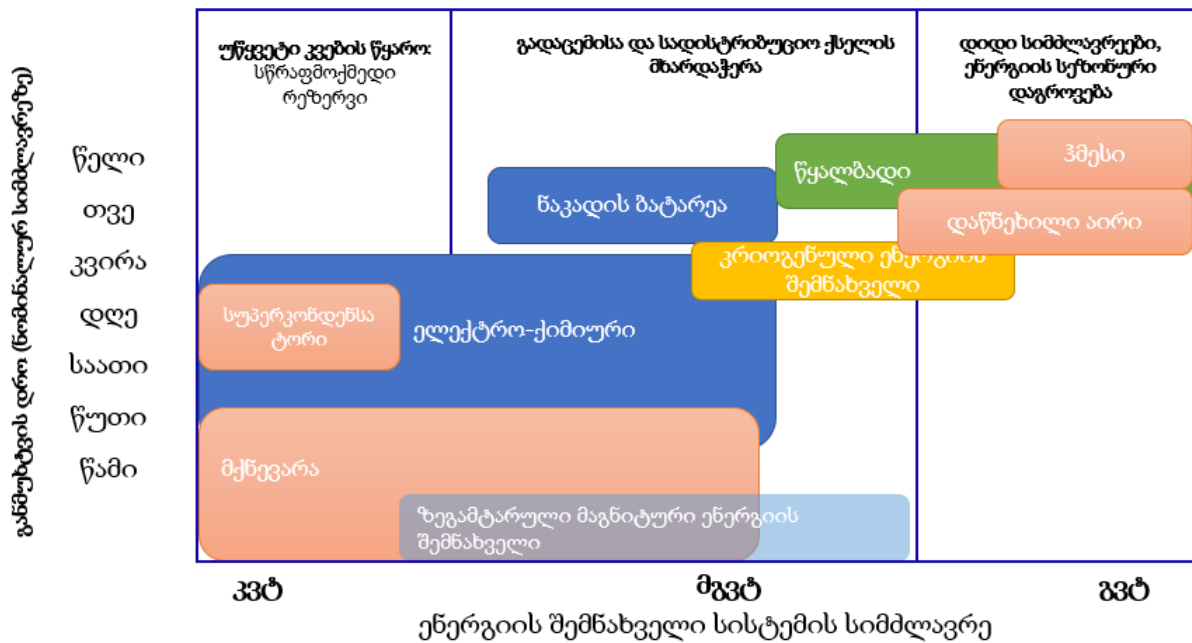


სურათი: 1 ენერგიის შემნახველი სისტემები

ენერგიის შემნახველი სისტემები დადგმული სიმძლავრისა და ენერგიის დაგროვება-განმუხტვის დროის მიხედვით იყოფიან სამ ძირითად ჯგუფად, როგორც ეს ნაჩვენებია სურათ 2-ზე მოცემულ დიაგრამაზე. დიაგრამაზე ნათლად ჩანს, რომ სუპერკონდენსატორები, ელექტრო-ქიმიური ბატარეები და ზეგამტარული მაგნიტური ენერგიის შემნახველებს შეუძლიათ შეასრულონ ე.წ. უწყვეტი კვების წყაროს ფუნქცია, ე.ი. მათ შეუძლიათ ფაქტობრივად მყისიერი დამუხტვა-განმუხტვა (წამიდან კვირამდე დროის შუალედში) და ნებისმიერი სისტემისთვის სწრაფი რეზერვების მიწოდება. მათი დადგმული სიმძლავრე მერყეობს კვტ-იდან მგვტ-ამდე ზღვრებში.

მეორე ჯგუფში თავმოყრილია უმეტესწილად ელექტრო-ქიმიური ენერგიის შემნახველი ბატარეები, მქნევარა, ზეგამტარული მაგნიტური ენერგიის შემნახველი, წყალბადი და კრიოგენული ენერგიის შემნახველი. ეს სისტემები განიხილებიან, როგორც გადაცემისა და დისტრიბუციის ქსელის საიმედო და სტაბილური მუშაობის მხარდამჭერი სერვისების მომწოდებლები. მათი მეშვეობით შესაძლებელია ენერგიის დროში დაძვრა, შესაბამისად პიკების ეფექტური მოხსნა, სიხშირის რეგულირება, გენერაციისა და ქსელის ადეკვატურობის უზრუნველყოფა. მათი განმუხტვის დრო მერყეობს წამიდან წლის ჭრილში, გამოყენებული ტექნოლოგიის მიხედვით, ხოლო დადგმული სიმძლავრე არის მგვტ-ის ფარგლებში.

მესამე კატეგორია აერთიანებს დიდი სიმძლავრის, სეზონური ენერგიის შემნახველებს, როგორებიცაა ჰიდრომაკუმულირებელი ელექტროსადგური, წყალბადი, კრიოგენული და დაწნეხილი აირის ენერგიის შემნახველები, ისინი უზრუნველყოფენ ქვეყნების იმპორტ დამოკიდებულების შემცირებას და შესაბამისად, ენერგოუსაფრთხოების დონის ამაღლებას.



სურათი: 2 ენერგიის შენახვით სისტემების გამოყენების არეალი

აღსანიშნავია, რომ სეზონური ბალანსირებისთვის განკუთვნილი ენერგიის შენახვები ხასიათდებიან ტექნოლოგიების სიმცირით. ვინაიდან ამ ტიპის შენახვები წარმოადგენენ კომპლექსურ და ძვირადღირებულ სისტემებს, მათი აგება შეზღუდულია გეოგრაფიული ფაქტორით. თუმცა ისინი უზრუნველყოფენ ენერგიის შენახვას მრავალი საათის, დღისა და სეზონის განმავლობაში.

რაც შეეხება მოკლევადიან ბალანსირებას, ამ კუთხით არის ტექნოლოგიების ფართო არჩევანი და ბოლო დეკადის განმავლობაში შეინიშნება ფასის მკვეთრი შემცირება (მაგ. ლითიუმის ბატარეები). ამასთანავე, პიკში მათ აქვთ კონკურენტული ფასი წიაღისეულ საწვავთან შედარებით და მათი მონტაჟი არ არის გეოგრაფიულად შეზღუდული.

2.1 ენერგიის შენახვით ბატარეების დადებითი და უარყოფითი მხარეები

ენერგიის შენახვით ბატარეები, განსხვავებით ტრადიციული რეზერვის წყაროებიდან (კომბინირებული ციკლის თბოელექტროსადგური, ჰიდროელექტროსადგური და ა.შ) არ არის შეზღუდული მექანიკური, თერმოდინამიკური და ჰიდრავლიკური თვისებებით. შესაბამისად, მას გააჩნია ენერგიისა და სიმძლავრის თანაფარდობის მცირე კოეფიციენტი და აქედან გამომდინარე, ძალიან მცირე განმუხტვის დრო (100 მსწმ). ეშბ აქვს, სიმძლავრის აღება-მოხსნის ძალიან მაღალი სიჩქარე. ისინი ხასიათდებიან ხანგრძლივი სიცოცხლისუნარიანობით სხვა ალტერნატივებთან შედარებით და არ გამოყოფენ CO₂ ექსპლუატაციის პერიოდში. ამასთანავე, ეშბ არის კომპაქტური სხვა ალტერნატივებთან შედარებით და შეიძლება განთავსდეს ქსელის ნებისმიერ წერტილში პირველადი ენერგორესურსისგან დამოუკიდებლად. ბოლო დეკადის განმავლობაში, მათთვის დამახასიათებელია სწრაფად კლებადი ფასი.

თუმცა აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ ემზ შეზღუდულია სიმძლავრით, ენერგიითა და განმუხტვის დროის ხანგრძლივობით კომბინირებული ციკლის თბოელექტროსადგურთან და რეზერვუარიან ჰესებთან შედარებით. ემზ-ს მოცულობის ზრდასთან ერთად იზრდება ინვესტიციის მოცულობაც, რამაც შესაძლოა გადააჭარბოს ელექტროსადგურისთვის საჭირო ინვესტიციას. გარდა ამისა, დღის განმავლობაში რამდენჯერმე ემზ-ის სრული დამუხტვა-განმუხტვა იწვევს მოწყობილობის ნაადრევ დამცვლებას. ეკონომიკური თვალსაზრისით, რეკომენდებულია ემზ-ის გათვლა რამდენიმე სასისტემო სერვისის გასაწევად, რათა მომგებიანი გახდეს მათი ქსელში ინტეგრაცია.

3 ცვალებადი გენერაციის განახლებადი ენერგორესურსები

ქარის ელექტროსადგური წარმოადგენს ცვალებადი გენერაციის განახლებადი ენერგორესურსს, რომელიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სათბურის გაზების ემისიის შემცირებაში. ის წარმოადგენს ენერგიის განახლებად და ამოუწურავ წყაროს, რომელსაც შეუძლია ეფექტურად ჩაანაცვლოს ამოწურვადი საწვავის რესურსი. გარდა ამისა, საქართველოს მსგავსი ქვეყნებისთვის, რომელიც მეტწილად დამოკიდებულია ჰიდრორესურსებზე, რომელიც ხასიათდება სეზონურობით და დიდი რაოდენობით იმპორტირებულ ელექტროენერგიაზე, ქარის ელექტროსადგურები წარმოადგენ დივერსიფიცირებული გენერაციის წყაროს და ხელს უწყობს, შემცირებულ დამოკიდებულებას იმპორტზე. ამასთან ერთად, მათ აქვთ დაბალი ზღვრული დანახარჯი ტრადიციულ ელექტროსადგურებთან შედარებით.

მეორე მხრივ, ქესი ხასიათდება ამინდზე დამოკიდებულებითა და შესაბამისი ცვალებადი გენერაციით დღის, საათის და წუთის ჭრილში. შესაბამისად აქვს უარყოფითი გავლენა სიხშირეზე, სისტემის იზოლირებულ რეჟიმში მუშაობის დროს. ამასთანავე, ქესი ვერ უზრუნველყოფს აქტიური სიმძლავრის შენარჩუნებას მოკლე შერთვების დროს და შემცირებულ აქტიურ სიმძლავრეს, თავის მხრივ, უარყოფითი გავლენა აქვს სისტემის სტაბილურობაზე. ყოველივე ზემოთ აღნიშნულის თავიდან ასაცილებლად, საჭიროა სისტემაში ძვირადღირებული სწრაფად მანევრირებადი სიმძლავრის რეზერვის მობილიზება, რაც აძვირებს ელექტროენერგიის ღირებულებას.

4 სისტემის დამხმარე სერვისები

ელექტროენერგეტიკული სისტემის მდგრადი და საიმედო მუშაობის უზრუნველსაყოფად, სისტემაში მობილიზებულია შემდეგი დამხმარე სერვისები.

- სიხშირის შენარჩუნების რეზერვი (პირველადი რეზერვი)
- სიხშირის აღდგენის რეზერვი (მეორეული რეზერვი)
- ჩანაცვლების რეზერვი (მესამეული რეზერვი)

- ძაბვის რეგულირება
- სისტემის აღდგენა ნულოვანი მდგომარეობიდან

4.1 სიხშირის კონტროლი - გამოწვევა ქარის ინტეგრაციის დროს

როგორც წინა თავებში აღინიშნა, ქესის დიდი რაოდენობით ინტეგრაციის დროს, სისტემის ოპერატორებისთვის დიდ გამოწვევას წარმოადგენს სიხშირის კონტროლი. სიხშირის ნომინალური მნიშვნელობის შესანარჩუნებლად აუცილებელი პირობაა სიმძლავრეთა ბალანსის დაცვა. ე.ი. გამომუშავებული და მოხმარებული ელექტროენერგია დროის ნებისმიერ მოცემულ მომენტში ერთმანეთის ტოლი უნდა იყოს. ქესის ცვალებადი და მერყევი გენერაციის გამო კი ეს პირობა ვერ სრულდება.

სიხშირის შენარჩუნების რეზერვი აქტიურდება სიხშირის ცვლილებიდან პირველ ოცდაათ წამამდე პერიოდში. ამ ტიპის რეზერვის გააქტიურებას უზრუნველყოფენ სიხშირის რეგულატორები. მათი ვერ გააქტიურების შემთხვევაში, აქტიურდება სპეციალური ავტომატიკები.

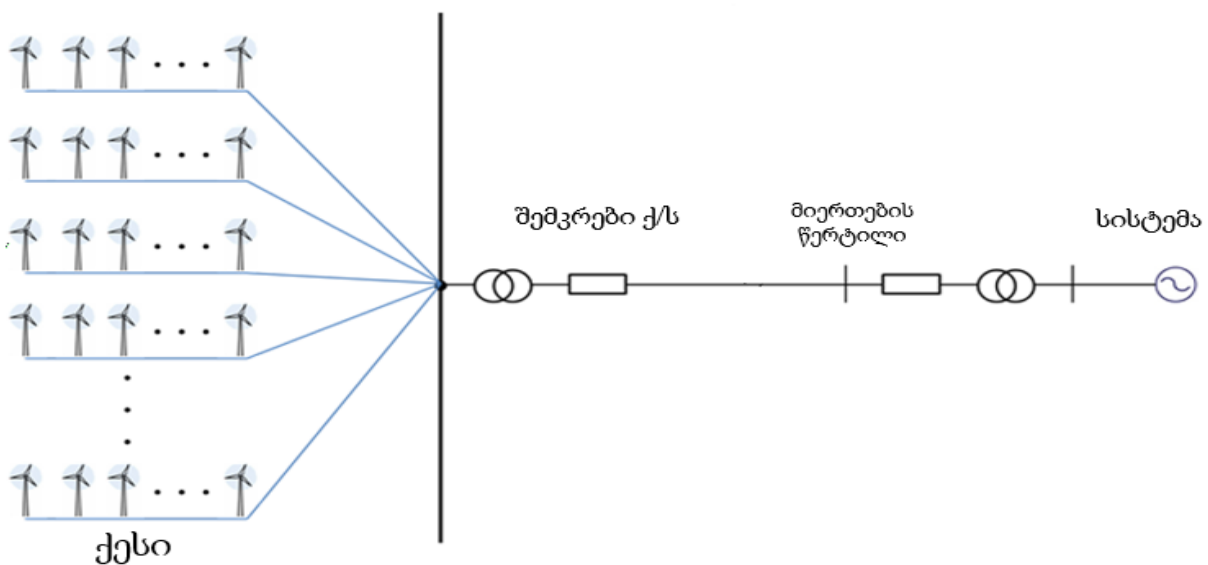
სიხშირის აღდგენის, ანუ მეორადი რეზერვი აქტიურდება სიხშირის გადახრიდან 30 წამის შემდეგ 10 წუთამდე პერიოდში. ასეთი რეზერვი აქტიურდება ავტომატური და დისტანციური მართვის (AGC) საშუალებით.

4.2 ენერგიის შემნახველი ბატარეების როლი სასისტემო მომსახურებაში

ენერგიის შემნახველ ბატარეების, თავიანთი მოქმედების პრინციპიდან გამომდინარე, შეუძლიათ მნიშვნელოვანი როლი ითამაშონ სიხშირის რეგულირებაში. ეშბ შთანთქავს ან აწვდის ქსელს სიმძლავრეს ნომინალური დანაყენიდან გადახრის პროპორციულად, გაცილებით სწრაფად, ვიდრე ელექტროსადგურები. ეშბ განმუხტვის დროს შეადგენს საშუალოდ 100 მკვმს. ისინი ინახავენ ჭარბ ელექტროენერგიას და ქსელში აწვდიან დეფიციტის დროს. შესაბამისად, ეშბ შეუძლია ცვალებადი ხასიათის ელექტროენერგიის კომპენსაცია და სიხშირის ბალანსის დაცვა სისტემის ოპერატორის მიერ დადგენილი მოთხოვნების შესაბამისად. ამასთანავე აქვს ძაბვისა და სიხშირის ერთდროული რეგულირების შესაძლებლობა. მათი გამოყენება ამცირებს მზრუნავი რეზერვების მობილიზების საჭიროებას და ამ მიზნით დიდი ელექტროსადგურების მშენებლობას და ზრდის მზისა და ქარის ელექტროსადგურების სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტს.

5 ქარის ელექტროსადგურის მუშაობის პრინციპი

ქარის ელექტროსადგური (ქესი) ეწოდება დიდ ტერიტორიაზე ქარის ტურბინებისგან შემდგარ ელექტროსადგურს, რომელიც პირველად ენერგორესურსად იყენებს ქარის ენერგიას. დიდი სიმძლავრის ქარის ელექტროსადგურებში, ქარის ტურბინები განლაგებულია კლასტერებად. თითოეულ კლასტერში შეიძლება შედიოდეს რამდენიმე ქარის ტურბინა, რომლებიც იკრიბებიან ერთ სალტეზე და შემდეგ თითოეული კლასტერი საბოლოოდ ერთიანდება და ერთდება ერთ საერთო ძაბვის სალტეზე. ზოგადად ქარის ტურბინის გენერატორის გამოსასვლელი ძაბვა შეადგენს 690 ვ-ს, რომელიც შემდეგ მაღლდება სამალეხელი ტრანსფორმატორით საშუალო (35 კვ) ან მაღალი ძაბვის (110/220 კვ) საფეხურამდე. ქესი შემკრები სალტიდან ძალოვანი კაბელით უერთდება ელექტროსისტემას ძირითადად მაღალი ძაბვის ქვესადგურთან. დიდი სიმძლავრის ქარის ელექტროსადგურის ზოგადი სქემა ნაჩვენებია სურათი 3-ზე.



სურათი: 3 ქესის ზოგადი სქემა

თანამედროვე ქარის ელექტროსადგურები, ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით, აგებულია ჰორიზონტალურდებრივი ქარის ტურბინებისგან. ყველაზე გავრცელებულია ქარის ტურბინების შემდეგი კონფიგურაცია:

- ფიქსირებული სიჩქარის, რომელიც ქსელთან მიერთებულია სინქრონულად
- ცვალებადი სიჩქარის, რომელიც ქსელთან მიერთებულია ასინქრონულად, HVDC-ის გავლით

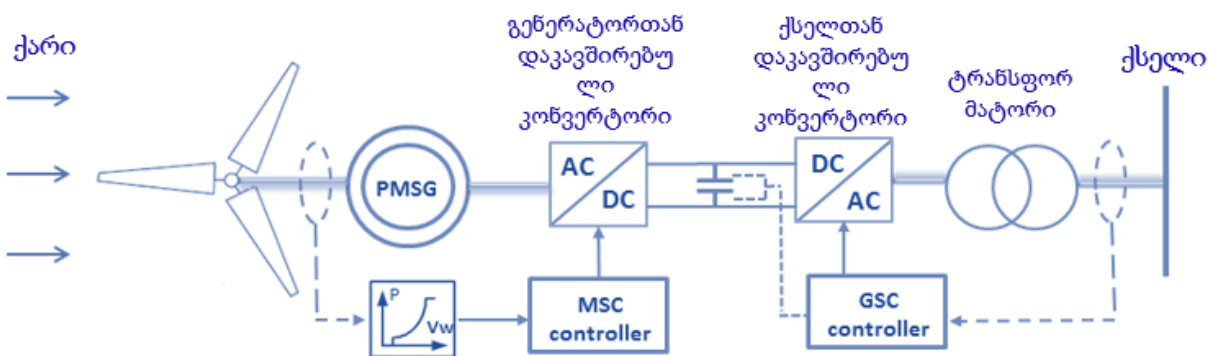
ხოლო, ამათგან მაღალი სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტის, სისტემის სიხშირეზე გაცილებით მცირე ზეგავლენისა და მეტად მოქნილი მართვის შესაძლებლობების გამო, ცვალებადი სიჩქარის ქარის ტურბინები წარმოადგენს ქესის ყველაზე გავრცელებულ

კონფიგურაციას. ცვალებადი სიჩქარის ქარის ტურბინები დაკომპლექტებულია ქვემოთ მოცემული ორი ძირითადი ტიპის გენერატორისაგან:

- ორმხრივი კვების ინდუქციური გენერატორი, რომლის სტატორსა და როტორს შორის მოთავსებულია ძალური ელექტრონიკის ინტერფეისი, რაც ქარის ტურბინის ცვალებადი სიჩქარით მუშაობის შესაძლებლობას იძლევა (როტორს აწვდის ცვლად ძაბვას სრიალის სიხშირის შესაბამისად). გენერირებული სიმძლავრის დაახლოებით 30% მიეწოდება ქსელს როტორიდან ძალური ელექტრონიკის გავლით, ხოლო დანარჩენი სიმძლავრე პირდაპირ გაედინება ქსელში სტატორის გავლით. სწორედ ამიტომ არის შეზღუდული ამ ტიპის ქარის ტურბინის ცვალებადი სიჩქარით მუშაობა.
- მუდმივი მაგნიტის სინქრონული გენერატორი (PMSG), მთლიანად არის იზოლირებული ქსელიდან ძალური ელექტრონიკის საშუალებით, რაც მთლიანად იძლევა ქარის ტურბინის ცვალებადი სიჩქარით მუშაობას ქსელის სიხშირისგან დამოუკიდებლად.

5.1 მუდმივი მაგნიტის ინდუქციური გენერატორი

მუდმივი მაგნიტის ინდუქციური გენერატორი სქემატურად ნაჩვენებია სურათ 4-ზე. ამ ტიპის გენერატორი ქსელიდან იზოლირებულია ძაბვის წყაროს კონვერტორული (VSC) ჩანართით. VSC-ის საშუალებით ერთმანეთისგან განცალკავებულია ძაბვისა და აქტიური სიმძლავრის კონტროლი. გენერატორთან დაკავშირებული კონვერტორით კონტროლდება აქტიური სიმძლავრე, ხოლო ქსელთან მიერთებული კონვერტორით რეაქტიული სიმძლავრე.



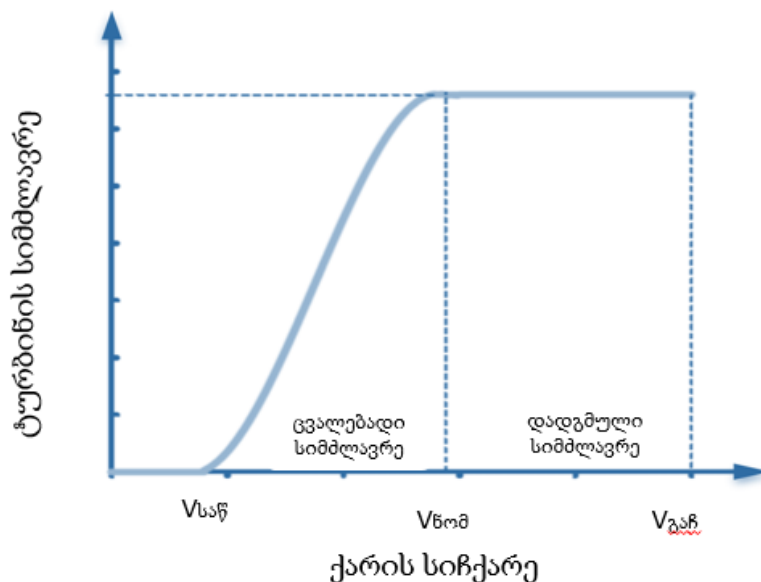
სურათი: 4 მუდმივი მაგნიტის ინდუქციური გენერატორის სქემა

სწორედ ზემოთ განხილული VSC-ის კონფიგურაციის საშუალებით PMSG-ის აქვს საშუალება ცვალოს თავისი სიმძლავრის გამომუშავება ქარის სიჩქარის შესაბამისად, ისე რომ მის ცვალებად სიხშირეს არ ჰქონდეს არანაირი გავლენა ქსელის სიხშირეზე. ქარის ტურბინის სიმძლავრის გამომუშავების ცვლილების შესაძლებლობა ქარის სიჩქარეზე დამოკიდებულებით ხასიათდება ქარის ტურბინის სიმძლავრის მრუდით. ტიპური

სიმძლავრის მრუდი ნაჩვენებია სურათ 5-ზე. სიმძლავრის მრუდის მიხედვით ქარის ტურბინა მუშაობას იწყებს ქარის $V_{საწ}$ სიჩქარეზე (ძირითადად 3 მ/წმ) რა დროსაც გამოიმუშავებს თავის მინიმალურ სიმძლავრეს. შემდეგ, ქარის სიჩქარის ზრდასთან ერთად, პროპორციულად იზრდება სიმძლავრის გამომუშავებაც სანამ ქარის სიჩქარე არ მიაღწევს ნომინალურ მნიშვნელობას (ძირითადად 15 – 25 მ/წმ), რომლის დროსაც ქარის ტურბინა გამოიმუშავებს ნომინალურ სიმძლავრეს. ხოლო როდესაც ქარის სიჩქარე მიაღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას $V_{გაჩ}$ (>25 მ/წმ), რომლის ზევითაც საშიში ხდება ტურბინის მუშაობა, ქარის ტურბინა ჩერდება და წყვეტს მუშაობას.

მაქსიმალური სიმძლავრის მიყოლის (MPPT) კონტროლი გამოიყენება ქარის ტურბინებში ქარის დაბალი სიჩქარეების დროს, რათა გამოიმუშაოს მაქსიმალური შესაძლებელი სიმძლავრე კონკრეტულ ქარის სიჩქარეზე

ტურბინის ფრთის დახრის კუთხის კონტროლი კი გამოიყენება ქარის უფრო მაღალი სიჩქარის დროს ტურბინის გამომუშავების შესაზღუდად.



სურათი: 5 ქარის ტურბინის ტიპური სიმძლავრის მრუდი

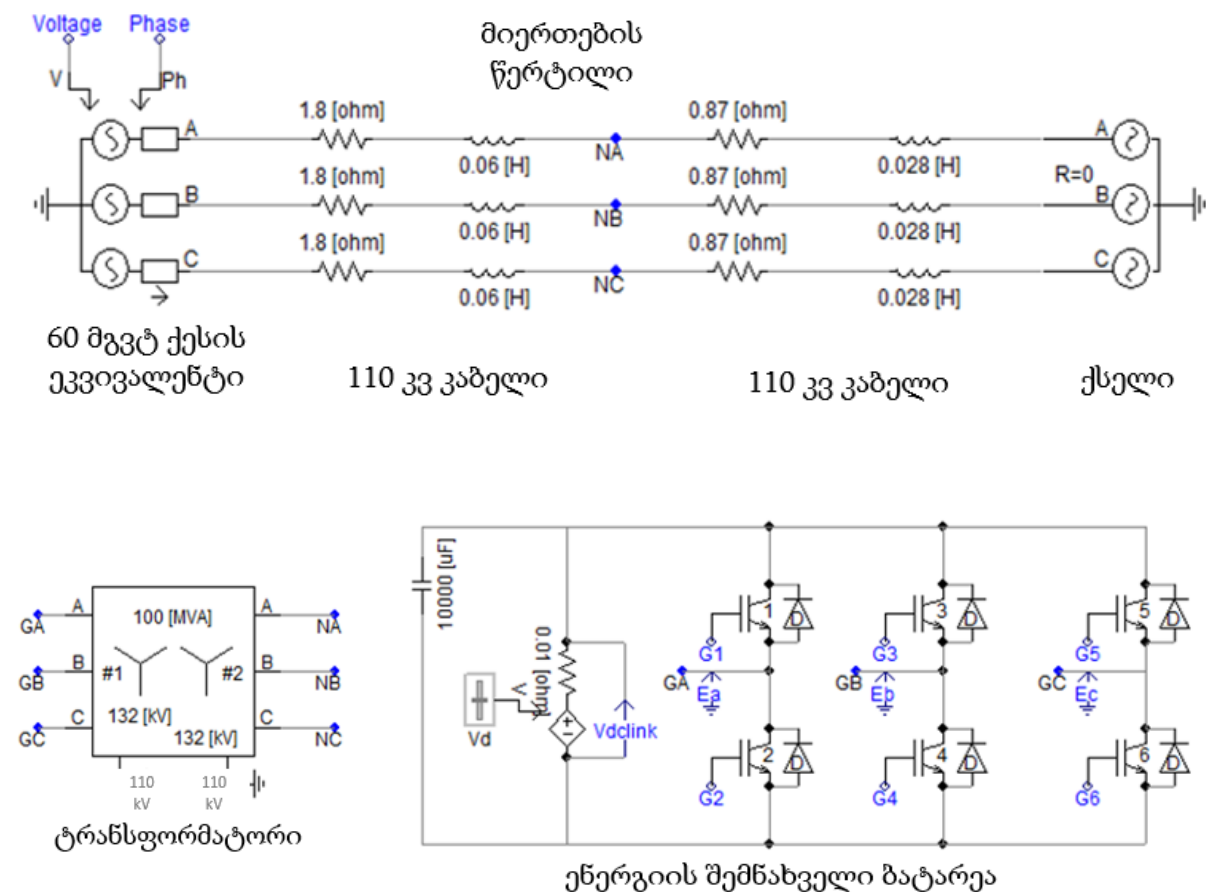
ცვალებადი სიჩქარით მომუშავე ქარის ტურბინები საგრძნობლად ზრდის ქარის ელექტროსადგურის სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტს და გაცილებით მიმზიდველს ხდის ელექტროსადგურს როგორც ინვესტორისთვის ასევე სისტემის ოპერატორისთვის.

6 სატესტო სისტემის აღწერა

სატესტო სისტემა აწყობილია სიმულაციურ პროგრამაში PSCAD/EMTDC. სატესტო სისტემა შედგება 60 მგვტ ქარის ელექტროსადგურისგან, რომელიც ქსელთან

მიერთებულია 110 კვ-იანი ძალური კაბელით და იმავე სალტეზე მიერთებულია ენერგიის შემნახველი ბატარეა (სურათი 6).

მოდელში გამოყენებულია 60 მგვტ ქესის ეკვივალენტი, რომელიც წარმოდგენილია 3-ფაზა ცვლადი ძაბვის წყაროს სახით, რომლი ძაბვის სიდიდე და ფაზა კონტროლირებადია. მსგავსი მოდელის გამოყენება დასაშვებია, რადგან ამ კვლევის მიზანი არის ეშ-ის პასუხის შესწავლა ქარის სიჩქარის ცვლილებით გამოწვეულ გენერაციის ცვლილებაზე. შესაბამისად, მოდელში დაშვებულია, რომ ქესის ყველა ქარის ტურბინა არის მუშაობაში და სრულად შეესაბამება ქარხნულ პირობებს. ამავე პირობის გათვალისწინებით, შესაძლებელია მოდელში ვეიქ ეფექტის უგულებელყოფა.



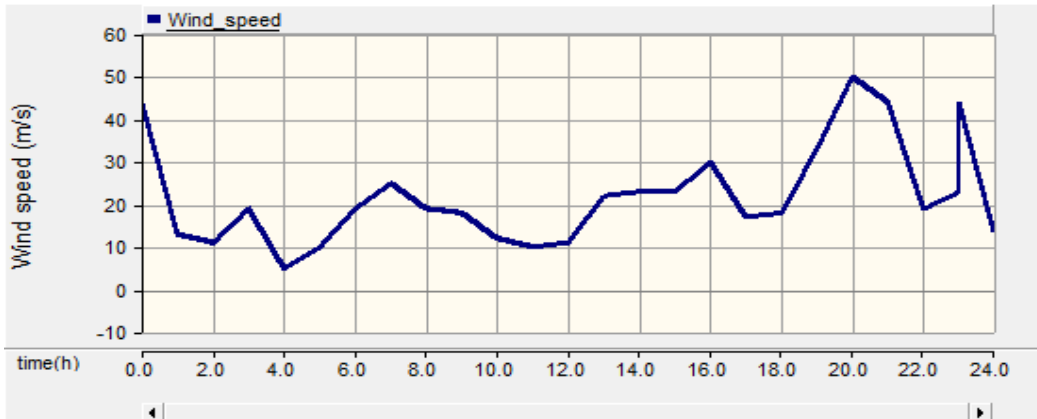
სურათი: 6 სატესტო სისტემა

ელექტროენერგეტიკული სისტემა წარმოდგენილია 3 ფაზა ძაბვის წყაროს სახით, რომლის ნომინალური ძაბვა არის 110 კვ და სიხშირე 50 ჰც. ასეთი მოდელით სისტემის წარმოდგენა მიზანშეწონილია, რადგან ელექტროენერგეტიკული სისტემა არის გაცილებით დიდი და მძლავრი, ვიდრე დამოუკიდებელი ქესი.

ენერგიის შემნახველი ბატარეის მოდელი წარმოდგენილია ძაბვის კონვერტორის სახით. ამ მოდელში გათვალისწინებულია იდეალური ბატარეა, რომლის სიმძლავრეც მიჩნეულია იმდენად დიდად, რომ შეუძლია ქესის ნებისმიერი უზალანსობის

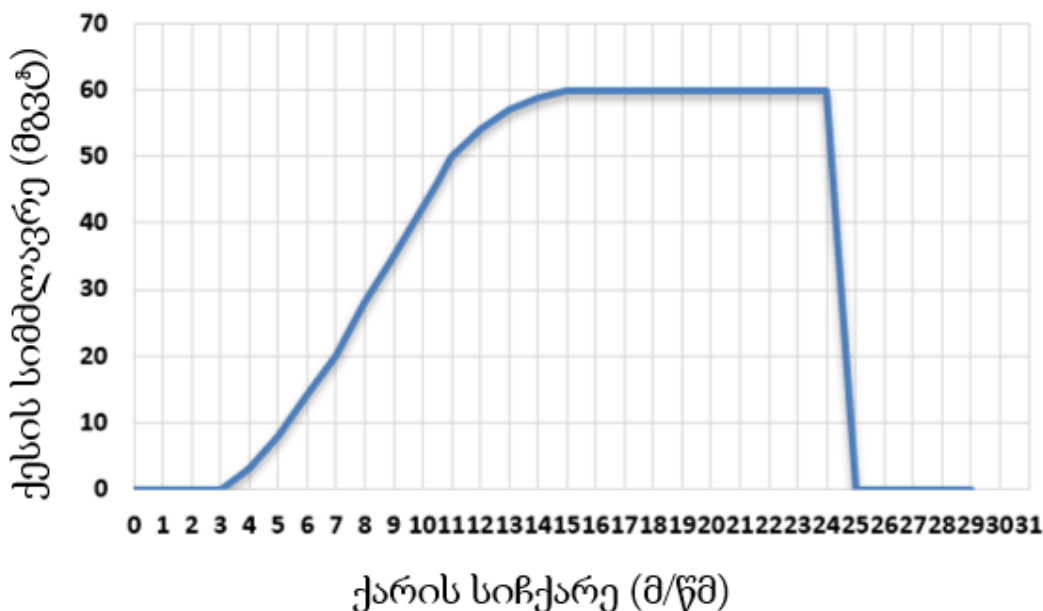
აღმოფხვრა. იდეალური ბატარეის ქცევა მიახლოებულია ლითიუმის ფოსფატის (LiFePO_4) ემბ-თან, შესაბამისად, სიმულაციის შედეგები შეიძლება ჩაითვალოს ძალიან ახლოს რეალური ბატარეის ქცევასთან.

სიმულაციის დროს გამოყენებული ქარის სიჩქარის გრაფიკი 24 საათის განმავლობაში ნაჩვენებია სურათ 7-ზე.



სურათი: 7 დამოძღვრებული ქარის სიჩქარის ცვლილება 24 საათის განმავლობაში

ქესის ეკვივალენტი 3-ფაზა ცვლადი ძაბვის წყაროს ფაზის კონტროლი ხორციელდება სურათ 7-ზე მოცემული ქარის სიჩქარისა და მასზე დამოკიდებული ქარის ტურბინის სიმძლავრის მრუდის მიხედვით. აგრეგირებული ქესის სიმძლავრის მრუდი ნაჩვენებია სურათ 8-ზე.

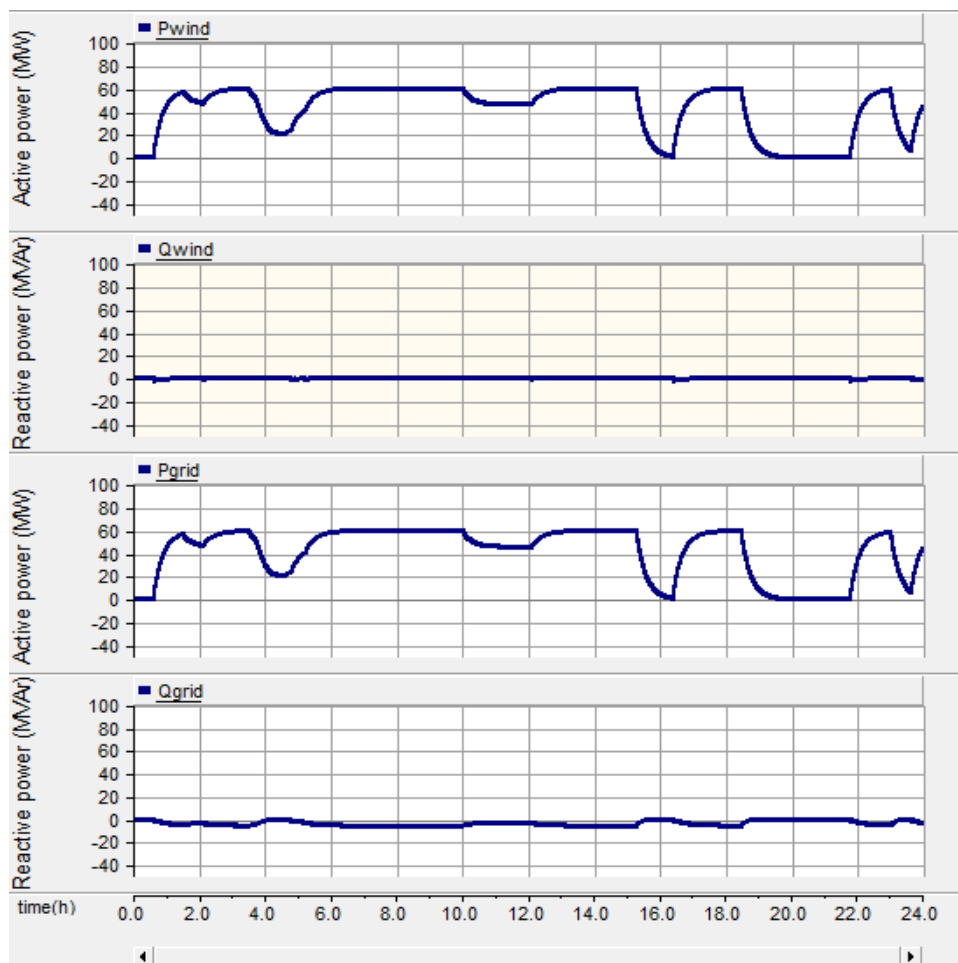


სურათი: 8 აგრეგირებული ქესის სიმძლავრის მრუდი

7 სიმულაციის შედეგები

სიმულაცია ჩატარდა სამი სხვადასხვა სცენარისთვის, სამივე სცენარში ქარის ელექტროსადგურის $\cos\phi=1$.

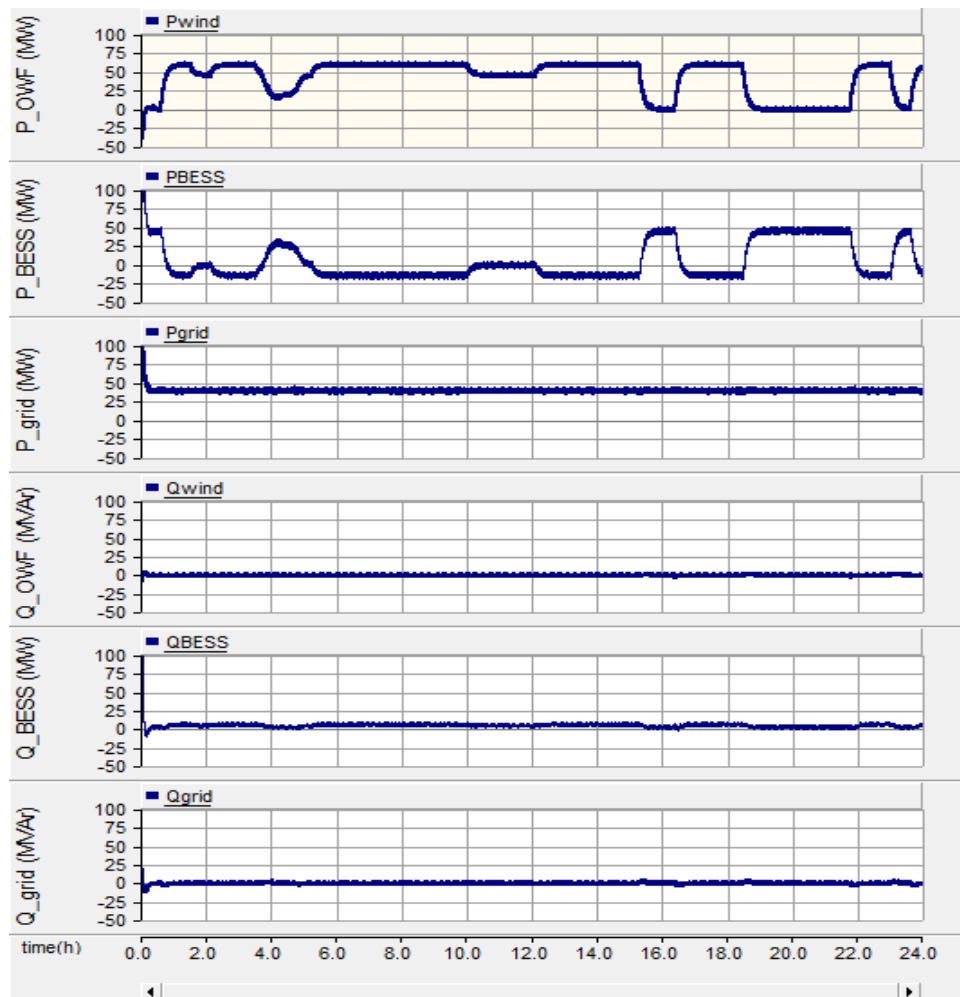
პირველ სცენარში სალტეზე მიერთებულია მხოლოდ ქესი, ხოლო ენერგიის შემნახველი ბატარეა გამორთულია. სიმულაციის შედეგები ნაჩვენებია სურათ 9-ზე. როგორც სურათიდან ჩანს, ქარის ელექტროსადგურის გენერაციაში განსაკუთრებული რყევები შეინიშნება 15:00-დან 24:00-მდე პერიოდში. აღსანიშნავია, რომ ქესის გამომუშავება გაუტოლდა 0 მგვტ-ს 16:00 და 19:00 – 21:00 მაშინ როდესაც სისტემაში არის თეორიული პიკური დატვირთვა.



სურათი: 9 ქესის აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილება ქარის სიჩქარის შესაბამისად

პიკური დატვირთვის დროს უეცრად შემცირებული გენერაცია საფრთხის ქვეშ აყენებს ელექტროენერგიის საიმედოობისა და უწყვეტი მიწოდების პირობას და მოითხოვს სიხშირის რეზერვების გააქტიურებას, რაც თავის მხრივ აძვირებს ელექტროენერგიის ღირებულებას. მეორე მხრივ, ღამის განმავლობაში ქესი გამოიმუშავებდა თავის დადგმულ სიმძლავრეს (60 მგვტ). ღამის განმავლობაში ელექტროენერგიის მოხმარება

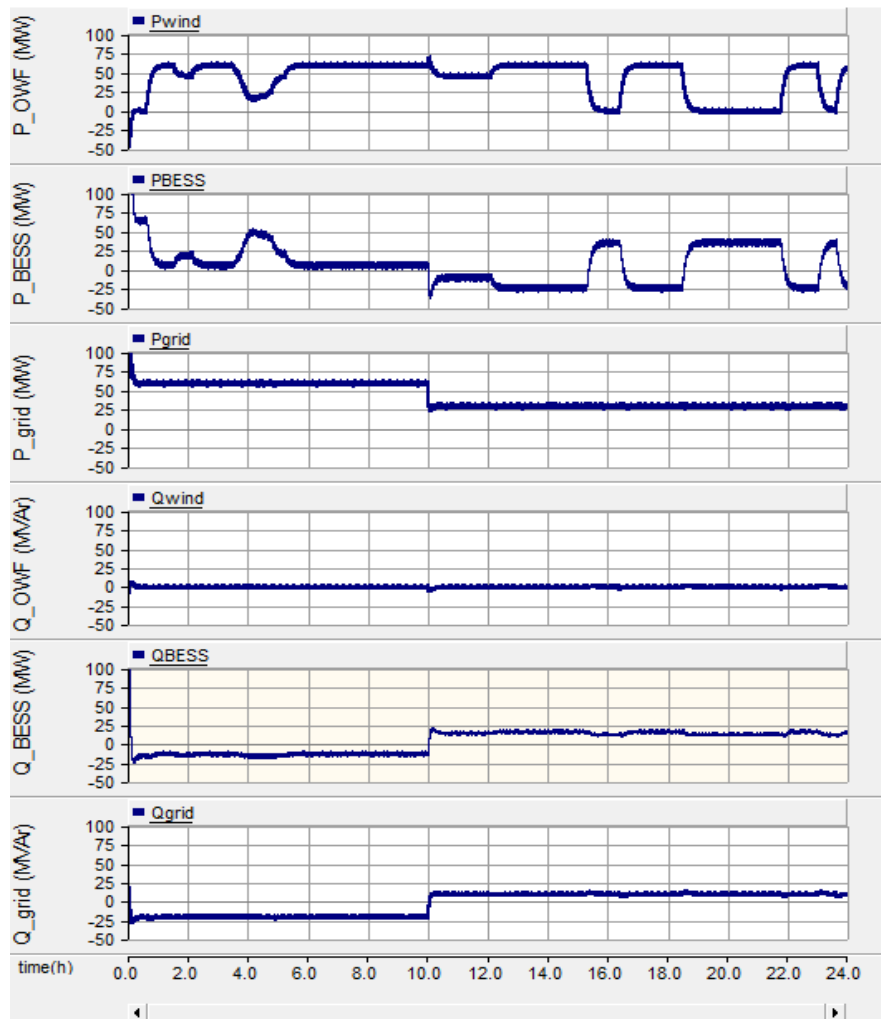
არის შემცირებული და შესაბამისად, სისტემაში არის ჭარბი გენერაცია. ამიტომ, სისტემის ოპერატორს მოუწევს ჭარბი გენერაციის შემცირება და მწვანე და იაფი გენერაციის გამორთვა.



სურათი: 10 ქესი + ეშპ აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილება ქარის სიჩქარის შესაბამისად

მეორე სცენარში დამოდელორებულია ქესის და ეშპ-ის ერთდროული მუშაობა. ამ სცენარში განხილულია შემთხვევა, როდესაც ქარის ელექტროსადგურმა ქსელს უნდა მიაწოდოს 40 მგვტ სიმძლავრე, წინააღმდეგ შემთხვევაში დაჯარიმდება შექმნილი უბალანსობის გამო. შესაბამისად, ეშპ-ის დანაყენიც იყო 40 მგვტ და ქსელში მიწოდებული ელექტროენერგია გამოითვლება შემდეგი ფორმულით $P_{ქს} = P_{ქესი} \pm P_{ეშპ}$.

სიმულაციის შედეგები ნაჩვენებია სურათ 10-ზე. $t=6$ სთ-ზე, ქესის გამომუშავებამ შეადგინა 60 მგვტ. ამავდროულად, ბატარეამ მყისიერად იმოქმედა და შთანთქა ზედმეტი 20 მგვტ და ქსელს მიეწოდა ხელშეკრულებით განსაზღვრული 40 მგვტ. $t=16$ სთ-ზე, ქესის გამომუშავება იყო 0 მგვტ, რა დროსაც ეშპ მყისიერად განიმუხტა 40 მგვტ-ით და ქესის გაჩერება შეუმჩნეველი გახდა სისტემის ოპერატორისთვის.



სურათი: 11 ქესი + ეზბ, აქტიური და რეაქტიული სიმძლავრის ცვლილება ქარის სიჩქარის შესაბამისად (ქესის გენერაცია შეზღუდულია 25 მგვტ-ით)

მესამე სცენარში დამოდელორებულია შემთხვევა, როდესაც დღის ერთ მონაკვეთში $t=10$ სთ-მდე, ქესის გამომუშავება განსაზღვრული იყო 60 მგვტ-ით, ხოლო $t=10$ სთ-ის შემდეგ 25 მგვტ-ით. ამასთანავე, სისტემის ოპერატორის მხრიდან მოთხოვნილი იყო რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირება. სიმულაციის შედეგები ნაჩვენებია სურათ 11-ზე. წინა შემთხვევების მსგავსად, ამ შემთხვევაშიც, ქესის გენერაციის ნებისმიერი გადახრის დროს დანაყენიდან, ეზბ მყისიერად მოიხმარდა (იტენებოდა) ან გენერირებდა (განიმუხტებოდა) ზუსტად იმავე სიდიდეს რაც იყო დანაყენიდან გადახრა, შესაბამისად ქსელს მიეწოდებოდა მუდმივად ერთიდაიგივე სიდიდის სიმძლავრე კონტრაქტის შესაბამისად. ამასთან ერთად, მიუხედავად იმისა, რომ ქესის $\cos\phi=1$, ბატარეამ უზრუნველყო რეაქტიული სიმძლავრის რეგულირება. $t=10$ სთ-მდე, იგი მოიხმარდა რეაქტიულ სიმძლავრეს, ხოლო $t=10$ სთ-ის შემდეგ კი გენერირებდა.

8 დასკვნა

ქარის სიჩქარის ცვლილება არის შემთხვევითი და ძნელად პროგნოზირებადი, რაც უქმნის საფრთხეს ელექტროსისტემის სტაბილურ და საიმედო მუშაობას, მათი დიდი რაოდენობით ინტეგრაციის დროს.

მოდელირებისა და სიმულაციის შედეგებმა აჩვენა, რომ ენერგიის შემნახველ ბატარეებს შეუძლია შეამციროს ქარის ცვლადი სიჩქარით გამოწვეული რყევები, გაზარდოს ქსელის ადეკვატურობა და მოქნილობა.

ერთ კვანძში მიერთებულმა ეშბ და ქარის ელექტროსადგურმა მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა ქსელის ადეკვატურობა, გაზარდა ქსელის სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტი და ქესი გახდა დისპეტჩირებადი ენერგიის წყარო, მისი ცვალებადი ბუნების მიუხედავად ეშბ და ქსელის კომბინაციას აქვს მნიშვნელოვანი სარგებელი როგორც სისტემის ოპერატორებისთვის, ასევე ქსელის მფლობელებისთვის, რადგან ისინი აღარ გადაიხდიან გადასახადს გენერაციის დიდ ფარგლებში ცვალებადობისა და სისტემაში შექმნილი უბალანსობის გამო.

საერთო ჯამში, განხილული კომბინაცია მხარს უჭერს ქარის ელექტროსადგურების ქსელში ფართომასშტაბიან ინტეგრაციას, ელექტროსისტემის საიმედოობასა და მიწოდების უსაფრთხოებაზე მნიშვნელოვანი ზეგავლენის გარეშე

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] European Environment Agency, 'Europe's onshore and offshore wind energy potential', no. 6. 2009.
- [2] G. Ren, J. Liu, J. Wan, Y. Guo, and D. Yu, 'Overview of wind power intermittency : Impacts , measurements , and mitigation solutions,' Appl. Energy, Elsevier, vol. 204(c), no. October, pp. 47–65, 2017.
- [3] ENTSO-E, 'Power Facts', 2019. [Online]. Available: https://docstore.entsoe.eu/Documents/Publications/ENTSOE%20general%20publications/ENTSO-E_PowerFacts_2019.pdf. [Accessed: 27- Jul- 2021].
- [4] 'Wind Power for Power Systems,' ed. by T. J. Ackermann, J. Wiley and Sons, Ltd, ch. 8, pp. 143–165, 2005.
- [5] H . Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, C.N. Rasmussen, 'Review of Energy Storage System for Wind Power Integration Support,' Appl. Energy, Elsevier, vol. 137, pp. 545–55, 2015.

- [6] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, 'Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation', *Appl. Energy*, Elsevier, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [7] H. HaiPing, P. WenXia, L. Bei and M. HuiMeng, 'One Power Control Strategy of Wind Farm Based on the Battery Energy Storage', in *Proc. 2012 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, IET, pp. 1-4, 2012.
- [8] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright and M. Hughes, 'Wind Generation: Modelling and Control', John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [9] M. Hoffman, A. Sadosky, M. Kintner-Meyer, and J. DeSteele, 'Analysis tools for sizing and placement of energy storage in grid applications: a literature review,' *Pacific Northwest ...*, no. September, p. 32, 2010.
- [10] International Renewable Energy Agency, 'Battery Storage for Renewables: Market status and Technology Outlook', 2015. [Online]. Available: https://irena.org/documentdownloads/publications/irena_battery_storage_report_2015.pdf. [Accessed: 28- Jul- 2021].
- [11] Elizarashvili, T., Arziani, G., & Kvatadze, B. (2022). Renewable energy hybrid mini-grid concept for rural electrification in Georgia. In *Proceedings of the CIGRE Paris Session 2022* (Paper No. C6-11119_2022).
- [12] Elizarashvili, T., & Arziani, G. (2022). FACTS with energy storage for renewable integration in the Georgian power system. In *Proceedings of the CIGRE Paris Session 2022* (Paper No. B4-11120_2022). CIGRE.
- [13] K. Bakič, SEERC CIGRE History: Early Electrification and Empowerment of Region where Current Electricity was Born. Ljubljana, Slovenia: Slovenian Association of Electric Power Engineers CIGRE& CIRE, 2020.
- [14] Arziani, G., Kvatadze, B., Baramidze, L. (2023). Analyzing the Behavior of PI Section and T Section High Voltage Line Models in Harmonic Load Flow. *Georgian Scientists*, 5(4), 177–187. <https://doi.org/10.52340/gi.2023.05.04.16>
- [15] G. Arziani and T. Elizarashvili, "FACTS for effective DER integration into the Georgia distribution grids," *Turk J Electr Power Energy Syst.*, 2025; 5(2), 105-113. Published online May 5, 2025. <https://doi.org/10.5152/tepes.2025.24036>

[16]. G. Arziani and G. Chkhaidze, “The Impact of the Level of Detail in the Distributed Parameter Model of a Transmission Line on Its Frequency Characteristics”, GS, vol. 7, no. 2, pp. 493–502, Jun. 2025. <https://doi.org/10.52340/gs.2025.07.02.44>

Role of energy storage systems for ancillary services

Abstract

The large-scale integration of wind power into modern electricity systems presents fundamental operational challenges, owing to the stochastic and non-dispatchable nature of wind resources. This paper examines the colocated of Battery Energy Storage Systems (BESS) with utility - scale wind power plants as a technically and economically viable strategy for mitigating generation variability and enabling firm power delivery. A 60 MW wind power plant, comprising Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG), interfaced with the grid via back-to-back Voltage Source Converters (VSC) is modeled in the PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation environment, alongside a Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) - based BESS connected at the 110 kV point of common coupling. Three representative operational scenarios are evaluated over a 24-hour simulation horizon: (i) standalone wind plant operation without storage; (ii) wind-BESS co-operation with real-time power smoothing and constant 40 MW grid delivery; and (iii) combined operation under active power curtailment with simultaneous reactive power regulation. Simulation results demonstrate that BESS effectively eliminates generation volatility, enables energy time-shifting from periods of surplus to peak demand intervals, and delivers critical ancillary services: including primary frequency response and dynamic reactive power compensation with a discharge response time of approximately 100 milliseconds. The study findings have shown that BESS integration transforms an inherently intermittent wind generation into a dispatchable generation resource, enhances power system stability, improves the capacity factor of the wind plant, and has potential to generate additional economic value through the elimination of imbalance penalties, reduction of curtailments, and access to ancillary service revenue streams.

Keywords: Battery Energy Storage Systems, Wind Farm Integration, Frequency Regulation, Reactive Power Control, Energy Time-Shifting.

ე. მინდელის შახტის ველის დაყოფა სამთო-გეოლოგიურ და სამთო ტექნიკურ პირობების მქონე ბლოკებად ჭაბურღილების მონაცემებზე დაყრდნობით

ანზორი ტაველიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის დოქტორანტი

ანოტაცია

ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადო წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე რთულ სამთო-გეოლოგიურ ობიექტს, რომელიც ხასიათდება რთული ტექტონიკური აგებულებით, ნახშირის ფენების ცვალებადი სიმძლავრითა და დახრის კუთხეებით. აღნიშნული პირობები მნიშვნელოვნად ართულებს საბადოს გახსნისა და მომზადებისა სქემებისა და დამუშავების ტექნოლოგიების შერჩევას. ნაშრომში გაანალიზებულია საბადოს გეოლოგიური აგებულება, არსებული ექსპლუატაციის სქემები, მათი ნაკლოვანებები და შემოთავაზებულია ოპტიმიზებული ტექნოლოგიური გადაწყვეტები, რომლებიც ითვალისწინებს ბლოკურ დაყოფას, უსაფრთხოების ამაღლებას და მოპოვების ეფექტიანობის ზრდას. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მექანიზებული სისტემების გამოყენების პერსპექტივებს, ასევე სამთო დარტყმებისა და ენდოგენური ხანძრების რისკების შემცირებას.

საკვანძო სიტყვები: სამთო-გეოლოგიური პირობები, ტექტონიკური აგებულება, ბლოკური დაყოფა, მექანიზებული სისტემები, სამთო დარტყმები, ენდოგენური ხანძრები.

შესავალი

ტყიბულ-შაორის საბადო წარმოადგენს საქართველოს ქვანახშირის ინდუსტრიის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს ობიექტს, რომლის გეოლოგიური აგებულება მნიშვნელოვნად განსხვავდება სხვა საბადოებისგან. მისი ფენობრივი სტრუქტურა, ტექტონიკური რღვევები და ნახშირის ფენის ცვალებადი სიმძლავრე დეა დახრის კუთხე

ქმნიან განსაკუთრებულ სირთულეებს როგორც საბადოს გახსნის, ასევე დამუშავების პროცესში.

ექსპლუატაციის მრავალწლიანი პრაქტიკა ადასტურებს, რომ ერთიანი უნივერსალური ტექნოლოგიის გამოყენება ვერ უზრუნველყოფს ეფექტურ შედეგს. შესაბამისად, აუცილებელია საბადოს დეტალური გეოლოგიური ანალიზი და ინდივიდუალური ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებების შემუშავება თითოეული ამოსადები უბნისათვის.

ნაშრომის მიზანია ე. მინდელის შახტის ველის გეოლოგიური სტრუქტურის შესწავლა, მისი ბლოკებად დაყოფა და თითოეული ბლოკისათვის ოპტიმალური დამუშავების ტექნოლოგიის განსაზღვრა.

ძირითადი ნაწილი

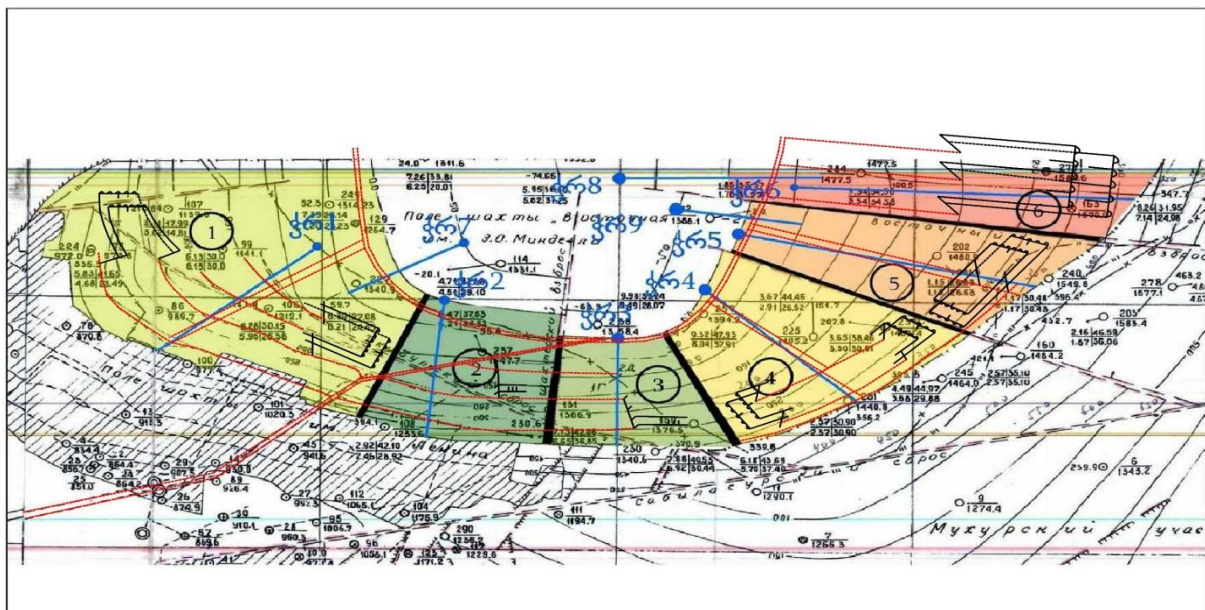
ტყიბულ–შაორის ქვანახშირის საბადო თავისი სამთო–გეოლოგიური აგებულებით მიეკუთვნება ერთ-ერთ ყველაზე რთულ ობიექტს არა მხოლოდ საქართველოს, არამედ ზოგადად რეგიონული ქვანახშირის საბადოებს შორის. მისი გეოლოგიური სტრუქტურა ხასიათდება მკვეთრად გამოხატული ტექტონიკური რღვევებით, ფენთა არათანაბარი განლაგებით, ნახშირის შრეების ცვალებადი სიმძლავრითა და რთული ლითოლოგიური შემადგენლობით, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს როგორც საბადოს გახსნის, ისე მისი შემდგომი ექსპლუატაციის პროცესებს. განსაკუთრებით აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ საბადოში არსებული ნახშირის ფენები ხშირ შემთხვევაში წარმოდგენილია ციცაბო და ცვალებადი დახრის კუთხეებით, რაც ქმნის დამატებით სირთულეებს როგორც გვირაბების გაყვანის, ასევე მოპოვებითი სამუშაოების ორგანიზაციისას.

საბადოს გეოლოგიური აგებულების ანალიზი ცხადყოფს, რომ ტექტონიკური რღვევები ხშირ შემთხვევაში ქმნიან ფენების დისლოკაციას 20–50 მეტრის ამპლიტუდით, რაც იწვევს როგორც ნახშირის ფენების გაწყვეტას, ასევე მათი სივრცობრივი განლაგების მკვეთრ არასტაბილურობას. აღნიშნული გარემოება პირდაპირ აისახება საბადოს ტექნოლოგიურ პროექტირებაზე, ვინაიდან ტრადიციული ერთიანი დამუშავების სქემები ასეთ პირობებში ვერ უზრუნველყოფს სტაბილურ და ეკონომიკურად ეფექტურ მოპოვებას. შესაბამისად, აუცილებელია საბადოს დაყოფა ცალკეულ, დაახლოებით ერთნაირ, სამთო–გეოლოგიურ და სამთოტექნიკური პირობების მქონე ბლოკებად, რომელთაც ექნებათ ინდივიდუალური ტექნოლოგიური გადაწყვეტები.

ტყიბულ–შაორის საბადოზე ჩატარებული დეტალური გეოლოგიური კვლევების საფუძველზე, რომელიც მოიცავდა 80-ზე მეტი ჭაბურღილის მონაცემების ანალიზს, დადგინდა, რომ საბადოს სტრუქტურა შესაძლებელია პირობითად დაიყოს ექვს ძირითად ბლოკად. თითოეული ბლოკი განსხვავდება ერთმანეთისგან როგორც ფენთა დახრის კუთხით, ასევე ნახშირის სიმძლავრით, ლითოლოგიური შემადგენლობითა და

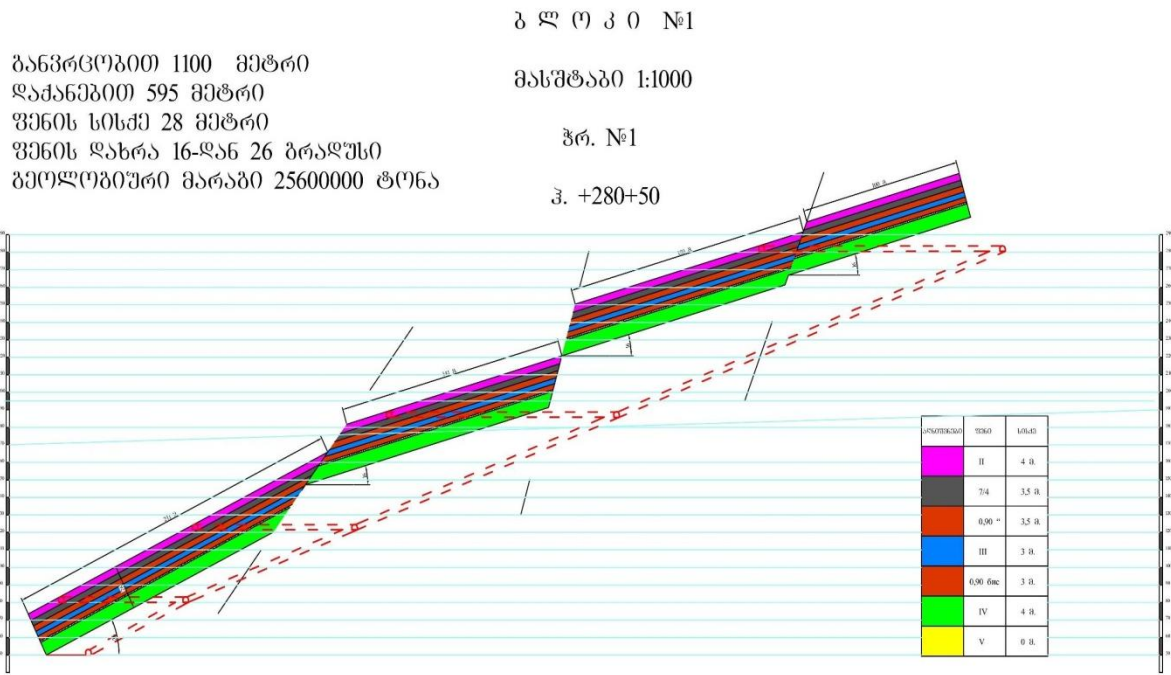
ტექტონიკური დარღვევების ინტენსივობით. აღნიშნული დაყოფა წარმოადგენს საბადოს რაციონალური დამუშავების ერთ-ერთ ძირითად წინაპირობას, ვინაიდან მხოლოდ ასეთი მიდგომა იძლევა შესაძლებლობას, რომ თითოეულ უბანზე შეირჩეს ოპტიმალური ტექნოლოგიური სქემა. (ნახ1) აღნიშნული ბლოკური სტრუქტურა წარმოადგენს საბადოს თანამედროვე დამუშავების საფუძველს, ვინაიდან მხოლოდ ასეთი დიფერენცირებული მიდგომა იძლევა შესაძლებლობას ოპტიმალურად იქნას შერჩეული მოპოვების სისტემა და შემცირდეს როგორც ტექნოლოგიური, ისე ეკონომიკური დანაკარგები.

ნახ1. ე. მინდელის შახტის ველის დაყოფა ბლოკებად



პირველი ამოსაღები ბლოკი წარმოადგენს ყველაზე რთულ და პრობლემურ უბანს საბადოს მთელ სტრუქტურაში. მისი გეოლოგიური აგებულება ხასიათდება ძლიერი ტექტონიკური დანაწევრებით, სადაც ფენთა წყება დაყოფილია 20–25 მეტრიანი ამპლიტუდის რღვევებით. აღნიშნული გარემოება მნიშვნელოვნად ართულებს როგორც ბლოკის გახსნას, ისე მისი შემდგომი დამუშავების პროცესს. ბლოკის ზომები განვრცობით აღწევს დაახლოებით 1100 მეტრს, ხოლო დაქანებით დაახლოებით 600 მეტრს, რაც ქმნის დამატებით ტექნოლოგიურ სირთულეებს. ასეთ პირობებში ტრადიციული უწყვეტი მექანიზებული კომპლექსების გამოყენება არარაციონალურია, ვინაიდან სამუშაო სივრცის არასტაბილურობა არ უზრუნველყოფს მათი ეფექტური ფუნქციონირების შესაძლებლობას. (ნახ2)

ნახ2. N 1 ამოსაღები ბლოკი



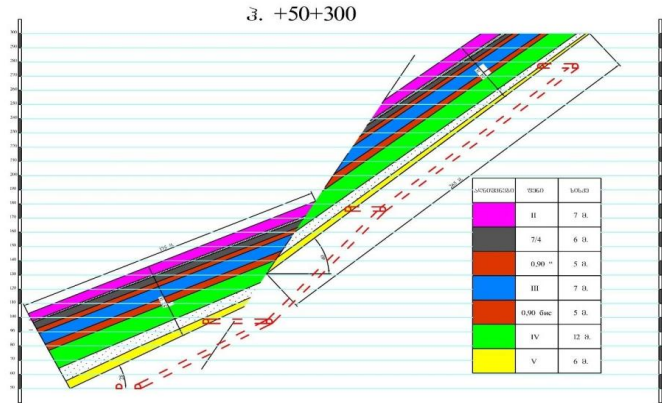
ამ ბლოკის დამუშავებისთვის მიზანშეწონილია გამოყენებულ იქნას პანელური სისტემა, რომელიც დაფუძნებულია ცალკეული ამოსაღები უბნების ეტაპობრივ დამუშავებაზე. თითოეული პანელი უნდა იყოს ტექნოლოგიურად იზოლირებული და აღჭურვილი დამოუკიდებელი ვენტილაციისა და სატრანსპორტო სისტემებით. ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა შემცირდეს ტექტონიკური დარღვევების უარყოფითი გავლენა და უზრუნველყოფილი იქნას სამუშაო პროცესის სტაბილურობა. ამასთანავე, აუცილებელია წმენდითი სამუშაოების შესრულება მომპოვებელი კომბაინების გამოყენებით ინდივიდუალური სამაგრის სისტემასთან ერთად, რაც ზრდის მოქნილობას რთულ გეოლოგიურ პირობებში.

მეორე ამოსაღები ბლოკი ხასიათდება შედარებით უკეთესი გეოლოგიური პირობებით, თუმცა აქაც აღინიშნება მნიშვნელოვანი ტექტონიკური გავლენა, რომელიც გამოიხატება ფენთა დახრის კუთხის ცვალებადობაში და ნახსლეტური რღვევების არსებობაში. ბლოკის ზომები განვრცობით შეადგენს დაახლოებით 750 მეტრს, ხოლო დაქანებით 420 მეტრს. ფენთა დახრის კუთხე მერყეობს 28–40 გრადუსის ფარგლებში, რაც ქმნის როგორც ტექნოლოგიურ შესაძლებლობებს, ისე გარკვეულ შეზღუდვებს. (ნახ3)

ნახ3. N2 ამოსაღები ბლოკი

ბანკრცობი 750 მეტრი
 ღაქანეობი 423 მეტრი
 ფენის სისქი 40-დან 46 მეტრი
 ფენის ღანა 25-დან 40 გრადუსი
 გეოლოგიური მარაბი 20000000 ტონა

ბ ლ ო კ ი №2
 მასშტაბი 1:1000
 ჯრ. №2



აღნიშნულ ბლოკში მიზანშეწონილია კომბინირებული ტექნოლოგიის გამოყენება, რომელიც მოიცავს როგორც კლასიკურ შტრეკულ მომზადებას, ასევე ქანობური გახსნის სისტემებს. განსაკუთრებით ეფექტიანია ქანობის გამოყენება 0 ჰორიზონტამდე, რომლის მეშვეობითაც უზრუნველყოფილია ცენტრალური ველების დაკავშირება და შემდგომი ბლოკური დამუშავება. ამ ბლოკის ქვედა ნაწილებში, სადაც ფენთა დახრის კუთხე მცირდება 35 გრადუსზე ქვემოთ, შესაძლებელია კომბინირებული მოპოვების ტექნოლოგიის გამოყენება ინდივიდუალური სამაგრიტ, რაც უზრუნველყოფს უსაფრთხოების და ეფექტიანობის ბალანსს.

მესამე ამოსაღები ბლოკი წარმოადგენს საბადოს ერთ-ერთ ყველაზე მაღალმარაგიან უბანს, სადაც კონცენტრირებულია დიდი რაოდენობით ქვანახშირი, თუმცა მისი დამუშავება რთულდება როგორც ტექტონიკური რღვევებით, ისე ფენთა არათანაბარი სიმძლავრით. აღნიშნულ ბლოკში ფენთა სისქე მერყეობს 50–70 მეტრის ფარგლებში, ხოლო დახრის კუთხე იცვლება 29–38 გრადუსამდე. ასეთი გეოლოგიური პირობები მოითხოვს მრავალსაფეხურიან ტექნოლოგიურ გადაწყვეტას.(4)

ნახ4. N3 ამოსაღები ბლოკი

ბ ლ ო კ ი №3

მასშტაბი 1:1000

განვრცობით 680 მეტრი

დაქანებით 429 მეტრი

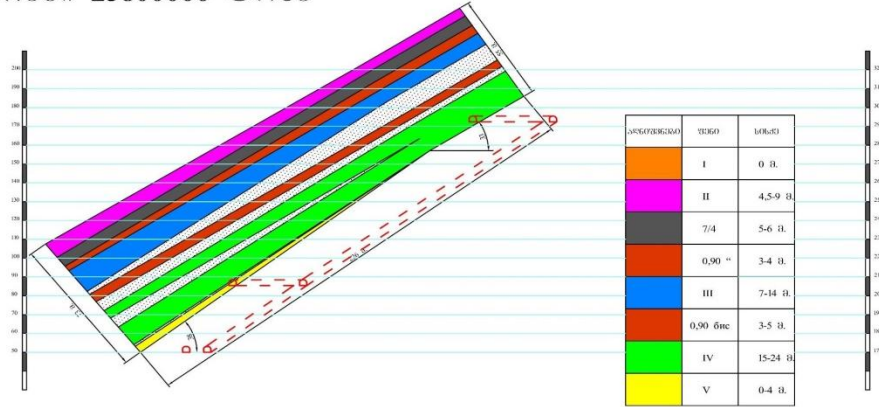
ფენის სისქი 52-დან 73 მეტრი

ფენის დახრა 29-დან 38 გრადუსი

გეოლოგიური მარაბი 25800000 ტონა

ჭრ. №3 - 1

კ. +175+50



ამ ბლოკის ზედა ჰორიზონტებზე მიზანშეწონილია გამოყენებულ იქნას სვეტური სისტემები, რომლებიც უზრუნველყოფენ სტაბილურ მოპოვებას შედარებით ერთგვაროვან უბნებში, ხოლო ქვედა ჰორიზონტებზე საჭიროა ჩამოქცევითი სისტემების გამოყენება, რომლებიც ეფუძნება კონტროლირებად გრუნტის ჩამოშლას. აღნიშნული კომბინაცია საშუალებას იძლევა მაქსიმალურად იქნას ათვისებული საბადოს რესურსები და შემცირდეს დანაკარგები.

მეოთხე და მეხუთე ბლოკები ხასიათდება შედარებით რთული ლითოლოგიური აგებულებით, სადაც ნახშირის ფენებს შორის ხშირია არგილიტებისა და ალევროლიტების შრეები. ეს შუალედური ქანები მნიშვნელოვნად ართულებს მოპოვების პროცესს და ზრდის როგორც დანახარჯებს, ისე ტექნოლოგიურ სირთულეებს. ამ პირობებში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ფენთა დეტალურ გეოლოგიურ დიფერენციაციას და მოპოვების წინასწარ მოდელირებას. (ნახ5), (ნახ6).

ნახ5. N4 ამოსაღები ბლოკი

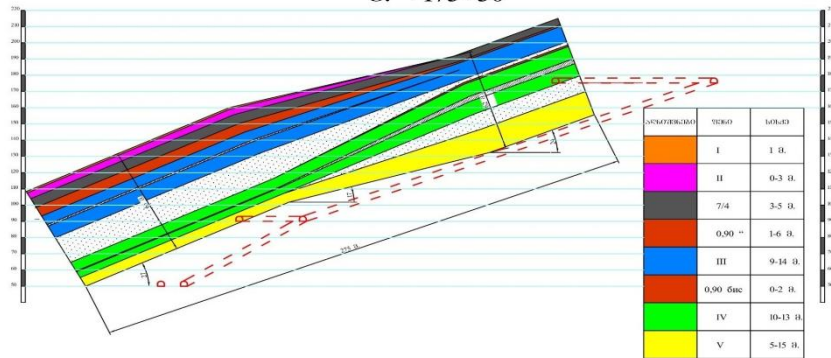
განვრცობითი 580 მეტრი
 ღაძანებით 520 მეტრი
 ფენის სისქი 43-დან 62 მეტრი
 ფენის ღახრა 27-დან 33 ბრადუსი
 გეოლოგიური მარაბი 22740000 ტონა

ბ ლ ო კ ი №4

მასშტაბი 1:1000

ჭრ. №4 - 1

პ. +175+50



ნახ6. N5 ამოსაღები ბლოკი

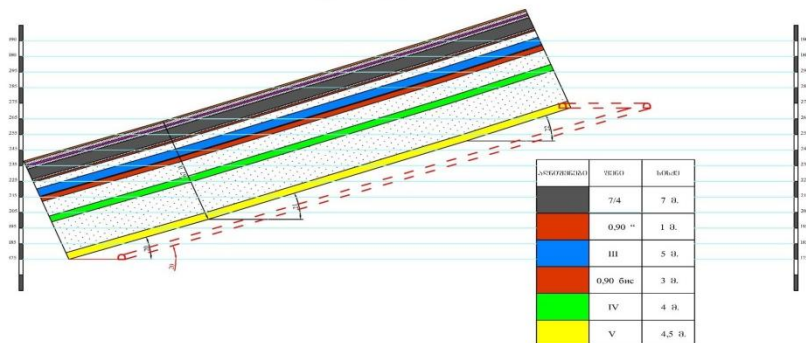
განვრცობითი 420 მეტრი
 ღაძანებით 670 მეტრი
 ფენის სისქი 73 მეტრი
 ფენის ღახრა 16-დან 22 ბრადუსი
 გეოლოგიური მარაბი 29700000 ტონა

ბ ლ ო კ ი №5

მასშტაბი 1:1000

ჭრ. №5 - 2

პ. +275+175

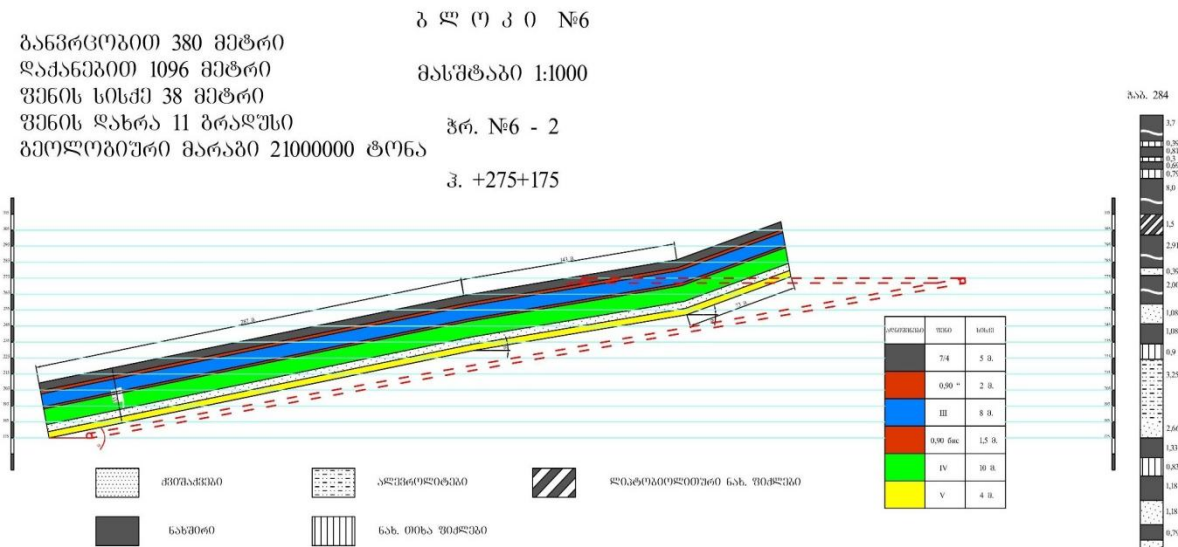


ამ ბლოკებში რეკომენდებულია დადმავალი ლავური სისტემების გამოყენება, სადაც წმენდითი სანგრევი გადაადგილდება ეტაპობრივად ბლოკის საზღვრების მიმართულებით. ამასთანავე, აუცილებელია ვენტილაციის სისტემების მკაცრი კონტროლი, ვინაიდან გაზის დაგროვების რისკი იზრდება რთული გეოლოგიური სტრუქტურის გამო.

მეექვსე ბლოკი, რომელიც საბადოს ყველაზე შორეულ აღმოსავლეთ ნაწილში მდებარეობს, ხასიათდება შედარებით სტაბილური გეოლოგიური პირობებით. ფენთა დახრის კუთხე აქ მერყეობს 9–19 გრადუსის ფარგლებში, რაც ქმნის ხელსაყრელ პირობებს საპორიზონტე მომზადებისა და დადმავალი ლავური სისტემების გამოყენებისთვის.

აღნიშნულ ბლოკში შესაძლებელია შედარებით მაღალმექანიზებული ტექნოლოგიების დანერგვა, რაც ზრდის მოპოვების პროდუქტიულობას და ამცირებს შრომით დანახარჯებს.(ნახ.7)

ნახ7. N6 ამოსაღები ბლოკი



ამ ბლოკის დამუშავებისას ცენტრალური მნიშვნელობა ენიჭება სწორად ორგანიზებულ ბრემსბერგულ სისტემებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ მასალის ეფექტურ ტრანსპორტირებას და სამუშაო სივრცის სტაბილურობას. ასევე შესაძლებელია შეწყვილებული ლავების გამოყენება, რაც ზრდის მოპოვების უწყვეტობას და ამცირებს ტექნოლოგიურ დანაკარგებს.

საბადოს თითოეული ბლოკის ანალიზი ცხადყოფს, რომ ერთიანი უნივერსალური ტექნოლოგიური გადაწყვეტა პრაქტიკულად შეუძლებელია. შესაბამისად, აუცილებელია მოქნილი, ადაპტირებული და ბლოკებზე მორგებული სისტემების დანერგვა, რომლებიც ითვალისწინებენ როგორც გეოლოგიურ პირობებს, ისე სამთო-ტექნიკურ შეზღუდვებს. ასეთი მიდგომა უზრუნველყოფს როგორც უსაფრთხოების ამაღლებას სამთო დარტყმების თვალსაზრისით, ისე ეკონომიკური ეფექტიანობის ზრდას.

დასკვნა

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დადგინდა, რომ საბადოს ექსპლუატაციის ძირითადი სირთულეები უკავშირდება არა მხოლოდ გეოლოგიურ ფაქტორებს, არამედ გამოყენებული ტექნოლოგიური სისტემების არასაკმარის ადაპტაციას რეალურ სამთო პირობებთან. განსაკუთრებით პრობლემურია ტრადიციული კამერულ-სვეტური

სისტემების გამოყენება, რომლებიც მიუხედავად მათი ტექნოლოგიური სიმარტივისა, ვერ უზრუნველყოფენ უსაფრთხოების საკმარის დონეს და ხასიათდებიან მაღალი დანაკარგებით. აღნიშნული მეთოდები მხოლოდ ნაწილობრივ აკმაყოფილებს დაბალპროდუქტიული შახტების მოთხოვნებს, მაშინ როდესაც ტყიბულ-შაორის საბადოს ცენტრალური უბნები საჭიროებს უფრო მოქნილ და მექანიზებულ მიდგომებს.

კვლევის შედეგებმა ასევე აჩვენა, რომ საბადოს ერთ-ერთი მთავარი პრობლემაა ენდოგენური ხანძრებისა და სამთო დარტყმების მაღალი რისკი, რაც გამოწვეულია ნახშირის თვითაღებადობის თვისებითა და ფენთა დამაბულობის არათანაბარი განაწილებით. აღნიშნული ფაქტორი მნიშვნელოვნად ამცირებს სამუშაოების უსაფრთხოების დონეს და საჭიროებს სპეციალური პროფილაქტიკური სისტემების დანერგვას, მათ შორის გაზის მუდმივ მონიტორინგს, ვენტილაციის ოპტიმიზაციას და გამომუშავებული სივრცის კონტროლირებად მართვას.

საბადოს ბლოკური ანალიზის საფუძველზე შემუშავებული რეკომენდაციები ეფუძნება პრინციპს, რომ თითოეულ გეოლოგიურ ბლოკს უნდა გააჩნდეს ინდივიდუალური გახსნის, მომზადებისა და დამუშავების ტექნოლოგიური სქემა. ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა მაქსიმალურად იქნას გათვალისწინებული კონკრეტული უბნის გეოლოგიური პირობები და მინიმუმამდე იქნას დაყვანილი როგორც ტექნოლოგიური, ისე ეკონომიკური რისკები. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ცენტრალური ბლოკების სწორი ეტაპობრივი დამუშავება, ვინაიდან სწორედ აქ არის კონცენტრირებული ძირითადი მარაგების დიდი ნაწილი.

კვლევის შედეგები ცხადყოფს, რომ რეკომენდირებული ტექნოლოგიური სქემების დანერგვა უზრუნველყოფს საბადოს ექსპლუატაციის ეფექტიანობის მნიშვნელოვან ზრდას. კერძოდ, მოსალოდნელია:

- ქვანახშირის დანაკარგების შემცირება 20–30%-ით;
- მოპოვების პროდუქტიულობის ზრდა;
- სამთო სამუშაოების უსაფრთხოების დონის გაუმჯობესება;
- ვენტილაციისა და გაზდაცვის სისტემების ეფექტიანობის ამაღლება;
- ტექნოლოგიური პროცესების სტაბილიზაცია რთულ გეოლოგიურ პირობებში.

გარდა ამისა, მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ შემოთავაზებული ბლოკური და მექანიზებული მიდგომა ქმნის შესაძლებლობას საბადოს რესურსების უფრო რაციონალური გამოყენებისთვის. განსაკუთრებით ეფექტიანია კომბაინური მოპოვების სისტემების გამოყენება შედარებით სტაბილურ უბნებში, ხოლო ციცაბო და რთულ ზონებში — ჩამოქცევითი და სვეტური სისტემების კომბინაცია. ასეთი დიფერენცირებული მიდგომა უზრუნველყოფს როგორც ტექნოლოგიურ მოქნილობას, ისე ეკონომიკურ გამართლებას.

დასკვნის სახით უნდა აღინიშნოს, რომ შემოთავაზებული ტექნოლოგიური მიდგომა წარმოადგენს კომპლექსურ საინჟინრო გადაწყვეტას, რომელიც ითვალისწინებს როგორც საბადოს გეოლოგიურ თავისებურებებს, ისე თანამედროვე სამთო ტექნოლოგიების მოთხოვნებს. მისი პრაქტიკაში დანერგვა უზრუნველყოფს საბადოს რესურსების უფრო სრულ და ეკონომიკურად ეფექტურ ათვისებას, რაც მნიშვნელოვნად გაზრდის როგორც სამთო წარმოების სტაბილურობას, ისე ენერგეტიკული სექტორის მდგრადობას.

გამოყენებული ლიტერატურა.

1. ა. მიქელაძე. ტყიბულ-შაორის საბადოს სამრეწველო ათვისების პრობლემები. „სამთო ჟურნალი“, თბილისი, 2010. გვ. 20-25.
2. გ. მაჩაიძე, გ. ლობჯანიძე, ა. ტაველიშვილი. ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადოს დამუშავების პრობლემები და მისი განვითარების პერსპექტივები. „სამთო ჟურნალი“, თბილისი, 2017. გვ. 16-20.
3. Микеладзе А. С. Разработка глубоких горизонтов ткибули-шаорского каменноугольного месторождения. «Мецниереба», Тбилиси, 1975, 167 с.

Division of the E. Mindeli Mine Field into Blocks with Different Mining-Geological and Mining-Technical Conditions Based on Borehole Data

Anzori Tavelishvili

Doctoral Student of the Georgian Technical University

Abstract

The Tkibuli-Shaori coal deposit represents one of the most complex mining-geological objects, characterized by complicated tectonic structures, variable coal seam thicknesses, and steep inclination angles. These conditions significantly complicate the selection of appropriate mine opening, preparation, and extraction technologies. The paper analyzes the geological structure of the deposit, the existing mining schemes, and their shortcomings, while proposing optimized technological solutions based on block division, improved safety measures, and increased mining efficiency. Particular attention is paid to the prospects of applying mechanized systems, as well as to reducing the risks of rock bursts and endogenous fires.

Financial Toxicity in Cancer Care

Tamriko Bulia¹; Tina Beruchashvili¹; Ioseb Abesadze²; David Makhashvili³; Lekso Toidze⁴;
Diana Zhamerashvili⁵; Mariam Chkheidze⁶ Ekaterine Abzianidze⁷; Bakho Dvali⁸

¹School of Health Sciences; The University of Georgia; ²Tbilisi State Medical University;

³Clinic Rustavi LLC; ⁴David Tvildiani Medical University; ⁵Aversi Clinic; ⁶LTD First Medical
Clinic; ⁷East European University; ⁸New Vision University

ABSTRACT

Financial toxicity has become an increasingly important concern in contemporary cancer care. Although advances in oncology have improved survival and expanded treatment options, they have also increased the economic burden experienced by patients and families. Financial toxicity refers not only to direct medical expenses but also to indirect costs, loss of income, psychological distress, and reduced access to care. This literature review examines the concept, determinants, consequences, measurement, and policy implications of financial toxicity among cancer patients. Evidence suggests that financial hardship may affect treatment adherence, quality of life, mental health, family stability, and health equity. The burden is particularly relevant for vulnerable populations and health systems with limited financial protection. Addressing financial toxicity requires routine screening, transparent communication about costs, financial navigation, stronger insurance coverage, and equity-oriented cancer policy. Recognizing financial toxicity as part of cancer care quality is essential to patient-centered, sustainable oncology practice.

Keywords: cancer care; financial toxicity; health equity; treatment adherence; public health

INTRODUCTION

Cancer care has changed substantially over the past few decades. Earlier diagnosis, improved surgical techniques, radiotherapy, systemic therapy, targeted agents, immunotherapy, and supportive oncology services have contributed to longer survival for many cancer patients. However, these advances have also created new challenges. One of the most important and increasingly recognized challenges is the financial burden associated with cancer diagnosis,

treatment, follow-up, and survivorship. For many patients, cancer is not only a medical diagnosis but also a major economic event that affects employment, family income, savings, household stability, and long-term financial security.

The term financial toxicity was introduced to describe the harmful financial consequences of cancer care, in analogy with the physical toxicities of cancer treatment (Zafar & Abernethy, 2013). The concept highlights that financial hardship can become a treatment-related adverse effect, affecting patients' well-being, decision-making, and ability to continue recommended care. Unlike traditional discussions of health expenditure, financial toxicity emphasizes the patient experience: how costs are felt, managed, and internalized by individuals and families.

Financial toxicity is not limited to countries without universal health coverage. It has been documented in high-income, middle-income, and low-resource settings, although its mechanisms and severity vary across health systems (Donkor et al., 2022; Smith et al., 2019). Even insured patients may incur high out-of-pocket payments, transportation costs, lost income, medication expenses, diagnostic costs, and informal caregiving burdens. In health systems with partial reimbursement or fragmented cancer services, these pressures may be intensified.

The consequences of financial toxicity are clinically and socially significant. Patients may delay diagnostic procedures, postpone treatment, reduce medication use, miss follow-up appointments, or avoid recommended supportive services because of cost concerns (Zafar et al., 2013). Financial hardship has also been associated with psychological distress, lower quality of life, and poorer overall well-being (Altice et al., 2017; Smith et al., 2019). At the family level, cancer-related expenses may lead to debt, depletion of savings, reduced spending on basic needs, and long-term socioeconomic vulnerability.

From a public health perspective, financial toxicity is closely linked to health equity. The burden is not distributed equally. Patients with low income, unstable employment, limited insurance coverage, rural residence, dependent family members, or advanced disease may be at greater risk (Carrera et al., 2018; Donkor et al., 2022). Therefore, financial toxicity should not be viewed only as an individual financial problem. It reflects broader structural issues, including insurance design, reimbursement policy, availability of affordable medicines, geographic access to oncology services, and social protection.

This literature review examines the concept, determinants, consequences, measurement, and policy implications of financial toxicity in cancer care. It focuses on cancer patients across the disease trajectory and discusses financial toxicity as a multidimensional issue involving clinical practice, health systems, public health, and social justice.

DEFINING FINANCIAL TOXICITY

Financial toxicity refers to the economic burden and distress experienced by patients as a result of cancer diagnosis and treatment. It includes both objective and subjective dimensions. Objective financial burden may involve direct medical costs, direct non-medical costs, and indirect costs. Subjective financial distress refers to the psychological and emotional strain caused

by financial pressure, uncertainty, and perceived inability to afford care (de Souza et al., 2014; Zafar & Abernethy, 2013).

Direct medical costs include expenses related to consultations, diagnostic tests, surgery, chemotherapy, radiotherapy, immunotherapy, targeted therapy, hospitalization, medications, laboratory tests, and follow-up care. These costs may be fully, partially, or minimally covered depending on the health system. Even when major treatments are reimbursed, patients may still pay for additional medications, imaging, supportive drugs, rehabilitation, or private consultations.

Direct non-medical costs include transportation, accommodation, food during treatment visits, childcare, home modifications, and other practical expenses associated with accessing care. These costs are particularly important for patients who live far from oncology centers. In many countries, specialized cancer services are concentrated in urban areas, requiring patients from rural or regional communities to travel repeatedly for diagnosis, treatment, and follow-up.

Indirect costs include loss of income, reduced working hours, job loss, early retirement, caregiver work absence, and reduced productivity. These costs may be substantial, especially for working-age adults, self-employed patients, and households dependent on one income source. Cancer may also affect the employment of family caregivers, who often accompany patients to appointments, provide home care, and manage treatment logistics.

Financial toxicity, therefore, extends beyond the price of cancer drugs. It reflects the interaction between disease, treatment, household resources, insurance coverage, employment, geography, and social support. A patient may experience financial toxicity even if the clinical treatment itself is partially funded, because the total economic consequences of cancer may still be overwhelming.

A key feature of financial toxicity is its influence on care decisions. Patients may not always disclose financial distress to clinicians, yet they may silently alter their behavior by delaying appointments, avoiding medications, or refusing recommended interventions. For this reason, financial toxicity should be understood as both a patient-centered outcome and a potential barrier to effective cancer care.

DETERMINANTS OF FINANCIAL TOXICITY

Financial toxicity is shaped by multiple determinants operating at the patient, disease, treatment, health-system, and policy levels. Understanding these determinants is essential for identifying patients at risk and designing effective interventions.

Patient-Level Factors

Socioeconomic status is one of the most consistent determinants of financial toxicity. Patients with lower income, fewer savings, unstable employment, or limited family resources are more vulnerable to cancer-related financial hardship (Altice et al., 2017; Smith et al., 2019). For

these patients, even moderate out-of-pocket expenses may represent a large proportion of household income.

Employment status is also important. Cancer diagnosis and treatment can disrupt work through hospitalization, treatment schedules, fatigue, psychological distress, or functional limitations. Patients may reduce working hours, take unpaid leave, change jobs, or stop working altogether. For self-employed individuals, informal workers, or those without paid sick leave, the economic consequences may be immediate and severe.

Age can influence financial vulnerability in different ways. Younger adults may face loss of income, childcare costs, education loans, and limited savings. Middle-aged adults may have dependent children or elderly relatives. Older adults may live on fixed incomes and face competing costs related to comorbidities, medications, and transportation. Therefore, financial toxicity can affect patients across the lifespan, although the mechanisms may differ.

Health literacy and financial literacy may also shape patient experience. Patients with limited understanding of insurance coverage, reimbursement rules, treatment costs, or available assistance programs may be less able to anticipate and manage financial risks. In addition, patients may feel uncomfortable discussing costs with clinicians, especially if they believe that financial concerns may compromise the quality of care they receive.

Disease- and Treatment-Related Factors

Cancer type, stage, treatment intensity, and duration of care influence financial toxicity. Patients requiring multimodal treatment, prolonged systemic therapy, repeated imaging, hospitalization, or long-term follow-up may face higher cumulative costs. Advanced cancers may involve more frequent care episodes, emergency visits, complications, and supportive medications.

The increasing use of high-cost cancer medicines has intensified concerns about affordability. Targeted therapies and immunotherapies have improved outcomes for selected patients, but they may be associated with substantial costs for health systems and patients (Tran & Zafar, 2018). Even when such treatments are reimbursed, associated costs such as monitoring, management of adverse events, travel, and time away from work may remain significant.

Treatment-related adverse effects can also contribute indirectly to financial toxicity. Complications may require additional consultations, medications, hospital admissions, or rehabilitation. They may also reduce patients' ability to work or perform daily activities. Thus, clinical toxicity and financial toxicity may interact, reinforcing each other.

Health-System Factors

Health-system design plays a central role in determining the severity of financial toxicity. Insurance coverage, reimbursement mechanisms, availability of public funding, price regulation, and access to essential medicines all influence patient costs. In systems where cancer care requires

substantial out-of-pocket payment, financial toxicity may be more common and severe (Donkor et al., 2022).

Fragmentation of services can increase costs. Patients may need to visit multiple facilities for diagnosis, treatment, imaging, laboratory testing, and follow-up. Lack of coordination can lead to duplicated tests, unnecessary travel, delays, and additional administrative expenses. When oncology services are concentrated in large cities, regional patients may face repeated travel and accommodation costs.

Another important system-level factor is the availability of financial counseling or patient navigation. Many patients do not receive clear information about expected costs, reimbursement options, or social assistance. Without structured support, patients may discover costs late, after treatment has already begun, when financial stress is more difficult to manage.

Policy-Level Factors

At the policy level, financial toxicity reflects the effectiveness of financial protection mechanisms. Universal health coverage, social insurance, national cancer control programs, essential medicines policies, and social welfare systems can reduce or intensify patient financial burden. Where cancer care is not fully integrated into public financing, patients may experience catastrophic health expenditure.

Policy decisions about drug pricing, reimbursement, diagnostic coverage, regional service distribution, and social benefits directly affect patients. Financial toxicity, therefore, cannot be addressed only at the level of individual clinician-patient communication. It requires broader policy attention to affordability, equity, and sustainability.

CONSEQUENCES FOR PATIENTS AND FAMILIES

The consequences of financial toxicity are multidimensional. They affect clinical care, psychological well-being, family functioning, social stability, and long-term economic security. Financial toxicity is not simply a side issue; it may become central to the cancer experience.

Clinical Consequences

Financial hardship can interfere with timely diagnosis and treatment. Patients may delay consultations, postpone diagnostic tests, or avoid specialist care because of anticipated costs. Once treatment begins, patients may miss appointments, reduce medication use, decline recommended therapies, or stop treatment prematurely due to financial pressure (Zafar et al., 2013).

Cost-related non-adherence is particularly concerning in oncology, where treatment timing and continuity may influence outcomes. If patients cannot afford medications for adverse effects, transportation to treatment centers, or follow-up imaging, clinical care may become incomplete. Financial toxicity can therefore undermine the effectiveness of otherwise evidence-based cancer treatment.

Some patients may also choose treatment options based on affordability rather than clinical preference. While shared decision-making should include patient values and preferences, decisions constrained by financial hardship raise ethical concerns. A patient's treatment choice may not reflect true preference but rather economic necessity.

Psychological Consequences

Financial toxicity is strongly connected to emotional distress. Patients may experience anxiety, fear, shame, guilt, or helplessness related to treatment costs and family finances. The uncertainty of cancer is compounded by uncertainty about affordability. Patients may worry not only about survival but also about whether their illness will financially harm their family.

Financial distress can reduce perceived control and increase psychological burden. Patients may feel that they are forced to choose between health and household stability. This can be particularly difficult for parents, primary earners, or patients responsible for dependents. In such cases, cancer-related financial hardship may affect identity, dignity, and family roles.

Studies have shown associations between financial burden and poorer mental health, lower quality of life, and greater distress among cancer patients and survivors (Altice et al., 2017; Smith et al., 2019). Although financial toxicity is economic in origin, its consequences are deeply psychosocial.

Family and Household Consequences

Cancer affects households, not only individuals. Family members may contribute financially, provide transportation, accompany patients to treatment, reduce working hours, or leave employment to provide care. Household savings may be depleted, assets may be sold, and families may borrow money to cover treatment-related expenses.

Financial toxicity may also change household priorities. Families may reduce spending on food, education, housing, preventive health care, or other basic needs. In some cases, the economic consequences of cancer may persist long after treatment ends, especially if debt accumulates or employment is lost.

The family impact of financial toxicity is particularly important in cultures and health systems where family members are expected to provide practical and financial support. In such contexts, cancer-related financial burden may become a shared family crisis.

FINANCIAL TOXICITY AND TREATMENT ADHERENCE

Treatment adherence is one of the most clinically important pathways through which financial toxicity may affect cancer outcomes. Adherence in cancer care includes attending appointments, completing diagnostic tests, receiving treatment on schedule, taking oral medications correctly, managing side effects, and participating in follow-up surveillance.

Cancer treatment increasingly includes oral anticancer agents, long-term hormonal therapy, targeted therapy, and supportive medications. These treatments may shift responsibility

from hospital-based administration to patient-managed adherence. When costs are high, patients may skip doses, delay refills, split tablets, or discontinue therapy without informing clinicians. This behavior may be invisible unless clinicians ask directly about affordability.

Financial toxicity may also affect adherence indirectly. Patients who cannot afford transportation may miss appointments. Patients who lose income may prioritize work over treatment visits. Patients who cannot afford supportive medications may experience unmanaged side effects, leading to treatment interruption. Patients who feel overwhelmed by bills may disengage from care.

Cost-related adherence problems are not always recognized in clinical practice. Patients may be reluctant to disclose financial difficulty because of embarrassment or fear of receiving lower-quality care. Clinicians may avoid cost discussions because they lack time, training, or knowledge of actual treatment costs. As a result, financial toxicity may remain hidden until it has already affected care.

Addressing adherence therefore requires more than reminding patients to follow treatment instructions. It requires identifying financial barriers, discussing cost concerns, connecting patients with assistance resources, and designing care pathways that reduce avoidable expenses.

PSYCHOSOCIAL IMPACT OF FINANCIAL BURDEN

The psychosocial impact of financial toxicity deserves specific attention because cancer care is already emotionally demanding. Financial burden adds another layer of stress to diagnosis, treatment, and survivorship.

Patients may experience guilt if they believe their illness is financially harming their family. They may feel shame about needing financial assistance or borrowing money. Some patients may avoid discussing costs with relatives to protect them emotionally, while others may experience conflict within the household about treatment expenses.

Financial toxicity may also affect social participation. Patients may withdraw from social activities because of cost, fatigue, or embarrassment. Reduced income and increased expenses can limit normal life activities, contributing to isolation and reduced well-being. In survivorship, ongoing financial consequences may delay return to normal life even after treatment is completed.

For some patients, financial hardship changes the meaning of cancer treatment. Treatment may be perceived not only as a medical necessity but also as a financial threat. This can affect hope, trust, and decision-making. Patients may ask whether treatment is “worth it” not only in terms of survival benefit but also in terms of family financial survival.

Psychosocial support in oncology should therefore include attention to financial distress. Screening for anxiety and depression is important, but financial stressors should also be recognized as contributors to emotional suffering. Integrating social workers, financial

navigators, psychologists, and patient support services can help address the broader psychosocial consequences of financial toxicity.

HEALTH EQUITY AND VULNERABLE GROUPS

Financial toxicity is fundamentally an equity issue. It does not affect all patients equally. Patients who enter cancer care with fewer resources are more likely to experience severe consequences. This includes low-income patients, uninsured or underinsured patients, rural residents, unemployed individuals, informal workers, single parents, older adults on fixed incomes, and patients with dependent family members.

Rural patients may face additional travel and accommodation costs due to the geographic concentration of oncology services. Even if treatment is covered, repeated travel can become unaffordable. Patients from regions with limited specialist services may also experience diagnostic delays, fragmented care, and higher indirect costs.

Younger adults may be especially vulnerable because they may have limited savings, unstable employment, young children, or educational debt. They may also be in life stages where cancer disrupts career development, family planning, and financial independence. Older adults, by contrast, may face fixed incomes, comorbidities, and competing medication costs.

Gender may also influence financial toxicity. In some settings, women may have lower income, less employment security, or greater caregiving responsibilities. Cancer-related financial hardship may therefore intersect with gender inequality, family roles, and social expectations.

Health equity requires that financial toxicity be addressed proactively. If financial burden prevents some patients from accessing or completing treatment, then cancer care is not equitable, even if treatment is technically available. Equity-oriented oncology must consider affordability as part of access.

FINANCIAL TOXICITY IN LOW- AND MIDDLE-RESOURCE SETTINGS

Financial toxicity is particularly relevant in low- and middle-income settings, where health insurance coverage may be incomplete, public funding may be limited, and out-of-pocket payments may account for a substantial share of health expenditures. A systematic review and meta-analysis of financial toxicity in low- and middle-income countries found that cancer diagnosis, treatment, and care impose a high financial burden on patients and families (Donkor et al., 2022). This evidence suggests that financial toxicity is not a marginal issue but a major barrier to cancer control.

In lower-resource settings, patients may face multiple overlapping barriers: late diagnosis, limited availability of specialized oncology services, high medication costs, travel expenses, limited reimbursement, and weak social protection. These barriers may lead to delayed treatment, incomplete care, and household impoverishment.

The financial burden may be especially severe when cancer services are centralized in major cities. Patients from regional areas may need to travel repeatedly for imaging, pathology, chemotherapy, radiotherapy, or specialist consultations. Transportation and accommodation costs may become a major part of the cancer care burden.

In addition, access to newer cancer medicines may be limited by reimbursement policies and high prices. Even when essential treatments are available, supportive medications, diagnostics, and follow-up care may create additional costs. For patients with limited income, these cumulative expenses can become catastrophic.

Financial toxicity in low- and middle-resource settings should be understood within the broader framework of universal health coverage. Cancer care policies must address not only service availability but also affordability. Expanding cancer treatment without adequate financial protection may improve theoretical access while leaving many patients unable to complete care.

MEASUREMENT OF FINANCIAL TOXICITY

Measuring financial toxicity is essential for research, clinical practice, and policy. Without measurement, financial hardship remains hidden and difficult to address. Several approaches have been used to assess financial toxicity, including out-of-pocket expenditure, catastrophic health expenditure, employment loss, debt, insurance status, and patient-reported financial distress.

One of the most widely discussed patient-reported outcome measures is the Comprehensive Score for Financial Toxicity (COST), developed to assess financial distress among cancer patients (de Souza et al., 2014). The COST measure captures the subjective experience of financial burden, including worry, perceived control, and satisfaction with financial resources. Patient-reported measures are important because objective costs alone do not fully explain distress. Two patients with similar expenses may experience different levels of toxicity depending on income, savings, family support, and expectations.

Catastrophic health expenditure is another important concept, particularly in public health research. It usually refers to health spending that exceeds a defined proportion of household income or capacity to pay. This measure helps identify when medical expenses threaten household financial stability.

Employment outcomes are also relevant. Work interruptions, reduced income, job loss, and changes in caregiver employment should be considered part of the financial toxicity framework. These indirect costs may be especially important for working-age patients and families.

Routine clinical screening for financial distress remains limited in many settings. However, incorporating simple questions into oncology practice may help identify patients at risk. For example, clinicians or care teams may ask whether treatment costs, transportation,

medications, or work disruption are causing difficulty. Screening should be linked to referral pathways; failing to offer support when financial distress is identified may be insufficient.

STRATEGIES TO REDUCE FINANCIAL TOXICITY

Reducing financial toxicity requires interventions at multiple levels: clinical, institutional, health-system, and policy. No single intervention is sufficient because financial toxicity has multiple causes.

Clinical-Level Strategies

At the clinical level, oncology teams should recognize financial toxicity as part of patient-centered care. Cost-related concerns should be discussed respectfully and without judgment. Clinicians do not need to know every exact cost, but they should be willing to ask whether affordability is a concern and refer patients to appropriate support.

Shared decision-making can include discussion of financial implications when clinically appropriate. Patients should not be forced to choose inferior care because of cost, but they should be informed about available options, expected benefits, potential toxicities, and financial consequences. Transparent communication can reduce uncertainty and help patients plan.

Routine screening for financial distress may help identify patients early. Screening can be conducted by nurses, social workers, patient navigators, or financial counselors. Patients at high risk can then be referred for assistance with insurance, reimbursement, medication support programs, transportation resources, or social services.

Institutional Strategies

Cancer centers can reduce financial toxicity by developing financial navigation services. Financial navigators help patients understand coverage, estimate costs, apply for assistance programs, and coordinate reimbursement. Evidence suggests that financial navigation is increasingly recognized as a practical response to financial distress in oncology care (Yezefski et al., 2018).

Institutions can also improve scheduling and coordination to reduce unnecessary visits. Combining appointments, avoiding duplicated tests, and coordinating imaging, laboratory work, and consultations can reduce travel and time costs. Telemedicine may help some patients, particularly for follow-up visits, although it should not replace necessary physical examination or treatment.

Patient education materials should include information about possible costs and available resources. Many patients do not know what financial support exists until they are already in crisis. Early information can improve preparedness.

Health-System Strategies

At the health-system level, reducing financial toxicity requires stronger insurance coverage, reimbursement of essential cancer services, and protection from catastrophic expenditure. Coverage should include not only anticancer treatment but also diagnostics, monitoring, supportive medications, rehabilitation, and follow-up care.

Access to essential cancer medicines is a major priority. Policies that promote rational medicine selection, price negotiation, generic and biosimilar availability, and transparent reimbursement can reduce patient burden. Health technology assessment may help systems prioritize treatments that provide meaningful clinical benefit relative to cost.

Regional access to cancer services is also important. Strengthening regional diagnostic and treatment capacity can reduce travel-related financial burden. Where full decentralization is not feasible, patient transportation support and accommodation programs may reduce inequities.

Policy-Level Strategies

At the policy level, financial toxicity should be integrated into national cancer control planning. Cancer policies often focus on prevention, screening, diagnosis, and treatment availability, but affordability should be equally emphasized. A treatment that exists but is unaffordable is not truly accessible.

Governments and health authorities can monitor catastrophic health expenditure among cancer patients, evaluate out-of-pocket spending, and identify vulnerable groups. Such data can guide reimbursement reform, social assistance, and targeted support.

Social protection policies are also important. Paid sick leave, disability benefits, caregiver support, employment protection, and anti-discrimination policies can reduce indirect financial harm. Cancer care policy should therefore connect with broader labor and social welfare policy.

IMPLICATIONS FOR ONCOLOGY PRACTICE AND PUBLIC HEALTH

Financial toxicity has important implications for oncology practice. Clinicians should understand that financial hardship can influence treatment decisions, adherence, emotional well-being, and family stability. Asking about financial concerns should become a normal part of comprehensive cancer care, similar to asking about symptoms, treatment side effects, or psychosocial distress.

However, clinicians alone cannot solve financial toxicity. Oncology practice must be supported by institutional systems, financial counseling, social work, patient navigation, and policy-level financial protection. A patient-centered cancer care model should include attention to affordability and access.

From a public health perspective, financial toxicity reflects the social determinants of cancer outcomes. Income, employment, geography, insurance, education, and social support all

shape the cancer experience. Therefore, cancer control strategies should address not only biological disease but also the economic conditions that influence care.

Financial toxicity also raises ethical questions. If patients cannot access or complete effective treatment because of cost, then the health system fails to deliver equitable care. Equity in oncology requires that patients are not financially destroyed by seeking treatment. Protecting patients from financial harm should be considered part of quality cancer care.

For countries with developing or transitional health systems, financial toxicity is especially important. Expanding oncology services should be accompanied by policies that protect households from catastrophic expenditure. Otherwise, improvements in cancer treatment availability may not translate into real access for all patients.

CONCLUSION

Financial toxicity is an important and often under-recognized consequence of cancer care. It includes direct medical expenses, non-medical costs, loss of income, psychological distress, and household economic instability. Its effects extend beyond finances, influencing treatment adherence, quality of life, mental health, family functioning, and health equity.

The burden of financial toxicity is shaped by patient-level vulnerability, treatment intensity, health-system design, insurance coverage, and broader social policy. Vulnerable populations, including low-income patients, rural residents, uninsured or underinsured individuals, and families with limited resources, are at particular risk.

Addressing financial toxicity requires coordinated action. Oncology teams should screen for financial distress and communicate openly about affordability. Cancer centers should provide financial navigation and social support. Health systems should strengthen reimbursement, regional access, and essential medicine availability. Policymakers should integrate financial protection into cancer control planning.

As cancer care continues to advance, affordability must remain central to patient-centered oncology. Effective treatment is not sufficient if patients cannot access it, complete it, or survive its economic consequences. Recognizing financial toxicity as a core dimension of cancer care quality is essential for more equitable, humane, and sustainable oncology practice.

References

Altice, C. K., Banegas, M. P., Tucker-Seeley, R. D., & Yabroff, K. R. (2017). Financial hardships experienced by cancer survivors: A systematic review. *Journal of the National Cancer Institute*, 109(2), djw205. <https://doi.org/10.1093/jnci/djw205>

Carrera, P. M., Kantarjian, H. M., & Blinder, V. S. (2018). The financial burden and distress of patients with cancer: Understanding and stepping-up action on the financial toxicity of cancer treatment. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 68(2), 153–165. <https://doi.org/10.3322/caac.21443>

de Souza, J. A., Yap, B. J., Hlubocky, F. J., Wroblewski, K., Ratain, M. J., Cella, D., & Daugherty, C. K. (2014). The development of a financial toxicity patient-reported outcome in cancer: The COST measure. *Cancer*, 120(20), 3245–3253. <https://doi.org/10.1002/cncr.28814>

Donkor, A., Atuwo-Ampoh, V. D., Yakanu, F., Torgbenu, E., Ameyaw, E. K., Kitson-Mills, D., Vanderpuye, V., & Kyei, K. A. (2022). Financial toxicity of cancer care in low- and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *Supportive Care in Cancer*, 30, 7159–7190. <https://doi.org/10.1007/s00520-022-07044-z>

Gordon, L. G., Merollini, K. M. D., Lowe, A., & Chan, R. J. (2017). A systematic review of financial toxicity among cancer survivors: We cannot pay the co-pay. *The Patient*, 10(3), 295–309. <https://doi.org/10.1007/s40271-016-0204-x>

Lentz, R., Benson, A. B., III, & Kircher, S. (2019). Financial toxicity in cancer care: Prevalence, causes, consequences, and reduction strategies. *Journal of Surgical Oncology*, 120(1), 85–92. <https://doi.org/10.1002/jso.25374>

National Cancer Institute. (2024). *Financial toxicity and cancer treatment (PDQ®)–Health professional version*. National Cancer Institute. <https://www.cancer.gov/about-cancer/managing-care/track-care-costs/financial-toxicity-hp-pdq>

Smith, G. L., Lopez-Olivo, M. A., Advani, P. G., Ning, M. S., Geng, Y., Giordano, S. H., & Volk, R. J. (2019). Financial burdens of cancer treatment: A systematic review of risk factors and outcomes. *Journal of the National Comprehensive Cancer Network*, 17(10), 1184–1192. <https://doi.org/10.6004/jnccn.2019.7305>

Tran, G., & Zafar, S. Y. (2018). Financial toxicity and implications for cancer care in the era of molecular and immune therapies. *Annals of Translational Medicine*, 6(9), 166. <https://doi.org/10.21037/atm.2018.03.28>

Yabroff, K. R., Dowling, E. C., Guy, G. P., Jr., Banegas, M. P., Davidoff, A., Han, X., Virgo, K. S., McNeel, T. S., Chawla, N., Blanch-Hartigan, D., Kent, E. E., Li, C., Rodriguez, J. L., de Moor, J. S., Zheng, Z., Jemal, A., & Ekwueme, D. U. (2016). Financial hardship associated with cancer in the United States: Findings from a population-based sample of adult cancer survivors. *Journal of Clinical Oncology*, 34(3), 259–267. <https://doi.org/10.1200/JCO.2015.62.0468>

Yezefski, T., Steelquist, J., Watabayashi, K., Sherman, D., Shankaran, V., & Ramsey, S. (2018). Impact of trained oncology financial navigators on patient out-of-pocket spending. *American Journal of Managed Care*, 24(5 Suppl), S74–S79.

Zafar, S. Y. (2016). Financial toxicity of cancer care: It's time to intervene. *Journal of the National Cancer Institute*, 108(5), djv370. <https://doi.org/10.1093/jnci/djv370>

Zafar, S. Y., & Abernethy, A. P. (2013). Financial toxicity, Part I: A new name for a growing problem. *Oncology*, 27(2), 80–81, 149.

Zafar, S. Y., Peppercorn, J. M., Schrag, D., Taylor, D. H., Goetzinger, A. M., Zhong, X., & Abernethy, A. P. (2013). The financial toxicity of cancer treatment: A pilot study assessing out-of-pocket expenses and the insured cancer patient's experience. *The Oncologist*, 18(4), 381–390. <https://doi.org/10.1634/theoncologist.2012-0279>

ახალი თაობის ინტელექტუალური ქსელები – 6G ტექნოლოგიის მიმოხილვა

მახარაძე სალომე¹, მიქავა თალიკო²

^{1,2}საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი, ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, ¹ასოცირებული პროფესორი, s.makharadze@gtu.ge, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5105-0476>, ²ბაკალავრი, mikava.taliko22@gtu.ge

აბსტრაქტი

6G არის მომავალი მეექვსე თაობის მობილური ქსელის ტექნოლოგია, რომლის კომერციული გაშვება 2030 წლისთვისაა მოსალოდნელი. ის გვთავაზობს 1 ტერაბიტ-წამამდე სიჩქარეს (5G-ზე 100-ჯერ უფრო სწრაფი) და მიკროწამიან დაყოვნებას. ახალი ტექნოლოგია გააერთიანებს ხელოვნური ინტელექტის შესაძლებლობებს, თანამგზავრების მეშვეობით 3D დაფარვას და მაღალი სიზუსტის სენსორებს, რაც შესაძლებელს გახდის ინტერაქტიული AR/VR-ის, ჰოლოგრამული და ავტონომიური სისტემების გამოყენებას.

სტატიაში განხილულია მეექვსე თაობის (6G) მობილური კომუნიკაციის ტექნოლოგია, მისი განვითარების ტენდენციები, მახასიათებლები და სამომავლო გამოყენების სფეროები. სტატიაში გაანალიზებულია 6G-ის როლი ციფრული ტრანსფორმაციის პროცესში, მისი უპირატესობები წინა თაობის (5G) ქსელებთან შედარებით და ის ტექნოლოგიური გამოწვევები, რომლებიც დაკავშირებულია მის დანერგვასთან. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ხელოვნური ინტელექტის ინტეგრაციას, ტერაჰერცულ სიხშირეებსა და ჰოლოგრაფიული კომუნიკაციის შესაძლებლობებს.

საკვანძო სიტყვები: 6G, მობილური კომუნიკაცია, ხელოვნური ინტელექტი, ტერაჰერცი, უსადენო ქსელები.

შესავალი

მობილური კომუნიკაციების ტექნოლოგიებმა ბოლო ათწლეულების განმავლობაში სწრაფი განვითარება განიცადა. 1G-დან 5G-მდე თითოეული თაობა მნიშვნელოვნად ცვლიდა კომუნიკაციის ხარისხს, სიჩქარესა და გამოყენების

შესაძლებლობებს. დღეს მსოფლიოს მასშტაბით აქტიურად მიმდინარეობს 5G ქსელების დანერგვა, თუმცა უკვე დღის წესრიგში დგას 6G (Generation) ტექნოლოგიის კონცეფცია.

მობილური საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების განვითარება წარმოადგენს თანამედროვე ციფრული საზოგადოების ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მიმართულებას. თითოეული ახალი თაობის ქსელმა მნიშვნელოვნად შეცვალა ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარე, ხარისხი და ხელმისაწვდომობა. თუ 1G ტექნოლოგია მხოლოდ ხმოვან კომუნიკაციას ემსახურებოდა, 2G-იმ ციფრული კავშირი შემოგვთავაზა, 3G-იმ მობილური ინტერნეტი, 4G-იმ ფართოზოლოვანი მონაცემთა გადაცემა უზრუნველყო, ხოლო 5G-იმ შექმნა საფუძველი ინტერნეტ საგნებისთვის (IoT), ავტონომიური სისტემებისთვის და ჰიპერ-სიჩქარის ინფრასტრუქტურისთვის.



სურათი 1. მობილური ქსელების ევოლუცია

დღეს მსოფლიო ტექნოლოგიური სექტორი აქტიურად მუშაობს შემდეგი თაობის — 6G (Sixth Generation) — ქსელების განვითარებაზე. მიუხედავად იმისა, რომ 6G ჯერ კიდევ სტანდარტიზაციისა და კვლევის ეტაპზეა, მისი კონცეფცია უკვე მკაფიოდ განსაზღვრულია: ეს იქნება ინტელექტუალური, მაღალსიჩქარიანი, ენერგოეფექტური და სრულად ინტეგრირებული საკომუნიკაციო ეკოსისტემა, რომელიც ფიზიკურ, ციფრულ და ბიოლოგიურ სამყაროს შორის კავშირს ახალ დონეზე გადაიყვანს.

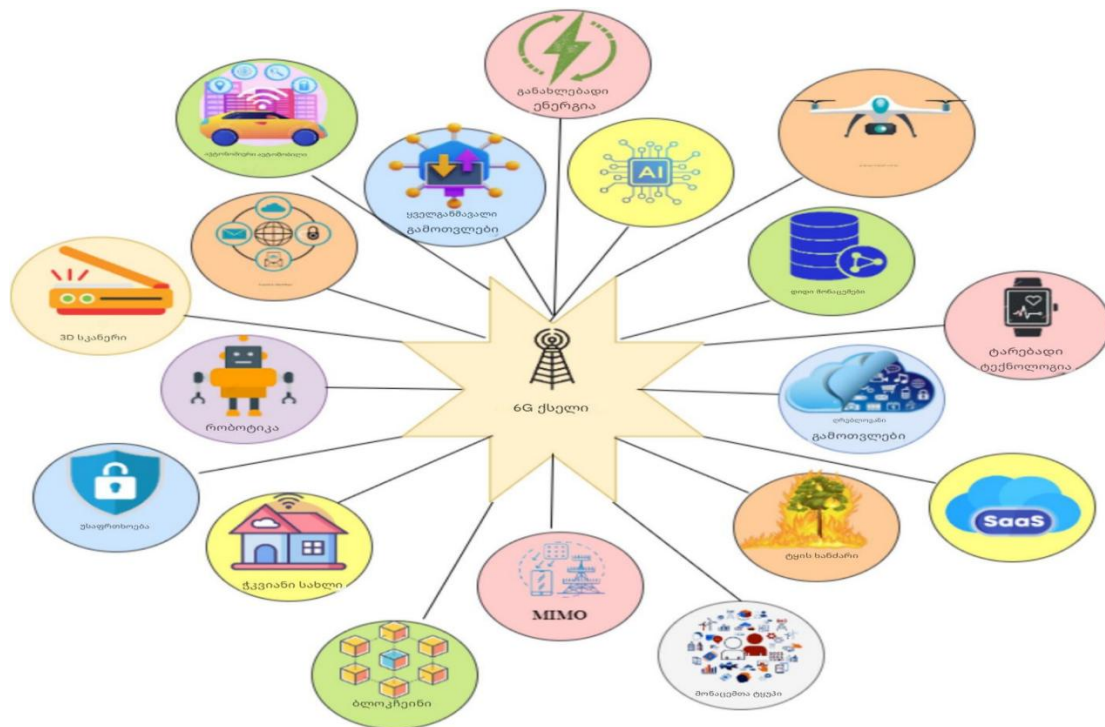
6G წარმოადგენს მომავალ თაობას, რომელიც მიზნად ისახავს არა მხოლოდ სიჩქარის ზრდას, არამედ ინტელექტუალური ქსელების შექმნას, სადაც ხელოვნური ინტელექტი და ავტომატიზაცია მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს.

6G (Sixth Generation) ტექნოლოგია

6G არის მეექვსე თაობის უსადენო საკომუნიკაციო სისტემა, რომლის დანერგვაც მოსალოდნელია 2030 წლისთვის. იგი მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს, შეამცირებს დაყოვნებას და უზრუნველყოფს ქსელის უფრო მაღალ ინტელექტუალიზაციას.

6G ქსელები განიხილება არა მხოლოდ როგორც სწრაფი ინტერნეტის საშუალება, არამედ როგორც პლატფორმა, რომელიც გააერთიანებს:

- ხელოვნურ ინტელექტს (AI);
- მანქანურ სწავლებას (ML);
- გაფართოებულ და ვირტუალურ რეალობას (AR/VR);
- ჰოლოგრაფიულ კომუნიკაციას;
- ავტონომიურ ტრანსპორტს;
- ჭკვიან ქალაქებს;
- სატელიტურ და მიწისზედა ქსელებს;
- ინდუსტრია 5.0-ის გადაწყვეტილებებს.



სურათი 2. 6G ქსელი

6G ქსელები გამოიყენებენ სიხშირეების ფართო სპექტრს, რათა უზრუნველყონ ულტრამალალი სიჩქარე (1 ტბიტ/წმ-მდე) და მინიმალური დაყოვნება. ძირითადი სიხშირული დიაპაზონები, რომლებიც ამჟამად განიხილება 6G-ისთვის, არის:

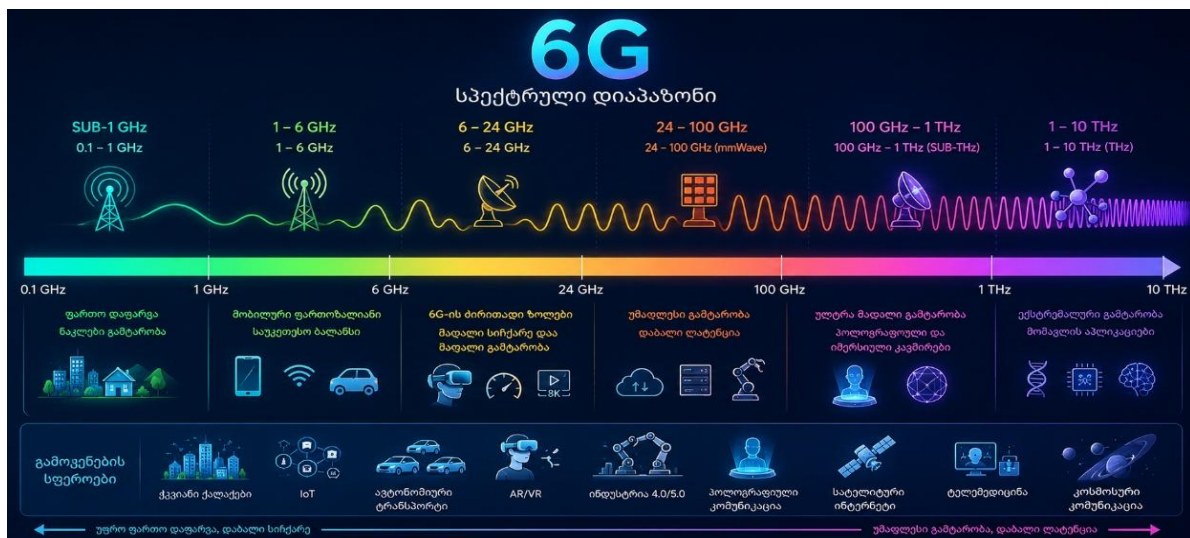
- **ზედა საშუალო დიაპაზონი (Upper Mid-band/FR3):** 7 გჰც-დან 24 გჰც-მდე. ეს დიაპაზონი ითვლება 6G-ის "ოქროს ზოლად", რადგან ის გთავაზობთ კარგ ბალანსს სიგნალის გავრცელების მანძილსა და გამტარუნარიანობას შორის. კერძოდ, **7.125–8.4 გჰც** და **14.8–15.35 გჰც** დიაპაზონი აქტიური შესწავლის საგანია.
- **მილიმეტრული ტალღები (mmWave):** 24 გჰც-დან 300 გჰც-მდე. მიუხედავად იმისა, რომ 5G უკვე იყენებს mmWave-ს, 6G-ში ამ დიაპაზონის უფრო მაღალი ნაწილები იქნება ათვისებული მონაცემთა გადაცემის სიმძლავრის გასაზრდელად.

- **სუბ-ტერაჰერცული (Sub-THz) დიაპაზონი:** 90 გჰც-დან 300 გჰც-მდე. ეს სიხშირეები საშუალებას იძლევა მიღწეულ იქნეს ექსტრემალური სიჩქარეები, რაც საჭიროა ისეთი ტექნოლოგიებისთვის, როგორიცაა მაღალი გარჩევადობის ჰოლოგრაფიული კომუნიკაცია.

- **ტერაჰერცული (THz) დიაპაზონი:** 300 გჰც-დან 3 ტჰც-მდე (ზოგიერთი წყაროს მიხედვით 10 ტჰც-მდე). ეს არის 6G-ის ყველაზე განსაკუთრებული უპირატესობა, რომელიც უზრუნველყოფს უპრეცედენტო სიჩქარეს, თუმცა სიგნალის გავრცელების მანძილი ძალიან მოკლეა.

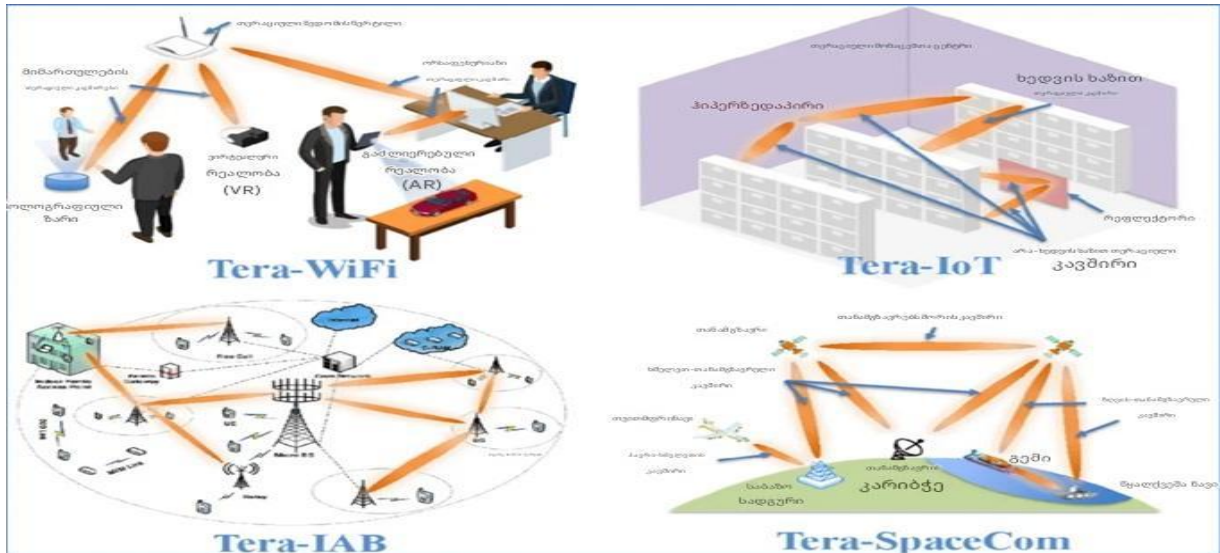
- **დაბალი და საშუალო დიაპაზონები (Sub-7 GHz):** 6G ასევე გამოიყენებს არსებულ სიხშირეებს (1 გჰც-ის ქვემოთ და 1-7 გჰც-მდე), რათა უზრუნველყოს ფართო დაფარვა და შენობებში სიგნალის შეღწევადობა.

სპექტრის გამოყოფის შესახებ საბოლოო გადაწყვეტილებებს მიიღებენ მსოფლიო რადიოკომუნიკაციების კონფერენციაზე (WRC-27), ხოლო კომერციული 6G ქსელების გაშვება 2030 წლისთვისაა მოსალოდნელი.



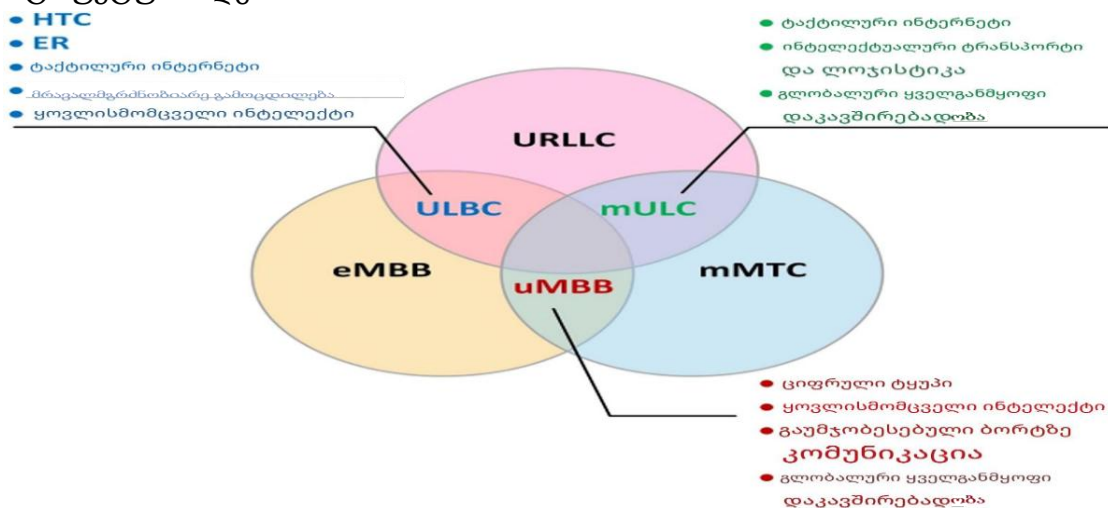
სურათი 3. 6G სპექტრული დიაპაზონი

6G ქსელის დაგეგმარება იგეგმება ამ ახალი დიაპაზონების გამოყენებით, რათა განხორციელდეს ისეთი შესაძლებლობები, როგორიცაა XR (გაფართოებული რეალობა) და ხელოვნური ინტელექტი, საწყისი იმპლემენტაციები კი ზედა საშუალო დიაპაზონზე იქნება დაფუძნებული.



სურათი 4. ტერაპერცული კომუნიკაციის სხვადასხვა გამოყენება

აქცენტი გაკეთდება ულტრა სანდო, დაბალი დაყოვნების კომუნიკაციაზე (Ultra-reliable low latency communication - URLLC) და მასიური მანქანური ტიპის კომუნიკაციებზე (Massive machine-type communications - mMTC), რაც უზრუნველყოფს უწყვეტ კავშირს ყველაფერთან, პერსონალური მოწყობილობებიდან ჰკვიან ინფრასტრუქტურამდე.



სურათი 5. 6G-ის გამოყენების სცენარები

6G ტექნოლოგიის ძირითადი მახასიათებლები

უკიდურესად მაღალი სიჩქარე

6G-ის ერთ-ერთი მთავარი მახასიათებელი იქნება მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე, რომელმაც შესაძლოა მიაღწიოს 1 ტერაბიტ/წამამდე (1 Tbps). ეს მნიშვნელოვნად აღემატება 5G-ის შესაძლებლობებს. შედეგად შესაძლებელი გახდება:

- წამებში დიდი მოცულობის ფაილების გადაცემა;
- 16K და უფრო მაღალი ხარისხის ვიდეოსტრიმინგი;
- რეალურ დროში ჰოლოგრაფიული ზარები;

- მასიური მონაცემთა ნაკადების დამუშავება.

ულტრა დაბალი დაყოვნება (Latency)

თუ 5G ქსელში დაყოვნება დაახლოებით 1 მილიწამია, 6G მიზნად ისახავს მიკროწამების დონეზე დაყოვნებას. რაც კრიტიკულად მნიშვნელოვანია:

- ავტონომიური ავტომობილებისთვის;
- დისტანციური ქირურგიისთვის;
- სამხედრო მართვის სისტემებისთვის;
- ინდუსტრიული რობოტიკისთვის;
- რეალურ დროში VR/AR გარემოსთვის.

ხელოვნური ინტელექტის დრო ინტეგრაცია

6G-ის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი სიახლე იქნება AI-ის ჩაშენება ქსელის არქიტექტურაში. 5G-ში AI დამატებითი ინსტრუმენტია, ხოლო 6G-ში იგი გახდება ქსელის მართვის ბირთვი. 6G ქსელები დაფუძნებული იქნება AI-ზე, რომელიც რეალურ დროში გააანალიზებს ქსელის დატვირთვას და მოახდენს ოპტიმიზაციას. ქსელის დიზაინში ჩაერთვება ხელოვნური ინტელექტი და მანქანური სწავლება, რათა გაუმჯობესდეს ქსელის მუშაობა, მართვა და ენერგოეფექტურობა. AI უზრუნველყოფს:

- ტრაფიკის პროგნოზირებას;
- რესურსების ავტომატურ განაწილებას;
- ქსელის თვითგამართვას (Self-Healing Network);
- საფრთხეების აღმოჩენას;
- ენერგომოხმარების ოპტიმიზაციას.

ტერაჰერცული სპექტრის გამოყენება

6G გამოიყენებს უფრო მაღალ სიხშირეებს — ტერაჰერცულ დიაპაზონს (THz Band), რომელიც ბევრად დიდ გამტარუნარიანობას იძლევა. უპირატესობები:

- უზარმაზარი გამტარუნარიანობა;
- მაღალი სიჩქარე;
- მრავალმომხმარებლიანი მხარდაჭერა.

ნაკლოვანება:

- მცირე დაფარვის არეალი;
- სიგნალის სწრაფი მიღება;
- ინფრასტრუქტურის მაღალი ღირებულება.

ჰოლოგრაფიული კომუნიკაცია

6G-ის ეპოქაში რეალობად შეიძლება იქცეს 3D ჰოლოგრაფიული კომუნიკაცია, სადაც ადამიანის ან საგნის სამგანზომილებიანი, რეალისტური პროექციის მიღება იქნება სივრცეში შესაძლებელი. გამოყენების სფეროები:

- ონლაინ განათლება;
- ბიზნეს შეხვედრები;
- მედიცინა;
- გასართობი ინდუსტრია.

ციფრული ტყუპები (Digital Twin)

ფიზიკური ობიექტების ციფრული ასლების შექმნა საშუალებას მისცემს სისტემებს უკეთესი მონიტორინგისა და მართვისას.

ინტეგრირებული სატელიტური და საჰაერო ქსელები

6G ქსელები აღარ იქნება მხოლოდ მიწისზედა საბაზო სადგურებზე დამოკიდებული. ისინი მოიცავენ:

- დაბალორბიტულ თანამგზავრებს (LEO satellites);
- დრონებს;
- მაღალი სიმაღლის პლატფორმებს (HAPS);
- მიწისზედა ინფრასტრუქტურას.

რაც შექმნის **გლობალურ უწყვეტ დაფარვას**, მათ შორის სოფლებში, ზღვაში, მთებში და უდაბნოშიც კი.

მასიური IoT და ჰკვიანი გარემო

6G-ს შეეძლება ერთ კვადრატულ კილომეტრზე მილიონობით მოწყობილობის დაკავშირება. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია:

- ჰკვიანი ქალაქებისთვის;
- სენსორული ინფრასტრუქტურისთვის;
- ენერგოსისტემებისთვის;
- სოფლის მეურნეობისთვის;
- ჯანდაცვის მონიტორინგისთვის.

ენერგოეფექტურობა და მწვანე კომუნიკაცია

თანამედროვე სამყაროში გარემოს დაცვა ერთ-ერთი პრიორიტეტია. 6G ქსელები ორიენტირებული იქნება დაბალ ენერგომოხმარებაზე. 6G იქმნება ენერგოეფექტურობის გათვალისწინებით, რათა შემცირდეს მონაცემთა გამოყენების ზრდასთან დაკავშირებული გარემოზე ზემოქმედება, ძირითადი აქცენტი კეთდება როგორც ქსელური ინფრასტრუქტურის, ასევე მოწყობილობების ენერგომოხმარების შემცირებაზე. რისთვისაც გამოყენებული იქნება შემდეგი მეთოდები:

- ენერგოეფექტური ანტენები;
- AI-ზე დაფუძნებული ოპტიმიზაცია;
- “ძილის” (Sleep) რეჟიმის ქსელური ელემენტები;
- განახლებადი ენერგიის წყაროების გამოყენება.



სურათი 6. 6G ტექნოლოგიის ძირითადი მახასიათებლები

5G და 6G ტექნოლოგიების შედარება

5G უკვე წარმოადგენს მაღალტექნოლოგიურ ქსელს, თუმცა 6G კიდევ უფრო ფართო შესაძლებლობებს გვთავაზობს.

- 5G უზრუნველყოფს მაღალი სიჩქარის ინტერნეტს და IoT მხარდაჭერას;
- 6G მიზნად ისახავს სრულად ინტელექტუალურ ქსელს.

6G-ის მთავარი უპირატესობა იქნება არა მხოლოდ სიჩქარე, არამედ ქსელის თვითმართვადი სისტემების შექმნა.

ცხრილი 1. 5G და 6G ტექნოლოგიების შედარება

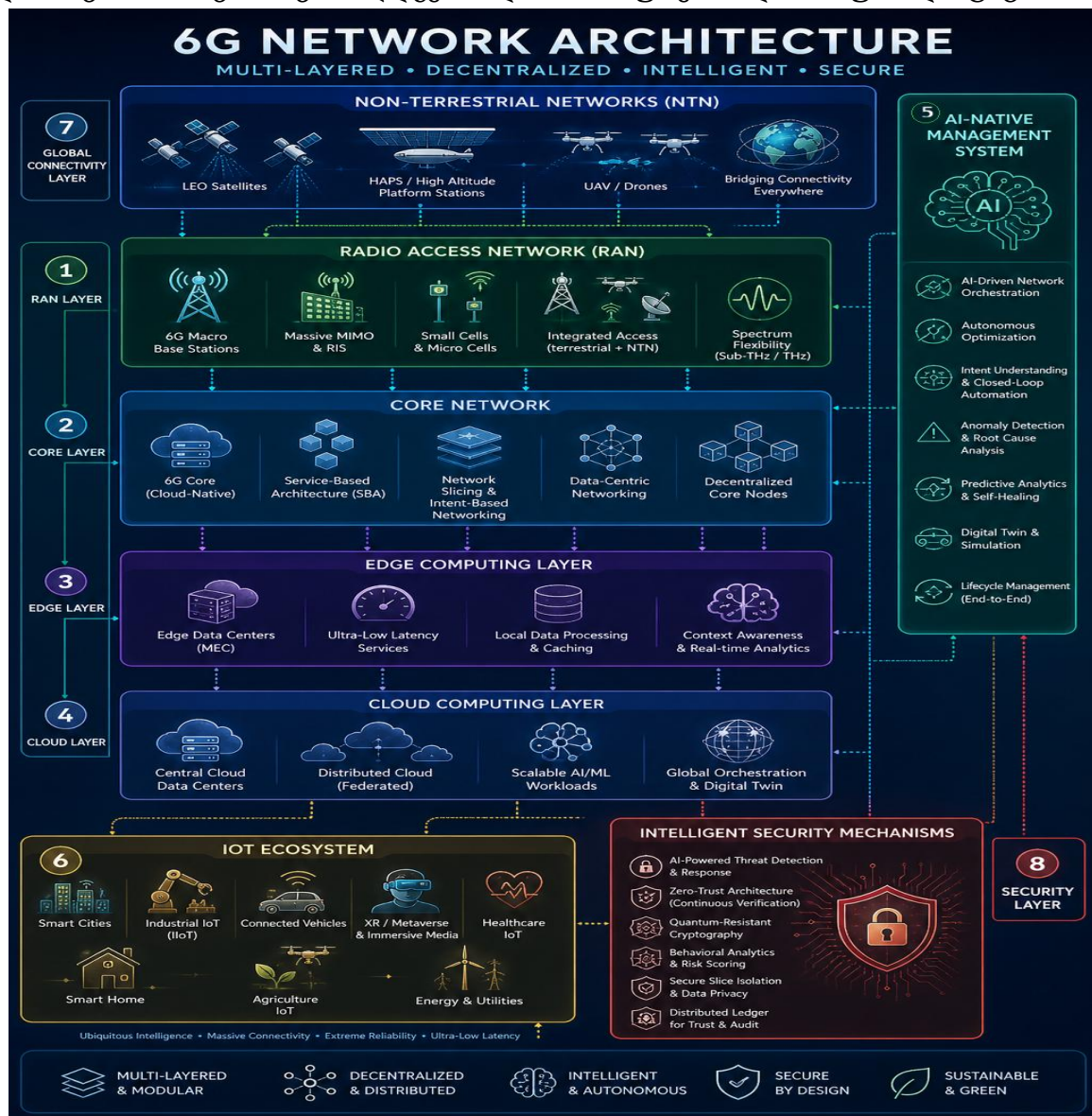
პარამეტრი	5G	6G
სიჩქარე	10 Gbps-მდე	1 Tbps-მდე
სიხშირული დიაპაზონი	გჰც-ზე ნაკლები, მიკროტალღა ფიქსირებული წვდომისთვის	გჰც-ზე ნაკლები, მიკროტალღური მობილური წვდომისთვის. ტერაჰერცული დიაპაზონი 140 გჰც-ზე მეტი. არა-RF დიაპაზონები, მაგ., ოპტიკური, VLC და ა.შ.
არქიტექტურა	- მკვრივი ქვე-6 გჰც-იანი მცირე ზომის საბაზო სადგურები ქოლგისებრი მაკრო-საბაზო სადგურებით. - mmWave-ის დაახლოებით 100 მეტრიანი მცირე ზომის უჯრედები ფიქსირებული წვდომისთვის.	- მაღალი სიხშირეების უუჯრედო ჰიპერ-სიხშირეები. - დროებით დამონტაჟებული BS-ებით. - პაწაწინა THz უჯრედები
დაყოფნა	~1 მილიწამი	<1 მილიწამი/ მიკროწამები
AI ინტეგრაცია	შეზღუდული	სრული
სპექტრი	mmWave	THz
დაფარვა	მიწისზედა	მიწისზედა + სატელიტური
მობილურობა	350 კმ/სთ	>1000 კმ/სთ
სპექტრული ეფექტურობა	3~5x 4G-სთან შედარებით	>3x 5G-სთან შედარებით
ენერგოეფექტურობა	1000 x 4G-სთან შედარებით	>10x 5G-სთან შედარებით
დაფარვა	70%-ზე მეტი	>99%
საიმედოობა	99.9%	>99.999%
პოზიციონირების სიზუსტე	მეტრი	სანტიმეტრი
მიმღების მგრძნობელობა	დაახლოებით -120 დბმ	<-130 დბმ
რეალობა	AR/VR	ჰოლოგრაფიული XR
მოწყობილობის ტიპი	სმარტფონები, სენსორები, დრონები	სენსორები, XR და BCI ადჰუვრელობა, ჰიპერ-სიხშირული იმპლანტები,
AI	დამატებითი	ჩაშენებული

6G ქსელის არქიტექტურა

6G ქსელის არქიტექტურა წარმოადგენს მრავალშრიან და დეცენტრალიზებულ მოდელს, სადაც ინტეგრირებულია:

- რადიო წვდომის ქსელი (RAN);
- ბირთვული ქსელი (Core Network);
- Edge Computing;
- Cloud Computing;
- AI-Native მართვის სისტემა;
- არაზელების ქსელები - Non-Terrestrial Networks (NTN);
- IoT ეკოსისტემა;
- უსაფრთხოების ინტელექტუალური მექანიზმები.

ეს არქიტექტურა უზრუნველყოფს არა მხოლოდ მონაცემთა გადაცემას, არამედ ქსელის თვითმართვას, თვითაღდგენას და მომსახურების დინამიურ ადაპტაციას.



სურათი 7. 6G ქსელის არქიტექტურა

6G ქსელის არქიტექტურის ძირითადი ფენები

1. მომხმარებლის მოწყობილობების ფენა (Device Layer).

ამ ფენაში ერთიანდება ყველა ტიპის დამაბოლოებელი მოწყობილობა:

- სმარტფონები;
- ტაბლეტები;
- ავტონომიური მანქანები;
- სენსორები;
- დრონები;
- სამედიცინო მოწყობილობები;
- AR/VR სათვალეები;
- ინდუსტრიული რობოტები.

6G ეპოქაში მოწყობილობები არა მხოლოდ მომხმარებლები იქნებიან, არამედ თავადაც ქსელის აქტიური ელემენტები.

2. რადიო წვდომის ქსელი (6G RAN)

RAN წარმოადგენს იმ ნაწილს, რომელიც მომხმარებელს უსადენო კავშირით სარგებლობის შესაძლებლობას აძლევს.

6G RAN-ის თავისებურებები:

- Massive MIMO-ის გაუმჯობესებული ვერსიები;
- Intelligent Reflecting Surfaces (IRS);
- THz სიხშირეების გამოყენება;
- Ultra-Dense Small Cells;
- AI-ზე დაფუძნებული სიგნალის მართვა.

6G RAN იქნება პროგრამულად მართვადი და დინამიურად ადაპტირებადი გარემო.

3. Edge Intelligence Layer

6G-ში მონაცემთა დიდი ნაწილი დამუშავდება მომხმარებელთან ახლოს — Edge Nodes-ზე. უპირატესობები:

- მინიმალური დაყოვნება;
- რეალურ დროში მონაცემთა ანალიზი;
- ქსელის განტვირთვა დატვირთვისგან;
- ლოკალური გადაწყვეტილებების მიღება.

გამოყენება:

- ავტონომიური ტრანსპორტი;
- ქარხნული ავტომატიზაცია;
- ჰიპერ-კამერები;
- მედიცინა.

4. Core Network (6G Core)

ბირთვული ქსელი იქნება სრულად პროგრამულად განსაზღვრული (SDN/NFV based). ძირითადი ფუნქციები:

- სესიების მართვა;
- მომხმარებლის ავთენტიფიკაცია;
- რესურსების განაწილება;
- ქსელის “დაჭრა” (Network Slicing);
- უსაფრთხოების პოლიტიკა;
- მომსახურების ხარისხის კონტროლი (QoS).

6G Core იქნება cloud-native და distributed.

5. Cloud-Native ინფრასტრუქტურა

6G ქსელი დაეყრდნობა ღრუბლოვან ტექნოლოგიებს:

- Public Cloud;
- Private Cloud;
- Hybrid Cloud;
- Multi-Cloud.

რაც გაზრდის მასშტაბურობას, მოქნილობას და მომსახურების ხელმისაწვდომობას.

6. AI-Native კონტროლის ფენა

6G-ის ერთ-ერთი მთავარი განსხვავება არის ის, რომ ხელოვნური ინტელექტი ჩაშენებული იქნება არქიტექტურაში. AI მართავს:

- ტრაფიკის ნაკადებს;
- სპექტრის განაწილებას;
- თვითაღდგენას;
- თავდასხმების აღმოჩენას;
- მომხმარებლის ქცევის პროგნოზირებას;
- ენერგოეფექტურობას.

7. Non-Terrestrial Network Layer (NTN)

6G არქიტექტურა მოიცავს კოსმოსურ და საჰაერო ინფრასტრუქტურას:

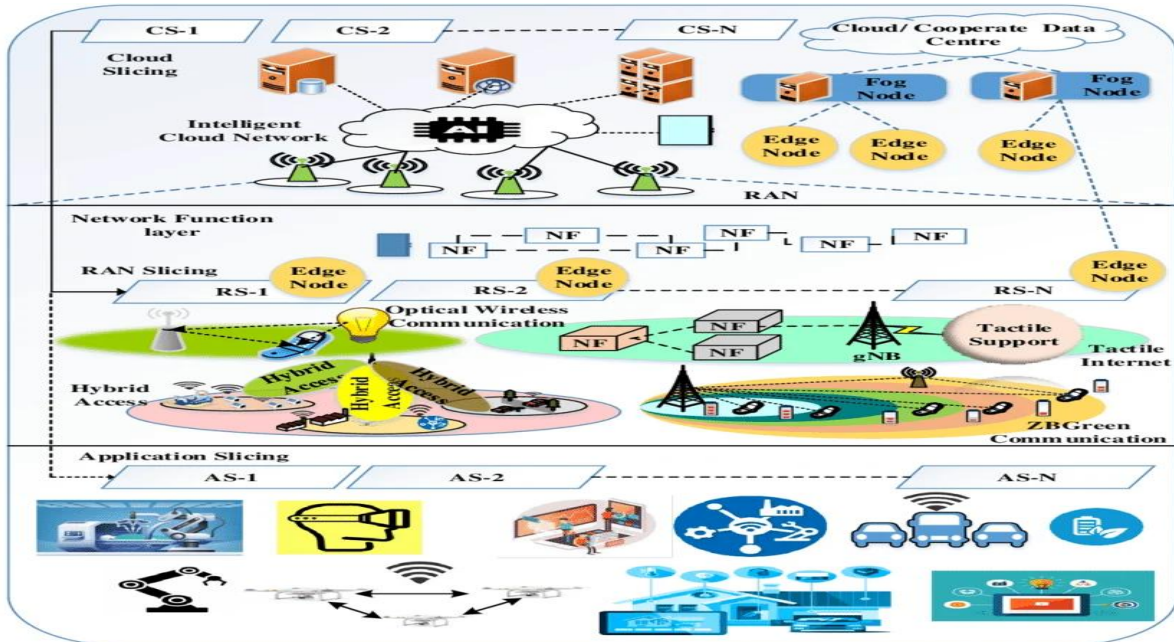
- LEO თანამგზავრები;
- HAPS პლატფორმები;
- დრონები;
- საჰაერო რელები.

ამ გზით შესაძლებელი ხდება კავშირი ისეთ ადგილებში, სადაც ტრადიციული ინფრასტრუქტურა არ არსებობს.

8. Security-by-Design ფენა

უსაფრთხოება 6G-ში თავიდანვე ჩაშენებული იქნება. მექანიზმები:

- ნულოვანი ნდობის არქიტექტურა - Zero Trust Architecture;
- კვანტური რეზისტენტული კრიპტოგრაფია - Quantum-Resistant Cryptography;
- AI საფრთხის გამოვლენა - AI Threat Detection;
- განაწილებული იდენტობის მენეჯმენტი - Distributed Identity Management;
- ბლოკჩეინის მხარდაჭერა - Blockchain.



სურათი 8. 6G ქსელის ვირტუალიზებულ “დაჭრაზე” დაფუძნებული არქიტექტურა

6G ქსელების გამოყენების სფეროები

6G ტექნოლოგიის გამოყენება შესაძლებელი იქნება შემდეგ სფეროებში:

მედიცინა

- დისტანციური ქირურგია, მუდმივი მონიტორინგი.
- პაციენტის რეალურ დროში მონიტორინგი;
- AI დიაგნოსტიკა.

ტრანსპორტი

- ავტონომიური მანქანები;
- ჭკვიანი გზები;
- სატრანსპორტო ნაკადების მართვა.

განათლება

- ვირტუალური ლაბორატორიები;
- ჰოლოგრაფიული ლექციები (VR/AR გარემო);

- იმერსიული სწავლება.

ინდუსტრია

- სრულად ავტომატიზებული ქარხნები;
- რობოტიზებული წარმოება;
- პროგნოზირებადი ტექნიკური მომსახურება.

ჭკვიანი ქალაქები

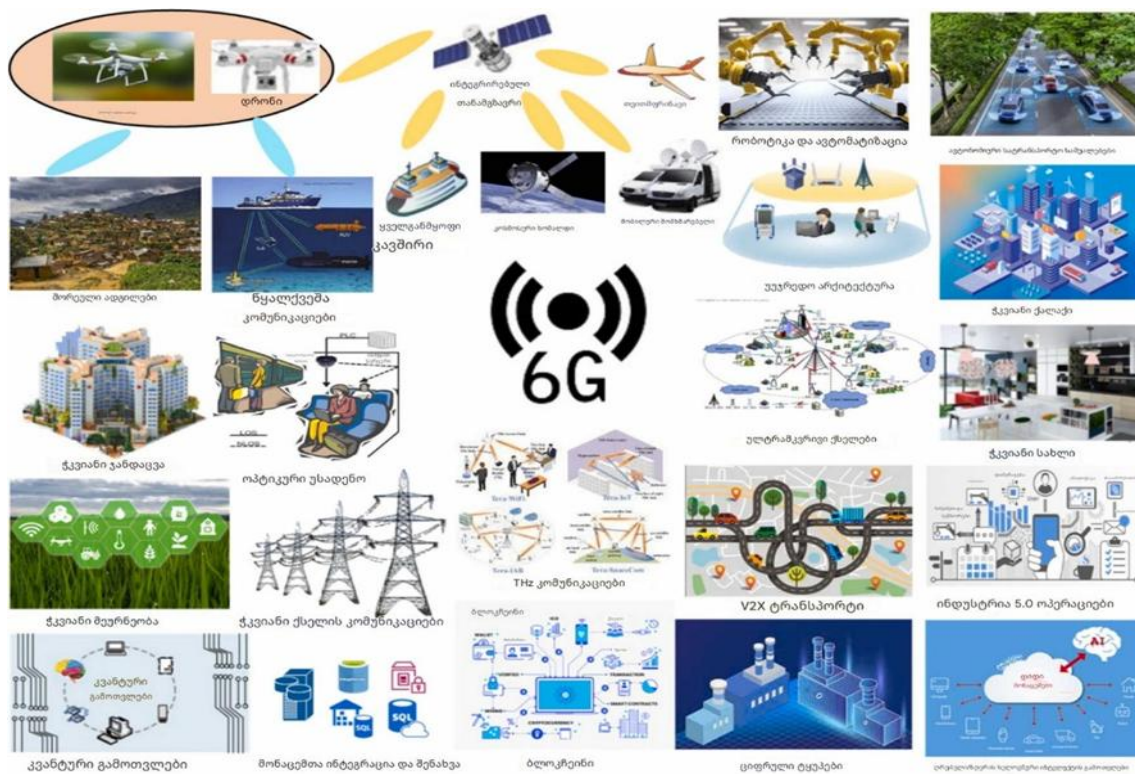
- ავტონომიური ტრანსპორტი, განათება, ენერგია.

ინდუსტრია 4.0, 5.0

- რობოტიკა, ავტომატიზაცია.

სამხედრო სექტორი

- სამხედრო და კოსმოსური კავშირი;
- რეალურ დროში ტაქტიკური კომუნიკაცია.



სურათი 9. 6G ქსელების გამოყენების სფეროები

6G-ის დანერგვასთან დაკავშირებული გამოწვევები

მიუხედავად უმრავი პერსპექტივისა, 6G-ის დანერგვას ახლავს სერიოზული გამოწვევები:

1. მაღალი ინფრასტრუქტურული ხარჯები;
2. სტანდარტიზაციის სირთულე;
3. კიბერუსაფრთხოების რისკები;
4. მონაცემთა კონფიდენციალურობა;
5. ენერგომომხმარების კონტროლი;
6. გლობალური რეგულაციები;
7. ტექნოლოგიური მოუმზადებლობა განვითარებად ქვეყნებში.



სურათი 10. 6G-ის დანერგვასთან დაკავშირებული გამოწვევები

6G-ის დანერგვის პროგნოზი საქართველოში

საქართველოში ჯერ კიდევ მიმდინარეობს 5G ქსელების დანერგვისა და განვითარების ეტაპი. 6G-ის დანერგვა საჭიროებს:

- ძლიერ ოპტიკური ინფრასტრუქტურის განვითარებას;
- ინვესტიციების მოზიდვას;
- კვალიფიციური კადრების მომზადებას.

საქართველოში 6G-ის დანერგვა პირველ ეტაპზე რეალისტური იქნება ბიზნეს სექტორსა და ქალაქებში, ხოლო შემდეგ რეგიონებში ეტაპობრივად.

დასკვნა

6G ტექნოლოგია წარმოადგენს მობილური კომუნიკაციების ახალ ევოლუციურ ეტაპს. 6G ქსელის არქიტექტურა წარმოადგენს მომავლის ჰიბრიდულ, ინტელექტუალურ და სრულად ინტეგრირებულ საკომუნიკაციო სისტემას. იგი აერთიანებს მიწისზედა, ღრუბლოვან, Edge, AI და კოსმოსურ კომპონენტებს ერთიან ეკოსისტემაში. 6G არა მხოლოდ გაზრდის სიჩქარეს, არამედ შეცვლის მთლიანად ქსელის ფუნქციონირების

პრინციპს - ქსელი გახდება თვითმართვადი, თვითგანვითარებადი და გლობალურად ხელმისაწვდომი. იგი არა მხოლოდ გააუმჯობესებს ინტერნეტის სიჩქარეს, არამედ შექმნის ინტელექტუალურ ქსელებს, რომლებიც შეძლებენ დამოუკიდებელ მართვასა და ოპტიმიზაციას. მიუხედავად არსებული გამოწვევებისა, 6G მომავალში მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს ციფრული საზოგადოების განვითარებაში. 6G იქნება ახალი ციფრული ეპოქის საფუძველი, ინტერნეტი გახდება უფრო სწრაფი, ჭკვიანი და ინტეგრირებული. შეიძლება ითქვას, რომ 6G წარმოადგენს მომავლის საკომუნიკაციო პლატფორმას, რომელიც მნიშვნელოვნად შეცვლის ჩვენს ყოველდღიურ ცხოვრებას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. ITU – International Telecommunication Union Reports on IMT-2030 (6G Vision).
2. IEEE Communications Magazine – 6G Wireless Systems Research.
3. Obeidallah Ali, DIGIS 2, Technologies, 6 November, 2025.
4. Qualcomm Research – Future of Wireless Communication. 25.06.2025.
5. Mohammed H. Alsharif, Abu Jahid, Raju Kannadasan, Mun-Kyeom Kim, Unleashing the potential of sixth generation (6G) wireless networks in smart energy grid management: A comprehensive review, Energy Reports, Volume 11, June 2024, Pages 1376-1398.
6. Ericsson Mobility Report 2024.
7. Nokia Bell Labs – 6G White Paper, 2023.
8. Mohammed Banafaa, Ibraheem Shayea, Jafri Din, 6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges, Advantages, and Opportunities. Alexandria Engineering Journal, Volume 64, 1 February 2023, Pages 245-274.

NEXT GENERATION INTELLIGENT NETWORKS – 6G TECHNOLOGY REVIEW

¹Makharadze Salome, ²Mikava Taliko

^{1,2}Georgian Technical University, Faculty of Informatics and Management Systems, Digital Telecommunication Technology's Department, ¹Associate Professor, +995 557 36 11 31, s.makharadze@gtu.ge, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5105-0476>, ²Bachelor, +995 597 15 30 90, mikava.taliko22@gtu.ge,

Abstract

6G is the upcoming sixth-generation mobile network technology, expected to be commercially available by 2030. It offers speeds of up to 1 terabit per second (100 times faster than 5G) and microsecond latency. It will combine artificial intelligence capabilities, 3D coverage via satellites, and high-precision sensors, enabling interactive AR/VR, holographic, and autonomous systems.

The paper discusses 6G mobile communication technology, its development trends, expected characteristics, and future application areas. This paper analyzes the role of 6G in digital transformation, its advantages compared to 5G networks, and the technological challenges associated with its implementation. Special attention is given to artificial intelligence integration, terahertz frequencies, and holographic communication possibilities.

Key words: 6G, mobile communication, artificial intelligence, terahertz, wireless networks.

ქანების ნიმუშების დინამიკური რღვევა და სამთო დარტყმა

ირაკლი გუჯაბიძე¹, გელა მაჩაიძე², ანზორ ტაველიშვილი³

¹საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. პროფესორი; ²საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. პროფესორი; ³საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის დოქტორანტი

ანოტაცია

სამთო საწარმოებში სამთო დარტყმის ფორმირებისა და რეალიზაციის პროცესების შესწავლის მიზნით განხილულია ლაბორატორიულ პირობებში ქანების ნიმუშის ერთდერძა კუმშვის დროს დინამიკური რღვევის პროცესები და ქანის ცალკეული უმცირესი ნაწილაკები „გასროლის“ ეფექტი, როგორც „მიკრო სამთო დარტყმა“. ახსნილია მისი გამოწვევი ენერგეტიკული მექანიზმი. მიღებულია რღვევის ენერგეტიკული განტოლება და შემოთავაზებულია კრიტერიუმი, რომლის დაკმაყოფილების შემთხვევაშიც, ლაბორატორიულ პირობებში, ქანის ნიმუშის ცალკეული ფრაგმენტების გამოსროლას (დინამიკურ რღვევას) ადგილი არ ექნება. ნაჩვენებია, რომ ლაბორატორიული და თეორიული კვლევების შედეგები კარგ თანხვედრაშია, რაც თეორიული კვლევების შედეგების მაღალ საიმედოებაზე მიუთითებს. ნაშრომში მოცემულია რეკომენდაციები მიღებული შედეგების სამთო დარტყმებზე განზოგადოების შესახებ.

საკვანძო სიტყვები: ქანის ნიმუში, დინამიკური რღვევა, სამთო დარტყმა, ერთდერძა კუმშვა.

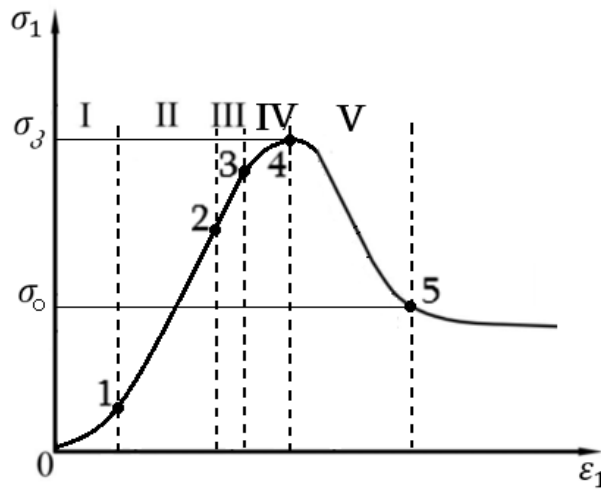
შესავალი

სამთო საწარმოებში სამთო დარტყმების რეალიზაციის პრცესი ძალიან წააგავს ქანების ნიმუშების დინამიკური რღვევის პროცესს ლაბორატორიულ პირობებში. ამ ფაქტზე არაერთმა მეცნიერმა გაამახვილა ყურადღება და გაავლო პარალელები მიმდინარე პროცესებს შორის. ამიტომ, მიზანშეწონილად მიგვაჩნია დეტალურად შევისწავლოთ ქანის ნიმუშის დეფორმირების სრული სურათი ლაბორატორიულ პირობებში და დავადგინოთ დინამიკური პროცესების რეალიზაციის თავისებურებანი; გამომწვევი მიზეზები და შევიმუშაოთ მათი შესაძლო პრევენციის მეთოდოლოგია.

ძირითადი ნაწილი

ქანის ნიმუშის ერთდერძა კუმშვაზე გამოცდის დროს, დატვირთვების ნულიდან სიმტკიცის ზღვრამდე გაზრდის და შემდეგ რღვევის კვალდაკვალ, თანმიმდევრულად იცვლება მისი

დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ხასიათი. მაქსიმალურ მთავარ ძაბვასა (σ_1) და დეფორმაციას (ε_1) შორის დამოკიდებულება $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$ რთულია (ნახ.1.). ქანის ნიმუშის დეფორმირების დიაგრამას ნოლოვანი დატვირთვიდან, მის მაქსიმალურ წინააღდეგობამდე და შემდეგ სრულ რღვევამდე, ქანის რეფორმირების „სრულ დიაგრამას“ უწოდებენ. კლდოვანი ქანებისათვის სრული დიაგრამა შეიძლება დავყოთ ხუთ ძირითად უბნად[1,2]:



ნახ.1.ქანის ნიმუშის დეფორმირების სრული დიაგრამა.

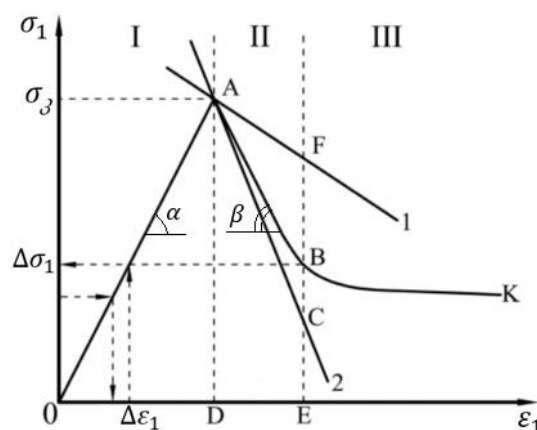
I უბანზე დეფორმაციები არადრეკადია. ძაბვები იზრდებიან არა წრფივად. ნიმუშში ძალის მოქმედების მართობულ მიმართულებაზე, არსებული მიკრო ბზარები და ფორები იხურება. $\sigma_1=f(\varepsilon_1)$ დამოკიდებულების მრუდი ხასიათდება მზარდი კუთხური კოეფიციენტით, დეფორმაციის მოდული და გრძივი დეფორმაციები მზარდია. ნიმუშის მოცულობა იკლებს. წერტილ 1-ის შესაბამისი დატვირთვების დროს ნიმუშში იწყება დრეკადი დეფორმაციები.

II უბანზე დამოკიდებულება $\sigma_1=f(\varepsilon_1)$ წრფივია. რეალიზდება დრეკადი დეფორმაციები. პუასონის კოეფიციენტი (μ) და დრეკადობის მოდული ($E_{\text{დრ}}$) მუდმივი სიდიდეებია. ნიმუშში ვითარდება გრძივი და განივი დეფორმაციები. ნიმუშის მოცულობა იკლებს. მე-2-ე წერტილის შესაბამის დატვირთვას (σ_2) დრეკადობის ზღვარი ეწოდება, რადგან აქ მთავრდება დრეკადობის პროცესი.

III უბანზე დამოკიდებულება $\sigma_1=f(\varepsilon_1)$ რჩება წრფივი. σ_1 პროპორციულია ε_1 -ის. დეფორმაციები არადრეკადია, რის გამოც იზრდება განივი დეფორმაციების კოეფიციენტი. მე-3 წერტილის შესაბამის დატვირთვას (σ_3) პროპორციულობის ზღვარი ეწოდება. დეზინტეგრაციულ ზონებში მოქმედი ლოკალური ძაბვების კონცენტრაციის გამო, ისინი აჭარბებენ ქანის სიმტკიცის ზღვარს და იწყება მცირე ზომის "ქერცლების" ან ნაწილაკების დინამიკური გამოტყორცნა ქანის ნიმუშიდან.

IV უბანზე დამოკიდებულება $\sigma_1=f(\varepsilon_1)$ არაწრფივი ხდება, ფუნქციის ზრდის ტემპი იკლებს. ნიმუშში მიმდინარეობს ბზარწარმოქმნის პროცესის ინიცირება, არსებული მიკრობზარებიდან და დეფექტებიდან. მიკრობზარებიდან. განივი დეფორმაციები იზრდება. ნიმუშის მოცულობა იწყებს ზრდას და უახლოვდება მის საწყის მნიშვნელობას. უბნის ბოლოს ნიმუშის წინააღმდეგობა დატვირთვაზე აღწევს მაქსიმუმს. მე-4-ე წერტილის შესაბამის დატვირთვას σ_4 სიმტკიცის ზღვარი ეწოდება. ამ უბანზე გრძელდება მცირე ზომის "ქერცლების" და ნაწილაკების დინამიკური გამოტყორცნა ქანის ნიმუშიდან.

V უბანზე ვითარდება რღვევის პროცესი. ნიმუშის დეფორმირებასთან ერთად მიმდინარეობს მის მთელ მოცულობაში ბზარების გავრცელება. თანდათან ირღვევა ქანის შინაგანი კავშირები და ნიმუშში ჩნდება ლოკალური რღვევის უბნები. მაგრამ, მათი გაჩენა არ იწვევს მთელი ნიმუშის მზიდუნარიანობის სრულ დაკარგვას, რადგან ნიმუშის ცალკეულ ნაწილებს შორის ჯერ კიდევ მოქმედებს შეჭიდულობის ძალები. ნიმუში ირღვევა $0,01 \div 0,05$ მ-ის ზომების მქონე ნაწილებად. გარკვეულ პირობებში ისინი გამოიტყორცნებიან ნიმუშიდან საშუალოდ $4 \div 10$ მ/წმ სიჩქარით, $2 \div 5$ მ მანძილზე. წერტილ 5-ში ქანი მთლიანად დარღვეულია, რადგან ბზარები კვეთენ ერთმანეთს და გამოდიან ნიმუშის ზედაპირზე. ნიმუში იშლება ცალკეულ ფრაქციებად, მაგრამ მას მაინც გააჩნია გარკვეული წინააღმდეგობის უნარი - σ_0 , მას ნარჩენ სიმტკიცეს უწოდებენ და ძირითადად დაშლილი ქანის ცალკეულ ფრაქციებს შორის ხახუნის ძალებითაა განპირობებული. კლდოვან ქანებში დრეკადი დეფორმაციების (წრფივი) უბანი საკმაოდ დიდია, ამიტომ თეორიულ გაანგარიშებებში, საკითხის გამარტივების მიზნით 0-დან სიმტკიცის ზღვრამდე (წრტილი 5) დატვირთვის I უბანის აპროქსიმაციას ახდენენ წრფივი დამოკიდებულებით. ასევე ახლოსაა წრფივთან ქანის ნიმუშის რღვევის პროცესის ამსახველი V უბანიც. ამიტომ ქანის დეფორმირების სრულ დიაგრამაზე აღნიშნულ უბნსაც წრფივი დამოკიდებულებებით ცვლიან და ნახ.1-ზე ნაჩვენები დიაგრამის ნაცვლად გაანგარიშებებში ნახ.2-ზე ნაჩვენებ დიაგრამას (OA და AB წრფივი უბნებითა და სამი დამახასიათებელი ზონით) ეყრდნობიან. OA უბანზე ძაბვებსა და დეფორმაციებს შორის კავშირს გვიჩვენებს დეფორმაციის მოდული - $E = \tan \alpha$, ხოლო AB უბანზე რღვევის მოდული - $M = \tan \beta$.



ნახ.2. ქანის ნიმუშის დეფორმირების სრული დიაგრამის აპროქსიმაცია.

ლაბორატორიული გამოცდების დროს ქანის ნიმუშის დეფორმირების სრული დიაგრამა ყოველთვის არ მიიღება. ჩვეულებრივ პრესზე გამოცდის დროს, როგორც წესი, დატვირთვის ზღვრულ (σ_3) მნიშვნელობამდე მიღწევის შემდეგ, მის დეფორმირებაზე გავლენას ახდენენ პრესის ფილებში დაგროვილი დრეკადი ენერგია, რომელიც რღვევის პროცესის დაწყებისთანავე გამონთავისუფლდება, მყისიერად გადაეცემა საცდელ ნიმუშს და იწვევს მის სრულ დინამიკურ რღვევას. აღნიშნულის გამო დიაგრამაზე AB (ნახ.2) უბანი ვერ ფიქსირდება, რადგან ქანის ნიმუში ირღვევა სტიქიურად და მისი ფრაქციები გამოიტყორცნება გარკვეულ მანძილზე, რასაც „მიკრო სამთო დარტყმა“ შეიძლება ვუწოდოთ.

ქანის ნიმუშის სრული დიაგრამის მისაღებად საჭიროა გარკვეული პირობების დაკმაყოფილება. ამისათვის განვიხილოთ ქანის ნიმუშის დეფორმირების პროცესი უფრო დეტალურად.

ქანის სიმტკიცის ზღვრის მიღწევა შესაძლებელია ორი გზით: წინასწარ განსაზღვრული დატვირთვის რეჟიმში და წინასწარ განსაზღვრული დეფორმაციის რეჟიმში. პირველ შემთხვევაში, დატვირთვები $\Delta\sigma_1$ ინტერვალებით თანმიმდევრულად შეჰყავთ პრესის მართვის პანელზე და შესაბამისი დეფორმაციის ნამატები $\Delta\varepsilon_1$ ჩაიწერება ავტომატურ რეჟიმში. როდესაც ზღვრული დატვირთვა - σ_3 მიღწეულია, ნიმუშში პირველი სტრუქტურული ბმები იწყებენ დაშლას და სატესტო მანქანაში დაგროვილი პოტენციური ენერგია სწრაფად გამოთავისუფლდება, რაც იწვევს ქანის ნიმუშში დარჩენილი ბმების ზვავის მაგვარ განადგურებას. ამას მივყავართ ნიმუშის მყისიერ რღვევასთან, რის გამოც დიაგრამის AB (ნახ.2) უბანი დაფიქსირებას ვერ ასწრებს. ამ დროს ქანის ნიმუში, ლაბორატორიული გამოცდის, ხშირად ფიქსირდება მისი ცალკეული ფრაგმენტების ნიმუშიდან გამოტყორცნა, რასაც „გასროლის ეფექტს“ უწოდებენ.

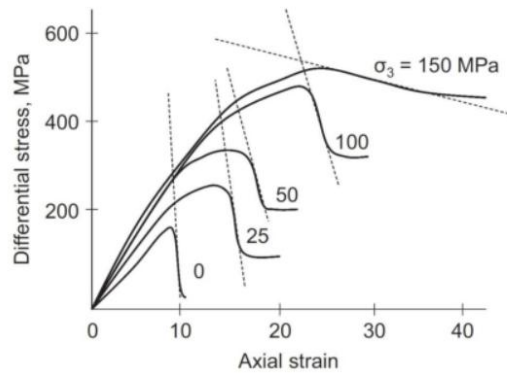
განსხვავებული სურათია ნიმუშის მოცემულ დეფორმაციებზე გამოცდის შემთხვევაში. ამ დროს სატესტო მანქანა ისეა კონსტრუირებული, რომ შესაძლებელია დეფორმაციის ბიჯის - $\Delta\varepsilon_1$ -ის მკაცრად ფიქსირებულად მიწოდება და მათი შესაბამისი დატვირთვების $\Delta\sigma_1$ -ის გაზომვა. ამ შემთხვევაში სატესტო მანქანაში დაგროვილი პოტენციური ენერგიის ნიმუშზე გადაცემა, ნიმუში სიმტკიცის ზღვრის (σ_3) მიღწევის შემდეგ, ხდება უწყვეტად. ნიმუში თანდათან ირღვევა და B (ნახ.2) წერტილში ფხვიერ მასად გადაიქცევა (B წერტილის შემდგომ ის დატვირთვებს წინააღმდეგობას უწევს მხოლოდ ცალკეულ ნაწილებს შორის არსებული ხახუნის ძალებით). ასეთ რეჟიმში მიიღება ე.წ. „დეფორმირების სრული დიაგრამა“. ე.ი. პროცესი დამოკიდებულია პრესისა და ნიმუშის სიხისტეებზე.

დადგენილია, რომ თუ პრესის სიხისტე (უბანი AC, ნახ.2) ნიმუშის სიხისტეზე (უბანი AB) მეტია მისი რღვევის პროცესი მიმდინარეობს კონტროლირებად რეჟიმში, ხოლო თუ პრესის სიხისტე (უბანი AF, ნახ.2) ნიმუშის სიხისტეზე (უბანი AB) ნაკლებია რღვევის პროცესი არაკონტროლირებადია და დიაგრამაზე AB უბანი ვერ ფიქსირდება. რღვევის პროცესი ვითარდება სტიქიურად და ცდა წყდება A წერტილშივე.

ამრიგად, სრული დიაგრამის მისაღებად აუცილებელია გამოსაცდელ ქანზე უფრო ხისტი მახასიათებლების მქონე პრესის გამოყენება.

ქანების მოცულობითი კუმშვის შემთხვევაში „დეფორმირების სრულ დიაგრამას“ აქვს ნახ.3-ზე ნაჩვენები სახე. ზოგიერთი ქანისათვის რღვევის მოდული მოცულობითი კუმშვის დროს იცვლება. მისი ფრაქციები გამოიტყორცნებას ანუ „მიკრო სამთო დარტყმას“ არა აქვს ადგილი. ნახაზიდან ნათლად ჩანს, რომ რღვევის მოდული ქვიშაქვისათვის მინიმალური მთავირი ძაბვის σ_3 - ის ფუნქციაა: $M=f(\sigma_3)$ [3]. ამ შემთხვევაში M-ის მნიშვნელობა σ_3 - ის ზრდის კვალდაკვალ მცირდება. ასეთ შემთხვევებში მისი მნიშვნელობები შესაძლებელია გამოვთვალოთ ემპირიული ფორმულით:

$$M(\sigma_3) = M \cdot \left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_3}\right)^k. (1)$$



ნახ.3. ქვიშაქვების ნიმუშების დეფორმირების სრული დიაგრამა მოცულობითი კუმშვის დროს.

სამთო დარტყმის მექანიზმის თეორიული აღწერისა და მისი პროგნოზირების მეთოდის შემუშავების მიზნით, ლაბორატორიულ პირობებში ქანის ნიმუშის გამოცდის პროცესში, დეტალურად შევისწავლოთ ენერგიის მიმოცვლის საკითხი.

განვიხილოთ ნიმუშის დეფორმირების „სრული დიაგრამა“ (ნახ.2). ქანი სიმტკიცის ზღვრის მიღწევის შემდეგ რღვევის პროცესში, ქანის ნიმუშის რღვევის პროცესზე პასუხისმგებელია პრესის ფილებსა $W_{ფ}$ და თვით ნიმუშში $W_{ქ}$ დაგროვილი დრეკადი ენერგია. როცა ამ ენერგიების ჯამი გადააჭარბებს ნიმუშის სრული დარღვევისათვის საჭირო ენერგიას - $W_{რღ}$ -ს მოხდება ნიმუშის ნატეხების გასროლა („მიკრო სამთო დარტყმა“):

$$W_{ქ} + W_{ფ} > W_{რღ} \quad (2)$$

დავადგინოთ მათი მნიშვნელობები. დრეკადობის უბანზე:

$$\sigma_{დრ} = E \cdot \varepsilon,$$

ამიტომ:

$$W_{ფ} = \int_0^{\varepsilon_{ფ.ზ}} E_{ფ} \varepsilon d\varepsilon = \frac{E_{ფ} \varepsilon_{ფ.ზ}^2}{2} = \frac{(\sigma_{ფ} - \sigma_0)^2}{2E_{ფ}}; \quad W_{ქ} = \int_0^{\varepsilon_{ქ.ზ}} E_{ქ} \varepsilon d\varepsilon = \frac{E_{ქ} \varepsilon_{ქ.ზ}^2}{2} = \frac{(\sigma_{ქ} - \sigma_0)^2}{2E_{ქ}};$$

რღვევის პროცესში:

$$\sigma_{რღ} = \varepsilon_{რღ} M,$$

ხოლო რღვევის ენერგია ტოლია:

$$W_{რღ} = \int_0^{\varepsilon_0} \varepsilon_{რღ} M d\varepsilon_{რღ} = \frac{M \varepsilon_0^2}{2} = \frac{(\sigma_{ქ} - \sigma_0)^2}{2M}; \quad (3)$$

სადაც $\varepsilon_{ფ.ზ}$ და $\varepsilon_{ქ.ზ}$ - პრესის ფილისა და ქანის ნიმუშის ზღვრული დეფორმაციებია შესაბამისად; $E_{ფ}$ და $E_{ქ}$ - პრესის ფილისა და ქანის ნიმუშის დეფორმაციის მოდულებია შესაბამისად; $\varepsilon_{რღ}$ - ნიმუშის რღვევის დეფორმაციაა, ხოლო $\sigma_{რღ}$ - ნაწილობრივად დარღვეული ქანის ნიმუშის მზიდუნარიანობაა რღვევის $\varepsilon_{რღ}$ დეფორმაციის დროს; ε_0 - ნიმუშის ნარჩენი მზიდუნარიანობის - σ_0 -ის შესაბამისი დეფორმაციაა.

მაშინ (2)-დან:

$$\frac{(\sigma_j - \sigma_0)^2}{2E_j} + \frac{(\sigma_j - \sigma_0)^2}{2E_g} > \frac{(\sigma_j - \sigma_0)^2}{2M}. \quad (4)$$

ანუ:

$$\frac{1}{E_j} + \frac{1}{E_g} > \frac{1}{M}. \quad (5)$$

საბოლოოდ მივიღებთ:

$$\frac{M_j(E_g + E_j)}{E_j E_g} > 1. \quad (6)$$

ამრიგად, ქანის ნიმუშის ლაბორატორიულ პირობებში კუმშვაზე გამოცდის დროს, „გასროლის“ ეფექტს („მიკრო სამთო დარტყმას“) ადგილი ექნება, თუ დაკმაყოფილდება პირობა (6). ამ შემთხვევაში სიმტკიცის ზღვრის მიღწევითანავე ქანის ნიმუში უეცრად დაირღვევა და მისი გარკვეული ფრაგმენტები „გაისროლება“. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ქანის რღვევის პროცესი იქნება კონტროლირებადი და მივიღებთ მისი დეფორმირების $(\sigma_1 - \varepsilon_1)$ სრულ დიაგრამას. ამრიგად, პროცესი არ არის დამოკიდებული დატვირთვაზე. ის დამოკიდებულია ქანისა და პრესის ფილების მექანიკურ მახასიათებლებზე (იხ. ფორმულა 6).

აქ უნდა ავღნიშნოთ, რომ ანალოგიური მიდგომა ერთდერძა კუმშვის პირობებისათვის, რღვევის კრიტერიუმის დასადგენად, გამოყენებულია ნაშრომში [4], თუმცა დრეკადი და რღვევის ენერგიების შედარებისას, სრული დრეკადი ენერგია შედარებულია არასრულ რღვევის ენერგიასთან (რღვევის უბანზე (3) -ის ანალოგიური ინტეგრალის აღების დროს ε დეფორმაციის ზღვრულ მნიშვნელობებად აღებული ε_j და ε , რაც ყოვლად დაუშვებელია. გარდა აღნიშნულისა ერთდერძა კუმშვის კრიტერიუმის გამოყენება ქანთა მასივის მოცულობითი დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის რღვევის კრიტერიუმად ასევე დაუშვებელია).

რიგ ნაშრომში მიჩნეულია [5], რომ რღვევას იწვევს მხოლოდ ქანში დაგროვილი დრეკადი ენერგია, ხოლო პრესის ფილებიდან გადმოცემული ენერგია 0-ის ტოლია, მათ მიერ მიღებული შედეგი მთლიანად ემთხვევა ჩვენს მიერ მიღებულ (6) პირობას, როგორც კერძო შემთხვევა, როცა $E_g=0$. ანალოგიური მიდგომები მოცემულია ნაშრომში [6]. ასეთი მიდგომები სამთო დარტყმის მექანიზმის ასახსნელად მიუღებელია, მით უმეტეს, თუ ისინი ქანების ერთდერძა კუმშვის თავისებურებებზეა აგებული.

ანალოგიურ პროცესებს ადგილი აქვს ქანთა მასივებშიც, გვირაბების მშენებლობისა და სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვების პროცესში წარმოქმნილი სიცარიელების გარემოცველ ქანებში გროვდება და გარკვეულ პირობებში, აფეთქების მსგავსად, უეცრად გამოიყოფა პოტენციური ენერგიის დიდი რაოდენობა. მაგრამ ამ შემთხვევაში ადგილი აქვს ქანთა მასივის მოცულობით დაძაბულ მდგომარეობას, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს ამოცანას. ამ მოვლენას სამთო საქმეში სამთო დარტყმას უწოდებენ.

ჩავატარეთ თეორიული ექსპერიმენტი. განვიხილოთ შემდეგი მაგალითი. ვთქვათ ლაბორატორიულ პირობებში უნდა გამოვცადოთ არგელიტის ნიმუში. წნეხისა და არგელიტის ნიმუშის მექანიკური მახასიათებლები მოცემულია ცხრილ 1-ში.

ცხრილი 1.

№	პარამეტრი	აღნიშვნა	მნიშვნელობა,	განზომილება
1.	არგელიტის დეფორმაციის მოდული	E_j	15×10^9	პა
2.	წნეხის ფილების დრეკადობის მოდული	E_g	200×10^9	პა
3.	არგელიტის რღვევის მოდული	M	12×10^9	პა
4.	არგელიტის სიმკვრივე	ρ	2500	კგ/მ³
5.	არგელიტის სიმტკიცე	σ_j	40×10^6	პა

ვნახოთ, როგორია ენერგეტიკული ბალანსი რღვევის პრცესში (ზონა II, ნახ.2). შესაბამისი მონაცემების, პირობა (6)-ში შეტანით მივიღებთ:

$$\frac{M_j(E_g + E_j)}{E_j E_g} = 0,92 < 1. \quad (7)$$

ე.ი. პირობა (6) არ კმაყოფილდება და „მინი სამთო დარტყმას“ ადგილი არ ექნება, ანუ ნიმუშის ფრაგმენტების „გასროლას“ ლაბორატორიაში გამოცდის დროს ადგილი არ ექნება. პროცესი იქნება სტბილური.

ეხლა ავიღოთ უფრო მყიფე არგელიტი, რომლისთვისაც $M=18 \times 10^9$ პა, მაშინ მივიღებთ:

$$\frac{M_j(E_g + E_j)}{E_j E_g} = 1,29 > 1. \quad (8)$$

ე.ი. სრულდება პირობა (6) და ცდის მსვლელობის დროს ადგილი ექნება „მიკრო სამთო დარტყმას“ და ნიმუშის ფრაგმენტების „გასროლას“ ლაბორატორიაში.

ეხლა ვნახოთ, როგორ თანხვედრაშია ჩვენი თეორიული კვლევის შედეგები, ექსპერიმენტით მიღებულ შედეგებთან. ამისათვის ერთმანეთს შევადაროთ დინამიკური რღვევის პრცესის შემდეგი მაჩვენებლები: ფრაგმენტების ზომები, ფრაგმენტების გაფრენის სიჩქარე და ფრაგმენტების ფრენის მანძილი.

ფრაგმენტების ზომები. გამოტყორცნილი ფრაგმენტების ზომები მერყეობენ $0,01 \div 0,05$ მ-ის ფარგლებში.

ფრაგმენტების გაფრენის სიჩქარე. სიჩქარე გამოითვლება დეფორმირებით დაგროვილი ენერგიის მიხედვით და შეიძლება ვიანგარიშოთ ფორმულით:

$$\vartheta = \sigma_j \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot E_j}} = 40 \times 10^6 \cdot \sqrt{\frac{1}{2500 \cdot 15 \times 10^9}} = 6,5 \text{ მ/წმ.}$$

ფრაგმენტების ფრენის მანძილი. ჩავთვალოთ, რომ ნიმუში პრესში დევს $h=1\text{მ}$ სიმაღლეზე და “გმოსროლა” ხდება ჰორიზონტალურად. მაშინ, ფრაგმენტის ვარდნის დრო ტოლი იქნება:

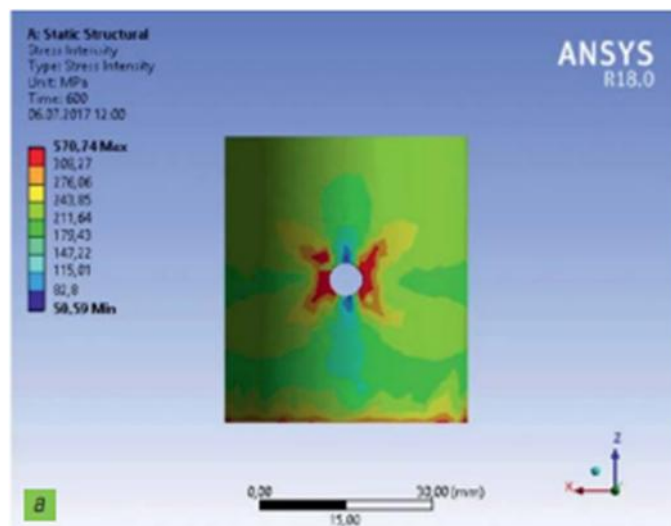
$$T = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{9,8}} = 0,45 \text{ წმ.}$$

ფრენის მანძილი იქნება: $L = \vartheta \cdot t = 0,65 \cdot 0,45 = 2,9 \text{ მ.}$

ვნახოთ, რა გავლენას ახდენენ ნიმუშის რღვევის პროცესზე მისი აგებულების არარეთგვაროვნება. ამ შემთხვევაში მთავარი ფაქტორებია:

1. ფორმების ეფექტი: მარცვლებს შორის არსებული ფორები მოქმედებენ, როგორც "ძაბვების კონცენტრატორები".
2. ზედაპირული ეფექტი: ნიმუშის კიდეებზე ქანი ნაკლებად არის შეზღუდული (არა აქვს გვერდითი დატვირთვა), ამიტომ დეფორმაციით დაგროვილი ენერგია ყველაზე ადვილად აქ თავისუფლდება.
3. მარცვლების ორიენტაცია: ზოგიერთი მარცვალი შეიძლება იყოს ისეთი კუთხოვანი, რომ მასზე მოქმედი ძხები ძაბვები მაქსიმალური აღმოჩნდეს.

თეორიული კვლევა გვიჩვენებს, რომ საშუალოდ ნმმ-მდე დიამეტრის [7] მქონე დეზინტეგრაციული ზონების ირგვლივ ძაბვათა კონცენტრაციის კოეფიციენტის - k -ს მნიშვნელობა საშუალოდ $2 \div 5$ -ის ტოლია, ხოლო ნიმუშზე მოსული დატვირთვა $0,5 \div 0,8 \sigma_j$ -ს შეადგენს (ნახ.4). შესაბამისად, ამ ზონებში აქერცლილი ნაწილაკების “გასროლის” ეფექტს შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს მაშინაც კი, როცა $k=2$ და ნიმუშის დატვირთვა $0,5 \sigma_j$ – ს შეადგენს.



ნახ.4. ქანის ნიმუშში მკუმშავი ძაბვების კონცენტრაციის ზონა [7].

ამრიგად, ნიმუშის $0,5\sigma_3$ დატვირთვის დროს 6 მმ-მდე დიამეტრის მქონე დეზინტეგრაციულ (შესუსტებულ) ზონაში ენერგეტიკული ბალანსი ისეთივეა, როგორც მთელი ნიმუშისა სიმტკიცის ზღვარზე. თუ პირველ შემთხვევაში ადგილი ექნება $2\div 6$ მმ-იანი (საშუალოდ 4მმ) დიამეტრის მქონე ფრაგმენტების “გასროლას” და თუ ნიმუშის ზომა 60მმ-ია, მაშინ შეგვიძლია დავადგინოთ, რამდენჯერ ნაკლები დიამეტრი ექნება მეორე შემთხვევაში (II უბანზე იხ.ნახ.2.) გამოტყორცნილი ნაწილაკებს:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\gamma \cdot V_1}{\gamma \cdot V_2} = \frac{R_1^3}{R_2^3} = \frac{30^3}{2^3} = 3375.$$

სადაც P_1 და P_2 - გამოსროლილი ნაწილაკების წონებია პირველ და მეორე შემთხვევაში;

V_1 და V_2 - აღნიშნული ნაწილაკების მოცულობებია შესაბამისად;

γ - ქანის მოცულობითი წონაა და ორთავე შემთხვევაში ერთნაირია;

R_1 და R_2 - გამოსროლილი ნაწილაკების (ბურთულაკების) რადიუსებია პირველ და მეორე შემთხვევაში.

ე.ი. მეორე შემთხვევაში ნაწილაკის ზომა 3375-ჯერ ნაკლები, ანუ $R=0,02\text{მ}/3375=5,9\text{მკმ}$ -ია.

ლაბორატორიული და თეორიული კვლევებით მიღებული ქანის ნიმუშის რღვევის ძირითადი მახასიათებლები მოცემულია ცხრილში 2-ში.

ცხრილი.2

დატვირთვები ნიმუშიდან აქერცვლისა და მოწყვეტის დასაწყისში (უბანი III და IV, ნახ.3).	აქერცლილი და ნიმუშიდან მოწყვეტილი მინერალური ნაწილაკების ზომები (უბანი III და IV, ნახ.3), მკ.მ.	ნიმუშიდან „გასროლილ“ ნიმუშის ნატეხების ზომები (უბანი V), მ.	ნიმუშიდან „გასროლილი“ ნიმუშის ნატეხების სიჩქარე (უბანი V), მ/წმ.	ნიმუშის ნატეხების „გასროლის“ მანძილი (უბანი V), მ.
ლაბორატორიული ცდების შედეგად მიღებული შედეგები (იხ.თავი 1.1.2)				
$0,5\div 0,8 \sigma_3$	$0,5\div 5,0$	$0,01\div 0,05$	$4\div 10$	$2\div 5$
თეორიული კვლევის შედეგად მიღებული შედეგები				
$0,5\div 0,8 \sigma_3$	5,9	0,03	6,5	2,9

ლაბორატორიული და თეორიული კვლევების შედეგების შედარებით, დავრწმუნდებით ამ უკანასკნელის მაღალ საიმედოობაში.

სამთო საწარმოებში (შახტებში და მადაროებში) სამთო დარტყმების ანალოგიური თეორიული კვლევის ჩსატარებლად, აუცილებელია რღვევის პროცესის ჩაწერა ქანთა მასივის მოცულობითი დაძაბული მდგომარეობის საფუძველზე, ხოლო მასში შემავალი რღვევის მოდულის მნიშვნელობის დასადგენად გამოვიყენოთ გამოსახულება (2).

დასკვნები

ერთდერმა კუმშვაზე ქანების ნიმუშების ლაბორატორიული კვლევების საფუძველზე დადგენილია მათი დინამიკური რღვევის ენერგეტიკული ბალანსის პირობა და მიღებულია სამთო დარტყმის კრიტერიუმი ერთდერმა კუმშვის დროს.

დადგენილია პრესის ფილების მექანიკური მახასიათებლები, რომლებიც გამორიცხავენ პროცესების დინამიკურად განვითარებას ექსპერიმენტის დროს და ნიმუშის დეფორმირების სრული დიაგრამის მიღებას. შემუშავებულია რეკომენდაციები გამოსაცდელი ხელსაწყოთა სწორი პროექტირებისათვის.

შესწავლილი ექსპერიმენტული კვლევების შედეგები და ჩვენს მიერ შემუშავებული თეორიული კვლევის შედეგები კარგ თანხვედრაშია, რაც ამ უკანსკნელის მაღალ საიმედოობაზე მეტყველებს.

შემუშავებულია რეკომენდაციები სამთო საწარმოებში (შახტებში და მაღაროებში) სამთო დარტყმების პროგნოზირების თეორიული ენერგეტიკული მოდელის შექმნისა და მისი პრევენციის ღონისძიებების შემუშავებისათვის.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. И.К.Гуджабидзе. Вопросы механики подземных сооружений неглубокого залегания. Тбилисский университет, 1991 г. 186с.
2. ზ.გუდავაძე. ქანების ფიზიკა. სტუ „საგამომცემლო სახლი“. 2025. 312გვ.
3. Tarasov, B. G. Superbrittleness of rocks and earthquake activity /B. G. Tarasov, M. F. Randolph // International Journal of Rock Mechanics & Mining Science. – 2011. – Vol. 48. – Iss. 6. – Pp. 888–898.
4. Гоголин.В.А. Деформационные и прочностные характеристики горных пород при сжатий. ВестникКГТУ, 2016. №3. стр.3-8.
5. ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ РАЗРУШЕНИЙ В МАССИВАХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД Э.В. Каспарьян1, Н.Н. Кузнецов1, А.Н. Шоков, А.К. Пак. Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия, ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /2020; (4):69-84. <https://giab-online.ru/files/Data/2020/4/69-84.pdf>.
6. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. Mahdi Askaripour, Ali Saeidi, Alain Rouleau, Patrick Mercier-Langevin. Underground Space. Volume 7, Issue 4, August 2022, Pages 577-607. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2467967422000022>.
7. С. Д. ВИКТОРОВ и др. Комплексное моделирование зон концентраций напряжений для оценки состояния геоматериаллов. https://rudmet.net/media/articles/Article_MJ_11_17_pp.41-45_2.pdf.

Dynamic Fracture of Rock Samples and Rock Burst

Georgian Technical University. Professors: Irakli Gujabidze, Gela Machaidze, PhD candidate Anzor Tavelishvili.

Abstract

To study the formation and occurrence of rock bursts in mining enterprises, the dynamic fracture of rock samples under uniaxial compression in laboratory conditions is examined, along with the “ejection” of the smallest rock particles, considered a “micro rock burst.” The energy mechanism underlying this phenomenon is explained. An energy equation for fracture is derived, and a criterion is proposed such that, under laboratory conditions, the ejection (dynamic fracture) of individual rock sample fragments will not occur if the criterion is satisfied. The laboratory and theoretical studies show good agreement, indicating the high reliability of the theoretical results. The paper also provides recommendations for generalizing the obtained results to actual rock bursts in mining practice.

Keywords: rock sample, dynamic fracture, rock burst, uniaxial compression.

ენდოცერვიქსის ატიპური ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიების იმუნოჰისტოქიმიური მახასიათებლები და დიაგნოსტიკური თავისებურებები

ანა ფანცხავა¹; ნიკოლოზ კინტრაია²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; გინეკოლოგი;

²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მეანობა-გინეკოლოგიის კათედრის
პროფესორი; ³თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;
პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი; ⁴თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის
ასოცირებული პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი;
თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი

ენდოცერვიქსის ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიები წარმოადგენს საშვილოსნოს ყელის პათოლოგიის დიაგნოსტიკურად კომპლექსურ სპექტრს, რომელიც მოიცავს როგორც კეთილთვისებიან რეაქტიულ ცვლილებებს ასევე სიმსივნისწინარე ჯირკვლოვან ნეოპლაზიებს. რეაქტიულ ატიპიასა და ადენოკარცინომა in situ (AIS) შორის მორფოლოგიური მახასიათებლების გადაფარვამ შეიძლება გაართულოს რუტინული ჰისტოპათოლოგიური ინტერპრეტაცია, განსაკუთრებით ბიოფსიური მასალის შეზღუდულობისა და ენდოცერვიკალური კიურეტაჟის სპეციფიკიდან გამომდინარე. იმუნოჰისტოქიმიური კვლევის ტექნოლოგია წარმოადგენს მნიშვნელოვან დამატებით დიაგნოსტიკურ ინსტრუმენტს ატიპიური ჯირკვლოვანი დაზიანებების შეფასებისას.

ჩვენი კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ატიპიური ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანებების იმუნოჰისტოქიმიური მახასიათებლების შეფასება და p16, p53 და Ki67-ის დიაგნოსტიკური სარგებლიანობის განსაზღვრა კეთილთვისებიანი/რეაქტიული ჯირკვლოვანი დაზიანებების პრეკანცერული ჯირკვლოვანი დაზიანებებისგან განასხვავებლად.

რეტროსპექტული კვლევა მოიცავდა საარქივო მასალიდან მიღებულ 63 ფორმალინით ფიქსირებულ პარაფინში ჩაყალიბებულ (FFPE) ენდოცერვიქსის ჯირკვლოვანი დაზიანებების შემთხვევებს. საკვლევი კოჰორტა დაიყო კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებად (n=38) და სიმსივნისწინარე/ატიპიურ ჯირკვლოვან დაზიანებებად (n=25).

p16, p53 და Ki67-ის იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზი ჩატარდა სტანდარტიზებული პროტოკოლების გამოყენებით. შეფასდა შედეგების ნიმუშები და პროლიფერაციული აქტივობა და კორელაცია მოხდა ჰისტოპათოლოგიურ მონაცემებთან. სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა ქი-კვადრატის, ფიშერ ექსაქსის და მენ-უიტნის U ტესტების გამოყენებით.

კეთილთვისებიანი/რეაქტიული დაზიანებები უპირატესად ავლენდა p16 შედეგების ლაქოვან ან უარყოფით ნიმუშებს, ბუნებრივი ტიპის p53 ექსპრესიას და დაბალ პროლიფერაციულ აქტივობას, Ki67 ინდექსებით 5%-დან 6%-მდე. ამის საპირისპიროდ, ყველა სიმსივნისწინარე დაზიანება ავლენდა დიფუზურ ბლოკ-ტიპის p16 დადებითობას და p53 ჭარბ ექსპრესიას. Ki67 პროლიფერაციული აქტივობა მნიშვნელოვნად გაიზარდა სიმსივნისწინარე დაზიანებებში, 12%-დან 20%-მდე ($p < 0.001$). პაციენტის საშუალო ასაკი უფრო მაღალი იყო სიმსივნისწინარე დაზიანებებში კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებთან შედარებით. HPV დადებითობა უფრო ხშირად ასოცირდებოდა წინამორბედ დაზიანებებთან. p16, p53 და Ki67-ის კომბინირებული შეფასება ავლენდა მკაფიო იმუნოფენოტიპურ გამიჯვნას კეთილთვისებიან/რეაქტიულ და წინამორბედ ჯირკვლოვან დაზიანებებს შორის.

საკვანძო სიტყვები: ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანებები; p16; p53; Ki67; იმუნოჰისტოქიმიკა; საშვილოსნოს ყელის ჯირკვლოვანი ნეოპლაზია; ატიპიური ჯირკვლოვანი დაზიანებები; HPV;

შესავალი

ენდოცერვიქსის ჯირკვლოვანი დაზიანებები წარმოადგენს საშვილოსნოს ყელის პათოლოგიების დიაგნოსტიკურად რთულ და ბიოლოგიურად ჰეტეროგენულ ჯგუფს, რომელიც მოიცავს დაზიანებებს კეთილთვისებიან რეაქტიულ ცვლილებებიდან ინვაზიურ ადენოკარცინომამდე.¹⁻⁵ საშვილოსნოს ყელის ბრტყელუჯრედოვანი ინტრაეპითელური დაზიანებებისგან განსხვავებით, ჯირკვლოვანი დაზიანებები შედარებით ნაკლებად ხშირია, ხშირად არასაკმარისად არის დიაგნოსტიკური და ამავდროულად ავლენს მნიშვნელოვან მორფოლოგიური მახასიათებლების გადაფარვას რეაქტიულ და ნეოპლაზიურ მდგომარეობებს შორის.⁶ ეს დიაგნოსტიკური სირთულე თანამედროვე გინეკოლოგიური პათოლოგიის ერთ-ერთ მთავარ პრობლემად რჩება, განსაკუთრებით მცირე ზომის ბიოფსიურ მასალასა და ენდოცერვიკალური კიურეტაჟის ნიმუშებში, სადაც ქსოვილის შეზღუდულმა ორიენტაციამ და ფრაგმენტაციამ შეიძლება შეზღუდოს არქიტექტურული და ციტოლოგიური დეტალები.⁷

ბოლო ათწლეულების განმავლობაში, საშვილოსნოს ყელის ადენოკარცინომის შემთხვევები გაიზარდა ბრტყელუჯრედოვან კარცინომასთან შედარებით.^{6,8} მიუხედავად იმისა, რომ საშვილოსნოს ყელის კიბოს სკრინინგის პროგრამებმა

მნიშვნელოვნად შეამცირა ბრტყელუჯრედოვანი დაზიანებების შემთხვევები, ჯირკვლოვანი ნეოპლაზია კვლავ წარმოადგენს მნიშვნელოვან კლინიკურ სირთულეს ციტოლოგიური გამოვლენის შეზღუდვების, ენდოცერვიკალური ლოკალიზაციის უფრო ცვალებადი წინამორბედი მორფოლოგიის გამო.⁵ ადენოკარცინომა in situ (AIS) ამჟამად HPV-ასოცირებული ენდოცერვიკალური ადენოკარცინომის მთავარ წინამორბედ დაზიანებად ითვლება, თუმცა AIS-სა და კეთილთვისებიან ჯირკვლოვან მიმიკერებს შორის განსხვავება რუტინულ დიაგნოსტიკურ პრაქტიკაში პრობლემურ საკითხად რჩება.^{5,7,9}

ენდოცერვიქსის რეაქტიულმა და კეთილთვისებიანმა ჯირკვლოვანმა ცვლილებებმა შეიძლება აჩვენოს უჯრედების ბირთვების გადიდება, ფსევდოსტრატიფიკაცია, ჰიპერქრომაზია, მიტოზური აქტივობა და არქიტექტურული დარღვევები. ასეთი ცვლილებები შეიძლება მოხდეს ქრონიკულ ანთებასთან, ჰორმონალურ ცვლილებებთან, ქსოვილების აღდგენასთან, წინა ინსტრუმენტულ ჩარევებთან ან მეტაპლაზიურ პროცესებთან ასოცირებულად.¹⁰ მიკროგლანდულური ჰიპერპლაზია, ტუბოენდომეტრიოიდული მეტაპლაზია, მიკროკლასტერები და რეაქტიული ატიპია განსაკუთრებით მნიშვნელოვან დიფერენციალურ დიაგნოსტიკურ ნოზოლოგიურ ერთეულებს წარმოადგენს. ფრაგმენტირებულ კიურეტაჟის ნიმუშებში, ამ დაზიანებებმა შეიძლება შექმნას მნიშვნელოვანი ინტერპრეტაციული სირთულეები, რამაც პოტენციურად შეიძლება გამოიწვიოს ნეოპლაზიის ჰიპერდიაგნოსტიკა ან ნამდვილი წინამორბედი დაზიანებების არასაკმარისი გამოვლენა.

ადამიანის პაპილომავირუსი (HPV), განსაკუთრებით მაღალი რისკის HPV გენოტიპები, ცენტრალურ როლს ასრულებს ენდოცერვიკალური ადენოკარცინომის და მათი წინამორბედი დაზიანებების უმრავლესობის პათოგენეზში.^{11,12} ვირუსული ონკოგენების მასპინძელ უჯრედულ გზებში ინტეგრაცია ხელს უწყობს უჯრედული ციკლის კონტროლის დისრეგულაციას p53-სა და რეტინობლასტომასთან ასოცირებულ ცილებთან ურთიერთქმედების გზით. ეს მოლეკულური ცვლილებები ხელს უწყობს უკონტროლო პროლიფერაციას, გენომურ არასტაბილურობას და პროგრესირებად ნეოპლაზიურ ტრანსფორმაციას.^{13,14} დიფუზური ბლოკ-ტიპის p16 ექსპრესია ფართოდ არის აღიარებული, როგორც მაღალი რისკის მქონე HPV-ასოცირებული ნეოპლაზიის სუროგატული მარკერი და საშვილოსნოს ყელის პათოლოგიის თანამედროვე დიაგნოსტიკური ალგორითმების აუცილებელ კომპონენტს წარმოადგენს.

კვლევის მასალა და მეთოდები

კვლევა წარმოადგენს რეტროსპექტულ-დაკვირვებით კოჰორტულ კვლევას, რომელიც ჩატარდა ფორმალინით ფიქსირებულ, პარაფინში ჩაყალიბებულ (FFPE) ქსოვილის ნიმუშების გამოყენებით, რომლებიც მიღებული იყო თბილისის სახელმწიფო

სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიის დეპარტამენტის საარქივო არაფერსონიფიცირებული მასალებიდან.

კვლევაში ჩართული იყო სულ 63 შემთხვევა. შემთხვევები ჰისტოპათოლოგიური დიაგნოზის მიხედვით დაიყო ორ ძირითად საკვლევ ჯგუფად.

პირველი საკვლევი ჯგუფი (ჯგუფი A) შედგებოდა კეთილთვისებიანი/რეაქტიული ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანებებისგან და მოიცავდა რეაქტიულ ატიპიას, ანთებით/რეაქტიულ ჯირკვლოვან ცვლილებებს, კეთილთვისებიან ენდოცერვიკალურ ჯირკვლებს და მათთან დაკავშირებულ არასიმსივნურ ჯირკვლოვან პროლიფერაციებს.

მეორე ჯგუფი (ჯგუფი B) მოიცავდა სიმსივნის წინამორბედ/ატიპიურ ჯირკვლოვან დაზიანებებს, რომლებიც წარმოდგენილი იყო ადენოკარცინომა in situ (AIS) და სხვა ატიპიური ჯირკვლოვანი პროლიფერაციებით, რომლებიც ავლენდნენ ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიაზე საეჭვო მორფოლოგიურ მახასიათებლებს.

კვლევიდან გამოირიცხა ქსოვილის არასაკმარისი ფიქსაციის, მძიმე კაუტერიზაციის არტეფაქტის, ფართო ნეკროზის ან არადეკვატური ქსოვილის შემთხვევები. იმუნოჰისტოქიმიური შეფასებისთვის შეირჩა წარმომადგენლობითი პარაფინის ბლოკები დაზიანების ქსოვილის ყველაზე მაღალი შემცველობით.

კლინიკური ინფორმაცია მოპოვებული იქნა დაწესებულების პათოლოგიის არქივიდან და ელექტრონული სამედიცინო ჩანაწერებიდან. თითოეული შემთხვევისთვის დაფიქსირდა შემდეგი პარამეტრები: პაციენტის ასაკი, ნიმუშის ტიპი, HPV სტატუსი, დაკვირვების ხანგრძლივობა, რეციდივის სტატუსი და ჰისტოპათოლოგიური დიაგნოზი.

ნიმუშების ტიპები მოიცავდა ენდოცერვიკალურ კიურეტაჟს (ECC), საშვილოსნოს ყელის ბიოფსიას და კონიზაციური ამოკვეთის ნიმუშებს. HPV სტატუსი კატეგორიზებული იყო როგორც დადებითი, უარყოფითი ან უცნობი, არსებული კლინიკური ჩანაწერების მიხედვით.

ჰისტოპათოლოგიური შეფასება მოიცავდა ჯირკვლოვანი არქიტექტურის, ციტოლოგიური ატიპიის, ბირთვის გადიდების, ბირთვის სტრუქტურული ცვლილების, აქტივობის, აპოპტოზური სხეულების და სტრომული რეაქციის შეფასებას. შემთხვევები შემდგომში დაიყო კეთილთვისებიან/რეაქტიულ ან წინამორბედ დაზიანების ჯგუფებად მორფოლოგიური და იმუნოფენოტიპური მონაცემების კომბინაციის საფუძველზე (ცხრილი 1).

პარამეტრი	კეთილთვისებიანი/რეაქტიული დაზიანებები (n=38)	პრეკურსორული დაზიანებები (n=25)	p- მნიშვნელობა
საშუალო ასაკი (წლები)	28.4 ± 1.8	40.4 ± 3.1	<0.001
ნიმუშის ტიპი – ECC	18 (47.4%)	0 (0%)	<0.001
ნიმუშის ტიპი – ბიოფსია	20 (52.6%)	0 (0%)	<0.001
ნიმუშის ტიპი – კონიზაცია	0 (0%)	25 (100%)	<0.001
HPV დადებითი	0 (0%)	8 (32.0%)	0.001
HPV უარყოფითი	20 (52.6%)	17 (68.0%)	0.214
HPV უცნობი	18 (47.4%)	0 (0%)	<0.001
p16 პოზიტიურობა	0 (0%)	25 (100%)	<0.001
p16 ლაქოვანი ექსპრესია	26 (68.4%)	0 (0%)	<0.001
p16 უარყოფითი ექსპრესია	12 (31.6%)	0 (0%)	<0.001
p53 wild-type ტიპი	38 (100%)	0 (0%)	<0.001
p53 overexpression	0 (0%)	25 (100%)	<0.001
Ki67 საშუალო ინდექსი (%)	5.3 ± 0.5	17.2 ± 3.3	<0.001
დაკვირვების ხანგრძლივობა (თვე)	23.3 ± 1.0	27.8 ± 2.0	<0.001

ცხრილი 7. კეთილთვისებიანი/რეაქტიული და პრეკურსორული ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანებების კლინიკურ-პათოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური მახასიათებლები.

იმუნოჰისტოქიმიური კვლევა ჩატარდა FFPE ქსოვილის ანატომიის გამოყენებით სტანდარტიზებული ლაბორატორიული პროტოკოლების შესაბამისად. იმუნოჰისტოქიმიური შედეგები ჩატარდა ავტომატიზირებული შედეგების პლატფორმის გამოყენებით ხელმისაწვდომი პირველადი ანტისხეულებით. შეფასდა შემდეგი ანტისხეულები: p16, p53, Ki67.

შესაბამისი დადებითი და უარყოფითი კონტროლი ჩართული იყო თითოეულ შედეგის ეტაპში.

იმუნოჰისტოქიმიური კვლევის შედეგების ინტერპრეტაცია ჩატარდა წარმომადგენლობითი დაზიანების უბნების შეფასებით.

p16 ექსპრესია კატეგორიზებული იყო შედეგების განაწილებისა და ინტენსივობის მიხედვით. დიფუზური ძლიერი უწყვეტი ბირთვული და ციტოპლაზმური შედეგები, რომელიც მოიცავდა დაზიანების ჯირკვლების უმეტესობას, განიმარტა, როგორც ბლოკური ტიპის დადებითობა. ფოკალური, წყვეტილი ან სუსტი შედეგები კატეგორიზებული იყო, როგორც ლაქოვანი ექსპრესია. შედეგების სრული არარსებობა განიმარტა, როგორც უარყოფითი ექსპრესია.

p16 ექსპრესიის ტიპი	კეთილთვისებიანი/რეაქტიული დაზიანებები (n=38)	პრეკურსორული დაზიანებები (n=25)	სულ	p-მნიშვნელობა
ბლოკური პოზიტიურობა	0 (0%)	25 (100%)	25	<0.001
ლაქოვანი ექსპრესია	26 (68.4%)	0 (0%)	26	<0.001
უარყოფითი ექსპრესია	12 (31.6%)	0 (0%)	12	<0.001

ცხრილი 8. p16 ექსპრესიის განაწილება კვლევის ჯგუფებში;

p53 იმუნოფენოტიპი კლასიფიცირებული იყო, როგორც ველური/ბუნებრივი ტიპის ან ჰიპერექსპრესიის ნიმუში. Ki67 პროლიფერაციული აქტივობა შეფასდა, როგორც დადებითად შეღებილი დაზიანების ბირთვების პროცენტული მაჩვენებელი წარმომადგენლობით მაღალი პროლიფერაციის არეალებში. თითოეულ შემთხვევაში შეფასდა მინიმუმ რამდენიმე წარმომადგენლობითი დაზიანების ველი და დაფიქსირდა დადებითი ბირთვების სავარაუდო პროცენტული მაჩვენებელი.

სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა SPSS სტატისტიკური პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით. უწყვეტი ცვლადები გამოიხატა, როგორც საშუალო $\pm$ სტანდარტული გადახრა, ხოლო კატეგორიული ცვლადები წარმოდგენილი იყო სიხშირეების და პროცენტული მაჩვენებლების სახით. კეთილთვისებიანი/რეაქტიული და წინამორბედი დაზიანების ჯგუფებს შორის შედარება ჩატარდა მან-უიტნის U ტესტის გამოყენებით უწყვეტი ცვლადებისთვის და ქი-კვადრატის ან ფიშერის ზუსტი ტესტების გამოყენებით კატეგორიული ცვლადებისთვის. სტატისტიკურად მნიშვნელოვნად ჩაითვა 0.05-ზე ნაკლები p-მნიშვნელობა.

კვლევა ჩატარდა ჰელსინკის დეკლარაციის პრინციპებისა და ინსტიტუციური ეთიკური სტანდარტების შესაბამისად. კვლევაში გამოყენებული იყო რუტინული დიაგნოსტიკური პრაქტიკის დროს მოპოვებული რეტროსპექტული არქივის FFPE მასალა. პაციენტის საიდენტიფიკაციო ინფორმაცია ანალიზის დაწყებამდე ანონიმიზებული იყო.

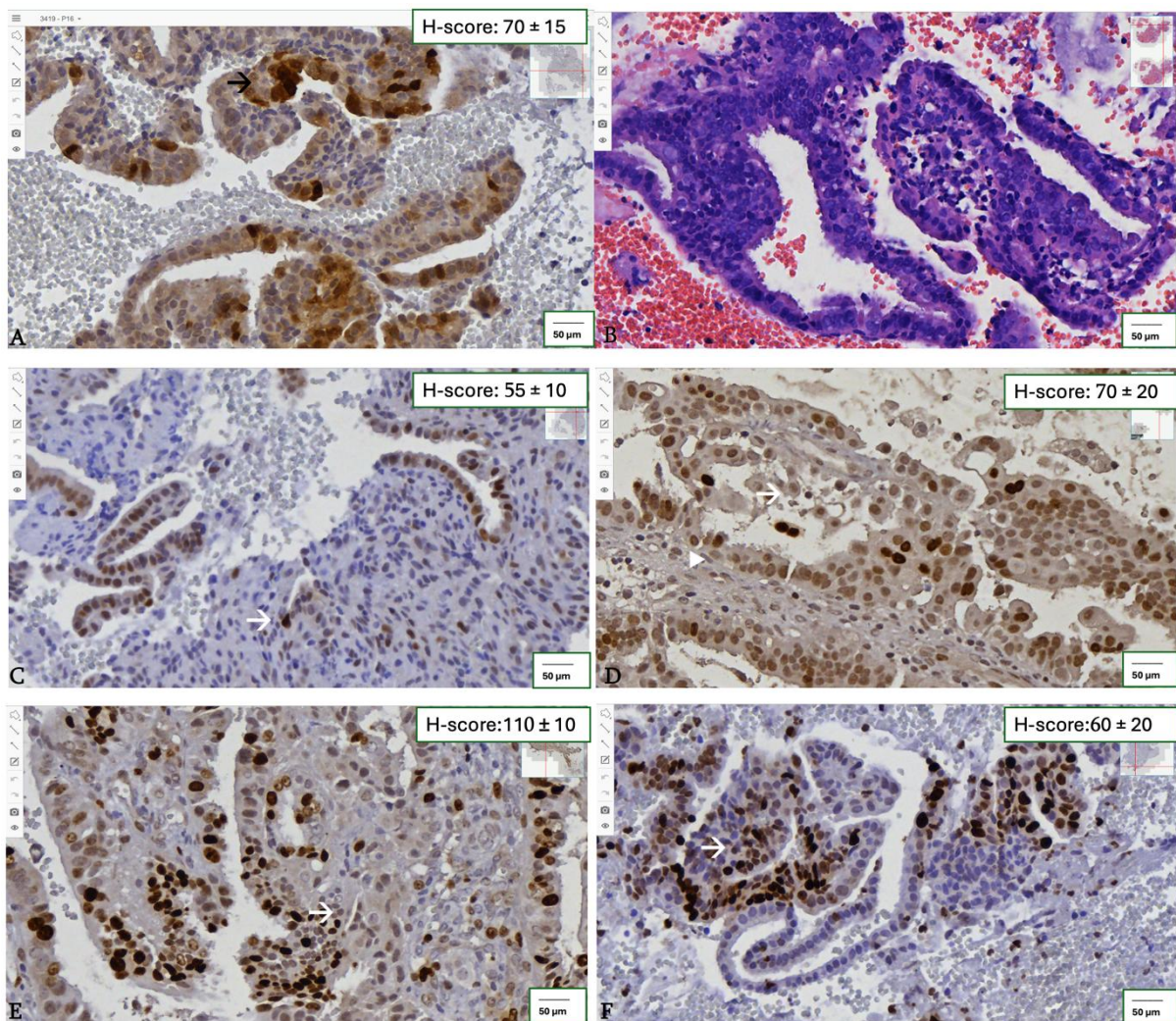
კვლევის შედეგები

კვლევაში სულ ჩართული იყო 63 ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანების შემთხვევა. აქედან 38 შემთხვევა (60.3%) კლასიფიცირებული იყო, როგორც კეთილთვისებიანი/რეაქტიული ჯირკვლოვანი დაზიანება (ჯგუფი A), ხოლო 25 შემთხვევა (39.7%) წარმოადგენდა წინამორბედ/ატიპიურ ჯირკვლოვან დაზიანებებს (ჯგუფი B). კვლევის კოჰორტაში ძირითადად შედარებით ახალგაზრდა და საშუალო ასაკის ქალები იყვნენ, პაციენტების ასაკი 26-დან 45 წლამდე მერყეობდა.

კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებს შორის, ნიმუშების უმეტესობა მიღებული იყო ენდოცერვიკალური კიურეტაჟით (ECC) ან საშვილოსნოს ყელის ბიოფსიით. ამის საპირისპიროდ, სიმსივნის წინამორბედი დაზიანებები უპირატესად წარმოდგენილი იყო კონიზაციური ამოკვეთის ნიმუშებით. კეთილთვისებიანი/რეაქტიული დაზიანებების

მქონე პაციენტების საშუალო ასაკი უფრო დაბალი იყო სიმსივნის წინამორბედ დაზიანებებთან შედარებით. რეაქტიული დაზიანებები ყველაზე ხშირად გამოვლინდა 26-30 წლის ასაკის პაციენტებში, ხოლო წინამორბედი დაზიანებების კონცენტრაცია 38-45 წლის ასაკობრივ დიაპაზონში იყო.

HPV სტატუსმა მნიშვნელოვანი განსხვავებები აჩვენა კვლევის ჯგუფებს შორის. კეთილთვისებიანი/რეაქტიული დაზიანებები უპირატესად HPV-უარყოფითი ან HPV-უცნობი იყო, ხოლო წინამორბედი დაზიანებები HPV-დადებითობის უფრო მაღალი სიხშირით ხასიათდებოდა. HPV-დადებითი სტატუსი ძირითადად წინამორბედ დაზიანებებში დაფიქსირდა, რომლებიც დიფუზურ p16 ზედმეტ ექსპრესიას ავლენდნენ, რაც ადასტურებს HPV-ით გამოწვეულ მოლეკულურ ცვლილებებსა და ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიური პროგრესირების კავშირს.



სურათი 5. კეთილთვისებიანი/რეაქტიული და სიმსივნის წინამორბედი ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანებების წარმომადგენლობითი ჰისტოპათოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური კვლევის შედეგები (ორიგინალი გადიდება $\times 400$). (A) მოზაიკური ტიპის p16 პოზიტიურობა წინამორბედ ჯირკვლოვან დაზიანებაში (ჯგუფი B). (B) სიმსივნის წინამორბედი ჯირკვლოვანი დაზიანების პემატოქსილინ-ეოზინით შეღებილი ანათალი

(ჯგუფი B), რომელიც აჩვენებს ბირთვულ სტრატეგიკაციას, ჰიპერქრომაზიას და ჯირკვლოვან ატიპიას. (C) p53 ის ბუნებრივი ტიპის პოზიტიურობა (ჯგუფი A). (D) p53 ჭარბი ექსპრესიის ნიმუში (ჯგუფი B). (E) Ki67 პროლიფერაციული ინდექსის მომატება წინამორბედ ჯირკვლოვან დაზიანებაში (ჯგუფი A). (F) Ki67-ის ფოკალური მაღალი პროლიფერაციული აქტივობა კეთილთვისებიანი/რეაქტიული ჯირკვლოვანი დაზიანების შემთხვევაში (ჯგუფი A).

იმუნოჰისტოქიმიურმა ანალიზმა გამოავლინა მნიშვნელოვანი განსხვავებები p16 ექსპრესიის ნიმუშებში კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებსა და წინამორბედ დაზიანებებს შორის. კეთილთვისებიანი/რეაქტიული დაზიანებები უპირატესად ავლენდა p16 შედეგის ლაქოვან ან უარყოფით ნიმუშებს. ლაქოვანი შედეგა რეაქტიული დაზიანებების უმეტესობაში დაფიქსირდა, ხოლო ECC ნიმუშების ქვეჯგუფმა აჩვენა p16 ექსპრესიის სრული არარსებობა. ამის საპირისპიროდ, წინამორბედი ყველა დაზიანება ავლენდა დიფუზურ ბლოკ-ტიპის p16 დადებითობას. კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებს შორის ბლოკ-ტიპის p16 ექსპრესია არ გამოვლენილა. ეს განსხვავება კვლევის ერთ-ერთ ყველაზე დიაგნოსტიკურად მნიშვნელოვან დასკვნას წარმოადგენდა და არასიმსივნურ და წინამორბედ ჯირკვლოვან პათოლოგიას შორის მკაფიო გამიჯვნას აჩვენებდა.

p53 იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზის შედეგად ასევე გამოვლინდა მნიშვნელოვანი ჯგუფებს შორის განსხვავებები. კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებში მუდმივად აღინიშნებოდა ველური ტიპის p53 შედეგის ნიმუში აბერანტული დაგროვების ნიშნების გარეშე. წინამორბედ დაზიანებებში ყველა გამოკვლეულ შემთხვევაში გამოვლინდა დიფუზური p53 ჭარბი ექსპრესია. წინამორბედ დაზიანებებსა და p53 ჭარბ ექსპრესიას შორის კავშირი ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიური ტრანსფორმაციის დროს მოლეკულური არასტაბილურობის ზრდაზე მიუთითებდა.

Ki67-ის გამოყენებით პროლიფერაციული აქტივობის შეფასებამ აჩვენა წინამორბედი დაზიანებების მნიშვნელოვანი პროლიფერაციული ზრდა კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებთან შედარებით. კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებში გამოვლინდა ძალიან დაბალი პროლიფერაციული ინდექსი, Ki67 მნიშვნელობები ძირითადად 5%-დან 6%-მდე მერყეობდა. ამის საპირისპიროდ, წინამორბედ დაზიანებებში გამოვლინდა მნიშვნელოვნად მომატებული პროლიფერაციული მაჩვენებლები, 12%-დან 20%-მდე. ყველაზე მაღალი პროლიფერაციული აქტივობა გამოვლინდა წინამორბედ დაზიანებებში, რომლებიც დაკავშირებულია დიფუზურ ბლოკ-ტიპის p16 ექსპრესიასთან და p53 ჭარბ ექსპრესიასთან. საერთო ჯამში, წინამორბედ დაზიანებებში Ki67 ექსპრესია დაახლოებით სამჯერ მაღალი იყო, ვიდრე კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებში დაფიქსირებული.

კვლევის შედეგების ანალიზი

ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანებების დიფერენციალური დიაგნოზი გინეკოლოგიური პათოლოგიის ერთ-ერთ ყველაზე კომპლექსურ სფეროდ რჩება რეაქტიული ჯირკვლოვანი ატიპიისა და წინამორბედი ნეოპლაზიური დაზიანებების მნიშვნელოვანი მორფოლოგიური ჰეტეროგენულობის გამო. ჩვენს კვლევაში, სიმსივნის წინამორბედმა დაზიანებებმა აჩვენა განსხვავებული იმუნოფენოტიპური ცვლილებები, რომლებიც ხასიათდება დიფუზური p16 დადებითობით, Ki67 პროლიფერაციული აქტივობის ზრდით და p53 ჭარბი ექსპრესიით, მაშინ როდესაც კეთილთვისებიანი/რეაქტიული დაზიანებები უპირატესად ავლენდა ლაქოვან ან უარყოფით p16 შედეგას, დაბალ Ki67 ინდექსებს და ველური ტიპის/ბუნებრივი ტიპის p53 ექსპრესიას.

ჩვენი დასკვნები შეესაბამება თანამედროვე კვლევებს, რომლებიც ხაზს უსვამს p16-ის მნიშვნელობას, როგორც HPV-ასოცირებული ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიის სუროგატულ მარკერს.^{15,16} ავტორების ნაწილი აღნიშნავს, რომ დიფუზური ბლოკ-ტიპის p16 შედეგა ძლიერ კორელაციაშია ადენოკარცინომასთან in situ და HPV-ასოცირებულ ჯირკვლოვან დაზიანებებთან, მაშინ როდესაც კეთილთვისებიანი და რეაქტიული დაზიანებები, როგორც წესი, ავლენენ ფოკალურ ან ლაქებისებრ ექსპრესიის ნიმუშებს.^{17,18}

ჩვენი კვლევის შედეგების მიხედვით Ki67 ანალიზმა ასევე აჩვენა მნიშვნელოვნად გაზრდილი პროლიფერაციული აქტივობა სიმსივნის წინამორბედ დაზიანებებში კეთილთვისებიან/რეაქტიულ დაზიანებებთან შედარებით. მსგავსი დაკვირვებები აღინიშნა საშვილოსნოს ყელის ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიის შეფასების წინა კვლევებში, რაც ადასტურებს Ki67-ის როლს, როგორც პროგრესირებადი ნეოპლაზიური ტრანსფორმაციის ინდიკატორს.^{19,20}

კეთილთვისებიანი/რეაქტიული დაზიანებები მუდმივად ავლენდა ველური ტიპის ექსპრესიას, ხოლო წინამორბედი დაზიანებები დიფუზურ ჭარბ ექსპრესიას. ბოლოდროინდელი მოლეკულური კვლევები ვარაუდობენ, რომ შეცვლილი p53 გზები შეიძლება ხელს უწყობდეს ჯირკვლოვანი ნეოპლაზიის ბიოლოგიურ პროგრესირებას და გენომურ არასტაბილურობას.^{21,22}

ჩვენი კვლევის შედეგები ადასტურებს p16, p53 და Ki67 იმუნოჰისტოქიმიის კომბინირებული ანალიზის პრაქტიკულ დიაგნოსტიკურ ღირებულებას ატიპიური ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანებების შეფასებისას, განსაკუთრებით შეზღუდული ბიოფსიის და კიურეტაჟის ნიმუშებში, სადაც მხოლოდ მორფოლოგია შეიძლება არასაკმარისი იყოს.

დასკვნა

ჩვენი კვლევის შედეგების საფუძველზე გამოვლინდა მნიშვნელოვანი იმუნოფენოტიპური განსხვავებები კეთილთვისებიან/რეაქტიულ ენდოცერვიკალურ ჯირკვლოვან დაზიანებებსა და სიმსივნის წინამორბედ ატიპიურ ჯირკვლოვან დაზიანებებს შორის. დიფუზური ტიპის p16 ექსპრესია, Ki67 პროლიფერაციული აქტივობის მომატება და p53-ის ჭარბი ექსპრესია ძლიერ ასოცირდებოდა წინამორბედ დაზიანებებთან, მაშინ როდესაც კეთილთვისებიან/რეაქტიული დაზიანებები უპირატესად ავლენდა p16-ის ლაქისებრ ან უარყოფით შედეგებს, დაბალ პროლიფერაციულ ინდექსს და ველური/ბუნებრივი ტიპის p53 ექსპრესიას.

ჩვენი კვლევის შედეგად მიღებული დასკვნები ადასტურებს p16, p53 და Ki67 იმუნოჰისტოქიმიური შეფასების კომბინირებულ დიაგნოსტიკურ სარგებლიანობას ატიპიური ენდოცერვიკალური ჯირკვლოვანი დაზიანებების შეფასებისას, განსაკუთრებით მორფოლოგიურად რთულ შემთხვევებში და შეზღუდული ბიოფსიის ან ენდოცერვიკალური კიურეტაჟის ნიმუშების შემთხვევაში. კვლევა ასევე ხაზს უსვამს დიაგნოსტიკური რეპროდუცირების გასაუმჯობესებლად ინტეგრირებული მორფოლოგიური და იმუნოფენოტიპური ინტერპრეტაციის მნიშვნელობას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Gogitidze, G.-J., Kepuladze, S., & Burkadze, G. (2025). Features of Neural Microenvironment Remodelling in cervical intraepithelial neoplasia and squamous Cell Carcinoma. *Georgian Scientists*, 7(2), 96–109. <https://doi.org/10.52340/g.s.2025.07.02.09>
2. Gogitidze, G., Kepuladze, S., Tevzadze, N., & Burkadze, G. (2023). The Role of the Local Neural microenvironment in the Progression of cervical intraepithelial Neoplasia. *Georgian Scientists*, 5(3), 182–188. <https://doi.org/10.52340/2023.05.03.19>
3. Gogitidze, G.-J., Kepuladze, S., & Burkadze, G. (2025). Vascular Remodeling Across the Spectrum of Cervical Intraepithelial Neoplasia and Squamous Cell Carcinoma: A Digital Pathology-Based Morphometric and Immunohistochemical Analysis. *Georgian Scientists*, 7(2), 56–68. <https://doi.org/10.52340/g.s.2025.07.02.06>
4. Adamashvili, N., Beriashvili, R., Tevzadze, N., Kepuladze, S., & Burkadze, G. (2024). Features of the distribution of acute and chronic inflammatory index in cervical intraepithelial neoplasia of different degrees and its relationship with proliferative activity detected by AgNOR technology. *Georgian Scientists*, 6(1), 45–57. <https://doi.org/10.52340/g.s.2024.06.01.08>
5. Pirog EC, Kleter B, Olgac S, et al. Prevalence of human papillomavirus DNA in different histological subtypes of cervical adenocarcinoma. *American Journal of Pathology* 2000; 157(4):1055–1062.

6. Stolnicu S, Talia KL, McCluggage WG. The Evolving Spectrum of Precursor Lesions of Cervical Adenocarcinomas. *Adv Anat Pathol* 2020; 27(5):278–293.
7. Makino H, Sato S, Yajima A, Komatsu S, Fukao A. Evaluation of the effectiveness of cervical cancer screening: a case-control study in Miyagi, Japan. *Tohoku J Exp Med* 1995; 175(3):171–178.
8. Boria F, Siegrist J, Hardisson D, Saturio N, Zapardiel I. Lobular endocervical glandular hyperplasia mimicking cervical adenocarcinoma. *J Obstet Gynaecol (Lahore)* 2021; 41(7):1166–1168.
9. Bosch FX, Burchell AN, Schiffman M, et al. Epidemiology and Natural History of Human Papillomavirus Infections and Type-Specific Implications in Cervical Neoplasia. *Vaccine* 2008; 26(SUPPL. 10).
10. Nara M, Hashi A, Murata SI, et al. Lobular endocervical glandular hyperplasia as a presumed precursor of cervical adenocarcinoma independent of human papillomavirus infection. *Gynecol Oncol* 2007; 106(2):289–298.
11. Liao, S. Y., Rodgers, W. H., Kauderer, J., Darcy, K. M., Carter, R., Susumu, N., Nagao, S., Walker, J. L., Hatae, M., & Stanbridge, E. J. (2013). Endocervical glandular neoplasia associated with lobular endocervical glandular hyperplasia is HPV-independent and correlates with carbonic anhydrase-IX expression: a Gynaecological Oncology Group Study. *British journal of cancer*, 108(3), 613–620. <https://doi.org/10.1038/bjc.2012.578>
12. Endocervical glandular neoplasia associated with lobular endocervical glandular hyperplasia is HPV-independent and correlates with carbonic anhydrase-IX expression: a Gynaecological Oncology Group Study - PMC [Homepage on the Internet]. [cited 2026 May 19]; Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3593541/>
13. Yamazaki H, Sasagawa T, Basha W, Segawa T, Inoue M. Hybrid capture-II and LCR-E7 PCR assays for HPV typing in cervical cytologic samples. *Int J Cancer* 2001; 94(2):222–227.
14. Liao SY, Rodgers WH, Kauderer J, et al. Carbonic anhydrase IX (CA-IX) and high-risk human papillomavirus (H-HPV) as diagnostic biomarkers of cervical dysplasia/neoplasia in Japanese women with a cytologic diagnosis of atypical glandular cells (AGC): A Gynecologic Oncology Group (GOG) Study. *Br J Cancer* 2011; 104(2):353–360.
15. Klaes R, Friedrich T, Spitkovsky D, et al. Overexpression of p16ink4a as a specific marker for dysplastic and neoplastic epithelial cells of the cervix uteri. *Int J Cancer* 2001; 92(2):276–284.
16. Negri G, Egarter-Vigl E, Kasal A, Romano F, Haitel A, Mian C. P16INK4a is a useful marker for the diagnosis of adenocarcinoma of the cervix uteri and its precursors: An

- immunohistochemical study with immunocytochemical correlations. *American Journal of Surgical Pathology* 2003; 27(2):187–193.
17. Mehdi HK, Raju K, Sheela SR. Association of P16, Ki-67, and CD44 expression in high-grade squamous intraepithelial neoplasia and squamous cell carcinoma of the cervix. *J Cancer Res Ther* 2023; 19(8):S260–S267.
 18. Benevolo M, Mottolese M, Marandino F, et al. Immunohistochemical expression of p16INK4a is predictive of HR-HPV infection in cervical low-grade lesions. *Modern Pathology* 2006; 19(3):384–391.
 19. Nucci MR. Pseudoneoplastic glandular lesions of the uterine cervix: A selective review. *International Journal of Gynecological Pathology* 2014; 33(4):330–338.
 20. Gilks CB, Young RH, Aguirre P, DeLellis RA, Scully RE. Adenoma malignum (minimal deviation adenocarcinoma) of the uterine cervix. A clinicopathological and immunohistochemical analysis of 26 cases. *American Journal of Surgical Pathology* 1989; 13(9):717–729.
 21. M Fischer MQLSKE. The p53-p21-DREAM-CDE/CHR pathway regulates G2/M cell cycle genes. *Nucleic Acids Res* 2016; 44:164–174.
 22. Blagih J, Buck MD, Vousden KH. p53, cancer and the immune response. *J Cell Sci* 2020; 133(5).

Immunohistochemical Characteristics of Atypical Endocervical Glandular Lesions

Ana Pantskhava - PhD student, Tbilisi State Medical University; Doctor; Gynaecologist;

Nikoloz Kintraia - Professor, Department of Obstetrics and Gynaecology, Tbilisi State Medical University;

Giorgi Burkadze - Head of the Department of Molecular Pathology, TSMU; Professor; Doctor, Pathologist;

Shota Kepuladze - Associate Professor, Department of Molecular Pathology, TSMU; Doctor, Pathologist;

Tbilisi State Medical University

Abstract

Glandular neoplasias of the endocervix represent a diagnostically complex spectrum of cervical pathology, which includes both benign reactive changes and precancerous glandular neoplasias. The overlap of morphological features between reactive atypia and adenocarcinoma in situ (AIS) can complicate routine histopathological interpretation, especially given the limited availability of biopsy material and the specificity of endocervical curettage. Immunohistochemical technology represents an important additional diagnostic tool in the evaluation of atypical glandular lesions.

The aim of our study was to evaluate the immunohistochemical features of atypical endocervical glandular lesions and to determine the diagnostic utility of p16, p53, and Ki67 in differentiating benign/reactive glandular lesions from precancerous glandular lesions.

A retrospective study included 63 cases of formalin-fixed paraffin-embedded (FFPE) endocervical glandular lesions obtained from archival material. The study cohort was divided into benign/reactive lesions (n=38) and precancerous/atypical glandular lesions (n=25). Immunohistochemical analysis of p16, p53, and Ki67 was performed using standardized protocols. Staining patterns and proliferative activity were assessed and correlated with histopathological data. Statistical analysis was performed using chi-square, Fisher exact, and Mann-Whitney U tests.

Benign/reactive lesions predominantly showed patchy or negative p16 staining patterns, wild-type p53 expression, and low proliferative activity, with Ki67 indices of 5% to 6%. In contrast, all precancerous lesions showed diffuse block-type p16 positivity and p53 overexpression. Ki67 proliferative activity was significantly increased in precancerous lesions, from 12% to 20% ($p<0.001$). The mean patient age was higher in precancerous lesions compared with benign/reactive lesions. HPV positivity was more frequently associated with precancerous

lesions. Combined evaluation of p16, p53, and Ki67 revealed a clear immunophenotypic distinction between benign/reactive and precancerous glandular lesions.

Keywords: Endocervical glandular lesions; p16; p53; Ki67; immunohistochemistry; cervical glandular neoplasia; atypical glandular lesions; HPV;

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ანა ფანცხავა - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; გინეკოლოგი;

Ana Pantskava - PhD student at Tbilisi State Medical University; Doctor; Surgeon; Gynaecologist;

ნიკოლოზ კინტრაია - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მეანობა-გინეკოლოგიის კათედრის პროფესორი;

Nikoloz Kintraia - Professor of the Department of Obstetrics and Gynecology, Tbilisi State Medical University;

გიორგი ბურკაძე - თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი;

Giorgi Burkadze - Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Professor;

<https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

burkadze@yahoo.com

შოთა კეპულაძე - თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Doctor of Pathology;

Shota.kepuladze@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

მეცხოველეობის ისტორია საქართველოში - სათავეები, ჩამოყალიბება, განვითარება პრეისტორიიდან თანამედროვეობამდე

კობა მიქაძე¹; მაია კერესელიძე²; რუსუდან ურიდია³; შოთა ნებიერიძე⁴; მარიკა ბოკუჩავა⁵

¹შპს ევროპის უნივერსიტეტი, ასოცირებული პროფესორი, mikadze.koba@eu.edu.ge; ²შპს ევროპის უნივერსიტეტი, პროფესორი, maia.kereselidze@eu.edu.ge, (+995) 591 195 115; ³შპს ევროპის უნივერსიტეტი, ასოცირებული პროფესორი, rusudan.uridia@eu.edu.ge orcid ID: 0009-0002-0685-2813; ⁴შპს ევროპის უნივერსიტეტი, ასოცირებული პროფესორი, neberidze.shota@eu.edu.ge; ⁵შპს ევროპის უნივერსიტეტი, ასისტენტ პროფესორი, marika.bokuchava@eu.edu.ge

რეზიუმე

მეცხოველეობა ქარველი ხალხის საქმიანობის უძველესი დარგია. ჩვენი წინაპარი ცხოველებს უხსოვარი დროიდან აშინაურებდა და უვლიდა. ეს ფაქტები პალეოლითიდან გვხდება, აქედანვე ისახება პირველყოფილი მეურნეობრიობის ფორმა მოშინაურების ფაქტებით. აღნიშნული დასტურდება არქეოლოგიური მასალებით როგორცაა: გვარჯილის კლდეში, საკაჟიაში, დევისხვრელში და სხვაგან ნაპოვნი ცხოველების ძვლები, მისგან დამზადებული სხვადასხვა ნივთები, რქისა და ძვლის იარაღები. ნეოლითიდან აღმოჩენილია ტყავეულის დასამუშავებელი იარაღები. ისახება მიწათმოქმედება და მესაქონლეობა, ჩნდება სოფლის ტიპის დასახლება. მოსახლეობა ცხოველს იყენებს გამწევ ძალად და აიოლებს მიწის დამუშავებას. ფაქტებია წალკასა და სხვაგან მიკვლეული ურმის ნაშთი, საგორავები. ცხოველებით - ხარისთავებიანი ფიგურებით ირთვებოდა საკულტო ნაგებობანი, ხოვლეში საკურთხევის სვეტის თავები და ა.შ. მერძეული მესაქონლეობის განვითარებას ადასტურებს არტეფაქტებში რძის შესანახი ჭურჭლის სიუხვე და ნაირსახეობა, სადღვებელი და სხვა. ძვ.წ.ა. VI-IV ათასწლ. საცხოვრებელი კომპლექსი შედგებოდა ძირითადი საცხოვრისისა და სამეურნეო ნაგებობებისაგან, რაც მიგვანიშნებს საქონლის სიმრავლეზე, მათზე ზრუნვაზე. გამდლისწყაროს (ძვ. წ. 1 ს.) განძში არის ფარები, კარავი და სხვა მესაქონლეობის დამადასტურებელი ნიშნები. ძალზე ხშირია შემთხვევები ცხოველების სადგომების ადგილებზე შემდგომში სოფლების გაშენებისა.

ცხოველების გამოსახულებები ბევრგანაა. ბრილის სამაროვანში (XVIII-XIV საუკ.) აღმოჩენილია ვერძის, ძაღლის, გველის; მხედრისა და ცხენიანი ეტლის ქანდაკებები, ასევე შალის ქსოვილის ნაშთები. მომთაბარეობის სიმბოლოა გამოსახულება ვერძისა და ვერძისთავა ფრინველის ტანით; ბრინჯაოს ქანდაკებები მწყემსებისა და მეცხვარე ძაღლების გამოსახულებით. სამარხებში ხშირია ცხენების აღმოჩენა, საკულტო დეკორში ცხენების ორნამენტიზებული გამოსახულებები, ასევე ლაგმების სიუხვე; რაც ადასტურებს მეცხენეობის განვითარებას და ტრადიციას. საუკეთესო აბორიგენული ჯიშის ცხენი ექსპორტის საგანს წარმოადგენდა. კოლხური ცხვრის განსაკუთრებულობას უკავშირდება „ოქროს საწმისის“ მითის ერთერთი ვარიანტი. მთიელთა შემოქმედებითი ძიებით მოხდა ჩამოყალიბება მთის ჯიშის ძროხისა, რომელიც ბარის ჯიშთან შედარებით უფრო კარგად ეგუება მაღალმთიან რელიეფს, დადიდად ამტანია.

ამგვარად აღნიშნული მოკლე ისტორიული ექსკურსი თვალნათლივ ადასტურებს საქართველოში მეცხოველეობის განვითარებას, უძველესი ხანიდან - კაცობრიობის ცივილიზაციის გარიჟრაჟიდან; პირუტყვის- ჩვენი მარჩენალის კულტს, მისი მოვლა-შენახვის, კვების, მკურნალობის დიდ ტრადიციას

საკვანძო სიტყვები: საქართველოს ისტორია, მეცხოველეობა, არტეფაქტები, პალეოლითი, ნეოლითი, ადრე ბრინჯაო, ენდემური ჯიშები, მეცხოველეობის ისტორია, არქეოლოგიური გათხრები, სამეურნეო საქმიანობა.

საქართველოს ტერიტორიაზე პრეისტორიული ეპოქიდან კაცობრიობის ცივილიზაციის არსებობა მრავალი მეცნიერული წყაროებით არის დასაბუთებული. უძველესი დროიდან ადამიანთა ცხოვრების ფაქტს ადასტურებს დმანისში ჩატარებული არქეოლოგიური გათხრები; აქ აღმოჩენილი ადამიანის ჩონჩხის ფრაგმენტები უძველესია მთელს ევრაზიაში, ასაკი 1 800 000 წელს შეადგენს!! ძველი წელთაღრიცხვის II ათასწლეულში მდ. ჭოროხის აუზში იქმნება ქართველების პირველი პოლიტიკური გაერთიანება დიაოხი და კოლხა. მათ რამდენიმე საუკუნე იარსებეს, ვინაიდან ისინი დაამხეს ჩრდილოეთიდან შემოჭრილმა მომთაბარე ტომებმა. ძვ. წ. VI საუკუნეში ჩამოყალიბდა ეგრისის ანუ კოლხეთის სამეფო, რომელიც თითქმის მთლიანად აერთიანებდა დღევანდელ დასავლეთ საქართველოს. ძვ. წ. IV საუკუნეში აღმოსავლეთ საქართველოში შეიქმნა იბერიის სამეფო. იბერიის მეფეს ფარნავაზს უკავშირდება მსოფლიოში უძველესი ქართული დამწერლობის შექმნა. ძვ. წ.-ს ბოლოს რომის იმპერიამ დაიპყრო ეგრისის სამეფო, მისი დასუსტების შემდეგ იბერია სპარსეთის გავლენის ქვეშ ექცევა. დასავლეთ საქართველოს ტერიტორიაზე ოთხი სამთავრო ყალიბდება: ლაზების, აფშილების, აბაზგებისა და სანიგების. განსაკუთრებით გაძლიერდა ლაზთა სამთავრო, რომელმაც დაიქვემდებარა დანარჩენი სამი და შეიქმნა ახალი სახელმწიფო ლაზიკა. ამას მოსდევს სხვადასხვა ისტორიული ეპოქები, რომელთა პერიპეტებში წიაღსვლები

სცილდება ჩვენი კვლევების მიზანს, ფაქტი ერთია- საქართვეოს ტერიტორიაზე უხსოვარი დროიდან ცხოვრობდა ადამიანი და ეწეოდა სამეურნეო საქმიანობას [3, 4, 7, 8].

ქართველების წინაპრების პირველყოფითი სამეურნეო საქმიანობის ერთერთი მთავარი დარგი მემცენარეობასთან ერთად მეცხოველეობა ყოფილა, რომლის განვითარების საწყისები ჩვენი ცივილიზაციის გარიჟრაჟზე ჩაისახა. ქვის ხანის უძველესი ეტაპიდან გვხვდება ადამიანის ცხოველებთან დამოკიდებულების მიმანიშნებელი ფაქტები. ამ ხნიდანვე მოიპოვება პირველყოფილი მეურნეობის ნიშნები- ესაა ნადირობა, ცხოველების შეგროვება როგორც დაჭრილი ასევე დაჭერილი ნადირების და ფრინველების; ამის პარალელურად ხდება ასეთი ცხოველების მოთვინიერება- მოშინაურება, მათზე მზრუნველობა- კვება, მკურნალობის ელემენტარული ხერხების გააზრება და გამოყენება, გარკვეული ქცევითი და პროდუქტიული თავისებურებების გაუმჯობესება- უმარტივესი სელექცია. ბუნებრივია ამ პროცესებს დასჭირდა არა ერთი ასეული წელიწადი, რასაც ქართველი ადამიანი დიდი რუდუნებითა და სიყვარულით ეწეოდა. საქართველოში ოდითგან არსებობდა ცხოველებზე მზრუნველობის ტრადიცია- კულტი. ჩვენამდე მოაღწია ცხოველების, მათზე ნადირობისა და სხვა სცენების ნახატებმა, კლდეზე, გამოქვაბულებში, მაგალითად თრიალეთის პეტროგლიფები [1, 3, 4].

არქეოლოგიური მასალა-არტეფაქტები საკმაო საფუძველს ქმნის მოცემული მიმართულებით კვლევების შედეგების უტყუარობისათვის. ზედა პალეოლითის პერიოდის გვარჯილის კლდეში წარმოებული კვლევებით მოპოვებულია სხვადასხვა ცხოველების ძვლები და ძვლისგან დამზადებული სანადირო თუ ყოფითი დანიშნულების ნივთები; განსაკუთრებით უნდა აღინიშნოს ძვლისგან გამოკვეთილი „მეთაურის კვერთხი“. უამრავი ასეთი არტეფაქტები გვაქვს, მაგალითად ხარაგაულთან, სოფ ლაშეს ზევით -დევის ხვრელის (ზედა პალეოლითი- 50-40 ათასი წლის წინ) და საკაჟიას (თერჯოლა, სოფ გოდოგანთან) უძველეს გამოქვაბულებში მოპოვებულია რქისა და ძვლის იარაღები. ამ უძველეს ფენებში ნაპოვნია მღვიმური დათვის, მარტორქის, ლოსის, კეთილშობილი ირმის, ბიზონის, კავკასიური ჯიხვის, ტახისა და სხვა ცხოველთა ძვლები. აქვე აღმოჩნდა ნეანდერტალელი ადამიანის ზედა ყბის ფრაგმენტი და კბილები. აღნიშნული მასალა შუა და გვიანდელი მუსტიეს (შუა პალეოლითი) ხანით თარიღდება [1, 3, 5].

შემდგომ პერიოდში - ნეოლითიდან უკვე მოიპოვება მოშინაურებული ღორის ნაშთები, რაც იმას ადასტურებს თუ როგორი წინსვლაა ცხოველების მოთვინიერების, მოშინაურების, ე.წ. სელექციის მხრივ. მეცნიერების ვარაუდით ღორი ითვლება ძაღლის შემდგომ მეორე მოშინაურებული ცხოველის სახედ. ძვ.წ.ა.მეოთხე-მესამე ათასწლ. არტეფაქტები წოდებული, როგორც მტკვარ-არაქსის კულტურა, უხვად მოიცავს თიხის ჭურჭელს, რელიეფური ორნამენტებით. ისინი მეცნიერების მიერ მიჩნეულია სარძევე ჭურჭლად. ჩვენში პალეოლითის პერიოდიდან მოყოლებული ადამიანების საქმიანობაში, მეურნეობაში დიდი ადგილი ეკავა ნადირობას, ცხოველების შეგროვებას,

შენახვას, მეთევზეობას. ხდებოდა ტყავეულის დამუშავება და გამოყენება შესამოსად, რის დამადასტურებელიცაა ძვლოვანი მასალისგან დამზადებული ტყავეულის დასამუშავებელი ხელსაწყო-იარაღები, ესოდენ უხვად მოძიებული. ადამიანების ჯგუფებს შორის ხშირია ბრძოლები მეცხოველეობის ნადავლის მოპოვება-მითვისების მიზნით [1, 2, 3].

ისტორიულად აღიარებული ფაქტია, რომ ახალი ქვის ხანიდან- ნეოლითიდან მიმთვისებლური მეურნეობა იცვლება მწარმოებლურით. ისახება მიწათმოქმედებისა და მესაქონლეობის ორგანიზების ელემენტები, ჩნდება სოფლის ტიპის დასახლებები. მიწათმოქმედება განაპირობებდა მესაქონლეობის განვითარებას. თავის მხრივ მეცხოველეობა გამწევი ძალით აიოლებდა მიწის დამუშავებას და იძლეოდა დამატებით პროდუქციას. ასეთი პროგრესის ფაქტები უხვად მოიპოვება, განსაკუთრებით ქვემო ქართლის დაბლობზე. მეოთხე-მესამე ათასწლეულებიდან აღმოჩენილია ხარის, ცხვრის, თხის, ღორის ძვლოვანი მასალა. მოპოვებული თიხის მომცრო ფიგურების- სარძეო ჭურჭლების სიუხვე უკავშირდება ნახევრადნაზმატყლიანი ცხიმკუდიანი ცხვრის არსებობას. ეს მიუთითებს სახელგანთქმული ქართული ენდემური ცხვრის ჯიშის ჩამოყალიბების უადრეს საწყისებს. მრავლადაა აღმოჩენილი ეტლის ბორბლები, ხოლო წაკლაში მიკვლეული ურმის ნაშთი პირუტყვის გამწევი ძალად გამოყენების ნიშანია.

ამ დროიდან ხდება თრიალეთის კულტურის ჩასახვა-განვითარება. თრიალეთის კულტურა უკავშირდება ეკონომიკურად დაწინაურებულ მესაქონლე-მიწათმოქმედ ტომებს, რომელთა განვითარებას ხელს უწყობდა სამხრეთ საქართველოს ბუნებრივი პირობები. თრიალეთის კულტურა მტკვარ-არაქსის კულტურის მემკვიდრეა და მის ძეგლებად ითვლება უმთავრესად ყორღანული სამარხების (გორასამარხების) კულტურა. მათი ნაწილი ადრებრინჯაოს ხანის დასასრულით - ძვ. წ. III ათასწლეულის ბოლო საუკუნეებით თარიღდება, ნაწილი კი შუა ბრინჯაოს ხანით - ძვ. წ. II ათასწლეულის პირველი ნახევრით. წალკასა და სხვა ლოკაციებზე გათხრების შედეგად მოპოვებულია მრავალი არტეფაქტი- გორა სამარხები. ასეთ სამარხებში აღმოჩენილი მიცვალებულების ნეშტი ხშირად დასაკრძალავ ოთხთვალა ეტლზე ესვენა. სხვადასხვა ნივთებთან ერთად ატანდნენ დაკლულ საქონელაც. ცხენების სიუხვესა და ზოგადად მეცხენეობის ფართოდ განვითარებას ადასტურებს ბრინჯაოს ლაგმების სიუხვე მეორე ათასწლეულიდან- გვიან ბრინჯაოს ხანაში [1, 2, 5].

ხოვლეში (ხოვლე გორა - ძვ.წ. მეცხრე- მერვე საუკ. გვიან ბრინჯაო-ადრინდელი რკინის ხანა) აღმოჩენილია უძველესი ტიპის ბოსლის ნაშთები; პალეოლითიდან მოყოლებული ასევე გვხვდება ურმის თვალი, სადღვებელი, სარძევე ჭურჭლის სიუხვე. ყოველივე ზემოთ აღნიშნული ადასტურებს მესაქონლეობის დარგის კარგად წარმართვა - ორგანიზებას, რაც შეუძლებელი იყო თუნდაც მოვლა-შენახვის ელემენტარული სანიტარიული ჩვევების გარეშე. აქვე უნდა აღინიშნოს საკულტო ნაგებობები, კერძოდ მათი შემკულობა - დეკორი. აღსანიშნავია ხოვლეს საკურთხეველი, რომელიც უმეტეს შემთხვევაში (სვეტის თავები) თიხის ვერძის თავის ქანდაკებითაა შემკული.

არქიტექტურული გაფორმების მიზნით ხშირად გამოიყენება ხარისა და ვერძის თავებიანი გამოსახულებები- ქვის, ხის, ძვირფასი ლითონებით დამშვენებული [2, 3, 5].

ცხოველების სკულპტურული გამოსახულებები ბევრგან გვხვდება, მაგალითად ბრილის სამაროვანში (ონი, სოფ. ღებთან, ძვ. წ. XVIII-XIV საუკ.) აღმოჩენილია ცხოველების ქანდაკებები - ვერძის, ძაღლის, გველის; მხედრისა და ცხენიანი ეტლის ქანდაკებები, ასევე შალის ქსოვილის ნაშთები. ცალკე აღნიშვნის ღირსია გამოსახულება, რომელიც წარმოადგენს ვერძისა და ვერძისთავა ფრინველის ტანს. ეს ფანტაზიური სინთეზი აიხსნება როგორც მომთაბარეობის სიმბოლო - ოსტატს სურს, რომ ცხოველების გადარეკისას ხიფათით აღსავსე გზა საზაფხულო და საზამთრო სამოვრებს შორის მწყემსებისათვის უვნებელი იყოს. ეს სურვილი უფრო მკაფიოდაა გამოხატული სხვა საგანში, ესაა ცული რომელიც გაფორმებულია განსაკუთრებული მხატვრულობით, კერძოდ აქ შერწყმულია ვერძისთავი, ფრთები, ცული და მზე, ანუ ყველა ის ელემენტი რაც აუცილებელია გზის უვნებლად გასავლელად .

ბრილისა და თლიას (გვ. ბრინჯაოსა და ადრ. რკინის ხანის (ძვ. წ. XII—VII სს.) არქეოლოგიური ძეგლი სოფ. თლია, ჯავა) გვიანბრინჯაოს პერიოდის არტეფაქტების მნიშვნელოვანი ნაწილი შემკულია ცხოველური - ირმის, ცხენის, ძაღლის, გველის, თევზის ელემენტებით. ბრინჯაოს ქანდაკებები მოიცავს მწყემსებისა და მეცხვარე ძაღლების გამოსახულებას. მსგავსი არტეფაქტი გვხვდება გამდლისწყაროში (გამდლისწყარო ძვ. წ. II ათასწლეულის ბოლო – I ათასწლეულის დასაწყისი); ესაა ბრინჯაოს მცირე ზომის უნიკალური ქანდაკება, რომელიც ცხვრის კულტთან და ნაყოფიერების ღვთაებასთან დაკავშირებულ რიტუალურ სცენას გამოხატავს (ფარები, ცხვრის ფარა, მეცხვარის ძაღლები, ორფერდა კარავი, სამსხვერპლო, მწყემსები, სარიტუალო ნივთები და სხვ.). ქანდაკება მოწმობს აგრეთვე მეცხვარეობის სამეურნეო მნიშვნელობას [2, 4, 7].

ასევე გვიანბრინჯაო-ადრე რკინის ხანაში (ძვ. წ. XV-VI სს) თრელიგორები ყველაზე დიდი დასახლება იყო კავკასიაში. თრელის სამაროვნის გვიანბრინჯაოს ხანის სამარხთა შორის განსაკუთრებული მნიშვნელობისაა ძვ. წ. XIII ს-ის წარჩინებული მეომრის სამარხი, სადაც აღმოჩნდა ბრინჯაოს აბზინდა ცხენზე ამხედრებული მამაკაცის გამოსახულებით. ეს მხედრის უადრესი გამოსახულებაა კავკასიაში [1, 3, 4]. ადრეული პერიოდის საქართველოში მერძეული მესაქონლეობის განვითარების არტეფაქტებში უხვადაა რძის შესანახი სხვადასხვაგვარი ჭურჭლები, სადღვებელი და სხვა. სამარხებში ხშირია ცხენების აღმოჩენა, საკულტო დეკორში ცხენების ორნამენტიზებული გამოსახულებები, ასევე ლაგმების სიუხვე. ყოველივე ეს ადასტურებს მეცხენეობის განვითარებას და ტრადიციას. ამისვე დასტურია კოლხეთში გავრცელებული „გაცხენების“ მისტერიული რიტუალი - ფაქტი ცხენის კულტისა. ეს ჩვეულება კარგად აქვს აღწერილი უდიდეს ქართველ მწერალს კონსტანტინე გამსახურდიას „მთვარის მოტაცებაში“. საქართველოში უძველესი დროიდან იყო მოშენებული საუკეთესო აბორიგენული ჯიშის ცხენი, რომელიც ექსპორტის საგანს წარმოადგენდა.

ძვ. წ. VI -IV ათასწლეულების ნასოფლარებში საცხოვრებელი კომპლექსი მოიცავდა როგორც ძირითად საცხოვრებელს, ასევე მიმდებარედ დამხმარე სამეურნეო ნაგებობებს, რაც მიგვანიშნებს მოშენებული პირუტყვის სიმრავლესა და მათზე მზრუნველობაზე, მოვლა-შენახვის პირობების დაცვაზე. დასახლებებში იყო საკულტო-რელიგიური სენაკები სადაც ხდებოდა მსხვერპლშეწირვა უმეტესად ხარებისა და ცხვრებისა, უპირატესობა ენიჭებოდა თეთრ ხარს. ნაყოფიერების სიმბოლოს წარმოადგენდა შავი თხა [1, 3]. საქართველოში მთის მოსახლეობის საქმიანობა გვიანბრინჯაოს ხანაში წარმოუდგენელია განვიხილოთ მეცხოველეობის, განსაკუთრებით მეცხვარეობის განვითარების გარეშე. ადრიდანვე ეს დარგი ვითარდებოდა მომთაბარული ხერხით. ახალი

წელთაღრიცხვიდან უფრო მძლავრად ხდება ამ დარგის განვითარება, მყარდება ეკონომიკური კავშირურთიერთობები მთასა და ბარს შორის, რაც განაპირობებს სეზონური სამოვრების მონაცვლეობით რაციონალურ გამოყენებას. მთის მოსახლეობა უპირატესობას კვლავაც მეცხოველეობას ანიჭებდა, ბარში კი სჭარბობდა მემცენარეობის დარგი. საზოგადოდ ქართველი ფეოდალის მეურნეობის ქვაკუთხედს საქონლის ჯოგი, ცხვრის ფარა წარმოადგენდა. ქვეყნის მიღმაც იყო განთქმული ქართული აბორიგენური ჯიშების ზნეკეთილობა, ამტანობა, პროდუქტიულობა. აქაური ცხვარი გამოირჩეოდა მაღალპროდუქტიულობითაც და მრავალნაყოფიერებითაც. კოლხური ცხვრის განსაკუთრებულობას უკავშირდება ოქროს საწმისის მითის ერთერთი ვარიანტი. აქაური მატყლი ექსპორტის საგანს წარმოადგენდა. უცხოელი მოგზაური, გეოგრაფი და ისტორიკოსი სტრაბონი ძვ. წ. 64-24 წწ. აღწერს დედამიწის სხვა ნაწილებთან ერთად სამხრეთ ნაწილს - იბერიას და მიუთითებს საქართველოს მთიანეთში მესაქონლეობის მაღალგანვითარებაზე [6].

სოფლის მეურნეობის ძირითად მწარმოებელს ქართველ ყმა-გლეხობა ას პირუტყვისთვის ყოვლისგამომხატველი სახელი - მარჩენალი შეურქმევია. ძველთაგანვე ქართველები შეხვედრისთანავე პირველრიგში „საყოლს“- მარჩენალ ცხვარ-ძროხას მოიკითხავდა. ასევე ტრადიციისამებრ მთაში ახლაც მიღებულია „ცხვარ-მეცხვარის“ გამორჩეული ლოცვა-სადღეგრძელო. მწყემსობის დაფასების, პოპულარობის ფაქტია უძველეს სასაფლაოზე მწყემსის საფლავის ქვის გამორჩეულობა, სტილიზებული ორნამენტები და სილამაზე. რაც შეეხება ცხოველის სადგომს - სიტყვა ბოსელი ამავე დროს წარმართული ნაყოფიერების კულტის სახელიცაა- ბასილა, ბოსლა.თავად სიტყვა „ცხოვრება“ წარმოდგება „ცხოვარ- ცხვარ“ ძირისგან [4, 5, 7]. ანტიკურ ეპოქაში, საერთო პროგრესის კვალობაზე მეცხოველეობის დარგის წინსვლა-განვითარებაა. ამას ხელს უწყობდა დიდი გამოცდილების დაგროვება, მწყემსური ალლო და თვით ბუნებრივი პირობების რაციონალური გამოყენება, იმხანად არარსებული ეკოლოგიური ცოდნის ხალხური საწყისები, წესები და ლიმიტები. მკაცრ ბუნებრივ პირობებს უნივერსალურად მიესადაგნენ ჩვენში ასწლეულების განმავლობაში გამოყვანილი უნიკალური გენოფონდის წარმომადგენლები. კავკასიელ მთიელთა შემოქმედებითი ძიებით,

გმირობითა და სიმამაცით მოხდა ჩამოყალიბება მთის ჯიშის ძროხისა, რომელიც ბარის ჯიშთან შედარებით უფრო მომცროა, მაგრამ ამტანი, ადაპტირებული ისეთი გარემოსადმი, სადაც ვერ ხერხდება სხვა მაღალპროდუქტიული ჯიშების მოშენება, შეუცვლელიო ენდემია. კარგი მოვლა-შენახვისა და კვების პირობებში იძლევა თითქმის იმდენს, რამდენსაც პროდუქტიული ნახირი. ლიტერატურაში გვხვდება ცალკეული სახელწოდებები ამ ჯიშისა: ხევსურული, ფშაური, ბალყარული, ასევე თუშური და ყარაჩაული ცხვარი, რაც უკავშირდება იმ ეთნიკურ წრეს, სადაც ხდებოდა მათი მოშენება. აღსანიშნავია დასავლეთ საქართველოს ენდემები გამორჩეული კვარაცხელიას ძროხა და იმერული ცხვარი, ასევე ფრინველების ენდემები, ქათმის, ინდაურის, იხვის, ბატის [6].

ფეოდალურ ეპოქაში საერთო წინსვლის კვალობაზე აღინიშნება სოფლის მეურნეობის ერთ-ერთი უმთავრესი დარგის მეცხოველეობის განვითარება, იზრდება პირუტყვის სულადობა, პროდუქტიული მახასიათებლები. არსებობს სხვადასხვა ისტორიული მასალა, როგორც ქართული, ასევე უცხოური, რაც ამტკიცებს ზემოთხსენებულ მოცემულობას. ერთ-ერთი ასეთია მეცხრე საუკუნის არაბული წყარო, რომლის მიხედვითაც არაბი სარდლის იბნ-იაზიდია ლაშქრობისას დამარცხებული კახეთის სამთავრო კონტრიბუციას იხდის 8000 ცხენითა და 20000 ცხვრით. აგრეთვე სამხრეთ-დასავლეთში მესაქონლეობის მაღალგანვითარებას ადასტურებს ბასილი ზარზმელის (მეცხრე-მეათე საუკუნის ქართველი მწერალი და საეკლესიო მოღვაწე) ცნობა, რომელიც შეეხება გიორგი ჩორჩანელის, ზარზმის დიდი ფეოდალის - დიდი მთავრის მეურნეობას. უმემკვიდრეოდ და უოჯახოდ დარჩენილმა დასა და დისშვილებს დაუტოვა თავისი უძრავ-მოძრავი ქონება, მათ შორის „საქონელი მრავალფეხა, სიმრავლე სახედართა და მროწლეულთა“ (მროწლე- ნახირი) [1, 3, 7].

საქართველოს მთიანეთში მეცხოველეობა ალპური ხასიათისა იყო, ასეა დღესაც. საქონლის გადაადგილება ხდებოდა ვერტიკალური ზონალობით, მტკიცედ შემუშავებული და ხანგრძლივად აპრობირებული პრინციპების დაცვით. ხდებოდა ასევე ჰორიზონტალური მონაცვლეობაც. უფრო ლოკალურ არეალებში ხდებოდა ხეობის დაყოფა მზიან- „მზორე“ და ჩრდილოვან მხარეებად. ეს მხარეები განსხვავდებოდა ბალახნარის და აქედან გამომდინარე მიღებული რძის პროდუქტების თვისებებით, ხარისხით. ასეთ პირობებში გამოიყენებოდა მეურნეობის ე.წ. „ორხელაობის“ პრინციპი. იგი მოიცავდა სამეურნეო ბაზების ორგანიზებას როგორც ბარში, ასევე მთისწინა ბარის ზონაში - ე.წ. „საწუელი“. მომთაბარეობა მოიცავდა ფართო მასშტაბებსაც.

უძველეს ქართულ საისტორიო ძეგლში „ქართლის ცხოვრებაში“ კერძოდ მოქცევაი ქარლისაში, მოციქულთა სწორი წმინდა ნინო თავფარავნის ტბასთან ხვდება მწყემსებს, რომლებიც მცხეთიდან არიან ამოსული. მაშასადამე იმ ხანად- მეოთხე საუკუნეში საქართველოს კუთხეებს შორის არსებულა განვითარებული კავშირები და ურთიერთთანამშრომლობა, რაც კარგი ფონი- მოტივაცია ყოფილა მომთაბარული მეცხოველეობისათვის [5, 7].

ისტორიულად ალპური მეცხოველეობა წარმოდგენილი იყო ვერტიკალური ზონალობის ჭრილში. ვერტიკალური ზონალობის ორგანიზება მოიცავდა ტერიტორიის დიფერენცირებას სამ ძირითად ზონად. ამ დანაწილებას საფუძვლად ედო ლანშაფტურ-და ზოო-გეოეკოლოგიური ასპექტები. პრაქტიკულად ეს ხდებოდა ერთი შეხედვით მარტივად, მაგრამ საოცრად გონივრულად როგორც ეკოლოგიური, ასევე ეკონომიკური თვალსაზრისით, დასახლების მიმდებარედ დაბალი- პირველი ზონა ეთმობოდა მერმეულ საქონელს- მეწველს; შემდეგ - უფრო შემადლებული რელიეფი - მშრალსა და მოზარდეულს, მესამე ზედა ზონა გამიზნული იყო ცხვრისათვის. იალაღები იწყებოდა სუბალპური ზონიდან და მიემართებოდა ზევით ზღვის დონიდან 3 000 მ სიმაღლემდე.

განსაკუთრებულად უნდა აღინიშნოს ცხოველზე ზრუნვისა და მოვლა-შენახვის დიდი ტრადიცია . ჯერ კიდევ მაშინ, როდესაც მრავალ უცხო ტომს ველურად ცხოვრებით გაჰქონდა თავი, ჩვენში, ბრინჯაოს ხანაში ცხოველებს სპეციალურ სადგომში - ბოსელში ინახავდნენ, ხოვლეს არტეფაქტი. ხოვლეს ბოსელი სქემატურად კარგადაა დაგეგმარებული, გააზრებული დეტალებითა და მოწყობით გამოირჩევა. აქვე მივუბრუნდებოდით გამდლისწყაროს ფარეხის გამოსახულებას. ადამიანის საცხოვრებელ კომპლექსში მთავარი ადგილი განეკუთვნებოდა პირუტყვის სადგომსა და ცხოველური პოდუქტების მისაღებ, გადასამუშავებელ და შესანახ სათავსოებს. ეს ტრადიცია დღემდეა შემორჩენილი, მაგალითად ხევსურული სახლის სათავსო- „სენე“. მას დიდი მნიშვნელობა ქონდა საცხოვრებელ კომპლექსში, რაც ადასტურებს ხევში, ხევსურეთში და სხვაგან, ზოგადად საქართველოს მთიანეთში, მესაქონლეობის დიდ ტრადიციას. გადმოცემის თანახმად სენე განსაკუთრებული მოვლის, სისუფთავის ადგილი იყო, იმდენად მნიშვნელოვანი, რომ აქ ოჯახის დიასახლისი ინახავდა ძვირფასეულობას და შემოსვლა მის გარდა შეეძლო მხოლოდ უფროს რძალს.

საქართველოში ხშირი იყო შემთხვევები ცხოველებისათვის განკუთვნილი ადგილების, ბაკ-საჩიხეების, ბოცლების ადგილებზე სოფლების გაშენებისა, ამ მხრივ ტოპონიმების ჩამოთვლა შორს წაგვიყვანდა. ისტორიულად საქართველოს ბევრ კუთხეში ადამიანის საცხოვრებელს უშუალოდ ემიჯნებოდა ცხოველების სადგომი. განსაკუთრებით გამოირჩევა სვანური მაჩუბის გაფორმება-დიზაინი. ამის მიზეზი იყო სხვადასხვა გარემოებები: ზამთრის ცივი კლიმატი, ტომობრივ-გვაროვნული თავდასხმები; მაგრამ უნდა ითქვას, რომ საქონლის სადგომის უშუალო სიახლოვე ადამიანის სამყოფელთან მესაქონლეობის მაღალი კულტურის, ჩვენი წინაპრის მიერ პირუტყვის იგავმიუწვდომელი სიყვარულის გამოძახილია და არამც და არამც ხალხის დაბალი სანიტარული კულტურა-ცივილიზაციისა.

ყოველივე აღნიშნულთან ერთად მოკლედ უნდა აღინიშნოს პირუტყვის მოვლა-შენახვის განუყოფელი ნაწილის - მკურნალობის ჩვევებზედაც. როგორც ირკვევა მათ საკმაოდ საფუძვლიანავ ფლობდნენ იმჟამინდელი მეჯოგეები. მკურნალობის უმარტივესი ელემენტები ცხოველების მოშინაურებისთანავე ჩასახულა. კარაბადინების სახით ჩვენში ასეთი წერილობითი ძეგლები გვიანდელი პერიოდისაა. ვეტერინარული ხელნაწერი

წიგნები საქართველოში XVII საუკუნიდან გვხვდება. მათ შექმნაში, თარგმნაში დიდი წვლილი მიუძღვის ვახტანგ VI-ს, გიორგი XII-ის შვილებს – იოანე და ბაგრატ ბატონიშვილებს. ცხენის, ძაღლის და ფრინველთა კარაბადინების შემცველი ხელნაწერები ქართული კალიგრაფიისა და წიგნის კულტურის თვალსაჩინო ნიმუშებს წარმოადგენენ. ეს მცირე ისტორიული მასალა ადასტურებს განვითარებული მეცხოველეობის ქვეყანაში სამკურნალო ჩვევებისა და ხერხების ასევე მაღალ დონესა და პროფესიონალიზმს. სავარაუდოდ უთუოდ იქნებოდა ადრეული პერიოდის მასალებიც, მაგრამ ჩვენი ბედუკუდმართი პერიპეტიების ქარ-ცეცხლში უკვალოდ შთაინთქა.

ამგვარად ზემოთ მოყვანილი მოკლე ისტორიული ექსკურსი თვალნათლივ ადასტურებს საქართველოში მეცხოველეობის გაღაღგანვითარებას, უძველესი ხანიდან- კაცობრიობის ცივილიზაციის გარიჟრაჟიდან, პირუტყვის - ჩვენი მარჩენალის კულტს, მისი მოვლა-შენახვის, კვების, მკურნალობის დიდ ტრადიციას. ყოველივე ეს დიდ საფუძველს - მოტივაციას იძლევა აღვადგინოთ სიმრავლე და ზნეკეთილობა ჩვენი ცხვარ-ძროხისა, ფურ-კამეჩისა, მროწლესა და კოლტისა, ქართლოსიანთა ეს განუყოფელი დოვლათი და ფენომენი.

ლიტერატურა:

1. ს. ჯანაშია. საქართველო ადრინდელი ფეოდალიზაციის გზაზე, _ შრომები, ტ. I, თბ., 1949, გვ.178- 210;
2. მუსხელიშვილი დ., ხოვლეს ნამოსახლარის არქეოლოგიური მასალა, თბ., 1978. გვ.42-59;
3. ნ. ლომოური. ეგრისის სამეფოს ისტორია, თბ., 1968, გვ. 12-24;
4. ივანე ჯავახიშვილი „თხზულებანი თორმეტ ტომად“, ტ. I, თბილისი 1979, გვ.47-81;
5. ქართლის ცხოვრება, რ. მეტრეველის რედაქციით, საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემია, თბ., 2008. გვ. 27-54;
6. გ. გოგოლი, სასოფლო-სამეურნეო და შინაურ ცხოველთა ბიომრავალფეროვნება საქართველოში. სამეცნიერო შრომათა კრებული: „მეცხოველეობის ბიოლოგიური საფუძვლების თანამედროვე პრობლემები“, თბილისი, ტ. 4 (5), 2009; 6
7. საქართველოს ისტორია, ტომი 1. თბილისი, 2012 წ. გვ 128-140;
8. Vekua Abesalom et al. (Jul 2002). "A new skull of early Homo from Dmanisi, Georgia". *Science* 297 (5578): 85–9. doi:10.1126/science.1072953. ISSN 0036-8075. PMID 12098694;
9. Lordkipanidze David et al. (20 September 2007). "Postcranial evidence from early Homo from Dmanisi, Georgia". *Nature* 449 (7160): 305–310. doi:10.1038/nature06134. PMID 17882214;

History of Animal Husbandry in Georgia - Origins, Formation, Development from Prehistory to Modernity

Koba Mikadze - European University Ltd, Associate Professor

mikadze.koba@eu.edu.ge

Maia Kereselidze - European University Ltd, Professor

maia.kereselidze@eu.edu.ge

(+995) 591 195 115

Rusudan Uridia - European University Ltd, Associate Professor

rusudan.uridia@eu.edu.ge

Orcid<https://orcid.org/0009-0002-0685-2813>

Shota Nebieridze - European University Ltd, Associate Professor

nebieridze.shota@eu.edu.ge

Marika Bokuchava - European University Ltd, Assistant Professor

marika.bokuchava@eu.edu.ge

Abstract

Livestock husbandry represents one of the earliest and most enduring forms of economic activity among the Georgian people. Archaeological and paleoenvironmental evidence indicates that the domestication and systematic management of animals began in prehistoric times, with roots extending back to the Paleolithic period. Material evidence supporting early animal domestication has been recovered from numerous archaeological sites.

From the Neolithic period onward, significant transformations in subsistence strategies are observed. Animals were increasingly employed as draft power, facilitating agricultural intensification. Cultic architecture was also enriched with animal symbolism, including bull-headed figurines and decorated altar elements, such as pillar capitals discovered at Khovle and related sites. The advancement of dairy husbandry is confirmed by the abundance and diversity of milk-processing and storage vessels, including churns and specialized containers. Notably, many later settlements were established on sites originally used as animal enclosures, suggesting long-term continuity in land use.

Animal imagery is widely attested in the archaeological record. At the Brili burial ground (18th–14th centuries BC), sculptures depicting rams, dogs, snakes, riders, and horse-drawn chariots have

been uncovered, alongside remains of woolen textiles. Bronze figurines representing shepherds and sheepdogs, as well as composite symbolic forms, reflect the cultural and ideological importance of pastoralism and nomadic traditions. Indigenous horse breeds of exceptional quality constituted valuable export commodities in antiquity. The distinctive characteristics of the Colchian sheep are reflected in one interpretative version of the myth of the Golden Fleece, linking animal husbandry with broader cultural and mythological narratives. Moreover, adaptive breeding practices in mountainous regions led to the formation of resilient cattle breeds capable of thriving in high-altitude environments, demonstrating early knowledge of selective breeding and environmental adaptation.

In conclusion, this overview highlights the continuous and dynamic development of livestock husbandry in Georgia from the earliest stages of human civilization. The archaeological record illustrates not only the economic significance of livestock but also its profound cultural, symbolic, and technological roles, supported by long-standing traditions of animal care, feeding practices, and proto-veterinary knowledge.

Keywords: History of Georgia, animal husbandry, artifacts, paleolithic, neolithic, Early Bronze Age, endemic breeds, history of animal husbandry, archaeological excavations, agricultural activities.

Factors Influencing Humoral Immunity Post COVID-19 Vaccination in Georgia

Tamar Azikuri¹, George Kamkamidze², Nikoloz Pruidze³, Natia Kvaratskhelia¹

¹University of Georgia, 77a, M. Kostava str., Tbilisi, 0171, Georgia Tel: +995 593 545 223, Email: tamar.azikuri@gmail.com; ²Clinic NeoLab, Tbilisi, Georgia ³Professor, Coordinator of the Doctoral Program of Medicine, Doctor, Department of Medicine, School of Health Sciences, University of Georgia;

ABSTRACT

COVID-19 vaccines have reduced severe disease and mortality worldwide. However, humoral immunity wanes over time, particularly against symptomatic SARS-CoV-2 infection (Andrews et al., 2022; Feikin et al., 2022). Vaccine effectiveness (VE) against symptomatic infection declines from ~53% one month post-vaccination to 14% at six months, while protection against severe disease remains above 70% (Tartof et al., 2021; Lin et al., 2022). Hybrid immunity—vaccination with prior infection—provides stronger and more durable protection (Chemaitelly et al., 2023; Pilz et al., 2022). Demographic and clinical factors, including age, comorbidities, and immunosuppression, influence responses, while sex differences are minor (Goel et al., 2021; Griffin, 2023). Genetic factors, particularly Rhesus (Rh) status, may shape humoral responses (Alavi et al., 2023; Musa et al., 2023). In Georgia, plasma donor data confirmed vaccination, hybrid immunity, and Rh positivity as predictors of protective titers. These findings support universal vaccination, timely boosters, and targeted protection.

Keywords: COVID-19; vaccination; humoral immunity; hybrid immunity; Georgia

INTRODUCTION

The rapid development and deployment of COVID-19 vaccines marked one of the most significant achievements in modern public health. Since early 2021, billions of doses have been administered worldwide, preventing millions of hospitalizations and deaths (World Health Organization, 2022). Yet despite their success, variability in immune responses soon became

evident. Breakthrough infections, particularly during the Delta and Omicron waves, highlighted both waning immunity and viral immune escape (Pouwels et al., 2021).

Humoral immunity, mediated primarily through neutralizing antibodies, plays a central role in preventing infection. However, the magnitude and durability of antibody responses differ widely across individuals. Several domains contribute to this variability:

- **Temporal dynamics** – antibody titers peak after vaccination and subsequently decline (Andrews et al., 2022; Feikin et al., 2022).
- **Infection history** – hybrid immunity, combining prior infection with vaccination, offers broader and more durable protection (Chemaitelly et al., 2023; Pilz et al., 2022).
- **Demographic and clinical factors** – age, comorbidities, and immunosuppression can weaken immune responses (Goel et al., 2021; Griffin, 2023).
- **Genetic influences** – blood group and Rh factor may modulate antibody responses (Alavi et al., 2023; Musa et al., 2023).

Georgia provides a valuable case study. The country experienced moderate vaccine uptake alongside high exposure to natural infection. This environment allowed researchers to explore determinants of humoral immunity in a mixed-immunity setting. Data from 175 plasma donors provide unique insights into how global findings translate to local populations.

TEMPORAL DYNAMICS OF ANTIBODY RESPONSE

Waning of antibody levels

After vaccination, antibody titers rise rapidly, reaching their peak within a few weeks. However, these levels decline steadily thereafter. Andrews et al. (2022) reported that vaccine effectiveness (VE) against symptomatic infection with the Pfizer-BioNTech vaccine dropped from ~53% one month after the second dose to ~14% at six months. Similarly, Feikin et al. (2022), in a meta-analysis involving more than 25 million individuals, confirmed that waning immunity was consistent across both mRNA and adenoviral vector vaccines.

Protection against severe disease

Despite the decline in protection against infection, defense against hospitalization and death remains comparatively robust. Tartof et al. (2021) found that VE against hospitalization remained above 70% up to six months post-vaccination. Lin et al. (2022) demonstrated similar durability across different vaccine platforms. This sustained protection is attributed largely to cellular immunity, including memory B cells and T cells, which continue to provide defense even as antibody levels fall (Goel et al., 2021; Khoury et al., 2021).

Variant impact

The emergence of new variants has accelerated immune escape. Pouwels et al. (2021) showed that Omicron reduced VE more rapidly than Delta, due to extensive mutations in the spike protein. Consequently, VE against symptomatic Omicron infection was significantly lower than against earlier variants, with declines occurring within weeks rather than months.

Booster effects

Booster doses have proven effective in restoring protection, at least temporarily. Feikin et al. (2022) reported that VE against symptomatic infection increased to about 60% one month after a booster dose, though this protection declined to ~20% within 6–9 months. Variant-adapted boosters may provide improved durability and coverage against immune escape, and their periodic use could become necessary during future waves (Chemaitelly et al., 2023).

HYBRID IMMUNITY

Hybrid immunity—generated when vaccination is combined with prior SARS-CoV-2 infection—consistently provides stronger and more durable protection than either vaccination or infection alone.

Magnitude and durability

Chemaitelly et al. (2023), in a systematic review and meta-regression of 26 studies covering over eight million individuals, found that hybrid immunity maintained $\geq 95\%$ protection against severe disease for up to 11 months after primary vaccination and ~95% at six months following a booster. Pilz et al. (2022) similarly reported that reinfection rates were lowest among hybrid immunity groups, even during the circulation of immune-evasive variants such as Omicron.

Immunological mechanisms

From an immunological perspective, the enhanced protection of hybrid immunity arises from complementary processes. Natural infection exposes the immune system to multiple viral proteins, broadening the antibody repertoire. Vaccination, on the other hand, focuses immune responses on the spike protein, encouraging affinity maturation and high-titer neutralization. Together, these exposures stimulate more robust memory B cell pools and polyfunctional T cell responses, leading to durable and broad-spectrum protection (Harrison et al., 2023).

Georgian evidence

In Georgia, plasma donor data confirmed the global pattern. Of individuals with hybrid immunity, 92.5% achieved protective antibody titers (≥ 1000 BAU/mL). This was significantly higher than the 77.8% of vaccinated-only participants and the 24.3% of infection-only

individuals ($p < 0.001$). These findings emphasize the critical role of vaccination even in populations with high natural infection exposure.

DEMOGRAPHIC AND CLINICAL DETERMINANTS

Age

Age is one of the strongest predictors of reduced vaccine responsiveness. Older adults often mount weaker and less durable antibody responses due to **immunosenescence**, a gradual decline in immune function characterized by reduced naïve T cell production, diminished B cell diversity, and impaired memory responses (Weinberger et al., 2008). Even after booster doses, elderly populations generally achieve lower peak titers than younger individuals (Griffin, 2023). This reduced responsiveness contributes to their heightened vulnerability during COVID-19 surges and underscores the importance of prioritizing timely booster campaigns for older age groups.

Sex

Sex-related differences in vaccine-induced immunity have been observed but are relatively modest. Females often produce slightly higher antibody titers following vaccination compared to males. This difference is thought to result from hormonal influences—estrogen enhances, while testosterone may suppress immune function—and the presence of immune-regulatory genes on the X chromosome (Goel et al., 2021). However, these differences are small in magnitude and do not warrant sex-specific vaccination recommendations.

Comorbidities

Pre-existing health conditions also affect humoral immunity. Chronic illnesses such as **diabetes, obesity, cardiovascular disease, and chronic kidney disease** have been associated with diminished antibody responses to COVID-19 vaccines. Lin et al. (2022) demonstrated that patients with these comorbidities not only generated lower titers but also exhibited faster waning. Such findings are consistent with the increased COVID-19 severity observed in these groups.

Immunosuppression

Immunocompromised individuals represent a special challenge. Transplant recipients, cancer patients undergoing chemotherapy, and those on long-term immunosuppressive therapy frequently fail to achieve protective titers even after multiple vaccine doses (Andrews et al., 2022). These patients often require **additional booster doses**, heterologous vaccination strategies, or passive immunization (e.g., monoclonal antibodies) to maintain protection.

GENETIC DETERMINANTS

ABO blood groups

The role of ABO blood groups in COVID-19 susceptibility and vaccine response has been debated. Some studies suggest that individuals with **blood group O** have reduced risk of infection, while those with **group A** may face higher susceptibility (Liu et al., 2023; Al-Madani et al., 2023). However, these associations are inconsistent across populations, and evidence for an effect on vaccine-induced antibody responses is weak. Alavi et al. (2023) reported minor vaccine-specific differences: recipients of the AstraZeneca vaccine with blood type A displayed higher antibody rises, whereas blood type O was linked to more persistent responses in Sinopharm recipients.

Rhesus (Rh) factor

Evidence for the **Rh factor** is stronger. Alavi et al. (2023) observed significantly higher antibody responses in Rh-positive individuals across vaccine types. Musa et al. (2023) further reported that Rh-negative status was associated with higher mortality risk in COVID-19 patients. The mechanisms remain under investigation but may involve glycan-mediated immune modulation or differences in immune complex clearance.

Other genetic influences

Beyond ABO and Rh, emerging research points to broader **immunogenetic determinants**. The COVID-19 Host Genetics Initiative (2021) identified multiple genetic loci linked to COVID-19 severity, including variants in immune regulatory genes, interferon pathways, and HLA polymorphisms. These findings highlight that host genetics play an important role not only in susceptibility to severe infection but also potentially in shaping vaccine responsiveness. However, such associations remain preliminary and require confirmation in large, multi-ethnic cohorts.

GEORGIAN COHORT FINDINGS

A study of **175 plasma donors in Georgia (2022–2023)** provided regional evidence that aligns with and extends global findings.

- **Vaccination effect:** 81.9% of vaccinated individuals achieved protective antibody titers (≥ 1000 BAU/mL), compared with only 21.0% of unvaccinated donors (OR = 16.88, 95% CI: 8.54–33.37, $p < 0.001$).
- **Hybrid immunity:** 92.5% of participants with both prior infection and vaccination achieved protective titers, compared to 77.8% of vaccinated-only and 24.3% of infection-only groups (OR = 57.58 vs neither, $p < 0.001$).
- **Rh factor:** Rh-positive individuals showed significantly stronger protective responses than Rh-negative (57.7% vs 30.8%, $p = 0.011$).
- **ABO groups:** No statistically significant association was observed ($p = 0.374$).

These results confirm that vaccination and hybrid immunity remain the strongest predictors of protection in the Georgian population, while Rh factor may represent a novel genetic determinant of humoral response.

TABLE 1. Determinants of humoral immune response: global evidence vs Georgian cohort

Determinant	Global Evidence (selected sources)	Georgian Evidence
Waning immunity	VE falls from ~53% at 1 month → ~14% at 6 months (Andrews; Feikin; Tartof; Lin)	Decline observed in plasma donor data
Hybrid immunity	≥95% protection up to 11 months (Chemaitelly; Pilz; Harrison)	92.5% vs 77.8% vaccinated only
Age/comorbidities	Older adults, diabetes, obesity reduce responses (Goel; Griffin)	Not directly assessed
Sex	Females slightly higher titers (Goel)	Not studied
ABO group	Mixed findings; weak associations (Liu; Al-Madani)	No association (p = 0.374)
Rh factor	Rh+ stronger antibody rise (Alavi; Musa)	Rh+ 57.7% vs Rh– 30.8% (p = 0.011)

PUBLIC HEALTH IMPLICATIONS

The convergence of global evidence with Georgian cohort findings highlights several key implications for public health policy and vaccination strategy.

Booster timing

Because vaccine-induced antibody levels wane rapidly, timely **booster administration** is essential. Data suggest boosters may be required every **4–6 months** during periods of high transmission to sustain adequate protection against symptomatic infection. This is especially critical for populations at higher risk of severe disease, including older adults and individuals with chronic conditions.

Universal vaccination

Hybrid immunity data confirm that **all individuals benefit from vaccination**, regardless of prior infection history. Relying solely on natural infection provides incomplete and short-lived immunity. Universal vaccination should therefore remain a cornerstone of pandemic control strategies, even in countries with widespread prior exposure.

Targeted strategies

Certain groups may require **tailored approaches**. Elderly individuals, immunocompromised patients, and Rh-negative populations are more likely to exhibit reduced humoral responses. Strategies for these groups may include additional booster doses, closer serological monitoring, or alternative preventive measures such as monoclonal antibody prophylaxis.

Variant readiness

The rapid emergence of immune-evasive variants such as Omicron underscores the need for **variant-adapted vaccines**. Incorporating dominant strain antigens into updated boosters could improve the breadth and durability of protection.

Global equity

Disparities in vaccine access remain significant. Many low- and middle-income countries continue to face barriers in securing adequate supplies of primary and booster doses. Global coordination is needed to ensure equitable distribution, preventing immunity gaps that could foster new variant emergence.

RESEARCH GAPS AND FUTURE DIRECTIONS

Despite significant advances in understanding vaccine-induced immunity, important gaps remain:

1. Durability beyond 12 months

Most studies track antibody levels for up to a year, but longer-term data are scarce. Extended follow-up is needed to determine whether hybrid immunity or repeated boosters provide lasting protection across different populations.

2. Cellular immunity

Antibody titers are only one correlate of protection. More research is required on **T cell-mediated immunity** and memory B cell function, which likely underpin durable defense against severe disease even as antibody levels decline (Khoury et al., 2021).

3. Host genetics

While ABO and Rh have received attention, broader genetic studies are needed. Large, multi-ethnic cohorts with **genome-wide association studies (GWAS)** could clarify the roles of HLA polymorphisms, Fc receptor variants, and innate immunity genes in shaping vaccine response.

4. Variant-adapted vaccines

As new variants emerge, there is a need to evaluate the **efficacy and durability** of updated formulations. Research should assess whether variant-specific boosters provide broader and longer-lasting protection than existing platforms.

5. Population-specific data

Regional cohorts, such as the Georgian study, are vital for contextualizing global findings. Local epidemiology, infection history, and vaccine use patterns can significantly influence immune outcomes, emphasizing the need for **country-level research** to inform national policy.

CONCLUSIONS

Humoral immune responses after COVID-19 vaccination are shaped by a combination of temporal dynamics, prior infection, demographic and clinical factors, and host genetics. Vaccination remains the strongest predictor of protective antibody titers, while hybrid immunity provides the most robust and durable protection. Age, comorbidities, and immunosuppression significantly reduce vaccine responses, and the Rhesus (Rh) factor emerges as a potential genetic determinant.

In Georgia, plasma donor data confirm these trends: vaccination and hybrid immunity were the most powerful predictors of protective titers, while Rh positivity was associated with stronger

responses. These findings highlight the importance of **universal vaccination**, **timely booster campaigns**, and **targeted monitoring** of vulnerable groups. Integrating both global and local evidence will be essential for shaping effective, evidence-based immunization policies in the years ahead.

REFERENCES

- Alavi, S. M., Sadeghi, R., Shahrabi-Farahani, F., et al. (2023). Association between ABO/Rh blood group system and antibody responses to SARS-CoV-2 vaccination. *Journal of Medical Virology*, 95(12), e28918. <https://doi.org/10.1002/jmv.28918>
- Al-Madani, M., Alnasser, S., & Alghamdi, S. (2023). ABO and Rh blood groups in relation to COVID-19 susceptibility and severity: A comprehensive review. *Cureus*, 15(1), e33301. <https://doi.org/10.7759/cureus.33301>
- Andrews, N., Tessier, E., Stowe, J., et al. (2022). Duration of protection against mild and severe disease by COVID-19 vaccines. *New England Journal of Medicine*, 386(4), 340–350. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2115481>
- Chemaitelly, H., Ayoub, H. H., Coyle, P., et al. (2023). Protection from hybrid immunity against symptomatic SARS-CoV-2 infection and severe COVID-19: A systematic review and meta-regression. *The Lancet Infectious Diseases*, 23(5), 556–567. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(23\)00115-9](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(23)00115-9)
- COVID-19 Host Genetics Initiative. (2021). Mapping the human genetic architecture of COVID-19. *Nature*, 600(7889), 472–477. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03767-x>
- Feikin, D. R., Higdon, M. M., Abu-Raddad, L. J., et al. (2022). Duration of vaccine effectiveness against COVID-19: A systematic review and meta-regression. *The Lancet*, 399(10328), 924–944. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)00152-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)00152-0)
- Goel, R. R., Painter, M. M., Lundgreen, K. A., et al. (2021). Durable SARS-CoV-2 B cell immunity after mRNA vaccination. *Cell*, 184(5), 1201–1213. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.050>
- Griffin, S. (2023). COVID-19: Vaccine immunity against symptomatic infection wanes within months, review finds. *BMJ*, 380, p415. <https://doi.org/10.1136/bmj.p415>
- Harrison, A. G., Lin, T., & Wang, P. (2023). Mechanisms of SARS-CoV-2 immunity and the role of hybrid immunity in durable protection. *Nature Reviews Immunology*, 23(9), 555–568. <https://doi.org/10.1038/s41577-023-00890-4>

- Khoury, D. S., Cromer, D., Reynaldi, A., et al. (2021). Neutralizing antibody levels are highly predictive of immune protection from symptomatic SARS-CoV-2 infection. *Nature Medicine*, 27(7), 1205–1211. <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01377-8>
- Lin, D. Y., Gu, Y., Wheeler, B., et al. (2022). Effectiveness of COVID-19 vaccines over a 9-month period in North Carolina. *New England Journal of Medicine*, 386(10), 933–941. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2117128>
- Liu, Y., Ma, H., Zhang, Y., et al. (2023). ABO blood group and risk of COVID-19 infection: A systematic review and meta-analysis. *Transfusion Medicine and Hemotherapy*, 50(2), 82–91. <https://doi.org/10.1159/000529064>
- Musa, S., Al-Suwaidan, H., & Al-Qahtani, A. (2023). Rhesus blood group and COVID-19 outcomes: Evidence from a multi-center retrospective cohort. *Frontiers in Medicine*, 10, 1152371. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1152371>
- Pilz, S., Theiler-Schwetz, V., Trummer, C., et al. (2022). SARS-CoV-2 reinfections: Overview of efficacy and duration of natural and hybrid immunity. *Environmental Research*, 209, 112911. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112911>
- Pouwels, K. B., Pritchard, E., Matthews, P. C., et al. (2021). Waning of vaccine effectiveness against SARS-CoV-2 infection in the UK after two doses of BNT162b2 or ChAdOx1. *The Lancet*, 398(10310), 896–907. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02241-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02241-8)
- Tartof, S. Y., Slezak, J. M., Fischer, H., et al. (2021). Effectiveness of mRNA BNT162b2 COVID-19 vaccine up to 6 months in a large integrated health system in the USA: A retrospective cohort study. *The Lancet*, 398(10309), 1407–1416. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02183-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02183-8)
- Weinberger, B., Herndler-Brandstetter, D., Schwanninger, A., Weiskopf, D., & Grubeck-Loebenstien, B. (2008). Biology of immune responses to vaccines in elderly persons. *Clinical Infectious Diseases*, 46(7), 1078–1084. <https://doi.org/10.1086/529197>
- World Health Organization. (2022). *Global COVID-19 vaccination progress report*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-2019-nCoV-vaccines-progress-2022>

ენდომეტრიუმის ენდომეტროიდული კარცინომების რეციდივთან ასოცირებული კლინიკურ-მორფოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური თავისებურებები

ალექსანდრე დიაკონიძე¹; ნიკოლოზ კინტრიაა²; გიორგი ბურკაძე³ შოთა კეპულაძე⁴;
რიმა ბერიაშვილი⁵

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; მეან-გინეკოლოგი; ²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მეანობა-გინეკოლოგიის კათედრის პროფესორი; ³თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი; ⁴თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი; ⁵თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათანატომიური დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი

აბსტრაქტი

ენდომეტრიუმის კარცინომა ქალთა რეპროდუქციული სისტემის ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ ავთვისებიან სიმსივნეს წარმოადგენს. მიუხედავად იმისა, რომ დაბალი ხარისხის ენდომეტროიდული კარცინომები ჩვეულებრივ კეთილსაიმედო პროგნოზთან ასოცირდება, პაციენტთა ნაწილში ვითარდება ადგილობრივი ან დისტანციური რეციდივი. აღნიშნული ფაქტი მიუთითებს დამატებითი კლინიკურ-მორფოლოგიური და იმუნოფენოტიკური პროგნოსტიკური მარკერების შეფასების აუცილებლობაზე. კვლევის მიზანს წარმოადგენდა დაბალი ხარისხის ენდომეტროიდული ენდომეტრიული კარცინომების რეციდივთან ასოცირებული კლინიკურ-მორფოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური თავისებურებების შეფასება. კვლევა ჩატარდა რეტროსპექტიულ არქივულ მასალაზე. გამოყენებულ იქნა ფორმალინში ფიქსირებული და პარაფინში ჩაყალიბებული (FFPE) ენდომეტრიული სიმსივნური ქსოვილები, რომლებიც შეგროვდა 2018–2025 წლებში. ანალიზისთვის შერჩეულ იქნა დაბალი ხარისხის ენდომეტროიდული კარცინომები და შემთხვევები დაიყო არარეციდივირებულ და რეციდივირებულ ჯგუფებად. შეფასდა კლინიკურ-მორფოლოგიური პარამეტრები, მათ შორის FIGO სტადია, მიომეტრიუმის ინვაზია, ლიმფოვასკულური ინვაზია (LVSI) და დაავადებისგან თავისუფალი პერიოდი (DFS). იმუნოჰისტოქიმიური კვლევა შესრულდა ER, PR, Ki67 და p53 მარკერების გამოყენებით. ციფრული ანალიზი განხორციელდა whole-slide imaging სისტემისა და QuPath/ImageJ

პროგრამული უზრუნველყოფის დახმარებით. კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ რეციდივირებული კარცინომები უფრო ხშირად ასოცირდებოდა ღრმა მიომეტრიულ ინვაზიასთან, ვრცელ LVSI-სთან და მოკლე DFS-თან. არარეციდივირებულ ჯგუფში შენარჩუნებული იყო მაღალი ER და PR ექსპრესია, მაშინ როდესაც რეციდივირებულ სიმსივნეებში აღინიშნებოდა ჰორმონული რეცეპტორების შემცირებული ექსპრესია. Ki67-ის პროლიფერაციული ინდექსი მნიშვნელოვნად მაღალი იყო რეციდივირებულ შემთხვევებში. p53-ის აბერანტული ექსპრესია უფრო ხშირად ფიქსირდებოდა აგრესიული კლინიკური მიმდინარეობის მქონე სიმსივნეებში. ყოველივე აღნიშნულის საფუძველზე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული ენდომეტრიული კარცინომების რეციდივი ასოცირდება სპეციფიკურ კლინიკურ-მორფოლოგიურ და იმუნოფენოტიპურ ცვლილებებთან, მათ შორის ღრმა ინვაზიასთან, LVSI-სთან, ჰორმონული რეცეპტორების დაკარგვასთან, მაღალი პროლიფერაციული აქტივობასთან და p53-ის აბერანტულ ექსპრესიასთან. აღნიშნული მარკერების კომპლექსურმა შეფასებამ შესაძლოა ხელი შეუწყოს მაღალი რისკის მქონე პაციენტების უფრო ზუსტ იდენტიფიკაციას.

საკვანძო სიტყვები: ენდომეტრიუმის კარცინომა; ენდომეტრიოიდული კარცინომა; რეციდივი; ER; PR; Ki67; p53; იმუნოჰისტოქიმია; ციფრული პათოლოგია; პროგნოზი;

შესავალი

ენდომეტრიუმის კარცინომა წარმოადგენს ქალთა რეპროდუქციული სისტემის ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ ავთვისებიან სიმსივნეს და მისი სიხშირე ბოლო ათწლეულებში მსოფლიოს მასშტაბით მნიშვნელოვნად იზრდება.¹ განსაკუთრებით აღსანიშნავია დაავადების ზრდა პოსტმენოპაუზურ ასაკში, რაც მნიშვნელოვან კავშირშია სიმსუქნესთან, მეტაბოლურ სინდრომთან, შაქრიან დიაბეტთან და ჰორმონულ დისბალანსთან.^{2,3} თანამედროვე კლასიფიკაციის მიხედვით, ენდომეტრიუმის კარცინომები ჰისტოლოგიურად და მოლეკულურად ჰეტეროგენულ ჯგუფს წარმოადგენს, თუმცა ყველაზე გავრცელებულ ფორმად ენდომეტრიოიდული ტიპის კარცინომა მიიჩნევა.⁴

დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომები ტრადიციულად შედარებით კეთილსაიმედო პროგნოზთან ასოცირდება, რადგან შემთხვევათა უმეტესობაში ისინი დიაგნოსტირდება ადრეულ სტადიებზე და ინარჩუნებს ჰორმონდამოკიდებულ ფენოტიპს. ⁵⁻⁷მიუხედავად ამისა, პაციენტთა გარკვეულ ნაწილში დაავადება მაინც პროგრესირებს და ვითარდება ადგილობრივი ან დისტანციური რეციდივი, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ მხოლოდ კლასიკური ჰისტოლოგიური შეფასება ყოველთვის ვერ ასახავს სიმსივნის რეალურ ბიოლოგიურ აგრესიულობას. სწორედ ამიტომ, ბოლო წლებში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ისეთი კლინიკურ-მორფოლოგიური და

იმუნოფენოტიპური პარამეტრების იდენტიფიცირებას, რომლებიც შესაძლოა რეციდივის პროგნოზირების დამატებით საშუალებად იქცეს.⁸⁻¹⁰

მიომეტრიუმის ინვაზიის სიღრმე, ლიმფოვასკულური ინვაზია (LVSI), FIGO სტადია და სიმსივნის ხარისხი დღემდე რჩება პროგნოსტიკური შეფასების ძირითად კომპონენტებად. თუმცა თანამედროვე კვლევები მიუთითებს, რომ სიმსივნის ბიოლოგიური ქცევის განსაზღვრისთვის მნიშვნელოვანი როლი აქვს იმუნოჰისტოქიმიურ მარკერებსაც.¹¹⁻¹³ განსაკუთრებით საინტერესოა ჰორმონული რეცეპტორების, ესტროგენის რეცეპტორის (ER) და პროგესტერონის რეცეპტორის (PR) შეფასება, რადგან მათი ექსპრესიის შემცირება ხშირად ასოცირდება სიმსივნის დედიფერენცირებასთან და აგრესიულ მიმდინარეობასთან. გარდა ამისა, Ki67-ის მაღალი პროლიფერაციული ინდექსი მიუთითებს უჯრედული ციკლის აქტივაციაზე და დაკავშირებულია არასახარბიელო პროგნოზთან, ხოლო p53-ის აბერანტული ექსპრესია შეიძლება ასახავდეს გენომურ არასტაბილურობას და სიმსივნის პროგრესირების მაღალ პოტენციალს.¹¹⁻¹³

ბოლო წლებში მნიშვნელოვნად გაიზარდა ციფრული პათოლოგიის როლი ონკოლოგიურ კვლევებში. Whole-slide imaging (WSI) ტექნოლოგიებისა და ციფრული ანალიზის პროგრამების გამოყენება შესაძლებელს ხდის იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის უფრო სტანდარტიზებულ, ობიექტურ და რეპროდუცირებად შეფასებას. ციფრული პათოლოგია განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სიმსივნური პეტეროგენულობის შეფასებისას, რაც თანამედროვე ონკოპათოლოგიის ერთ-ერთ ყველაზე აქტუალურ მიმართულებად მიიჩნევა.

მიუხედავად არსებული პროგრესისა, დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომების რეციდივთან დაკავშირებული მრავალი საკითხი კვლავ არასრულად არის შესწავლილი. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ისეთი შემთხვევების იდენტიფიცირება, რომლებიც მორფოლოგიურად ნაკლებად აგრესიულად გამოიყურება, თუმცა შემდგომში ავლენს პროგრესირებისა და რეციდივის უნარს. აღნიშნული გარემოებები განაპირობებს დამატებითი კლინიკურ-მორფოლოგიური და იმუნოფენოტიპური კვლევების აუცილებლობას.

წინამდებარე კვლევის მიზანს წარმოადგენს დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული ენდომეტრიული კარცინომების რეციდივთან ასოცირებული კლინიკურ-მორფოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური თავისებურებების შეფასება, ER, PR, Ki67 და p53 მარკერების გამოყენებით, აგრეთვე ციფრული პათოლოგიის შესაძლებლობების ინტეგრირება სიმსივნის პროგნოსტიკური პროფილის უფრო ზუსტი განსაზღვრისათვის.

კვლევის მასალა და მეთოდები

კვლევა წარმოადგენს რეტროსპექტულ-დაკვირვებით კოჰორტულ კვლევას, რომელიც ჩატარდა თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიის დეპარტამენტისა და მასთან ასოცირებული მრავალპროფილური კლინიკების არქივულ მასალაზე, ფორმალინით ფიქსირებულ, პარაფინში ჩაყალიბებულ (FFPE) ქსოვილის არაპერსონიფიცირებული ნიმუშების გამოყენებით. ენდომეტრიუმის ეპითელური სიმსივნეების ბლოკები, შეგროვდა 2018–2025 წლებში. კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ენდომეტრიუმის ენდომეტროიდული კარცინომების რეციდივთან ასოცირებული კლინიკურ-მორფოლოგიური და იმუნოჰენოტიპური თავისებურებების შეფასება.

კვლევაში თავდაპირველად შეტანილი იყო 57 ენდომეტრიული დაზიანება, შემთხვევები დაიყო ორ ძირითად ჯგუფად: არარეციდივირებული და რეციდივირებული ენდომეტროიდული კარცინომები. რეციდივირებულ ჯგუფში შედიოდა პირველადი სიმსივნური ქსოვილები იმ პაციენტებიდან, რომლებშიც შემდგომ კლინიკურ დაკვირვებაში დაფიქსირდა ადგილობრივი ან დისტანციური რეციდივი. კვლევიდან გამოირიცხა არასაკმარისად შენარჩუნებული ქსოვილები, ძლიერი არტეფაქტების მქონე პრეპარატები, სეროზული კარცინომები, მეტასტაზური ქსოვილები, აგრეთვე ენდომეტრიუმის ჰიპერპლაზიები და EIN-დაზიანებები, რომლებიც არ შედიოდა მოცემული სტატიის ძირითად შედარებით ანალიზში.

არქივული დოკუმენტაციიდან და პათოლოგიური დასკვნებიდან შეგროვდა პაციენტების კლინიკური და მორფოლოგიური მონაცემები, მათ შორის ასაკი, სხეულის მასის ინდექსი (BMI), მენოპაუზური სტატუსი, თანმხლები მეტაბოლური დაავადებები, FIGO სტადია, სიმსივნის ხარისხი, მიომეტრიუმის ინვაზიის სიღრმე, ლიმფოვასკულური ინვაზიის (LVSI) არსებობა, რეციდივის სტატუსი, დაკვირვების ხანგრძლივობა და დაავადებისგან თავისუფალი პერიოდი (DFS). ჰისტოლოგიური შეფასება განხორციელდა ჰემატოქსილინ-ეოზინით შეღებილ პრეპარატებზე WHO-ის კლასიფიკაციისა და FIGO-ს თანამედროვე კრიტერიუმების შესაბამისად.

იმუნოჰისტოქიმიური კვლევა შესრულდა Leica-ს პლატფორმაზე სტანდარტიზებული პროტოკოლების გამოყენებით. გამოყენებულ იქნა შემდეგი ანტისხეულები: Estrogen Receptor (ER), Progesterone Receptor (PR), Ki67 და p53. იმუნოჰისტოქიმიური რეაქცია ვიზუალიზებული იქნა DAB ქრომოგენის გამოყენებით. ყველა შემთხვევა შეფასდა შესაბამისი პოზიტიური და ნეგატიური კონტროლების ფონზე.

ER და PR ექსპრესია შეფასდა H-score სისტემით, რომელიც ითვალისწინებდა როგორც შეღებვის ინტენსივობას, ასევე პოზიტიური უჯრედების პროცენტულ მაჩვენებელს. H-score-ის დიაპაზონი მერყეობდა 0-დან 300-მდე. Ki67 შეფასდა როგორც პოზიტიური ბირთვების პროცენტული რაოდენობა ყველაზე აქტიურ („hotspot“) უბნებში. p53 ექსპრესია კლასიფიცირდა wild-type, diffuse overexpression და null-pattern ტიპებად.

პრეპარატების სრული ციფრული სკანირება განხორციელდა Motic-ის whole-slide imaging სისტემის გამოყენებით. მიღებული ციფრული გამოსახულებები გაანალიზდა QuPath-ისა და ImageJ-ის პროგრამული უზრუნველყოფების დახმარებით. ციფრული ანალიზის ფარგლებში შეფასდა იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის ინტენსივობა, H-score, Ki67-ის პროცენტული მაჩვენებელი და სიმსივნური ჰეტეროგენულობის ხარისხი.

სტატისტიკური ანალიზი განხორციელდა SPSS პროგრამის გამოყენებით. რაოდენობრივი მონაცემები წარმოდგენილი იყო საშუალო მნიშვნელობისა და სტანდარტული გადახრის ($\text{Mean} \pm \text{SD}$) სახით. ჯგუფებს შორის განსხვავებების შეფასებისთვის გამოყენებულ იქნა Mann–Whitney U ტესტი, ხოლო კატეგორიული ცვლადების შედარება განხორციელდა χ^2 (Chi-square) ტესტით. დაავადებისგან თავისუფალი გადარჩენის (DFS) ანალიზისთვის გამოყენებულ იქნა Kaplan–Meier-ის მეთოდი და log-rank ტესტი. $p < 0.05$ მიიჩნეოდა სტატისტიკურად სარწმუნოდ.

კვლევის შედეგები

კვლევის მონაცემთა ბაზა მოიცავდა სულ 57 შემთხვევას. კვლევის კოჰორტაში შედიოდა პირველადი დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომა, რომლებიც კლინიკური შედეგების მიხედვით კატეგორიზებული იყო მორეციდივე და არარეციდიველ ჯგუფებად.

რეციდიველი სიმსივნეების მქონე პაციენტებმა ზოგადად ნაკლებად ხელსაყრელი კლინიკურ-პათოლოგიური მახასიათებლები აჩვენეს არარეციდიველ კოჰორტასთან შედარებით. მორეციდივე კარცინომა უფრო ხშირად გამოვლინდა ხანდაზმულ პოსტმენოპაუზურ ქალებში, რომლებსაც აღენიშნებოდათ სიმსუქნესთან დაკავშირებული მეტაბოლური დაავადებები, მათ შორის შაქრიანი დიაბეტი და ჰიპერტენზია. ჰისტოპათოლოგიურმა გამოკვლევამ აჩვენა, რომ არარეციდიველი სიმსივნეები უპირატესად FIGO სტადიის IA დაზიანებები იყო მიომეტრიუმის ზედაპირული ინვაზიით, რომელიც მოიცავდა მიომეტრიუმის სისქის 50%-ზე ნაკლებს. ამის საპირისპიროდ, მორეციდივე სიმსივნეებში უფრო ხშირად ავლენდნენ FIGO სტადიის IB დაავადებას და ღრმა მიომეტრიუმის ინვაზიას, რომელიც 50%-ს აღემატებოდა.

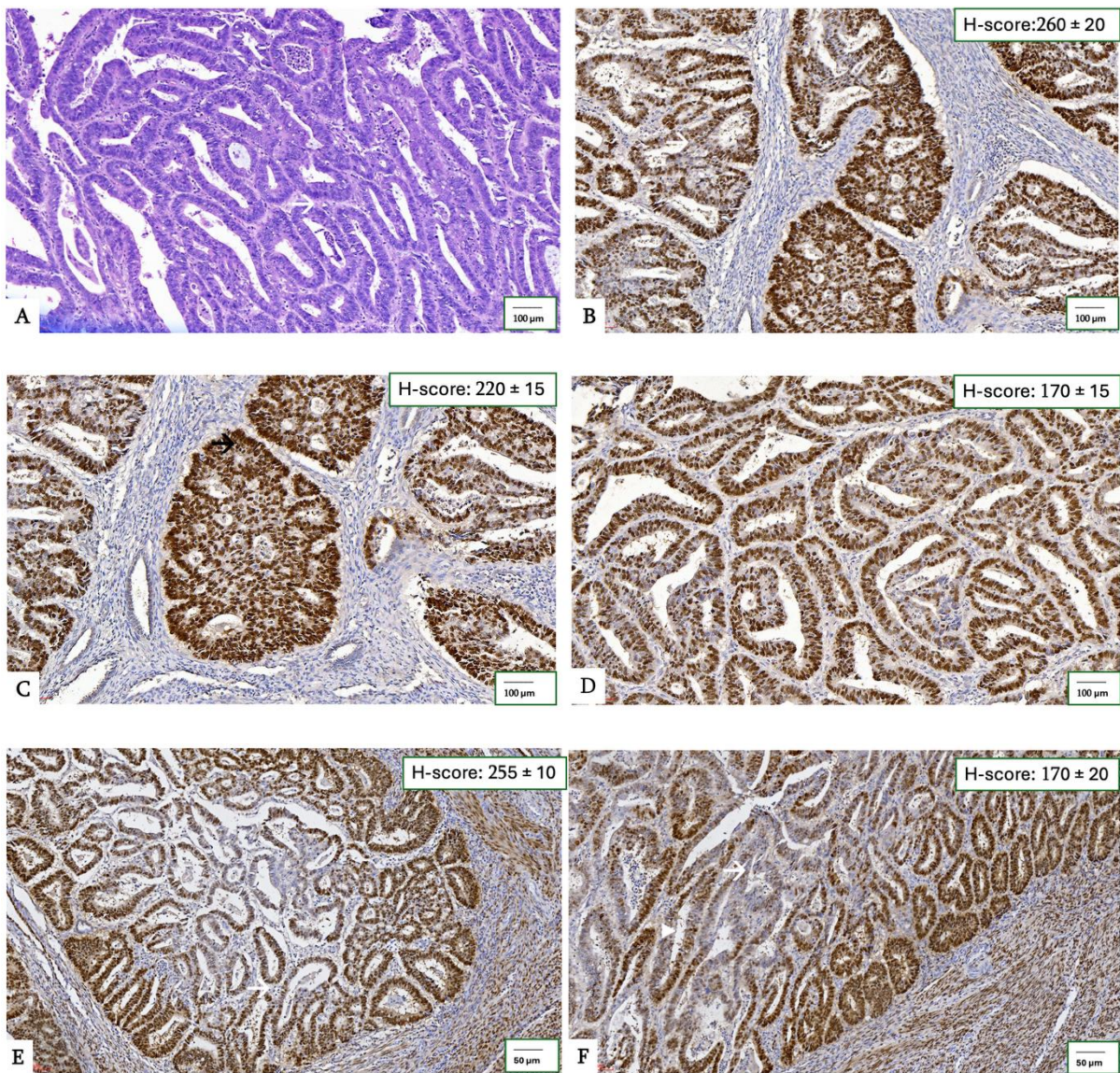
ლიმფოვასკულური სივრცის ინვაზიამ ასევე აჩვენა მკაფიო განსხვავებები ჯგუფებს შორის. უმეტეს შემთხვევაში, არარეციდიველ სიმსივნეებს არ აღენიშნებოდათ LVSI ან ავლენდნენ მხოლოდ ფოკალურ ჩართულობას, მაშინ როდესაც მორეციდივე კარცინომებს უფრო ხშირად აღენიშნებოდათ ფართო ლიმფოვასკულური ინვაზია. რუტინული ჰემატოქსილინ-ეოზინის გამოკვლევისას, მორეციდივე სიმსივნეებმა

დამატებით აჩვენეს არქიტექტურული დარღვევების მომატება და ინფილტრაციული საზღვრების გაძლიერება.

პარამეტრი	არარეციდივირებული სიმსივნეები	რეციდივირებული სიმსივნეები
ასაკი	შედარებით ახალგაზრდა პაციენტები	უფრო ხანდაზმული პაციენტები
მენოპაუზური სტატუსი	უმეტესად პოსტმენოპაუზური	უმეტესად პოსტმენოპაუზური
BMI	ზომიერი სიმსუქნე	გამოხატული სიმსუქნე
FIGO სტადია	ძირითადად IA	ძირითადად >IB
სიმსივნის ხარისხი	ძირითადად G1	უფრო ხშირად G2
მიომეტრიუმის ინვაზია	<50%	>50%
LVI	არ არის ან ფოკალური	ხშირია ვრცელი
რეციდივი	არ აღინიშნება	აღინიშნება
DFS	გახანგრძლივებული	შემცირებული

ცხრილი 9. არარეციდივირებული და რეციდივირებული დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომების კლინიკურ-მორფოლოგიური მახასიათებლები

ჰორმონალური რეცეპტორების ანალიზმა გამოავლინა ესტროგენის და პროგესტერონის რეცეპტორების ექსპრესიის მნიშვნელოვანი შემცირება მორეციდივე სიმსივნეებში. არარეციდივულ კარცინომებს ზოგადად შენარჩუნებული ჰქონდათ ძლიერი დიფუზური ER და PR დადებითობა ჯირკვლოვანი ტიპის ჰორმონალური ფენოტიპის შენარჩუნებით. ამის საპირისპიროდ, მორეციდივე სიმსივნეებს აღენიშნებოდათ შეღებვის ინტენსივობის შემცირება და იმუნოჰისტოქიმიური სიმსივნური უჯრედების პროპორციის შემცირება. PR ექსპრესიის შემცირება უფრო გამოხატული იყო, ვიდრე ER-ის დაკარგვა რამდენიმე მორეციდივე შემთხვევაში.



სურათი 6. მორეციდივე და არარეციდივული დაბალი ხარისხის ენდომეტრიუმის ენდომეტრიოიდული კარცინომების ჰისტოპათოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური მახასიათებლები. (A) ჰემატოქსილინითა და ეოზინით (H&E) შეღებვა, რომელიც აჩვენებს კარგად დიფერენცირებულ ენდომეტრიოიდულ ჯირკვლოვან არქიტექტურას შედარებით შენარჩუნებული მორფოლოგიით არარეციდივულ შემთხვევაში ($\times 200$). (B) ესტროგენის რეცეპტორის (ER) ძლიერი დიფუზური ექსპრესია არარეციდივულ კარცინომაში მაღალი H-ქულით (ER IHC, $\times 200$). (C) პროგესტერონის რეცეპტორის (PR) შენარჩუნებული ექსპრესია არარეციდივულ სიმსივნეში (PR IHC, $\times 200$). (D) ER-ის შემცირებული ექსპრესია მორეციდივე ენდომეტრიოიდულ კარცინომაში, რომელიც აჩვენებს ჰორმონალური რეცეპტორების დადებითობის შემცირებას (ER IHC, $\times 200$). (E) Ki67 პროლიფერაციული ინდექსი რეციდივულ სიმსივნეში (Ki67 IHC, $\times 200$). (F) Ki67-ის პროლიფერაციული აქტივობა არარეციდივულ კარცინომაში დიფუზური ბირთვული დადებითობით (Ki67 IHC, $\times 200$).

მარკერი	არარეციდივირებული ჯგუფი	რეციდივირებული ჯგუფი
ER ექსპრესია	მაღალი	შემცირებული
PR ექსპრესია	ძლიერი დიფუზური	მნიშვნელოვნად შემცირებული
Ki67	დაბალი/საშუალო	მაღალი
p53	Wild-type	ხშირია overexpression
ჰორმონდამოკიდებული ფენოტიპი	შენარჩუნებული	დაკარგული

ცხრილი 10. ჰორმონული და პროლიფერაციული მარკერების ექსპრესია;

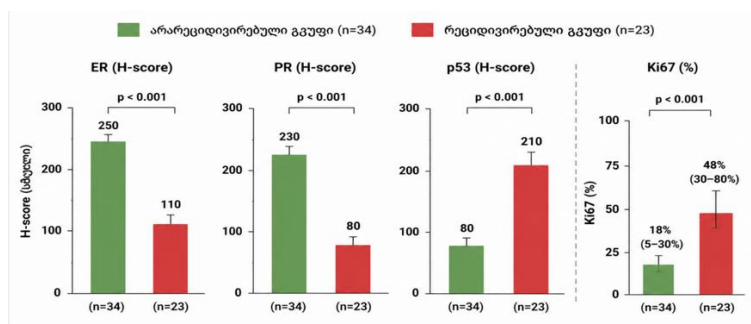
პროლიფერაციული აქტივობის შეფასებამ აჩვენა Ki67 ინდექსების მნიშვნელოვნად გაზრდა მორეციდივე კარცინომებში. არარეციდივულ სიმსივნეებს აღენიშნებოდათ შედარებით დაბალი პროლიფერაციული აქტივობა დაბალიდან საშუალომდე Ki67 ექსპრესიის ნიმუშებით, მაშინ როდესაც მორეციდივე სიმსივნეებს აღენიშნებოდათ მნიშვნელოვნად მომატებული პროლიფერაციული აქტივობა დიფუზური ბირთვული შეღებვით.

მახასიათებელი განსხვავებები ასევე დაფიქსირდა p53-ის ექსპრესიის ტიპებში. არარეციდივული დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომების უმეტესობამ შეინარჩუნა ველური ტიპის/ბუნებრივი ტიპის p53 შეღებვა, რომელიც ხასიათდება ჰეტეროგენული ცვლადი ბირთვული დადებითობით. მორეციდივე სიმსივნეებმა კი უფრო ხშირად აჩვენეს აბერანტული შეღებვის ნიმუშები, მათ შორის დიფუზური ძლიერი ზედმეტად ექსპრესია, რაც მიუთითებს რეციდივსა და მოლეკულურ არასტაბილურობას შორის კავშირზე.

დაკვირვების მონაცემების შედარებამ აჩვენა დაავადებისგან თავისუფალი გადარჩენის გახანგრძლივება არარეციდივულ კოჰორტაში, მაშინ როდესაც მორეციდივე სიმსივნეებმა აჩვენეს რეციდივისგან თავისუფალი უფრო მოკლე ინტერვალები, რამდენიმე შემთხვევაში კი რეციდივი ადრეული დაკვირვების პერიოდებში. შორეული რეციდივის ნიმუშები უფრო ხშირად დაფიქსირდა სიმსივნეებში, რომლებიც ავლენდნენ ღრმა მიომეტრიულ ინვაზიას, ფართო LVSI-ს, მომატებულ Ki67 ინდექსებს და შემცირებულ ჰორმონალური რეცეპტორების ექსპრესიას.

პარამეტრი	დაბალი რისკი	მაღალი რისკი
FIGO სტადია	IA	≥IB
მიომეტრიუმის ინვაზია	<50%	>50%
LVSI	უარყოფითი	ვრცელი
Ki67	დაბალი	მაღალი
ER/PR	შენარჩუნებული	შემცირებული
p53	Wild-type	აბერანტული

ცხრილი 11. რეციდივთან ასოცირებული ძირითადი პროგნოსტიკური პარამეტრები;



დიაგრამა 1. იმუნოჰისტოქიმიური მარკერების ექსპრესიის შედარება;

საერთო ჯამში, მორეციდივე დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდულმა კარცინომებმა აჩვენეს კოორდინირებული კლინიკურ-პათოლოგიური ფენოტიპი, რომელიც ხასიათდება მიომეტრიუმში უფრო ღრმა ინვაზიით, ლიმფოვასკულური ჩართულობის გაზრდით, ჰორმონალური რეცეპტორების ექსპრესიის დაკარგვით, მომატებული პროლიფერაციული აქტივობით და უფრო ხშირი აბერანტული p53 იმუნოფენოტიპებით, არარეციდივულ სიმსივნეებთან შედარებით. ეს დასკვნები ადასტურებს დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომების მორფოლოგიური და იმუნოფენოტიპური შეფასების კომბინირებულ პროგნოზულ მნიშვნელობას რეციდივის გაზრდილი რისკის იდენტიფიცირებაში.

კვლევის შედეგების ანალიზი

ენდომეტრიუმის კარცინომა განვითარებულ ქვეყნებში ყველაზე გავრცელებულ გინეკოლოგიურ ავთვისებიან სიმსივნედ რჩება და მიუხედავად იმისა, რომ დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომა ზოგადად ხელსაყრელ პროგნოზთან ასოცირდება, კლინიკურად მნიშვნელოვანი ქვეჯგუფი ავლენს რეციდივის მიმართ ტენდენციას. შესაბამისად, რეციდივთან დაკავშირებული მორფოლოგიური და იმუნოჰენოტიპური პროგნოზის ფაქტორების იდენტიფიცირება უაღრესად აქტუალური რჩება ინდივიდუალური რისკის სტრატეგიკაციისა და ოპერაციის შემდგომი მართვისთვის. ჩვენს კვლევაში, მორეციდივე დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდულმა კარცინომებმა აჩვენეს კოორდინირებული კლინიკურ-პათოლოგიური და იმუნოჰენოტიპური ცვლილებები, რომლებიც ხასიათდება მიომეტრიუმში უფრო ღრმა ინვაზიით, ლიმფოვასკულური სივრცის ინვაზიის გაზრდით, ჰორმონალური რეცეპტორების ექსპრესიის შემცირებით, პროლიფერაციული აქტივობის მომატებით და p53 იმუნოჰენოტიპების უფრო ხშირი აბერანტული გამოვლინებით, არარეციდივულ სიმსივნეებთან შედარებით.

ამ კვლევის ერთ-ერთი ყველაზე თვალსაჩინო დასკვნა იყო რეციდივსა და აგრესიულ ადგილობრივ ინვაზიურ მახასიათებლებს შორის კავშირი. მორეციდივე სიმსივნეებმა უფრო ხშირად აჩვენეს ღრმა მიომეტრიუმში ინვაზია და ფართო LVSI, რომლებიც ორივე ენდომეტრიუმის კარცინომის კარგად დადასტურებული უარყოფითი პროგნოზული ფაქტორებია. წინა კვლევებმა არაერთხელ აჩვენა, რომ მიომეტრიუმში 50%-ზე მეტი ინვაზია მნიშვნელოვნად ზრდის ლიმფურ კვანძებში დისემინაციისა და რეციდივის რისკს. ანალოგიურად, LVSI ასახავს სისხლძარღვთა დისემინაციის გაზრდილ ბიოლოგიურ შესაძლებლობას და არაერთხელ იქნა ჩართული თანამედროვე პროგნოზული რისკის მოდელებსა და ESGO/ESTRO/ESP კლასიფიკაციებში.¹⁴⁻¹⁶ ჩვენი კვლევის შედეგად მიღებული მონაცემები ასევე ამყარებს არსებულ მტკიცებულებებს, რომლებიც მიუთითებს, რომ ჰისტოლოგიურად დაბალი ხარისხის სიმსივნეებმაც კი შეიძლება აჩვენონ აგრესიული კლინიკური ქცევა.

ჰორმონალური რეცეპტორების ანალიზმა დამატებით გამოავლინა ER და PR ექსპრესიის მნიშვნელოვანი შემცირება მორეციდივე სიმსივნეებში. ენდომეტრიოიდული კარცინომა ტრადიციულად განიხილება, როგორც ჰორმონდამოკიდებული ნეოპლაზია და შენარჩუნებული ER/PR ექსპრესია ზოგადად ასოცირდება ხელსაყრელ დიფერენციაციასთან და გაუმჯობესებულ პროგნოზთან. ჩვენს ამჟამინდელ კოჰორტაში, არარეციდივულმა სიმსივნეებმა შეინარჩუნეს ჰორმონური რეცეპტორების ძლიერი დადებითობა, ხოლო მორეციდივე დაზიანებებმა აჩვენა რეცეპტორების ექსპრესიის მნიშვნელოვანი შემცირება, განსაკუთრებით PR. მსგავსი დაკვირვებები დაფიქსირდა მრავალ წინა კვლევაში, რაც აჩვენებს, რომ PR ექსპრესიის დაკარგვა კორელაციაშია ბიოლოგიური აგრესიულობის ზრდასთან, ჰორმონალური რეგულირებისადმი წინააღმდეგობასთან და რეციდივის რისკის ზრდასთან. PR-ის დაკარგვა, შესაბამისად,

შეიძლება წარმოადგენდეს დედიფერენციაციის და ენდომეტრიოიდული ფენოტიპის სტაბილურობის პროგრესული დაკარგვის ადრეულ ინდიკატორს.¹⁷

ჩვენი კვლევის შედეგებმა ასევე აჩვენა მნიშვნელოვნად გაზრდილი პროლიფერაციული აქტივობა მორეციდივე კარცინომებში, რაც აისახება Ki67 პროლიფერაციული ინდექსების მომატებაში. Ki67 არის ენდომეტრიუმის პათოლოგიაში პროლიფერაციასთან დაკავშირებული ერთ-ერთი ყველაზე ფართოდ შესწავლილი ბიომარკერი და გაზრდილი ექსპრესია ასოცირდება უფრო მაღალი ხარისხის, მოწინავე სტადიასთან და არახელსაყრელ პროგნოზთან. მიმდინარე კოჰორტაში მორეციდივე სიმსივნეებმა აჩვენა დიფუზური ბირთვული დადებითობა, რომელიც მოიცავდა სიმსივნის ფართო რეგიონებს, ხოლო არარეციდივულმა დაზიანებებმა აჩვენა შედარებით დაბალი პროლიფერაციული ფრაქციები.

p53 იმუნოფენოტიპების ექსპრესიის აბერანტული ფორმები უფრო ხშირად დაფიქსირდა მორეციდივე სიმსივნეებში. მიუხედავად იმისა, რომ TP53 ანომალიები კლასიკურად ასოცირდება სეროზულ კარცინომასთან, სულ უფრო მეტი მტკიცებულება მიუთითებს, რომ მორფოლოგიურად ენდომეტრიოიდული სიმსივნეების ქვეჯგუფები, რომლებიც აბერანტულ p53 ექსპრესიას ავლენენ, შეიძლება უფრო აგრესიულად იქცეოდნენ. ამჟამინდელი დაკვირვებები შეესაბამება თანამედროვე მოლეკულურ კლასიფიკაციებს, რომლებიც ხაზს უსვამენ TP53 ცვლილებების პროგნოზულ მნიშვნელობას ენდომეტრიუმის კარცინომაში. დაბალი ხარისხის სიმსივნეებშიც კი, p53 აბერანტულმა ექსპრესიამ შეიძლება გამოავლინოს ბიოლოგიურად არასტაბილური ნეოპლაზიები გაზრდილი რეციდივის პოტენციალით.^{18,19}

საერთო ჯამში, კვლევის დასკვნები მიუთითებს, რომ დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომის რეციდივი დაკავშირებულია კოორდინირებულ მორფოლოგიურ და იმუნოფენოტიპურ ცვლილებებთან, რომლებიც მოიცავს ინვაზიურ ზრდას, ჰორმონალური რეცეპტორების დაკარგვას, პროლიფერაციულ აქტივობას და p53 ექსპრესიის დარღვევას. ეს დაკვირვებები ადასტურებს ჰისტოპათოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური შეფასების კომბინირებულ მნიშვნელობას პოტენციურად აგრესიული კლინიკური ქცევის მქონე სიმსივნეების იდენტიფიცირებისთვის, შედარებით დაბალი ჰისტოლოგიური ხარისხის მიუხედავად.

დასკვნა

ჩვენი კვლევის შედეგების საფუძველზე შესაძლოა დავასკვნათ, რომ ენდომეტრიუმის ენდომეტრიოიდული კარცინომების მორეციდივე ჯგუფი არარეციდივულ სიმსივნეებთან შედარებით ავლენდა კლინიკურ-პათოლოგიურ და იმუნოფენოტიპურ ჰეტეროგენულობას. რეციდივი დაკავშირებული იყო მიომეტრიუმში უფრო ღრმა ინვაზიასთან, ლიმფოვასკულური სივრცის ფართო ინვაზიასთან, ER და PR ექსპრესიის შემცირებასთან, Ki67 პროლიფერაციული აქტივობის მომატებასთან და p53

იმუნოფენოტიპების უფრო ხშირ აბერანტულ ექსპრესიის ტიპებთან. ეს მონაცემები მიუთითებს, რომ მორფოლოგიურად დაბალი ხარისხის ენდომეტრიოიდული კარცინომების ქვეჯგუფს გააჩნია ბიოლოგიურად აგრესიული მახასიათებლები, რომლებიც შესაძლოა სრულად არ აისახოს მხოლოდ ტრადიციული ჰისტოლოგიური კლასიფიკაციაში, რის გამოც მორფოლოგიური პარამეტრების ინტეგრირებულმა შეფასებამ იმუნოჰისტოქიმიურ ბიომარკერებთან ერთად შეიძლება გააუმჯობესოს რეციდივის გაზრდილი რისკის მქონე პაციენტების იდენტიფიცირება და ხელი შეუწყოს უფრო ინდივიდუალურ პროგნოზულ სტრატეგიკას. ამ მონაცემების დასადასტურებლად და კლინიკური გამოყენებისთვის რეპროდუცირებადი პროგნოზული მოდელების შესაქმნელად საჭიროა უფრო ფართომასშტაბიანი მულტიცენტრული კვლევები გაფართოებული კოჰორტებით და გრძელვადიანი დაკვირვებით.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Morice P, Leary A, Creutzberg C, Abu-Rustum N, Darai E. Endometrial cancer. The Lancet 2016; 387(10023):1094–1108.
2. Jones ER, O’Flynn H, Njoku K, Crosbie EJ. Detecting endometrial cancer. The Obstetrician & Gynaecologist 2021; 23(2):103–112.
3. Makker V, MacKay H, Ray-Coquard I, et al. Endometrial cancer. Nat Rev Dis Primers 2021; 7(1).
4. Amant F, Moerman P, Neven P, Timmerman D, Limbergen E Van, Vergote I. Endometrial cancer. Lancet 2005; 366(9484):491–505.
5. Uharček P. Prognostic factors in endometrial carcinoma. Journal of Obstetrics and Gynaecology Research 2008; 34(5):776–783.
6. Bokhman J V. Two pathogenetic types of endometrial carcinoma. Gynecol Oncol 1983; 15(1):10–17.
7. Getz G, Gabriel SB, Cibulskis K, et al. Integrated genomic characterization of endometrial carcinoma. Nature 2013; 497(7447):67–73.
8. Zhorzholiani, P., Bokhua, Z., Kepuladze, S., & Burkadze, G. (2025). Assessment of FOXP3+ Expression in Endometrial Precancerous and Neoplastic Lesions: A Comparative Study of Immune Microenvironment Dynamics. Georgian Scientists, 7(1), 50–63. <https://doi.org/10.52340/gS.2025.07.01.06>

9. Zhorzholiani, P., Bokhua, Z., Kepuladze, S., & Burkadze, G. (2025). The Role of M1 and M2 Macrophages in the Progression of Endometrial Hyperplasia to Endometrioid Adenocarcinoma. *Georgian Scientists*, 7(1), 24–37.
<https://doi.org/10.52340/gs.2025.07.01.04>
10. Turashvili, T., Tevdorashvili, G., Tevzadze, N., Kepuladze, S., & Burkadze, G. (2024). Features of epithelial-mesenchymal transformation and distribution of stem cells during Endometrial ciliary/tubal metaplasia. *Georgian Scientists*, 6(2), 178–194.
<https://doi.org/10.52340/gs.2024.06.02.17>
11. Turashvili, T., Tevdorashvili, G., Tevzadze, N., Kepuladze, S., & Burkadze, G. (2024). Features of hormone receptor expression and proliferative-apoptotic characteristics in endometrial ciliary/tubal metaplasia. *Georgian Scientists*, 6(2), 93–110.
<https://doi.org/10.52340/gs.2024.06.02>.
12. Barbakadze, L., Kintraia, N., Burkadze, G., & Kepuladze, S. (2023). ASSESSMENT OF PROLIFERATIVE ACTIVITY OF ENDOMETRIAL STROMAL TUMORS USING AgNOR TECHNOLOGY. *Georgian Scientists*, 5(2), 123–133.
<https://doi.org/10.52340/gs.2023.05.02.16>
13. Turashvili, T., Tevdorashvili, G., Burkadze, G., & Kepuladze, S. (2023). Evaluation of proliferative activity of endometrial metaplasias by AgNor technology. *Georgian Scientists*, 5(3), 10–20. <https://doi.org/10.52340/2023.05.03.02>
14. Njoku K, Sutton CJ, Whetton AD, Crosbie EJ. Metabolomic biomarkers for detection, prognosis and identifying recurrence in endometrial cancer. *Metabolites* 2020; 10(8):1–28.
15. McConechy MK, Talhouk A, Leung S, et al. Endometrial carcinomas with POLE exonuclease domain mutations have a favorable prognosis. *Clinical Cancer Research* 2016; 22(12):2865–2873.
16. Stelloo E, Bosse T, Nout RA, et al. Refining prognosis and identifying targetable pathways for high-risk endometrial cancer; A TransPORTEC initiative. *Modern Pathology* 2015; 28(6):836–844.
17. Trovik J, Wik E, Werner HMJ, et al. Hormone receptor loss in endometrial carcinoma curettage predicts lymph node metastasis and poor outcome in prospective multicentre trial. *Eur J Cancer* 2013; 49(16):3431–3441.
18. Dobrzycka B, Terlikowski SJ, Mazurek A, et al. Circulating free DNA, p53 antibody and mutations of KRAS gene in endometrial cancer. *Int J Cancer* 2010; 127(3):612–621.

19. Brett MA, Atenafu EG, Singh N, et al. Equivalent survival of p53 mutated endometrial endometrioid carcinoma grade 3 and endometrial serous carcinoma. *International Journal of Gynecological Pathology* 2021; 40(2):116–123.

Clinical-morphological and immunohistochemical features associated with recurrence of endometrioid carcinomas of the endometrium

Alexander Diakonidze¹; Nikoloz Kintraia²; Giorgi Burkadze³; Shota Kepuladze⁴; Rima Beriashvili⁵

¹PhD student, Tbilisi State Medical University; Doctor; Obstetrician-gynaecologist; ²Professor, Department of Obstetrics and Gynecology, Tbilisi State Medical University; ⁴Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Professor; Doctor, Pathologist; ⁴Associate Professor, Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Doctor, Pathologist; ⁵Head of the Department of Pathology, Tbilisi State Medical University; Professor;

Abstract

Endometrial carcinoma is one of the most common malignant tumors of the female reproductive system. Although low-grade endometrioid carcinomas are usually associated with a favorable prognosis, some patients develop local or distant recurrence. This fact indicates the need to evaluate additional clinical-morphological and immunophenotypic prognostic markers. The aim of the study was to evaluate the clinical-morphological and immunohistochemical features associated with recurrence of low-grade endometrioid endometrial carcinomas. The study was conducted on retrospective archival material. Formalin-fixed, paraffin-embedded (FFPE) endometrial tumor tissues collected in 2018–2025 were used. Low-grade endometrioid carcinomas were selected for analysis and cases were divided into non-recurrent and recurrent groups. Clinico-morphological parameters were assessed, including FIGO stage, myometrial invasion, lymphovascular invasion (LVSI), and disease-free survival (DFS). Immunohistochemical studies were performed using ER, PR, Ki67, and p53 markers. Digital analysis was performed using a whole-slide imaging system and QuPath/ImageJ software. The results of the study showed that recurrent carcinomas were more frequently associated with deep myometrial invasion, extensive LVSI, and short DFS. High ER and PR expression was maintained in the non-recurrent group, whereas reduced expression of hormone receptors was observed in recurrent tumors. The Ki67 proliferative index was significantly higher in recurrent cases. Aberrant expression of p53 was more frequently observed in tumors with an aggressive clinical course. Based on all of the above, we can conclude that recurrence of low-grade endometrioid endometrial carcinomas is associated with specific clinical-morphological and immunophenotypic changes, including deep invasion, LVSI, loss of hormone receptors, high

proliferative activity, and aberrant expression of p53. A comprehensive assessment of these markers may contribute to a more accurate identification of high-risk patients.

Keywords: endometrial carcinoma; endometrioid carcinoma; recurrence; ER; PR; Ki67; p53; immunohistochemistry; digital pathology; prognosis

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ალექსანდრე დიაკონიძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; მეან-გინეკოლოგი;

Alexander Diakonidze - PhD student at Tbilisi State Medical University; Doctor; Obstetrician-Gynaecologist; +995577788812 A.pantskhava@reproart.ge; akuna-78@mail.ru

რიმა ბერიაშვილი - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათანატომიური დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი;

Rima Beriashvili - Head of the Pathoanatomical Department at Tbilisi State Medical University; Professor; <https://orcid.org/0009-0003-3978-3196>, rima@tsmu.edu

ნიკოლოზ კინტრაია - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მეანობა-გინეკოლოგიის კათედრის პროფესორი;

Nikoloz Kintraia - Professor of the Department of Obstetrics and Gynecology, Tbilisi State Medical University; <https://orcid.org/0009-0006-9482-2989>

გიორგი ბურკაძე - თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი;

Giorgi Burkadze - Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Professor; <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>, burkadze@yahoo.com

შოთა კეპულაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Doctor of Pathology; <https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>, Shota.kepuladze@gmail.com

Transforming engineering-focused STEM education to aligning current teaching practices with the “Industry 5.0” paradigm

Gigo jandieri^{1,2}, Inga Janelidze ³

¹Rafiel Dvali Institute of Machine Mechanics, 0186 Tbilisi, Georgia; ²Independent Investigator, 04205 Leipzig, Germany. <https://orcid.org/0000-0003-2976-1201>; ³Georgian Technical University, 0160 Tbilisi, Georgia. <https://orcid.org/0000-0002-9961-7638>, *E-mail: gigo.jandieri@gmail.com

Abstract

In the context of the rapidly intensifying challenges facing the global economy, engineering-focused STEM education is increasingly recognized as a structural factor of strategic, state-level significance, - one capable of exerting a decisive influence on the formation of a nation's industrial dynamics, productivity trajectories, and pathways of technological development. Within the revolutionary paradigm of Industry 5.0, whose defining feature is the imperative of complementarity between humans and machines (the digital domain), the modernization and strategic alignment of engineering education with contemporary industrial realities emerge as a fundamental prerequisite for ensuring national competitiveness. Accordingly, this study presents a comparative analysis of the effectiveness of educational and human-capital policies in leading industrial economies that underpin industrial advancement, alignment with global market demands, and the capacity for adaptive governance. In particular, paper examines the current challenges of engineering-focused STEM workforce preparation within Technical and Vocational Education and Training (TVET) systems, and substantiates the necessity of elevating cooperation between educational institutions and industrial enterprises to a new, more productive institutional level. Particular emphasis is placed on the transformation of university-level engineering education, - specifically, on the rationale for its evolution from a neutral, academically autonomous subsystem into an instrument that actively supports national industrial and strategic development. To this end, the study recommends the integration of several key components into the educational process: the expansion of inclusive and diversified STEM pathways; the development of human capital equipped with digital and green technology competencies; the transformation of existing academic and laboratory infrastructures into applied R&D and innovation hubs; and the establishment and institutionalization of forward-looking methodologies for anticipating shifts in engineering competency demands.

Based on the foregoing, it has been concluded that the proposed modernized model of engineering-focused STEM education can serve as a crucial mechanism for virtually any country, acting not only as a guarantor of technological sovereignty and industrial autonomy, but also as a source of adaptive capabilities necessary for full integration into the emerging industrial landscape of “Industry 5.0.”

Keywords

Engineering TVET and Higher Education, Industry-relevant competencies, Early Identification, University–Industry Linkages, Industrial and Educational Policy.

I. Introduction

National industrial trajectories, technological competitiveness, and long-term economic sustainability depend on engineering education as the cornerstone. Within the operational reality of Industry 5.0, where human-technology synergies and environmental imperatives dictate market survival, STEM (science, technology, engineering, mathematics) competencies have moved beyond their role as mere assets to become mandatory structural prerequisites for sovereign technological development (Breque et al., 2021).

It is well known that engineering education functions as a key mechanism for the development of intellectual human capital, allowing societies to accelerate technological progress, modernize production systems and build adaptive industrial ecosystems focused on innovation. This role is constantly emphasized in international assessments, which note that engineering and technical skills, along with a wide range of competencies in the field of STEM, are among the most demanded, but structurally deficient skills in the global labor market (Hagenreiner et al., 2015; Oeij et al., 2024).

Over the past decade, the global economy has undergone a profound transformation driven by digital technology, automation, artificial intelligence and a shift to low-carbon production models. These changes have increased the demand for engineering talent in virtually every sector – from advanced manufacturing and renewable energy to microelectronics, robotics and critical infrastructure. The presence of engineers increasingly determines not only the operational stability of industries, but also their ability to innovate, increase productivity and technological renewal (Rampasso et al., 2020; Garcés et al., 2025). In this context, engineering education systems face unprecedented pressure to expand, diversify and modernize their curricula, pedagogical approaches and institutional structures (Matsaberidze et al., 2022).

The global expansion of higher education has simultaneously reached historic proportions. Between 2000 and 2025, the number of students worldwide more than doubled, rising from about 100 million to more than 260 million. STEM fields have been a major driver of this growth, reflecting the growing demand for science and technology competencies in both developed and

developing countries. However, quantitative expansion alone did not result in proportional industrial benefits.

Three interrelated issues, which include the continued shortage of engineering staff, non-compliance of education results with production needs, and uneven distribution of engineering talent across regions and sectors, are consistently addressed by international reports (OECD, 2025a; UNESCO, 2021; World Bank, 2019; Council of the European Union, 2026; World Economic Forum, 2025; UNESCO-UNEVOC, 2020; International Energy Agency, 2023; UNIDO, 2025). Together, these challenges limit investment, slow innovation cycles, and reduce the effectiveness of industrial modernization strategies.

Despite the growing body of research in engineering education, several critical gaps remain. First, existing research often considers national systems in isolation, lacking a comprehensive global view of how engineering education interacts with broader technological and industrial transformation. Second, the mechanisms by which engineering competencies are translated into industrial productivity, such as innovation capacity, productivity growth, and technology uptake, remain insufficiently conceptualized. Thirdly, literature rarely integrates demographic, spatial and sectoral dynamics, such as regional imbalances in skills, migration flows and the growth of new high-tech industries, into a single analytical structure. As a result, the relationship between engineering education and industrial development is often described in general terms, without a systematic assessment of how specific educational structures, pedagogical models, and institutional arrangements determine production outcomes.

These research gaps are particularly significant in the context of Industry 5.0, which places new demands on engineering competencies. Engineers are now expected not only to master technical knowledge, but also to work in complex socio-technical systems, integrate digital and physical technologies and contribute to sustainable, human-centered industrial solutions. This shift requires educational systems to move beyond traditional lecture-based teaching to adopt more practice-oriented, interdisciplinary, and industry-specific pedagogies. Project-based learning (PBL) and problem-based learning (PrBL) have become leading approaches in this regard, enabling students to develop systems thinking, collaboration skills, and practical problem-solving abilities (Lavado-Anguera et al., 2024). Nevertheless, the global spread of these pedagogical methods remains uneven and their impact on production performance has yet to be fully assessed.

Another important aspect is the spatial and industry distribution of engineering personnel. While some regions, such as East and South Asia, have dramatically increased tech graduation, others continue to face chronic shortages. Even in industrialized countries, significant differences remain between major technology centers and minor industrial cities. Rapidly growing sectors such as renewable energy, microelectronics and robotics attract disproportionate proportions of engineering graduates, leaving core but less prestigious sectors such as water management,

recycling, and traditional light and heavy industries experiencing acute skills shortages. These imbalances are further exacerbated by global migration flows, including both physical mobility and the emerging phenomenon of "virtual brain drain," where engineers from lower-income countries work remotely for foreign companies, reducing the availability of talent for domestic industries.

Collectively, these dynamics underscore the need for a comprehensive, data-driven assessment of how engineering education systems contribute to industrial development in a rapidly changing global environment. Such an assessment should combine quantitative indicators (graduation, enrollment trends, labor market data) with qualitative indicators (curriculum relevance, pedagogical innovation, links between universities and industry). It must also address the broader socioeconomic and technological context, including demographic shifts, digital transformation and green transition.

Against this background, the present study has two interrelated goals. First, it aims to systematize international data on the current state of STEM engineering education, focusing on global trends in STEM expansion, regional and industry skills imbalances, and the dissemination of practical pedagogical models. Second, it seeks to analyze how engineering education systems affect industrial development, technological modernization and innovation potential, as well as identify key areas, in which these systems must evolve in response to the demands of industry 5.0. by integrating different sources of empirical data and adopting a global comparative perspective, the study will contribute to a deeper understanding of the strategic role of engineering education in shaping the future of the industrial economy.

II. Material and methods

The research methodology includes global aggregate analysis using official datasets from the following sources: OECD Education at a Glance (OECD, 2025*a*), UNESCO Institute for Statistics (2021), World Bank World Development Indicators (World Bank, 2019; World Economic Forum Future of Jobs (2025), and UNIDO Industrial Competitiveness Index (UNIDO, 2025). These datasets provide comparable, validated measures of engineering education outcomes, R&D intensity, industrial competitiveness, and skilled labor shortage.

Conceptually, the study defines engineering-focused STEM education as a subsystem of industrial-economic development opportunities. In particular, engineering education is viewed as part of the national intellectual capacity system for inclusive development, alongside industrial policy and sectoral strategies, research and innovation systems, vocational education and training (VET), and infrastructure and energy systems.

From this perspective, given its paramount practical role, engineering education is regarded as a key factor in building the human resource capacity (intellectual capital) required for the

design of targeted processes or technological schemes that take into account the capabilities of artificial intelligence, for the operational management and maintenance of complex industrial systems, for testing and implementing new technologies and production approaches in the industrial sector, and for developing enterprises' capacity to master and fully adapt imported, modernized, and cutting-edge technologies.

Based on the above, a two-way model that represents the relationship between engineering education and industry is used to analyze the relationship between supply and demand. This relationship is considered as a comprising system of "Supply side" - universities, technical institutes, polytechnic colleges, and other vocational training institutions that provide training for engineers, technicians, and technologists; and "Demand side" - sectors of light and heavy industry, energy, construction, transport, infrastructure and logistics systems, as well as other high-tech services requiring professional engineering competencies.

Subsequent analysis uses an analytical framework based on the premise that engineering education is a strategic tool for accumulating the human resources (intellectual capital) needed to ensure technological sovereignty and sustainable industrial development. This structure allows you to structure the analysis according to the following parameters: *a)* development of competencies that ensure the design of technological processes and production schemes regardless of the prevalence and maturity of artificial intelligence systems; *b)* maintaining operational stability in the industrial sector through skilled operation and maintenance of complex technical systems; *c)* acceleration technology refresh by testing, adapting, and implementing innovative solutions in the production environment; and *d)* increasing the ability of enterprises to assimilate, integrate and institutionally adapt imported high-tech solutions.

Based on the above, it can be emphasized that the analytical prerequisites used form the methodological basis for assessing the mutual, bilateral impact between engineering education and production dynamics: on the one hand, the quality of training, which determines the technological advantages of countries, and on the other, industrial transformations, which, in turn, impose new requirements for the content, structure and mechanisms for updating engineering-focused STEM education.

III. Findings and discussion

A. Current state of engineering education within the STEM framework

A significant body of contemporary research highlights that engineering education is central to the broader STEM paradigm. Within this paradigm, STEM functions as a foundational cognitive and methodological platform that provides core scientific, technological, and mathematical competencies. Building on this foundation, engineering education constitutes the applied dimension of STEM - an integrated set of professional practices, design methodologies,

and technology solutions that translate STEM knowledge into specific products, processes, and innovations. These engineering transformations shape industrial productivity and economic development at local, national and global levels.

Data from UNESCO (2021) and the World Bank (2019) over the past two decades indicate a significant expansion of STEM and engineering programs, especially in East and South Asia (China, India, the Republic of Korea), a number of European countries, and a growing number of developing economies. Key trends in this expansion include rapid growth in the absolute number of engineering graduates in China and India, stabilization or moderate growth in many OECD countries, and - relatively low but gradually increasing enrollment and graduation rates in sub-Saharan Africa and selected Latin American states.

Taken together, these data indicate that the development of engineering education cannot be considered in isolation. It is embedded in the broader global dynamics of STEM learning and depends on how effectively countries build a continuous pipeline linking STEM competencies → engineering skills → technological development. This pipeline ultimately determines the national potential for industrial modernization, innovation and long-term economic growth. However, the global expansion of STEM and engineering programs shows an important pattern: quantitative growth alone does not lead to strengthening industrial capacity unless it is accompanied by improvements in the quality of education, regular modernization of curricula, and deeper links between educational institutions and industrial sectors. Analysis of the period 2000-2025 confirms this dependence. As noted earlier, the number of students in higher education has increased on an unprecedented scale, with the number of students worldwide more than double over the past two decades. STEM fields have been the primary driver of this expansion, although growth rates and geographic distribution vary significantly across regions. Evidence (UNESCO, 2021; World Bank, 2019; Council of the European Union, 2026) shows that expanding STEM education provides a necessary foundation for engineering education but translating that foundation into tangible industrial outcomes depends on the quality of national education systems and the degree to which they integrate with real industrial needs. In other words, the effectiveness of engineering education is determined not by the number of graduates, but by the degree to which educational systems can align STEM competencies with industry engineering skills and translate them into technological development.

The observed expansion of STEM and engineering programs in different regions of the world reflects not only the growing demand for technical competencies, but also deeper structural shifts in the global economy. In East and South Asia, the rapid growth of engineering graduates is closely related to accelerated industrialization, large-scale investments in high-tech industries, and strategic government planning aimed at strengthening national technological sovereignty. In OECD countries, modest growth or stabilization in enrollment reflects the transition to a knowledge-based economy, where the emphasis is less on graduation rates than on educational quality, interdisciplinarity, and innovative capacity. In sub-Saharan Africa and

parts of Latin America, the gradual increase in STEM graduation rates shows a commitment to catching up with global technological trends, yet progress remains constrained by institutional and infrastructural constraints.

International evidence consistently indicates that quantitative growth alone does not guarantee an increase in industrial potential. Without improving the quality of education, modernizing curricula, developing research ecosystems, and strong links between universities and industry, the growth of STEM programs remains a statistical indicator rather than a genuine driver of industrial development. The transformational potential of STEM expansion is only realized when educational systems can translate increasing enrollment into industry competencies, applied engineering skills, and support technological advancement.

Analysis of data from 2000-2025 shows that much of the global growth in STEM and engineering education is driven by regional dynamics. The most significant expansion occurred in China and East Asian countries. During that period, China became the world leader in STEM graduates, awarding nearly two million bachelor's degrees in science and engineering each year by 2020, compared with less than one million in the United States. Today, more than 40% of all Chinese graduates hold STEM degrees. India ranks second in the world in engineering talent production, graduating about 2.6 million STEM professionals annually, with about 34% of all Indian students opting for STEM disciplines.

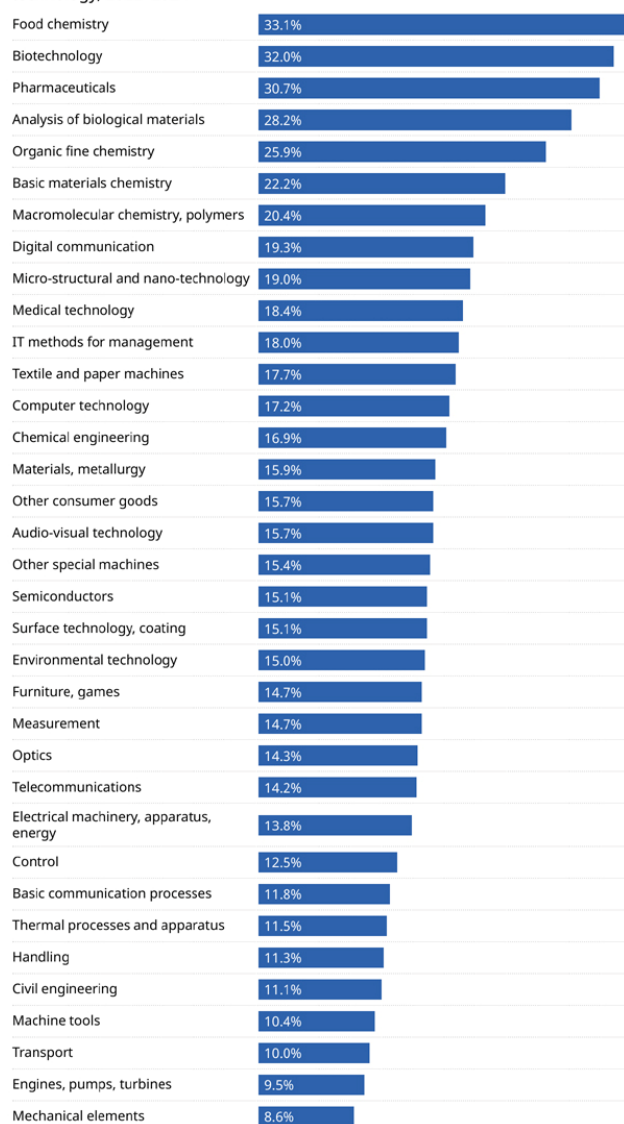
Within the European Union and OECD, Germany stands out as a clear leader in STEM participation, with more than 30% of graduates pursuing degrees in these fields. In the 2024/25 academic year, 43% of all foreign students in Germany studied engineering and science. At the same time, some countries, such as France, recorded small declines and STEM enrollment fell to 23.7% in 2023. The European Union has set a strategic goal to increase the share of STEM students in higher education to at least 32% by 2030 (European Commission, 2025).

In North America, and especially in the United States, the proportion of STEM degrees remains relatively modest at around 20% (Oliss et al., 2023), despite overall growth in graduation rates. However, the number of STEM degrees awarded exceeded the targets set in 2012 by more than 16%. In Latin America, countries such as Brazil and Chile show a growing interest in STEM as a tool to strengthen national competitiveness, although expansion is constrained by socio-economic inequalities and unequal access to education (Oliss et al., 2023).

An analysis of demographic factors based on OECD data shows that mechanical engineering remains the most attractive area within STEM, reflecting the ongoing global demand for engineering competencies and their central role in technological development. The example of Germany in the academic year 2024/25 illustrates this trend: engineering programs continue to dominate the preferences of both domestic and foreign students, emphasizing the high international competitiveness of German engineering education and its strong compliance with the country's industrial base (Kercher et al., 2025).

Technology fields with the highest proportion of women were biotechnology, food chemistry and pharmaceuticals.

5. Share of women among listed inventors in PCT applications by field of technology, 2022–2024



Source: WIPO Statistics Database, March 2025.

Fig. 1. Share of women among listed inventors in PCT applications by field of technology, 2022–2024

While women's participation in STEM is gradually increasing, the gender balance remains uneven. The highest proportion of female inventors is found in fields such as biotechnology, food chemistry and pharmaceuticals (Figure: 1). On average, women account for just 32–34% of STEM students in the European Union, with the highest proportions observed in Romania (42.5%) and Poland (41.5%) (UNESCO, 2024). These differences are a reflection of the impact of cultural norms, national education strategies, and targeted initiatives aimed at increasing women's participation in technical fields.

Global mobility is another important determinant of the STEM landscape. The number of international students studying abroad, predominantly in STEM disciplines, tripled, rising from 2.1 million in 2000 to 6.9 million in 2023. This trend indicates the emergence of a global market for engineering competencies (ICEF Monitor, 2025a). While this dynamic is generally positive, it requires careful planning, strengthening education infrastructure, adapting to industrial needs, and targeted support for underrepresented groups. Only under these conditions can demographic growth lead to a steady expansion of industrial and technological potential.

From the point of view of human capital theory, the growth in the number of registered engineers reflects the willingness of both states and individuals to invest in competencies that bring the greatest return in technologically intensive economies. Engineering remains the most popular field in STEM precisely because it provides the most direct link between education investment and economic productivity at both the individual and national levels. The example of Germany, where engineering programs dominated the preferences of both domestic and international students in 2024/25, illustrates how advanced industrial economies continue to view engineering education as a strategic asset to maintain competitiveness.

In terms of global talent flow theory, the threefold increase in international students, most of whom are studying STEM disciplines, signals the emergence of a global market for engineering competencies. Students are increasingly moving to countries where educational systems have a high reputation and where industry has shown a steady demand for engineering skills. This increases competition between countries for attracting and retaining talent and fosters new models of cerebrovascular accident, in which graduates return to their home countries with globally relevant competencies. Germany, Canada, the United States, South Korea and the Netherlands have emerged as major destinations for these flows, strengthening their innovative ecosystems and strengthening their long-term technological capabilities.

Within the national and industry theory of innovation systems, demographic trends in STEM are directly related to how many countries manage to integrate education, industry and research infrastructure. Increasing enrollment alone does not strengthen innovation capacity unless educational programs are embedded in national knowledge and technology chains. The persistent gender imbalance, with women accounting for just 32-34% of STEM students in the EU, is also affecting innovative systems, limiting the diversity of engineering perspectives and reducing the overall pool of available human capital. The relatively high level of participation of women in Romania and Poland indicates that targeted national policies can significantly expand the talent base of innovative systems.

Collectively, the trends identified indicate that demographic growth in STEM - rising student numbers, increasing international mobility, and gradually increasing female participation - is creating a favorable foundation for the development of engineering education. However, with the quantitative expansion of programs, these processes are not automatically translated into production or technological advantages. Their impact depends on how effectively countries integrate STEM dynamics into their national innovation systems: through strategic workforce planning, curriculum modernization, strengthening university-industry linkages, and institutional settings that allow global talent flows and gender diversity to function not only as statistical indicators but also as genuine drivers of industrial development. In this sense, demographic shifts in STEM education represent a necessary but insufficient condition; their transformation into industrial capacity requires concerted policy action and coordinated modernization of educational and industrial institutions.

B. Key deficiencies in engineering education and strategies for their improvement

International assessments and surveys of employers in many countries consistently highlight several critical shortcomings in engineering graduates: insufficient practical skills, limited influence of real industrial environments, inadequate training in digital tools, data analysis and system integration, as well as gaps in interpersonal competencies, such as project management, communication and interdisciplinary cooperation (World Economic Forum, 2025).

The combined analysis of these issues indicates the need for a systematic transformation of engineering education in the period 2026-2030 in the following areas:

1. lagging and non-compliance of curricula with technological cycles: The main problem is the constant lag of curricula caused by the fact that technological cycles in industry, especially in artificial intelligence, robotics and materials science, are now average 2-3 years, while university curricula are usually updated every 5-7 years. As a result, graduates enter the labor market with skills that already require retraining. Such structural misalignment reduces the relevance of engineering programs and weakens the responsiveness of education systems to industrial needs.

2. Lack of T-shaped competencies: Employers are increasingly looking for T-shaped professional engineers capable of deep expertise in one area (vertical strip "T"), with broad competencies in related areas (horizontal strip). The dearth of such profiles is compounded by insufficient training in hard digital skills, including big data, simulation environments, and digital twins, even among traditional mechanical engineers. Modern engineering is inherently collaborative, and deficiencies in project management and communication have become critical obstacles to both individual career growth and the efficient functioning of industrial production systems.

3. The introduction of cutting-edge educational models (trends for 2024–2025) and the addressing of existing gaps through the implementation of advanced educational approaches such as dual education systems, project-based learning, and micro-credentials: Under the dual education system (Germany, China), students can spend almost 50% of their study time in an industrial setting (Wehnert et al., 2021). This model directly addresses employers' concerns regarding a lack of practical skills; Within project-based learning (widely implemented in the US and Singapore), the focus shifts from abstract theoretical lectures to solving real-world industrial problems provided by corporate partners; Meanwhile, the micro-credentialing (certification) approach, which offers short, targeted modules on new tools such as AI-assisted design, helps to fill gaps in core engineering skills and qualifications. This approach has been successfully implemented in EU countries, and regions such as Latin America and the Caribbean are preparing to adopt it with the support of UNESCO (Gutovic, 2025).

Together, these models represent a shift towards more flexible, industry-oriented, and competency-based engineering education systems capable of responding to rapid technological changes and changing labor market demands.

The analysis shows that in the future, a global increase in STEM students will no longer serve as a guarantee of economic success. The central challenge of the 2026-2030 period will not be competition for more engineers, but the ability to close the gap between university classes and the sexes of industrial production or IT/AI laboratories. Countries that succeed in aligning engineering education with real technological conditions through hands-on training, industry-specific learning models, and ongoing curriculum modernization will be able to turn STEM

expansion into tangible industrial and technological benefits. Only under these conditions can engineering education fulfill its strategic function of supporting sustainable industrial and technological progress and strengthening national innovation systems.

C. The role of technical and vocational education in industrial systems

Technical and Vocational Education and Training (TVET) plays a key role in providing the industry with qualified technicians, operators, and mid-level professionals. Joint analytical reviews by UNESCO (2021), World Economic Forum (2025), the World Bank (2019) and Council of the European Union (2026) emphasize that countries with well-developed and institutionally sustainable TVET systems, such as Germany, Switzerland, Austria, and the Republic of Korea, demonstrate higher levels of industrial productivity and competitiveness. These countries also have low youth unemployment, a smoother transition from school to work, and strong potential to introduce and spread new technologies.

Under these conditions, TVET systems function as an important link between education and industry, providing a continuous flow of personnel able to operate modern equipment, comply with quality and safety standards and quickly adapt to technological changes. Due to the close integration between educational institutions and enterprises, TVET is becoming not only a mechanism for training the workforce, but also an important component of national innovation systems. It accelerates the adoption of advanced technologies and supports the sustainable development of industrial sectors. In such systems, engineers do not work in isolation but are built into a dense structure of the workforce, consisting of highly qualified technicians and technologists.

Based on the accumulated international experience by 2026, we can confidently state that the key to the success of countries such as Germany and the Republic of Korea lies not in a strict hierarchy between engineers and technical personnel, but in a symbiotic relationship between engineering and technical intelligence. Their engineering ecosystems are built on the principle of functional complementarity: each design engineer is supported by a whole community of highly qualified technicians and mid-level specialists. Without their participation, even the most complex engineering projects remain "on paper," since there is no workforce capable of ensuring their physical implementation, scaling and maintenance.

A typical example is the introduction of new production technologies, such as metal 3D printing. Engineers can design technology by adapting it to production requirements and integrating it into broader engineering workflows. Nevertheless, it is the TVET level personnel who ensure its practical implementation: operation and calibration of equipment, quality control, troubleshooting, and scaling of technology on production lines. With this separation of functions, technology evolves from an experimental prototype to a fully operational industry standard.

Another major benefit of advanced TVET systems is the substantial reduction of the gap between education and employment in transition. In countries with strong vocational training,

the transition from school to stable employment occurs with minimal friction. This is essential not only for industrial productivity, but also for youth integration, sustainable employment and prevention of structural unemployment. As a result, TVET is becoming more than a mechanism for training the workforce; it acts as a fundamental component of socio-economic stability and industrial development.

The key conclusion is that effective educational and industrial policies in the 2020s require the simultaneous development of both pillars of the workforce system, engineering and technical levels. The widening gap between "over-qualified theorists" and "under-qualified workers" creates a structural imbalance that can slow down techno-economic and environmental progress. When engineering expertise is not supported by enough skilled technicians, innovation remains at a conceptual stage; conversely, when technical staff lack modern training, industry loses the ability to adopt, adopt and scale new technologies. Therefore, overcoming this gap becomes a strategic prerequisite for sustainable industrial development and the formation of fully functional production ecosystems.

D. Dual systems and work-based learning

The need to balance both engineering and technical levels of the workforce makes dual systems and work-based learning models one of the most effective mechanisms for bridging the structural gap between education and industry. Dual systems are learning models in which students divide their time between classroom learning and hands-on learning directly in enterprises. International evidence shows that such systems are particularly effective in aligning educational outcomes with actual industrial needs (Martínez-Izquierdo et al., 2022). Their main features include the participation of employers in the development of curricula, formalized apprenticeship programs and the joint responsibility of the state, employers and educational institutions. These models significantly reduce the mismatch between supply and demand for skilled personnel by closely linking engineering education with industrial development.

Dual learning is widely recognized as one of the most effective mechanisms for overcoming curriculum lag because it integrates learning processes with real-time business practices. Under this model, employers are not just consumers of labor, but co-authors of curricula, sharing risks and costs with governments and educational organizations. This approach ensures a smooth transition of students into the corporate environment, speeds up recruitment processes and supports the formation of a stable professional identity. By 2025, dual systems are increasingly seen as a critical component of STEM development as they make engineering ecosystems more flexible, adaptive, and able to respond quickly to technological change (Quirós-Alpera et al., 2025).

Despite their clear advantages and proven effectiveness, dual systems also face several structural challenges that need to be addressed when scaling or adapting to new environments. Of particular importance there are two issues:

1. Coordination difficulty: Effective cooperation between educational institutions and enterprises remains organizationally demanding. This requires flexible public policies, stable partnership mechanisms, and professional management by both education and industry. Without clear procedures, clearly defined responsibilities, and long-term commitments, the dual model loses much of its effectiveness.

2. Limited attractiveness of TVET pathways: Efforts are ongoing in many countries to elevate the prestige and social value of TVET and dual study programs to levels comparable to academic higher education. This is particularly important as industries face a growing shortage of qualified technicians and mid-level professionals (Alexandrova & Krasteva, 2026). Without enhancing the appeal of a tech career, even well-designed dual systems can struggle to attract enough talent.

Taken together, these factors indicate that the further development of dual systems requires not only institutional support, but also a change in the public perception of technical professions, as well as stronger mechanisms for cooperation between governments, enterprises, and educational organizations.

E. Skill shortages as a constraint on industrial and technological progress

Studies by the World Bank and OECD on industrial competitiveness show that firms in manufacturing and heavy industry consistently identify a shortage of sufficiently qualified engineers and technicians as the main constraint for sustained production expansion, technological modernization, and compliance with increasingly stringent quality and environmental standards (OECD, 2025*b*). Therefore, in many middle-income countries, industrial policy is shifting from low-value assembly operations to higher-value activities such as advanced design, engineering, and R&D. Such a transition is impossible without a corresponding deepening of engineering education and expansion of national research potential.

Modernization of the industry is being held back by the lack of appropriate engineering skills. Countries with low STEM participation are increasingly losing momentum in industrial growth because their education systems cannot keep up with technological innovation cycles. This skills deficit has become a major obstacle to sustainable integration into industry 4.0 and preparation for the transition to industry 5.0. Modern equipment, robotic production lines, and predictive analytics systems can be purchased by industrial firms, but these investments are not profitable without engineers who can program, adapt, and support them flexibly. As a result, entire economies face technological stagnation, despite the formal availability of new capacities and technologies (Senna et al., 2023; Brückner et al., 2025).

The second major obstacle in industrial and technological advancement is the difficulty, sometimes impossible, of meeting ESG, ISO, and environmental standards. This problem arises not only due to additional financial burdens associated with compliance (Reis et al., 2025), but

also due to the lack of engineers who are able to conduct timely analyzes and make optimal production decisions in response to regulatory requirements (Grüner, 2024; Smirnov, 2025). The global value chains of today require strict compliance with environmental regulations and quality standards. Meeting these demands requires more than just operators of new technologies; it requires environmental engineers and systems integrators who can adapt technology solutions to regulatory frameworks and industrial processes.

This segment of the labor force is either very scarce or completely absent in many developing countries (Smirnov, 2025; Aiginger, 2024). As a result, firms are struggling to meet the standards required to participate in EU and US markets, effectively limiting their integration into high-value global supply chains. Thus, failure to comply with ESG and ISO requirements becomes not only a regulatory problem, but also a structural obstacle to industrial modernization, export diversification, and long-term technological competitiveness.

Systematic analysis of ways to accelerate industrial development emphasizes the importance of engineering sovereignty as a critical factor associated with the accumulation of advanced engineering skills (Blind, 2025). Engineering sovereignty refers to the ability of engineers to go beyond simple reproduction and targeted adaptation, where they must strictly and without deviation follow instructions, to genuine creation, including design, innovation, and research and development. Achieving this level of capability requires a fundamentally different type of education: engineers must be able to solve open problems through design thinking, use existing research infrastructures and, if necessary, initiate cooperation with relevant research institutions (Zhao et al., 2025).

This leads to the conclusion that meaningful industrial modernization is impossible without strong, institutionalized links between the manufacturing sector and universities. Higher education institutions, instead of functioning as isolated academic entities, should assume the role of fully integrated research centers within industrial ecosystems.

Empirical evidence supports this argument. Studies conducted in 2024-2025 (Angerott et al., 2024; Reshoring Initiative, 2025) show that the shortage of STEM specialists has become a bottleneck even for developed countries, such as the United States and Germany, in their attempts to reorient production from Asia. According to the MINT Autumn Report (Angerott et al., 2024) and the Reshoring Initiative (2025), Germany faces a shortfall of more than 200,000 STEM professionals, threatening its innovative capabilities, while the United States could face a manufacturing labor shortage of up to 3 million by 2030. Such shortages could block large-scale reorganization efforts and undermine the competitiveness of the industry.

The scale of these gaps makes it unlikely that internal learning alone can address them in the near term. A key strategic response is international certification of engineers. In modern practice, this includes recognition through the EUR ING title or accreditation under the Washington Agreement, both of which serve as mechanisms for verifying engineering

sovereignty (National Society of Professional Engineers, 2025; U.S. Green Building Council, 2024). These structures enable engineers to move from local performers to internationally recognized design professionals capable of enforcing stringent safety and sustainability standards such as ASME and ISO.

F. The role of digitalization and industry 4.0/5.0 in advancing engineering education

Digitalization and Industry 4.0 by 2025 ceased to be merely "topics to be explored" and instead became a technological environment that fundamentally changes the structure of engineering education. The transition to industry 5.0, where the focus shifts to human-AI cooperation, further increases the qualification requirements for both human experience and the complexity of artificial intelligence systems (Jandieri et al., 2023; Deloitte Insights, 2025; Kavlashvili, 2026).

The emergence of automation, robotics, the Internet of Things (IoT), and cyber-physical systems has radically transformed the profile of competencies that are in demand in modern production. According to the World Economic Forum's 2023–25 Jobs Future Report, the global labor market is undergoing a structural shift. Demand for traditional, highly specialized engineering roles is giving way to hybrid profiles, such as mechatronics specialists, data engineers and industrial artificial intelligence professionals. Under these conditions, continuous professional development and retraining have become the only viable means of maintaining professional significance.

Engineering education systems that do not integrate digital competencies into the core of their curricula inevitably create skill deficits, producing graduates who are structurally and technologically unsuited to the needs of the modernized industrial sector. Skill hybridization helps bridge the gap between technical execution and compliance. For example, an engineer with expertise in data analytics and environmental management can embed ISO standards and ESG criteria into the product DNA itself during the design phase. This transforms international standards from an administrative burden to a natural competitive advantage in global markets.

The latest reports, including WEF Future of Jobs 2025 (World Economic Forum, 2025) and Stemgenic Global: Future of Jobs Report 2025 (Stemgenic Global, 2025), indicate that three competency levels will be the most important for employers in 2026-2030. These three levels are as follows:

1. *Technology Literacy and Hybridization*: Demand for AI-enabled manufacturing professionals is projected to grow 117%. This includes expanding the competencies of the digital twin, where the creation of virtual replicas of factories becomes a basic requirement for mechanical engineers and technologists.
2. *Cognitive flexibility*: Emphasis on analytical thinking and integrated problem solving in complex socio-technical ecosystems.

3. *Adaptability*: Lifelong learning ability and ability to work under high levels of uncertainty.

Studies (Khan et al, 2025; Naseer et al., 2025) have shown that universities which successfully integrate digital competencies have achieved a 35% higher level of employer satisfaction. This correlation suggests that, by 2026, the value of an engineering degree will be determined by the graduate's immediate operational readiness. Consequently, leading educational institutions have adopted the “Learning by Doing 2.0” model, characterized by high-fidelity immersive simulations and mixed reality (deploying 'virtual factories' and digital twins enables risk-free learning and optimisation of complex processes, significantly reducing the learning curve), as well as industry-integrated project-based learning (PBL), which uses applied industrial tasks such as IoT-based precision agriculture or intelligent network management to develop systems thinking and interdisciplinary flexibility. These events represent a fundamental paradigm shift. Digital immersion and experiential learning are no longer optional; they are fundamental elements of next-generation engineering curricula. Institutions using these hybrid models effectively protect their graduates from the future, allowing them to navigate and lead in the AI ecosystems of Industry 5.0.

G. The impact of the green transition and the role of the green economy in advancing engineering education

Climate change and decarbonization policies are reshaping key industrial sectors, including energy, transport, construction and heavy industry, creating a new demand for energy systems, environmental and sustainability engineers, as well as technological design that can reduce emissions and consumption of non-renewable resources (Jandieri, 2022; Abdelali et al., 2025; Ghazal et al., 2026). International reports on energy and climate (IEA, 2024; IRENA, 2024) emphasize that the green transition is essentially an engineering problem that requires large-scale application of technical knowledge in renewable energy, power grids, energy storage, efficiency and redesign of industrial processes.

According to the latest data from the International Energy Agency (IEA, 2024) and the International Renewable Energy Agency (IRENA, 2024) for 2024-2026, a new hierarchy of high-demand engineering professions has emerged, such as power system and network engineers, engineers of industrial decarbonization, and circular economic engineers. At the same time, energy system engineers need to integrate renewable energy variables (solar, wind) into existing power systems and develop long-term energy storage technologies; industrial decarbonization engineers must build understanding of how energy-intensive industries, such as steel and cement, shift from coal to hydrogen or renewable electricity? Circular economic engineers must design products with full recyclability in mind, minimizing waste and maximizing resource efficiency throughout the product lifecycle.

According to the latest research (Bashmakov et al., 2022; Wojtaszek, 2025; Hoving, 2025), the key competencies of Green Engineer in 2026 include several mandatory modules that did not exist ten years ago. These new competencies reflect the structural transformation of industrial systems under the pressure of decarbonization, resource efficiency, and ESG-based management. The most important profiles include:

- Life Cycle Assessment Engineers (LCAs) who are skilled in assessing the environmental impact of a product at all stages of the material cycle - from raw material extraction to end-of-life disposal. Their expertise allows companies to quantify emissions, resource use and waste generation, and to redesign products according to cyclical economic principles.

- Energy efficiency engineers capable of implementing intelligent metering systems and optimizing energy consumption through AI-based analytics. These professionals play a central role in reducing operating costs, improving energy efficiency and enforcing increasingly stringent energy efficiency regulations.

- ESG compliance engineers who understand how technical solutions affect a company's non-financial reporting and how to align production processes with environmental, social and governance standards. Their role is becoming indispensable as global supply chains demand transparent sustainability metrics and verifiable compliance with international norms.

Estimates for 2025 suggest that the global economy faces a shortfall of approximately 7 million skilled technicians needed to meet Net Zero's current commitments. At the same time, more than 40% of all R&D budgets in the global automotive and energy sectors are projected to focus on environmental and sustainability-oriented innovations by 2026. The acuity of this problem is illustrated by a comparative regional analysis (Figure 2) showing China's leadership in patent numbers, which highlights the importance of not having a staff shortage and indicates a high level of activity among engineers engaged in innovation, mainly "green" activity. Most Chinese developments focus on solar and other forms of renewable energy, while the European Union prioritizes high-tech solutions in hydrogen energy and carbon capture, use, and storage (CCUS) (World Economic Forum, 2025; IEA, 2024; International Energy Agency, 2025). The development of the latter is hampered precisely because of the aging and passivation of the engineering potential. Meanwhile, encouraging progress in engineering education is showing in India, with a 22% jump in activity.

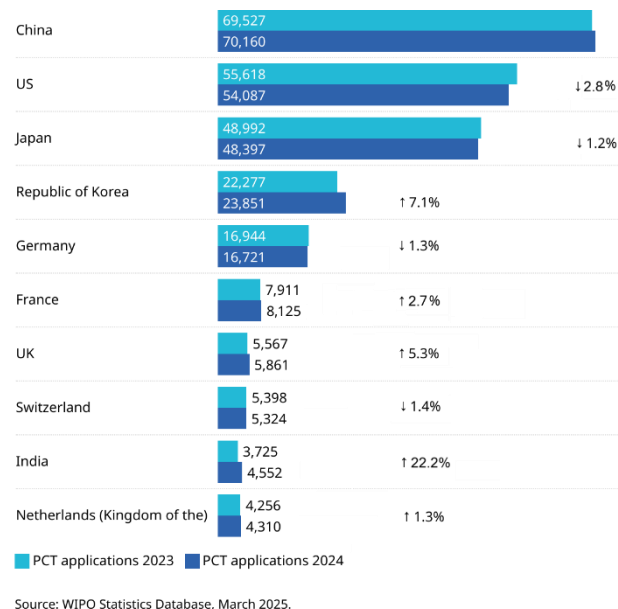


Fig. 2. A comparative regional analysis of patent activity across the world

The scale of the global skills gap indicates that the green transition is not just a political issue, but a deep engineering bottleneck. A shortage of specialists capable of developing, integrating and supporting low-carbon technologies is slowing the deployment of renewable energy systems, electrification pathways and industrial decarbonization strategies. As a result, even countries with ambitious climate goals risk falling behind because of insufficient human capital.

H. Challenges associated with engineering skill mismatches

A well-documented illustration of the problem of skills mismatch in engineering is the phenomenon commonly known as the "paradox of unemployed engineers" (Tilak et al., 2021; New York Academy of Sciences, 2024). Several countries, including India, Egypt, Latin American states and CIS countries, have a glut of graduates from traditional engineering disciplines such as civil engineering and general mechanics who are struggling to find work. At the same time, industries in these countries report an acute shortage of engineering talents.

The main reason for this imbalance is the inability of universities to keep up with the real dynamics of the global labor market. Higher education institutions in these regions continue to produce so-called "universal theorists" in state-approved curricula, while the labor market increasingly requires "narrow specialists" in emerging non-traditional niches. This structural lag results in a workforce that is formally educated but not technologically suited to industrial needs.

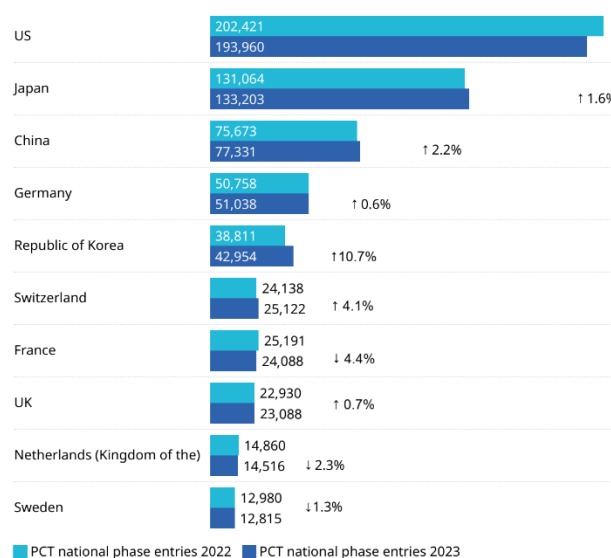
Recent studies (Li et al., 2021; Rikala et al., 2024) show that the most serious skills mismatches occur in the following sectors: *a*) Advanced manufacturing, a critical shortage of specialists in industrial-scale additive manufacturing (3D printing) and smart production planning; *b*) Automation and control, - a growing demand for engineers capable of integrating robotics into legacy production lines; *c*) Energy systems are experiencing a constant shortage of

engineers who understand the physics of distributed networks and modern energy storage systems; d) software and Data Engineering,- mechanical engineers trained in classical programs but lacking coding skills to collect and analyze data from industrial sensors and drives are becoming increasingly uncompetitive.

These mismatches create systemic constraints to industrial development: firms cannot adopt advanced technologies, graduates face unemployment despite having engineering degrees, and economies lose competitiveness in global value chains. Thus, the paradox of unemployed engineers reflects not an excess of talent, but a structural mismatch between educational outcomes and technological demand.

According to the OECD analysis (2025 *b*), the main drivers of engineering skills mismatch are institutional inertia, weak signal from industry, and prestige-driven bias, which often contradicts actual labor market needs. Institutional inertia arises because traditional universities with outdated curricula face significant financial and organizational barriers to modernizing laboratories, upgrading equipment, and retraining conservative academic workforces. The weak signal from industry comes as many companies as possible struggle to articulate what skills they will need in the next five years; they often lack the foresight and analytical capacity to predict technological change. Prestige bias occurs when students choose "trendy" fields such as general computer science, artificial intelligence, robotics or data engineering, while ignoring areas of high demand such as industrial IT, mechanized systems automation and systems engineering, where salaries are often higher and competition is lower.

The combined effect results in a chronic lack of automation, a glut in traditional areas and reduced national capacity to adopt Industry 5.0. This slows down industrial modernization and weakens integration into the global economy.



Source: WIPO Statistics Database, March 2025.

Fig. 3. Number of PCT applications entering the national phase across the top ten countries of origin, 2023-2024.

By the beginning of 2026, it is obvious that an increase in the number of students without updating content leads to a decrease in profits. Countries that have successfully reoriented their engineering education to double-crossing (digital + green), such as South Korea and Singapore, exhibit GDP and productivity growth rates 2 to 3 percentage points higher than those still trapped in traditional educational models. This emphasizes that bringing education in line with technological demand is no longer just a social goal, but a strategic imperative for national survival.

To confirm the above, we can cite PCT data (Figure 3), reflecting the progress of countries in the amount of growth in patent activity. In this case, the United States is already leading in terms of the number of applications ($\approx 200\,000$), followed by Japan ($\approx 130\,000$), followed by China and Germany ($\approx 75\,000 - 50\,000$, respectively), but the Republic of Korea became the only country from the top twenty where there was a double-digit increase in PCT applications (+10.7%), which switched to the national phase.

1. Regional and sectoral imbalances in engineering skills

Despite the global surge in STEM enrollment and the expansion of engineering programs, regional and sectoral imbalances in engineering competencies remain among the most persistent structural challenges to industrial development. The shortage of engineering and technical personnel manifests unevenly, creating spatial and sectoral gaps that directly impede the competitiveness of regions, specific industries, and national economies. These imbalances demonstrate that a quantitative expansion of the STEM base does not guarantee an equitable distribution of expertise, nor does it eliminate the structural constraints inherent in diverse industrial systems.

First, the engineering talent gap is most acute in industrial clusters and secondary cities, where production facilities are concentrated but major universities or research centers are absent. These territories face chronic shortages, which constrain production expansion, hinder the adoption of new technologies, and deter investment. Consequently, a spatial divide emerges between "talent magnets" and "competency deserts."

Second, labor shortages are concentrated in high-growth sectors, such as renewable energy, advanced manufacturing, microelectronics, robotics, and ICT (Information and Communication Technologies). The pace of development in these industries significantly outstrips the capacity of educational systems to supply qualified specialists, resulting in a persistent mismatch between supply and demand. Simultaneously, foundational sectors, including traditional mechanical engineering, water resource management, waste processing, and urban infrastructure, face a "workforce graying" effect and an insufficient influx of young professionals, despite their critical role in economic stability.

Third, global migration flows exacerbate these imbalances. Skilled engineers continue to migrate to high-income countries offering advanced research infrastructure and superior working

conditions. Parallel to this, the phenomenon of "virtual brain drain" has accelerated: specialists from low-income countries work remotely for foreign corporations, bypassing the development needs of local industry. This creates a double-tier gap, where countries lose both physical mobility and the participation of their best talents in local value chains.

By early 2026, these regional and sectoral imbalances will emerge as a primary structural bottleneck in the global economy. Despite record numbers of engineering graduates, their distribution remains highly skewed.

Analysis of development trends shows that the modern landscape of engineering human capital is formed by the following three interrelated factors:

1. Spatial imbalance: "Magnets" versus "Deserts": Even in industrialized countries, there is a sharp contrast associated with the formation of so-called attractive industrial clusters and secondary, less attractive cities. For example, industrial clusters and hubs such as Shenzhen (China), Munich (Germany), or Monterrey (Mexico) have begun to "absorb" global talent, creating the localized overheating of wages and associated industrial boom (König & Brenner, 2025; Mi et al., 2025; Jordaan et al., 2024). At the same time, secondary cities, i.e., "second-tier" industrial centers, began to face production stagnation due to the gradual decline in the number of skilled technicians and engineers at the higher and middle levels. To make matters worse, local university graduates have increasingly migrated to administrative capitals or technology hubs immediately after completing their degrees (Turgel et al., 2023; Demirović Bajrami et al., 2025).

2. Sectoral bias, i.e., the tendency to "noise". Engineering talent is increasingly distributed disproportionately among sectors with quick returns on investment, leaving fundamental industries relatively in short supply. Among these "neglected" sectors are traditional manufacturing, water management and waste treatment. These industries are most likely to suffer from chronic aging of the labor force (in many OECD countries, the average age of a construction engineer is over 50). Meanwhile, the "magnet" sectors are becoming ICT, renewable energy and autonomous systems. They attract much of the young talent through perceived prestige and higher pay at the primary level.

3. The global engineering migration known as "Brain Drain 2.0," which took on new forms in 2025-2026, such as physical and virtual outflow of personnel. For example, developing countries (India, Nigeria, Eastern Europe, etc.) continue to physically miss out on leading STEM specialists in favor of Germany, Canada, or the US through simplified, highly qualified visa programs (Hoppe & Fujishiro, 2025). But, in parallel also occurs so-called virtual outflow, the reason for which becomes the format of remote online work. This employment format allows engineers in emerging economies (for example, Vietnam and Kazakhstan) to service Western corporations without moving. While this is financially beneficial for an individual, it deprives local industries of the expertise needed to make domestic technological breakthroughs. The negative effects of the noted have been exhaustively reported in a study (Walsh et al., 2023).

Hence, the primary challenge in 2026 and beyond is not only generating engineers but also retaining them and strategically distributing them across regions and sectors. Nations that fail to develop localized ecosystems, including housing, infrastructure, social mobility, and quality of urban life, will lose the competition for talent, regardless of the strength of their universities.

A comprehensive policy mix is necessary to address these imbalances, which includes strategic regional planning of vocational training, stimulation of industrial clusters, strengthening of universities in Tier-2 cities, and the creation of robust incentives for talent retention. To ensure sustainable distribution of engineering competencies and support long-term industrial resilience, educational reform and spatial-economic policy must be integrated.

J. Research universities as industrial partners

High-performance engineering education systems are typically embedded within resilient, institutionalized forms of cooperation between academia and industry. In advanced innovation ecosystems, research universities are no longer viewed as autonomous educational institutions but as integral participants in industrial development, functioning as technology generators, talent incubators, and knowledge transfer platforms (Jonbekova et al., 2020).

In line with the noted Triple Helix II models, key formats for collaboration are to establish joint research centers, conduct contract research and consulting, develop new doctoral programs in industry, and create common laboratories and test sites. In this context, joint research centers could also be associations where universities and corporations address common technological challenges; Contract research and consulting should include enterprises with easy access to specialized academic expertise; Industrial PhD programs should encompass doctoral research conducted directly within a corporate environment to address applied problems, whilst shared laboratories and test facilities should refer to jointly managed infrastructure for high-precision experiments and prototyping.

These mechanisms catalyze the transition to a modern "University 3.0" model (Álvarez Torres et al., 2025), characterized by accelerated transfer of technology from laboratory to production, accelerated familiarization of students with genuine industrial problems rather than abstract academic cases, and - to align research programs with market needs, enhancing their commercial potential. There is no doubt that by 2026, this integration had moved from a strategic choice to a fundamental survival mechanism for technical universities.

In this regard, it should be emphasized that recent reports (OECD, 2025c; Lutchén, 2024; Li et al., 2023; BMWK, 2025; Cunningham et al., 2025; Compagnucci et al., 2025; Compagnucci & Spigarelli, 2025) have revealed the following three transformative trends:

1. *Joint laboratories and innovation testbeds:* Rather than procuring equipment in isolation, universities establish alliances with industrial giants, e.g., Siemens-TU Munich, Apple-

MIT (Elia et al., 2021; Fraunhofer, 2024). This provides universities with access to cutting-edge instrumentation they could not otherwise afford, while businesses gain access to "fresh intellectual capital" and the ability to test prototypes without disrupting primary production lines. Representatives from those participating companies serve on ongoing advisory boards charged with providing real-time input on the critical technological skills students will need in their careers. They also help educators make sure curricula evolve as technologies evolve (Lutchen, 2024).

2. The rise of the industrial PhD. This format emerged as a highly effective instrument during 2024-2025: doctoral candidates develop their dissertations while simultaneously solving specific applied tasks for industrial partners (Compagnucci et al., 2025; Compagnucci & Spigarelli, 2025).

In the early 2000s, the first author of this study was among the pioneers of the Industrial PhD model in Georgia, conducting applied research under the auspices of Kutaisi State Technical University and implementing findings directly at the production sites of the Zestafoni Ferroalloy Plant (Dzhandieri, 2005; Dzhandieri et al., 2007; Dzhandieri et al., 2009).

International evidence suggests that Industrial PhD programs significantly enhance the integration of early-career researchers into production processes (Boman et al., 2026). Notably, approximately 85% of participants remain with the partner company post-completion, directly mitigating the high-level skill shortage and cultivating a sustainable pool of R&D leaders.

3. Technology transfer and SME consulting. Universities are increasingly serving as R&D departments for Small and Medium Enterprises (SMEs) that lack internal research capabilities (Sarpong et al., 2025). By 2025, the share of extra budgetary income for leading engineering schools derived from industrial contracts reached 30-40% (CESAER, 2025). This dual-benefit model ensures financial sustainability for the university while driving long-term technological progress for the industrial sector (Jin et al., 2026).

All the aforementioned processes, - the surge in technology transfer, the expansion of contract research, and the proliferation of industrial PhDs and joint laboratories, converge into a defining trend for the 2026-2030 period: the emergence of "Regional Innovation Hubs."

Governments in leading economies (EU, China, USA) are shifting from supporting isolated academic institutions toward funding integrated consortia that unite universities, major industrial enterprises, and networks of technology startups. This model fosters a "dense" innovation environment where scientific inquiry, engineering development, and production competencies coexist within a single functional space. Consequently, the trajectory from fundamental research to industrial implementation is compressed from the traditional 3-7 years to a matter of months.

Regional innovation hubs are becoming more than just infrastructure; they are a new type of industrial organization that facilitates faster technology transfer, fosters technological entrepreneurship, and enhances national industrial competitiveness. It follows that a university operating in isolation by 2026 and beyond will be increasingly categorized as obsolete. The success of modern engineering education will be no longer measured primarily by publication volume, but by the quantity of implemented patents and the viability of technological spin-offs (startups emerging from the academic environment).

K. Features of project-based learning and real-world problem solving

Pedagogical approaches also play a pivotal role in shaping the engineering competencies required for the modern industry. Leading global universities and engineering schools are transitioning from traditional lecture-based formats to Project-Based Learning (PBL) and Problem-Based Learning (PrBL). These methods achieve maximum efficacy when implemented in close synchronization with corporate and industrial partners (Lavado-Anguera et al., 2024).

Such formats enable students to develop not only the systems thinking required to understand and manage complex industrial and technological ecosystems, but also skills in interdisciplinary collaboration (for example, integrating knowledge from fields such as mechanics, electronics, programming, materials science, ecology, and economics) and practical skills for solving engineering problems, including diagnostics, optimization, prototyping and the seamless implementation of technologies.

By shifting the focus from passive content absorption to active inquiry, PBL and PrBL foster a "Learning-by-Doing" environment. This environment is critical for the Industry 5.0 era, where engineers must not only possess technical mastery but also the cognitive agility to address unstructured industrial challenges. It is therefore logical that, according to source (O'Connor et al., 2026), by early 2026, PBL had moved beyond the realm of a pedagogical experiment to become the "gold standard" of engineering education, based on the following three transformative changes in the approach to developing engineering competencies:

a) From "Formula" to "System" (System Thinking): In classical education, students typically solve problems with a single correct answer. In contrast, real-world projects are perpetually constrained by budgets, timelines, environmental regulations, and material properties. The primary outcome of PBL is a graduate who understands how a change in a single component affects the entire ecosystem. For instance, reducing a vehicle's chassis weight is analyzed not just as a mechanical task, but through its impact on handling, energy efficiency, maintenance costs, and market viability.

b) Interdisciplinarity as the Norm: Modern engineering challenges, such as the development of industrial drones, require the simultaneous input of mechanical engineers, software developers, industrial designers, and economists. By forming project groups that simulate actual corporate departments, universities create the only viable environment for

developing "soft skills", i.e., high-level communication and the ability to integrate insights from diverse technical fields.

c) Industry-Driven PBL (Corporate Collaboration): The most successful cases of 2024-2025 involve companies bringing "raw" industrial problems to the university, - challenges that the company itself could not solve rapidly.

This collaboration offers a twofold benefit. Firstly, students gain genuine practical experience by grappling with real-world production constraints, technical uncertainties and professional responsibilities. This enables them to transition from the role of passive learners to that of junior engineering consultants. Secondly, there are benefits for industry partners, who gain a "fresh perspective" on intractable technical problems and gain direct access to a pre-vetted talent pool. This integration effectively eliminates the traditional six-month retraining and adaptation period, as graduates are already aligned with the company's specific technology stack and corporate workflow from the outset.

Project-based learning (PBL) ultimately contributes to the development of high-level professional resilience and cognitive strategies, which include: *a)* resilience to setbacks when a project encounters technical or systemic obstacles (in such cases, students learn to change their approach and seek alternative solutions rather than getting bogged down in the problem, which is a crucial trait for the R&D sector); *b)* information literacy and rapid data synthesis (in the digital landscape of 2026, the aim is not to memorise reference books, but to master the art of "smart searching", that is, to effectively locate, filter and verify complex data for engineering calculations); and *c)* professional conviction (technical communication), where an engineer must possess sufficient presentation skills to effectively and intelligently "sell" a technical solution to management or clients, bridging the gap between engineering complexity and business value.

Based on this comprehensive analysis, it can be argued that by 2026 and in the medium term, a successful engineering environment will be shaped by three complementary elements: *a)* quantitative and qualitative indicators of workforce training, i.e. the number and level of training of graduates; *b)* the relevance of knowledge, i.e. the relevance and alignment of study programs with the requirements of digital and 'green' transformation; and *c)* education integrated with the needs of industry, with strong practical links through PBL models, dual education formats, and partnerships with industry.

The collapse or absence of any single corner of this triangle can transform engineering education into an expensive but low-efficiency process. Without this balance, the system becomes incapable of generating either innovative technological solutions or sustainable industrial advantages for the nation.

IV. Effective pathways for modernizing engineering-focused stem education

A. Integrating engineering skills into industrial policy

The experiences of nations that have successfully modernized their industrial bases, such as the Republic of Korea, Singapore, Taiwan, and Finland, demonstrate that engineering education must not be treated as an autonomous academic sphere, but as an indispensable element of national industrial strategy (OECD, 2023; Shin, 2025). In these states, the training of engineering and technical personnel is embedded within long-term industrial development plans. Consequently, educational policy is formulated in tight synchronization with the priorities of technological and digital transformation, the advancement of high-tech sectors, and the strengthening of the national innovation ecosystem.

Key elements of such comprehensive strategies include: a) the targeted expansion of engineering programmes in strategic sectors, which involve concentrating resources on critical areas such as semiconductors, advanced energy technologies, precision engineering, robotics, biotechnology, and digital manufacturing; b) linking government scholarships and grants to specific sectors, which involve providing financial incentives tied to priority sectors to ensure a steady influx of high-calibre specialists into high value-added sectors; c) joint funding of research centres bringing together universities and industry, ensuring the establishment of collaboration centres where students, engineers, and researchers tackle real-world industrial challenges, blurring the boundaries between academia and industry; and d) long-term strategic planning of human resources, aligning the supply of engineering personnel with technological forecasts and sectoral roadmaps to prevent a future structural shortage of qualified specialists.

To ensure that the set objectives are achieved, according to sources (OECD, 2023; Shin, 2025; Center for Strategic and International Studies, 2025; Ministry of Digital Development and Information, 2024; ICEF Monitor, 2025*b*; Ministry of Education Singapore, 2026), by early 2026 the leading industrialized nations had established four clearly defined strategic priorities: *a*) Targeted expansion of priority sectors; *b*) Strategic scholarship models for talent retention; *c*) Co-financing R&D and the "green-digital twin transition"; and *d*) Long-term planning and the "t-shaped" professional modern.

As part of a targeted approach to developing priority sectors, the government is moving away from a general increase in student intake towards a system of "strictly linking" university quotas to projected industrial needs for the period 2025–2030. Real-time labor monitoring systems now adjust training quotas in strategic fields such as next-generation semiconductors and biopharmaceuticals. Under the 2024–2028 Master Plans, these nations are directing multi-billion-dollar investments into the "cultivation" of engineers specialized in Smart Manufacturing, AI Infrastructure, and Next-Gen Intelligent Chips (OECD, 2023; Shin, 2025).

As part of the development of strategic scholarship models designed to retain talent, financial support for students must become a long-term geopolitical tool. For instance, South

Korea's "Study Korea 300K" initiative aims to attract and critically retain 300,000 international STEM students by 2027 through simplified residency pathways for high-tech graduates (Center for Strategic and International Studies, 2025). The 47% growth in international student enrollment over the past two years demonstrates the efficacy of this retention-led strategy. Similarly, Singapore's 2025 expansion of WSQ (Workforce Skills Qualifications) supports technical institute graduates with direct training subsidies aligned with national competency standards (Ministry of Digital Development and Information., 2024).

As part of the initiative for co-funding R&D and the "transition to environmentally friendly digital twins", industrial subsidies are now to be allocated on a "hand-in-hand" basis, i.e. support for industry must be accompanied by investment in education. For example, in 2025, Finland launched a €400 million decarbonization scheme where grant eligibility requires the development of new staff competencies and collaboration with research centers. Finland leads in integrating micro-credentials into Vocational Education and Training (VET), allowing "green" and digital skills to be rapidly injected into classic engineering profiles (Ministry of Digital Development and Information, 2024; ICEF Monitor, 2025 b).

In turn, as part of a long-term planning approach and the concept of the "T-shaped" professional, STEM policy is gradually shifting its focus from training narrowly specialised technical professionals to developing "T-shaped" competencies (ICEF Monitor, 2025b; Ministry of Education Singapore, 2026). This approach emphasizes deep technical expertise (e.g., AI, Cybersecurity) combined with broad cross-functional skills (e.g., systems thinking, technology ethics, and professional communication). Furthermore, this model incorporates Continuous Skill Recalibration. In the 2026 landscape, an engineer's education does not end with a diploma; rather, the T-shaped profile is maintained through lifelong learning pathways. Professionals are encouraged to return to Regional Innovation Hubs every 3–5 years to update their skills in response to new technological disruptions, ensuring that human capital remains as dynamic as the industry itself.

The trends outlined above clearly indicate that future economic success belongs to nations where the Ministry of Industry and the Ministry of Education operate as a unified talent management body. This integration ensures that every dollar invested in education is converted into patents, technological spin-offs, and high-value jobs in strategic sectors. By 2026, the benchmark of a successful educational system is its ability to function as a seamless R&D arm of the national industrial strategy.

B. The early forecasting model for industry-relevant competencies (EFM-IC): A conceptual framework

Effective alignment of engineering education with industrial demands is impossible without systemic and regular skills forecasting. In an era of rapid technological progress and accelerating innovation cycles, traditional planning methods based on historical statistics or static expert

opinions have become insufficient. By 2026, leading economies are transitioning to data-driven forecasting models rooted in Big Data analytics, intelligent labor market monitoring, and the active participation of industrial stakeholders (OECD, 2025*d*; Ministry of Economic Affairs and Employment, 2025).

Recent studies and international reports (Ministry of Education Singapore, 2026; OECD, 2025*d*; Ministry of Economic Affairs and Employment, 2025; Chikasha et al., 2020; European Education Area, 2024; World Economic Forum, 2025; Udemy Business, 2026; Cedefop, 2025*a*; Cedefop, 2025*b*; Hyndman et al., 2021) indicate that this transition requires the following instruments:

- Dynamic labor market research, - utilizing employer surveys and real-time data to identify immediate and emerging deficits in engineering and technical competencies.
- Sectoral skills councils - institutional platforms uniting employers, universities, TVET providers, and government agencies to co-define workforce development priorities.
- Medium- and long-term predictive modelling, - forecasting demand based on industrial trajectories, patent trends, and global socio-economic data.

These instruments empower governments and educational institutions to calibrate student enrollment in accordance with future sectoral needs, update curricula to reflect actual technological shifts, direct strategic investments toward high-growth competency domains, and preemptively mitigate structural skill shortages and regional imbalances.

It is evident that from 2026 onward, data-driven forecasting will become the standard approach for synchronizing engineering education with industrial development. This shift is characterized by the deployment of intelligent monitoring systems that leverage Big Data analytics of job vacancies and Artificial Intelligence to provide real-time, actionable insights into the global engineering talent landscape.

With the aim of bridging the structural gap between research outcomes and the growing demands of Industry 5.0, the authors of this study propose a multi-layered graphical model for the early forecasting of competencies required in industry (EFM-IC). The model is presented as a conceptual circular structural diagram and is illustrated in Figure 4.

The presented EFM-IC model is more than just another employer survey; it creates a Hybrid Predictive Loop that aligns educational recalibration with technological maturation cycles.

The model's architecture is predicated on the integration of three distinct temporal data streams:

Layer A: Real-time labor market intelligence. Utilizing AI-driven natural language processing (NLP) and data crawlers, this layer scans global and local job aggregates (e.g., LinkedIn,

Glassdoor) and Sector Skills Council reports. This provides high-velocity data on immediate skill shortages and shifting job descriptions.

Layer B: Technology and research frontiers. This layer monitors "Leading Indicators" of industrial change by analyzing patent application trajectories and publication volumes in Q1 scientific journals. By identifying surges in specific domains (e.g., solid-state electrolytes or neuromorphic computing) at Technology Readiness Levels (TRL) 4-6, the model anticipates mass-market competency demands 3–5 years before they materialize.

Layer C: Strategic industrial foresight. This top-down layer integrates long-term national industrial policies and corporate R&D roadmaps, defining the future competency domains required for sovereign technological development and the Green-Digital "Twin Transition."

At the core of the EFM-IC is a synthesis engine (Gap Identification and Synthesis Engine) that correlates the aforementioned data streams to identify "Competency Deviations." This engine utilizes a Transformation Matrix to map the obsolescence of traditional skills against forecasted high-value competencies. For example, the transition from Manual CAD Drafting to Digital Twin Simulation and Edge Computing Management is flagged as a critical curriculum update trigger.

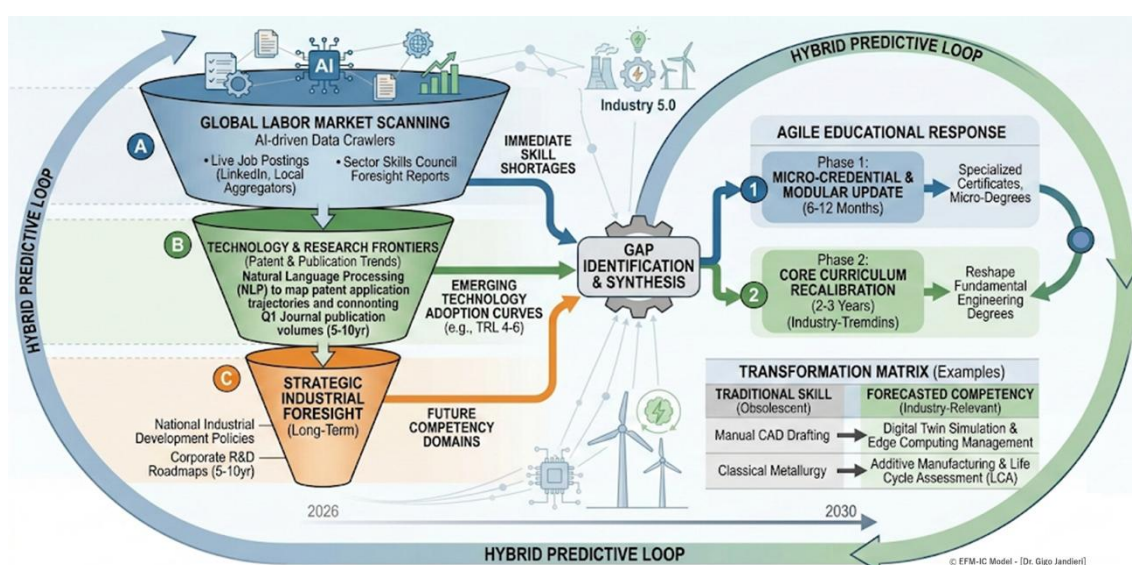


Fig. 4. Early forecasting model for industry-relevant competencies

The model on Figure 4 operationalizes its findings through a bifurcated implementation strategy:

Phase 1: Rapid modular integration (6-12 months). Upon detection of a high-growth competency, the system triggers the development of Micro-credentials and modular certificates. This allows for an immediate infusion of relevant skills into the workforce without waiting for full degree re-accreditation.

Phase 2: Core curriculum recalibration (2-3 years). Sustained trends identified by the funnel are used to fundamentally reshape core engineering degrees, ensuring that foundational STEM education remains aligned with the long-term industrial trajectory.

Based on the conceptual forecasting approach described above, it is evident that the proposed EFM-IC model possesses the potential to fundamentally transform the paradigm of engineering education, shifting it from a state of "institutional inertia" toward "anticipatory governance." By establishing this continuous, data-driven feedback loop, higher education institutions can transcend their traditional roles and evolve into proactive R&D hubs. Consequently, such centers will acquire the strategic capabilities necessary to sustain national industrial competitiveness amidst the structural volatility and rapid technological transitions anticipated throughout the 2026-2030 period.

C. Strengthening synergy between TVET and higher education

Recent research (Farran & Nunez, 2025) confirms that strengthening the linkages between Technical and Vocational Education and Training (TVET) and Higher Engineering Education is becoming a fundamental prerequisite for cultivating a holistic and resilient industrial skills ecosystem. In nations aiming to accelerate industrial modernization, these synergies are viewed as a strategic instrument to bridge the gap between technical and conceptual competencies, ensuring maximum flexibility in career trajectories.

The development of integrated TVET-university pathways will contribute both to the creation of flexible pathways enabling qualified technical specialists to transition to professional engineering roles without devaluation or loss of accumulated practical experience, and to the provision of a continuous infrastructure for upskilling, enabling the workforce to rapidly master new technologies as they are introduced into production. Furthermore, such a development scenario will also contribute to the formation of industrial environments in which technical and engineering levels will no longer be isolated "silos" but will constitute complementary components capable of preventing the fragmentation of national competencies.

The traditional, rigid dichotomy between the "vocational diploma holder" and the "university-educated engineer" has emerged as a primary bottleneck for industrial innovation. Leading global systems in 2025–2026 have addressed this by implementing the following strategic mechanisms:

1. Vertical mobility and the career "Upgrade". Advanced educational frameworks have institutionalized the transition from technician to engineer without temporal loss. This is operationalized through Recognition of Prior Learning (RPL), where industrial shop-floor experience and TVET competencies are converted into ECTS (European Credit Transfer and Accumulation System) credits. This reduces university residency by 1-2 years. Implementation of "2+2" or "3+1" articulation agreements, where students obtain practical certifications at the college level before seamlessly transitioning to a Bachelor of Engineering (B.Eng.) program.

2. *Lifelong learning*: dynamic upskilling and reskilling. With technical skillsets currently facing a 5-year half-life in Industry 4.0 environments, the fluidity between TVET and universities facilitates continuous workforce recalibration (Upskilling): Practicing engineers return to technical colleges to master specific high-tech tools (e.g., programming collaborative industrial robots). Mid-level technicians can pursue modular university education in Industrial Data Management or Digital Twins without exiting the workforce (Reskilling).

3. *The "Full-Stack" talent ecosystem*. Open pathways generate a "full-stack" of specialists who share a common technical language, yielding two critical advantages:

3.1. *Elimination of Professional Elitism*: Engineers with TVET backgrounds possess a superior grasp of real-world manufacturing constraints, leading to a significant reduction in design-to-production errors.

3.2. *Technological Coherence*: Synchronizing curricula ensures that the software and hardware utilized in colleges and universities are identical. This establishes a national technological standard, drastically lowering the total cost of system maintenance and industrial integration.

Comprehensive data, from enrolment surges to integration policies, underscores that the success of future industrial policy will be measured by the quality and agility of human capital, rather than mere headcount.

In light of the above, it can be confidently stated that, at the current stage of global development, engineering is no longer a static profession. It is evolving into a dynamic ecosystem based on the following four pillars: 1. Digitalization (the integration of artificial intelligence, big data and robotics); 2. Green transformation (a focus on environmental sustainability and energy efficiency); 3. Structural flexibility (a seamless link between vocational and technical education and training and higher education); and 4. Practical orientation: the widespread adoption of project-based learning (PBL) and dual education models.

D. Implementation of Continuous Engineering Education Systems

Given the current velocity of technological change, the traditional model of "one-time education for life" has ceased to align with industrial reality. An engineering career spanning 30-40 years can no longer rely solely on initial university training. As technological cycles now renew every 2-3 years, key competencies face rapid obsolescence. Consequently, modern advanced engineering training systems should be designed to provide continuous professional development (CPD), closely integrated with the professional career, modular upgrading programs, enabling rapid adoption of new technologies without long-term absence from the workplace and a flexible system of micro-certification, specializing in high-demand areas such as artificial intelligence, digital duplicates, robotics, ESG engineering, and cybersecurity.

The peculiarities and advantages of implementing the noted approaches to the system of continuous education have been thoroughly described in research (Soeiro, 2022; de Boer, 2025; Sanchez Barrioluengo, 2025). The studies noted show that expanding continuous learning opportunities can develop skills to master such flexible mechanisms of accumulation and retention of relevant knowledge, as a custodial finding of effective channels of communication with the possibility of harmonizing strategies for crisis management, timely development of plans to respond to all types of disruptions in the production process, Adequate digital infrastructure with at least basic digital literacy, etc. With a CPD system, the economic resilience of institutions is increased, which in turn, as a feedback note, demonstrates a strong sense of community among staff and students, providing further support for the professional development of their staff, increasing their motivation and conditions of work.

Nations that fail to establish institutional mechanisms for lifelong learning (LLL) will inevitably face chronic deficits in engineering competencies and a stagnation of industrial modernization. The absence of systemic LLL solutions will lead to a workforce unprepared for the integration of digital, automated, and green technologies, thereby capping productivity and eroding national industrial competitiveness.

Conversely, countries that successfully build Lifelong Learning Ecosystems, integrating the TVET sector, universities, industrial competency centers, micro-credentials, and corporate academies, will secure a strategic advantage. Such ecosystems will foster the development of a broader and more dynamic talent pool, accelerate the spread of innovation, and ensure industrial resilience in the midst of upcoming technological disruption.

Thus, the LLL approach is evolving from a mere educational STEM paradigm into a fundamental element of national industrial policy. It is the primary determinant of a country's capacity to adapt to the twin challenges of digital and green transformation. Looking ahead to 2026-2030, the ability of engineers to "retrain" will undoubtedly become one of the most important building blocks in the chain of ensuring and maintaining successful and sustainable industrial sovereignty.

E. Integrating equity and inclusivity into engineering-focused STEM education

Global data (UNESCO, 2024; OECD, 2025*b*; Royal Academy of Engineering; 2022) consistently indicate a significant underrepresentation of women and specific social groups within engineering disciplines. This disparity is not merely a matter of social justice, it is a critical factor limiting the available talent pool necessary for robust industrial development.

Accumulated practical experience, as reflected in the noted sources, shows that such a lack of inclusivity can lead to a diminished total workforce, a loss of the cognitive diversity essential for innovation, exacerbated regional and sectoral imbalances, and reduced efficiency of state investments in education.

Addressing these challenges requires a comprehensive set of measures to address systemic barriers and increase participation by both women and young people, who are also a vulnerable group in STEM education. Of these measures, three can be distinguished for their importance and practical value: *a)* Promotion of initial vocational guidance through the development of programs specifically aimed at young women and adolescents from lower socioeconomic backgrounds. These programs should promote early interest in engineering, break existing gender stereotypes and boldly demonstrate viable career paths in STEM; *b)* Create targeted financial incentives for scholarships and grants, target underrepresented groups; and *c)* Develop inclusive educational environments that ensure appropriate adaptation of curricula in universities and TVET institutions to include mentorship programs, Educating teachers on diversity and a culture of mutual respect. There is no doubt that such measures are vital to reducing dropout rates among minority students.

The implementation of the above measures could help to remove hidden barriers, which are a source of unconscious bias in teaching practice, and overcome the outdated dichotomy between “male” and “female” professions. This also involves promoting diverse role models and collaborating with employers to create inclusive career pathways.

Such inclusion strategies will enable companies and educational institutions to significantly expand their talent pool, alleviate chronic labor shortages, and enhance the adaptability of teams by drawing on a wide range of previously untapped life experiences and cognitive approaches to stimulate the emergence of the breakthrough ideas needed to solve complex problems.

The proposed transformative shift in the organizational culture of engineering education will directly strengthen the macroeconomic stability of the interconnected and, consequently, interdependent education-industry complex.

In its quest to ensure equality, the engineering sector must undoubtedly go beyond mere compliance with social norms in order to secure the long-term sustainability, enhanced innovation capacity and structural growth necessary for prosperity in the period 2026–2030. In this context, workforce diversity must cease to be an optional or “non-essential” value, it must become the primary driving force behind national technological sovereignty.

Here, we must not forget that measures to protect against global competition for engineering talent must become an integral part of national industrial policy. As noted above, it is no longer enough simply to train engineers – the state must create a “talent retention ecosystem” comprising lifelong learning opportunities, attractive career paths, competitive working conditions, a well-developed research infrastructure, and incentives for domestic high-tech enterprises. Such measures are necessary not only to mitigate the effects of the “brain drain”, but also to strengthen national human capital in the face of growing international demand.

In the era of global talent volatility, countries that fail to invest in the holistic retention and development of their engineer’s risk being relegated to the technological periphery, becoming

mere consumers of innovations created elsewhere (Center for China and Globalization, 2025; World Bank, 2023).

V. A multidimensional framework for engineering education transformation

The cumulative evidence of this study indicates that the modernization of engineering education cannot be achieved through isolated curricular updates. Instead, it requires a fundamental shift toward engineering- focused STEM Education. This approach positions engineering as the primary integrative discipline that translates scientific discovery into industrial innovation. As synthesized in the framework below (see Table 1), this transition is a multilevel institutional process. It necessitates the convergence of national strategic planning (Macro-level), university–industry operational synergy (Meso-level), and the dynamic integration of emerging competencies into the pedagogical process (Micro-level). By aligning these dimensions, engineering education transcends its traditional role, becoming a foundational pillar of national technological sovereignty.

Table I: Systemic conditions for engineering-focused stem education transformation

Systemic Condition	Key Transformation Mechanism	Level of Implementation	Strategic Objective
Strategic Alignment	Synchronizing enrolment quotas with industrial priorities.	National / Macro	Elimination of labour market structural imbalances.
University–R&D Hubs	Deployment of Industrial PhD programs and Shared Labs.	Institutional / Meso	Closing the theory-practice gap via applied innovation.
Twin Transition Skills	Integration of Digital (AI) and Green (ESG) competencies	Curricular / Micro	Ensuring workforce readiness for the dual transition
Seamless Continuum	Integration of TVET and Higher Ed via micro-credentials	Systemic / National	Enabling lifelong professional mobility and agility
STEM Pipeline Expansion	Inclusive talent attraction and regional life ecosystems	Regional / Social	Securing a sustainable and diversified talent pool

Predictive Forecasting	Institutionalizing Data-Driven foresight and Big Data	State / Regulatory	Proactive and agile curriculum recalibration

According to the multi-level framework presented in Table 1, the transition to the “Industry 5.0” landscape requires a move away from traditional, passive models of education. The research confirms that engineering-focused STEM Education serves as the vital link between theoretical knowledge and industrial application, forming the backbone of national technological autonomy. In this context, the engineering component of STEM acts as the catalytic force that transforms scientific inquiry into resilient industrial solutions.

By institutionalizing the five systemic conditions identified in this study (sections 4.1–4.5), by focusing on the particularly important stages of data-driven skills forecasting and the integration of seamless pathways from traditional vocational and technical education to continuous, inclusively expanded higher STEM education, countries can move beyond simply producing graduates and transition to the development of high-quality human capital capable of responding in a timely manner to the challenges of Industry 5.0. Ultimately, such a strategic reorientation ensures that the engineering ecosystem will function not merely as a passive academic subsystem, but as a key structural mechanism that ensures technological sovereignty and creates the conditions for sustainable competitiveness in an increasingly volatile global economy.

Conclusions

The transition from Industry 4.0 to 5.0 requires a decisive shift away from traditional, isolated academic models towards an integrated and adaptive, industry-relevant ecosystem capable of evolving in step with current and future technological and industrial changes.

In a paradigm defined by human-machine complementarity and the strategic coupling of digital and human capabilities, expanding university enrollment alone can no longer serve as a meaningful driver of industrial development. Without sustained alignment with industry needs and continuous curricular recalibration, engineering education risks devolving into a credential-producing system detached from economic reality.

Engineering-focused STEM education, in response to the challenges of the modern world, is becoming a key link between scientific knowledge and industrial application. Within this interface, the engineering component functions as the catalytic mechanism that transforms research into resilient, scalable, and context-specific industrial solutions. As global competition for talent intensifies, processes such as inclusivity expansion, lifelong learning, micro-credentialing, and vertical mobility must be understood not as peripheral trends but as structural imperatives for sustainable industrial transformation. Likewise, modular and flexible programs

that cultivate T-shaped STEM competencies will become essential for building a workforce capable of navigating the complexity of Industry 5.0.

To bridge the widening digital and environmental divide, a systemic approach is required rather than a fragmented one. The following three interdependent conditions therefore need to be met:

1. Strategic realignment at the macro level to ensure that engineering talent pipelines are synchronized with national industrial priorities.

2) Institutional integration at the meso level, where universities evolve into applied R&D hubs supported by industrial PhD programs and shared laboratories.

3) Pedagogical evolution at the micro level, eliminating the digital–green skills gap and establishing seamless TVET–higher education pathways that support lifelong professional adaptability.

A further shift from reactive planning to proactive, evidence-based forecasting is essential. Integrating big data analytics of labor markets, real-time monitoring of job vacancies and continuous tracking of innovation and patent activity will allow education systems to predict rather than simply react to industrial change.

Once early forecasting mechanisms and deep industrial integration become embedded within the educational environment, the alignment of human capital with Industry 5.0 will transcend conventional workforce development and emerge as a matter of national strategic security. In this context, the cumulative effect of targeted reforms will not only strengthen technological sovereignty but also convert academic achievements into durable industrial capital, laying the foundation for long-term economic resilience.

References:

- Abdelali, A., Hicham G., Nadège T.-M., Brahim, E., Mounir, A., Safae M. (2025). Digital twin technology and artificial intelligence in energy transition: A comprehensive systematic review of applications. *Energy Reports*, 13, 5196-5218, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.04.060>
- Aiginger, K. (2024). A new industrial policy as the key to the green transition. In S. Smirnov & H. Spenner (Eds.), *Investing in the structural transformation: 2024 European public investment outlook*. Open Book Publishers. <https://doi.org/10.11647/obp.0434.07>
- Alexandrova, S., & Krasteva, V. (2026). Skills Ecosystem and the Role of School Management for Sustainable Development of Dual Education. *Societies*, 16(1):20. <https://doi.org/10.3390/soc16010020>

- Álvarez Torres, F.J., Rangel Delgado, J.E., Sánchez Regla, A.L. (2025). University 3.0: Entrepreneurship Education and Socio-Digital Skills (SDS) as Pillars of Sustainability in the Future Education for the Asia-Pacific and the World. In: Ivanova Boncheva, A., Rangel Delgado, J.E. (eds) *Transition to a Safe Anthropocene in the Asia-Pacific. The Anthropocene: Politik-Economics-Society-Science*, 39. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66521-9_4
- Angerott, A., Kohlmeyer, E., & Speier, H. (2024). MINT-Herbstreport 2024: MINT-Fachkräfteengpässe und die Rolle von Innovationen. Institut der deutschen Wirtschaft (IW). <https://www.iwkoeln.de>
- Bashmakov, I.A., L.J. Nilsson, A. Acquaye, C. Bataille, J.M. Cullen, S. de la Rue du Can, M. Fishedick, Y. Geng, K. Tanaka, (2022): Industry. In IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.013>
- Blind, K. (2025). Standardization and standards: Safeguards of technological sovereignty? *Technological Forecasting and Social Change*, 210, 123873. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123873>
- Boman, J., Barrioluengo, M. S., & van der Weijden, I. (2026). Determinants of the career pathways of doctorate holders: Evidence from eight European universities. *Higher Education*, 91, 311–329. <https://doi.org/10.1007/s1073>
- Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>
- Brückner, A., Wölke, M., Hein-Pensel, F., Schero, E., Winkler, H., & Jabs, I. (2025). Assessing industry 5.0 readiness—Prototype of a holistic digital index to evaluate sustainability, resilience and human-centered factors. *International Journal of Information Management Data Insights*, 5(1), 100329. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2025.100329>
- Cedefop. (2025a). Skills forecast 2025: Technical report. European Centre for the Development of Vocational Training. https://www.cedefop.europa.eu/files/skills_forecast_2025_technical_report.pdf
- Cedefop. (2025b). Skills forecast 2025: Quantitative projections of future labor market trends – Germany. https://www.cedefop.europa.eu/files/skills_forecast_-_germany_2025.pdf
- Center for China and Globalization. (2025). AGTO report | Global talent flows: Trends and prospects 2025. <http://en.ccg.org.cn/archives/88854>

- Center for Strategic and International Studies. (2025). Critical and emerging technologies index 2025: South Korea report. https://www.belfercenter.org/sites/default/files/2025-06/CountryMemo_South%20Korea_June%202025.pdf
- CESAER. (2025). Driving change - Annual report 2024. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14938723>
- Chikasha, P., Ramdass, K. R., Mokgokloa, K., & Maladzhi, R. W. (2020). Aligning industrial engineering education with industry through atomic curriculum manipulation. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 31(4), 92–103. <https://doi.org/10.7166/31-4-2393>
- Compagnucci, L., & Spigarelli, F. (2025). Industrial doctorates: A systematic literature review and future research agenda. *Studies in Higher Education*, 50(6), 1076–1103. <https://doi.org/10.1080/03075079.2024.2362407>
- Compagnucci, L., Spigarelli, F., Perugini, F., et al. (2025). Industrial doctorates for regional development: The case of Le Marche Region. *Higher Education*, 90, 1591–1611. <https://doi.org/10.1007/s10734-024-01394-9>
- Council of the European Union. (2026). Competitiveness Council meeting. The 2026 annual single market and competitiveness report. <https://www.consilium.europa.eu/en/meetings/compet/2026/02/26/>
- Cunningham, J. A., Menter, M., & Starke, F. (2025). The evolution of university technology transfer research: A text mining approach. *Journal of Technology Transfer*, 50, 1231–1268. <https://doi.org/10.1007/s10961-024-10133-2>
- de Boer, W. (2025). Empowering lifelong learning: Building flexible pathways in engineering education. *European Journal of University Lifelong Learning*, 9(2), 61–68. <https://doi.org/10.53807/0902Weq8>
- Deloitte Insights. (2025). The human-machine collaboration in Industry 5.0: Scaling trust and competency. Deloitte Development LLC. <https://www2.deloitte.com>
- Demirović Bajrami, D., Petrović, M. D., Turgel, I. D., Radovanović, M. M., & Bugrova, E. D. (2025). Reindustrializing the hidden gems: A systematic review of creative efforts in second-tier cities. *Urban Science*, 9(12), 493. <https://doi.org/10.3390/urbansci9120493>
- Dzhandieri, G. V. (2005). Ways of improving the efficiency of the production of cast iron and ferroalloys in blast furnaces and electric furnaces. *Metallurgist*, 49, 7–10. <https://doi.org/10.1007/s11015-005-0041-y>
- Dzhandieri, G. V., Surguladze, T. A., & Robakidze, D. V. (2007). Mathematical simulation and control of solidification of alloys in the process of suspension casting. *Metal Science and Heat Treatment*, 49, 172–175. <https://doi.org/10.1007/s11041-007-0031-8>

- Dzhandieri, G. V., Surguladze, T. A., Robakidze, D. V., et al. (2009). Control of the process of direct manganese alloying of alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 51, 533–539. <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9207-8>
- Elia, G., Margherita A. and Passiante, G. (2021). Management Engineering: A New Perspective on the Integration of Engineering and Management Knowledge. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 68 (3), 881–893. <https://10.1109/TEM.2020.2992911>
- European Commission. (2025). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A blueprint for a European degree (COM(2025) 90 final). EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52025DC0090>
- European Education Area. (2024). STEM education and training. <https://education.ec.europa.eu/focus-topics/stem>
- Farran, I., & Nunez, I. (2025). Converging pathways: New approaches to integrate vocational education training and higher education. *Journal of Vocational Education & Training*, 77(4), 1147–1165. <https://doi.org/10.1080/13636820.2024.2428769>
- Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). (2025). Regulatory sandboxes. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Dossier/regulatory-sandboxes.html>
- Fraunhofer USA. (2024). Fraunhofer USA Focus 2024. 44 p. Fraunhofer USA, Inc.
- Garcés, G., Sanz-Benlloch, A., Montalbán-Domingo, L., & Díaz-Lantada, A. (2025). Future engineering competencies for a sustainable world: An integral framework for engineering education in the Industry 4.0 era. *International Journal of Sustainability in Higher Education*. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-08-2024-0531>
- Ghazal, M., Osman, M., Alhalabi, M., Gad, A., Yaghi, M., Ramadan, M., & Alkhedher, M. (2026). Advancements and challenges in green hydrogen production, storage, transportation, and utilization for climate-resilient energy systems. *Results in Engineering*, 29, 108993. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.108993>
- Grüner, S. L. (2024). Uncertainty decomposed: Understanding levels of contingency to enable effective decision-making. *Strategic Management*, 29(3), 5–27. <https://doi.org/10.5937/StraMan2400003G>
- Gutovic, V. (2025). Mapping micro-credentials in Latin America and the Caribbean: Towards a common framework. (T. Xia, Ed.). UNESCO International Institute for Higher Education in Latin America and the Caribbean. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000393794>

- Hagenreiner, T., Engelmann, G., & Köhler, P. (2015). Engineering education in an industrial context. *International Journal of Advanced Corporate Learning (iJAC)*, 8(2), 28–36. <https://doi.org/10.3991/ijac.v8i2.4680>
- Hoppe, A., & Fujishiro, K. (2025). Advancing migration research in work and organizational psychology: Person, context and time. *European Journal of Work and Organizational Psychology*, 34(4), 403–406. <https://doi.org/10.1080/1359432X.2025.2493458>
- Hoving, S. (2025). Trends in engineering - The intersection of sustainability and technology. Springer Nature. <https://www.springernature.com/gp/librarians/the-link/rd-blogpost/future-engineering-sustainability-tech/27772010>
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and practice* (3rd ed.). OTexts. <https://OTexts.com/fpp3>
- ICEF Monitor. (2025a). OECD tracks global student flows to developed, market-based economies. <https://monitor.icef.com/2025/09/oecd-tracks-global-student-flows-to-developed-market-based-economies>
- ICEF Monitor. (2025b). South Korea hits its 300,000 student target two years ahead of schedule. <https://studvoro.com/education/south-korea-international-student-enrollment-target-surpassed>
- International Energy Agency. (2023). *Energy technology perspectives 2023*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/7c6b23db-en>
- IEA - International Energy Agency. (2024). *World energy employment 2024*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-employment-2024>
- International Energy Agency. (2025). *Energy technology perspectives 2025*. <https://www.iea.org/>
- IRENA. (2024). *Renewable energy and jobs: Annual review 2024*. International Renewable Energy Agency. https://www.ilo.org/sites/default/files/2024-10/IRENA-ILO%20Renewable%20energy%20and%20jobs_2024.pdf
- Jandieri, G. (2022). A generalized model for assessing and intensifying the recycling of metal-bearing industrial waste: A new approach to the resource policy of manganese industry in Georgia. *Resources Policy*, 75, 102462. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102462>
- Jandieri, G., Janelidze, I., & Sakhvadze, D. (2023). Theoretical prerequisites for the formation of a paradigm of synergy between human and artificial intelligence in solving the problems of circular transformation of metallurgical enterprises. *Sciences of Europe*, 114, 96–101. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7811570>
- Jin, L., Geng, R., Tong, Y., & Hu, S. (2026). Is industry-university-research cooperation really a panacea for enhancing innovation quality? Evidence from Chinese firms. *International*

- Jonbekova, D., Sparks, J., Hartley, M., & Kuchumova, G. (2020). Development of university–industry partnerships in Kazakhstan: Innovation under constraint. *International Journal of Educational Development*, 79, 102291. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2020.102291>
- Jordaan, J. A., & Garduño-Rivera, R. (2024). Municipality manufacturing agglomerations unveiled: Exploring spatial structural transformation in Mexico under import substitution and trade liberalization. *Applied Geography*, 168, 103317. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2024.103317>
- Kavlashvili, K. (2026). Management of Intellectual Property in the Era of Artificial Intelligence. *Georgian Scientists*, 8(2), 58–71. <https://doi.org/10.52340/g.s.2026.08.02.05>
- Kercher, J., Knüttgen, N., Netz, N., & Fuge, I. (2025). Wissenschaft weltoffen kompakt 2025. Daten und Fakten zur Internationalität von Studium und Forschung in Deutschland und weltweit. wbv Media. <https://doi.org/10.3278/9783763978694>
- Khan, S. H., & Mourad, A. H. I. (2025). Integrating Industry 4.0 in engineering education: Implementation patterns, pedagogical strategies, and industry alignment. *Cogent Education*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2025.2588010>
- Kim, M., Ghobadi, F., Tayerani Charmchi, A. S., Lee, M., & Lee, J. (2026). Digital twins for clean energy systems: A state-of-the-art review of applications, integrated technologies, and key challenges. *Sustainability*, 18(1), 43. <https://doi.org/10.3390/su18010043>
- König, T., & Brenner, T. (2025). Skill shortages and industrial clusters—empirical evidence from German establishment data. *The Annals of Regional Science*, 74, 93. <https://doi.org/10.1007/s00168-025-01422-1>
- Lavado-Anguera, S., Velasco-Quintana, P.-J., & Terrón-López, M.-J. (2024). Project-based learning (PBL) as an experiential pedagogical methodology in engineering education: A review of the literature. *Education Sciences*, 14(6), 617. <https://doi.org/10.3390/educsci14060617>
- Li, G., Yuan, C., Kamarthi, S., Moghaddam, M., & Jin, X. (2021). Data science skills and domain knowledge requirements in the manufacturing industry: A gap analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 692–706. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.007>
- Li, J., Gao, F., & Gong, Y. (2023). Innovation ecosystem of future industry: Structure and path. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38(6), 29. <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20220822006>

- Lutchen, K. R. (2024). A new model for university-industry partnerships. Harvard Business Publishing. <https://hbsp.harvard.edu/inspiring-minds/a-new-model-for-university-industry-partnerships>
- Matsaberidze, M., Kerkadze, J., Janelidze, I., & Jandieri, G. (2022). To identify priorities in science and technology. *Georgian Scientists*, 4(1), 23-35. <https://doi.org/10.52340/gs.2022.04.01.04>
- Martínez-Izquierdo, L., & Torres Sánchez, M. (2022). Dual vocational education and training and policy transfer in the European Union policy: The case of work-based learning and apprenticeships. *Cogent Education*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2022.2154496>
- Mi, R., Liu, S., Liu, C., Li, Z., & Li, S. (2025). The nexus of digitalization, talent, and high-quality development: How clusters foster sustainable economic growth. *Sustainability*, 17(18), 8503. <https://doi.org/10.3390/su17188503>
- Ministry of Digital Development and Information. (2024). Smart Nation 2.0: A thriving digital future for all. <https://file.go.gov.sg/smartnation2-report.pdf>
- Ministry of Economic Affairs and Employment. (2025). Government adopts clean transition aid scheme for industrial investments: EUR 400 million reserved for 2025. <https://tem.fi/paatos?decisionId=3116>
- Ministry of Education Singapore. (2026). Institute of Technical Education (ITE) Progression Award (IPA). <https://www.moe.gov.sg/financial-matters/awards-scholarships/ite-progression-award-ipa>
- Naseer, F., Tariq, R., Alshahrani, H. M., et al. (2025). Project based learning framework integrating industry collaboration to enhance student future readiness in higher education. *Scientific Reports*, 15, 24985. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10385-4>
- National Society of Professional Engineers. (2025). The state of licensure report: Why PE is critical for Industry 4.0. <https://www.nspe.org>
- New York Academy of Sciences. (2024). The global STEM paradox. https://www.nyas.org/wp-content/uploads/2024/02/global_stem_paradox.pdf
- O'Connor, S., Power, J., Blom, N., & Tanner, D. (2026). Problem and project-based learning (PBL) within an online engineering module: An examination of student teamwork satisfaction and attitudes. *European Journal of Engineering Education*, 1–30. <https://doi.org/10.1080/03043797.2026.2618659>
- OECD. (2023). OECD reviews of innovation policy: Korea 2023. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/bdcf9685-en>
- OECD. (2025a). Education at a glance 2025: OECD indicators. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/1c0d9c79-en>

- OECD. (2025*b*). Skills outlook 2025: Building the skills of the 21st century for all. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-skills-outlook-2025_26163cd3-en/full-report.html
- OECD. (2025*c*). OECD science, technology and innovation outlook (2025): Driving change in a shifting landscape. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/5fe57b90-en>
- OECD. (2025*d*). Vocational education and training and the green transition in Finland. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/4d29a34a-en>
- Oeij, P., Lenaerts, K., Dhondt, S., Dijk, W. V., Scharinger, D., Sorko, S., & Warhurst, C. (2024). A conceptual framework for workforce skills for Industry 5.0: Implications for research, policy and practice. *Journal of Innovation Management*, 12(1), 205. https://doi.org/10.24840/2183-0606_012.001_0010
- Oliss, B., McFaul, C., & Riddick, J. C. (2023). The global distribution of STEM graduates: Which countries lead the way? Center for Security and Emerging Technology. <https://cset.georgetown.edu/article/the-global-distribution-of-stem-graduates-which-countries-lead-the-way/>
- Quirós-Alpera, S., Roets, A. O. S. B., Robina-Ramírez, R., & Leal-Solís, A. (2025). Bridging theory and practice: Challenges and opportunities in dual training for sustainability education at Spanish universities. *Societies*, 15(2), 32. <https://doi.org/10.3390/soc15020032>
- Rampasso, I. S., Quelhas, O. L. G., Anholon, R., Pereira, M. B., Miranda, J. D. A., & Alvarenga, W. S. (2020). Engineering education for sustainable development: Evaluation criteria for Brazilian context. *Sustainability*, 12(10), 3947. <https://doi.org/10.3390/su12103947>
- Reis, A. M., Dall-Orsoletta, A., Nunes, E., et al. (2025). Quality costs and Industry 4.0: Inspection strategy modelling and reviewing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136, 3883–3897. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13184-9>
- Reshoring Initiative. (2025). Data report: Reshoring and FDI continue at historic levels despite labor shortages. <https://www.reshorennow.org>
- Rikala, P., Braun, G., Järvinen, M., Stahre, J., & Hämmäläinen, R. (2024). Understanding and measuring skill gaps in Industry 4.0 — A review. *Technological Forecasting and Social Change*, 201, 123206. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123206>
- Royal Academy of Engineering. (2022). Literature review on engineering education and skills policy. <https://raeng.org.uk/media/03hjujfc/literature-review-on-engineering-education-and-skills-policy-2.pdf>
- Sanchez Barrioluengo, M. (2025). Micro-credentials in higher education (F. Biagi & G. Di Pietro, Eds.). Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/0157920>

- Sarpong, D., Meissner, D., Moraes, G., et al. (2025). The impact of university-industry engagement and the rise of competency transfer partnerships. *Journal of Technology Transfer*. <https://doi.org/10.1007/s10961-025-10251-5>
- Senna, P. P., Barros, A. C., Roca, J. B., & Azevedo, A. (2023). Development of a digital maturity model for Industry 4.0 based on the technology-organization-environment framework. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109645. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109645>
- Shin, A. (2025). Economic growth and design capability: A comparative study of Singapore, South Korea, Taiwan and Finland. *Journal of Enterprise and Business Intelligence*, 5(2), 86–97. <https://doi.org/10.53759/5181/JEBI202505009>
- Smirnov, S. (2025). Work-based learning for industrial modernisation. In S. Smirnov & H. Spenner (Eds.), *Dual systems and work-based learning: Lessons from Europe and the Eastern Partnership countries* (pp.165–188). Open Book Publishers. <https://doi.org/10.11647/obp.0434.07>
- Soeiro, A., de Wever, K., & Bochar, D. (2022). Engineering professional context and CPD. *European Journal of University Lifelong Learning*, 6(1), 39–49. <https://doi.org/10.53807/06018wwe>
- Stemgenic Global. (2025). Future of jobs report 2025: Key trends in AI and industry transformation. <https://stemgenicglobal.com/future-of-jobs-report-2025/>
- Tilak, B. G., & Choudhury, P. K. (2021). Paradoxes and contradictions in the growth of engineering education in India: Challenges and prospects. Council for Social Development. <https://www.csdindia.org/wp-WorkingPapers/Paradoxes-and-Contradictions-in-the-Growth-of-Engineering-Education-in-India-Challenges-and-Prospect.pdf>
- Turgel, I. D., & Ulyanova, E. A. (2023). Comparative analysis of the role of second-tier cities in the development of European countries and Russia. *Regional Studies, Regional Science*, 10(1), 604–624. <https://doi.org/10.1080/21681376.2023.2195465>
- U.S. Green Building Council. (2024). LEED v5: The future of sustainable engineering competencies. <https://www.usgbc.org>
- Udemy Business. (2026). 2026 global learning & skills trends report. <https://business.udemy.com/2026-global-learning-skills-trends-report/>
- UNESCO Institute for Statistics. (2024). New UIS data show that the share of women in STEM graduates has been stagnant for 10 years. (By Silvia Montoya). <https://world-education-blog.org/2024/04/25/new-uis-data-show-that-the-share-of-women-in-stem-graduates-stagnant-for-10-years/>

- UNESCO. (2021). Engineering for sustainable development: Delivering on the Sustainable Development Goals. Embassy of Good Science. <https://www.unesco.org/en/articles/engineering-sustainable-development-delivering-sustainable-development-goals>
- UNESCO-UNEVOC. (2020). Future of TVET teaching. <https://unevoc.unesco.org/home/Future+of+TVET+Teaching>
- UNIDO. (2025). Competitive industrial performance (CIP) index. <https://stat.unido.org/data/table?dataset=cip>
- Walsh, J., Nguyen, T. Q., & Hoang, T. (2023). Digital transformation in Vietnamese SMEs: Managerial implications. *Journal of Internet and Digital Economics*, 3(1-2), 18–32. <https://doi.org/10.1108/JIDE-09-2022-0018>
- Wehnert, C., Hönig, J., Spielmann, T., Schnierle, M., Franz, J., Röck, S., Riedel, O., Scheifele, C., & Roth, A. (2021). On-the-job-training in mechanical and plant engineering through Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 9(2). <https://doi.org/10.48513/joted.v9i2.218>
- Wojtaszek, H. (2025). Energy transition 2024–2025: New demand vectors, technology oversupply, and shrinking Net-Zero 2050 premium. *Energies*, 18(16), 4441. <https://doi.org/10.3390/en18164441>
- World Bank. (2019). World development report 2019: The changing nature of work. <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2019>
- World Bank. (2023). The use of advanced technology in job matching platforms: Recent examples from public agencies. <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/ceb5c5792ad0d874e9b1c3cc71362f46-0460012023/original/Digital-Job-Matching-Platforms-S4YE-Draft-Note-for-Discussion.pdf>
- World Economic Forum. (2025). The future of jobs report 2025. <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/digest/>
- Zhao, X., Lu, X., & Shi, H. (2025). Redesigning university–industry collaboration: A theoretical framework for innovation-oriented partnerships. *International Journal of Business and Management Invention*, 14, 193–207. <https://doi.org/10.35629/8028-1406193207>

ინჟინერიაზე ფოკუსირებული STEM განათლების ტრანსფორმაცია სწავლებისადმი არსებული მიდგომის „Industry 5.0“ პარადიგმასთან შესაბამისობის უზრუნველსაყოფად

გიგო ჯანდიერი^{1,2*}, ინგა ჯანელიძე³

¹რაფიელ დვალის მანქანათა მექანიკის ინსტიტუტი, 0186 თბილისი, საქართველო

²დამოუკიდებელი ექსპერტი, 04205 ლაიფციგი, გერმანია

³საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 0160 თბილისი, საქართველო

*ელ. ფოსტა: gigo.jandieri@gmail.com

ანოტაცია

მსოფლიო ეკონომიკის წინაშე მდგარი მუდმივად მზარდი გამოწვევების პირობებში ინჟინერიაზე ფოკუსირებული STEM განათლება სულ უფრო ხშირად განიხილება სახელმწიფოებრივი რანგის გადამწყვეტი მნიშვნელობის მქონე სტრუქტურული ფაქტორის რანგში, რომელსაც რეალურად ძალუძს არსებითი გავლენა იქონიოს სახელმწიფოს ინდუსტრიული დინამიკის, პროდუქტიულობისა და ტექნოლოგიური განვითარების ტრაექტორიების მართებულ ჩამოყალიბებაზე. თანამედროვე ინდუსტრიის ახალი რევოლუციური პარადიგმის „Industry 5.0“ პირობებში, რომლის ერთ-ერთ საკვანძო მახასიათებელს ადამიანსა და მანქანას (ციფრულ სამყაროს) შორის კომპლემენტარობის მოთხოვნა წარმოადგენს, სახელმწიფოს კონკურენტუნარიანობის უზრუნველყოფის ერთ-ერთ მთავარ წინაპირობად სწორედ, რომ საინჟინრო განათლების გათანამედროვეებისა და არსებულ რეალიებთან სტრატეგიული შეთანხმებულობის ამოცანის გადაჭრა გვესახება. ამდენად, წინამდებარე კვლევაში წარმოდგენილია მოწინავე სახელმწიფოთა ინდუსტრიული განვითარების, მსოფლიო ბაზრის მოთხოვნებთან შეთანხმებულობისა და მართვის შესაბამისი ფუნდამენტის უზრუნველყოფი საგანმანათლებლო-საკადრო პოლიტიკის პროდუქტიულობათა შედარებითი ანალიზი, განიხილება ინჟინერიაზე ფოკუსირებული STEM კადრების პროფესიულ-ტექნიკური განათლება-გადამზადების (TVET) აქტუალური საკითხები. არგუმენტირებულად საბუთდება საგანმანათლებლო სასწავლებლებსა და მრეწველობის ობიექტებს შორის თანამშრომლობის ახალ, უფრო პროდუქტიულ ინსტიტუციონალურ რანგში აყვანის აუცილებლობა. გამოკვეთილია საუნივერსიტეტო საინჟინრო განათლების ტრანსფორმაციის, კერძოდ კი - ნეიტრალური, სრულებით დამოუკიდებელი აკადემიური სისტემიდან, ქვეყნის სამრეწველო-სტრატეგიული

განვითარებისათვის ხელშემწყობ ინსტრუმენტად გარდაქმნის მიზანშეწონილობა, რისთვისაც შემოთავაზებულია სწავლების პროცესში ისეთი ახალი კომპონენტების გათვალისწინება, როგორებიცაა ინკლუზიური და დივერსიფიცირებული STEM განათლების დანერგვა, ციფრული და მწვანე ტექნოლოგიების განვითარების უნარების მქონე, ადამიანური კაპიტალის დივერსიფიცირებული განვითარება, არსებული სასწავლო-სამეცნიერო და/ან ლაბორატორიული ბაზების გამოყენებითი კვლევების R&D ინოვაციების ჰაბებად გარდაქმნა, საინჟინრო კომპეტენციებზე ფაქტობრივი მოთხოვნების, ცვალებადობის წინმსწრები პროგნოზირების მეთოდოლოგიების დამუშავება და ინსტიტუციონალიზაცია. ყოველივე აღნიშნულის საფუძველზე გამოტანილია დასკვნა, რომ ინჟინერიაზე ფოკუსირებული STEM განათლების შემოთავაზებული მოდერნიზებული მოდელი, პრაქტიკულად ნებისმიერი სახელმწიფოსათვის შეიძლება გახდეს არა მხოლოდ ტექნოლოგიური სუვერენიტეტის ან ინდუსტრიული ავტონომიის უზრუნველყოფის ერთგვარი გარანტი, არამედ შესძინოს მათ ადაპტაციური შესაძლებლობები „Industry 5.0“ ახალ ინდუსტრიულ ლანდშაფტში სრულფასოვანი გაწევრიანებისათვის.

Synthesis and Research of Poly [methyl-3-(*tetraacetyl mannoside*) propyl] siloxane for use in industrial production

Lali Tabatadze¹², Mariam Mtchedlishvili¹, Darejan Gulbani¹, Nino Garsevanishvili¹, Tamuna
Chipchiuri¹, Salome Dvali*, Giorgi Gigauri¹

¹Sokhumi State University, Faculty of Natural Sciences, Mathematics, Technologies and Pharmacy, Tbilisi, Georgia;

²P. Melikishvili Institute of Physical and Organic Chemistry, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Tbilisi,
Georgia

Abstract

Biopolymer products have secured an important position in industrial technology due to their unique properties, including thermal stability, flexibility, and resistance to environmental factors. This article discusses the synthesis and characterization of Poly [methyl-3- (*tetraacetyl mannoside*) propyl] siloxane (PMMaPS). The physicochemical characteristics and elemental analysis of the synthesized product were studied by FTIR, ¹H NMR, ¹³C NMR spectrophotometer and scanning electron microscope (SEM).

Keywords: synthesis, polymers, PMMaPS, PMHS, siloxane

Introduction

Natural and synthetic polymers due to its non-toxicity, biocompatibility, biodegradability, chemical reactivity, and microbe resistance, it has excellent potential for various scientific uses in biomedical, food, agricultural, pharmaceutical, and other industries. The many advances in glycoscience have more and more brought to light the crucial role of glycosides and glycoconjugates in biological processes [1-4].

Additional interest in glycoside synthesis has arisen with the prospect of producing sustainable materials from these abundant polymers [5-7]. Among the bio catalytic strategies, glycosynthases, genetically engineered glycosides void of hydrolytic activity, have gained much interest in recent years, enabling not only the selective synthesis of small glycosides and glycoconjugates, but also the production of highly functionalized polysaccharides.

Modified mono- and polysaccharide derivatives play an important role in discovering new sustainable materials as they originate from renewable resources. Polymers are defined as thermoplastic and thermoset polymers and elastomers. Polymers which are biodegradable currently achieve high interest in materials science. Specific initiators and catalysts are used to initiate and accelerate the chemical reactions between monomers [8]. Poly[methyl-3-(tetraacetylmannoside) propyl] siloxane (PMMaPS) was synthesized by acetylation of mannopyranoside, allylation of the resulting product, and subsequent hydrosilylation using our selected chosen catalysts.

Materials and Methods

Starting materials and reagents required for the synthesis Polymethyl mannoside polysiloxane (PMMaPS): 1,2,3,4,6-penta-O-acetyl- β -D-mannopyranose, allyl alcohol; $[(\text{BF}_3 \cdot \text{O}(\text{CH}_2)_2)]$ - for allylation as a catalyst; toluene, methanol; Pt/C - for silylation catalyst and poly(methylhydro)siloxane (PMHS), were purchased from Aldrich and used without further purification. The Chemical structure and elemental analysis of the synthesized product PMMaPS were studied by FTIR, ^1H NMR, ^{13}C NMR spectrophotometer and scanning electron microscope (SEM).

Fourier transform infrared (FTIR) spectra of the samples were recorded using a Shimadzu IR Affinity-1S FTIR spectrophotometer. The spectra were collected in the range of $4000\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ with 32 scans at a resolution of 4 cm^{-1} .

^{13}C NMR and ^1H NMR spectra of the compound were recorded on a 400 MHz spectrometer using CDCl_3 as the solvent.

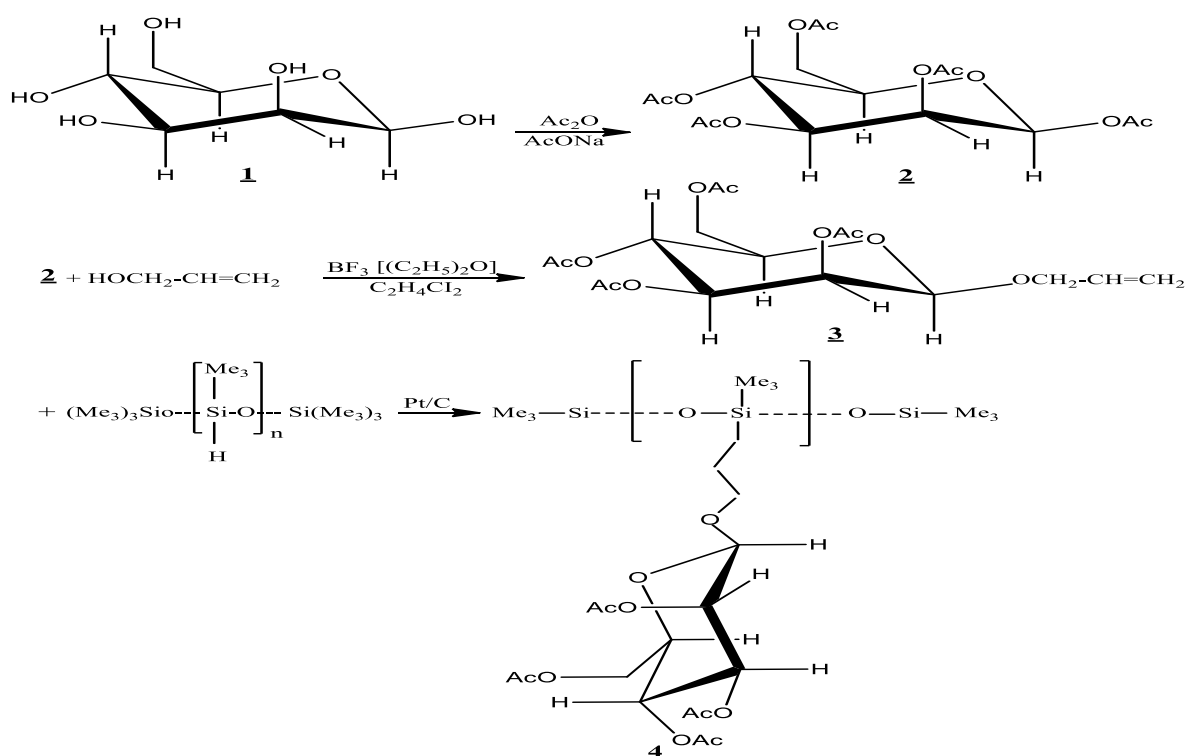
Scanning electron microscope (SEM) of the synthesized product (PMMaPS). The surface morphology and elemental composition of the samples were examined using a ZEISS Sigma 300 scanning electron microscope. The maximum accelerating voltage was 30 kV, and the spatial resolution was 2.0 nm. The microscope was equipped with a water-cooled lens system that maintained the operating temperature at 19.5°C , ensuring a stable magnetic field during analysis.

Results and Discussion

Synthesis of allyl-2,3,4,6-Tetra-O-acetyl- β -D-mannopyranose (3) [9]. To a solution of 2.34 g of β -pentaacetate and 3 ml of allyl alcohol in 44 ml of CH_2Cl_2 add 8 ml of $\text{BF}_3 \cdot \text{Et}_2\text{O}$, stir for 5.5 h at 0°C . Dilute with ethyl acetate and wash with NaHCO_3 . Leave the filtrate overnight over Na_2SO_4 . Concentrate the solution under vacuum. A colored syrup is obtained. The product crystallizes from a mixture of ethanol and hexane. Yield 1.4 g (60.3%). $T_{\text{melt.}}$ 85°C .

Synthesis of poly[methyl-3-(tetraacetyl mannoside) propyl]siloxane (4). 1.12 g of poly(methylhydro)siloxane were placed in a reaction flask and 1.4 g of allyl-2,3,4,6-tetra-O-acetyl- β -D-

mannopyranose were added. The reaction was carried out under nitrogen atmosphere. 3-4 drops of platinum Pt/C catalyst were added to 20 ml of freshly distilled toluene. The reaction solution was heated to 75 °C with constant stirring. After 65 minutes, 7 ml of methanol was added dropwise with vigorous stirring. The precipitated polymer was dissolved in toluene and freeze-dried. 2.1 g (106.0%) of poly[methyl-3-(*tetraacetyl mannoside*)propyl]siloxane are obtained. The melting point was 273 °C. The chemical structure, composition, and elemental characteristics of compound **4** were investigated using FTIR spectroscopy, ¹H NMR and ¹³C NMR spectrometry, as well as scanning electron microscopy (SEM).



Scheme 1. Synthesis of PMMaPS

FTIR spectrum of the PMMaPS. In the FTIR spectrum exhibits a strong ester carbonyl absorption band at 1742 cm⁻¹, which is consistent with complete acetylation of the sugar hydroxyl groups. Aliphatic C-H stretching vibrations are observed in the range of 2957-2852cm⁻¹ and arise from acetyl methyl groups, the pyranose backbone, and methyl substituents attached to silicon atoms. The absorption band near 1013 cm⁻¹ is primarily assigned to the asymmetric Si-O-Si stretching vibration of the trisiloxane fragment. Additional weaker bands observed in the region around 843 cm⁻¹ are attributable to Si-C stretching vibrations. The absence of a broad O-H stretching band near 3400 cm⁻¹ further confirms the complete acetylation of the molecule.

The chemical composition study of the PMMaPS using ¹³C NMR spectrophotometers. In the ¹³C NMR spectrum, signals corresponding to methyl (CH₃) groups are observed at δ 20.95 ppm. The acetyl methyl carbons resonate at δ 32.02 ppm. Resonances attributed to the sugar fragment carbons appear in the range of δ 63.02-75.45 ppm. The anomeric carbon of the sugar moiety,

bonded to oxygen, is observed at δ 102.60 ppm. The carbonyl (C=O) carbons of the acetyl groups give rise to signals in the region of δ 169.8-171 ppm.

The chemical composition study of the PMMaPS using ^1H NMR spectrophotometers. In PMGI₃PS, seven methyl groups are bonded to silicon, corresponding to a total of 21 protons. In the ^1H NMR spectrum, 18 of these protons appear as a singlet at δ 0.16 ppm, while the remaining silicon-bound methyl group resonates as a singlet at δ 0.58 ppm. The methylene protons directly attached to silicon (Si-CH₂) are observed as a multiplet at δ 0.93 ppm.

The acetyl groups give rise to signals corresponding to 12 protons, appearing as a doublet at δ 2.11 ppm. The -O-CH₂- protons (2H) resonate as a triplet at δ 3.48 ppm. Signals from the sugar moiety are observed in the region δ 4.22–5.20 ppm, where one proton appears as a doublet of doublets at δ 4.22 ppm, one proton as a singlet at δ 4.55 ppm, and one proton as a doublet of doublets at δ 5.20 ppm. These resonances are consistent with an acetylated pyranose ring substituted with a trisiloxane fragment.

Scanning electron microscopy of PMMaPS compound. The synthesized PMMaPS was analyzed using scanning electron microscopy (SEM).

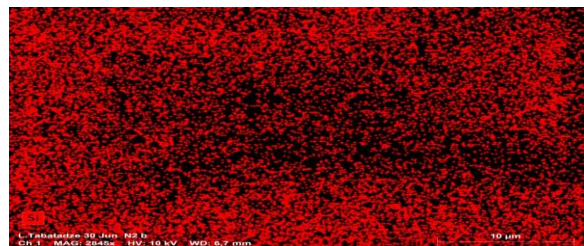
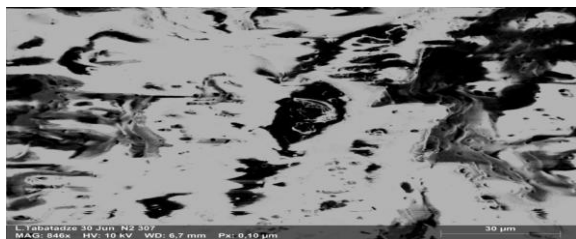


Fig. 1. Scanning electron microscope image of PMMaPS(4) Fig. 2. Element distribution map of PMMaPS (4)

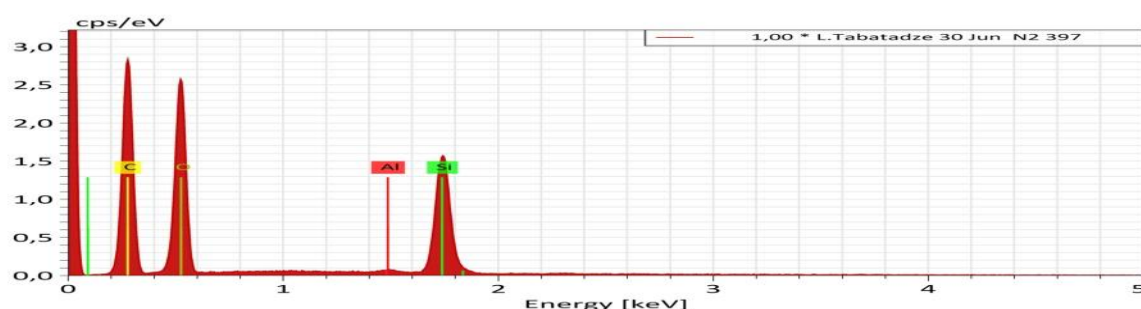


Fig. 3. Substance 4. Elemental analysis of PMMaPS

<i>Element</i>	<i>At. No</i>	<i>Net</i>	<i>Mass [%]</i>	<i>Mass Norm. [%]</i>	<i>Atom [%]</i>	<i>Abs. error [mass %]</i>	<i>Rel. error [%]</i>
<i>Carbon</i>	6	66628	68,30	45,98	54,99	2,98	4,30

<i>Oxygen</i>	<i>8</i>	<i>62416</i>	<i>61,00</i>	<i>41,32</i>	<i>37,88</i>	<i>2,48</i>	<i>4,07</i>
<i>Silicon</i>	<i>14</i>	<i>55481</i>	<i>21,45</i>	<i>12,49</i>	<i>7,03</i>	<i>0,85</i>	<i>4,17</i>
<i>Aluminum</i>	<i>13</i>	<i>782</i>	<i>0,07</i>	<i>0,13</i>	<i>0,07</i>	<i>0,02</i>	<i>10,24</i>
<i>Sulfur</i>	<i>16</i>	<i>332</i>	<i>0,04</i>	<i>0,08</i>	<i>0,03</i>	<i>0,02</i>	<i>14,03</i>
		<i>Sum</i>	<i>150,86</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>		

Tab. 1. Substance 4. Elemental analysis of PMMaP

Elemental analysis of PMMaPS was performed using a scanning electron microscope (SEM). The X-ray diffraction results are presented in figure 1-3. and Table 1. Elemental analysis showed that PMMaPS predominantly contained three major elements—carbon (C), oxygen (O), and silicon (Si), while all other detected elements were present only as trace impurities.

Conclusion

Poly[methyl-3-(tetraacetylmannoside)propyl]siloxane for industrial applications was synthesized in high yield by condensation of allyl-2,3,4,6-tetra-O-acetyl- β -D-mannopyranose and polymethylhydrosiloxane (PMHS - a key building block for a wide range of modern silicone materials) using a Pt/C catalyst.

The combined FTIR, ^1H NMR, and ^{13}C NMR data unequivocally confirm the successful synthesis and full structural characterization of Overall, of poly [methyl-3- (*tetraacetylmannoside* side) propyl] siloxane the chemical structure.

The ^{13}C NMR spectrum shows signals for silicon-bound methyl carbons at δ 20.95 ppm and acetyl methyl carbons at δ 20.95 ppm. Resonances corresponding to the sugar ring carbons are observed in the range δ 63.02-75.45 ppm, while the anomeric carbon bonded to oxygen appears at δ 102.60 ppm. The ester carbonyl carbons of the acetyl groups give rise to signals in the region δ 169.8-171 ppm. These chemical shifts confirm complete acetylation of the sugar hydroxyl groups, preservation of the pyranose ring structure, and successful attachment of the heptamethyl trisiloxane moiety.

REFERENCE

1. Birajdar, M. S.; Joo, H.; Koh, W.-G.; Park, H. Natural Bio-Based Monomers for Biomedical Applications: A Review. *Biomater. Res.* 2021, 25, 1–14. <https://spj.science.org/doi/full/10.1186/s40824-021-00208-8>
2. Mtchedlishvili, M.; Tabatadze, L.; Gventsadze, D.; Lezhava, T.; Gventsadze, L.; Iremashvili, D.; Shonia, T. Technological Aspects of Biopolymers Based on Yucca Gloriosa Fiber. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2024. 18(4), 138–144. <http://science.org.ge/bnas/vol-18-4.html>
3. Pachulia, Z., Shengelia, N., Tabatadze, L., Gakhokidze, R. Modeling of the synthesis of sulfanilamide monoglucoside by quantum-chemical method. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2016, 10(4), 33–36. <http://science.org.ge/bnas/vol-10-4.html>
4. Sikharulidze, T.; Tabatadze, L.; Lobjanidze, Q.; Makharoblidze, M.; Gulbani, D.; Sharia, I.; Ebralidze, K. **Chemical Analysis of Chicken Nuggets Using Near-Infrared (NIR) Spectroscopy.** *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2025. 19 (193), 4, P.73–78. <http://science.org.ge/bnas/vol-19-4.html>
5. Sidamonidze, N.N., Tabatadze, L.V., Vardiashvili, R.O., Chachua, E.I., Shengelia, N.G. Hydrosulphurisation tactions of Allyl Derivatives of Altrapyranose wityh Mercaptans. *Oxidation Communications*. 2023, 46(2), 337–344. <https://scibulcom.net/en/journal/0209-4541/issue/2023-46-2/>
6. Tabatadze, L., Sidamonidze, N., Gulbani, D.; Iremashvili, D. Synthesis and biological activity of Hepta-O-acetyl-1-O-(2-chloro-3-phenil thio propyl)- β -D-maltose. *Georgian Sciences*, 2021. 3(4), P.1–8. <https://www.scribd.com/document/630972349/fulltext2021vol3is4>
7. Tabatadze, L., Iremashvili, D., Gventsadze, D., Berulava, M., Shengelia, N. Obtaining an Eco-friendly Biocomposite Based on Walnut Shell for use in Furniture Production. *Chemistry and Chemical Technology*, 2025, 19(3), 503–510. <https://www.scopus.com/pages/publications/105019529883?origin=resultslist>
8. Satchanska, G.; Davidova, S.; Petrov, P. Natural and Synthetic Polymers for Biomedical and Environmental Applications. *Polymers* 2024, 16(8), 1159. <https://doi.org/10.3390/polym16081159>
9. Iremashvili, D.; Tabatadze, L.; Ebralidze, K.; Pirtskheliani, N.; Botchorishvili, I.; Shengelia, N. Hydrosilylation Reactions of Bioorganic Products. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2025. 19(2), 51–55. <http://science.org.ge/bnas/vol-19-2.html>

საუნივერსიტეტო სწავლების ხარისხის ამაღლების გზები

გელა ღვინეფაძე¹; შორენა დეკანოსიძე², ნინო ჩორხაული³

¹საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ghvinepadzegela08@gtu.ge, <https://orcid.org/0009-0001-2350-5648>; ²საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი dekanosidzeshorena08@gtu.ge; ³საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, m.chorkhauli@gtu.ge

რეზიუმე

დღევანდელ მსოფლიოში მიმდინარე სწრაფი და მასშტაბური ცვლილებანი მოითხოვს ამ პროცესების მეტად ღრმად შესწავლას და ოპერატიულად რეაგირებას. ბუნებრივია, რომ ამ მხრივ უმნიშვნელოვანესი როლის შესრულება ეკისრება უმაღლეს სკოლებს და, პირველ ყოვლისა, უნივერსიტეტებს. სწორედ ამ უკანასკნელთა სტრუქტურა იძლევა შესაძლებლობას, ფართო გასაქანი მიეცეს მეცნიერთა მიერ დღეს ასე რეკომენდებულ ინტერ- და ტრანსდისციპლინური კავშირების დამყარებას სხვადასხვა პროფილის ფაკულტეტებსა და დეპარტამენტებს შორის.

შესაბამისად, განსაკუთრებით აქტუალური ხდება უნივერსიტეტებში სწავლების ხარისხის ამაღლების საკითხი.

წარმოდგენილ ნაშრომში ამ მიმართულებით განიხილება რიგი საკითხებისა. ნაწილი მათგანი ეყრდნობა მსოფლიოს განვითარებული ქვეყნების საგანმანათლებლო სფეროში არსებულ წარმატებულ პრაქტიკას. მაგრამ, უმეტეს შემთხვევაში სტატიის ავტორები რეკომენდაციას ვუწევთ არა საზღვარგარეთული წარმატებული მიდგომების ჩვენს სივრცეში მექანიკურად გადმოღებას, არამედ მათ მისადაგებას ჩვენში არსებულ ვითარებასთან.

კერძოდ, სწავლების პროცესის ხარისხის ასამაღლებლად, ადგილობრივი პირობების გათვალისწინებით, შემოთავაზებული არის აღნიშნული მიდგომების გარკვეული სახით მოდიფიცირებაც. ამასთან ერთად, რიგ შემთხვევებში ვიყენებთ თვისებრივად ახალ მიდგომებსაც. ისინი ეყრდნობიან სტატიის ავტორთა სამუშაო გამოცდილებას და მეტწილად დაფუძნებულია მიღებული გადაწყვეტილებების კომპიუტერული პროგრამების სახით რეალიზებაზე.

გარდა ამისა, გამოთქმულია მოსაზრებები, უნივერსიტეტებში სწავლების პროცესისადმი წაყენებული ახალი მოთხოვნები თუ როგორ უნდა აისახოს სასწავლო

გეგმების შედგენისას, ამასთან, რომელი სახის სიახლეებს უნდა განესაზღვროთ უფრო მაღალი პრიორიტეტები.

საკვანძო სიტყვები: საუნივერსიტეტო სწავლების ხარისხი; ინოვაციები სწავლებაში; ინტერ- და ტრანსდისციპლინურობა.

შესავალი

დღეს მთელს მსოფლიოში მიმდინარე სწრაფი და მასშტაბური ცვლილებანი ადამიანის საქმიანობის მრავალ სფეროში მოითხოვს ამ პროცესების შესწავლა-გაანალიზებას და რაც მთავარია, მათზე ოპერატიულად რეაგირების მოხდენას.

ბუნებრივია, რომ ამ მხრივ მეტად მნიშვნელოვანი როლის შესრულება ეკისრება უმაღლეს სკოლებს, რომელთა შორის, უპირველეს ყოვლისა, მოიაზრება უნივერსიტეტები.

საქმე ისაა, რომ სწორედ საუნივერსიტეტო სასწავლებლების სტრუქტურა უზრუნველყოფს შესაძლებლობას, ფართო ასპარეზი მიეცეს ინტერდისციპლინური და ტრანსდისციპლინური კავშირების ორგანიზებას განსხვავებული სახის პროფილის ფაკულტეტებსა და მათ შემადგენლობაში შემავალ დეპარტამენტებს შორის, რაც ასე ტრენდული მოთხოვნა ხდება სადღეისოდ.

წარმოდგენილ სტატიაში განხილული საკითხების და გადაწყვეტილი ამოცანების ნაწილი ეყრდნობა განვითარებული ქვეყნების უნივერსიტეტების მიღწევებს ამ მიმართულებით, ნაწილში კი ასახული ისინი, როგორც ადგილობრივ პირობებთან მისადაგებულნი და შესაბამისი სახით მოდიფიცირებულნი.

სტატიაში ასევე შემოთავაზებულია მისი ავტორების მიერ დასმული ზოგიერთი ახალი ისეთი ამოცანაც, რომელთა გადასაწყვეტად საჭირო გახდა თვისებრივად ახალი მიდგომების გამოყენება. ეს მიდგომები ეფუძნება ლექტორების სამუშაო გამოცდილებას ინფორმატიკის სფეროში და, როგორც წესი, მიღებული გადაწყვეტილებების რეალიზება ხდება კომპიუტერული პროგრამების მეშვეობით.

შემდეგ, ცნობილია, რომ განვითარებულ სახელმწიფოებში მეტად დიდ ყურადღებას აქცევენ ინოვაციური აზროვნების განმავითარებელი დისციპლინების სწავლებას.

რაც შეეხება საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტს, აქ ბოლო წლებია, ამ მიმართულების საგნები ეკითხება ინფორმატიკის და მართვის სისტემების ფაკულტეტზე რამდენიმე დეპარტამენტის ბაკალავრიატისა და მაგისტრატურის სტუდენტებს, ასევე, როგორც არჩევითი დისციპლინა, - მთელი ფაკულტეტიდან სტუდენტთა ნაკრებს.

ლექციებზე სტუდენტები ეცნობიან კრეატიული აზროვნების სფეროში აღიარებული სპეციალისტების მიერ შემუშავებულ მეთოდებს, რეკომენდაციებს, პრაქტიკულ მეცადინეობებზე კი ჯგუფს ევალება პედაგოგის ან მათ მიერვე დასმული

არასტანდარტული სახის ამოცანები გადაწყვიტონ შესწავლილ მიდგომებზე დაყრდნობით სწორედ ინოვაციურ დონეზე, დაბოლოს, როგორც პროგრამისტებმა, საბოლოო შედეგი მიიღონ პროგრამული პროდუქტის სახით.

ნაშრომში მოყვანილია ის რეკომენდაციებიც, თუ უნივერსიტეტებში სწავლების პროცესისადმი წაყენებული ახალი მოთხოვნები როგორ უნდა აისახოს სასწავლო გეგმების შედგენისას, ასევე, - შემოთავაზებულებიდან რომელი სახის სიახლეებისათვის არის სასურველი, განესაზღვროთ მათ უფრო მაღალი პრიორიტეტები სხვებთან შედარებით.

ძირითადი ნაწილი

წარმოდგენილ ნაშრომში განიხილება უნივერსიტეტებში სწავლების ხარისხის ასამაღლებლად დასახული გზები.

ეს საკითხი დღეს განსაკუთრებით აქტუალურად არის მიჩნეული, მთელს მსოფლიოში მიმდინარე იმ მასშტაბური სახის ცვლილებებიდან გამომდინარე, რომლებიც ხდება ადამიანის საქმიანობის, ფაქტობრივად, ნებისმიერ დარგში.

ბუნებრივია, რომ ამ გამოწვევების წინაშეა საქართველოს საგანმანათლებლო სისტემაც და მეტიც, საქართველოში აღნიშნული პრობლემები გაცილებით უფრო მწვავედ დგას, ვიდრე მსოფლიოს განვითარებულ ქვეყნებში, რომლებშიც, როგორც წესი, მათ მოგვარებას დიდი ყურადღება ეთმობა.

შესაბამისად, დღის წესრიგში დგება როგორც განვითარებულ ქვეყნებში უმაღლეს სკოლებში სწავლების სფეროში არსებული გამოცდილების შესწავლა-გაანალიზების საკითხი, ამ გამოცდილებიდან სასურველის გადმოღების მიზნით, ასევე, - ჩვენივე ქვეყანაში ამ მიმართულებით არსებული წარმატებული თუ წარუმატებელი შედეგების შესახებ აკადემიური პერსონალის ინფორმირება.

წარმოდგენილ სტატიაში ასახულია ის გამოცდილება, რომელიც მის ავტორებს - ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის პედაგოგებს - დაუგროვდათ წლების განმავლობაში კომპიუტერული ტექნოლოგიებისა და კრეატიული აზროვნების მიმართულების საგნების სწავლებისას, ამასთან, გამოთქმულია ის მოსაზრებები, თუ რა ღონისძიებანი უნდა გატარდეს მომავალში დასახული მიზნების მისაღწევად.

აღნიშნული პრობლემატიკის თაობაზე სხვადასხვა წლებში სტატიის ავტორებს გამოქვეყნებული აქვთ რიგი ნაშრომებისა [1-11], წინამდებარე სტატიაში კი ხდება როგორც ამ ნაშრომებში მოცემული მასალების შეჯამება, ასევე, განიხილება, მათი შეხედულებით, ახლო მომავალში რეალიზებისათვის პერსპექტიულად მიჩნეული ზოგიერთი მოსაზრებაც.

პირველ რიგში, უმაღლეს სკოლებში სწავლების დონის ამაღლებისათვის გამიზნული ინოვაციების შემუშავება-რეალიზებისათვის საჭიროდ მივიჩნიეთ, დავყრდნობოდით არაერთი ცნობილი სპეციალისტის მიერ რეკომენდებულ ინტერ- და ტრანსდისციპლინურ მიდგომებს, რომელთაც უკვე არაერთხელ დაამტკიცეს თავიანთი

ეფექტიანობა არა მარტო სწავლების, არამედ ბევრ სხვადასხვა სფეროში წამოჭრილი რთული ამოცანების გადაწყვეტისას.

ზემოთ ნათქვამის დასტურად შეიძლება მოვიყვანოთ ამ მიდგომების საფუძველზე გადაწყვეტილი ამოცანების მაგალითები ქართული რეალობიდანაც, მათ შორის დავასახელებდით საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკის და მართვის სისტემების ფაკულტეტის თანამშრომლების გ. ჩაჩანიძის, ლ. იმნაიშვილის, გ. ღვინეფაძის მიერ მიღებულ შედეგებს [12].

აქვე ხაზი უნდა გაესვას შემდეგ გარემოებას:

ინტერ- და ტრანსდისციპლინურ მიდგომებზე დაყრდნობით მიღებული გადაწყვეტილებანი განსაკუთრებით ეფექტიანი ხდება მაშინ, როდესაც მათი რეალიზება ხდება ისეთი კომპიუტერული პროგრამის მეშვეობით, რომელიც საშუალებას აძლევს მომხმარებელს, დიალოგის რეჟიმში მიიღოს სისტემისაგან პასუხი მასში კონკრეტული მონაცემების შეტანისას.

აქედან გამომდინარე, ვთვლით, რომ უნივერსიტეტებში სწავლების ხარისხის ასამაღლებლად გადაწყვეტილებების მიღებისას უმნიშვნელოვანესი როლის შესრულება უნდა დაეკისროს ინფორმატიკის დარგს და ასევე, კრეატიული აზროვნების სფეროს სპეციალისტების მიერ რეკომენდებულ მიდგომებს.

ფაქტია, რომ დღეს ნებისმიერ სფეროში მიღწევათა დონეს მნიშვნელოვნად განაპირობებს შემდეგი ფაქტორი - მასში მომუშავე სპეციალისტები თუ რა დონეზე ფლობენ და იყენებენ საკუთარ საქმიანობაში თანამედროვე კომპიუტერულ ტექნოლოგიებს, რომლებიც მეტად სწრაფი ტემპებით ვითარდება:

მაგალითად, ჯერ კიდევ 30 წლის წინ, სპეციალისტების მტკიცებით, ყოველ ხუთ წელიწადში აღნიშნულ სფეროში არსებული ცოდნა 50%-ით ძველდებოდა, ბოლო წლებში კი მათში ცვლილებების ტემპები კიდევ უფრო დაჩქარდა და შესაბამისად, გაზრდილია მოთხოვნებიც სასწავლო მასალებში ამ სიახლეთა გათვალისწინების ოპერატიულობისადმი.

შესაბამისად, დღის წესრიგში მწვავედ დგება არა მარტო სტუდენტთა მიერ ასეთი ტექნოლოგიების დროულად დაუფლების საკითხი, ასევე, ეს მოთხოვნა წაეყენება უნივერსიტეტში მოღვაწე ყველა პედაგოგს და სპეციალისტს და იგი მოგვარდეს კვალიფიკაციის უნივერსიტეტებში არსებულ კვალიფიკაციების ამაღლების კურსებზე აღნიშნული მიმართულებით მეტი დროისა და სახსრების გამოყოფით, ვიდრე დღეს ამას აქვს ადგილი.

აქვე აღსანიშნავია ერთი გარემოება - ინფორმატიკის სფეროში როგორც მნიშვნელობის, ასევე, განვითარების ტემპების მხრივ გამოირჩევა ვებტექნოლოგიები.

ვთვლით, რომ ამ მიმართულებას უნდა მიენიჭოს პრიორიტეტი სწავლების ხარისხის უფრო მაღალ დონეზე ასაყვანად და სწორედ მას ეძღვნება სტატიის ავტორთა მიერ შესრულებული რიგი სამუშაოებისა, რომელთაგან გამოვარჩევდით ინტერაქტიურ რეჟიმში ვებტექნოლოგიების შესწავლისათვის განკუთვნილ ელექტრონულ სახელმძღვანელოს.

ეს სახელმძღვანელო ეყრდნობა მოწინავე საზღვარგარეთულ გამოცდილებას, მაგრამ ამავე დროს, ადგილობრივ სიტუაციასთან მისადაგების მიზნით, მასში რეალიზებულია რიგი სიახლეებისა:

- საქმე ისაა, რომ ჯერ ერთი, ამ გამოცდილებიდან მოწონებული მასალების უცვლელი სახით გადმოღება-გადმოქართულება სხვადასხვა მიზეზის გამო ყოველთვის ვერ ხერხდება;
- გარდა ამისა, ზოგჯერ შესაძლებელი და უკეთესიცაა ეს პროცესი წარიმართოს ჩვენი პირობებისათვის უფრო მისადაგებული ფორმებითაც.

ზემოთ თქმულის საილუსტრაციოდ ქვემოთ მოგვყავს ჩვენ მიერ მიღებული ზოგიერთი გადაწყვეტილებანი.

მაგალითად, ჩვენთვის ამ მიმართულებით საინტერესო, დღეს მსოფლიოში ყველაზე პოპულარულ <https://www.w3schools.com/> საიტზე მასალის განახლება ხდება თითქმის ყოველთვიურად, ზოგჯერ კი - უფრო მეტი ინტენსივობითაც. თუმცა, აქვე შევნიშნავთ, რომ, თავისი სპეციფიკიდან გამომდინარე, ამ საიტს გააჩნია ზოგიერთი ნაკლიც, კერძოდ:

- მასზე არსებული კონტენტის სხვა ენებზე, მათ შორის ქართულად თარგმნისას (შევნიშნავთ, რომ ეს სერვისი საიტის უდავო ღირსებაა), აღნიშნული პროცესის ავტომატიზების გამო მიღებული თარგმანი ბუნებრივია, რომ სრულყოფილი ვერ იქნება.
- მომხმარებელს არ ეძლევა შესაძლებლობა, მარტივად დაიმახსოვროს საიტზე არსებული ფაილების საკუთარი შეხედულებისამებრ მოდიფიცირებული ვარიანტები, რისი მიზეზიც ადვილად ასახსნელია:
აღნიშნულ საიტს დღეში უამრავი მომხმარებელი აკითხავს და თითოეული მათგანის ასეთი სერვისით უზრუნველყოფა, ჯერ ერთი, ფაქტობრივად, შეუძლებელია, და მეორეც, მის გამოყენებას აზრიც ნაკლებად ექნებოდა, განსხვავებით „ავტონომიური“ სწავლების მიდგომისაგან (რომელსაც ქვემოთ განვიხილავთ).
- გარდა ამისა, <https://www.w3schools.com/> საიტი ორიენტირებული არის მასობრივი მომხმარებლის ინტერესების დაკმაყოფილებაზე. ამ დროს აქცენტი კეთდება ამა თუ იმ ენის მხოლოდ ძირითადი საშუალებების შესწავლაზე. ინფორმატიკის ფაკულტეტზე კი სტუდენტებს შესაძენი ცოდნის მოცულობის და სირთულის მხრივ გაცილებით მეტი მოთხოვნები წაეყენებათ.
გასათვალისწინებელი არის ის გარემოებაც, რომ ცალკეულ დეპარტამენტებში, როგორც წესი, შეისწავლება ერთმანეთისაგან განსხვავებული, შესაბამისი სპეციფიკის მქონე კომპიუტერული ტექნოლოგიებიც, ამასთან, (ზოგჯერ რამდენიმეც).

სწორედ პრაქტიკაში ამ პრობლემური საკითხების მოგვარებით დაგროვილი გამოცდილება განიხილება სტატიის ავტორთა ნაშრომებში [6-8].

ქართველი სპეციალისტების მიერ სხვადასხვა დროს გამოთქმულია არაერთი საყურადღებო მოსაზრება, გამოიზნული უმაღლესი (საუნივერსიტეტო) და სასკოლო განათლების სფეროებში სწავლების ხარისხის ასამაღლებლად.

კერძოდ, ჯერ კიდევ საბჭოთა პერიოდში ამ მიმართულებით მეტად საინტერესო იდეებს გვიზიარებდა ჩვენი უნივერსიტეტის წარმომადგენელი ფიზიკოსი დ. გიუნაშვილი უნივერსიტეტებში ლაბორატორიული და პრაქტიკული მეცადინეობების ინტეგრაციის თაობაზე [13].

დღეს კი ლოგიკურია, რომ განსაკუთრებულ ინტერესს ყურადღებას იმსახურებს იმ სპეციალისტების შემოთავაზებები, რომლებიც მსოფლიოს მოწინავე ქვეყნებში მუშაობის გამოცდილებას ფლობენ.

მათგან პირველ რიგში დავასახელებდით ცნობილი ფიზიკოსის გიორგი (გია) დვალისა და მისი თანამოაზრეების შემუშავებულ ვრცელი მოცულობის ნაშრომს - უმაღლესი განათლებისა და მეცნიერების რეფორმის კონცეფციის პროექტს [14].

ეს პროექტი სწავლების და მეცნიერული კვლევების მაღალ დონეზე წარმართვის მიზნით, რაც გულისხმობს ცოდნის მოპოვება-გავრცელების პროცესებისათვის უფრო ქმედითი ღონისძიებების გატარებას, ეფუძნება ტენუარის (tenure) სისტემის და ჰარნაკის პრინციპით (Harnack principle) რეკომენდებულ ამ სამი პუნქტისგან ფორმირებულ ბაზისს:

1. აკადემიურ თავისუფლებას;
2. აკადემიურ მიუკერძოებლობას;
3. აკადემიურ ხარისხს.

პროექტში დეტალურად არის განმარტებული თითოეული პუნქტის არსი და მათი გადამწყვეტი როლი უნივერსიტეტებში სწავლებისა და მეცნიერული კვლევების პროცესების ეფექტიანობის ამაღლებაში.

მალიან მოკლედ კი აღნიშნული კონცეფციის შესახებ ეს შეიძლება ითქვას:

სწავლება უნივერსიტეტებში მაშინ იქნება წარმატებული, როდესაც სტუდენტები აქტიურ მონაწილებას მიიღებენ წარჩინებული მკვლევარების გარშემო აწყობილი სტრუქტურების საქმიანობაში.

მეტად საყურადღებო მოსაზრებებს გამოთქვამს სწავლების პროცესის ხარისხის ასამაღლებლად (ამასთან, არა მარტო უმაღლესი სკოლების ხაზით), თბილისის თავისუფალი სკოლის ხელმძღვანელი, თავისუფალი უნივერსიტეტის მათემატიკისა და კომპიუტერული მეცნიერების ფაკულტეტის (MACS) დეკანი ამირან ამბროლაძე ჟურნალისტისათვის მიცემულ ინტერვიუში, რომელმაც, როგორც პედაგოგმა, დიდი გამოცდილება შეიძინა საზღვარგარეთის წამყვან უნივერსიტეტებში მოღვაწეობისას [15].

მისი შეხედულებიდან ქვემოთ მოგვყავს ჩვენი სტატიის თემატიკისთვის განსაკუთრებით საინტერესო პასაჟი, როდესაც ის პასუხობს ჟურნალისტის მიერ დასმულ ამ შეკითხვას:

საჭიროა კი ყველა ადამიანისათვის მათემატიკის ცოდნა?

პასუხია:

„ზოგადი განათლების საგანი, კურსი, რომელიც თავისუფალი უნივერსიტეტისათვის შეიქმნა, ეს არის მათემატიკა, ფაქტობრივად, ფორმულების გარეშე, ძირითადად იდეების დონეზე. მისი მიზანია სტუდენტებში განავითაროს ლოგიკის და სტრუქტურული აზროვნების უნარი. ბევრს მათემატიკა მხოლოდ ანგარიშის ცოდნა ჰგონია, სინამდვილეში მისი სწავლების მიზანი უნდა იყოს კრიტიკული აზროვნების განვითარება [ხაზგასმა ჩვენი]. დღევანდელ ეპოქაში, როდესაც ადამიანი უამრავი ფაქტობრივი მასალით იბომბება, აუცილებელია ამ ინფორმაციის სწორად დახარისხება-გაფილტვრის უნარი და მისი კრეატიულად გამოყენება“.

და სწორედ კრეატიული აზროვნების განვითარების მიზანს ემსახურება საგანი (საგნები), რომლებიც იკითხება საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკის და მართვის სისტემების ფაკულტეტზე რამდენიმე დეპარტამენტში ბაკალავრიატის და მაგისტრატურის სტუდენტებს შემდეგი დასახელებებით:

- კრეატიული აზროვნების საფუძვლები;
- კრეატიული აზროვნება და ინფორმატიკა;
- კრეატიული აზროვნება.

აქვე შევნიშნავთ, რომ ჩვენი მიზანია, ამ მიმართულების საგნები, გარკვეული მოდიფიცირებითა და სტრუქტურული ერთეულის - ფაკულტეტის, დეპარტამენტის - სპეციფიკის გათვალისწინებით ეკითხებოდეს ჩვენი უნივერსიტეტის ყველა სტუდენტს, რაც, სამწუხაროდ, ჯერჯერობით სირთულეებს აწყდება, მიუხედავად იმისა, რომ ინფორმატიკის ფაკულტეტის თანამშრომლების მიერ შექმნილი სახელმძღვანელოებით (და სილაბუსებით) სარგებლობა შეუძლია არა მარტო სტუ-ს სტუდენტებს, არამედ - ნებისმიერ მსურველსაც.

სახელმძღვანელოები განთავსებულია ამ მისამართებზე:

<https://gtu.ge/ims/pdf/kreatuiuli-azrovneba2.pdf>

<https://old.gtu.ge/book/creativity.pdf>

აღნიშნული მიმართულების საგანთა სწავლებისას დაგროვილი გამოცდილების თაობაზე წინამდებარე სტატიის ავტორებმა მოხსენებები წაიკითხეს კონფერენციებზე და გამოაქვეყნეს რიგი სტატიებისა პროფილურ ჟურნალებში [6-8].

პრობლემური სახის ამოცანების გადაჭრაში კრეატიული მიდგომები, რა თქმა უნდა, შეიძლება გამოყენებული იქნას უმაღლესი სკოლების ადმინისტრაციების მიერაც, ამ სახის დაწესებულებებში სწავლების ხარისხის ამაღლების მიზნით, ამასთან, „სამართავი რგოლის“-სტუდენტების ჩართულობით, კერძოდ, თუ როგორ უნდა აისახოს სწავლების პროცესისადმი გაზრდილი მოთხოვნები სასწავლო გეგმების სტრუქტურის შედგენისას და რომელი სიახლეების შემოტანას უნდა განესაზღვროს მეტი პრიორიტეტები.

გარკვეული ღონისძიებები საუნივერსიტეტო სწავლების ხარისხის ასამაღლებლად ჩვენს ქვეყანაში ტარდება ანდა მომავლისთვის არის გათვალისწინებული.

მაგალითად, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თავისი ფუნქციონირებისათვის უმთავრეს მიზნებად ისახავს თავისი საქმიანობის დაფუძნებას შემდეგ პრინციპებზე:

- ავტონომიურობა;
- აკადემიური თავისუფლება;
- სწავლა-სწავლების და კვლევის პროცესების ერთიანობა;
- თანასწორობა;
- გამჭვირვალობა.

ამასთან, ზემოთ მოყვანილ ჩამონათვალში თითოეული პუნქტისათვის გაწერილია რიგი ამოცანების შესრულებაც [16].

მაგრამ სამუშაო ჯერ კიდევ ბევრია და, გარდა ამისა, გასათვალისწინებელია ის გარემოებაც, რომ, ფაქტობრივად, ნებისმიერი სიახლის შემოტანას თან ახლავს გარკვეული სირთულეებიც.

და აქ გამოსავალი უნდა ვეძებოთ პილოტური პროექტების შემოღებასა და მათი ავ-კარგის ოპერატიულად განსჯაში.

როგორც წესი, ამა თუ იმ სიახლის შემოღებისას ხშირად საჭირო, მოიძებნოს ე. წ. „ოქროს შუალედი“, რათა დაცული იქნეს ბალანსი ორ უკიდურესობას შორის.

მაგალითად, მისასალმებელია ავტონომიურობის უზრუნველყოფა როგორც მთლიანად უნივერსიტეტის, ასევე, მასში შემავალი ისეთი სტრუქტურული ერთეულებისათვის: ფაკულტეტები, დეპარტამენტები და სხვ.

მაგრამ ამ ქმედების რეალიზაციისას გამორიცხული არ არის, რომ მიღებული შედეგი გარკვეული ხარვეზებით ხასიათდებოდეს ანდა, საბოლოო ჯამში, სრულებით მიუღებელიც კი აღმოჩნდეს.

მაგალითად:

- რამდენიმე წლის წინ დაწყებული იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საიტის განახლება, მაგრამ, მისი კონფიგურაციის ჩამოყალიბებაში ამ ერთეულებისათვის მინიჭებულმა ავტონომიურობამ ზოგიერთი მიმართულებით დადებითი როლი ვერ შეასრულა.

კერძოდ, საიტის ადრინდელ ვერსიაში გაცილებით მარტივად ხდებოდა ნებისმიერი ფაკულტეტის პედაგოგიური კოლექტივის მიერ გამოშვებული სახელმძღვანელოების მოძიება. ამასთან, შერჩეულ გზას მეორე დადებითი მხარეც გააჩნდა - შესაძლებელი იყო ამ მიმართულებით კოლექტივების მიღწევების შედარება-შეფასება, რაც ახლა მეტად გართულდა.

- შემდეგ, ბოლო პერიოდში უნივერსიტეტში დოქტორანტებისათვის სწავლების საფასური თითქმის ორჯერ გაიზარდა, რაც, საბოლოო ჯამში, ვერანაირად წაადგება მეცნიერების წინსვლის საქმეს, რომლის დაფინანსებისათვისაც აუცილებლად ვთვლით, მოძიებული უნდა იქნეს სხვა გზები.

დასასრულ, მოგვყავს ის მოსაზრებანი, რომელთა გათვალისწინება, ჩვენი აზრით, დიდად წაადგება ქართული საუნივერსიტეტო სივრცის წინაშე მდგომ პრობლემათა გადაწყვეტის საქმეს:

- უპირველეს ყოვლისა, გადასაჭრელია ის პრობლემა, რომ დღეს მუშაობს არცთუ ცოტა რაოდენობის სტუდენტი, მათ შორის მეტი წილია მაღალკურსელებისა, რომელთაც უჭირთ სამუშაო დღის დამთავრების შემდეგ მეცადინეობებზე დასწრება, ამასთან, როგორც წესი, მათ ტრანსპორტით მგზავრობა უწევთ პიკის საათებში.

შესაძლებლად ვთვლით, ამ კონტიგენტის სტუდენტებისათვის თუნდაც მხოლოდ ლექციები წარიმართოს ონ-ლაინ რეჟიმში. ამასთან, კოვიდის პერიოდში გვაქვს ამ ფორმატში სწავლების გამოცდილება და შესაძლებელია, გაანალიზდეს მისი ავ-კარგიც.

- საინტერესოა, რომ. მაგალითად, ამერიკის შეერთებულ შტატებში უმაღლეს სკოლებში ამ სახის მეცადინეობათა წილი 50%-ის ფარგლებშია.
- მარტივი გათვლები აჩვენებს, რომ დღეს ლექტორთა უმეტესობას ყოველკვირეულად საშუალოდ ასზე მეტი სტუდენტის ცოდნის შემოწმება უხდება, რაც ამ პროცესის ხარისხზე დადებითად ნამდვილად არ მოქმედებს.

უმჯობესად მიგვაჩნია, ეს საქმიანობა დაევალოს იმ საგამოცდო ცენტრს, რომელიც, მაგალითად, საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში ისედაც არსებობს (ოღონდ ამ შემთხვევაში საჭირო იქნება ამ ცენტრის კონტიგენტის შევსება) და მასში ტესტური წესით შემოწმდეს სტუდენტების ცოდნის დონე. და ვინც დაგროვილი ქულების ოდენობის მიხედვით მოწინავეთა 20%-ში აღმოჩნდება, მხოლოდ ეს სტუდენტები მიიღოს ლექტორმა გამოცდის მეორე ეტაპზე, თუკი სტუდენტს პრეტენზია ექნება უფრო მაღალ შეფასებაზე.

- ხვალ (ამ სიტყვის ფართო გაგებით) დიდად სავარაუდოა, რომ კვანტურმა კომპიუტერმა რევოლუცია მოახდინოს ინფორმატიკის სფეროში და ფრიად სასურველია, საქართველო ამ დიდი საქმისაგან მოწყვეტილი არ აღმოჩნდეს.

კარგი იქნებოდა, ნიჭიერი და მოტივირებული ახალგაზრდების ჯგუფის შერჩევა და გაგვეზავნა გერმანიაში შესაბამის სამეცნიერო წრეებთან სათანამშრომლოდ (სანამ ჯერ კიდევ დროა!)

დასკვნა

სტატიაში განიხილება ჩვენს ქვეყანაში საუნივერსიტეტო სწავლების ხარისხის ამაღლებისათვის დასახული გზები. ამ მიზნის მისაღწევად საჭიროდ მიიჩნევა განვითარებული ქვეყნების საგანმანათლებლო სფეროში არსებული მიღწევების შესწავლა-გაანალიზება და წარმატებული მიდგომების ჩვენს სივრცეში გადმოღება, ოღონდ არა მექანიკურად, არამედ - გარკვეული სახის მოდიფიცირებით, აქ არსებულ ვითარებასთან მისადაგებით.

აღწერილია ის გამოცდილება, რომელიც სტატიის ავტორებს დაუგროვდათ წლების განმავლობაში საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკის და მართვის სისტემების ფაკულტეტზე კომპიუტერული ტექნოლოგიების და კრეატიული აზროვნების მიმართულების დისციპლინების კითხვისას.

განიხილება ამ პერიოდში მიღებული გამოცდილების საფუძველზე შემუშავებული ის მიდგომები, სწავლების ახალი ფორმები და პრაქტიკაში მათი დანერგვის მიზნით შექმნილი კომპიუტერული სისტემები, რომელთა მიზანი იყო უმაღლეს სკოლაში სწავლების ხარისხის ამაღლება.

გამოთქმულია აგრეთვე, ამავე მიზნის მისაღწევად გათვალისწინებული ზოგიერთი მოსაზრება, გათვლილი მომავალში მათი რეალიზების პერსპექტივაზე.

ლიტერატურა

1. გ. ღვინეფაძე, თ. შავიშვილი. „On-line სახელმძღვანელოების დაპროექტების კონცეფცია“. თბილისი. სტუ-ს გამომცემლობა, „შრომები“, 2021, №1 (519), გვ. 40-54. ISSN 1512-0996.
2. გ. ღვინეფაძე, თ. შავიშვილი. „ინტერდისციპლინური მიდგომების ეფექტიანობა მეცნიერული კვლევებისა და სწავლების პროცესებში“. 2021. მაისი. ავტომატიზებული სისტემების კათედრის დაარსებიდან 50-ე წლისთავისა და მისი დამაარსებლის, აკადემიკოს გოჩა ჩოგოვადის 80 წლის იუბილესადმი მიძღვნილი საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „საინფორმაციო საზოგადოება და განათლების ინტენსიფიკაციის ტექნოლოგიები“. სტუ, „შრომები, მართვის ავტომატიზებული სისტემები“, 2021. №1 (32), გვ. 316-319. ISSN 1512-3979.
3. გ. ღვინეფაძე. „ტრანს- და ინტერდისციპლინური მიდგომები პრობლემების გადასაწყვეტად“. II საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „საქართველო და ევროინტეგრაცია“. სტუ, სტატიების კრებული, 29-30 სექტემბერი 2022. გვ. 114-122. <https://drive.google.com/file/d/1Bxge5mIXd-6LgEnfMQUiNR2mp2RmV5dF/view>
4. გ. ღვინეფაძე. „ტრანს- და ინტერდისციპლინური მიდგომები პრობლემების გადასაწყვეტად“. II საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „საქართველო და ევროინტეგრაცია“. სტუ, სტატიების კრებული, 29-30 სექტემბერი 2022. გვ. 114-122. <https://drive.google.com/file/d/1Bxge5mIXd-6LgEnfMQUiNR2mp2RmV5dF/view>
5. გ. ღვინეფაძე. „საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში კრეატიული აზროვნების სწავლების თაობაზე“. თბილისი. სტუ-ს გამომცემლობა, „შრომები“, 2023, №3 (529), გვ. 42-54. ISSN 1512-0996.
6. გ. ღვინეფაძე, ნ. ჩორხაული. „ზოგიერთი სიახლის შესახებ ვებტექნოლოგიების სწავლებიდან“. საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია

- „თანამედროვე გამოწვევები და მიღწევები ინფორმაციულ და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიებში - 2023“, საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“.
7. G. Ghvinepadze, N. Chorkhauri. “About some News in the Teaching of Web Technologies”. The 4nd Conference “Problems of Engineering Sciences”, Batumi, 26.08.24-28.08.24
 8. გ. ღვინეფაძე, ნ. ჩორხაული. „უახლესი კომპიუტერული ტექნოლოგიების სწავლების კვლევის შესახებ“. საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია „თანამედროვე გამოწვევები და მიღწევები ინფორმაციულ და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიებში - 2024“. შრომათა კრებული. საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2024. გვ. 394-400. ISBN 978-9941-512-80-3. <https://gtu.ge/ims/pdf/docs/collection-of-works.pdf>
 9. გ. ღვინეფაძე, შ. დეკანოსიძე, ნ. ჩორხაული. „ინფორმაციის დამახსოვრების სტრატეგიები“. <https://doi.org/10.52340/gs.2025.07.01.02>. ჟურნალი „ქართველი მეცნიერები“, ტომი 7, No. 1 (2025).
 10. გ. ღვინეფაძე, ნ. ჩორხაული. „უმაღლეს სკოლებში სწავლების ხარისხის ამაღლების ასპექტები“. საქართველოს ბიზნესის მეცნიერებათა აკადემიის ჟურნალი „მომბე“. 2025. № 54, [HTTPS://DOI. ORG/10.52340/GBASB](https://doi.org/10.52340/GBASB), ISSN 2233-3606. გვ. 98-103.
 11. გ. ღვინეფაძე. „კრეატიული აზროვნების დისციპლინის სწავლებიდან - რთული, არასტანდარტული პრობლემების წამოჭრა-გადაწყვეტის მაგალითები“. სტუ-ს გამომცემლობა, „შრომები“. 2025. №1 (535), ISSN 1512-0996. გვ. 215-227.
 12. გ. ღვინეფაძე, თ. შავიშვილი. „კრეატიული აზროვნების საფუძვლები“. მონოგრაფია. თბილისი. სტუ-ს „IT კონსალტინგის სამეცნიერო ცენტრი“, 2024, გვ. 191, ISBN 978-9941-8-6929-7.
 13. დ. გიუნაშვილი. „სასწავლო პროცესის და ცოდნის კონტროლის რეორგანიზაციის ზოგიერთი საკითხი უმაღლეს ტექნიკურ სკოლაში“. მეთოდური მითითებები. სტუ, 1990.
 14. <https://gtu.ge/pdf/koncepcia.pdf>
 15. <http://aaf.ge/index.php?menu=2&jurn=0&rubr=0&mas=3771>
 16. <https://old.gtu.ge/pdf/gtu-strategy.pdf>

Ways to improve the quality of university education

Summary

Gela Ghvinepadze

Georgian Technical University

<https://orcid.org/0009-0001-2350-5648>

Shorena Dekanosidze

Georgian Technical University

Nino Chorkhauri

Georgian Technical University

Summary

The rapid and large-scale changes occurring in the modern world require a deeper study of these processes and an operative response to them. The most important role in this, of course, is assigned to higher education institutions and, first of all, to universities.

It is the structure of the latter that provides a wide space for the establishment of inter- and transdisciplinary connections between faculties and departments of a different profile, which is what scientists recommend today.

Accordingly, the issue of improving the quality of teaching in universities becomes especially relevant.

In the presented work, a number of questions in this direction are considered. Some of them are based on the successful practice of developed countries in the field of education. However, in most cases, the authors of the article recommend not to mechanically transfer successful foreign approaches to our space, but to adapt them to the existing situation in our country.

In particular, to improve the quality of the educational process, taking into account local conditions, a certain modification of the above-mentioned approaches is offered. In some cases, qualitatively new approaches are also used. They are based on the experience of the authors of the article and most of the decisions made are implemented in the form of computer programs.

In addition, opinions are expressed about how new requirements for the educational process in universities should be reflected in the development of educational programs, and what kinds of innovations should be given priority.

Key words: Quality of university teaching; Innovations in teaching; Inter- and transdisciplinarity.

ძუძუს ეპითელური სიმსივნეებისა და სიმსივნისწინარე მდგომარეობების პროლიფერაციულ-აპოპტოზურ აქტივობას, სიმსივნის „ზადებსა“ და სიმსივნის მაინფილტრირებელ ლიმფოციტებს შორის კორელაციური კავშირები: რეტროსპექტული იმუნოჰისტოქიმიური კვლევა

ქეთევან შენგელაია¹; ირაკლი კობხრიძე²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴;

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; გინეკოლოგი; ²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ონკოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ³თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი; ⁴თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი, პათოლოგანატომი;

აბსტრაქტი

ძუძუს კიბო ავლენს მნიშვნელოვან ბიოლოგიურ ჰეტეროგენულობას, რომელიც ხასიათდება პროლიფერაციული აქტივობის, აპოპტოზური რეგულირების, ინვაზიური პოტენციალისა და იმუნური მიკროგარემოს თავისებურებების მკვეთრი განსხვავებებით. სულ უფრო მეტი მტკიცებულება მიუთითებს, რომ ამ ფაქტორებს შორის ურთიერთქმედება მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს სიმსივნის პროგრესირებას და კლინიკურ ჰეტეროგენულ ქცევას. ამ კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ძუძუს ეპითელურ სიმსივნეებსა და სიმსივნის წინარე მდგომარეობებში პროლიფერაციულ აქტივობას, აპოპტოზურ მარკერების ექსპრესიას, სიმსივნის „ზადებსა“ და სიმსივნის მაინფილტრირებელ ლიმფოციტებს (TIL) შორის ურთიერთკავშირის გამოკვლევა.

ეს რეტროსპექტული კვლევა მოიცავდა კეთილთვისებიან, პრეინვაზიურ და ინვაზიურ ძუძუს ეპითელურ დაზიანებებს, რომლებიც დიაგნოსტირებული იყო 2018 და 2025 წლებში. ჰისტოპათოლოგიური შეფასება ჩატარდა ჰემატოქსილინით და ეოზინით შეღებილი ანათლების გამოყენებით. იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზი მოიცავდა Ki67-ს, როგორც პროლიფერაციულ მარკერს და BCL2-ს, როგორც ანტიაპოპტოზურ მარკერს. სიმსივნის „ზადები“ შეფასდა ინვაზიურ ფრონტზე, ხოლო სტრომული TIL-ები შეფასდა დადგენილი საერთაშორისო რეკომენდაციების შესაბამისად. სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა არაპარამეტრული შედარებითი და კორელაციის მეთოდების გამოყენებით.

კვლევაში ჩართული იყო სულ 54 შემთხვევა, მათ შორის კეთილთვისებიანი/ჰიპერპლაზიური დაზიანებები, პრეინვაზიური დაზიანებები და ინვაზიური სარძევე ჯირკვლის კარცინომა. Ki67 ექსპრესიამ აჩვენა პროგრესული ზრდა ნეოპლაზიურ სპექტრში, ყველაზე მაღალი პროლიფერაციული აქტივობით დაფიქსირდა ინვაზიურ კარცინომებში და განსაკუთრებით სამმაგად უარყოფით სიმსივნეებში ($p < 0.001$). სიმსივნის „ბადების“ აქტივობამ აჩვენა ძლიერი დადებითი კორელაცია Ki67 ექსპრესიასთან ($\rho = 0.949$, $p < 0.001$), რაც მიუთითებს პროლიფერაციულ აქტივაციასა და ინვაზიურ რემოდელირებას შორის მჭიდრო კავშირზე. სტრომული TIL სიმკვრივემ აჩვენა ინვერსიული კორელაცია როგორც Ki67 ექსპრესიასთან, ასევე სიმსივნის „ბადების“ აქტივობასთან, რაც მიუთითებს ადგილობრივი იმუნური პასუხის შედარებით დათრგუნვაზე მაღალ აგრესიულ სიმსივნეებში. BCL2 ექსპრესია მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდა დაზიანების ჯგუფებს შორის ($p < 0.001$), თუმცა მისი კავშირი რეციდივთან არ იყო სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი.

ძუძუს კიბოს პროგრესირება დაკავშირებულია პროლიფერაციული სიგნალის გადაცემის, აპოპტოზური რეგულირების, ინვაზიური მორფოლოგიური რემოდელირებისა და სტრომული იმუნური პასუხის კოორდინირებულ ცვლილებებთან. Ki67-ის მაღალი ექსპრესია და სიმსივნის ზრდა, როგორც ჩანს, აგრესიული სიმსივნის ქცევის ურთიერთდაკავშირებულ ინდიკატორებს წარმოადგენს, ხოლო სტრომული TIL-ის სიმკვრივის შემცირება შეიძლება სიმსივნის ევოლუციის დროს პროგრესულ იმუნურ გაქცევას ასახავდეს. პროლიფერაციული, აპოპტოზური და მიკროგარემოს პარამეტრების ინტეგრირებული შეფასება შეიძლება ღირებულ დამატებით ინფორმაციას იძლეოდეს ძუძუს კარცინომის ბიოლოგიური სტრატეგიკაციისთვის.

საკვანძო სიტყვები: ძუძუს კიბო; Ki67; BCL2; სიმსივნის მაინფილტრირებელი ლიმფოციტები; პროლიფერაციული აქტივობა; აპოპტოზი; იმუნოჰისტოქიმია; სიმსივნის მიკროგარემო;

შესავალი

ძუძუს კიბო მსოფლიოში ქალთა პოპულაციაში ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ ავთვისებიან სიმსივნედ რჩება და მისი მაღალი შემთხვევების რაოდენობის, ბიოლოგიური ჰეტეროგენულობისა და ცვალებადი კლინიკური ქცევის გამო, კვლავ წარმოადგენს მნიშვნელოვან გლობალურ ჯანმრთელობის ტვირთს.[1,2] მოლეკულური კლასიფიკაციისა და მიზნობრივი თერაპიის მნიშვნელოვანი პროგრესის მიუხედავად, სარძევე ჯირკვლის კიბოს პროგრესირება და რეციდივი მნიშვნელოვან კლინიკურ გამოწვევებად რჩება, განსაკუთრებით აგრესიული მოლეკულური ქვეტიპების შემთხვევაში, რომლებიც ხასიათდება გაზრდილი პროლიფერაციული აქტივობითა და ინვაზიური პოტენციალით. [3] თანამედროვე ონკოპათოლოგია სულ უფრო მეტად

ადიარებს, რომ სიმსივნის პროგრესირება არ განისაზღვრება მხოლოდ ჰისტოლოგიური ქვეტიპით ან სტადიით, არამედ პროლიფერაციული სიგნალის გადაცემით, აპოპტოზური რეგულირების, სტრომის რემოდელირებისა და ადგილობრივი იმუნური მიკროგარემოს შორის რთული ურთიერთქმედებით.

სარმევე ჯირკვლის პათოლოგიაში გამოყენებულ მრავალრიცხოვან ბიომარკერებს შორის, Ki67 გახდა პროლიფერაციული აქტივობის ერთ-ერთი ყველაზე ფართოდ შესწავლილი ინდიკატორი. Ki67 არის ბირთვული ცილა, რომელიც ექსპრესირდება უჯრედული ციკლის აქტიური ფაზების დროს და ითვლება სიმსივნის ზრდის ფრაქციის შეფასების მნიშვნელოვან სუროგატ მარკერად. Ki67-ის გაზრდილი ექსპრესია ასოცირდება უფრო მაღალ ჰისტოლოგიურ ხარისხთან, აგრესიულ მოლეკულურ ქვეტიპთან, არახელსაყრელ პროგნოზთან და სარმევე ჯირკვლის კარცინომის დროს დაავადებისგან თავისუფალი გადარჩენის შემცირებასთან. კლინიკურ პრაქტიკაში, Ki67 ხშირად შედის მოლეკულური ქვეტიპის კლასიფიკაციაში, განსაკუთრებით Luminal A და Luminal B კარცინომების განსასხვავებლად. თუმცა, მისი ფართო გამოყენების მიუხედავად, Ki67 ექსპრესიის ბიოლოგიური მნიშვნელობა ბოლომდე არ არის გაგებული.[4,5]

აპოპტოზური რეგულირება წარმოადგენს სიმსივნის ბიოლოგიის კიდევ ერთ ფუნდამენტურ კომპონენტს. BCL2 არის ანტი-აპოპტოზური ცილა, რომელიც აფერხებს დაპროგრამებულ უჯრედების სიკვდილს და ხელს უწყობს უჯრედების გახანგრძლივებულ გადარჩენას. ბევრ ავთვისებიან სიმსივნეში, BCL2-ის ექსპრესიის გაზრდა ასოცირდება სიმსივნის მდგრადობასთან და თერაპიულ რეზისტენტობასთან. საინტერესოა, რომ სარმევე ჯირკვლის კარცინომაში, BCL2 ექსპრესია ავლენს პარადოქსულ ბიოლოგიურ ქცევას სხვა სიმსივნის ტიპებთან შედარებით. [6]რამდენიმე კვლევამ აჩვენა, რომ BCL2 დადებითობა უფრო ხშირად ასოცირდება ჰორმონ-რეცეპტორ-დადებით და დაბალი ხარისხის სარმევე ჯირკვლის კარცინომებთან და შეიძლება კორელაციაში იყოს უფრო ხელსაყრელ კლინიკურ შედეგებთან. ეს დასკვნები მიუთითებს, რომ BCL2-ის ბიოლოგიურ როლზე სარმევე ჯირკვლის კიბოში შეიძლება ძლიერ გავლენას ახდენდეს ჰორმონალური სიგნალის გადაცემის გზები და მოლეკულური ქვეტიპის სპეციფიკური მექანიზმები. შესაბამისად, პროლიფერაციული და აპოპტოზური მარკერების ერთად შეფასებამ შეიძლება უფრო ყოვლისმომცველი ინფორმაცია მოგვაწოდოს სიმსივნის ქცევის შესახებ, ვიდრე მხოლოდ იზოლირებული მარკერების ანალიზმა.[7,8]

ბოლო წლებში სულ უფრო მეტი ყურადღება ექცევა სიმსივნის ინვაზიურობის მორფოლოგიურ ინდიკატორებს, განსაკუთრებით სიმსივნის კვირტებს ე.წ „სიმსივნურ ბადებს“. სიმსივნის „ბადები“ გულისხმობს იზოლირებული ცალკეული სიმსივნური უჯრედების ან მცირე უჯრედული კლასტერების არსებობას კარცინომების ინვაზიურ ფრონტზე და ამჟამად განიხილება, როგორც გაძლიერებული მიგრაციული და

ინვაზიური უნარის ჰისტოლოგიური გამოვლინება. მიუხედავად იმისა, რომ სიმსივნის „ბადები“ ფართოდ არის შესწავლილი მსხვილი ნაწლავის კარცინომაში და ჩართულია პროგნოზული შეფასების სისტემებში, მისი მნიშვნელობა სარძევე ჯირკვლის კარცინომაში ნაკლებად მკაფიოდ არის დადგენილი. ახალი მტკიცებულებები მიუთითებს, რომ სარძევე ჯირკვლის კარცინომაში სიმსივნის „ბადების“ გაზრდა დაკავშირებულია აგრესიულ კლინიკურ-პათოლოგიურ მახასიათებლებთან, ლიმფოვასკულურ ინვაზიასთან, ლიმფური კვანძების მეტასტაზებთან და შემცირებულ გადარჩენის მაჩვენებელთან. ბიოლოგიური პერსპექტივიდან გამომდინარე, სიმსივნის „ბადები“, სავარაუდოდ, ასახავს ნაწილობრივ ეპითელურ-მეზენქიმურ გადასვლას (EMT), რომლის დროსაც სიმსივნური უჯრედები კარგავენ ეპითელურ ადჰეზიურ თვისებებს და იძენენ გამლიერებულ ინვაზიურ შესაძლებლობებს. პროლიფერაციულ აქტივობასა და სიმსივნის „ბადებს“ შორის ურთიერთობა განსაკუთრებით საინტერესო რჩება, რადგან მაღალპროლიფერაციულ სიმსივნეებმა შეიძლება ერთდროულად აჩვენონ გაზრდილი ინვაზიური და მეტასტაზური პოტენციალი.[9]

სიმსივნის მიკროგარემო ასევე წარმოიშვა, როგორც სარძევე ჯირკვლის კიბოს პროგრესირების კრიტიკული განმსაზღვრელი ფაქტორი. სტრომული სიმსივნეში ინფილტრირებული ლიმფოციტები (TIL) წარმოადგენენ მასპინძლის იმუნურ პასუხს სიმსივნური უჯრედების წინააღმდეგ და სულ უფრო მნიშვნელოვანი ხდება თანამედროვე სარძევე ჯირკვლის კიბოს კვლევაში. TIL-ების პროგნოზული მნიშვნელობა განსაკუთრებით აღიარებულია სამმაგად უარყოფით და HER2-დადებით სარძევე ჯირკვლის კარცინომებში, სადაც ლიმფოციტური ინფილტრაციის გაზრდა შეიძლება კორელაციაში იყოს გაუმჯობესებულ თერაპიულ პასუხთან და გადარჩენასთან. თუმცა, TIL სიმკვრივეს, პროლიფერაციულ აქტივობასა და ინვაზიურ მორფოლოგიურ ცვლილებებს შორის ურთიერთქმედება ბოლომდე შესწავლილი არ არის.[10,11] მაღალი პროლიფერაციული ინდექსებით და ძლიერი ინვაზიური რემოდელირებით ხასიათდება სიმსივნეები, რომლებიც ხასიათდებიან იმუნური გაქცევის მექანიზმებით, რაც იწვევს არაეფექტურ ანტისიმსივნურ იმუნურ მეთვალყურეობას და უფრო აგრესიული ბიოლოგიური ფენოტიპებისკენ პროგრესირებას.

სარძევე ჯირკვლის კარცინომას ასევე ახასიათებს მნიშვნელოვანი მოლეკულური ჰეტეროგენულობა. ლუმინალური სიმსივნეები ზოგადად ავლენენ ჰორმონის რეცეპტორების დადებითობას და დაბალ პროლიფერაციულ აქტივობას, მაშინ როდესაც HER2-დადებითი და სამმაგად უარყოფითი კარცინომები ხშირად ავლენენ უფრო აგრესიულ ბიოლოგიურ ქცევას. იმის გაგება, თუ როგორ ურთიერთქმედებენ პროლიფერაციული მარკერები, აპოპტოზური გზები, სიმსივნის „ბადები“ და სტრომული იმუნური პასუხები სხვადასხვა მოლეკულურ ქვეტიპებს შორის, შეიძლება

ხელს უწყობდეს ბიოლოგიური სტრატეგიკაციისა და პროგნოზული შეფასების გაუმჯობესებას.

მიუხედავად იმისა, რომ მრავალრიცხოვანმა კვლევამ დამოუკიდებლად შეისწავლა Ki67, BCL2, სიმსივნის „ბადები” ან TIL-ები სარძევე ჯირკვლის კარცინომაში, შედარებით ცოტა კვლევამ შეაფასა ეს პარამეტრები ერთდროულად ერთსა და იმავე კოჰორტაში. პროლიფერაციული აქტივობის, აპოპტოზური სიგნალის გადაცემის, ინვაზიური მორფოლოგიური რემოდელირებისა და იმუნური მიკროგარემოს პასუხის ინტეგრირებული შეფასება შეიძლება უფრო ყოვლისმომცველ წარმოდგენას გვიქმნიდეს სარძევე ჯირკვლის კიბოს პროგრესირების საფუძვლად მყოფ ბიოლოგიურ მექანიზმებზე. ასეთი კომბინირებული შეფასება ასევე შეიძლება დაეხმაროს სიმსივნის აგრესიულობასა და რეციდივში მონაწილე გზების იდენტიფიცირებაში.

კვლევის მასალა და მეთოდები

კვლევა წარმოადგენს რეტროსპექტულ-დაკვირვებით კოჰორტულ კვლევას, რომელიც ჩატარდა ფორმალინით ფიქსირებულ, პარაფინში ჩაყალიბებულ (FFPE) ქსოვილის ნიმუშების გამოყენებით, რომლებიც მიღებული იყო თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიის დეპარტამენტის საარქივო არაფერსონიფიცირებული მასალებიდან. კვლევა მოიცავდა 2018-2025 წლებში დიაგნოსტირებულ ძუძუს ეპითელური დაზიანებებს. ჰისტოპათოლოგიური ნიმუშები შედგებოდა ბიოფსიის, ლამფექტომიის (ძუძუს შემანარჩუნებელი ოპერაცია) და მასტექტომიის შედეგად მიღებული მასალებისგან. კვლევიდან გამოირიცხა ქსოვილის არასაკმარისი შენარჩუნების, ფართო ნეკროზის, მძიმე ფიქსაციის არტეფაქტების ან არასრული კლინიკურ-პათოლოგიური ინფორმაციის შემთხვევები.

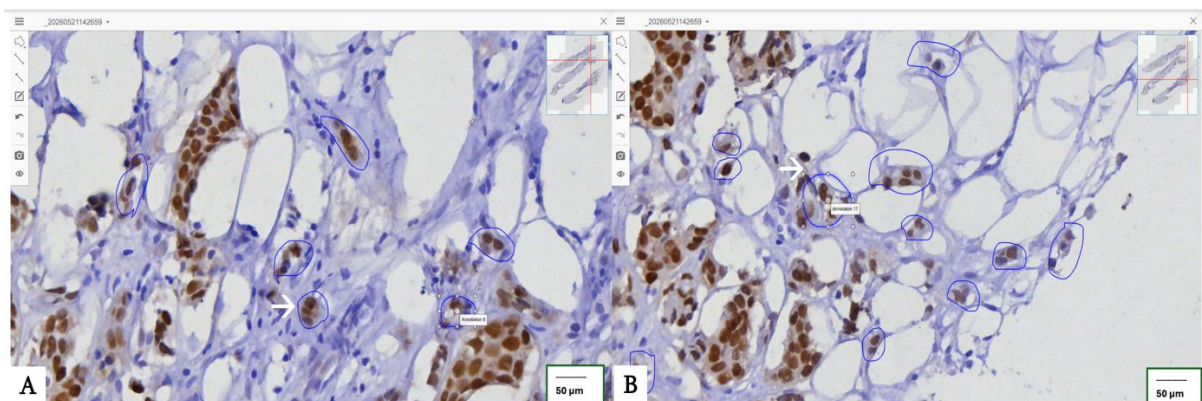
კვლევის კოჰორტაში შედიოდა სარძევე ჯირკვლის კეთილთვისებიანი და ჰიპერპლაზიური დაზიანებები, პრეინვაზიური ეპითელური დაზიანებები და ინვაზიური სარძევე ჯირკვლის კარცინომა. ჰისტოლოგიური დიაგნოზები ვერიფიცირებული იქნა ჯანმო-ს თანამედროვე კლასიფიკაციის კრიტერიუმების შესაბამისად. ინვაზიური კარცინომა დამატებით დაჯგუფდა მოლეკულური ქვეტიპის მიხედვით ლუმინალურ A, ლუმინალურ B, HER2-დადებით და სამმაგად უარყოფით სარძევე ჯირკვლის კარცინომის (TNBC) ჯგუფებად იმუნოჰისტოქიმიურად ჰორმონული რეცეპტორისა და HER2 პროფილების საფუძველზე.

კლინიკური ინფორმაცია შეგროვდა პათანატომიური მომართვის დოკუმენტაციებიდან და ინსტიტუციური მონაცემთა ბაზებიდან. კვლევის ალგორითმში შემავალი გაანალიზებული ცვლადები მოიცავდა პაციენტის ასაკს, ჰისტოლოგიურ დიაგნოზს,

სიმსივნის ხარისხს, სიმსივნის ზომას, pT სტადიას, pN სტადიას, რეციდივის სტატუსს, დაკვირვების ხანგრძლივობას და მოლეკულური ქვეტიპის კლასიფიკაციას.

ყველა შემთხვევის ჰემატოქსილინით და ეოზინით (H&E) შეღებილი სლაიდები დამოუკიდებლად განხილულ იქნა ჰისტომორფოლოგიური შეფასებისთვის. სიმსივნის ინფილტრაციული ლიმფოციტები (TIL) შეფასდა ინვაზიური სიმსივნის უბნების მიმდებარე სტრომულ კომპარტმენტებში, საერთაშორისო TIL-ების სამუშაო ჯგუფის რეკომენდაციების შესაბამისად. სტრომული TIL-ის პროცენტული მაჩვენებელი შეფასდა, როგორც მონონუკლეარული ანთებითი უჯრედების მიერ ინვაზიური სიმსივნის საზღვარზე დაკავებული სტრომული ფართობის პროპორცია.

სიმსივნის „ბადების“ შეფასება ჩატარდა ინვაზიური კარცინომის შემთხვევებში H&E-შეღებილი ანათლების გამოყენებით. სიმსივნური „ბადები“ განისაზღვრა, როგორც იზოლირებული ერთჯერადი სიმსივნური უჯრედები ან კლასტერები, რომლებიც შედგებოდა ხუთამდე სიმსივნური უჯრედისგან, რომლებიც განლაგებული იყო ინვაზიურ ფრონტზე. „ბადების“ კერები იდენტიფიცირებული იქნა დაბალი გადიდებით, რასაც მოჰყვა რაოდენობრივი შეფასება მაღალი სიმძლავრის ველებში (HPF). შემთხვევები შემდგომში კატეგორიზებული იქნა „ბადების“ ინტენსივობის მიხედვით.



სურათი 7. A. სურათზე ნაჩვენებია სიმსივნური „ბადები“ მარკირებულია ლურჯად, აღნიშნულია ერთ-ერთი კლასტერი ისრით, შეფასებულია პროლიფერაციული აქტივობა სიმსივნის ბადებში იმუნოჰისტოქიმიური ტექნოლოგიით Ki67 ანტისხეულის გამოყენებით 400X, სიმსივნის ბადების მაჩვენებელი ზომიერია 6 სიმსივნური „ბადი“; საკვლევი ჯგუფი დაბალდიფერენცირებული ინვაზიური სადინროვანი კარცინომა Luminal B; B. ნაჩვენებია სიმსივნური „ბადები“ მარკირებულია ლურჯად, აღნიშნულია ერთ-ერთი კლასტერი ისრით, შეფასებულია პროლიფერაციული აქტივობა სიმსივნის ბადებში იმუნოჰისტოქიმიური ტექნოლოგიით Ki67 ანტისხეულის გამოყენებით 400X, სიმსივნის ბადების მაჩვენებელი მაღალია >10 სიმსივნური „ბადი“, საკვლევი ჯგუფი დაბალდიფერენცირებული ინვაზიური სადინროვანი კარცინომა Luminal B;

იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზი ჩატარდა დადებითად დამუხტულ სლაიდებზე დაფიქსირებულ FFPE ქსოვილის ანათლების გამოყენებით. ოთხმიკრომეტრიანი

ანათლები დეპარაფინიზებული, რეჰიდრატირებული და თერმულად ინდუცირებული ეპიტოპის აღდგენის შემდეგ იქნა გამოყენებული. იმუნოჰისტოქიმიური შეღებვა ჩატარდა ხელმისაწვდომი პირველადი ანტისხეულების გამოყენებით, მწარმოებლის მიერ რეკომენდებული პროტოკოლების შესაბამისად. ანტისხეულები მოიცავდა Ki67-ს, როგორც პროლიფერაციულ მარკერს და BCL2-ს, როგორც ანტიაპოპტოზურ მარკერს. მოლეკულური ქვეტიპის კლასიფიკაციისთვის, სადაც ეს შესაძლებელი იყო, დამატებით გამოყენებული იყო ესტროგენის რეცეპტორი (ER), პროგესტერონის რეცეპტორი (PR) და HER2 იმუნოჰისტოქიმია.

Ki67 პროლიფერაციული აქტივობა შეფასდა, როგორც დადებითად შეღებილი სიმსივნური ბირთვების პროცენტული მაჩვენებელი ცხელ წერტილებში, რომლებიც აჩვენებდნენ მაქსიმალურ პროლიფერაციულ აქტივობას. მინიმუმ 500 სიმსივნური უჯრედი შეფასდა წარმომადგენლობით მაღალი გადიდების ველებში. Ki67 ექსპრესია დაფიქსირდა, როგორც უწყვეტი პროცენტული ცვლადი.

BCL2 ექსპრესია შეფასდა ნახევრად რაოდენობრივად შეღებვის ინტენსივობის და დადებითი სიმსივნური უჯრედების პროცენტული მაჩვენებლის მიხედვით. ციტოპლაზმური შეღებვის ინტენსივობა შეფასდა, როგორც სუსტი, საშუალო ან ძლიერი და შემდგომში H-ქულა გამოითვალა ინტენსივობისა და განაწილების კომბინირებული პარამეტრების გამოყენებით.

P53 იმუნოჰისტოქიმიური ნიმუშები, ხელმისაწვდომობის შემთხვევაში, კატეგორიზებული იყო როგორც ველური/ბუნებრივი ტიპის, ზედმეტად გამოხატული/ჰიპერექსპრესიული ან ნულოვანი ტიპის შეღებვის ნიმუშები.

ციფრული სლაიდის მიმოხილვა და მორფოლოგიური ვერიფიკაცია ჩატარდა მთლიანი სლაიდის ვიზუალიზაციის სისტემების (WSI) გამოყენებით. რაოდენობრივი და ნახევრად რაოდენობრივი ანალიზები დამოუკიდებლად იქნა განხილული დაკვირვებითი მიკერძოების მინიმიზაციის მიზნით.

სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა SPSS სტატისტიკური პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით. უწყვეტი ცვლადები გამოიხატა საშუალო $\pm$ სტანდარტული გადახრით ან მედიანას მნიშვნელობებით. კვლევის ჯგუფებს შორის შედარება ჩატარდა კრუსკალ-ვალის და მან-უიტნის U ტესტების გამოყენებით არაპარამეტრული ცვლადებისთვის. პროლიფერაციულ აქტივობას, სიმსივნის „ბადებსა“, TIL სიმკვრივეს და აპოპტოზური მარკერის ექსპრესიას შორის კორელაციები შეფასდა სპერმანის კორელაციის ანალიზის გამოყენებით. p -მნიშვნელობა < 0.05 ითვლებოდა სტატისტიკურად მნიშვნელოვნად.

კვლევა ჩატარდა ჰელსინკის დეკლარაციის პრინციპების შესაბამისად და დამტკიცებული იყო თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის

ინსტიტუციური ეთიკის კომიტეტის მიერ. პაციენტის ყველა ინფორმაცია ანონიმიზებული და არაპერსონიფიცირებული იყო.

კვლევის შედეგები

კვლევის კოჰორტაში შედიოდა 54 მუშუს დაზიანება: 12 კეთილთვისებიანი/ჰიპერპლაზიური დაზიანება, 12 პრეინვაზიური დაზიანება და 30 ინვაზიური სარძევე ჯირკვლის კარცინომა. ინვაზიური კარცინომის ჯგუფი წარმოადგენდა კვლევის პოპულაციის უდიდეს ნაწილს და ავლენდა ყველაზე ფართო მორფოლოგიურ და იმუნოფენოტიპურ ჰეტეროგენულობას.

პაციენტის საშუალო ასაკი იყო 49.3 წელი (დიაპაზონი: 38–65 წელი). ინვაზიური კარცინომის მქონე პაციენტები ზოგადად უფრო მაღალი ასაკობრივი კატეგორიის იყვნენ კეთილთვისებიანი და პრეინვაზიური დაზიანებების მქონე პაციენტებთან შედარებით. საშუალო ასაკი იყო 42.5 წელი კეთილთვისებიანი/ჰიპერპლაზიური დაზიანებების შემთხვევაში, 43.0 წელი პრეინვაზიური დაზიანებების შემთხვევაში და 54.6 წელი ინვაზიური კარცინომის შემთხვევაში, რაც მიუთითებს ნეოპლაზიური სპექტრის ასაკობრივ პროგრესულ მატებაზე.

პარამეტრი	კეთილთვისებიანი/ჰიპერპლაზიური	პრეინვაზიური	ინვაზიური კარცინომა
შემთხვევების რაოდენობა	12	12	30
საშუალო ასაკი	42.5	43.0	54.6
Ki67 საშუალო (%)	3.5	14.0	67.0
BCL2 საშუალო H-score	0	30.0	56.0
TIL საშუალო (%)	—	12.0	21.0
Tumor Budding საშუალო	—	—	7.0

ცხრილი 12. კვლევის ჯგუფების კლინიკურ-პათოლოგიური მახასიათებლები;

პროლიფერაციული აქტივობის ანალიზმა აჩვენა Ki67 ექსპრესიის მნიშვნელოვანი ეტაპობრივი ზრდა კეთილთვისებიანი დაზიანებებიდან ინვაზიურ კარცინომაში პროგრესირების დროს. კეთილთვისებიანი/ჰიპერპლაზიური დაზიანებები ავლენდა მინიმალურ პროლიფერაციულ აქტივობას, Ki67-ის საშუალო ინდექსით 3.5%. პრეინვაზიურმა დაზიანებებმა აჩვენა შუალედური პროლიფერაცია, საშუალო Ki67 ინდექსით 14.0%, მაშინ როდესაც ინვაზიურმა კარცინომებმა აჩვენა მნიშვნელოვნად მომატებული პროლიფერაციული აქტივობა, საშუალო Ki67 ინდექსით 67.0%. სტატისტიკურმა ანალიზმა დაადასტურა კვლევის ჯგუფებს შორის მნიშვნელოვანი განსხვავება (კრუსკალ-ვალის $H = 43.647$, $p < 0.001$). ეს მონაცემები მიუთითებს

პროგრესულ პროლიფერაციულ აქტივაციაზე სარძევე ჯირკვლის სიმსივნის პროგრესირების დროს.

მოლეკულური ქვეტიპი	Ki67 საშუალო (%)
Luminal A	55.0
Luminal B	60.0
HER2-დადებითი	70.0
Triple-negative	80.0

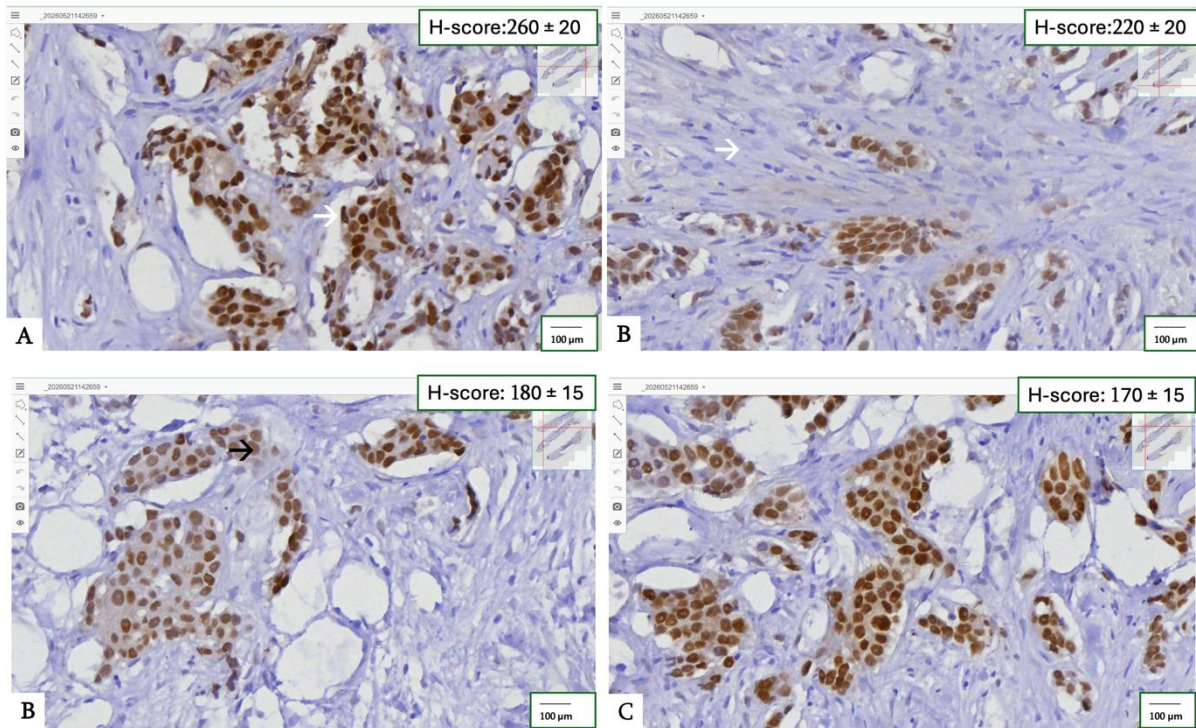
ცხრილი 13. Ki67 ექსპრესიის შედარება მოლეკულურ ქვეტიპებში;

BCL2 ექსპრესიამ ასევე აჩვენა მნიშვნელოვანი საკვლევ ჯგუფთაშორისი ვარიაცია. კეთილთვისებიანმა დაზიანებებმა აჩვენა BCL2 ექსპრესია ან არარსებობა ან მინიმალური, ხოლო პრეინვაზიურმა დაზიანებებმა აჩვენა ზომიერი დადებითობა. ინვაზიურმა კარცინომებმა აჩვენეს ყველაზე მაღალი საშუალო BCL2 H-ქულა (56.0), თუმცა დაფიქსირდა მნიშვნელოვანი შიდაჯგუფური ჰეტეროგენულობა. ინვაზიურ სიმსივნეებში BCL2 ექსპრესიის დიაპაზონი მერყეობდა ფოკალური სუსტი დადებითობიდან დიფუზურ ძლიერ ექსპრესიამდე. ჯგუფთაშორისი საერთო განსხვავებები სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი იყო ($H = 25.860$, $p < 0.001$). რამდენიმე ინვაზიურ კარცინომაში BCL2 ექსპრესიის ზრდის მიუხედავად, ექსპრესიის ნიმუშები მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდა მოლეკულური ქვეტიპისა და პროლიფერაციული სტატუსის მიხედვით.

პარამეტრები	Spearman rho	p მნიშვნელობა
Ki67 და Tumor Budding	0.949	<0.001
Ki67 და TIL	-0.353	0.035
TIL და Tumor Budding	-0.949	<0.001

ცხრილი 14. კორელაციური ანალიზი ძირითად პარამეტრებს შორის;

ქვეტიპზე ორიენტირებულმა ანალიზმა გამოავლინა მნიშვნელოვანი განსხვავებები პროლიფერაციული აქტივობის მხრივ ინვაზიურ კარცინომებს შორის. ლუმინალური A კარცინომებმა ავთვისებიან სიმსივნეებს შორის ყველაზე დაბალი Ki67 ინდექსი აჩვენეს, საშუალო პროლიფერაციული აქტივობით დაახლოებით 55.0%. ლუმინალური B სანათურის კარცინომებმა ზომიერად გაზარდეს Ki67 ექსპრესია (საშუალოდ 60.0%), ხოლო HER2-დადებითმა კარცინომებმა პროლიფერაციული აქტივობის შემდგომი მატება აჩვენეს. სამმაგად უარყოფითმა სარძევე ჯირკვლის კარცინომებმა ყველაზე მაღალი პროლიფერაციული ინდექსები აჩვენეს, საშუალო Ki67 მნიშვნელობით, რომელიც 80.0%-ს უახლოვდებოდა. ეს განსხვავებები სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი იყო ($H = 29.000$, $p < 0.001$), რაც ადასტურებდა მოლეკულურ ქვეტიპსა და ბიოლოგიურ აგრესიულობას შორის კავშირს.



სურათი 8. Ki67 იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის თავისებურებები ძუძუს კარცინომის სხვადასხვა მოლეკულურ ქვეტიპებში. (A) Luminal B ტიპის ინვაზიური კარცინომა, ზომიერად მაღალი პროლიფერაციული აქტივობით (Grade 2), Ki67 მაღალი ბირთვული ექსპრესია; (B) HER2-დადებითი ინვაზიური კარცინომა (Grade 3), მაღალი პროლიფერაციული აქტივობით და ინტენსიური Ki67 ბირთვული პოზიტიურობით; (C) Triple-negative ძუძუს კარცინომა (Grade 3), გამოხატული Ki67 ექსპრესიით; (D) მაღალი ხარისხის Luminal B ინვაზიური კარცინომა (Grade 3), დიფუზური Ki67 ბირთვული პოზიტიურობით. ისრები მიუთითებს მაღალი პროლიფერაციული აქტივობის უბნებზე. მასშტაბი: 100 µm; გადიდება $\times 400$.

სიმსივნის „ბადების“ ანალიზი წარმატებით ჩატარდა ინვაზიური კარცინომის 24 შემთხვევაში. სიმსივნის „ბადების“ საშუალო რაოდენობა შეფასებულ ცხელ ველზე 7.0 „ბადი“ იყო, მნიშვნელობებით 4-დან 12-მდე მერყეობდა. სიმსივნის „ბადები“ ყველაზე ნაკლებად შესამჩნევი იყო სანათურის კარცინომებში და ყველაზე გამოხატული სამმაგად უარყოფით კარცინომებში. სიმსივნის გამრავლებასა და Ki67 პროლიფერაციულ აქტივობას შორის ძლიერი დადებითი კორელაცია გამოვლინდა (სპირმანის $\rho = 0.949$, $p < 0.001$), რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ინვაზიური უჯრედული დისოციაციის გაძლიერებული პოტენციალით სიმსივნეებსაც აქვთ შესაბამისად გაძლიერებული პროლიფერაციული პოტენციალი.

სტრომული სიმსივნის-მაინფილტრირებელი ლიმფოციტების (TIL) შეფასებამ კვლევის ჯგუფებში იმუნური მიკროგარემოს ცვალებადი რეაქციები აჩვენა. პრეინვაზიურმა დაზიანებებმა შედარებით შეზღუდული ლიმფოციტური ინფილტრაცია აჩვენა, TIL-ის საშუალო პროცენტული მაჩვენებლით 12.0%, ხოლო ინვაზიურმა კარცინომებმა სტრომული ლიმფოციტების დაგროვების ზრდა აჩვენა, საშუალო მნიშვნელობით 21.0%. თუმცა, მოლეკულურ ქვეტიპებს შორის მნიშვნელოვანი ჰეტეროგენულობა დაფიქსირდა.

TIL-ის სიმკვრივემ უკუპროპორციული კავშირი აჩვენა როგორც პროლიფერაციულ აქტივობასთან, ასევე სიმსივნის „ბადებთან“. სპირმენის კორელაციის ანალიზმა აჩვენა უარყოფითი კორელაცია TIL პროცენტსა და Ki67 ექსპრესიას შორის ($\rho = -0.353$, $p = 0.035$), ხოლო კიდევ უფრო ძლიერი შებრუნებული კორელაცია დაფიქსირდა TIL სიმკვრივესა და სიმსივნის „ბადების“ აქტივობას შორის ($\rho = -0.949$, $p < 0.001$). ეს მონაცემები მიუთითებს, რომ სიმსივნეები გაზრდილი ინვაზიური „ბადებით“ მორფოლოგიით შეიძლება ავლენდნენ ეფექტური ადგილობრივი იმუნური პასუხის დარღვევას.

რეციდივთან ასოცირებულმა ანალიზმა აჩვენა, რომ მორეციდივე ინვაზიურ კარცინომებს უფრო აგრესიული ბიოლოგიური მახასიათებლები ჰქონდათ არარეციდივულ სიმსივნეებთან შედარებით. მორეციდივე სიმსივნეებმა აჩვენა მნიშვნელოვნად მომატებული Ki67 ექსპრესია, გაზრდილი სიმსივნის „ბადების“ აქტივობა და დაბალი სტრომული TIL პროცენტული მაჩვენებლები. ამის საპირისპიროდ, BCL2 ექსპრესიამ არ აჩვენა სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი კავშირი რეციდივის სტატუსთან ($p = 0.125$). ეს დაკვირვებები მიუთითებს, რომ პროლიფერაციული აქტივობა და ინვაზიური მორფოლოგიური რემოდელირება შეიძლება უფრო მჭიდროდ იყოს დაკავშირებული რეციდივის რისკთან, ვიდრე მხოლოდ აპოპტოზური მარკერის ექსპრესია.

პარამეტრი	რეციდივი	არარეციდივი	p
Ki67 (%)	მაღალი	შედარებით დაბალი	<0.001
Tumor Budding	მაღალი	დაბალი	<0.001
TIL (%)	დაბალი	მაღალი	<0.001
BCL2 H-score	განსხვავება უმნიშვნელო	—	0.125

ცხრილი 15. რეციდივისა და არარეციდივის ჯგუფების შედარება;

კვლევის შედეგები აჩვენებს, რომ სარბევე ჯირკვლის სიმსივნის პროგრესულ ევოლუციას თან ახლავს პროლიფერაციული აქტივობის ზრდა, ინვაზიური „ბადების“ მორფოლოგიის გაძლიერება და ადგილობრივი იმუნური მიკროგარემოს ცვლილებები. Ki67-ის მაღალი ექსპრესია მჭიდრო კავშირში იყო აგრესიულ მოლეკულურ ქვეტიპთან, სიმსივნის კვირტების/„ბადების“ ზრდასთან და რეციდივთან, მაშინ როდესაც სტრომულმა TIL-ებმა აჩვენეს უკუკავშირი როგორც პროლიფერაციასთან, ასევე „ბადების“ აქტივობასთან. დაკვირვებული ურთიერთობები ადასტურებს იმ კონცეფციას, რომ პროლიფერაციული აქტივაცია და ინვაზიური უჯრედული რემოდელირება ურთიერთდაკავშირებული ბიოლოგიური მოვლენებია სარბევე ჯირკვლის კარცინომის პროგრესირებაში.

კვლევის შედეგების ანალიზი

კვლევის შედეგებმა აჩვენა მნიშვნელოვანი კავშირი პროლიფერაციულ აქტივობას, აპოპტოზური მარკერების ექსპრესიას, სიმსივნის „ბადებსა“ და სტრომულ იმუნურ პასუხს შორის სარძევე ჯირკვლის ეპითელიური დაზიანებების მთელ სპექტრში. კეთილთვისებიანი და პრეინვაზიური დაზიანებებიდან ინვაზიურ კარცინომაზე პროგრესულ გადასვლას თან ახლდა Ki67 პროლიფერაციული ინდექსის მნიშვნელოვანი მატება, სიმსივნის „ბადების“ აქტივობის ზრდა და ადგილობრივი იმუნური მიკროგარემოს რემოდელირება. ეს დასკვნები ადასტურებს იმ კონცეფციას, რომ სარძევე ჯირკვლის კანცეროგენეზი ხასიათდება არა მხოლოდ უჯრედების პროლიფერაციის გაზრდით, არამედ ინვაზიური ქცევისა და სიმსივნე-სტრომის ურთიერთქმედების დინამიური ცვლილებებით.

Ki67 არის ერთ-ერთი ყველაზე ფართოდ გამოყენებული იმუნოჰისტოქიმიური მარკერი ძუძუს კარცინომაში პროლიფერაციული აქტივობის შესაფასებლად. ამ კვლევაში, Ki67 ექსპრესიამ აჩვენა პროგრესული ზრდა კეთილთვისებიანი დაზიანებებიდან ინვაზიურ კარცინომამდე, ყველაზე მაღალი პროლიფერაციული აქტივობით, რომელიც დაფიქსირდა სამმაგად უარყოფით სიმსივნეებში. ეს დასკვნები შეესაბამება წინა კვლევების ანგარიშებს, რომლებიც აჩვენებს, რომ აგრესიული მოლეკულური ქვეტიპები, განსაკუთრებით სამმაგად უარყოფით და HER2-დადებით კარცინომებს, აქვთ მომატებული პროლიფერაციული ინდექსები და უფრო ბიოლოგიურად აგრესიული ქცევა. [12,13] Ki67-ის მაღალ ექსპრესიასა და რეციდივს შორის დაფიქსირებული კავშირი კიდევ უფრო ადასტურებს პროლიფერაციული აქტივაციის პროგნოზულ მნიშვნელობას სარძევე ჯირკვლის კარცინომის პროგრესირებაში.

ჩვენი კვლევის მნიშვნელოვანი დასკვნა იყო Ki67-ის ექსპრესიასა და სიმსივნის „ბადების“ წარმოქმნის აქტივობას შორის ძლიერი დადებითი კავშირი. სიმსივნის კვირტები წარმოადგენს იზოლირებული ცალკეული უჯრედების ან მცირე ინვაზიური კლასტერების არსებობას ინვაზიურ ფრონტზე და სულ უფრო მეტად აღიარებულია, როგორც ეპითელიურ-მეზენქიმური გადასვლისა და აგრესიული სიმსივნის ქცევის მორფოლოგიური გამოვლინება. მიუხედავად იმისა, რომ სიმსივნის კვირტები ფართოდ იქნა შესწავლილი კოლორექტალურ კარცინომაში, სულ უფრო მეტი მტკიცებულება მიუთითებს, რომ მას ასევე აქვს პროგნოზული მნიშვნელობა სარძევე ჯირკვლის კარცინომაში. მიმდინარე კოჰორტაში კვირტების წარმოქმნის ინტენსივობასა და პროლიფერაციულ აქტივობას შორის დაფიქსირებული ძლიერი კორელაცია მიუთითებს, რომ მაღალპროლიფერაციული სიმსივნეები ერთდროულად იძენენ გაძლიერებულ ინვაზიურ და მიგრაციულ პოტენციალს. ეს დაკვირვება ადასტურებს ბიოლოგიურ კონცეფციას, რომ პროლიფერაციული აქტივაცია და ინვაზიური რემოდელირება ურთიერთდაკავშირებული პროცესებია სიმსივნის პროგრესირების დროს.[14,15]

კვლევამ ასევე აჩვენა უკუკავშირი სტრომულ სიმსივნეში ინფილტრირებულ ლიმფოციტებსა და აგრესიულ მორფოლოგიურ პარამეტრებს შორის. სიმსივნეები, რომლებსაც აღენიშნებოდათ გაზრდილი „ბადების“ აქტივობა და Ki67-ის ექსპრესიის მომატება, TIL-ის უფრო დაბალ პროცენტულ მაჩვენებლებს ავლენდნენ, რაც ადგილობრივი სიმსივნის საწინააღმდეგო იმუნური პასუხის შედარებით დათრგუნვას ან არაეფექტურ აქტივაციას მიუთითებს. სიმსივნეში ინფილტრირებული ლიმფოციტები ამჟამად მასპინძლის იმუნური აქტივობის მნიშვნელოვან ინდიკატორებად ითვლება, განსაკუთრებით სამმაგად უარყოფით და HER2-დადებით სარძევე ჯირკვლის კარცინომებში. რამდენიმე კვლევამ აჩვენა, რომ სტრომული TIL-ის სიმკვრივის მომატება შეიძლება კორელაციაში იყოს გაუმჯობესებულ თერაპიულ პასუხთან და ხელსაყრელ პროგნოზთან სარძევე ჯირკვლის კიბოს გარკვეულ ქვეტიპებში.[12,16] ამის საპირისპიროდ, ლიმფოციტური ინფილტრაციის შემცირებამ შეიძლება ხელი შეუწყოს ადგილობრივ ინვაზიას და პროგრესირებას იმუნურად განპირობებული სიმსივნის არასაკმარისი კონტროლის გზით. ამ კვლევაში გამოვლენილი უკუპროპორციული კორელაცია TIL-ის სიმკვრივესა და სიმსივნის „ბადებს“ წარმოქმნას შორის, შესაბამისად, შეიძლება ასახავდეს პროგრესულ იმუნურ გაქცევას ინვაზიური სიმსივნის ევოლუციის დროს.

BCL2-ის ექსპრესიამ აჩვენა ჰეტეროგენული განაწილება კვლევის ჯგუფებსა და მოლეკულურ ქვეტიპებს შორის. ტრადიციულად, BCL2 განიხილება, როგორც ანტიაპოპტოზური ცილა, რომელიც დაკავშირებულია უჯრედების გადარჩენის გაძლიერებასთან. თუმცა, სარძევე ჯირკვლის კარცინომაში, BCL2-ის დადებითობა პარადოქსულად ასოცირდება რამდენიმე კვლევაში დაბალი ხარისხის ლუმინალურ სიმსივნეებთან და შედარებით ხელსაყრელ პროგნოზთან, რაც, სავარაუდოდ, ასახავს მის მჭიდრო კავშირს ჰორმონული რეცეპტორების სიგნალის გადაცემის გზებთან. ამჟამინდელ კოჰორტაში, ინვაზიურმა კარცინომებმა აჩვენეს BCL2-ის უფრო მაღალი საერთო ექსპრესია კეთილთვისებიან და პრეინვაზიურ დაზიანებებთან შედარებით; თუმცა, ექსპრესიის ნიმუშები ძალიან ჰეტეროგენულია. გარდა ამისა, BCL2-ის ექსპრესიამ არ აჩვენა სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი კავშირი რეციდივის სტატუსთან. ეს მონაცემები მიუთითებს, რომ მხოლოდ ანტიაპოპტოზური სიგნალიზაცია შესაძლოა ადეკვატურად არ ასახავდეს აგრესიულ ბიოლოგიურ ქცევას პროლიფერაციული და მიკროგარემოს პარამეტრების ინტეგრაციის გარეშე.[17,18]

მოლეკულური ქვეტიპის ანალიზმა აჩვენა აშკარა ბიოლოგიური ჰეტეროგენულობა ინვაზიურ კარცინომებს შორის. სამმაგად უარყოფითმა სიმსივნეებმა აჩვენეს ყველაზე მაღალი პროლიფერაციული აქტივობა და სიმსივნის ყველაზე ძლიერი „ბადების“ მაჩვენებელი, რაც ადასტურებს ამ ქვეტიპის აღიარებულ აგრესიულ კლინიკურ ქცევას. ლუმინალურმა სიმსივნეებმა აჩვენეს შედარებით დაბალი პროლიფერაციული ინდექსები და შემცირებული „ბადების“ აქტივობა, რაც შეესაბამება მათ ზოგადად უფრო

დიფერენცირებულ ფენოტიპს. ეს დაკვირვებები თანხვედრაშია წინა მოლეკულურ და იმუნოჰისტოქიმიურ კვლევებთან, რომლებიც ავლენენ სიმსივნის ქვეტიპზე დამოკიდებულ განსხვავებებს პროლიფერაციულ სიგნალის გადაცემაში, სტრომის რემოდელირებასა და იმუნური ურთიერთქმედებებში.[19,20]

საერთო ჯამში, ამჟამინდელი მონაცემები მიუთითებს, რომ სარძევე ჯირკვლის კარცინომის პროგრესირებას თან ახლავს პროლიფერაციული სიგნალის გადაცემის, აპოპტოზური რეგულირების, ინვაზიური მორფოლოგიური რემოდელირებისა და ადგილობრივი იმუნური პასუხის კოორდინირებული ცვლილებები.

დასკვნა

ჩვენი კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ ძუძუს კარცინომის პროგრესირებას თან ახლავს პროლიფერაციული აქტივობის, აპოპტოზური მარკერების ექსპრესიის, ინვაზიური მორფოლოგიური რემოდელირებისა და სტრომული იმუნური პასუხის მნიშვნელოვანი ცვლილებები. Ki67 ექსპრესიამ აჩვენა პროგრესული ზრდა კეთილთვისებიანი და პრეინვაზიური დაზიანებებიდან ინვაზიურ კარცინომამდე და მჭიდრო კავშირში იყო აგრესიულ მოლეკულურ ქვეტიპთან, სიმსივნის გაზრდილ აქტივობასთან და რეციდივთან. სამმაგად უარყოფითმა სარძევე ჯირკვლის კარცინომებმა აჩვენეს ყველაზე მაღალი პროლიფერაციული ინდექსები და ყველაზე გამოხატული ინვაზიური „ბადების“ ნიმუშები, რაც ადასტურებს მათ აღიარებულ აგრესიულ ბიოლოგიურ ქცევას.

სიმსივნის კვირტის/„ბადების“ წარმოქმნამ აჩვენა ძლიერი დადებითი კორელაცია პროლიფერაციულ აქტივობასთან, რაც მიუთითებს უჯრედულ პროლიფერაციასა და ინვაზიურ რემოდელირებას შორის მჭიდრო ურთიერთქმედებაზე სარძევე ჯირკვლის კიბოს პროგრესირების დროს. ამის საპირისპიროდ, სტრომულმა სიმსივნეში ინფილტრირებულმა ლიმფოციტებმა აჩვენეს უკუპროპორციული კავშირი როგორც Ki67 ექსპრესიასთან, ასევე სიმსივნის „ბადების“ წარმოქმნასთან, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ გაძლიერებული ინვაზიური პოტენციალის მქონე სიმსივნეებმა შეიძლება ერთდროულად აჩვენონ ადგილობრივი იმუნური პასუხის მექანიზმების შემცირებული ეფექტურობა.

BCL2 ექსპრესიამ აჩვენა ჰეტეროგენული განაწილება კვლევის ჯგუფებსა და მოლეკულურ ქვეტიპებს შორის, რაც ასახავს აპოპტოზური რეგულაციის რთულ ბიოლოგიურ როლს სარძევე ჯირკვლის კარცინომაში. მიუხედავად იმისა, რომ BCL2-ის ექსპრესია მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდა დაზიანების კატეგორიებს შორის, მისი კავშირი რეციდივთან ნაკლებად გამოხატული იყო პროლიფერაციულ და ინვაზიურ მორფოლოგიურ პარამეტრებთან შედარებით.

საერთო ჯამში, ამ კვლევის შედეგები ადასტურებს პროლიფერაციული მარკერების, აპოპტოზური სიგნალის გადაცემის, სიმსივნის „ბადების“ წარმოქმნისა და იმუნური მიკროგარემოს რეაქციის ინტეგრირებული შეფასების მნიშვნელობას ძუძუს კარცინომაში. ამ პარამეტრების კომბინირებული შეფასებამ შეიძლება მოგვაწოდოს ღირებული დამატებითი ინფორმაცია სიმსივნის აგრესიულობისა და პროგრესირების პოტენციალის შესახებ და ხელი შეუწყოს ძუძუს ეპითელური სიმსივნეების ბიოლოგიური სტრატეგიკაციის გაუმჯობესებას.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Orrantia-Borunda E, Anchondo-Nuñez P, Acuña-Aguilar LE, Gómez-Valles FO, Ramírez-Valdespino CA. Subtypes of Breast Cancer. Breast Cancer 2022;31–42. <https://doi.org/10.36255/EXON-PUBLICATIONS-BREAST-CANCER-SUBTYPES> .
- [2] Orrantia-Borunda E, Anchondo-Nuñez P, Acuña-Aguilar LE, Gómez-Valles FO, Ramírez-Valdespino CA. Subtypes of Breast Cancer. Breast Cancer 2022;31–42. <https://doi.org/10.36255/EXON-PUBLICATIONS-BREAST-CANCER-SUBTYPES>.
- [3] Carey LA, Perou CM, Livasy CA, Dressler LG, Cowan D, Conway K, et al. Race, breast cancer subtypes, and survival in the Carolina Breast Cancer Study. J Am Med Assoc 2006; 295:2492–502. <https://doi.org/10.1001/JAMA.295.21.2492>.
- [4] Ahmad A. Breast Cancer Statistics: Recent Trends. Adv Exp Med Biol 2019; 1152:1–7. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20301-6_1.
- [5] Foulkes WD, Smith IE, Reis-Filho JS. Triple-Negative Breast Cancer. New England Journal of Medicine 2010; 363:1938–48. <https://doi.org/10.1056/NEJMRA1001389>.
- [6] Radha G, Raghavan SC. BCL2: A promising cancer therapeutic target. Biochim Biophys Acta Rev Cancer 2017; 1868:309–14. <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2017.06.004>.
- [7] Badr H, Carmack CL, Kashy DA, Cristofanilli M, Revenson TA. Dyadic Coping in Metastatic Breast Cancer. Health Psychology 2010; 29:169–80. <https://doi.org/10.1037/A0018165>.
- [8] Andreopoulou E, Schweber SJ, Sparano JA, Mcdaid HM. Therapies for triple negative breast cancer. Expert Opin Pharmacother 2015; 16:983–98. <https://doi.org/10.1517/14656566.2015.1032246>.
- [9] Kepuladze S, Kokhraidze I, Burkadze G. Comparative analysis of phenotypic features in the primary tumor, tumour buds and metastatic lymph nodes within Luminal A and Luminal B molecular subtypes of invasive ductal carcinoma of the breast. GEORGIAN SCIENTISTS 2022; 4:117–40. <https://doi.org/10.52340/g.s.2022.04.02.09>.

- [10] Gagliato D de M, Jardim DLF, Marchesi MSP, Hortobagyi GN. Mechanisms of resistance and sensitivity to anti-HER2 therapies in HER2+ breast cancer. *Oncotarget* 2016; 7:64431–46. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.7043>.
- [11] L Mao WSSXLYRDAR. Melatonin represses metastasis in HER2-positive human breast cancer cells by suppressing RSK2 expression. *Mol Cancer Res : MCR* 2016; 14:1159–69.
- [12] Slamon DJ, Godolphin W, Jones LA, Holt JA, Wong SG, Keith DE, et al. Studies of the HER-2/neu proto-oncogene in human breast and ovarian cancer. *Science* (1979) 1989; 244:707–12. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.2470152>.
- [13] Ingold Heppner B, Loibl S, Denkert C. Tumor-Infiltrating Lymphocytes: A Promising Biomarker in Breast Cancer. *Breast Care* 2016; 11:96. <https://doi.org/10.1159/000444357>.
- [14] Salhia B, Trippel M, Pfaltz K, Cihoric N, Grogg A, Ladrach C, et al. High tumor budding stratifies breast cancer with metastatic properties. *Breast Cancer Res Treat* 2015; 150:363–71. <https://doi.org/10.1007/s10549-015-3333-3>.
- [15] Salhia B, Trippel M, Pfaltz K, Cihoric N, Grogg A, Ladrach C, et al. High tumor budding stratifies breast cancer with metastatic properties. *Breast Cancer Res Treat* 2015; 150:363–71. <https://doi.org/10.1007/S10549-015-3333-3>.
- [16] Yin L, Duan JJ, Bian XW, Yu SC. Triple-negative breast cancer molecular subtyping and treatment progress. *Breast Cancer Research* 2020; 22:1–13. <https://doi.org/10.1186/S13058-020-01296-5/TABLES/3>.
- [17] Goyal R, Gupta T, Bal A, Sahni D, Singh G. Role of Melatonin in Breast Carcinoma: Correlation of Expression Patterns of Melatonin-1 Receptor with Estrogen, Progesterone, and HER2 Receptors. *Applied Immunohistochemistry and Molecular Morphology* 2020; 28:518–23. <https://doi.org/10.1097/PAI.0000000000000788>.
- [18] Huang T, Bao H, Meng Y hua, Zhu J lin, Chu X dong, Chu X li, et al. Tumour budding is a novel marker in breast cancer: the clinical application and future prospects. *Ann Med* 2022; 54:1303. <https://doi.org/10.1080/07853890.2022.2070272>.
- [19] Huang T, Bao H, Meng Y hua, Zhu J lin, Chu X dong, Chu X li, et al. Tumour budding is a novel marker in breast cancer: the clinical application and future prospects. *Ann Med* 2022; 54:1303–12. <https://doi.org/10.1080/07853890.2022.2070272>.
- [20] Zhang H, Wang J, Yin Y, Meng Q, Lyu Y. The role of EMT-related lncRNA in the process of triple-negative breast cancer metastasis. *Biosci Rep* 2021; 41. <https://doi.org/10.1042/BSR20203121>.

Correlations between proliferative-apoptotic activity of breast epithelial tumours and precancerous conditions, tumour “Buds” and tumour-infiltrating lymphocytes: a retrospective immunohistochemical study

Ketevan Shengelaia¹; Irakli Kokhreidze²; Giorgi Burkadze³; Shota Kepuladze⁴

¹PhD student at Tbilisi State Medical University; Doctor; Gynaecologist; ²Associate Professor, Department of Oncology, Tbilisi State Medical University; ³Head of the Department of Molecular Pathology, TSMU; Professor; Doctor, Pathologist; ⁴Associate Professor, Department of Molecular Pathology, TSMU; Doctor, Pathologist;

Abstract

Breast carcinoma exhibits significant biological heterogeneity, characterised by marked differences in proliferative activity, apoptotic regulation, invasive potential, and immune microenvironment. Growing evidence suggests that the interplay among these factors significantly contributes to tumour progression and heterogeneous clinical behaviour. This study aimed to investigate the relationship between proliferative activity, expression of apoptotic markers, tumour “buds” and tumour-infiltrating lymphocytes (TIL) in epithelial breast tumours and pre-tumour states.

This retrospective study included benign, preinvasive, and invasive breast epithelial lesions diagnosed between 2018 and 2025. Histopathological evaluation was performed using hematoxylin and eosin-stained slides. Immunohistochemical analysis included Ki67 as a proliferative marker and BCL2 as an anti-apoptotic marker. Tumour “grids” were assessed at the invasive front, and stromal TILs were assessed according to established international recommendations. Statistical analysis was performed using nonparametric methods for comparison and correlation. A total of 54 cases were included in the study, including benign/hyperplastic lesions, preinvasive lesions, and invasive breast carcinoma. Ki67 expression showed a progressive increase across the neoplastic spectrum, with the highest proliferative activity observed in invasive carcinomas and especially in triple-negative tumours ($p < 0.001$). Tumour “seeding” activity showed a strong positive correlation with Ki67 expression ($\rho = 0.949$, $p < 0.001$), indicating a close relationship between proliferative activation and invasive remodelling. Stromal TIL density showed an inverse correlation with both Ki67 expression and tumour “budding” activity, indicating a relative suppression of the local immune response in highly aggressive tumours. BCL2 expression differed significantly between lesion groups ($p < 0.001$), although its association with recurrence was not statistically significant.

Breast cancer progression is associated with coordinated changes in proliferative signalling, apoptotic regulation, invasive morphological remodelling, and stromal immune response. High Ki67 expression and tumour growth appear to be interrelated indicators of aggressive tumour behaviour, while decreased stromal TIL density may reflect progressive immune escape during

tumour evolution. Integrated assessment of proliferative, apoptotic, and microenvironmental parameters may provide valuable additional information for the biological stratification of breast carcinoma.

Keywords: Breast cancer; Ki67; BCL2; tumor infiltrating lymphocytes; proliferative activity; apoptosis; immunohistochemistry; tumor microenvironment; Tumour Buds;

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ქეთევან შენგელაია - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი; გინეკოლოგი;

Ketevan Shengelaia - PhD student at Tbilisi State Medical University; Doctor; Surgeon; Gynaecologist; +995557587000

ირაკლი კობხრიძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მეანობა-გინეკოლოგიის კათედრის პროფესორი;

Irakli Kokhreidze - Professor of the Department of Oncology, Tbilisi State Medical University;

i.kokhreidze@gmail.com

გიორგი ბურკაძე - თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი;

Giorgi Burkadze - Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Professor;

<https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

burkadze@yahoo.com

შოთა კეპულაძე - თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Doctor of Pathology;

Shota.kepuladze@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

Hepatocellular Carcinoma in Chronic Hepatitis B: The Role of Ultrasound in Surveillance

Lela Inaishvili^{1,2}, Nikoloz Pruidze¹, Lali Sharvadze¹, Elene Gotsiridze^{2,3}, Giorgi Silagadze³, Sopio Giuashvili³, Mariam Chakhnashvili³, Elene Tsirdava³, Tamriko Bulia¹

¹School of Health Sciences, the University of Georgia, 77a Kostava Str., 0171 Tbilisi, Georgia

²Faculty of Medicine, Tbilisi State Medical University, 33 Vazha Pshavela Ave, Tbilisi, Georgia

³Mrcheveli Medical Center Limbach Group, 9 Kazbegi Avenue, 0160 Tbilisi, Georgia

Abstract

Hepatitis B virus (HBV) infection remains one of the leading causes of hepatocellular carcinoma (HCC) worldwide and continues to represent a major global public health burden. Although HCC most commonly develops in cirrhotic liver, chronic hepatitis B (CHB) possesses direct oncogenic potential and may result in HCC development even in non-cirrhotic patients. Early detection through surveillance is essential for improving prognosis and enabling potentially curative treatment.

Ultrasound remains the primary imaging modality for HCC surveillance because of its accessibility, safety, repeatability, and cost-effectiveness. However, surveillance performance is strongly influenced by operator expertise, liver parenchymal characteristics, obesity, and visualization quality. Recent developments including the Liver Imaging Reporting and Data System (LI-RADS) US Surveillance algorithm, visualization scoring systems, transient elastography, and contrast-enhanced ultrasound (CEUS) have expanded the role of ultrasound in surveillance and lesion characterization. In addition, emerging technologies such as artificial intelligence-assisted imaging analysis and radiomics may improve early tumor detection and individualized risk stratification in the future.

This review summarizes current evidence regarding CHB-related HCC epidemiology, surveillance strategies, ultrasound-based imaging approaches, LI-RADS US Surveillance, CEUS applications, and future perspectives in personalized HCC surveillance.

Keywords: Hepatitis B virus infection; Chronic hepatitis B; hepatocellular carcinoma; ultrasound; HCC surveillance; LI-RADS; contrast-enhanced ultrasound; transient elastography; liver fibrosis; CEUS; artificial intelligence

Introduction

Hepatocellular carcinoma (HCC) is the most common primary liver malignancy and remains a major cause of cancer-related mortality worldwide. Hepatitis B virus (HBV) infection is one of the leading etiological factors for HCC, particularly in regions with intermediate or high HBV endemicity. Unlike many other chronic liver diseases, HBV-related hepatocarcinogenesis may occur not only in cirrhotic patients but also in selected non-cirrhotic individuals because of the direct oncogenic potential of HBV. Therefore, surveillance remains essential for early tumor detection and reduction of HCC-related mortality. Ultrasound is widely recommended as the primary surveillance modality because it is non-invasive, accessible, repeatable, and cost-effective; however, its diagnostic performance depends on visualization quality, liver parenchymal characteristics, patient-related factors, and operator expertise. Recent advances in LI-RADS US Surveillance, visualization scoring, and contrast-enhanced ultrasound (CEUS) have further refined the role of ultrasound-based imaging in HCC surveillance among patients with chronic hepatitis B (EASL, 2025; Singal et al., 2023; Rodgers et al., 2024; Park et al., 2024).

Epidemiology and Global Burden of HBV-Related HCC

Chronic hepatitis B (CHB), resulting from infection with the HBV, continues to represent a significant global public health burden. According to the world health organization (WHO) Global Hepatitis Report 2026, an estimated 240 million people were living with chronic HBV infection worldwide in 2024, corresponding to 2.9% of the global population, with approximately 0.9 million new infections and 1.1 million HBV-related deaths annually, primarily due to cirrhosis and hepatocellular carcinoma (WHO, 2026).

HCC represents approximately 90% of primary liver cancers and remains a major global health problem, ranking as the sixth leading cancer and the third leading cause of cancer-related mortality worldwide. Although most HCCs arise in cirrhotic liver, chronic hepatitis B represents a distinct etiological context because HCC may also develop in non-cirrhotic patients. According to the EASL 2025 Clinical Practice Guidelines, HCC surveillance does not aim to reduce cancer incidence, but rather to reduce HCC-related mortality through repeated screening and detection at an earlier, potentially treatable stage (Easl, 2025).

HBV-related hepatocellular carcinoma in non-cirrhotic liver

Although HCC most frequently develops in the setting of cirrhosis, an important subset of cases occurs in patients without cirrhosis. Aryan et al. reported that approximately 10–20% of HCC cases are diagnosed in non-cirrhotic liver, highlighting the clinical significance of non-cirrhotic hepatocarcinogenesis. Non-cirrhotic HCC is often diagnosed at a more advanced stage compared with cirrhotic HCC because patients usually retain preserved liver function, remain asymptomatic for longer periods, and are less frequently enrolled in surveillance programs. As a

result, up to 25% of non-cirrhotic HCC cases may already demonstrate metastatic disease at diagnosis.

Among viral etiologies, HBV represents the leading cause of hepatotropic viral-related non-cirrhotic HCC. Unlike many other chronic liver diseases, HBV possesses direct oncogenic potential independent of advanced fibrosis or cirrhosis. HBV is a double-stranded DNA virus belonging to the Hepadnaviridae family that incorporates its DNA into the host hepatocyte genome following infection. According to Aryan et al., this integration process contributes to chromosomal instability, insertional mutagenesis, and production of mutant HBV proteins, ultimately resulting in decreased apoptosis and increased hepatocyte transformation and proliferation. These molecular mechanisms may explain why approximately 30% of HBV-related HCC cases occur in patients without cirrhosis.

The review also emphasizes that high HBV viral load and certain HBV genotypes or mutations, including the T1762/A1764 mutation, are associated with increased risk of HCC development in non-cirrhotic patients. Consequently, surveillance remains clinically important even in selected non-cirrhotic individuals with chronic HBV infection. The authors note that current surveillance strategies in high-risk non-cirrhotic HBV patients include abdominal ultrasound with or without serum alpha-fetoprotein assessment every six months. High-risk groups include individuals with a family history of HCC, patients of African descent older than 20 years, Asian men older than 40 years, and Asian women older than 50 years.

From an imaging perspective, non-cirrhotic HCC presents a particular diagnostic challenge because the absence of advanced fibrosis and cirrhotic architectural distortion may delay clinical suspicion and surveillance enrollment. Therefore, awareness of HBV-related non-cirrhotic HCC is essential for radiologists and hepatologists involved in ultrasound-based surveillance and early tumor detection (Aryan et al., 2024).

HCC surveillance in chronic HBV infection

HCC surveillance represents a fundamental strategy for reducing HCC-related mortality through early detection at a potentially curable stage. According to the EASL Clinical Practice Guidelines on the management of hepatitis B virus infection, surveillance programmes are particularly important in patients with chronic HBV infection because the risk of HCC persists despite effective antiviral therapy and may remain elevated even after HBsAg loss in selected patients. Patients with cirrhosis constitute the highest-risk group and require continued surveillance irrespective of treatment status. In addition, selected non-cirrhotic individuals with chronic HBV infection and increased HCC risk should also undergo surveillance, including patients with family history of HCC, advanced fibrosis, high liver stiffness measurements, demographic risk factors, or metabolic comorbidities.

The EASL guidelines recommend abdominal ultrasound (US) every six months as the primary surveillance modality in at-risk populations, performed by experienced operators. US remains widely used because of its accessibility, safety, repeatability, relatively low cost, and absence of ionizing radiation. Reported diagnostic performance for surveillance US demonstrates sensitivity ranging from 58% to 89% and specificity exceeding 90%, although examination quality and diagnostic accuracy strongly depend on operator expertise and patient-related factors. The guidelines further emphasize that other imaging modalities, including contrast-enhanced CT or MRI, should be considered when ultrasound cannot provide reliable information, particularly in patients with obesity, severe steatosis, bowel gas interference, or limited acoustic windows. In addition to imaging, serum alpha-fetoprotein (AFP) may be combined with US to improve sensitivity for early-stage HCC detection compared with US alone.

Recent EASL recommendations also highlight the growing importance of individualized risk stratification using HCC prediction models such as PAGE-B and mPAGE-B, particularly in patients receiving long-term nucleos(t)ide analogue therapy. These approaches may improve identification of patients at highest risk and optimize surveillance strategies in chronic HBV infection (EASL, 2025).

In addition to the EASL recommendations, the American Association for the Study of Liver Diseases (AASLD) Practice Guidance also emphasizes the central role of surveillance in reducing HCC-related mortality through early tumor detection and timely curative treatment. According to the AASLD guidance, surveillance should be performed in populations at increased risk for HCC, including patients with cirrhosis and selected non-cirrhotic individuals with HBV CHB. The guideline highlights that HBV-related hepatocarcinogenesis may occur even in the absence of cirrhosis because of the direct oncogenic mechanisms of HBV, supporting continued surveillance in high-risk non-cirrhotic patients.

The AASLD recommends abdominal ultrasound with or without serum AFP measurement every six months as the standard surveillance strategy. Ultrasound remains the preferred first-line modality because of its accessibility, safety profile, repeatability, and relatively low cost. However, the guideline also acknowledges important limitations of ultrasound-based surveillance, particularly reduced sensitivity for early-stage HCC in patients with obesity, hepatic steatosis, nodular cirrhosis, or poor acoustic windows. The authors note that surveillance effectiveness may vary substantially according to visualization quality and operator expertise.

The guidance further emphasizes the importance of individualized risk assessment in CHB. Specific high-risk populations include patients with cirrhosis, Asian men older than 40 years, Asian women older than 50 years, individuals of African ancestry at younger age, and patients

with a family history of HCC. Importantly, the risk of HCC may persist despite effective antiviral therapy, indicating that viral suppression does not completely eliminate the need for surveillance.

In addition, the AASLD guidance discusses the growing role of risk-stratified surveillance strategies and acknowledges that alternative imaging modalities such as CT or MRI may be appropriate in selected patients with inadequate ultrasound visualization or persistently limited surveillance quality. The guideline also recognizes the emerging value of biomarkers, risk prediction models, and standardized imaging systems in improving surveillance performance and optimizing individualized HCC screening approaches (Singal et al., 2023).

Diagnostic Performance of Ultrasound Surveillance

US remains the cornerstone imaging modality for HCC surveillance in patients at risk because of its wide availability, safety, repeatability, and relatively low cost. However, its diagnostic performance varies considerably according to tumor stage, patient characteristics, and examination quality. Early detection is critically important because curative treatment options, including surgical resection, liver transplantation, and local ablative therapies, are most effective when HCC is diagnosed at an early stage.

One of the most influential analyses evaluating surveillance performance was the meta-analysis conducted by Katerina Tzartzeva and colleagues. This systematic review assessed the effectiveness of US with or without AFP for early HCC detection in patients with cirrhosis. The authors demonstrated that US alone showed acceptable sensitivity for detecting HCC overall; however, sensitivity for early-stage HCC was substantially lower. Importantly, the addition of AFP significantly improved early-stage detection compared with ultrasound alone. These findings support the growing concept that combined surveillance strategies may improve detection of potentially curable tumors, particularly in patients with suboptimal ultrasound visualization or elevated HCC risk.

The study further emphasized the considerable heterogeneity in surveillance performance across different clinical settings. Factors associated with lower sensitivity included obesity, advanced cirrhosis, hepatic steatosis, nodular liver morphology, and operator dependency. Small lesions and infiltrative tumors were particularly difficult to identify during routine surveillance examinations. Despite these limitations, US continues to represent the recommended first-line surveillance modality in major international guidelines because it remains the most practical and accessible imaging tool for repeated population-based screening.

More recent evidence has additionally highlighted that US sensitivity is strongly influenced by examination quality and visualization adequacy. In clinical practice, poor acoustic windows, rib shadowing, bowel gas, and heterogeneous cirrhotic parenchyma may substantially reduce lesion

conspicuity and increase false-negative examinations. Consequently, current surveillance strategies increasingly emphasize standardized reporting systems, quality assessment, and individualized imaging approaches to improve surveillance effectiveness (Tzartzeva et al., 2018; Singal et al., 2020).

LI-RADS US Surveillance and Visualization Score

The American College of Radiology developed the Liver Imaging Reporting and Data System (LI-RADS) US Surveillance algorithm to standardize US-based HCC surveillance in at-risk patients. Initially introduced in 2017 and subsequently updated as LI-RADS US Surveillance v2024, the system provides a structured framework for ultrasound acquisition, interpretation, reporting, and follow-up recommendations. The updated version incorporates both surveillance findings and examination quality assessment, reflecting the growing recognition that visualization adequacy significantly influences diagnostic performance.

The LI-RADS US Surveillance system includes two major components: the US category and the Visualization Score. The US category reflects surveillance findings and is classified as US-1 (negative), US-2 (subthreshold observation smaller than 10 mm), or US-3 (positive surveillance examination with suspicious observation ≥ 10 mm or vascular thrombus). In parallel, the Visualization Score evaluates the expected sensitivity of the US examination and is categorized as VIS-A, VIS-B, or VIS-C. VIS-A indicates minimal or no visualization limitations, VIS-B indicates moderate limitations that may obscure small lesions, and VIS-C reflects severe limitations with substantially reduced expected sensitivity for HCC detection.

Recent studies have demonstrated the important clinical value of visualization scoring. Rodgers and colleagues emphasized that poor visualization quality is associated with decreased HCC detection sensitivity and increased risk of false-negative surveillance examinations. Multiple factors contribute to limited visualization, including obesity, hepatic steatosis, advanced cirrhosis, bowel gas, rib shadowing, and difficult lesion location. Patients with metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease (MASLD), alcohol-related liver disease, or elevated body mass index are particularly prone to VIS-C examinations.

The clinical relevance of visualization quality was further investigated by Min Kyung Park and colleagues in patients with CHB. Their study demonstrated that poor visualization scores were associated with decreased surveillance effectiveness and higher rates of false-negative examinations. VIS-C examinations showed markedly lower sensitivity for HCC detection compared with VIS-A studies, supporting the concept that visualization scoring may help identify patients who require alternative imaging strategies.

An important contribution of LI-RADS US Surveillance v2024 is the increasing emphasis on quality optimization and structured acquisition protocols. The updated recommendations encourage standardized cine sweeps, comprehensive liver coverage, and technical optimization strategies to improve lesion detection. Furthermore, the visualization score provides clinically actionable information because repeated VIS-C examinations may justify surveillance with contrast-enhanced CT or MRI instead of ultrasound alone.

The growing implementation of LI-RADS surveillance protocols also improves communication between radiologists and hepatologists by providing standardized terminology and management recommendations. Structured reporting may reduce interobserver variability, improve longitudinal comparison of examinations, and facilitate individualized surveillance strategies in high-risk HBV populations (Rodgers et al., 2024; Park et al., 2024; American College of Radiology, 2024; Kamaya et al., 2024).

Limitations of Ultrasound Surveillance

Despite its central role in HCC surveillance, US possesses several important limitations that may reduce diagnostic performance, particularly for early-stage tumors. US is highly operator dependent, and examination quality may vary considerably according to operator experience, patient body habitus, liver morphology, and technical factors. Consequently, surveillance sensitivity remains inconsistent across different patient populations and clinical settings.

One of the major limitations of ultrasound surveillance is reduced sensitivity for early-stage HCC. Small lesions, infiltrative tumors, and isoechoic nodules may be difficult to distinguish from background cirrhotic parenchyma. Lesions located in anatomical blind spots, including the hepatic dome, caudate lobe, or subdiaphragmatic regions, are particularly challenging to visualize. Infiltrative HCC may additionally mimic heterogeneous cirrhotic liver tissue and therefore remain occult during surveillance examinations.

Visualization quality represents another major challenge. Obesity, hepatic steatosis, bowel gas, rib shadowing, and advanced parenchymal heterogeneity may significantly impair acoustic penetration and lesion conspicuity. Several studies have shown that severe visualization limitations are associated with markedly lower sensitivity and increased false-negative rates. In particular, patients with metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease and advanced cirrhosis frequently demonstrate suboptimal surveillance quality.

Another important limitation is interobserver variability. Since ultrasound interpretation depends heavily on operator expertise and scanning technique, differences in acquisition quality and lesion recognition may influence surveillance outcomes. This limitation highlights the

importance of dedicated training, standardized acquisition protocols, quality assurance programs, and structured reporting systems such as LI-RADS.

Furthermore, ultrasound does not provide the same comprehensive lesion characterization as multiphasic CT or MRI. Suspicious findings identified during surveillance typically require additional cross-sectional imaging for definitive diagnosis and staging. Current guidelines therefore recommend alternative imaging modalities in patients with repeatedly inadequate ultrasound examinations or persistently poor visualization scores.

Given these limitations, contemporary surveillance strategies increasingly focus on individualized and risk-adapted approaches. Patients with consistently inadequate ultrasound quality may benefit from MRI-based surveillance protocols or combined ultrasound and biomarker strategies to improve early tumor detection (Rodgers et al., 2024; Kang et al., 2023; Schoenberger et al., 2021).

Contrast-Enhanced Ultrasound in HCC Assessment

CEUS has emerged as an important adjunctive imaging modality in the assessment of focal liver lesions and hepatocellular carcinoma. Unlike conventional B-mode US, CEUS enables real-time evaluation of lesion vascularity following administration of intravascular microbubble contrast agents. This technique improves characterization of focal liver lesions by assessing dynamic arterial enhancement and venous washout patterns, which are essential imaging features of HCC.

The WFUMB and EFSUMB 2020 guidelines emphasize that CEUS provides several advantages in liver imaging, including absence of ionizing radiation, real-time dynamic assessment, high temporal resolution, and favorable safety profile. CEUS may be particularly useful in patients with contraindications to iodinated CT contrast agents or gadolinium-based MRI contrast media. Additionally, CEUS allows targeted evaluation of lesions detected during surveillance ultrasound and may improve diagnostic confidence in indeterminate observations.

Typical imaging features of HCC on CEUS include non-rim arterial phase hyperenhancement followed by mild and late washout. These enhancement characteristics form the basis of CEUS LI-RADS classification systems developed for standardized lesion characterization. CEUS LI-RADS aims to improve diagnostic consistency and facilitate communication between radiologists and hepatologists.

A large multicenter retrospective study by Elisabetta Terzi and colleagues demonstrated that CEUS LI-RADS LR-5 observations show very high specificity for HCC in cirrhotic patients. The authors reported excellent positive predictive value for LR-5 lesions, supporting the reliability of

CEUS for non-invasive HCC diagnosis in appropriately selected patients. These findings contributed significantly to the growing acceptance of CEUS in liver imaging algorithms.

Nevertheless, CEUS also has limitations. The method remains operator dependent, examination quality may be impaired in obese patients or deeply located lesions, and evaluation of the entire liver during arterial phase may be challenging. In addition, CEUS is generally used as a problem-solving or characterization tool rather than as a primary surveillance modality. Current guidelines therefore position CEUS as a complementary technique within multimodality liver imaging strategies rather than a replacement for conventional surveillance ultrasound.

Overall, CEUS represents a valuable imaging technique for characterization of focal liver lesions detected during surveillance and may improve diagnostic accuracy when integrated into standardized imaging algorithms and LI-RADS-based assessment systems (Dietrich et al., 2020; Terzi et al., 2018).

Risk Prediction Models in HBV-Related HCC Surveillance

Recent advances in hepatocellular carcinoma surveillance increasingly emphasize individualized and risk-stratified surveillance strategies in patients with CHB. Since HCC risk is heterogeneous among HBV-infected individuals, several prediction models have been developed to identify patients at highest risk and optimize surveillance allocation.

One of the most widely validated models is the PAGE-B score, developed by George Papatheodoridis and colleagues. The PAGE-B model incorporates platelet count, age, and sex to predict the risk of HCC development in Caucasian patients receiving long-term antiviral therapy. The study demonstrated that PAGE-B effectively stratifies patients into low-, intermediate-, and high-risk categories for HCC development during five years of treatment. Importantly, the model highlighted that despite effective viral suppression, clinically significant HCC risk persists in selected patients, supporting the need for continued surveillance in high-risk groups (Papatheodoridis et al., 2016).

Subsequently, Kim and colleagues proposed the modified PAGE-B (mPAGE-B) score for Asian populations with CHB undergoing antiviral therapy. In addition to age, sex, and platelet count, the modified score incorporates serum albumin levels to improve predictive performance. The authors demonstrated that mPAGE-B showed good discrimination for HCC risk prediction and may improve identification of patients who require intensified surveillance strategies. These findings support the growing role of personalized surveillance algorithms based on demographic, laboratory, and fibrosis-related parameters rather than universal surveillance approaches alone (Kim et al., 2018).

In addition to clinical risk stratification, increasing attention has been directed toward integration of advanced ultrasound-based techniques into HCC surveillance pathways. Monitoring of liver fibrosis using transient elastography (TE) may further improve assessment of HCC risk in chronic HBV infection. Wong and colleagues demonstrated that longitudinal liver stiffness evaluation during antiviral therapy may provide important prognostic information regarding fibrosis progression and long-term clinical outcomes. Since advanced fibrosis and cirrhosis remain major risk factors for HCC development, elastography-based monitoring may contribute to future risk-adapted surveillance algorithms (Wong et al., 2022).

CEUS has also gained increasing importance as a complementary imaging modality in HCC assessment because it enables real-time evaluation of tumor vascularity without ionizing radiation. CEUS may improve characterization of indeterminate focal liver lesions detected during surveillance ultrasound and facilitate earlier HCC diagnosis in selected patients. Furthermore, implementation of CEUS LI-RADS algorithms has contributed to increasing standardization of CEUS interpretation and reporting. Wilson and colleagues emphasized the clinical role of CEUS LI-RADS and highlighted its practical implementation and complementary role alongside CT- and MRI-based LI-RADS systems in liver lesion assessment (Wilson et al., 2021).

Artificial Intelligence and Radiomics in HCC Imaging

Artificial intelligence (AI) and radiomics are emerging as promising technologies in the diagnosis, surveillance, and prognostication of HCC. These approaches aim to improve lesion detection, reduce operator dependency, and enhance risk stratification using quantitative imaging analysis and machine learning algorithms.

Bo and colleagues reviewed the expanding role of AI radiomics in HCC management, emphasizing its potential applications in lesion detection, treatment planning, prognosis prediction, and therapeutic response assessment. The authors describe radiomics as a technique that extracts large quantities of quantitative imaging features from radiological studies, allowing identification of imaging patterns that may not be visually appreciable to radiologists. AI-assisted radiomics models demonstrated promising results for differentiating benign and malignant liver lesions, predicting microvascular invasion, evaluating treatment response, and estimating patient prognosis. The review additionally highlights the growing integration of deep learning algorithms into multimodality liver imaging, including US, CT, and MRI-based HCC assessment (Bo et al., 2024).

Similarly, Heo and colleagues discussed the role of AI in prognostication of HCC. Their review emphasized that AI-based models may improve prediction of tumor recurrence, survival outcomes, and treatment response by integrating imaging findings with clinical and pathological

data. The authors also highlighted the potential of AI systems to support clinical decision-making and facilitate precision medicine approaches in HCC management. Importantly, the review notes that AI may contribute to future surveillance strategies by improving lesion detection sensitivity and reducing interobserver variability in imaging interpretation (Heo et al., 2024).

Further evidence supporting AI-assisted liver imaging was provided by Choi and colleagues, who developed and validated a deep learning system for staging liver fibrosis using contrast-enhanced CT imaging. Their study demonstrated that AI-based analysis could accurately assess fibrosis severity and potentially assist in risk stratification for chronic liver disease. Since fibrosis stage represents one of the strongest predictors of HCC development, AI-assisted fibrosis assessment may contribute to future risk-adapted surveillance algorithms in patients with CHB (Choi et al., 2020).

Conclusion

HCC remains one of the most serious complications of CHB infection and continues to represent a major global health burden. Although cirrhosis is the principal risk factor for HCC development, CHB infection possesses direct oncogenic potential and may lead to HCC even in non-cirrhotic patients. Consequently, effective surveillance strategies remain essential for early tumor detection and improved patient outcomes.

US continues to serve as the primary imaging modality for HCC surveillance because of its accessibility, safety, and cost-effectiveness. However, surveillance performance is strongly influenced by visualization quality, operator expertise, liver parenchymal characteristics, and patient-related factors. Recent advances including LI-RADS US Surveillance, visualization scoring systems, transient elastography, contrast-enhanced ultrasound, and artificial intelligence-assisted imaging analysis may improve surveillance standardization and diagnostic accuracy.

Future surveillance approaches will likely incorporate individualized risk stratification, advanced US techniques, and multimodality imaging strategies to optimize early HCC detection in patients with CHB. Continued development of standardized surveillance protocols and emerging imaging technologies may further contribute to reduction of HCC-related mortality worldwide.

Abbreviations

AFP - Alpha-fetoprotein

AI - Artificial intelligence

APHE - Arterial phase hyperenhancement

CEUS - Contrast-enhanced ultrasound

CHB - Chronic hepatitis B

CT - Computed tomography

DCEUS - Dynamic contrast-enhanced ultrasound

EASL - European Association for the Study of the Liver

HBV - Hepatitis B virus

HCC - Hepatocellular carcinoma

ICC - Intrahepatic cholangiocarcinoma

LI-RADS - Liver Imaging Reporting and Data System

MASLD - Metabolic dysfunction-associated steatotic liver disease

MRI - Magnetic resonance imaging

PAGE-B - Platelets, Age, Gender–Hepatitis B score

mPAGE-B - Modified PAGE-B score

TE - Transient elastography

UCA - Ultrasound contrast agent

US - Ultrasound

VIS - Visualization score

WFUMB - World Federation for Ultrasound in Medicine and

References

- American College of Radiology. (2024). *LI-RADS US Surveillance v2024 core*. American College of Radiology.
- Aryan, M., Ruli, T., & Shoreibah, M. (2024). *HCC in patients without cirrhosis: A review*. *Clinical Liver Disease*, 24(3), 516–521. <https://doi.org/10.1002/cld.1482>
- Bo, Z., Song, J., He, Q., Chen, B., Chen, Z., Xie, X., et al. (2024). Application of artificial intelligence radiomics in the diagnosis, treatment, and prognosis of hepatocellular carcinoma. *Computers in Biology and Medicine*, 173, 108337. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108337>
- Choi, K. J., Jang, J. K., Lee, S. S., Sung, Y. S., Shim, W. H., Kim, H. S., Yun, J., Choi, J. Y., & Lee, Y. J. (2020). Development and validation of a deep learning system for staging liver fibrosis by using contrast agent-enhanced CT images in the liver. *Radiology*, 289(3), 688–697. <https://doi.org/10.1148/radiol.2018180763>
- Chatzipanagiotou, O. P., Tsochatzis, E. A., & Meyer, T. (2024). Artificial intelligence in hepatocellular carcinoma diagnosis and management. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*. <https://doi.org/10.1111/jgh.16663>
- European Association for the Study of the Liver. (2025). *EASL Clinical Practice Guidelines on the management of hepatitis B virus infection*. *Journal of Hepatology*, 83(3), 502–583.
- Dietrich, C. F., Nolsøe, C. P., Barr, R. G., Berzigotti, A., Burns, P. N., Cantisani, V., Chammas, M. C., Chaubal, N., Choi, B. I., Clevert, D. A., Cosgrove, D., Cui, X. W., D'Onofrio, M., Dong, Y., Fenchel, M., Fowlkes, J. B., Gilja, O. H., Hocke, M., Ignee, A., ... Zheng, R. (2020). Guidelines and good clinical practice recommendations for contrast-enhanced ultrasound (CEUS) in the liver – Update 2020 WFUMB in cooperation with EFSUMB, AFSUMB, AIUM, and FLAUS. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 46(10), 2579–2604. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.04.030>
- Dietrich, C. F., Nolsøe, C. P., Barr, R. G., Berzigotti, A., Burns, P. N., Cantisani, V., Chammas, M. C., Chaubal, N., Choi, B. I., Clevert, D. A., Cui, X., Dong, Y., D'Onofrio, M., Fowlkes, J. B., Gilja, O. H., Huang, P., Ignee, A., Jenssen, C., Kono, Y., Kudo, M., ... Zheng, R. (2020). Guidelines and Good Clinical Practice Recommendations for Contrast-Enhanced Ultrasound (CEUS) in the Liver-Update 2020 WFUMB in Cooperation with EFSUMB, AFSUMB, AIUM, and FLAUS. *Ultrasound in medicine & biology*, 46(10), 2579–2604. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2020.04.030>
- Heo, S., Park, H. J., & Lee, S. S. (2024). Prognostication of hepatocellular carcinoma using artificial intelligence. *Korean Journal of Radiology*, 25(6), 550–565. <https://doi.org/10.3348/kjr.2024.0070>
- Kamaya, A., et al. (2024). LI-RADS US Surveillance version 2024 for hepatocellular carcinoma surveillance. *Radiology*. <https://doi.org/10.1148/radiol.240169> Kang, J. H., et al. (2023).

- Ultrasound LI-RADS visualization scores on surveillance ultrasound for hepatocellular carcinoma: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Ultrasound*.
- Kim, J. H., Kim, Y. D., Lee, M., Jun, B. G., Kim, T. S., Suk, K. T., Kang, S. H., Kim, M. Y., Cheon, G. J., Kim, D. J., & Baik, S. K. (2018). Modified PAGE-B score predicts the risk of hepatocellular carcinoma in Asians with chronic hepatitis B on antiviral therapy. *Journal of Hepatology*, 69(5), 1066–1073. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2018.07.018>
- Papatheodoridis, G., Dalekos, G., Sypsa, V., Yurdaydin, C., Buti, M., Goulis, J., Calleja, J. L., Chi, H., Manolakopoulos, S., Mangia, G., Gatselis, N., Keskin, O., Savvidou, S., de la Revilla, J., Hansen, B. E., Janssen, H. L., & Lampertico, P. (2016). PAGE-B predicts the risk of developing hepatocellular carcinoma in Caucasians with chronic hepatitis B on 5-year antiviral therapy. *Journal of Hepatology*, 64(4), 800–806. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2015.11.035>
- Park, M. K., Lee, D. H., Hur, B. Y., Lee, H.-C., Lee, Y. B., Yu, S. J., Kim, Y. J., Yoon, J.-H., & Lee, J.-H. (2024). Effectiveness of US surveillance of hepatocellular carcinoma in chronic hepatitis B: US LI-RADS visualization score. *Radiology*, 312(1), e232846. <https://doi.org/10.1148/radiol.232846>
- Rodgers, S. K., Fetzer, D. T., Seow, J. H., McGillen, K., Burrowes, D. P., Fung, C., Udare, A. S., Wilson, S. R., & Kamaya, A. (2024). *Optimizing US for HCC surveillance*. *Abdominal Radiology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s00261-024-04627-8>
- Schoenberger, H., et al. (2021). Dynamic changes in ultrasound quality for hepatocellular carcinoma screening in patients with cirrhosis. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*.
- Singal, A. G., Lampertico, P., & Nahon, P. (2020). Epidemiology and surveillance for hepatocellular carcinoma: New trends. *Journal of Hepatology*, 72(2), 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2019.08.025>
- Singal, A. G., Llovet, J. M., Yarchoan, M., Mehta, N., Heimbach, J. K., Dawson, L. A., Jou, J. H., Kulik, L. M., Agopian, V. G., Marrero, J. A., Mendiratta-Lala, M., Brown, D. B., Rilling, W. S., Goyal, L., Wei, A. C., & Taddei, T. H. (2023). AASLD Practice Guidance on prevention, diagnosis, and treatment of hepatocellular carcinoma. *Hepatology*, 78(6), 1922–1965. <https://doi.org/10.1097/HEP.0000000000000466>
- Terzi, E., Iavarone, M., Pompili, M., Veronese, L., Cabibbo, G., Fraquelli, M., Riccardi, L., De Bonis, L., Sangiovanni, A., Leoni, S., Piscaglia, F., & Colombo, M. (2018). Contrast ultrasound LI-RADS LR-5 identifies hepatocellular carcinoma in cirrhosis in a multicenter retrospective study of 1006 nodules. *Journal of Hepatology*, 68(3), 485–492. <https://doi.org/10.1016/j.jhep.2017.10.011>
- Tzartzeva, K., Obi, J., Rich, N. E., Parikh, N. D., Marrero, J. A., Yopp, A., Waljee, A. K., Singal, A. G., & Beste, L. A. (2018). Surveillance imaging and alpha fetoprotein for early detection of

hepatocellular carcinoma in patients with cirrhosis: A meta-analysis. *Gastroenterology*, 154(6), 1706–1718.e1. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2018.01.064>

World Health Organization. (2026). *Global hepatitis report 2026*. World Health Organization.

Wong, G. L.-H., Chan, H. L.-Y., Tse, Y.-K., Chan, H.-Y., Tse, C.-H., Lo, A. O.-S., Wong, V. W.-S., & Yip, T. C.-F. (2022). On-treatment monitoring of liver fibrosis with transient elastography in chronic hepatitis B patients. *Hepatology*, 75(4), 1035–1047. <https://doi.org/10.1002/hep.32169>

სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაცია საინჟინრო კომპანიაში: პრაქტიკული მიდგომა

თინათინ აიწურაძე

დოქტორანტი საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

რეზიუმე

თანამედროვე საინჟინრო კომპანიებში სამუშაო პროცესის ინტენსივობა, მაღალი პასუხისმგებლობა და დროითი შეზღუდვები მნიშვნელოვან ფსიქოემოციურ დატვირთვას ქმნის თანამშრომლებისთვის. სტრესი წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ფაქტორს, რომელიც გავლენას ახდენს როგორც ინდივიდის პროდუქტიულობაზე ისე ორგანიზაციის საერთო ეფექტურობაზე. აღნიშნულ პირობებში განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაცია, რომელიც მიმართულია როგორც თანამშრომელთა კეთილდღეობის გაუმჯობესებაზე, ისე ორგანიზაციული შედეგების ზრდაზე.

სტატიაში განხილულია სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაციის მოდელი საინჟინრო კომპანიაში, რომელიც ეფუძნება პრაქტიკულ გამოცდილებას და ინტეგრირებულ მიდგომას. წარმოდგენილია სტრესის გამომწვევი ძირითადი ფაქტორები სამუშაო გარემოში, მათ შორის მაღალი სამუშაო დატვირთვა, პასუხისმგებლობის დონე, დროითი წნეხი და კომუნიკაციური ბარიერები. აღნიშნული პრობლემების იდენტიფიკაციის საფუძველზე შემუშავებულია სტრესის მართვის კომპლექსური მოდელი, რომელიც მოიცავს ფსიქოემოციური რეგულაციის ტექნიკებს, კრეატიულ მეთოდებსა და ჯგუფურ სამუშაო ფორმატებს.

განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა პროცესების სტრუქტურირებასა და ოპტიმიზაციას, რაც გულისხმობს სტრესის მართვის ინტერვენციების ინტეგრაციას სამუშაო პროცესში. მოდელი მოიცავს ეტაპობრივ მიდგომას, რომელიც აერთიანებს სტრესის შეფასებას, ინდივიდუალური და ჯგუფური ტექნიკების გამოყენებას, ასევე შედეგების მონიტორინგსა და შეფასებას. აღნიშნული მიდგომა უზრუნველყოფს პროცესების სტანდარტიზაციას და ადაპტირებადობას სხვადასხვა სამუშაო გარემოში. მიღებული შედეგების ანალიზი მიუთითებს, რომ სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაცია ხელს უწყობს თანამშრომელთა ემოციური მდგომარეობის გაუმჯობესებას, შფოთვის შემცირებასა და კონცენტრაციის ზრდას. ასევე ფიქსირდება კომუნიკაციის

ხარისხის გაუმჯობესება და გუნდური მუშაობის ეფექტურობის ზრდა. აღნიშნული ფაქტორები პირდაპირ აისახება ორგანიზაციის პროდუქტიულობასა და სამუშაო პროცესის ხარისხზე.

დასკვნის სახით, სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაცია წარმოადგენს მნიშვნელოვან ინსტრუმენტს საინჟინრო კომპანიებში ეფექტური მუშაობის უზრუნველსაყოფად. წარმოდგენილი მოდელი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც პრაქტიკული ინსტრუმენტი სხვადასხვა ორგანიზაციულ გარემოში, რაც ხელს შეუწყობს თანამშრომელთა ფსიქოლოგიური კეთილდღეობისა და ორგანიზაციული ეფექტურობის ზრდას.

საკვანძო სიტყვები: სტრესის მართვა, ბიზნესინჟინერია, პროცესების ოპტიმიზაცია, ორგანიზაციული ეფექტურობა, სამუშაო სტრესი, KPI.

შესავალი

თანამედროვე საინჟინრო კომპანიებში სამუშაო პროცესების ინტენსივობა, ტექნოლოგიური სირთულე და მაღალი პასუხისმგებლობა ქმნის გარემოს, სადაც თანამშრომლები მუდმივად განიცდიან ფსიქოემოციურ თუ ფიზიოლოგიურ დატვირთვას. გლობალური კონკურენცია და დროითი შეზღუდვები ზრდის სტრესის დონეს, რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს როგორც ინდივიდის პროდუქტიულობაზე, ასევე ორგანიზაციულ ეფექტურობაზე (Lazarus & Folkman, 1984; Ganster & Rosen, 2013)). სტრესი ასოცირდება კოგნიტური ფუნქციების დაქვეითებასთან, გადაწყვეტილებების მიღების პროცესის გაძნელებასთან და შეცდომების რისკის ზრდასთან, რაც განსაკუთრებით კრიტიკულია საინჟინრო გარემოში.

ბიზნესინჟინერიის პერსპექტივიდან, სტრესის მართვა განიხილება როგორც ორგანიზაციული პროცესების ეფექტურობის მნიშვნელოვანი კომპონენტი. სამუშაო პროცესების ოპტიმიზაცია მოითხოვს არა მხოლოდ ტექნოლოგიურ და ოპერაციულ გაუმჯობესებას, არამედ თანამშრომელთა ფსიქოლოგიური რესურსების მართვასაც (Davenport, 1993). შესაბამისად, სტრესის მართვის სისტემური ინტეგრაცია ორგანიზაციულ პროცესებში წარმოადგენს თანამედროვე მენეჯმენტის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან გამოწვევას.

კვლევები მიუთითებს, რომ სამუშაო გარემოში ქრონიკული სტრესი ამცირებს თანამშრომელთა პროდუქტიულობას, ზრდის გადაღლილობას (burnout) და უარყოფითად მოქმედებს ორგანიზაციულ ეფექტურობაზე (Maslach & Leiter, 2016) აღნიშნული ფაქტორები საჭიროებს ისეთი მიდგომების გამოყენებას, რომლებიც ხელს უწყობს როგორც ინდივიდუალურ, ისე ორგანიზაციულ დონეზე სტრესის ეფექტურ რეგულაციას.

თანამედროვე კვლევები ასევე ადასტურებს, რომ სამუშაო სტრესი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს თანამშრომელთა ჯანმრთელობასა და ორგანიზაციულ შედეგებზე. (Ganster & Rosen, 2013)

თუმცა პრაქტიკაში სტრესის მართვის მეთოდები ხშირად არ არის სისტემატურად ინტეგრირებული და წარმოდგენილია ფრაგმენტულად, რაც ამცირებს მათი გამოყენების ეფექტურობას. პროცესზე დაფუძნებული მიდგომების დანერგვა, რომელიც მოიცავს სტრესის შეფასებას, ინერვენციების დაგეგმვას და შედეგების მონიტორინგს, საშუალებას იძლევა მიღწეულ იქნას უფრო სტაბილური და გრძელვადიანი შედეგები (Hammer, 1990). ნინამდებარე ნაშრომის მიზანია სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაციის მოდელის განხილვა საინჟინრო კომპანიაში, პრაქტიკულ გამოცდილებაზე დაყრდნობით. ნაშრომში წარმოდგენილია სტრესის გამომწვევი ფაქტორების ანალიზი, პროცესების სტრუქტურირების მიდგომები და მათი გავლენა თანამშრომელთა პროდუქტიულობასა და ორგანიზაციულ ეფექტურობაზე.

ძირითადი ნაწილი

საინჟინრო კომპანიებში სამუშაო პროცესები ხასიათდება მაღალი სირთულით, მაღალფუნქციურობითა და დროითი შეზღუდვებით, რაც ზრდის თანამშრომელთა ფსიქოემოციურ დატვირთვას. ორგანიზაციული ფსიქოლოგიის მიხედვით, სამუშაო გარემოში სტრესი დაკავშირებულია როგორც სამუშაო მოთხოვნებთან, ისე რესურსების არასაკმარისობასთან, რაც გავლენას ახდენს თანამშრომელთა მოტივაციასა და ეფექტურობაზე (Maslach & Leiter, 2016; Ganster & Rosen, 2013). აღნიშნული ფაქტორები ქმნის საჭიროებას სტრესის მართვის სისტემური და პროცესზე დაფუძნებული მიდგომების დანერგვისთვის.

ბიზნესინჟინერიის პერსპექტივიდან, სტრესის მართვა უნდა განიხილებოდეს, როგორც ორგანიზაციული პროცესის ნაწილი, რომელიც ექვემდებარება ანალიზსა და ოპტიმიზაციას. პროცესების ოპტიმიზაცია გულისხმობს რესურსების ეფექტურ გამოყენებას (Davenport, 1993). ამ კონტექსტში, სტრესის მართვის პროცესების ინტეგრაცია სამუშაო სისტემაში წარმოადგენს ორგანიზაციული ეფექტურობის ზრდის მნიშვნელოვან ფაქტორს.

სტრესის მართვის პროცესის ოპტიმიზაციის მოდელი მოიცავს რამდენიმე ძირითად ეტაპს: სტრესის გამომწვევი ფაქტორების იდენტიფიკაცია, სტრესის დონის შეფასება, შესაბამისი ინტერვენციების დაგეგმვა და შედეგების მონიტორინგი. საწყის ეტაპზე ხორციელდება სამუშაო გარემოს ანალიზი, სადაც ყურადღება ექცევა ისეთ ფაქტორებს, როგორიცაა სამუშაო დატვირთვა, დროითი წნეხი, პასუხისმგებლობის დონე და კომუნიკაციის სირთულეები. აღნიშნული ფაქტორები ზრდის შეცდომების ალბათობას და ამცირებს თანამშრომელთა კონცენტრაციას.

შემდგომ ეტაპზე ხორციელდება სტრესის მართვის ინტერვენციების დანერგვა, რომელიც მოიცავს როგორც ინდივიდუალურ, ისე ჯგუფურ მიდგომებს. პრაქტიკაში

გამოიყენება ემოციური რეგულაციის ტექნიკები, მოკლე რელაქსაციის მეთოდები და კომუნიკაციის გაუმჯობესების ინსტრუმენტები, რაც ხელს უწყობს თანამშრომელთა ფსიქოლოგიური მდგომარეობის სტაბილიზაციას და სამუშაო პროცესში ჩართულობის ზრდას. აღნიშნული მიდგომები შეესაბამება თანამედროვე ორგანიზაციული მართვის პრინციპებს, რომლებიც ორიენტირებულია ადამიანური რესურსების ეფექტურ გამოყენებაზე.

პროცესის ოპტიმიზაციის მნიშვნელოვანი კომპონენტია შედეგების შეფასება ძირითადი შესრულების მაჩვენებლების (KPI) აღნიშნული მაჩვენებლები მოიცავს თანამშრომელთა სტრესის დონის შემცირებას, სამუშაო პროცესში ჩართულობის ზრდას, კომუნიკაციის ხარისხის გაუმჯობესებასა და შეცდომების რაოდენობის შემცირებას. კვლევები მიუთითებს, რომ სამუშაო სტრესის შემცირება პირდაპირ კავშირშია თანამშრომელთა პროდუქტიულობის ზრდასა და ორგანიზაციული ეფექტურობის გაუმჯობესებასთან (Ganster & Rosen, 2013; Maslach & Leiter, 2016) ასევე, პროცესების სისტემური გაუმჯობესება ზრდის ორგანიზაციის საერთო შედეგებს (Davenport, 1993; Hammer, 1990).

ორგანიზაციული ფსიქოლოგიის ფარგლებში მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება ისეთ ფაქტორებს, როგორიცაა საორგანიზაციო ქცევა, მოტივაცია, კომუნიკაცია და გუნდური მუშაობა. აღნიშნული ელემენტები განსაზღვრავს თანამშრომელთა ჩართულობის დონეს და სამუშაო გარემოს სტაბილურობას. ინდუსტრიული და ორგანიზაციული ფსიქოლოგიის მიხედვით, აღნიშნული ფაქტორების გაუმჯობესება ხელს უწყობს სტრესის შემცირებას და ორგანიზაციული ეფექტურობის ზრდას (ჩარკვიანი. . . .) შესაბამისად, სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაცია უნდა მოიცავდეს არა მხოლოდ ტექნიკურ, არამედ ფსიქოლოგიურ კომპონენტებსაც.

ასევე მნიშვნელოვანია ორგანიზაციული კულტურის როლი სტრესის მართვის პროცესებში. მხარდამჭერი გარემო, ეფექტური კომუნიკაცია და მკაფიო როლების განაწილება ამცირებს გაურკვევლობას და ზრდის თანამშრომელთა ფსიქოლოგიურ უსაფრთხოებას. აღნიშნული ფაქტორები პირდაპირ აისახება გუნდური მუშაობის ხარისხზე და ორგანიზაციის საერთო შედეგებზე.

კვლევა ეფუძნება კონკრეტულ საინჟინრო კომპანიაში ჩატარებულ პრაქტიკულ დაკვირვებასა და შიდა შეფასების მონაცემებს, რომლის ფარგლებში დაფიქსირდა, რომ სტრესის მართვის პროცესების დანერგვამ გამოიწვია თანამშრომელთა სტრესის დონის შემცირება საშუალოდ 20-25%-ით, სამუშაო პროცესში ჩართულობის ზრდა დაახლოებით 15% -ით და შეცდომების რაოდენობის შემცირება 10-12% -ით. აღნიშნული შედეგები მიუთითებს სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაციის დადებით გავლენაზე როგორც ინდივიდუალურ, ისე ორგანიზაციულ ეფექტურობაზე.

შედეგად, სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაცია წარმოადგენს ინტეგრირებულ მიდგომას, რომელიც აერთიანებს ბიზნესინჟინერიისა და ორგანიზაციული ფსიქოლოგიის პრინციპებს. აღნიშნული მოდელი უზრუნველყოფს როგორც

თანამშრომელთა კეთილდღეობის გაუმჯობესებას, ასევე ორგანიზაციული ეფექტურობის ზრდას, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია თანამედროვე საინჟინრო კომპანიებში.

დასკვნა

ნაშრომში წარმოდგენილი მოდელი აერთიანებს ბიზნესინჟინერიისა და ორგანიზაციული ფსიქოლოგიის პრინციპებს და უზრუნველყოფს სტრესის მართვის პროცესების სისტემურ ინტეგრაციას ორგანიზაციულ გარემოში. აღნიშნული მიდგომა სტრესს განიხილავს როგორც მართვად პროცესს, რომელიც ექვემდებარება ანალიზსა და ოპტიმიზაციას.

კვლევის შედეგები მიუთითებს, რომ სტრესის მართვის პროცესების დანერგვა დადებითად აისახება თანამშრომელთა ემოციურ მდგომარეობაზე, ზრდის პროდუქტიულობას და აუმჯობესებს კომუნიკაციის ხარისხს. KPI -ზე დაფუძნებული შეფასება უზრუნველყოფს პროცესების გაზომვადობას და მართვადობას, რაც ზრდის ორგანიზაციულ ეფექტურობას.

ასევე დადასტურდა, რომ ორგანიზაციული კულტურა და გუნდური ურთიერთობები მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სტრესის რეგულაციაში, რაც ხაზს უსვამს ინტეგრირებული მიდგომის აუცილებლობას.

დასკვნის სახით შეიძლება ითქვას, რომ სტრესის მართვის პროცესების ოპტიმიზაცია წარმოადგენს პრაქტიკულად გამოყენებად და ადაპტირებად ინსტრუმენტს, რომელიც ხელს უწყობს როგორც თანამშრომელთა კეთილდღეობას, ისე ორგანიზაციული ეფექტურობისა და კონკურენტუნარიანობის ზრდას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Lazarus, R. S. , & Folkman, S. (1984). Stress, appraisal, and coping. Springer.
2. Davenport, T. H. (1993). Process innovation: Reengineering work through information technology. Harvard Business School Press.
3. Hammer, M. (1990). Reengineering work: Don't automate, obliterate. Harvard Business Review, 68(4), 104–112.
4. Maslach, C. , & Leiter, M. P. (2016). Burnout. Wiley.
5. Ganster, D. C. , & Rosen, C. C. (2013). Work stress and employee health: A multidisciplinary review. Journal of Management, 39(5), 1085–1122.
6. Davenport, T. H. (1993). Process innovation: Reengineering work through information technology. Harvard Business School Press.
7. Hammer, M. (1990). Reengineering work: Don't automate, obliterate. Harvard Business Review, 68(4), 104–112.
8. ჩარკვიანი, დ. 2001 ფსიქოლოგია ინდუსტრიულ ორგანიზაციებში

Optimization of Stress Management Processes in an Engineering Company: A Practical Approach

Tinatin Aitsuradze

Doctoral Candidate GTU

Summary

The optimization of stress management processes in engineering companies represents an important direction for improving both employee well-being and organizational performance. In modern work environments, high levels of responsibility, time pressure, and complex operational tasks significantly increase emotional stress, which negatively affects productivity, decision-making, and communication within teams. As a result, there is a growing need for systematic approaches that integrate stress management into organizational processes.

This study examines a process-oriented model of stress management based on the principles of business engineering and organizational psychology. The model emphasizes the structured integration of stress management into daily workflows, including the identification of stress factors, the implementation of targeted interventions, and the continuous monitoring of outcomes through key performance indicators (KPIs). Such an approach allows stress to be managed as an organizational variable rather than solely an individual concern.

The research is based on practical observations and internal evaluation data from an engineering company. The findings indicate that the implementation of structured stress management processes led to a noticeable reduction in employees' stress levels, increased engagement, and a decrease in operational errors. Furthermore, improvements were observed in communication quality, teamwork, and overall coordination of work processes, which contributed to enhanced organizational stability.

The results highlight that stress should be considered a manageable and measurable organizational process. The application of KPI-based evaluation enables organizations to assess the effectiveness of interventions and make data-driven adjustments. This contributes to the development of a more adaptive and resilient work environment.

In addition, the study underscores the importance of organizational culture, leadership support, and communication practices in maintaining a sustainable stress management system. These elements play a critical role in ensuring long-term effectiveness and employee involvement.

In conclusion, the proposed model represents a practical and adaptable framework that can be applied across various organizational contexts. Its implementation supports both employee well-being and the improvement of organizational efficiency, making it a valuable tool for modern engineering companies operating in competitive environments.

Keywords: Stress management, business engineering, process optimization, organizational efficiency, work stress, KPI.

სინოვიური გარსის უჯრედულ-მოლეკულური პროფილი, სისხლძარღვთა ცვლილებები რევმატოიდული ართრიტის დროს, დაავადების პროგრესიისა და ინდივიდუალური მკურნალობის შესაძლო მარკერები (კრიტიკული მიმოხილვა)

ეკატერინე მაგალობლიშვილი¹; ელენე ქართველიშვილი²; ნინო თევზაძე³; შოთა კეპულაძე⁴; გიორგი ბურკაძე⁵

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ემერიტუს პროფესორი; ³თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის პათოლოგანატომი; ექიმი; ⁴თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის ექიმი პათოლოგანატომი; მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ⁵თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

აბსტრაქტი

რევმატოიდული ართრიტი წარმოადგენს ქრონიკულ, პროგრესირებად აუტოიმუნურ დაავადებას, რომლის დროსაც ძირითადი პათოლოგიური ცვლილებები ვითარდება სინოვიურ გარსში. დაავადების პათოგენეზში ცენტრალური ადგილი უკავია იმუნური სისტემის დისრეგულაციას, ქრონიკულ სინოვიტს, სინოვიური მიკროგარემოს რემოდელირებასა და სისხლძარღვოვან ცვლილებებს. თანამედროვე კვლევებმა აჩვენა, რომ რევმატოიდული სინოვიუმი წარმოადგენს ჰეტეროგენულ ქსოვილს, სადაც აქტიურად ურთიერთქმედებენ ფიბრობლასტების მსგავსი სინოვიოციტები, მაკროფაგები, T და B ლიმფოციტები, ენდოთელური უჯრედები და სხვადასხვა ციტოკინური თუ ქემოკინური კავშირები. აღნიშნული პროცესები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს დაავადების პროგრესირებაზე, სახსრის დესტრუქციასა და მკურნალობისადმი ინდივიდუალურ პასუხზე.

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება სინოვიური გარსის ჰისტოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური პროფილის შეფასებას. CD64, CD68, CD163, VEGF, CXCL13, ICAM-1 და სხვა მარკერები ასახავენ ანთებითი პროცესის ინტენსივობას, მაკროფაგული აქტივაციის ხარისხს, ანგიოგენეზს და ქსოვილოვანი რემოდელირების თავისებურებებს.

სინოვიუმის ჰისტოლოგიური ჰეტეროგენულობა, მათ შორის ლიმფოციდური, მიელოციდური და ფიბროციდული ტიპები, შესაძლოა გამოყენებულ იქნეს დაავადების ბიოლოგიური ფენოტიპების განსაზღვრისა და მიზანმიმართული თერაპიის შერჩევისათვის.

სინოვიური ბიოფსიის, ციფრული პათოლოგიისა და თანამედროვე მოლეკულური მეთოდების განვითარებამ მნიშვნელოვნად გააფართოვა პერსონალიზებული რევმატოლოგიის შესაძლებლობები. სინოვიური ქსოვილის უჯრედულ-მოლეკულური პროფილისა და სისხლძარღვოვანი ცვლილებების დეტალური შეფასება შესაძლოა გახდეს დაავადების პროგრესიის, თერაპიული პასუხისა და ინდივიდუალური მკურნალობის სტრატეგიის პროგნოზირების მნიშვნელოვანი საფუძველი.

საკვანძო სიტყვები:

რევმატოიდული ართრიტი; სინოვიუმი; სინოვიტი; ანგიოგენეზი; CD64; CD68; CD163; მაკროფაგები; ფიბრობლასტების მსგავსი სინოვიოციტები; ბიომარკერები; იმუნოჰისტოქიმია; პერსონალიზებული თერაპია.

რევმატოიდული ართრიტი წარმოადგენს ქრონიკულ, სისტემურ, აუტოიმუნურ დაავადებას, რომელიც ხასიათდება პროგრესირებადი სინოვიური ანთებით, სახსრის სტრუქტურული დაზიანებითა და ფუნქციური უნარის თანდათანობითი დაკარგვით. დაავადება განსაკუთრებით მნიშვნელოვან სამედიცინო და სოციალურ პრობლემას წარმოადგენს მისი ფართო გავრცელების, ქრონიკული მიმდინარეობისა და ინვალიდიზაციის მაღალი რისკის გამო. რევმატოიდული ართრიტის დროს პათოლოგიური პროცესის მთავარი სამიზნე არის სინოვიური გარსი, სადაც ვითარდება კომპლექსური უჯრედულ-მოლეკულური ცვლილებები, რომლებიც საბოლოოდ განაპირობებს ხრტილისა და ძვლის დესტრუქციას.[1]

ბოლო ათწლეულებში მნიშვნელოვნად შეიცვალა წარმოდგენები რევმატოიდული ართრიტის პათოგენეზის შესახებ. თუ ადრე დაავადება მხოლოდ ქრონიკულ ანთებით პროცესად განიხილებოდა, თანამედროვე კვლევებმა აჩვენა, რომ სინოვიური მიკროგარემო წარმოადგენს დინამიურ და ჰეტეროგენულ ქსოვილურ სისტემას, სადაც ურთიერთქმედებენ იმუნური უჯრედები, სინოვიური ფიბრობლასტები, ენდოთელური უჯრედები, მაკროფაგები, ლიმფოციტები და სხვადასხვა ციტოკინური თუ ქემოკინური კავშირები. აღნიშნული პროცესები განსაზღვრავს როგორც დაავადების პროგრესირების სისწრაფეს, ასევე ინდივიდუალური თერაპიული პასუხის თავისებურებებს.[2,3]

განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება სინოვიური გარსის ჰისტოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური პროფილის შესწავლას. თანამედროვე ტექნოლოგიებმა, მათ შორის ცალკეული უჯრედის რნმ-სექვენირებამ, მრავალფეროვანმა იმუნოფენოტიპურმა

კვლევებმა და ციფრულმა პათოლოგიამ, შესაძლებელი გახადა სინოვიური ქსოვილის უჯრედული ჰეტეროგენობის უფრო სიღრმისეული შეფასება. დადგინდა, რომ სინოვიუმში სხვადასხვა ტიპის იმუნური და სტრომული უჯრედების რაოდენობრივი და ფუნქციური ცვლილებები პირდაპირ უკავშირდება დაავადების აქტივობას, პროგრესირებასა და მკურნალობის ეფექტურობას.[4]

რევმატოიდული ართრიტის დროს სინოვიური ანთების განვითარება მრავალსაფეხურიან პროცესს წარმოადგენს. დაავადების პრეკლინიკურ ფაზაში შესაძლებელია ციტრულინირებული ცილების საწინააღმდეგო ანტისხეულებისა და რევმატოიდული ფაქტორის არსებობა კლინიკური სიმპტომების გარეშე. მოგვიანებით ვითარდება სინოვიური მიკროვასკულატურის აქტივაცია, იზრდება სისხლძარღვთა განვლადობა და იმუნური უჯრედების მიგრაცია სინოვიუმში. შედეგად ყალიბდება ქრონიკული სინოვიტი, რომელსაც თან ახლავს ნეოანგიოგენეზი, სტრომული რემოდელირება და პანუსის ფორმირება.[5]

სინოვიური გარსის სისხლძარღვოვანი ცვლილებები თანამედროვე რევმატოლოგიის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან კვლევით მიმართულებად მიიჩნევა. ნეოვასკულარიზაცია არა მხოლოდ ანთებითი უჯრედების მიგრაციას უწყობს ხელს, არამედ უზრუნველყოფს ანთებითი მიკროგარემოს შენარჩუნებას. ანგიოგენეზის პროცესში მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება VEGF-ს, TNF- α -ს, IL-6-ს, IL-17-ს და სხვადასხვა ადჰეზიურ მოლეკულებს.[6,7] სინოვიური მიკროცირკულაციის ცვლილებები ასევე ასოცირდება დაავადების აქტივობასთან, ქსოვილოვანი ჰიპოქსიის განვითარებასთან და თერაპიისადმი რეზისტენტობის ფორმირებასთან.

რევმატოიდული ართრიტის მნიშვნელოვანი მახასიათებელია მისი ბიოლოგიური და ჰისტომორფოლოგიური ჰეტეროგენულობა. სხვადასხვა პაციენტში სინოვიური ქსოვილის სტრუქტურა, იმუნური ინფილტრატის ხასიათი და ციტოკინური პროფილი განსხვავებულია. სწორედ ამიტომ თანამედროვე კონცეფციები ორიენტირებულია ინდივიდუალური მკურნალობის მიდგომების განვითარებაზე, რაც ეფუძნება სინოვიური ქსოვილის მორფოლოგიურ და მოლეკულურ მახასიათებლებს.[8]

ამჟამად განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს ისეთი ბიომარკერები, როგორებიცაა CD68, CD163, CD64, CXCL13, ICAM-1, VEGF, Ki67, TNF- α , IL-6, IL-17 და სხვა. მათი ექსპრესიის შესწავლა შესაძლებელია გამოყენებულ იქნეს როგორც დაავადების პროგრესიის, ასევე მკურნალობისადმი პასუხის პროგნოზირებისათვის. სინოვიური ბიოფსიის განვითარებამ და იმუნოჰისტოქიმიური კვლევების ხელმისაწვდომობამ მნიშვნელოვანი პერსპექტივები შექმნა პერსონალიზებული მედიცინის მიმართულებით.[9]

წინამდებარე კრიტიკული მიმოხილვის მიზანია რევმატოიდული ართრიტის დროს სინოვიური გარსის უჯრედულ-მოლეკულური პროფილის, სისხლძარღვოვანი ცვლილებებისა და თანამედროვე ბიომარკერების შესახებ არსებული მონაცემების

სისტემატიზაცია, დაავადების პროგრესიის მექანიზმების შეფასება და ინდივიდუალური მკურნალობის შესაძლო პროგნოსტიკური მარკერების განხილვა.[10]

რევმატოიდული ართრიტის პათოგენეზი წარმოადგენს მრავალფაქტორულ და კომპლექსურ პროცესს, რომელშიც გენეტიკური, იმუნოლოგიური, გარემო და ქსოვილური ფაქტორები ერთმანეთთან მჭიდროდ ურთიერთქმედებენ. დაავადების განვითარება დაკავშირებულია იმუნური ტოლერანტობის დარღვევასთან, რაც საბოლოოდ იწვევს აუტოანტისხეულების ფორმირებასა და ქრონიკული ანთებითი პროცესის ჩამოყალიბებას.[11]

ერთ-ერთ მთავარ აუტოიმუნურ მექანიზმს წარმოადგენს **ციტრულინირებული ცილების მიმართ იმუნური პასუხი**. ციტრულინაცია არის პოსტრანსლაციური მოდიფიკაცია, რომლის დროსაც არგინინი გარდაიქმნება ციტრულინად. აღნიშნული ცვლილება ქმნის ახალ ანტიგენურ დეტერმინანტებს, რომელთა მიმართაც ვითარდება აუტოანტისხეულები - ACPA. აღნიშნული ანტისხეულები ხშირად ვლინდება დაავადების კლინიკურ გამოვლინებამდე რამდენიმე წლით ადრე.[4,12,13]

რევმატოიდული ფაქტორი ასევე მნიშვნელოვან როლს ასრულებს დაავადების პათოგენეზში. იგი წარმოადგენს IgG-ის Fc ფრაგმენტის მიმართ მიმართულ აუტოანტისხეულს, რომელიც ხელს უწყობს იმუნური კომპლექსების ფორმირებასა და კომპლემენტის აქტივაციას. შედეგად ძლიერდება ანთებითი რეაქცია და იზრდება ქსოვილოვანი დაზიანების ინტენსივობა.[14,15]

თანამედროვე მონაცემებით, რევმატოიდული ართრიტის განვითარება რამდენიმე ფაზად შეიძლება დაიყოს. პრეკლინიკურ ეტაპზე აღინიშნება აუტოანტისხეულების არსებობა და დაბალი ხარისხის იმუნური აქტივაცია. შემდგომ ეტაპზე სინოვიური მიკროვასკულატურის აქტივაცია და ენდოთელური დისფუნქცია განაპირობებს იმუნური უჯრედების სინოვიუმში მიგრაციას. საბოლოოდ ყალიბდება ქრონიკული სინოვიტი, რომელიც პროგრესირებს პანუსის ფორმირებასა და სახსრის დესტრუქციამდე.

პათოგენეზში ასევე მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია თანდაყოლილი და ადაპტაციური იმუნური სისტემის ურთიერთქმედებას. მაკროფაგები, დენდრიტული უჯრედები, T-ლიმფოციტები, B-ლიმფოციტები და სინოვიური ფიბრობლასტები ქმნიან ანთებითი მიკროგარემოს რთულ ქსელს, რომელიც უზრუნველყოფს ანთების ქრონიზაციას.

ნორმალური სინოვიუმი შედგება ორი ძირითადი კომპონენტისაგან: ინტიმური და ქვეშეშებარე შრისაგან. ინტიმური შრე შედგება მაკროფაგების მსგავსი და ფიბრობლასტების მსგავსი სინოვიოციტებისაგან. ქვეშეშებარე შრე კი შეიცავს სისხლძარღვებს, ფიბრობლასტებს, მაკროფაგებს, ნერვულ ბოჭკოებსა და ექსტრაცელულურ მატრიქსს.[16,17]

ფიბრობლასტების მსგავსი სინოვიოციტები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ჰიალურონის მეჯვისა და ლუბრიცინის პროდუქციაში, რაც აუცილებელია სახსრის ნორმალური ფუნქციონირებისათვის. მაკროფაგების მსგავსი სინოვიოციტები მონაწილეობენ ფაგოციტოზში და იმუნური ჰომეოსტაზის რეგულაციაში.

ნორმალური სინოვიური ქსოვილი გამოირჩევა დაბალი უჯრედული სიმჭიდროვითა და მინიმალური ანთებითი ინფილტრაციით. აღნიშნული ბალანსი ირღვევა რევმატოიდული ართრიტის დროს, როდესაც ვითარდება ინტიმის ჰიპერპლაზია, ანგიოგენეზი და ანთებითი ინფილტრაცია.

რევმატოიდული ართრიტის დროს სინოვიური ქსოვილი წარმოადგენს მაღალორგანიზებულ და დინამიკურ მიკროგარემოს, სადაც მრავალი ტიპის იმუნური და სტრომული უჯრედი ერთდროულად მონაწილეობს ანთებითი პროცესის ჩამოყალიბებასა და შენარჩუნებაში. თანამედროვე ტექნოლოგიებმა, განსაკუთრებით single-cell RNA sequencing-ისა და mass cytometry-ის გამოყენებამ, მნიშვნელოვნად გააფართოვა წარმოდგენები სინოვიუმის უჯრედულ ჰეტეროგენულობაზე.[18–20]

დადგენილია, რომ რევმატოიდული სინოვიუმი არ წარმოადგენს ერთგვაროვან ქსოვილს. სხვადასხვა უბანში შესაძლოა განსხვავებული უჯრედული კომპოზიცია, ანთებითი აქტივობა და ციტოკინური პროფილი აღინიშნებოდეს. აღნიშნული ჰეტეროგენულობა მნიშვნელოვანია როგორც დაავადების პროგრესირების მექანიზმების, ასევე მკურნალობისადმი ინდივიდუალური პასუხის გასაგებად.

განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა სინოვიური ფიბრობლასტების სხვადასხვა ქვეტიპებს. ზოგიერთი მათგანი ასოცირდება ანთებითი ციტოკინების პროდუქციასთან, ზოგი კი, ქსოვილოვანი დესტრუქციისა და პანუსის ფორმირების პროცესებთან. აღნიშნული ფაქტები მიუთითებს, რომ ფიბრობლასტების მსგავსი სინოვიოციტები მხოლოდ სტრუქტურულ უჯრედებს არ წარმოადგენენ, არამედ აქტიურად მონაწილეობენ იმუნური პასუხის რეგულაციაში.

რევმატოიდული სინოვიუმის ჰეტეროგენულობა განსაკუთრებით თვალსაჩინოა იმუნური ინფილტრატის შეფასებისას. ზოგიერთ პაციენტში დომინირებს ლიმფოციტური ინფილტრაცია, სხვებში, მაკროფაგული ან ფიბროზული კომპონენტები. აღნიშნული განსხვავებები შესაძლოა ასახავდეს დაავადების სხვადასხვა ბიოლოგიურ ფენოტიპს და საფუძვლად დაედოს პერსონალიზებული თერაპიის არჩევას.

თანამედროვე კვლევებით დადგენილია, რომ რევმატოიდული სინოვიუმი წარმოადგენს ჰეტეროგენულ ქსოვილს, რომელიც შეიცავს მრავალ განსხვავებულ უჯრედულ პოპულაციას. აღნიშნული ჰეტეროგენულობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს დაავადების მიმდინარეობასა და მკურნალობისადმი პასუხზე.

ფიბროზლასტების მსგავსი სინოვიოციტები რევმატოიდული ართრიტის პათოგენეზში ერთ-ერთ მთავარ ეფექტორულ უჯრედებად მიიჩნევა. ისინი გამოირჩევიან აგრესიული ფენოტიპით, მომატებული პროლიფერაციული აქტივობითა და აპოპტოზისადმი რეზისტენტობით. აღნიშნული უჯრედები გამოყოფენ მატრიქსის დამშლელ ფერმენტებს, ციტოკინებსა და ქემოკინებს, რაც ხელს უწყობს ხრტილისა და ძვლის დესტრუქციას.[21]

მაკროფაგები რევმატოიდული სინოვიუმის ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან კომპონენტს წარმოადგენენ. ისინი წარმოდგენილია M1 და M2 ფუნქციური ქვეტიპებით. M1 მაკროფაგები პროანთებითი აქტივობით ხასიათდებიან და გამოყოფენ TNF- α -ს, IL-1 β -სა და IL-6-ს. M2 მაკროფაგები შედარებით ანტიანთებითი თვისებებით გამოირჩევიან.[22]

CD68 და CD163 ფართოდ გამოიყენება მაკროფაგული პოპულაციების იდენტიფიკაციისათვის. კვლევებმა აჩვენა, რომ ქვეშმდებარე შრის მაკროფაგების რაოდენობა კორელაციაშია დაავადების აქტივობასთან და მკურნალობის ეფექტურობასთან.

T-უჯრედები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ ციტოკინური ქსელის რეგულაციაში. Th1 და Th17 უჯრედები განსაკუთრებით აქტიურად მონაწილეობენ ანთებითი პროცესის შენარჩუნებაში. B-უჯრედები კი პასუხისმგებელნი არიან აუტოანტისხეულების პროდუქციაზე და ანტიგენის წარდგენაზე.

NK უჯრედები და დენდრიტული უჯრედები ასევე მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ იმუნური პასუხის რეგულაციაში. მათი რაოდენობრივი და ფუნქციური ცვლილებები შესაძლოა დაკავშირებული იყოს დაავადების პროგრესირებასთან.

რევმატოიდული ართრიტის დროს **სისხლძარღვოვანი ცვლილებები** წარმოადგენს არა მხოლოდ მეორად მოვლენას, არამედ დაავადების პროგრესირების ერთ-ერთ ცენტრალურ მექანიზმს. სინოვიური ქსოვილის ჰიპერპლაზია და ინტენსიური ანთებითი ინფილტრაცია საჭიროებს მეტაბოლური მოთხოვნილებების ზრდას, რის გამოც აქტიურდება ახალი სისხლძარღვების ფორმირების პროცესი. აღნიშნული პროცესი ცნობილია როგორც **პათოლოგიური ანგიოგენეზი** და მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს დაავადების ქრონიზაციასა და სახსრის დესტრუქციაზე.[23,24]

სინოვიური ანგიოგენეზის პროცესში განსაკუთრებული როლი ენიჭება ენდოთელურ უჯრედებს, რომლებიც რეაგირებენ ჰიპოქსიაზე, ციტოკინებზე და ზრდის ფაქტორებზე. ანთებითი მიკროგარემო მდიდარია VEGF-ით, TNF- α -ით, IL-1 β -ითა და IL-17-ით, რომლებიც ხელს უწყობენ ენდოთელური უჯრედების პროლიფერაციასა და მიგრაციას. აღნიშნული პროცესების შედეგად სინოვიუმში ვითარდება მრავლობითი, ფუნქციურად არასრულფასოვანი და მაღალი განვლადობის მქონე სისხლძარღვები.

რევმატოიდული ართრიტის დროს სინოვიური მიკროცირკულაცია მნიშვნელოვნად იცვლება. აღინიშნება ენდოთელური აქტივაცია, ადჰეზიური მოლეკულების ჭარბი ექსპრესია და სისხლძარღვთა კედლის ფუნქციური დისრეგულაცია. ICAM-1, VCAM-1 და E-selectin ხელს უწყობენ ლეიკოციტების ადჰეზიასა და ტრანსენდოთელურ მიგრაციას, რაც კიდევ უფრო აძლიერებს ანთებით პროცესს.[25]

ანგიოგენეზისა და ანთების ურთიერთკავშირი ქმნის დადებითი უკუკავშირის მექანიზმს. რაც უფრო ინტენსიურია ანთება, მით უფრო ძლიერდება ნეოვასკულარიზაცია, ხოლო ახალი სისხლძარღვები უზრუნველყოფენ დამატებითი იმუნური უჯრედების სინოვიუმში მოხვედრას. შედეგად ყალიბდება თვითშენარჩუნებადი ანთებითი მიკროგარემო.

თანამედროვე კვლევები მიუთითებს, რომ სინოვიური სისხლძარღვოვანი ცვლილებების შეფასება შესაძლოა გამოყენებულ იქნეს დაავადების აქტივობისა და პროგრესიის ბიომარკერად. VEGF-ის მაღალი ექსპრესია, მიკროსისხლძარღვთა სიმჭიდროვის მატება და ენდოთელური აქტივაციის ნიშნები ხშირად ასოცირდება დაავადების უფრო აგრესიულ მიმდინარეობასთან.

ანგიოგენეზი რევმატოიდული ართრიტის ერთ-ერთი ძირითადი მორფოლოგიური და ფუნქციური მახასიათებელია. სინოვიურ ქსოვილში ახალი სისხლძარღვების ფორმირება აუცილებელია ანთებითი უჯრედების მუდმივი მიგრაციისა და მეტაბოლური მოთხოვნილებების დასაკმაყოფილებლად.

VEGF წარმოადგენს ანგიოგენეზის ცენტრალურ რეგულატორს. მისი ექსპრესია მნიშვნელოვნად მატულობს რევმატოიდულ სინოვიუმში და კორელაციაშია დაავადების აქტივობასთან. VEGF-ის გარდა, ანგიოგენეზში მონაწილეობენ TNF- α , IL-1 β , IL-6, FGF და ანგიოპოეტინები.[23,26,27]

სინოვიური ჰიპოქსია ასევე მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ანგიოგენეზის სტიმულაციაში. ჰიპოქსიური გარემო ააქტიურებს HIF-1 α -ს, რომელიც ზრდის VEGF-ის ექსპრესიას და ხელს უწყობს ნეოვასკულარიზაციას.

რევმატოიდული ართრიტის დროს სინოვიური სისხლძარღვები ხასიათდებიან სტრუქტურული და ფუნქციური ანომალიებით. აღინიშნება ენდოთელური აქტივაცია, სისხლძარღვთა განვლადობის ზრდა და ადჰეზიური მოლეკულების ჭარბი ექსპრესია.

რამდენიმე კვლევის მიხედვით, რევმატოიდული სინოვიუმი შეიძლება დაიყოს **ოთხ ძირითად ჰისტოლოგიურ ტიპად**: ლიმფოიდურ, მიელოიდურ, pauci-immune და ფიბროიდულ ვარიანტებად. აღნიშნული კლასიფიკაცია ასახავს სინოვიური ქსოვილის მორფოლოგიურ და იმუნოლოგიურ ჰეტეროგენულობას და მნიშვნელოვან როლს ასრულებს დაავადების პროგნოზისა და თერაპიული პასუხის შეფასებაში.[19,20]

ლიმფოიდური ტიპის სინოვიუმი ხასიათდება B და T ლიმფოციტების ინტენსიური აკუმულაციით, ლიმფოიდური აგრეგატების ფორმირებითა და იმუნოგლობულინების აქტიური პროდუქციით. აღნიშნულ შემთხვევებში ხშირად ვლინდება მეორადი ლიმფოიდური ორგანოების მსგავსი სტრუქტურები, რაც მიუთითებს ქრონიკული აუტოიმუნური პროცესის მაღალ ორგანიზებულობაზე. ლიმფოიდური ტიპი ჩვეულებრივ ასოცირდება დაავადების უფრო აგრესიულ მიმდინარეობასთან, სისტემური ანთებითი აქტივობის მაღალ დონესთან და ზოგიერთ შემთხვევაში ანტი-TNF თერაპიის მიმართ არასაკმარის პასუხთან. ამ ტიპის სინოვიუმში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება CXCL13-ის, CD20-ისა და სხვა B-უჯრედულ მარკერებს.

მიელოიდური ტიპის სინოვიუმში დომინირებენ მაკროფაგები, მონოციტები და პროანთებითი ციტოკინები. აღნიშნული ტიპი განსაკუთრებით მდიდარია TNF- α -ს, IL-1 β -სა და IL-6-ის გამოყოფი უჯრედებით, რის გამოც ასეთ შემთხვევებში ანტი-TNF თერაპია შედარებით მაღალი ეფექტურობით ხასიათდება. მიელოიდური ტიპის სინოვიუმში მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია CD68- და CD64-პოზიტიურ მაკროფაგულ პოპულაციებს, რომლებიც აქტიურად მონაწილეობენ ანთებითი რეაქციის გაძლიერებასა და ქსოვილოვანი დესტრუქციის პროცესებში.

pauci-immune ტიპის სინოვიუმში ანთებითი ინფილტრატი შედარებით მწირია და უპირატესად აღინიშნება სტრომული და ფიბროზული ცვლილებები. ასეთ შემთხვევებში ანთებითი ციტოკინების ექსპრესია ნაკლებად გამოხატულია, თუმცა სტრუქტურული რემოდელირების ნიშნები შესაძლოა მნიშვნელოვანი იყოს. ზოგიერთი ავტორის მიხედვით, აღნიშნული ტიპი შეიძლება ასოცირებული იყოს დაავადების ქრონიკულ და შედარებით ნაკლებად აქტიურ ფორმებთან.

ფიბროიდული ტიპის სინოვიუმი გამოირჩევა ფიბრობლასტების მსგავსი სინოვიოციტების ჭარბი აქტივობით, ექსტრაცელულური მატრიქსის დაგროვებითა და ქსოვილოვანი რემოდელირების პროცესებით. აღნიშნულ შემთხვევებში განსაკუთრებით აქტიურია TGF- β , SMAD და Wnt სასიგნალო გზები. ფიბროიდული ტიპი ასევე ასოცირდება ანგიოგენეზთან დაკავშირებული გენების ექსპრესიის მატებასთან და ზოგიერთ შემთხვევაში მკურნალობისადმი შედარებით დაბალ მგრძნობელობასთან.

სინოვიტის ჰისტოლოგიური ინდექსი წარმოადგენს მნიშვნელოვან ინსტრუმენტს სინოვიური ანთების ხარისხის შესაფასებლად. აღნიშნული სისტემა ეფუძნება ინტიმური შრის ჰიპერპლაზიის, სტრომული უჯრედულობის ხარისხისა და ანთებითი ინფილტრატის ინტენსივობის შეფასებას. თითოეული კომპონენტის დეტალური ანალიზი იძლევა შესაძლებლობას შეფასდეს სინოვიური ანთების აქტივობა და ქსოვილოვანი დაზიანების ხარისხი.

თითოეული კომპონენტი ფასდება 0-დან 3 ქულამდე, ხოლო ჯამური ქულა 0-დან 9-მდე მერყეობს. დაბალი ხარისხის სინოვიტი ძირითადად ასოცირდება დეგენერაციულ და

პოსტტრავმულ პროცესებთან, მაშინ როდესაც მაღალი ხარისხის სინოვიტი უფრო მეტად დამახასიათებელია ანთებითი რევმატული დაავადებებისათვის, მათ შორის რევმატოიდული ართრიტისათვის. სინოვიტის ინდექსი პრაქტიკულად მნიშვნელოვანი ინსტრუმენტია, რადგან იგი საშუალებას იძლევა შეფასდეს ანთებითი პროცესის ინტენსივობა, დაავადების აქტივობა და გარკვეულწილად პროგნოზიც.

სინოვიტის ინდექსის მნიშვნელობა განსაკუთრებით გაიზარდა თანამედროვე რევმატოლოგიაში, რადგან იგი საშუალებას იძლევა სტანდარტიზებულად შეფასდეს სინოვიური ქსოვილის მორფოლოგიური ცვლილებები. აღნიშნული მიდგომა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მაშინ, როდესაც საჭიროა დეგენერაციული და აუტოიმუნური პროცესების ერთმანეთისაგან დიფერენცირება. ზოგიერთი კვლევის მიხედვით, მაღალი ხარისხის სინოვიტი მნიშვნელოვნად კორელირებს სისტემური ანთების ლაბორატორიულ მაჩვენებლებთან, მათ შორის C-რეაქტიული ცილისა და ერთროციტების დალექვის სიჩქარის მატებასთან.

გარდა ამისა, სინოვიტის ინდექსი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მკურნალობის ეფექტურობის მონიტორინგისათვის. ბიოლოგიური თერაპიის ფონზე სინოვიური ანთების შემცირება ხშირად აისახება როგორც უჯრედული ინფილტრატის შემცირებაში, ისე ინტიმური შრის ჰიპერპლაზიის ნაწილობრივ რეგრესიაში. აღნიშნული ფაქტები მიუთითებს, რომ სინოვიტის ინდექსი არა მხოლოდ დიაგნოსტიკური, არამედ პროგნოსტიკური მნიშვნელობის მატარებელიც შეიძლება იყოს.

სინოვიტის ინდექსი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დიფერენციალური დიაგნოსტიკისა და დაავადების აქტივობის შეფასებისათვის.

CD64 წარმოადგენს Fcγ რეცეპტორების ოჯახის წევრს და მნიშვნელოვან როლს ასრულებს იმუნური კომპლექსებით განპირობებულ ანთებაში. რევმატოიდული ართრიტის დროს CD64 ექსპრესია მნიშვნელოვნად მატულობს სინოვიურ ქსოვილში. CD68 გამოიყენება მაკროფაგების საერთო მარკერად, ხოლო CD163, M2 მაკროფაგების იდენტიფიკაციისათვის. აღნიშნული მარკერების ექსპრესია შესაძლოა გამოყენებულ იქნეს დაავადების აქტივობისა და თერაპიული პასუხის პროგნოზირებისათვის.

Ki67 ასახავს პროლიფერაციულ აქტივობას, ხოლო VEGF, ანგიოგენეზურ აქტივობას. CXCL13 და ICAM-1 ასევე პერსპექტიულ ბიომარკერებად მიიჩნევა.

მნიშვნელოვანია იმუნოჰისტოქიმიური პროფილის ინტეგრაცია ჰისტოლოგიურ და კლინიკურ მონაცემებთან, რაც შესაძლოა საფუძვლად დაედოს ინდივიდუალური მკურნალობის სტრატეგიების დაგეგმვას.

რევმატოიდული ვასკულიტი წარმოადგენს რევმატოიდული ართრიტის მძიმე ექსტრაარტიკულურ გართულებას, რომელიც აზიანებს მცირე და საშუალო ზომის სისხლძარღვებს. პათოგენეზში მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება იმუნური კომპლექსების დეპონირებასა და კომპლემენტის აქტივაციას.[28–30]

ჰისტოლოგიურად აღინიშნება ფიბრინოიდული ნეკროზი, სისხლძარღვთა კედლის ანთებითი ინფილტრაცია და ენდოთელური დაზიანება. კლინიკურად შეიძლება გამოვლინდეს პერიფერიული ნეიროპათიით, კანის წყლულებით, განგრენითა და სისტემური დაზიანებებით.

რევმატოიდული ვასკულიტის განვითარების რისკი განსაკუთრებით მაღალია ხანგრძლივი და სეროპოზიტიური რევმატოიდული ართრიტის შემთხვევაში.

სინოვიური ბიოფსია თანამედროვე რევმატოლოგიაში სულ უფრო მნიშვნელოვან ადგილს იკავებს. აღნიშნული მეთოდი იძლევა სინოვიური ქსოვილის მორფოლოგიური, იმუნოლოგიური და მოლეკულური შეფასების შესაძლებლობას.

სინოვიური ბიოფსიის გამოყენება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია რთული დიფერენციალური დიაგნოსტიკის დროს, როდესაც აუცილებელია ანთებითი და არაანთებითი პროცესების ერთმანეთისაგან გამოიჯიშოს. ადრეული ართრიტის შემთხვევაში სინოვიური ქსოვილის შეფასებამ შესაძლოა მნიშვნელოვანი ინფორმაცია მოგვცეს დაავადების პროგრესიის პოტენციალის შესახებ. გარდა ამისა, სინოვიური ბიოფსია გამოიყენება თერაპიული პასუხის მონიტორინგისათვის, განსაკუთრებით ბიოლოგიური პრეპარატების გამოყენების ფონზე. პერსონალიზებული მედიცინის განვითარებასთან ერთად, სინოვიური ქსოვილის ჰისტოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური პროფილი სულ უფრო მეტად განიხილება როგორც ინდივიდუალური მკურნალობის დაგეგმვის საფუძველი.

თანამედროვე მიდგომები მოიცავს ციფრული პათოლოგიის, ხელოვნური ინტელექტისა და მრავალმარკერული იმუნოჰისტოქიმიის ინტეგრაციას.[31–34]

რევმატოიდული ართრიტის თანამედროვე მართვა ეფუძნება პერსონალიზებული მედიცინის პრინციპებს. სინოვიური ქსოვილის ჰისტოლოგიური და მოლეკულური პროფილის შეფასება შესაძლოა გამოყენებულ იქნეს კონკრეტული ბიოლოგიური თერაპიის შერჩევისათვის.

მიელოიდური ტიპის სინოვიუმი ხშირად უკეთ პასუხობს ანტი-TNF თერაპიას, ხოლო ლიმფოიდური ტიპი შესაძლოა მეტად მგრძნობიარე იყოს B-უჯრედების დამაქვეითებელი თერაპიის მიმართ.

მომავალში განსაკუთრებული მნიშვნელობა მიენიჭება ინტეგრირებული მოდელების განვითარებას, რომლებიც ერთ სისტემაში გააერთიანებენ ჰისტოლოგიურ

მახასიათებლებს, იმუნოჰისტოქიმიურ პროფილს, გენური ექსპრესიის მონაცემებს, კლინიკურ პარამეტრებსა და გამოსახულებითი კვლევების შედეგებს. აღნიშნული მიდგომები მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს დაავადების პროგნოზირების სიზუსტეს, შესაძლებელს გახდის მკურნალობის უფრო ზუსტ ინდივიდუალიზაციას და შეამცირებს არასაჭირო ან არაეფექტური თერაპიის გამოყენების ალბათობას.

აღნიშნული მიდგომები მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს პროგნოზირების სიზუსტეს და მკურნალობის ინდივიდუალიზაციას.

ყოველივე ზემოთაღნიშნულის საფუძველზე შესაძლოა დავასკვნათ, რომ რევმატოიდული ართრიტი წარმოადგენს ჰეტეროგენულ აუტოიმუნურ დაავადებას, რომლის პათოგენეზშიც ცენტრალური ადგილი უკავია სინოვიური გარსის კომპლექსურ უჯრედულ-მოლეკულურ ცვლილებებს. სინოვიუმი აღარ განიხილება მხოლოდ ანთებითი პროცესის პასიურ სამიზნედ; იგი წარმოადგენს აქტიურ იმუნოლოგიურ მიკროგარემოს, სადაც მიმდინარეობს იმუნური, სტრომული და სისხლძარღვოვანი კომპონენტების ინტენსიური ურთიერთქმედება.

სინოვიური გარსის ჰისტოლოგიური ტიპების, მაკროფაგული და ლიმფოციტური პოპულაციების, ანგიოგენეზისა და იმუნოჰისტოქიმიური მარკერების შეფასება მნიშვნელოვან ინფორმაციას იძლევა დაავადების აქტივობის, პროგრესიისა და თერაპიული პასუხის შესახებ. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება CD64, CD68, CD163, VEGF, CXCL13 და სხვა მარკერების შესწავლას.

სინოვიური ბიოფსიისა და თანამედროვე მოლეკულური ტექნოლოგიების განვითარება ქმნის პერსპექტივას პერსონალიზებული რევმატოლოგიისათვის. მომავალში სინოვიური ქსოვილის დეტალური ანალიზი შესაძლოა გახდეს ინდივიდუალური მკურნალობის შერჩევისა და დაავადების პროგნოზირების ერთ-ერთი მთავარი საფუძველი.

ამრიგად, სინოვიური გარსის უჯრედულ-მოლეკულური პროფილისა და სისხლძარღვოვანი ცვლილებების კვლევა წარმოადგენს რევმატოიდული ართრიტის თანამედროვე პათოგენეზის, პროგრესიისა და მიზანმიმართული თერაპიის შესწავლის მნიშვნელოვან მიმართულებას.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Yamanishi Y, Firestein GS. Pathogenesis of rheumatoid arthritis: The role of synoviocytes. *Rheumatic Disease Clinics of North America* 2001;27:355–71.
[https://doi.org/10.1016/S0889-857X\(05\)70206-4](https://doi.org/10.1016/S0889-857X(05)70206-4).

- [2] Cooles FAH, Isaacs JD, Anderson AE. Treg cells in rheumatoid arthritis: An update. *Curr Rheumatol Rep* 2013;15. <https://doi.org/10.1007/S11926-013-0352-0>.
- [3] Müller-Ladner U, Ospelt C, Gay S, Distler O, Pap T. Cells of the synovium in rheumatoid arthritis. Synovial fibroblasts. *Arthritis Res Ther* 2007;9. <https://doi.org/10.1186/AR2337>.
- [4] Schellekens GA, De Jong BAW, Van Den Hoogen FHJ, Van De Putte LBA, Van Venrooij WJ. Citrulline is an essential constituent of antigenic determinants recognized by rheumatoid arthritis-specific autoantibodies. *Journal of Clinical Investigation* 1998;101:273–81. <https://doi.org/10.1172/JCI1316>.
- [5] Put S, Westhovens R, Lahoutte T, Matthys P. Molecular imaging of rheumatoid arthritis: Emerging markers, tools, and techniques. *Arthritis Res Ther* 2014;16. <https://doi.org/10.1186/AR4542>.
- [6] Haynes DR, Barg E, Crotti TN, Holding C, Weedon H, Atkins GJ, et al. Osteoprotegerin expression in synovial tissue from patients with rheumatoid arthritis, spondyloarthropathies and osteoarthritis and normal controls. *Rheumatology* 2003;42:123–34. <https://doi.org/10.1093/RHEUMATOLOGY/KEG047>.
- [7] Klaasen R, Thurlings RM, Wijbrandts CA, Van Kuijk AW, Baeten D, Gerlag DM, et al. The relationship between synovial lymphocyte aggregates and the clinical response to infliximab in rheumatoid arthritis: A prospective study. *Arthritis Rheum* 2009;60:3217–24. <https://doi.org/10.1002/ART.24913>.
- [8] Klaasen R, Thurlings RM, Wijbrandts CA, Van Kuijk AW, Baeten D, Gerlag DM, et al. The relationship between synovial lymphocyte aggregates and the clinical response to infliximab in rheumatoid arthritis: A prospective study. *Arthritis Rheum* 2009;60:3217–24. <https://doi.org/10.1002/ART.24913>.
- [9] Lequerré T, Bansard C, Vittecoq O, Derambure C, Hiron M, Daveau M, et al. Early and long-standing rheumatoid arthritis: Distinct molecular signatures identified by gene-expression profiling in synovia. *Arthritis Res Ther* 2009;11. <https://doi.org/10.1186/AR2744>.
- [10] Mor A, Abramson SB, Pillinger MH. The fibroblast-like synovial cell in rheumatoid arthritis: A key player in inflammation and joint destruction. *Clinical Immunology* 2005;115:118–28. <https://doi.org/10.1016/J.CLIM.2004.12.009>.
- [11] Kinne RW, Bräuer R, Stuhlmüller B, Palombo-Kinne E, Burmester GR. Macrophages in rheumatoid arthritis. *Arthritis Res* 2000;2:189–202. <https://doi.org/10.1186/AR86>.

- [12] Ling S, Cline EN, Haug TS, Fox DA, Holoshitz J. Citrullinated calreticulin potentiates rheumatoid arthritis shared epitope signaling. *Arthritis Rheum* 2013;65:618–26. <https://doi.org/10.1002/ART.37814>.
- [13] Yoshida K, Korchynskyi O, Tak PP, Isozaki T, Ruth JH, Campbell PL, et al. Citrullination of Epithelial Neutrophil-Activating Peptide 78/CXCL5 Results in Conversion from a Non-Monocyte-Recruiting Chemokine to a Monocyte-Recruiting Chemokine. *Arthritis and Rheumatology* 2014;66:2716–27. <https://doi.org/10.1002/ART.38750>.
- [14] McInnes IB, Schett G. Cytokines in the pathogenesis of rheumatoid arthritis. *Nat Rev Immunol* 2007;7:429–42. <https://doi.org/10.1038/NRI2094>.
- [15] Asif Amin M, Fox DA, Ruth JH. Synovial Cellular and Molecular Markers in Rheumatoid Arthritis. *Semin Immunopathol* 2017;39:385. <https://doi.org/10.1007/S00281-017-0631-3>.
- [16] Qavtaradze N, Qartvelishvili E (Dodo), Kepuladze S, Burkadze G. Structural-molecular features of the osteochondral unit of the femur head and the synovial membrane and characteristics of progression and relapse in different types of osteoarthritis. *Georgian Scientists* 2022;4:175–84. <https://doi.org/10.52340/g.s.2022.04.05.18>.
- [17] Germisashvili K, Kartvelishvili E, Burkadze G, Kepuladze S, Kantaria N. Proliferative-apoptotic, hormonal receptor, and immune response characteristics of rheumatoid arthritis. *Georgian Scientists* 2023;5:66–74. <https://doi.org/10.52340/2023.05.03.08>.
- [18] Stephenson W, Donlin LT, Butler A, Rozo C, Bracken B, Rashidfarrokhi A, et al. Single-cell RNA-seq of rheumatoid arthritis synovial tissue using low-cost microfluidic instrumentation. *Nat Commun* 2018;9. <https://doi.org/10.1038/S41467-017-02659-X>.
- [19] Orange DE, Agius P, DiCarlo EF, Robine N, Geiger H, Szymonifka J, et al. Identification of Three Rheumatoid Arthritis Disease Subtypes by Machine Learning Integration of Synovial Histologic Features and RNA Sequencing Data. *Arthritis and Rheumatology* 2018;70:690–701. <https://doi.org/10.1002/ART.40428>.
- [20] Orange DE, Agius P, DiCarlo EF, Robine N, Geiger H, Szymonifka J, et al. Identification of Three Rheumatoid Arthritis Disease Subtypes by Machine Learning Integration of Synovial Histologic Features and RNA Sequencing Data. *Arthritis and Rheumatology* 2018;70:690–701. <https://doi.org/10.1002/ART.40428>.
- [21] Bartok B, Firestein GS. Fibroblast-like synoviocytes: Key effector cells in rheumatoid arthritis. *Immunol Rev* 2010;233:233–55. <https://doi.org/10.1111/J.0105-2896.2009.00859.X>.

- [22] Gordon S, Martinez FO. Alternative activation of macrophages: Mechanism and functions. *Immunity* 2010;32:593–604. <https://doi.org/10.1016/J.IMMUNI.2010.05.007>.
- [23] Koch AE, Polverini PJ, Kunkel SL, Harlow LA, DiPietro LA, Elner VM, et al. Interleukin-8 as a Macrophage-Derived Mediator of Angiogenesis. *Science* (1979) 1992;258:1798–801. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1281554>.
- [24] Strieter RM, Polverini PJ, Kunkel SL, Arenberg DA, Burdick MD, Kasper J, et al. The functional role of the ELR motif in CXC chemokine-mediated angiogenesis. *Journal of Biological Chemistry* 1995;270:27348–57. <https://doi.org/10.1074/JBC.270.45.27348>.
- [25] Yamada R, Sano H, Hla T, Hashiramoto A, Kawahito Y, Mukai S, et al. Selective inhibition of cyclooxygenase-2 with antisense oligodeoxynucleotide restricts induction of rat adjuvant-induced arthritis. *Biochem Biophys Res Commun* 2000;269:415–21. <https://doi.org/10.1006/BBRC.2000.2303>.
- [26] Cauli A, Yanni G, Panayi GS. Interleukin-1, interleukin-1 receptor antagonist and macrophage populations in rheumatoid arthritis synovial membrane. *Br J Rheumatol* 1997;36:935–40. <https://doi.org/10.1093/RHEUMATOLOGY/36.9.935>.
- [27] Xing R, Jin Y, Sun L, Yang L, Li C, Li Z, et al. Interleukin-21 induces migration and invasion of fibroblast-like synoviocytes from patients with rheumatoid arthritis. *Clin Exp Immunol* 2016;184:147–58. <https://doi.org/10.1111/CEI.12751>.
- [28] Hashimoto A, Tarner IH, Bohle RM, Gaumann A, Manetti M, Distler O, et al. Analysis of vascular gene expression in arthritic synovium by laser-mediated microdissection. *Arthritis Rheum* 2007;56:1094–105. <https://doi.org/10.1002/ART.22450>.
- [29] Audoy-Rémus J, Richard JF, Soulet D, Zhou H, Kubes P, Vallières L. Rod-shaped monocytes patrol the brain vasculature and give rise to perivascular macrophages under the influence of proinflammatory cytokines and angiopoietin-2. *Journal of Neuroscience* 2008;28:10187–99. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3510-08.2008>.
- [30] Hashimoto A, Tarner IH, Bohle RM, Gaumann A, Manetti M, Distler O, et al. Analysis of vascular gene expression in arthritic synovium by laser-mediated microdissection. *Arthritis Rheum* 2007;56:1094–105. <https://doi.org/10.1002/ART.22450>.
- [31] Gerlag DM, Tak PP. How to perform and analyse synovial biopsies. *Best Pract Res Clin Rheumatol* 2013;27:195–207. <https://doi.org/10.1016/J.BERH.2013.03.006>.
- [32] Pitzalis C, Kelly S, Humby F. New learnings on the pathophysiology of RA from synovial biopsies. *Curr Opin Rheumatol* 2013;25:334–44. <https://doi.org/10.1097/BOR.0B013E32835FD8EB>.

- [33] Pitzalis C, Kelly S, Humby F. New learnings on the pathophysiology of RA from synovial biopsies. *Curr Opin Rheumatol* 2013;25:334–44.
<https://doi.org/10.1097/BOR.0B013E32835FD8EB>.
- [34] Bresnihan B, Tak PP, Emery P, Klareskog L, Breedveld F. Synovial biopsy in arthritis research: Five years of concerted European collaboration. *Ann Rheum Dis* 2000;59:506–10. <https://doi.org/10.1136/ARD.59.7.506>.

Synovial membrane cellular-molecular profile, vascular changes in rheumatoid arthritis, possible markers of disease progression and individual treatment

Ekaterine Mgaloblishvili¹; Elene Kartvelishvili²; Nino Tevzadze³; Shota Kepuladze⁴; Giorgi Burkadze⁵

¹PhD student at Tbilisi State Medical University; ²Emeritus Professor at Tbilisi State Medical University;

³Pathologist at the Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; MD; ⁴Doctor Pathologist at the Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; Associate Professor of the

Department of Molecular Pathology; ⁵Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; Professor;

Critical Review

Rheumatoid arthritis is a chronic, progressive autoimmune disease characterized by persistent synovial inflammation and progressive joint destruction. The synovial membrane represents the primary target tissue of the disease, where complex cellular and molecular alterations contribute to chronic inflammation, tissue remodeling, and structural damage. Recent advances have demonstrated that rheumatoid synovium is a highly heterogeneous microenvironment composed of fibroblast-like synoviocytes, macrophages, T and B lymphocytes, endothelial cells, and multiple cytokine and chemokine signaling pathways. These interactions play a critical role in disease progression, angiogenesis, cartilage destruction, and variability in therapeutic response.

Increasing attention has been directed toward the histological and immunohistochemical characterization of synovial tissue. Biomarkers such as CD64, CD68, CD163, VEGF, CXCL13, and ICAM-1 reflect inflammatory activity, macrophage polarization, angiogenic potential, and stromal remodeling within the synovial microenvironment. Moreover, distinct synovial histopathological phenotypes, including lymphoid, myeloid, pauci-immune, and fibroid patterns, may provide important prognostic and predictive information for individualized therapeutic strategies.

The development of synovial biopsy techniques, digital pathology, and advanced molecular technologies has significantly expanded the potential of personalized rheumatology. Detailed evaluation of the cellular-molecular profile and vascular alterations of the synovial membrane may improve understanding of rheumatoid arthritis pathogenesis and contribute to the identification of prognostic biomarkers and targeted therapeutic approaches.

Keywords:

Rheumatoid arthritis; synovium; synovitis; angiogenesis; CD64; CD68; CD163; macrophages; fibroblast-like synoviocytes; biomarkers; immunohistochemistry; personalized therapy

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია

ეკატერინე მგალობლიშვილი - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი;

Ekaterine Mgaloblishvili - PhD student at Tbilisi State Medical University; Doctor; Surgeon;

ekmgaloblishvili@yahoo.fr

+995595 00 29 39

ელენე ქართველიშვილი - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ემერიტუს პროფესორი;

Elene-Dodo Kartvelishvili - Emeritus Professor at Tbilisi State Medical University;

n.gavtaradze@yahoo.com

ნინო თევზაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის პათოლოგანატომი; ექიმი;

Nino Tevzadze - Pathologist at the Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; MD;

niniatevzadze1@gmail.com

შოთა კეპულაძე - თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi

State Medical University; Doctor of Pathology;

Shota.kepuladze@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

გიორგი ბურკაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;

George Burkadze - Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the

Department of Molecular Pathology;

E-mail: burkadze@yahoo.com g.burkadze@tsmu.edu

Phone Number: 599578833; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

სინონაზალური პოლიპებისა და პაპილომების ფენოტიპური მახასიათებლები, რეციდივისა და პროგრესიის ფაქტორები (კრიტიკული მიმოხილვა)

ირინა ნახუცრიშვილი¹; ნატო ნაკუდაშვილი²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი ოტორინოლარინგოლოგი;

²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ოტორინოლარინგოლოგიის დეპარტამენტის

პროფესორი; ³თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის

დეპარტამენტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; ⁴თბილისის

სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის

პათოლოგანატომი; მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი;

აბსტრაქტი

სინონაზალური პოლიპები და პაპილომები წარმოადგენს ზედა სასუნთქი გზების ფართოდ გავრცელებულ პათოლოგიურ პროცესებს, რომლებიც მიუხედავად კეთილთვისებიანი ბუნებისა, ხშირად ხასიათდება ქრონიკული მიმდინარეობით, რეციდივის მაღალი სიხშირითა და გარკვეულ შემთხვევებში ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პოტენციალით. სინონაზალური პოლიპები უმეტესად დაკავშირებულია ქრონიკულ რინოსინუსიტთან, ალერგიულ და იმუნოლოგიურ დარღვევებთან, ხოლო სინონაზალური პაპილომები, განსაკუთრებით ინვერტირებული პაპილომები, გამოირჩევიან ადგილობრივად აგრესიული ქცევითა და ბრტყელუჯრედოვანი კარცინომის განვითარების გაზრდილი რისკით.

წინამდებარე კრიტიკული მიმოხილვის მიზანს წარმოადგენს სინონაზალური პოლიპებისა და პაპილომების ფენოტიპური მახასიათებლების, ჰისტომორფოლოგიური და მოლეკულური თავისებურებების, აგრეთვე რეციდივისა და პროგრესიის განმაპირობებელი ფაქტორების შეფასება. განხილულია დაავადებათა ეპიდემიოლოგია, ანთებითი მიკროგარემო, ციტოკინური და იმუნოლოგიური მექანიზმები, ეპითელურ-მეზენქიმური ტრანსფორმაციის პროცესები, ქსოვილოვანი რემოდელირება და მიკრობიოტის როლი. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ადამიანის პაპილომავირუსის (HPV), განსაკუთრებით HPV16-ის, მნიშვნელობას სინონაზალური პაპილომების პათოგენეზსა და ავთვისებიან პროგრესიაში.

მიმოხილვა ასევე აერთიანებს თანამედროვე მონაცემებს ისეთი მოლეკულური და იმუნოჰისტოქიმიური მარკერების შესახებ, როგორიცაა p16, EGFR, Ki67, VEGF, მატრიქსული მეტალოპროტეინაზები და ანთებითი ციტოკინები, რომლებიც შესაძლოა გამოყენებულ იქნეს დაავადების პროგნოზირების, რეციდივის რისკის შეფასებისა და პერსონალიზებული მკურნალობის დაგეგმვისათვის. არსებული ლიტერატურის

ანალიზი ცხადყოფს, რომ სინონაზალური პოლიპებისა და პაპილომების პათოგენეზი მრავალფაქტორული და ჰეტეროგენულია, რაც საჭიროებს დამატებით მოლეკულურ და კლინიკურ კვლევებს.

სინონაზალური დაზიანებების ფენოტიპური და მოლეკულური პროფილის სიდრმისეული შესწავლა ხელს შეუწყობს დაავადების ადრეულ დიაგნოსტიკას, რეციდივისა და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის რისკის უკეთ შეფასებას და თანამედროვე მიზანმიმართული თერაპიული საშუალებების განვითარებას.

საკვანძო სიტყვები: სინონაზალური პოლიპები, ინვერტირებული პაპილომა, HPV16, p16, ქრონიკული რინოსინუსიტი, ფენოტიპური ჰეტეროგენობა, რეციდივი, ავთვისებიანი ტრანსფორმაცია.

სინონაზალური პოლიპები და პაპილომები ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული არაავთვისებიანი დაზიანებებია, რომლებიც გავლენას ახდენენ ცხვირის ღრუსა და პარანაზალურ სინუსებზე. ეს დაზიანებები, თუმცა ზოგადად კეთილთვისებიანია, შეიძლება მნიშვნელოვნად იმოქმედოს პაციენტების ცხოვრების ხარისხზე და ზოგიერთ შემთხვევაში, გამოავლინოს მიდრეკილება რეციდივისა და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციისკენ. ამ ტიპის დაზიანებათა კლინიკური მნიშვნელობა მდგომარეობს მათ გავრცელებაში, რეციდივის პოტენციალში, ზუსტ დიაგნოსტიკასა და ეფექტურ მართვასთან დაკავშირებულ გამოწვევებში. [1]

სინონაზალური პოლიპები, განსაკუთრებით ქრონიკული ანთებითი პოლიპები, წარმოადგენს სხვადასხვა ფონური პათოფიზიოლოგიური პროცესების გამოვლინებას, მათ შორისაა ქრონიკული ანთება, ალერგიული რეაქციები და ზოგიერთ შემთხვევაში, გენეტიკური მიდრეკილება. ეს პოლიპები, როგორც წესი, კეთილთვისებიანი, წარმოიქმნება ცხვირის ღრუს ან პარანაზალური სინუსების ლორწოვანი გარსიდან, რაც იწვევს სიმპტომებს, როგორიცაა ცხვირის ობსტრუქცია, ყნოსვის დაქვეითება და მძიმე შემთხვევებში, სახის ტკივილი ან მაღალი წნევა. სინონაზალური პოლიპების ეტიოლოგია მულტიფაქტორულია, გარემო ფაქტორების, იმუნური რეაქციებისა და შესაძლოა, ინფექციური აგენტების გარკვეული წვლილით. [2,3] წლების განმავლობაში ჩვენი გაგება მოლეკულური და უჯრედული მექანიზმების შესახებ, რომლებიც საფუძვლად უდევს პოლიპების წარმოქმნას, მკვეთრად განვითარდა, მაგრამ ბევრი ასპექტი კვლავ გაუგებარია.

სინონაზალური პაპილომები წარმოადგენს დაზიანებების ცალკეულ ჯგუფს, რომელიც წარმოიქმნება შნეიდერის მემბრანიდან, რომელიც ფარავს ცხვირის ღრუს და პარანაზალური სინუსებს. ეს დაზიანებები შეიძლება დაიყოს სამ ძირითად ტიპად: ინვერტირებული პაპილომები, ეგზოფიტური პაპილომები და ონკოციტური პაპილომები. ინვერტირებული პაპილომები, ყველაზე გავრცელებული ქვეტიპი, ხასიათდება ენდოფიტური ზრდის ტიპით, ეპითელიუმის ქვეშმდებარე სტრომაში პროექციით. სინონაზალური პაპილომები ხშირად ასოცირდება ადამიანის პაპილომავირუსის ინფექციასთან, განსაკუთრებით HPV-16-თან და შეიძლება

გამოავლინოს რეციდივის და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის უფრო მაღალი რისკი, ვიდრე სხვა არანეოპლაზიურმა სინონასალურმა დაზიანებებმა .[4]

სინონაზალური პაპილომების თითოეული ქვეტიპი ავლენს უნიკალურ ჰისტოპათოლოგიურ მახასიათებლებს და კლინიკურ ქცევას, ინვერტირებული პაპილომები განსაკუთრებით აღსანიშნავია მათი უფრო მაღალი რეციდივის სიხშირისა და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პოტენციალის გამო. სინონაზალური პაპილომებისა და ადამიანის პაპილომავირუსის (HPV), განსაკუთრებით HPV16-ს შორის კავშირი არის ხშირი შესწავლის საგანი მათი პათოგენეზის, მკურნალობის ტაქტიკისა და პროგნოზის უკეთ გააზრებისათვის.[1,5]

სინონაზალური პოლიპების და პაპილომების ვრცელი მიმოხილვის აუცილებლობა განპირობებულია რამდენიმე ფაქტორით. პირველ რიგში, ამ დაზიანებების შესახებ ლიტერატურის დიდი ნაწილის არსებობის მიუხედავად, რჩება მნიშვნელოვანი ხარვეზები ჩვენს ცოდნაში, განსაკუთრებით ფენოტიპური ვარიაციების მოლეკულურ საფუძვლებთან და მექანიზმებთან დაკავშირებით, რომლებიც იწვევს რეციდივისა და ავთვისებიანი პროგრესირების პროცესს. მიუხედავად იმისა, რომ სინონაზალური პოლიპები ხშირად განიხილება კეთილთვისებიანად და მართვად მდგომარეობად, რეციდივის სიხშირე მაღალია და ზუსტი ფაქტორები, რომლებიც პროგნოზირებენ რეციდივს, ბოლომდე არ არის გამოვლენილი. ანალოგიურად, სინონაზალური პაპილომების ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პოტენციალი აჩენს კრიტიკულ კითხვებს ადრეული გამოვლენის, პრევენციისა და მართვის სტრატეგიების შესახებ.

მეორეც, ამ დაზიანებების კლასიფიკაციასა და მკურნალობაში არსებობს წინააღმდეგობები. მაგალითად, HPV-ის როლი სინონაზალური პაპილომების პათოგენეზში ჯერ კიდევ რჩება დებატების თემად, კვლევების საფუძველზე შედეგები ურთიერთსაწინააღმდეგოა. გარდა ამისა, პროლიფერაციული და აპოპტოზური მარკერების გამოყენება შედეგების პროგნოზირებისთვის ჯერ კიდევ არ არის სარწმუნოდ კლინიკურ პრაქტიკაში მოწოდებული. ბევრი სამუშაოა საჭირო ამ ბიომარკერების კლინიკური ღირებულების დასადასტურებლად და პრაქტიკაში მათი ინტეგრირებისთვის.

რაც უფრო მეტს ვხსნით სინონაზალური პოლიპებისა და პაპილომების გენეტიკური და გარემო ფაქტორების შესახებ, მით უფრო მეტად არსებობს შესაძლებლობა განვავითაროთ მკურნალობის უფრო პერსონალიზებული მიდგომები, შევამციროთ პაციენტის უარყოფითი შედეგები და შემცირდეს ასევე რეციდივების სიხშირე.

სინონაზალური პოლიპები და პაპილომები წარმოადგენს მნიშვნელოვან კლინიკურ ერთეულებს მათი გავრცელების, რეციდივის პოტენციალისა და მენეჯმენტის გამოწვევების გამო. ამ მდგომარეობების გლობალური სიხშირისა და გავრცელების გაგება გადამწყვეტია კლინიციისტებისთვის, მკვლევარებისთვის და საზოგადოებრივი

ჯანდაცვის პროფესიონალებისთვის, რადგან ის გვაწვდის მიმართულებას რესურსების განაწილების, კვლევის პრიორიტეტებისა და პრევენციული სტრატეგიების შემუშავებისათვის.

სინონაზალური პოლიპები გავრცელებული მდგომარეობაა, განსაკუთრებით მოზრდილებში, პრევალენტობის სიხშირე მნიშვნელოვნად განსხვავდება სხვადასხვა პოპულაციაში. გლობალურად, სინონაზალური პოლიპების გავრცელება შეფასებულია 1%-დან 4%-მდე დიაპაზონში ზოგად პოპულაციაში, უფრო მაღალი მაჩვენებელი დაფიქსირდა პაციენტებში ასთმით, ალერგიული რინიტით და სხვა ქრონიკული ანთებითი დაავადებებით. დასავლეთის ქვეყნებში, როგორცაა ამერიკის შეერთებული შტატები და ევროპის სხვადასხვა ნაწილი, პრევალენტობა ზოგადად უფრო მაღალია, ზოგიერთმა კვლევამ აჩვენა მაჩვენებლები 5% -მდე. ეს შეიძლება გამოწვეული იყოს დიაგნოსტიკური კრიტერიუმების, გარემოს დაცვითი ზემოქმედების და გენეტიკური მიდრეკილებების განსხვავებებით.[2,3]

ამის საპირისპიროდ, სინონაზალური პოლიპების გავრცელება აზიურ პოპულაციაში უფრო დაბალია, ჩინეთიდან, იაპონიიდან და სამხრეთ კორეიდან ჩატარებული კვლევებით 0,5%-დან 2%-მდეა. ამ განსხვავებებზე შეიძლება გავლენა იქონიოს გენეტიკურმა ფაქტორებმა, გარემოზე ზემოქმედების ცვალებადობამ (მაგ., გარკვეული ალერგენების დაბალი მაჩვენებლები) და განსხვავებები ჯანდაცვის ხელმისაწვდომობისა და დიაგნოსტიკური პრაქტიკის მიხედვით.[6,7]

სიხშირის თვალსაზრისით, სინონაზალური პოლიპები, როგორც წესი, დიაგნოსტირებულია საშუალო ასაკის და ხანდაზმულებში, დაწყების საშუალო ასაკი 40-დან 60 წლამდეა. სიხშირე იზრდება ასაკთან ერთად, სავარაუდოდ ქრონიკული ანთების კუმულაციური ეფექტების, გარემოს ზემოქმედებისა და იმუნური ფუნქციის ასაკთან დაკავშირებული ცვლილებების გამო.

სინონაზალური პაპილომები შედარებით იშვიათია პოლიპებთან შედარებით, მაგრამ მათი კლინიკური მნიშვნელობა იზრდება ადგილობრივად აგრესიული მიმდინარეობის, რეციდივისა და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პოტენციალის გამო. სინონაზალური პაპილომების გლობალური სიხშირე შეფასებულია 0,5-დან 1,5 შემთხვევამდე 100000 ადამიანზე წელიწადში. თუმცა, ეს სიხშირე მერყეობს რეგიონის მიხედვით, უფრო მაღალი მაჩვენებელია დაფიქსირებული იმ ადგილებში, სადაც მნიშვნელოვანი ზემოქმედებაა გარემოსდაცვითი რისკის ფაქტორები, როგორცაა ინდუსტრიული დაბინძურება.

სინონაზალური პაპილომების სხვადასხვა ქვეტიპების გავრცელება ასევე განსხვავდება. ინვერტირებული პაპილომები, ყველაზე გავრცელებული ქვეტიპი, შეადგენს სინონაზალური პაპილომების დაახლოებით 60%-70%-ს. ეგზოფიტური პაპილომები, თუმცა ნაკლებად გავრცელებულია, მაინც მნიშვნელოვანია მათი რეციდივის

პოტენციალის გამო. ონკოციტური პაპილომები ყველაზე იშვიათია, შემთხვევების 5%-ზე ნაკლებს შეადგენს, მაგრამ აღსანიშნავია მათი ასოციაცია უფრო აგრესიულ კლინიკურ ქცევასთან.

ევროპასა და ჩრდილოეთ ამერიკიდან ჩატარებული კვლევების საფუძველზე სინონაზალური პაპილომები უფრო ხშირად დიაგნოსტირებულია მამაკაცებში, ვიდრე ქალებში, მამაკაცებისა და ქალების თანაფარდობით 2:1-დან 4:1-მდე. ეს გენდერული უთანასწორობა შეიძლება ასახავდეს განსხვავებებს პროფესიულ ექსპოზიციაში, ცხოვრების სტილის ფაქტორებში (მაგ., მოწევის მაჩვენებელი) და შესაძლოა ჰორმონალურ გავლენასაც კი. დიაგნოზისტირებისას საშუალო ასაკი ჩვეულებრივ 50-დან 60 წლამდეა, თუმცა შემთხვევები დაფიქსირდა ფართო ასაკობრივ დიაპაზონში. [8]

სინონაზალური პოლიპები იშვიათია ბავშვებში და მოზარდებში, სიხშირე სტაბილურად იზრდება ასაკთან ერთად. ეს ტენდენცია სავარაუდოდ გამოწვეულია ქრონიკული ანთების კუმულაციური ეფექტებით, გარემოზე ზემოქმედებით და ასაკთან დაკავშირებული იმუნური ცვლილებებით. ამის საპირისპიროდ, სინონაზალური პაპილომები ვლინდება საშუალო ასაკის მოზარდებში, პიკური სიხშირით 50-დან 60 წლამდე. ამ ასაკობრივი განაწილების მიზეზები ბოლომდე არ არის გასაგები, მაგრამ შეიძლება ეხებოდეს გენეტიკური მუტაციების დაგროვებისთვის საჭირო დროს და სხვა რისკ ფაქტორებს, რომლებიც ხელს უწყობენ პაპილომების განვითარებას.[9]

კვლევებმა აჩვენა, რომ ზოგიერთი ეთნიკური ჯგუფი უფრო მიდრეკილია სინონაზალური პოლიპების განვითარებისკენ. მაგალითად, კავკასიური წარმოშობის ინდივიდებს აქვთ უფრო მაღალი გავრცელების მაჩვენებლები აზიური ან აფრიკული წარმოშობის პირებთან შედარებით. ამ განსხვავებების მიზეზები ბოლომდე არ არის ნათელი, მაგრამ შეიძლება შეიცავდეს გენეტიკურ მიდრეკილებებს, გარემოზე ზემოქმედებას და ჯანდაცვის ხელმისაწვდომობას.[10]

სოციალურ-ეკონომიკური მდგომარეობა ასევე მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ამ პირობების შემთხვევებსა და მართვაში. დაბალი სოციალურ-ეკონომიკური ფენის მქონე პირები ხშირად ექვემდებარებიან გარემოს დამაბინძურებლების მაღალ დონეს, აქვთ ნაკლები წვდომა ჯანდაცვაზე და შესაძლოა უფრო მეტად ჩაერთონ ისეთ ქცევებში, რომლებიც ზრდის სინონაზალური პოლიპების და პაპილომების განვითარების რისკს, როგორიცაა მოწევა. უფრო მეტიც, ჯანდაცვის ხელმისაწვდომობის უთანასწორობამ შეიძლება გამოიწვიოს დაგვიანებული დიაგნოსტიკა და არაოპტიმალური მკურნალობის შედეგები ამ პოპულაციებში.

გენეტიკური მიდრეკილება სინონაზალური პოლიპებისა და პაპილომების მიმართ ფართო კვლევის საგანია. ზოგიერთი გენეტიკური ვარიანტი ასოცირდება ამ დაზიანებების განვითარების გაზრდილ რისკთან, განსაკუთრებით იმ პირებში, რომლებსაც აქვთ ქრონიკული რინოსინუსიტის ან სხვა ანთებითი პირობების ოჯახის

ისტორია. მაგალითად, იმუნურ ფუნქციასთან დაკავშირებულ გენებში პოლიმორფიზმი, როგორიცაა IL-4, IL-13 და TNF- α , დაკავშირებულია სინონაზალური პოლიპებისადმი გაზრდილ მგრძნობელობასთან. გარდა ამისა, გენეტიკური მუტაციები EGFR და KRAS გენებში იყო ჩართული სინონაზალური პაპილომების პათოგენეზში, განსაკუთრებით იმ შემთხვევებში, რომლებიც განიცდიან ავთვისებიან ტრანსფორმაციას.[11,12]

გარემოს ზემოქმედება, განსაკუთრებით დამაბინძურებლებისა და ალერგენების მიმართ, მნიშვნელოვანი რისკ-ფაქტორებია სინონაზალური პოლიპებისა და პაპილომებისთვის. ჰაერის დაბინძურება, მათ შორის ნაწილაკების და ქიმიური გამლიზიანებლების ჩათვლით, ასოცირდება სინონაზალური პოლიპების განვითარების რისკთან. ჰაერის დაბინძურების მაღალი დონის მქონე ქალაქებში მცხოვრებ პირებს უფრო მეტად უვითარდებათ ქრონიკული რინოსინუსიტი და, შემდგომში, სინონაზალური პოლიპები. [12]

ალერგენები, როგორიცაა ყვავილის მტვერი, მტვრის ტკიპები და ობის, ასევე მნიშვნელოვანი გარემო ფაქტორებია სინონაზალური პოლიპების განვითარებაში. ალერგიული რინიტი, რომელიც გამოწვეულია ამ ალერგენებით, არის პოლიპების განვითარების საერთო წინამორბედი. ალერგენების ქრონიკული ზემოქმედება იწვევს ცხვირის ლორწოვანი გარსის მუდმივ ანთებას, რაც საბოლოოდ შეიძლება გამოიწვიოს პოლიპების წარმოქმნა.

პროფესიული ზემოქმედება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სინონაზალური პაპილომების განვითარებისთვის. ადამიანები, რომლებიც მუშაობენ ისეთ ინდუსტრიებში, როგორიცაა ხის დამუშავება, ტყავის წარმოება და ქიმიური წარმოება, ამ დაზიანებების განვითარების რისკის ქვეშ არიან. ეს პროფესიები ხშირად მოიცავს კანცეროგენულ ნივთიერებების ზემოქმედებას, როგორიცაა ფორმალდეჰიდი, ნიკელი და ქრომი, რომლებიც, როგორც ცნობილია, დამატებით ხელს უწყობენ პაპილომების განვითარებას.

ცხოვრების სტილი, მათ შორის მოწევა და დიეტა, ასევე მნიშვნელოვან როლს თამაშობს სინონაზალური პოლიპების და პაპილომების განვითარებაში. მოწევა არის კარგად ჩამოყალიბებული რისკის ფაქტორი ორივე მდგომარეობისთვის, მწვევლებს უფრო მეტად უვითარდებათ სინონაზალური პოლიპები და პაპილომები არამწვევლებთან შედარებით. თამბაქოს კვამლის კანცეროგენული ზემოქმედება განსაკუთრებით აქტუალურია სინონაზალური პაპილომების განვითარებაზე, რომლებსაც აქვთ ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის განსაზღვრული პოტენციალი.[12]

დიეტურ ფაქტორებმა ასევე შეუძლია გავლენა მოახდინოს სინონაზალური პოლიპების განვითარების რისკზე, თუმცა მტკიცებულება ნაკლებად ნათელია. ზოგიერთი კვლევა ვარაუდობს, რომ დიეტა, რომელიც მდიდარია გაჯერებული ცხიმებით და დაბალი ანტიოქსიდანტებით, შეიძლება ხელი შეუწყოს ქრონიკულ ანთებას და პოლიპების

განვითარებას. პირიქით, ხილით, ბოსტნეულით და ომეგა -3 ცხიმოვანი მჟავებით მდიდარ დიეტას შეიძლება ჰქონდეს დამცავი ეფექტი მათი ანთების საწინააღმდეგო თვისებების გამო.

გარემო და ცხოვრების წესის ფაქტორების კომბინირებულმა ეფექტებმა შეიძლება მნიშვნელოვნად გაზარდოს სინონაზალური პოლიპებისა და პაპილომების განვითარების რისკი. მაგალითად, პირებს, რომლებიც ეწევიან და ექვემდებარებიან ჰაერის დაბინძურების მაღალ დონეს, შეიძლება ჰქონდეთ ამ პირობების განვითარების სინერგიულად გაზრდილი რისკი. ანალოგიურად, კანცეროგენებთან პროფესიული ზემოქმედების მქონე პირები, რომლებსაც ასევე აქვთ ცუდი დიეტური ჩვევები, შეიძლება იყვნენ მაღალი რისკის ქვეშ.

სინონაზალური პოლიპების უფრო მაღალი სიხშირე პაპილომებთან და კიბოებთან შედარებით ხაზს უსვამს იმ მნიშვნელოვან ტვირთს, რომელსაც ეს დაზიანებები იწვევს ჯანდაცვის სისტემაში. გარდა ამისა, სინონაზალური პაპილომების რეციდივის სიხშირე, რომელიც შეიძლება მერყეობდეს 10%-დან 78%-მდე, ხაზს უსვამს ამ დაზიანებების ეფექტურად მართვის გამოწვევას.

ანთებითი სინონაზალური პოლიპები (Inflammatory sinonasal polyps : ISNPs) არის CRSwNP (ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით), რომელიც ხასიათდება მათი არანეოპლასტიური ბუნებით და ასოცირდება ცხვირის და პარანაზალური სინუსების ლორწოვანი გარსის ქრონიკულ ანთებასთან. ეს პოლიპები, რომლებიც შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს ზომის, ფორმისა და განაწილების მიხედვით, წარმოადგენს კლინიკურ და ჰისტოპათოლოგიურ გამოწვევებს უნიკალურ კომპლექტს.[13]

კლინიკურად, ანთებითი სინონაზალური პოლიპები, როგორც წესი, რბილი, შემუშპებული და მონაცრისფრო-მოვარდისფროა გარეგნულად. ისინი ხშირად წარმოიქმნება შუა ან ეთმოიდური სინუსებიდან და შეიძლება გავრცელდეს ცხვირის ღრუში, გამოიწვიოს ცხვირის ობსტრუქცია, ყნოსვის დისფუნქცია და რინორეა.

ჰისტოლოგიურად, ანთებითი სინონაზალური პოლიპები ხასიათდება ფსევდოსტრატიფიცირებული მოციმციმე ცილინდრული ეპითელიუმის არსებობით ფიალისებური (Goblet Cells) უჯრედებით, თანდაყოლილ შემუშპებულ სტრომასთან ერთად, რომელიც შეიცავს ანთებით უჯრედებს, უპირატესად ეოზინოფილებს. გაზრდილი ეოზინოფილების. პოხიერ უჯრედების და IgE-ის შემცველი უჯრედების არსებობა პოლიპის ქსოვილში მიუთითებს ალერგიულ ან ანთებით პროცესზე.[14]

ანთებითი სინონაზალური პოლიპების კლინიკური გამოვლინება ხშირად ეტაპობრივია, სიმპტომები, როგორც წესი, ვითარდება რამდენიმე თვიდან რამდენიმე წლამდე. პაციენტები ჩვეულებრივ უჩივიან ცხვირის ობსტრუქციას, რინორეას, ანოსმიას ან

ჰიპოსმიას და სახის მიდამოში წნევის შეგრძნებას და/ან ტკივილს. ცხვირის ობსტრუქციის ხარისხი შეიძლება განსხვავდებოდეს, ზოგიერთ პაციენტს აღენიშნება მსუბუქი დისკომფორტი და სხვები აღნიშნავენ ცხვირის სრულ ბლოკირებას. ანოსმია, ყნოსვის დაკარგვა, განსაკუთრებით შემაშფოთებელია მრავალი პაციენტისთვის და ხშირად ყველაზე მნიშვნელოვანი სიმპტომაა. ის ხშირად მოხსენებულია, როგორც ორმხრივი სიმპტომი, თუმცა ზოგიერთ შემთხვევაში ის შეიძლება იყოს ცალმხრივი, პოლიპების სივრცისა და ლოკალიზაციის მიხედვით.

სხვა სიმპტომები შეიძლება შეიცავდეს სინუსების ხშირი ინფექციებს და ხვრინვას. მძიმე შემთხვევებში, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც პოლიპები დიდი ან მრავალრიცხოვანია, პაციენტებს შეიძლება განუვითარდეთ პირით სუნთქვა, ძილის დარღვევა და ძილის აპნოე კი, ცხვირის გასასვლელების ობსტრუქციის გამო. თანმხლები პირობების არსებობამ, როგორიცაა ასთმა ან ასპირინით გამწვავებული რესპირატორული დაავადება (aspirin-exacerbated respiratory disease : AERD), შეიძლება გააძლიეროს ეს სიმპტომები და გაართულოს მკურნალობა.[15]

ფიზიკური გამოკვლევის დროს ცხვირის ენდოსკოპია სასურველი მეთოდია პოლიპების ვიზუალიზაციისთვის. პოლიპები, როგორც წესი, ვიზუალიზდება ფერმკრთალი, შეშუპებული და მზინავი მასების სახით ცხვირის ღრუში. მათ ხშირად აღწერენ, როგორც "ყურძნის მსგავსი" გარეგნობის მათი გლუვი, მომრგვალო ფორმის გამო. ენდოსკოპიური გამოკვლევა საშუალებას იძლევა შეფასდეს პოლიპების ზომის, ლოკალიზაციისა და რაოდენობის, აგრეთვე ნებისმიერი ასოცირებული მდგომარეობის არსებობა, როგორიცაა ლორწოვანი ჩირქოვანი გამონადენი ან სტრუქტურული ანომალიები, როგორიცაა გადახრილი ძგიდე.

ჰისტოპათოლოგიურად, ანთებითი სინონაზალური პოლიპები ხასიათდება ჰიპერპლასტიკური, ანთებითი სტრომით, რომელიც დაფარულია ფსევდოსტრუქტურული მოციმციმე ცილინდრული ეპითელიუმით. ეპითელიური შრე ხშირად სქელდება ქრონიკული ანთების გამო და ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება შეინიშნოს ბრტყელუჯრედოვანი მეტაპლაზიის არეები, განსაკუთრებით პაციენტებში, რომლებსაც ანამნეზში აქვთ თამბაქოს მოხმარება ან ქრონიკული გალიზიანება.[16,17]

სინონაზალური პოლიპების ანთებითი სტრომა შეშუპებულია მიქსოიდური ფონის შემცველობით. ეს შეშუპებითი სტრომა ხშირად ინფილტრირებულია შერეული ანთებითი უჯრედების პოპულაციის მიერ, მათ შორის ეოზინოფილები, ნეიტროფილები, ლიმფოციტები და პლაზმური უჯრედები. განსაკუთრებით აღსანიშნავია ეოზინოფილების არსებობა, რადგან ეოზინოფილური ინფილტრაცია არის CRSwNP(ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით)-ის დამახასიათებელი ნიშანი და ასოცირდება უფრო მძიმე დაავადებასთან და მკურნალობის შემდეგ რეციდივის უფრო მაღალი ალბათობასთან.[18]

ლორწოვანი ჯირკვლები და ფიალისებური (Goblet Cells) უჯრედები ხშირად ვლინდება პოლიპებში, რაც ხელს უწყობს ლორწოს ჭარბი გამომუშავებას, რაც დამახასიათებელია ამ მდგომარეობისთვის. ზოგიერთ შემთხვევაში, მიკროაბსცესები, რომლებიც შედგება ნეიტროფილებისაგან, შეიძლება შეინიშნოს სტრომის შიგნით, განსაკუთრებით პოლიპებში, რომლებიც დაკავშირებულია ქრონიკულ ბაქტერიულ ინფექციებთან.

პოლიპების შიგნით სისხლძარღვები, როგორც წესი, გაფართოებულია და შეიძლება გამოვლინდეს ნეოვასკულარიზაციის ნიშნები, განსაკუთრებით უფრო ქრონიკულ ან მძიმე შემთხვევებში. ითვლება, რომ ეს ნეოვასკულარიზაცია არის პასუხი პოლიპის ქსოვილში ქრონიკულ ანთებასა და ჰიპოქსიაზე.[19]

ვიზუალიზაციის ტექნიკა, როგორიცაა კომპიუტერული ტომოგრაფია (CT) და მაგნიტურ-რეზონანსული ტომოგრაფია (MRI), ხშირად გამოიყენება ჰისტოპათოლოგიური შეფასების დასასრულებლად და დაავადების მასშტაბის უფრო ყოვლისმომცველი შეფასებისთვის. CT სკანირება განსაკუთრებით სასარგებლოა სინუსების ჩართულობის მასშტაბისა და ძვლოვანი ცვლილებების შეფასებისთვის, როგორიცაა რემოდელირება ან ეროზია. MRI, მიუხედავად იმისა, რომ ნაკლებად გამოიყენება, შეუძლია დამატებითი ინფორმაციის მიწოდება პოლიპების რბილი ქსოვილების მახასიათებლების შესახებ და განასხვავოს კეთილთვისებიანი და ავთვისებიანი დაზიანებები.

ანთებითი სინონაზალური პოლიპების პათოგენეზი რთული და მულტიფაქტორულია, რომელიც მოიცავს მრავალფეროვან მოლეკულურ და უჯრედულ პროცესებს. წლების განმავლობაში, კვლევამ გამოავლინა რამდენიმე ძირითადი მარკერი, რომლებიც დაკავშირებულია ამ პოლიპების განვითარებასთან და პროგრესირებასთან.[20]

ციტოკინები და ქემოკინები გადამწყვეტ როლს თამაშობენ ანთებით პროცესებში, რომლებიც საფუძვლად უდევს სინონაზალური პოლიპების განვითარებას. Th2 ციტოკინები, როგორიცაა ინტერლეიკინ-4 (IL-4), ინტერლეიკინ-5 (IL-5) და ინტერლეიკინ-13 (IL-13), განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია CRSwNP (ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით)-ში, სადაც ისინი აღძრავენ ეოზინოფილურ ანთებას და ხელს უწყობენ IgE-ს გამომუშავებას. IL-5 განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან ის ხელს უწყობს ეოზინოფილების დიფერენციაციას, აქტივაციას და გადარჩენას, რაც იწვევს მათ დაგროვებას პოლიპებში. IL-5-ის მომატებული დონე დაკავშირებულია უფრო მძიმე დაავადებასთან და რეციდივის უფრო მაღალ ალბათობასთან.

IL-4 და IL-13 ხელს უწყობს T უჯრედების დიფერენციაციას Th2 უჯრედებად და აძლიერებს IgE-ს გამომუშავებას B უჯრედების მიერ. ეს ციტოკინები ასევე ხელს უწყობს ლორწოს გამომუშავებას ფიალისებური უჯრედების მიერ, რაც ხელს უწყობს დამახასიათებელ ლორწოვან ჰიპერსეკრეციას, რომელიც შეინიშნება CRSwNP (ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით)-ის მქონე პაციენტებში.

Th2 ციტოკინების გარდა, სინონაზალური პოლიპების დროს მომატებულია რამდენიმე ანთების საწინააღმდეგო ციტოკინი, როგორიცაა სიმსივნის ნეკროზის ფაქტორი-ალფა (TNF- α), ინტერლეიკინ-1 β (IL-1 β) და ინტერლეიკინ-6 (IL-6). ეს ციტოკინები ხელს უწყობენ ქრონიკულ ანთებით მდგომარეობას დამატებითი ანთებითი უჯრედების მოზიდვის ხელშეწყობით, ადჰეზიური მოლეკულების ექსპრესიის გაძლიერებით და მატრიქსის მეტალოპროტეინაზების (MMPs) წარმოების სტიმულირებით.[1,21]

ზრდის ფაქტორები ასევე მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ ანთებითი სინონაზალური პოლიპების პათოგენეზში. მაგალითად, სისხლძარღვთა ენდოთელური ზრდის ფაქტორი (VEGF) მონაწილეობს პოლიპების შიგნით დაფიქსირებულ ნეოვასკულარიზაციაში. VEGF ხელს უწყობს ენდოთელური უჯრედების პროლიფერაციას და ახალი სისხლძარღვების წარმოქმნას, რაც აუცილებელია მზარდი პოლიპური ქსოვილის ჟანგბადითა და საკვები ნივთიერებებით მომარაგებისთვის. VEGF-ის ამადლებული დონე ასოცირდება პოლიპების უფრო ფართო ზრდასთან და რეციდივის უფრო დიდ ალბათობასთან.

ტრანსფორმაციის ზრდის ფაქტორი ბეტა (TGF- β) არის კიდევ ერთი ძირითადი ზრდის ფაქტორი, რომელიც მონაწილეობს სინონაზალური პოლიპების პათოგენეზში. TGF- β აქვს ორმაგი როლი ანთებასა და ფიბროზში. ერთის მხრივ, ის თრგუნავს ანთებით პასუხს T უჯრედების პროლიფერაციის ინჰიბირებით და პრო-ანთებითი ციტოკინების გამომუშავებით. მეორე მხრივ, ის ხელს უწყობს ქსოვილის ფიბროზს უჯრედგარე მატრიქსის ცილების წარმოების სტიმულირებით, როგორიცაა კოლაგენი. სინონაზალური პოლიპების კონტექსტში, TGF- β შეიძლება წვლილი შეიტანოს ფიბროზისა და ქსოვილის რემოდელირების განვითარებაში, განსაკუთრებით ხანგრძლივი ან მორეციდივე პოლიპების დროს.[22]

გენეტიკური ფაქტორები ასევე ხელს უწყობენ სინონაზალური პოლიპების ანთებითი პროცესის მგრძნობელობას და პროგრესირებას. იმუნურ ფუნქციასთან დაკავშირებული გენებში პოლიმორფიზმი, როგორიცაა IL-4, IL-13 და TNF- α , დაკავშირებულია CRSwNP (ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით) -ის განვითარების გაზრდილ რისკთან. ამ პოლიმორფიზმებმა შეიძლება გამოიწვიოს ციტოკინის გამომუშავების ან სიგნალის შეცვლა, რაც ხელს უწყობს სინონაზალური პოლიპებისთვის დამახასიათებელ ქრონიკულ ანთებას.[23]

იმუნურ სისტემასთან დაკავშირებული გენების გარდა, პოლიმორფიზმი გენებში, რომლებიც მონაწილეობენ არაქიდონის მჟავის მეტაბოლიზმში, როგორიცაა ALOX5 (რომელიც აკოდირებს 5-ლიპოქსიგენაზას), ჩართული იყო CRSwNP (ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით)-ის პათოგენეზში, განსაკუთრებით AERD-ის მქონე პაციენტებში. ამ გენეტიკურმა ცვალებადობამ შეიძლება გამოიწვიოს ლეიკოტრიენების ჭარბი წარმოება, რომლებიც წარმოადგენენ ძლიერ ანთებით

შუამავლებს, რომლებიც ხელს უწყობენ ეოზინოფილურ ანთებას და პოლიპების წარმოქმნას.

უჯრედულ დონეზე, რამდენიმე მარკერი ასოცირდება ანთებასთან და ქსოვილის რემოდელირებასთან, რომელიც შეინიშნება სინონაზალური პოლიპების დროს. ეოზინოფილები არის CRSwNP (ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით)-ის დამახასიათებელი ნიშანი და მათი არსებობა პოლიპებში ხშირად გამოიყენება როგორც დაავადების სიმძიმის მარკერი. ეოზინოფილური კათიონური ცილა (ECP), ტოქსიკური ცილა, რომელიც გამოიყოფა გააქტიურებული ეოზინოფილებით, ხშირად მომატებულია CRSwNP (ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით) -ით დაავადებული პაციენტების ქსოვილსა და ცხვირის სეკრეტში.

სხვა უჯრედული მარკერები მოიცავს პოხიერი უჯრედების არსებობას, რომლებიც ხელს უწყობენ ანთებით პასუხს ჰისტამინის, პროტეაზებისა და ციტოკინების გამოთავისუფლებით. პოხიერი უჯრედების გააქტიურება და მათი შუამავლების შემდგომი გამოთავისუფლება თამაშობს როლს სინონაზალური პოლიპების დროს დაფიქსირებულ ქრონიკულ ანთებასა და ქსოვილის რემოდელირებაში.[24]

მატრიქსის მეტალოპროტეინაზები (MMPs), განსაკუთრებით MMP-9, მონაწილეობენ უჯრედგარე მატრიქსის დეგრადაციაში და მომატებულია მათი ექსპრესია სინონაზალურ პოლიპებში. MMP-ები ხელს უწყობენ ქსოვილის რემოდელირებას და შეუძლიათ შეასრულონ მნიშვნელოვანი როლი რეციდივის განვითარებაში.[25]

მიკრობიოტის როლი ანთებითი სინონაზალური პოლიპების პათოგენეზში არც ისე დიდი ხანია, რაც მზარდი კვლევის საგანია. ცხვირისა და სინუსების ღრუში არის მიკროორგანიზმების მრავალფეროვანი მოსახლეობა, მათ შორის ბაქტერიები, სოკოები და ვირუსები. ჯანმრთელ ადამიანებში ეს მიკრობული საზოგადოებები არსებობს ბალანსის მდგომარეობაში, იმუნური ჰომეოსტაზის შენარჩუნებაში როლს თამაშობენ კომენსალური ბაქტერიები.[26]

ქრონიკული რინოსინუსიტის მქონე პაციენტებში ეს ბალანსი ხშირად ირღვევა, რაც იწვევს დისბიოზის და პათოგენური მიკროორგანიზმების ჭარბ ზრდას. ბაქტერიული სახეობები, როგორიცაა *Staphylococcus aureus*, განსაკუთრებით მისი ბიოფილმის ფორმირების შტამები, ჩართულია ცხვირის ღრუს პოლიპებით მიმდინარე დაავადებების პათოგენეზში. ამ ბაქტერიებს შეუძლიათ თავი აირიდონ იმუნურ სისტემას ბიოფილების წარმოქმნით, რომელიც იცავს მათ მასპინძლის თავდაცვითი და ანტიბიოტიკების ზემოქმედებისაგან. *S. aureus*-ის არსებობა დაკავშირებულია უფრო მძიმე ანთებასთან, IgE-ის მაღალ დონესთან და რეციდივის უფრო დიდ ალბათობასთან.

სოკოვანი ელემენტები ასევე ჩართულია ქრონიკული რინოსინუსიტის პათოგენეზში, განსაკუთრებით პაციენტებში ალერგიული სოკოვანი რინოსინუსიტით (AFRS). სოკოს სპორებმა შეიძლება გამოიწვიოს გადაჭარბებული იმუნური პასუხი მგრძნობიარე ინდივიდებში, რაც გამოიწვევს ეოზინოფილური მუცინის წარმოქმნას და პოლიპების განვითარებას.

ქსოვილის რემოდელირება არის ქრონიკული ანთებითი მდგომარეობის დამახასიათებელი ნიშანი. ცხვირის და სინუსების ლორწოვან გარსში მუდმივი ანთება იწვევს ფიბრობლასტების და სხვა სტრომული უჯრედების გააქტიურებას, რაც ხელს უწყობს უჯრედგარე მატრიქსის ცილების გამომუშავებას და ფიბროზის განვითარებას. ამ რემოდელირების პროცესმა შეიძლება გამოიწვიოს ლორწოვანი გარსის გასქელება, პოლიპების წარმოქმნა და, ზოგიერთ შემთხვევაში, ნორმალური ქსოვილის არქიტექტურის განადგურება.

ბიოლოგიური თერაპია, რომელიც მიმართულია სპეციფიკურ ციტოკინებზე, როგორიცაა IL-5 (მაგ., მეპოლიზუმაბი) და IgE (მაგ., ომალიზუმაბი), ასევე იყო მრავალი კლინიკური კვლევის საგანი. ამ კვლევებმა აჩვენა ბიოლოგიური საშუალებების ეფექტურობა პოლიპების ზომის შემცირებაში, სიმპტომების გაუმჯობესებაში და ოპერაციის საჭიროების შემცირებაში მძიმე ან რეფრაქტერული CRSwNP (ქრონიკული რინოსინუსიტის ქვეჯგუფი ცხვირის პოლიპებით) -ის მქონე პაციენტებში. ამ კვლევების შედეგებმა გამოიწვია რამდენიმე ბიოლოგიური აგენტის დამტკიცება CRSwNP-ის სამკურნალოდ და ხაზგასმით აღნიშნეს კონკრეტული ანთებითი მნიშვნელობა ამ მდგომარეობის მართვაში.

ქირურგიული ჩარევები, როგორიცაა ენდოსკოპიური სინუსის ქირურგია (ESS), ასევე შეფასებული იყო კლინიკურ კვლევებში, კვლევებით, რომლებიც ადარებდნენ სხვადასხვა ქირურგიული ტექნიკის შედეგებს და ქირურგიის როლს სამედიცინო თერაპიასთან ერთად. ამ კვლევებმა აჩვენა ESS-ის სარგებელი ცხოვრების ხარისხის გაუმჯობესებაში, სიმპტომების შემცირებასა და ადგილობრივი მედიკამენტების მიწოდების გაძლიერებაში, თუმცა რეციდივის რისკი კვლავ გამოწვევად რჩება.[27–29]

კლინიკურმა კვლევებმა, რომლებიც იკვლევს ანტიბიოტიკების, სოკოს საწინააღმდეგო საშუალებების და სხვა დამხმარე თერაპიების როლს, აჩვენა მიკრობული ფაქტორების მნიშვნელობა სინონაზალური პოლიპების მკურნალობაში და ხაზგასმულია ანტიმიკრობული თერაპიის კომბინირების პოტენციური სარგებელი სტანდარტული ანთების საწინააღმდეგო მკურნალობასთან.

ინვერტირებული პაპილომა (IP) არის სინონაზალური პაპილომების ყველაზე გავრცელებული და კლინიკურად მნიშვნელოვანი ქვეტიპი, რომელიც შეადგენს შემთხვევების 50%-დან 70%-მდე. IP-ები უნიკალურია პაპილომებს შორის ადგილობრივი აგრესიული ქცევით, რეციდივის მაღალი სიხშირით (20-30%-მდე) და

ასოცირდება ბრტყელუჯრედოვან კარცინომასთან (SCC) შემთხვევების დაახლოებით 5-15%-ში. IP-ების ეტიოლოგია გაურკვეველი რჩება, მაგრამ რამდენიმე ფაქტორი, გამოკვეთილია, როგორიცაა ვირუსული ინფექციები (განსაკუთრებით ადამიანის პაპილომა ვირუსი [HPV]), ქრონიკული ანთება და გარემოზე ზემოქმედება.

ინვერტირებული პაპილომები IP-ები ძირითადად გავლენას ახდენენ მოზარდებზე, პიკური სიხშირით სიცოცხლის მეხუთე და მეექვსე ათწლეულებში. არსებობს მამაკაცის მიდრეკილება, მამაკაცისა და ქალის თანაფარდობით დაახლოებით 3:1. კლინიკურად, IP-ებს ხშირად ახასიათებთ ცხვირის ცალმხრივი ობსტრუქცია, ეპისტაქსია და რინორეა. ზოგიერთ პაციენტს შეიძლება ჰქონდეს სახის ტკივილი, ანოსმია ან სინუსიტთან დაკავშირებული სიმპტომები სინუსური წიაღების ობსტრუქციის გამო. IP-ები, როგორც წესი, ცალმხრივია, მაგრამ დაფიქსირდა ორმხრივი შემთხვევები, განსაკუთრებით მორეციდივე ან მულტიფოკალური დაავადების დროს.

ჰისტოლოგიურად, IP-ებს ახასიათებს ბრტყელი ეპითელიუმის პროლიფერაცია, რომელიც ჩაზრდილია ქვემდებარე სტრომაში, აქედან მოდის ტერმინი „ინვერტირებული“. ეპითელიუმი ხშირად სქელდება და შეიძლება გამოვლინდეს სხვადასხვა ხარისხის კერატინიზაცია, დისპლაზია ან კარცინომა *in situ*. სტრომა, როგორც წესი, შედგება ფიბროზული ან შემუშავებული მატრიქსისგან, სხვადასხვა ხარისხის ანთებით, განსაკუთრებით ლიმფოციტური და პლაზმური უჯრედების ინფილტრაციით. ეოზინოფილების და ნეიტროფილების არსებობა ნაკლებად ხშირია, მაგრამ შეიძლება შეინიშნოს ზოგიერთ შემთხვევაში.

IP-ების ერთ-ერთი მთავარი ჰისტოპათოლოგიური მახასიათებელია ბაზალური მემბრანის არსებობა, რომელიც გამოყოფს ეპითელიუმს ქვემდებარე სტრომისგან. ეს ბაზალური მემბრანა ხშირად იშლება დისპლაზიის ან ინვაზიური კარცინომის ადგილებში. ციტოკერატინების იმუნოჰისტოქიმიური შეღებვა, განსაკუთრებით CK5/6 და CK14, შეიძლება დაეხმაროს ეპითელიუმის ბრტყელი ბუნების დადასტურებას. p16, მაღალი რისკის HPV-ს დამხმარე მარკერი, ცვალებადია გამოხატული IP-ებში. [30,31]

ინვერტირებული პაპილომის/IP-ების მოლეკულური პათოგენეზი რთული და მრავალფაქტორიანია, რომელიც მოიცავს გენეტიკურ ცვლილებებს, ვირუსულ ინფექციებს და გარემო ფაქტორებს. მუტაციები EGFR გენში, განსაკუთრებით ეგზონებში 19 და 21, გამოვლენილია IP-ების დაახლოებით 80%-ში და განიხილება ამ ქვეტიპის დამახასიათებელ ნიშნად. ეს მუტაციები იწვევს EGFR სასიგნალო გზის გააქტიურებას, რაც ხელს უწყობს უჯრედების პროლიფერაციას და გადარჩენას. სხვა გენეტიკური ცვლილებები, მათ შორის PIK3CA, PTEN და TP53 გენების მუტაციები, ასევე დაფიქსირდა IP-ებში, განსაკუთრებით ავთვისებიან ტრანსფორმაციასთან დაკავშირებულ შემთხვევებში.

HPV-ის როლი IP-ების პათოგენეზში საკმატოა და განსხვავდება გეოგრაფიულად. მაღალი რისკის HPV ქვეტიპები, განსაკუთრებით HPV16, გამოვლინდა IP-ების ქვეჯგუფში, განსაკუთრებით დისპლაზიის ან კარცინომის in situ შემთხვევებში. თუმცა, HPV-ის საერთო გავრცელება IP-ებში უფრო დაბალია, ვიდრე სხვა HPV-სთან ასოცირებულ ნეოპლაზმებში, როგორცაა ოროფარინგეალური ბრტყელუჯრედოვანი კარცინომა SCC.

ეგზოფიტური (ფუნგიფორმული) პაპილომა (FP) ასევე ცნობილი როგორც სოკოსებრი პაპილომა, არის სინონაზალური პაპილომების ყველაზე ნაკლებად გავრცელებული ქვეტიპი, რომელიც შეადგენს შემთხვევების 5%-დან 10%-მდე. FP-ები ზოგადად მიჩნეულია კეთილთვისებიანად და ნაკლებად სავარაუდოა, რომ ჰქონდეს რეციდივი ან განიცადოს ავთვისებიანი ტრანსფორმაცია IP-ებთან შედარებით. ისინი ხშირად ასოცირდება დაბალი რისკის HPV ქვეტიპებთან, განსაკუთრებით HPV6 და HPV11, რომლებიც ასევე მონაწილეობენ სხვა კეთილთვისებიანი პაპილომების პათოგენეზში, როგორცაა ხორხის პაპილომები.

ეგზოფიტური (ფუნგიფორმული) პაპილომა (FP), როგორც წესი, წარმოდგენილია როგორც ცალკეული, ეგზოფიტური მასა ცხვირის ღრუში, რომელიც ხშირად წარმოიქმნება ცხვირის ძგიდისგან. ისინი უფრო ხშირია მოზრდილებში, მცირე დომინანტური მამრობითი სქესის წარმომადგენლებში და, როგორც წესი, ვლინდება ცხვირის ობსტრუქციის, ეპისტაქსის სიმპტომებით ან ხილული მასით ცხვირის ღრუში. IP-ებისგან განსხვავებით, FP-ები ნაკლებად სავარაუდოა, რომ შეაღწიონ მიმდებარე სტრუქტურებში ან განმეორდეს სრული ამოკვეთის შემდეგ.

ჰისტოლოგიურად, ფუნგიფორმ პაპილომებს ახასიათებთ ეგზოფიტური ზრდის ნიმუში, ბრტყელი ეპითელიუმის პაპილარული ზრდით, რომელსაც მხარს უჭერს ფიბროვასკულური ღერძი. ეპითელიუმში, როგორც წესი, შედგება კარგად დიფერენცირებული ბრტყელი უჯრედებისგან, მინიმალური ციტოლოგიური ატიპიით ან დისპლაზიით. სტრომა ხშირად უჯრედულია, სხვადასხვა რაოდენობით ანთებით, განსაკუთრებით ლიმფოციტებითა და პლაზმური უჯრედებით. იმუნოჰისტოქიმიურმა კვლევებმა შეიძლება აჩვენოს დაბალი რისკის მქონე HPV ქვეტიპების არსებობა, როგორცაა HPV6 და HPV11, FP-ების ქვეჯგუფში.

ციტოკერატინების იმუნოჰისტოქიმიური შედეგა, განსაკუთრებით CK7 და CK19, შეიძლება დაეხმაროს FP-ების განასხვავებას სხვა კეთილთვისებიანი და ავთვისებიანი ნეოპლაზმებისგან. HPV დნმ შეიძლება გამოვლინდეს FP-ების უმეტესობაში, განსაკუთრებით იმ შემთხვევებში, რომლებიც დაკავშირებულია დაბალი რისკის HPV ქვეტიპებთან. p16 გამოხატულება ჩვეულებრივ სუსტია ან არ არსებობს FP-ებში, რაც ასახავს ასოცირებული HPV ქვეტიპების დაბალ ონკოგენურ პოტენციალს.[32,33]

FP-ების მოლეკულური პროფილი განსაზღვრავს მათ დაბალ სიხშირეს და ნაკლებად აგრესიულ კლინიკურ ქცევას. HPV6 და HPV11 არის ყველაზე გავრცელებული HPV ქვეტიპები, რომლებიც გამოვლენილია FP-ებში და ითვლება, რომ ეს დაბალი რისკის ქვეტიპები თამაშობენ როლს სიმსივნის პათოგენეზში. IP-სგან განსხვავებით, EGFR გენში მუტაციები იშვიათია FP-ებში და სხვა გენეტიკური ცვლილებები, როგორიცაა PIK3CA ან PTEN მუტაციები, ფართოდ არ არის მოხსენებული.

ონკოციტური პაპილომა (OP), ასევე ცნობილი როგორც ცილინდრულ- უჯრედოვანი პაპილომა, არის სინონაზალური პაპილომის განსხვავებული ქვეტიპი, რომელიც ხასიათდება მისი უნიკალური ჰისტოპათოლოგიური მახასიათებლებით და ასოცირდება ქრონიკულ ანთებასთან. OP-ები შეადგენენ სინონაზალური პაპილომების დაახლოებით 5%-დან 10%-მდე და მიჩნეულია, რომ მათ აქვთ უფრო რთულად კლინიკური მიმდინარეობა IP-ებთან შედარებით.

OP-ები, როგორც წესი, გავლენას ახდენენ ხანდაზმულებზე, პიკური სიხშირით ცხოვრების მეექვსე-მეშვიდე ათწლეულებში. არ არსებობს მნიშვნელოვანი გენდერული მიდრეკილება. კლინიკურად, OP-ებს ხშირად ახასიათებთ სხვა სინონაზალური პაპილომების მსგავსი სიმპტომები, მათ შორის ცხვირის ობსტრუქცია, ეპისტაქსია და რინორეა. თუმცა, OPs უფრო მეტად დაკავშირებულია ქრონიკულ სინუსიტთან და სხვა ანთებით პროცესებთან, რაც ასახავს მათ კავშირს ქრონიკულ ანთებასთან.

ჰისტოლოგიურად, OP-ებს ახასიათებთ ონკოციტური (ცილინდრული) უჯრედების გამრავლება უხვი ეოზინოფილური ციტოპლაზმით და პატარა, ერთგვაროვანი ბირთვებით. ეს უჯრედები განლაგებულია პაპილარული პროექციებით, ხშირად მრავალშრიანი ან ფსევდოსტრუქტურირებულია. სტრომა ჩვეულებრივ ბოჭკოვანია, სხვადასხვა რაოდენობით ანთებით, მათ შორის ლიმფოციტები, პლაზმური უჯრედები და ეოზინოფილები. მუცინის გამომუშავება ხშირად ვლინდება და ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება შეინიშნოს ბრტყელი მეტაპლაზიის არეები.

იმუნოჰისტოქიმიური კვლევის მეთოდი ისეთი მარკერების გამოყენებით, როგორიცაა CK7, CK19 და MUC5AC, შეიძლება დამხმარე აღმოჩნდეს OP-ის დიაგნოზის დასადასტურებლად და მის განსასხვავებლად სხვა სინონაზალური ნეოპლაზიებისგან. IP-სგან განსხვავებით, OP-ები, როგორც წესი, უარყოფითია HPV დნმ-ზე და p16 -ის ექსპრესია ჩვეულებრივ არ არსებობს ან სუსტია.[34]

OP-ების მოლეკულური პათოგენეზი ნაკლებად არის შესწავლილი IP-ებთან შედარებით, რაც განპირობებულია მათი დაბალი სიხშირითა და ნაკლებად აგრესიული კლინიკური ქცევით. EGFR მუტაციები იშვიათია OP-ებში და სხვა გენეტიკური ცვლილებები, როგორიცაა KRAS ან BRAF-ის მუტაციები, ფართოდ არ არის შესწავლილი. HPV დნმ-ის არარსებობა OP-ების უმრავლესობაში მიუთითებს იმაზე, რომ HPV არ არის ძირითადი ეტიოლოგიური ფაქტორი ამ სიმსივნეების განვითარებაში.

სინონაზალური პაპილომების შესწავლა, მათ შორის ინვერტირებული პაპილომები (IPs), ეგზოფიტური პაპილომები (FPs) და ონკოციტური პაპილომები (OPs), იძლევა ღირებულ შეხედულებებს ამ სიმსივნეების მრავალფეროვან ფენოტიპურ მახასიათებლებზე და ფუძემდებლურ მექანიზმებზე. თითოეულ ქვეტიპს აქვს უნიკალური კლინიკური, ჰისტოლოგიური და მოლეკულური მახასიათებლები, რომლებიც გავლენას ახდენენ მათ ქცევაზე, მკურნალობის სტრატეგიებზე და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პოტენციალზე.

HPV-ისა და p16-ის როლი სინონაზალურ პაპილომებში არის მუდმივი კვლევის სფერო, სადა არის HPV უფრო მნიშვნელოვან როლი ინვერტირებულ პაპილომებში თუ ონკოციტურ პაპილომებში. HPV16, მაღალი რისკის ქვეტიპი, ასოცირდება ინვერტირებული პაპილომების უფრო აგრესიულ ფორმებთან და შეიძლება იყოს პროგნოზული მარკერი. p16, მაღალი რისკის მქონე HPV-ს დამხმარე მარკერი, ცვალებადია გამოხატული სინონაზალური პაპილომებში, უფრო მაღალი ექსპრესიით HPV-დადებით ინვერტირებულ პაპილომებში და სუსტი ან არარსებული ექსპრესიით ეგზოფიტურ და ონკოციტურ პაპილომებში.

დასასრულს, ფენოტიპური მახასიათებლების, მოლეკულური პროფილებისა და HPV-ს როლის უფრო სიღრმისეული გაგება სინონაზალური პაპილომებში გადამწყვეტია ზუსტი დიაგნოზის, ეფექტური მართვისა და დამიზნებითი თერაპიის შემუშავებისთვის. ამ სიმსივნეების მოლეკულური და გენეტიკური საფუძვლების უწყვეტი კვლევა გააძლიერებს ჩვენს უნარს განვასხვავოთ კეთილთვისებიანი და ავთვისებიანი ფორმები, რაც გააუმჯობესებს პაციენტის კლინიკურ შედეგებს და უკეთ წარმართავს პერსონალიზირებული მკურნალობის სტრატეგიებს.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Lisan Q, Laccourreye O, Bonfils P. Sinonasal inverted papilloma: From diagnosis to treatment. Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis 2016;133:337–41. <https://doi.org/10.1016/J.ANORL.2016.03.006>.
- [2] Mirza S, Bradley PJ, Acharya A, Stacey M, Jones NS. Sinonasal inverted papillomas: Recurrence, and synchronous and metachronous malignancy. Journal of Laryngology and Otology 2007;121:857–64. <https://doi.org/10.1017/S002221510700624X>.
- [3] Mirza S, Bradley PJ, Acharya A, Stacey M, Jones NS. Sinonasal inverted papillomas: Recurrence, and synchronous and metachronous malignancy. Journal of Laryngology and Otology 2007;121:857–64. <https://doi.org/10.1017/S002221510700624X>.

- [4] Paehler vor der Holte A, Fangk I, Glombitza S, Wilkens L, Welkoborsky HJ. Impact of human papillomaviruses (HPV) on recurrence rate and malignant progression of sinonasal papillomas. *Cancer Med* 2021;10:634–41.
<https://doi.org/10.1002/CAM4.3642;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:20457634;WGR OUP:STRING:PUBLICATION>.
- [5] Zhang L, Wang C. Surgical strategy for resection of sinonasal inverted papilloma. *Chinese Journal of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery* 2020;55:8–13.
<https://doi.org/10.3760/CMA.J.ISSN.1673-0860.2020.01.003>.
- [6] Re M, Gioacchini FM, Bajraktari A, Tomasetti M, Kaleci S, Rubini C, et al. Malignant transformation of sinonasal inverted papilloma and related genetic alterations: a systematic review. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* 2017;274:2991–3000.
<https://doi.org/10.1007/S00405-017-4571-2>.
- [7] Re M, Gioacchini FM, Bajraktari A, Tomasetti M, Kaleci S, Rubini C, et al. Malignant transformation of sinonasal inverted papilloma and related genetic alterations: a systematic review. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* 2017;274:2991–3000.
<https://doi.org/10.1007/S00405-017-4571-2>.
- [8] D’Errico A, Zajacova J, Cacciatore A, Baratti A, Zanelli R, Alfonzo S, et al. Occupational risk factors for sinonasal inverted papilloma: A case-control study. *Occup Environ Med* 2013;70:703–8. <https://doi.org/10.1136/OEMED-2013-101384>.
- [9] Contrera KJ, Woody NM, Rahman M, Sindwani R, Burkey BB. Clinical management of emerging sinonasal malignancies. *Head Neck* 2020;42:2202–12.
<https://doi.org/10.1002/HED.26150>.
- [10] Pähler vor der Holte A, Fangk I, Glombitza S, Wilkens L, Welkoborsky HJ. Prognostic factors and risk factors for development and recurrence of sinonasal papillomas: potential role of different HPV subtypes. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* 2020;277:767–75. <https://doi.org/10.1007/S00405-019-05747-4>.
- [11] Liu W, Li Z, Luo Q, Lai Y, Zhang J, Chen F, et al. The elevated expression of osteopontin and vascular endothelial growth factor in sinonasal inverted papilloma and its relationship with clinical severity. *Am J Rhinol Allergy* 2011;25:313–7.
<https://doi.org/10.2500/AJRA.2011.25.3662>.
- [12] Moon IJ, Lee DY, Suh MW, Han DH, Kim ST, Min YG, et al. Cigarette smoking increases risk of recurrence for sinonasal inverted papilloma. *Am J Rhinol Allergy* 2010;24:325–9.
<https://doi.org/10.2500/AJRA.2010.24.3510>.

- [13] Sham CL, To KF, Chan PKS, Lee DLY, Tong MCF, Van Hasselt CA. Prevalence of human papillomavirus, Epstein-Barr virus, p21, and p53 expression in sinonasal inverted papilloma, nasal polyp, and hypertrophied turbinate in Hong Kong patients. *Head Neck* 2012;34:520–33. <https://doi.org/10.1002/HED.21772>.
- [14] Etiology of sinonasal inverted papilloma: A narrative review - ScienceDirect n.d. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095881116300713> (accessed May 27, 2026).
- [15] Deitmer T, Wiener C. Is there an occupational etiology of inverted papilloma of the nose and sinuses? *Acta Otolaryngol* 1996;116:762–5. <https://doi.org/10.3109/00016489609137921>.
- [16] Kim JY, Yoon JK, Citardi MJ, Batra PS, Roh HJ. The prevalence of human papilloma virus infection in sinonasal inverted papilloma specimens classified by histological grade. *Am J Rhinol* 2007;21:664–9. <https://doi.org/10.2500/ajr.2007.21.3093>.
- [17] Roh HJ, Procop GW, Batra PS, Citardi MJ, Lanza DC. Inflammation and the pathogenesis of inverted papilloma. *Am J Rhinol* 2004;18:65–74. <https://doi.org/10.1177/194589240401800201>.
- [18] Byun JY, Lee SH, Shin JM, Baek BJ, Lee JY. Overexpression of angiominin in sinonasal inverted papilloma. *Int Forum Allergy Rhinol* 2014;4:512–6. <https://doi.org/10.1002/alr.21293>.
- [19] Wang MJ, Noel JE. Etiology of sinonasal inverted papilloma: A narrative review. *World J Otorhinolaryngol Head Neck Surg* 2017;3:54–8. <https://doi.org/10.1016/J.WJORL.2016.11.004>.
- [20] Li-Jessen NYK, Powell M, Choi AJ, Lee BJ, Thibeault SL. Cellular source and proinflammatory roles of high-mobility group box 1 in surgically injured rat vocal folds. *Laryngoscope* 2017;127:E193–200. <https://doi.org/10.1002/LARY.26333>.
- [21] Busquets JM, Hwang PH. Endoscopic resection of sinonasal inverted papilloma: A meta-analysis. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 2006;134:476–82. <https://doi.org/10.1016/J.OTOHNS.2005.11.038>.
- [22] Kim CJ, Tambe Y, Mukaisho KI, Sugihara H, Kageyama S, Kawauchi A, et al. Periostin suppresses in vivo invasiveness via PDK1/AKT/mTOR signaling pathway in a mouse orthotopic model of bladder cancer. *Oncol Lett* 2017;13:4276–84. <https://doi.org/10.3892/OL.2017.6004>.

- [23] Clinical characteristics and recurrence predictors of sinonasal inverted papilloma: a retrospective cohort study - PMC n.d.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12009903/> (accessed May 27, 2026).
- [24] Li XH, Wang DF, Yin DT. Clinical characteristics and recurrence predictors of sinonasal inverted papilloma: a retrospective cohort study. *Front Oncol* 2025;15:1537905.
<https://doi.org/10.3389/FONC.2025.1537905>.
- [25] Tolboom TCA, Pieterman E, Van der Laan WH, Toes REM, Huidekoper AL, Nelissen RGHH, et al. Invasive properties of fibroblast-like synoviocytes: Correlation with growth characteristics and expression of MMP-1, MMP-3, and MMP-10. *Ann Rheum Dis* 2002;61:975–80. <https://doi.org/10.1136/ARD.61.11.975>.
- [26] Lawson W, Ho BT, Shaari CM, Biller HF. Inverted papilloma a report of 112 cases. *Laryngoscope* 1995;105:282–8. <https://doi.org/10.1288/00005537-199503000-00011>.
- [27] Habib ARR, Hathorn I, Sunkaraneni VS, Srubiski A, Javer AR. Blood transfusion requirements for endoscopic sinonasal inverted papilloma resections. *Journal of Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 2013;42. <https://doi.org/10.1186/1916-0216-42-44>.
- [28] Habib ARR, Hathorn I, Sunkaraneni VS, Srubiski A, Javer AR. Blood transfusion requirements for endoscopic sinonasal inverted papilloma resections. *Journal of Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 2013;42. <https://doi.org/10.1186/1916-0216-42-44>.
- [29] Busquets JM, Hwang PH. Endoscopic resection of sinonasal inverted papilloma: A meta-analysis. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery* 2006;134:476–82.
<https://doi.org/10.1016/J.OTOHNS.2005.11.038>.
- [30] Myers EN, Fernau JL, Johnson JT, Tabet JC, Barnes EL. Management of inverted papilloma. *Laryngoscope* 1990;100:481–90. <https://doi.org/10.1288/00005537-199005000-00008>.
- [31] Lisan Q, Laccourreye O, Bonfils P. Sinonasal inverted papilloma: From diagnosis to treatment. *Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis* 2016;133:337–41.
<https://doi.org/10.1016/J.ANORL.2016.03.006>.
- [32] Syrjänen S, Syrjänen K. Hpv-associated benign squamous cell papillomas in the upper aero-digestive tract and their malignant potential. *Viruses* 2021;13.
<https://doi.org/10.3390/V13081624>.

- [33] Altavilla G, Staffieri A, Busatto G, Canesso A, Giacomelli L, Marioni G. Expression of p53, p16INK4A, pRb, p21WAF1/CIP1, p27KIP1, cyclin D1, Ki-67 and HPV DNA in sinonasal endophytic Schneiderian (inverted) papilloma. *Acta Otolaryngol* 2009;129:1242–9. <https://doi.org/10.3109/00016480802620647>.
- [34] Pajor AM, Danilewicz M, Stasikowska-Kanicka O, Józefowicz-Korczyńska M. The immunoexpression of CD34, Bcl-2, and Ki-67 antigens in sinonasal inverted papillomas. *Am J Rhinol Allergy* 2014;28. <https://doi.org/10.2500/ajra.2014.28.3980>.

Phenotypic characteristics of sinonasal polyps and papillomas, factors of recurrence and progression

Irina Nakhutsrishvili¹; Nato Nakudashvili²; Giorgi Burkadze³; Shota Kepuladze⁴

¹PhD student at Tbilisi State Medical University; MD; Otorhinolaryngologist; ²Professor of the Department of Otorhinolaryngology, Tbilisi State Medical University; ³Professor of the Department of Pathological Anatomy, Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; ⁴Pathologist, Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; Associate Professor of the Department of Molecular Pathology;

Critical review

Abstract

Sinonasal polyps and papillomas represent common pathological lesions of the upper respiratory tract which, despite their predominantly benign nature, are frequently associated with chronic progression, high recurrence rates, and in certain cases, malignant transformation potential. Sinonasal polyps are mainly associated with chronic rhinosinusitis, allergic and immunologic dysregulation, whereas sinonasal papillomas, particularly inverted papillomas, demonstrate locally aggressive behavior and an increased risk of squamous cell carcinoma development.

The aim of this critical review is to evaluate the phenotypic characteristics, histomorphological and molecular features, as well as the factors associated with recurrence and progression of sinonasal polyps and papillomas. The review discusses epidemiology, inflammatory microenvironment, cytokine and immunologic mechanisms, epithelial–mesenchymal transition-related processes, tissue remodeling, and the role of the microbiota. Particular emphasis is placed on the role of human papillomavirus (HPV), especially HPV16, in the pathogenesis and malignant progression of sinonasal papillomas.

This review also summarizes current evidence regarding molecular and immunohistochemical markers such as p16, EGFR, Ki67, VEGF, matrix metalloproteinases, and inflammatory cytokines, which may serve as valuable tools for disease prognostication, recurrence risk assessment, and the development of personalized therapeutic strategies. Analysis of the available literature demonstrates that the pathogenesis of sinonasal polyps and papillomas is multifactorial and heterogeneous, requiring further molecular and clinical investigations.

Comprehensive evaluation of the phenotypic and molecular profiles of sinonasal lesions may improve early diagnosis, facilitate more accurate prediction of recurrence and malignant transformation, and contribute to the development of targeted therapeutic approaches.

Keywords: sinonasal polyps, inverted papilloma, HPV16, p16, chronic rhinosinusitis, phenotypic heterogeneity, recurrence, malignant transformation.

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ირინა ნახუტყრიშვილი - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი ოტორინოლარინგოლოგი;

Irina Nakhutsrishvili - PhD student at Tbilisi State Medical University; otolaryngologist; +995599872727

ნატო ნაკუდაშვილი - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ოტორინოლარინგოლოგიის დეპარტამენტის პროფესორი;

Nato Nakudashvili - Professor of the Department of Otorhinolaryngology, Tbilisi State Medical University; +995 593 30 01 62
natonak@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9682-4535>

შოთა კეპულაძე - თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi

State Medical University; Doctor of Pathology;

Shota.kepuladze@gmail.com sh.kepuladze@tsmu.edu

<https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

გიორგი ბურკაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;

George Burkadze - Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department of Molecular Pathology;

E-mail: burkadze@yahoo.com g.burkadze@tsmu.edu

Phone Number: 599578833

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

მარკეტინგის სამსახურის თანამშრომლების შეფასების პარამეტრების სისტემის ჩამოყალიბება

ანა გერგაული

დოქტორანტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, <https://orcid.org/0009-0005-7371-0251>, gergauli.ana@gtu.ge

რეზიუმე

ორგანიზაციის მიზნების მისაღწევად უაღრესად მნიშვნელოვანია შესაბამისი ცოდნის, გამოცდილებისა და კვალიფიკაციის მქონე პერსონალის არსებობა, ვინაიდან მათ მუშაობაზეა დამოკიდებული ორგანიზაციის წარმატება და კონკურენტუნარიანობა ბაზარზე. კანდიდატების შესარჩევად და თანამშრომელთა მიერ შესრულებული სამუშაოს შესაფასებლად, აუცილებელია შეფასების პარამეტრების რელევანტური სისტემის შემუშავება. წინამდებარე სტატიაში განხილულია მარკეტინგული სამსახურის მაგალითზე თანამშრომლისთვის მნიშვნელოვანი პარამეტრების სისტემის ჩამოყალიბება, რომელიც, თავის მხრივ, გამოყენებული იქნება შემავალი პარამეტრების სახით ხელოვნური ნეირონული ქსელის მოდელში. პარამეტრების სისტემის დასადგენად, კვლევის პირველ ეტაპზე განხორციელდა სამეცნიერო ლიტერატურის ანალიზი, რომლის შედეგად დადგინდა, რომ თანამშრომლების/კანდიდატების შეფასების დროს შესაძლებელია გათვალისწინებულ იქნას ტექნიკური და რბილი უნარები, ასევე პიროვნული მახასიათებლები. შემდეგ ეტაპზე, თვისებრივი კვლევის ერთ-ერთი მეთოდის - ფოკუს ჯგუფის გამოყენებით, სფეროს ექსპერტების მიერ დაზუსტდა და გამოიკვეთა აღნიშნული უნარების კატეგორიები და თითოეული კატეგორიისთვის შესაბამისი პარამეტრები. პიროვნული მახასიათებლების შემთხვევაში მათში შემავალი კონკრეტული ნიშან-თვისებები დასახელდა, რისთვისაც გამოყენებული იყო დიდი ხუთეულის მოდელი. საბოლოო ჯამში, ჩატარებული კვლევებისა და ფოკუს ჯგუფის მუშაობის შედეგების დამუშავების საფუძველზე, მიღებულია მარკეტინგის განყოფილების თანამშრომლების შეფასების პარამეტრების საკმაოდ ვრცელი ჩამონათვალი, სადაც გაერთიანებულია სამუშაო პოზიციისთვის სპეციფიკური დარგობრივი უნარების, სტრატეგიული/ანალიტიკური კომპეტენციების, ლიდერული

და ინტერპერსონალური, ასევე გადაწყვეტილების მიღების უნარების და სხვა კატეგორიები, შესაბამისი პარამეტრებით.

საკვანძო სიტყვები: პერსონალის შერჩევა და შეფასება, ტექნიკური და რბილი უნარები, პიროვნული მახასიათებლების დიდი ხუთეულის მოდელი, ფოკუს ჯგუფის მეთოდი.

შესავალი

პროფესიონალი და კვალიფიციური კადრები არსებითად მნიშვნელოვანია ორგანიზაციის მიზნების მისაღწევად, რადგან ისინი უზრუნველყოფენ სამუშაო პროცესების ეფექტიანობას, ინოვაციურობასა და სამუშაოს მაღალი დონით შესრულებას. მათი ცოდნა და გამოცდილება არა მხოლოდ აჩქარებს მიზნების მიღწევას, არამედ უწყობს ხელს ორგანიზაციის სტრატეგიისა და ხედვის რეალიზაციას, რაც თავის მხრივ, უზრუნველყოფს გრძელვადიან წარმატებასა და კონკურენტულ უპირატესობას ბაზარზე. შესაბამისად, კრიტიკულად მნიშვნელოვანია თანამშრომლების შერჩევისა და შეფასების პროცესი, რაც განსაკუთრებით პრიორიტეტულია მარკეტინგის სამსახურის თანამშრომლებისა და მათი მენეჯერების შერჩევა-შეფასების დროს, როდესაც ყურადღება უნდა გამახვილდეს, როგორც ტექნიკურ (Hard skills), ისე რბილ უნარებზე (Soft skills). ტექნიკური უნარები მოიცავს თეორიულ და პრაქტიკულ ცოდნას, შესაძლებლობებს და სპეციფიკურ კომპეტენციებს, რომელიც საჭიროა კონკრეტული დავალების შესასრულებლად; მაშინ როდესაც, რბილი უნარები წარმოადგენს სოციალური, ინტერპერსონალური უნარების ნაკრებს, რომელიც უზრუნველყოფს კოლეგებთან კომუნიკაციის ეფექტიანად წარმართვას, პრობლემების გადაჭრასა და ლიდერული თვისებების გამოვლენას. ცალკე უნდა გამოიყოს პიროვნული მახასიათებლები, რომელიც ადამიანის ინდივიდუალური, უნიკალური მახასიათებლებია, რაც მას განასხვავებს სხვა ადამიანებისგან. აღნიშნული მახასიათებლები იმ გარემოზე არაა დამოკიდებული, სადაც ადამიანი მუშაობს, და როგორც წესი, დროთა განმავლობაში ცვლილებას არ განიცდის. ტექნიკური, რბილი უნარებისა და პიროვნული მახასიათებლების ბალანსი განსაზღვრავს თანამშრომლის წინსვლას და მის წვლილს ორგანიზაციის მიზნების მიღწევასა და ზოგად განვითარებაში.

ადამიანური რესურსების შეფასებისა და შერჩევის პროცედურისთვის გათვალისწინებულია ხელოვნურ ნეირონულ ქსელზე დაფუძნებული მოდელის აგება, რომელიც HR-მენეჯერებს (ადამიანური რესურსების მართვის მენეჯერებს) დაეხმარება თანამშრომელთა შერჩევისა და შეფასების პროცესში. აღნიშნული ხელოვნური ნეირონული ქსელისთვის უნდა განისაზღვროს შესასვლელი პარამეტრების სისტემა, რომლის მიხედვითაც განხორციელდება თანამშრომელთა შერჩევა და მათ მიერ შესრულებული სამუშაოს შეფასება. ამ მიზნით ჩატარდა ფოკუს ჯგუფი, რომლის მონაწილეები იყვნენ სხვადასხვა ორგანიზაციაში მოქმედი მარკეტინგის მენეჯერები (აღნიშნულ სფეროში 2 წელზე მეტი გამოცდილებით).

ძირითადი ნაწილი

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, დღევანდელ სწრაფად ცვალებად და კონკურენტულ გარემოში ორგანიზაციის წარმატებული ფუნქციონირებისთვის, დასახული სტრატეგიისა და მიზნების მისაღწევად, უმნიშვნელოვანეს როლს თამაშობს მაღალკვალიფიციური, სამუშაო პოზიციისთვის შესაბამისი ცოდნის, უნარებისა და გამოცდილების მქონე პერსონალი.

არსებული სამეცნიერო ლიტერატურის ჩატარებული კვლევის შედეგად დადგინდა, რომ თანამშრომლების/კანდიდატების შეფასება შესაძლებელია ტექნიკური და რბილი უნარებით, ასევე პერსონალური მახასიათებლებით (ნახ.1). ტექნიკური უნარები განისაზღვრება, როგორც კონკრეტული სამუშაო პოზიციისთვის საჭირო უნარების (მაგ. კომპიუტერული უნარები), ცოდნის, გამოცდილებისა და შესაძლებლობების კომბინაცია. ამისგან განსხვავებით, რბილი უნარები მოიცავს ადამიანის სოციალური უნარების, ემოციური ინტელექტისა და მახასიათებლების ერთობლიობას, რომელიც დაკავშირებულია სხვა ადამიანებთან (თანამშრომლებთან ან მომხმარებლებთან) ერთად მუშაობასა და ინტერაქციასთან, რაც საშუალებას აძლევს მათი ტექნიკური უნარები ეფექტიანად გადმოიტანონ სამუშაო გარემოში. აღნიშნული უნარების დასწავლა დროთა განმავლობაში შესაძლებელია, რასაც ვერ ვიტყვით პიროვნულ მახასიათებლებზე (Personality traits), რომელიც მოკლე დროში ცვლილებებს არ განიცდის (Gregorio, Maggioni, Mauri, & Mazzucchelli, 2019; Fantozzi, Martuscelli, Di Luo, & Schiraldi, 2024).



ნახ. 1. შეფასების პარამეტრების დაყოფა კვლევების მიხედვით

მარკეტინგის სამსახური წარმოადგენს ორგანიზაციის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ფუნქციურ ერთეულს, რომლის ძირითადი მიზნები მოიცავს ბაზრის შესწავლას, კონკურენტების გამოცდილების გაცნობას, მომხმარებელთა მოთხოვნილებების განსაზღვრას, წარმოებული პროდუქტის თუ მომსახურების პოპულარიზაციას, პარტნიორ ორგანიზაციებთან გრძელვადიანი თანამშრომლობის ჩამოყალიბებას და შენარჩუნებას (Shah & Murthi, 2021; Morgan & Feng, 2024). ბაზრის კვლევისა და ანალიზში მოიაზრება ბაზრის ტენდენციების, კონკურენტების, ასევე მომხმარებელთა ქცევის შესახებ ინფორმაციის შეგროვება და ანალიზი, რაც შემდგომ ხელს უწყობს ორგანიზაციის მიერ სტრატეგიის სწორად დაგეგმვასა და ბაზარზე კონკურენტული

უპირატესობის მიღწევას (Kalaighnam, Tuli, Kushwaha, Lee, & Ga, 2020; Morgan & Feng, 2024). მომხმარებელთა მოთხოვნილებებისა და საჭიროებების ზუსტად იდენტიფიცირებითა და შესაბამისი მარკეტინგული სტრატეგიის შემუშავებით, მარკეტინგის სამსახური უზრუნველყოფს კომპანიის მომხმარებელზე ორიენტირებულობასა და ბაზარზე პოზიციონირებას (Madhani, 2021). კომპანიის მიერ წარმოებული ბრენდისადმი მომხმარებელთა ცნობადობის, ნდობისა და ლოიალობის გაზრდის მიზნით, მარკეტინგის სამსახური მუდმივად ზრუნავს მიზნობრივი სარეკლამო და საზოგადოებასთან ურთიერთობის პოლიტიკის დანერგვაზე (Stone და Woodcock 2021, Qiu, Boukis და Storey 2022). მომხმარებელთა ქცევის პროგნოზირებისა და ამის საფუძველზე ეფექტიანი გადაწყვეტილებების მიღების მიზნით, აქტიურად გამოიყენება ანალიტიკური, ასევე ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული თანამედროვე მეთოდები და მიდგომები (Johnson, Sihi, & Muzellec, 2021; Wang, Bendle, & Pan, 2024).

აქედან გამომდინარე, მარკეტინგის მენეჯერის მოვალეობა (Kotabe & Helsen, 2022, pp. 19-20; Gregorio, Maggioni, Mauri, & Mazzucchelli, 2019) მოიცავს ბაზრის ტენდენციების შესწავლასა და შემდგომ ანალიზს, ასევე ინოვაციური იდეების გენერირებას და ინფორმაციის გადაცემას გუნდის წევრებისთვის, მომხმარებლებისა ან/და სხვა დაინტერესებული მხარეებისთვის, რისთვისაც სჭირდება ეფექტური კომუნიკაციის უნარები. ამასთან ერთად, აუცილებელია გააჩნდეს ორგანიზაციის საერთო ბიზნეს-მიზნებთან შესაბამისი გრძელვადიანი მარკეტინგული სტრატეგიების შემუშავების უნარებიც.

სამეცნიერო ლიტერატურაში (Santos, et al., 2021; Kotabe & Helsen, 2022; Gregorio, Maggioni, Mauri, & Mazzucchelli, 2019) აღნიშნულია, რომ მარკეტინგის მენეჯერი მასზე დაკისრებული მოვალეობის წარმატებით შესრულებისთვის, უნდა ფლობდეს ისეთ პროფესიულ უნარებსა და პიროვნულ მახასიათებლებს, როგორიცაა ანალიტიკური, სტრატეგიული აზროვნების, პროექტების მართვის, ბაზრის კვლევის, ფინანსების მართვის და პრობლემების გადაჭრის უნარები, ასევე, სიახლეებისადმი ღიაობა, კრეატიულობა, შესაბამისი კომპიუტერული პროგრამების ცოდნა, მედეგობა (პრობლემებთან გამკლავება), გუნდურად მუშაობის უნარები, დეტალებისადმი ყურადღება, დროის მენეჯმენტი, კომუნიკაბელურობა და სხვა.

კვლევის მეთოდოლოგია

პარამეტრების სისტემის დასადგენად გამოყენებულ იქნა თვისებრივი კვლევის ერთ-ერთი მეთოდი - ფოკუს-ჯგუფი, რომელშიც მონაწილეობა მიიღო სხვადასხვა ორგანიზაციის 26-დან 35 წლამდე 14 მარკეტინგისა და გაყიდვების განყოფილებების მენეჯერმა. ჩატარდა 2 ფოკუს-ჯგუფი. მიზანი იყო საქართველოში მარკეტინგის მენეჯერის პოზიციაზე დასაქმებულთათვის საჭირო ტექნიკური და რბილი უნარების, ასევე პიროვნული მახასიათებლების შესწავლა.

ძირითადი საკითხები, რომელზეც უნდა ემსჯელათ ფოკუს ჯგუფის მონაწილეებს იყო ის, თუ სამუშაოს შესრულების პროცესში რომელი თანამდებობის პირებთან აქვთ ყველაზე ხშირი კონტაქტი, მათი გამოცდილებიდან (სამუშაოს სპეციფიკიდან) გამომდინარე რა ტექნიკური, რბილი უნარები და პიროვნული მახასიათებლებია საჭირო მათზე დაკისრებული მოვალეობების კარგად შესასრულებლად.

კვლევის ძირითადი შედეგები

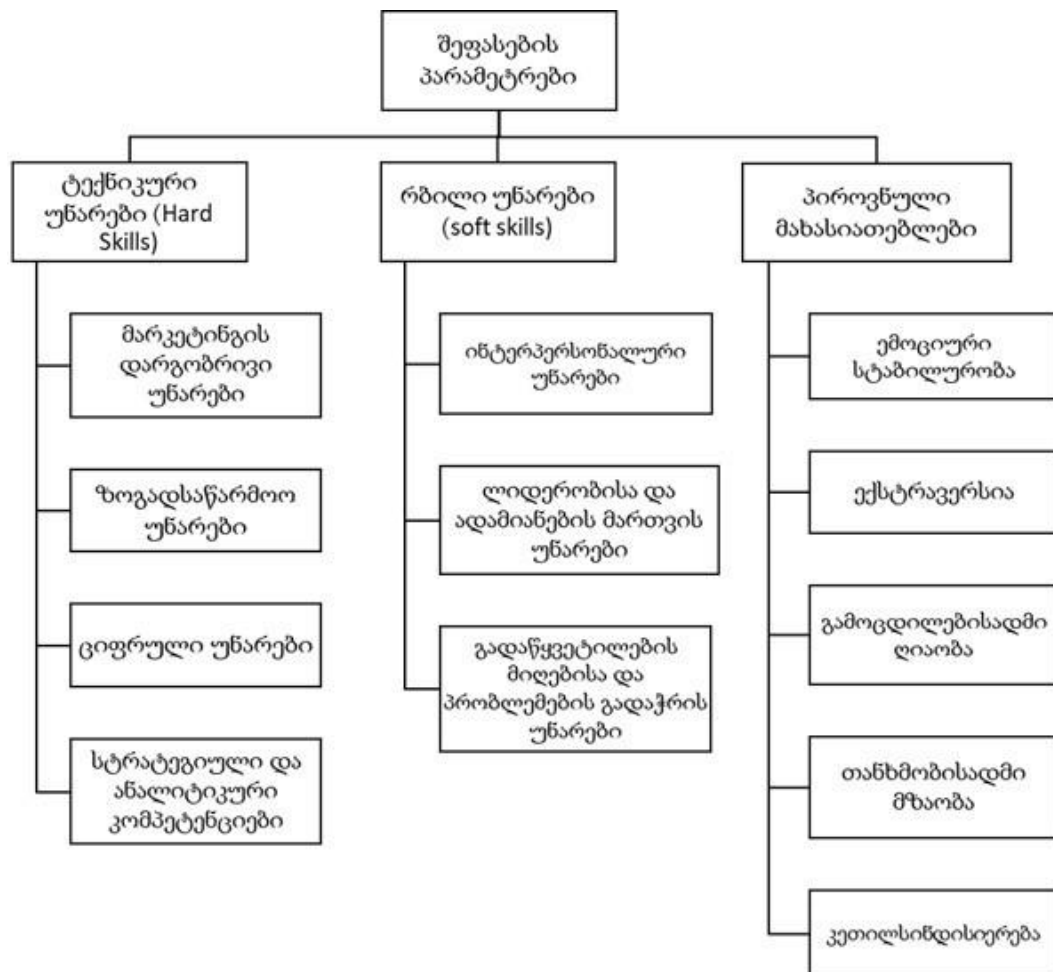
ჩატარებული კვლევის შედეგად გამოვლინდა, რომ ფოკუს-ჯგუფის მონაწილე მარკეტინგის მენეჯერებს ყოველდღიური მუშაობის პროცესში თავიანთი განყოფილების თანამშრომლების გარდა, ყველაზე ხშირი და აქტიური კონტაქტი აქვთ ზედა რგოლის მენეჯერებთან (სხვა დეპარტამენტის ხელმძღვანელები), შესყიდვებისა და გაყიდვების სპეციალისტებთან, დიზაინერებთან (მაგ. გრაფიკული დიზაინერი), კომერციულ დირექტორებთან და ადამიანური რესურსების მართვის მენეჯერებთან, ასევე სოციალური მედია მენეჯერებთან და ქოფირაითერებთან, დეველოპერებთან და ონლაინ კომუნიკაციის ოპერატორებთან (ციფრული მარკეტინგის მენეჯერის შემთხვევაში).

ფოკუს-ჯგუფის მონაწილეების მიერ საკმაოდ ვრცლად იყო ჩამოთვლილი ის ტექნიკური და რბილი უნარები, რომელიც, როგორც წესი, სჭირდებათ სამუშაო პროცესში. შემდეგ აღნიშნული ჯგუფები დაიყო ცალკეულ კატეგორიებად (ნახ.2).

ტექნიკური უნარები მოიცავს 4 ძირითად კატეგორიას, ესენია: მარკეტინგის დარგობრივი უნარები; ზოგადსაწამო უნარები, რომელიც მოიაზრებს კონკრეტული წარმოებისა და მომსახურების პროცესების ცოდნას, რაც თავის მხრივ, ეხმარება ამოცანებისა და მიზნების რეალისტურად დასახვაში, რომელიც სრულ თანხვედრაშია ორგანიზაციის შესაძლებლობებთან და სტრატეგიულ მიზნებთან; ციფრულ უნარებსა და სტრატეგიულ/ანალიტიკურ კომპეტენციებს.

რბილი უნარებისთვის გამოიკვეთა შემდეგი სამი კატეგორია: ინტერპერსონალური უნარები, ლიდერობისა და ადამიანების მართვის უნარები, და გადაწყვეტილების მიღებისა და პრობლემების გადაჭრის უნარები.

პიროვნული მახასიათებლების ჩამოყალიბებისთვის გამოყენებულ იქნა დიდი ხუთეულის ჩამონათვალი, კერძოდ ემოციური სტაბილურობა, ექსტრავერსია, გამოცდილებისადმი ღიაობა, თანხმობისადმი მზაობა და კეთილსინდისიერება/პატიოსნება.



ნახ. 2. შეფასების ჯგუფების დაყოფა კატეგორიებად და პარამეტრებად

ტექნიკური უნარების კატეგორიების კლასიფიკაცია პარამეტრებად მოცემულია ნახ.3-ზე. მარკეტინგის დარგობრივი უნარების კატეგორია, მომხმარებელთა ურთიერთობის მენეჯმენტის გარდა, მოიცავს სიზუსტეს ამოცანის დასმაში, დეტალებზე ორიენტაციას, თავისი სფეროს ცოდნას, და რამდენიმე მარკეტინგული ამოცანის ერთდროულად მართვის უნარს, ამასთან მონაცემებზე დამყარებული გადაწყვეტილების მიღებას, სტატისტიკის მეთოდების ცოდნას და გამოყენას, მიღებული შედეგების ანგარიშებში სინთეზირების უნარსა და მარკეტინგული ამოცანების გადაჭრის გამოცდილებას, რაც შეიძლება განისაზღვროს მენეჯერის მიერ ადრე შესრულებული სამუშაოების ან პროექტების რაოდენობის მიხედვით.

ზოგადსაწარმოო უნარებში მოიაზრება კომპანიისა და მისი მომხმარებლების ცოდნა, ასევე კვალიფიციური მოთხოვნები თანამშრომლების მიმართ.

ციფრული უნარების კატეგორიებში დაზუსტდა კონკრეტული პროგრამული უზრუნველყოფებიც, რომელთა ცოდნისა და მუშაობის გამოცდილება სასურველია ჰქონდეს მარკეტინგის მენეჯერს, ესენია: მუშაობის გამოცდილება კრეატიული საქმიანობის მხარდამჭერ ისეთ პროგრამებთან, როგორიცაა Canva, Illustrator, ასევე ქოფირაითინგი (მარკეტინგული სახის ტექსტების წერის ხელოვნება), Microsoft Office-ის პროგრამები, Meta-ს ანალიტიკური ინსტრუმენტებისა და ციფრული მარკეტინგის ისეთი

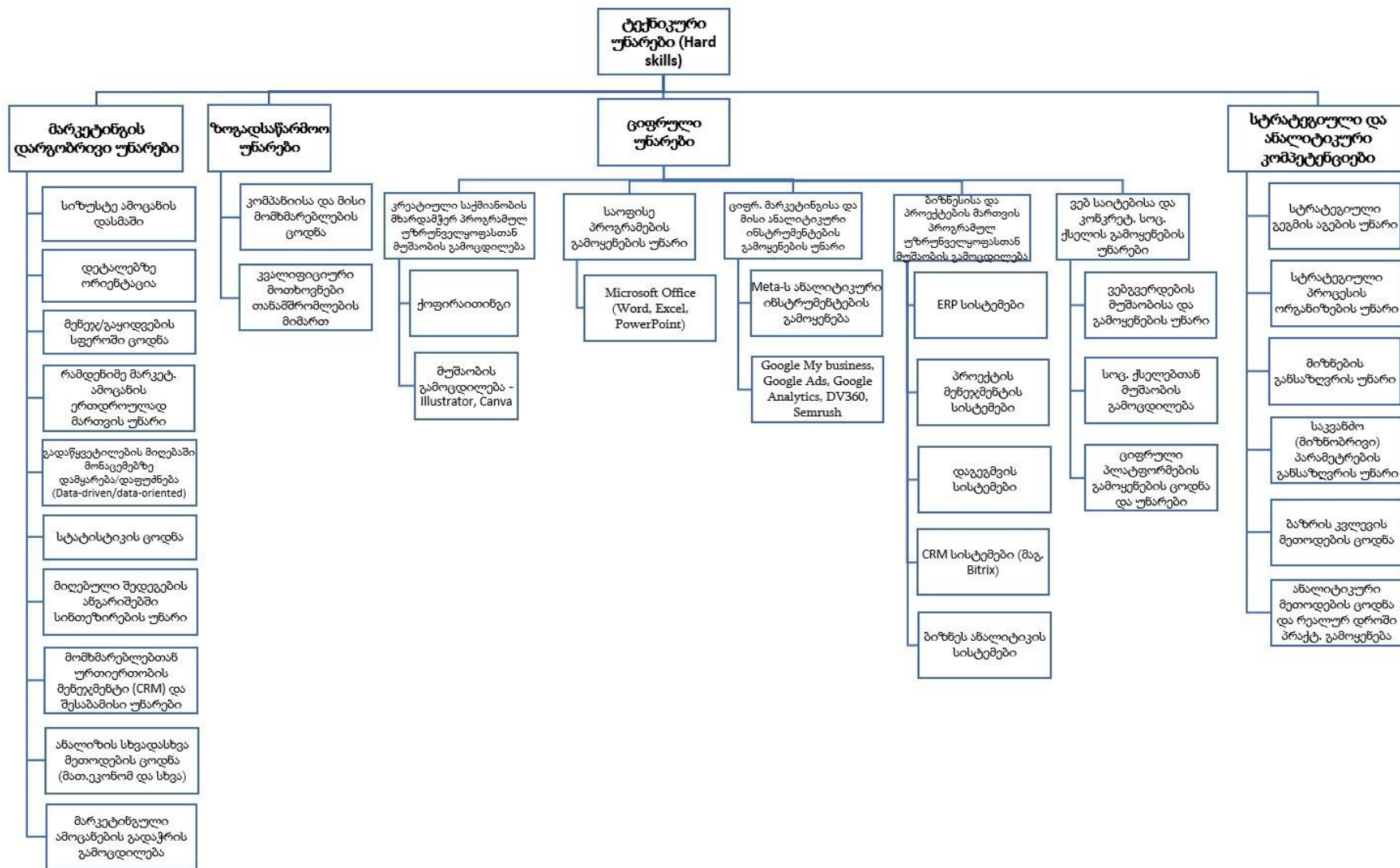
ისტრუმენტების გამოყენების უნარები, როგორიცაა Google My business, Google Ads, Google Analytics, და შედარებით მსხვილი და მაღალმზიუჯეტური ორგანიზაციების შემთხვევაში - DV360 და Semrush ციფრული მარკეტინგის პლატფორმები.

ბიზნესისა და პროექტების მართვის კატეგორიაში დასახელდა ERP სისტემის, ასევე პროექტების მართვის, დაგეგმვისა და ბიზნეს ანალიტიკის სისტემებთან მუშაობის გამოცდილება.

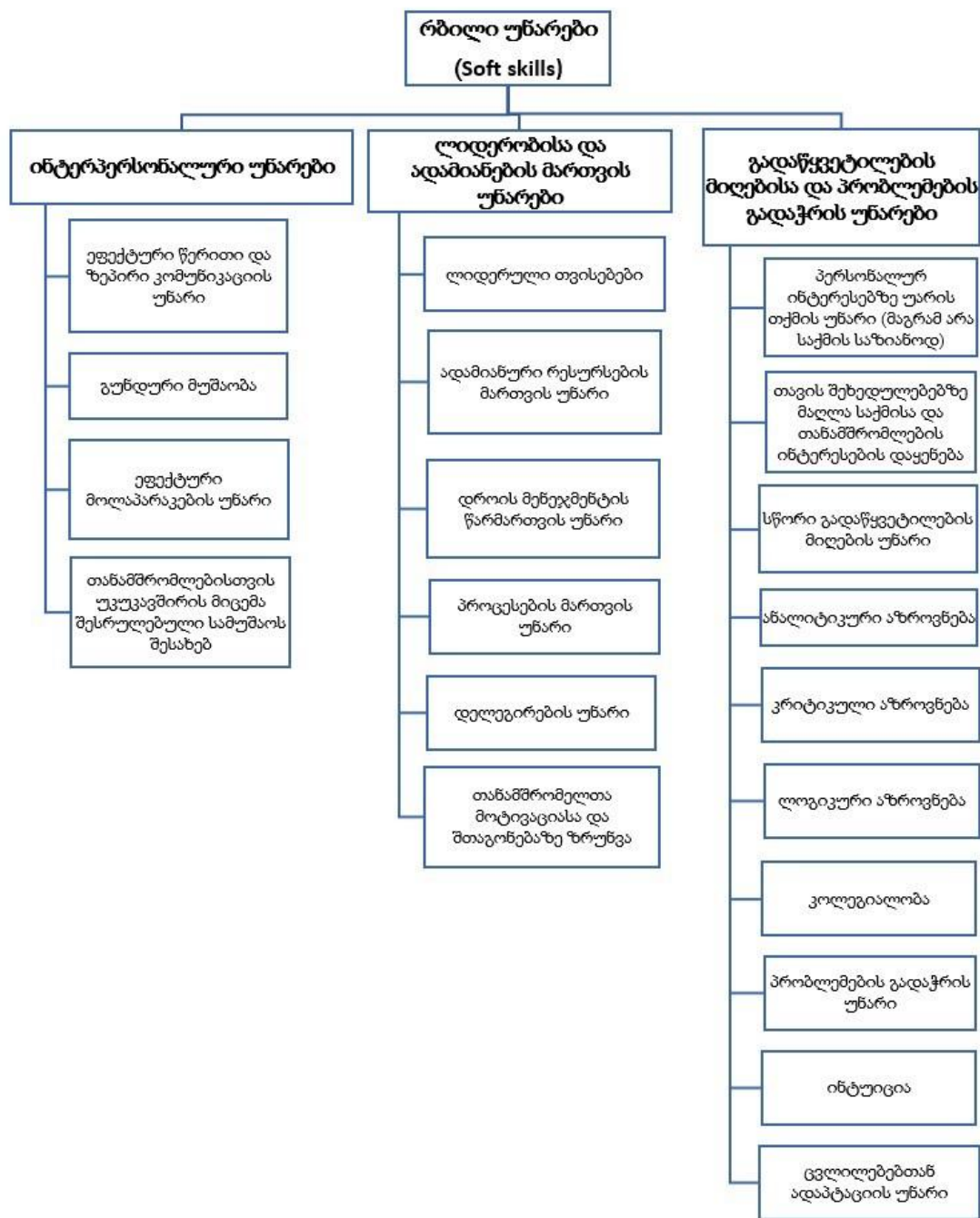
სტრატეგიული და ანალიტიკური კომპეტენციების კატეგორიის ფარგლებში განისაზღვრა ისეთი პარამეტრები, როგორიცაა: სტრატეგიული გეგმის აგების, პროცესების ორგანიზების უნარები, ასევე მიზნობრივი პარამეტრების განსაზღვრის, ბაზრის კვლევისა და ანალიტიკური მეთოდების ცოდნა, მათი რეალურ დროში პრაქტიკული გამოყენება.

რბილი უნარებისთვის გამოიკვეთა შემდეგი სამი კატეგორია (ნახ.4): ინტერპერსონალური უნარები, ლიდერობისა და ადამიანების მართვის უნარები, და გადაწყვეტილების მიღებისა და პრობლემების გადაჭრის უნარები. თავის მხრივ, თითოეულ კატეგორიის ქვეშ გამოიყო ცალკეული პარამეტრები. კერძოდ, ინტერპერსონალური უნარების ქვეშ დასახელდა ეფექტური წერითი და ზეპირი კომუნიკაციის, მოლაპარაკების წარმოების და გუნდური მუშაობის, ასევე თანამშრომლებისთვის მათ მიერ შესრულებული სამუშაოს შესახებ შესაბამისი უკუკავშირის მიცემის უნარები.

ლიდერობისა და ადამიანების მართვის უნარების კატეგორიაში განისაზღვრა შემდეგი პარამეტრები: დროის მენეჯმენტის წარმართვის, პროცესების მართვის, დელეგირების უნარები, ასევე ლიდერული და თანამშრომელთა მოტივაციასა და შთაგონებაზე ზრუნვის უნარები; ხოლო გადაწყვეტილების მიღებისა და პრობლემების გადაჭრის უნარების კატეგორიაში გაერთიანდა შემდეგი პარამეტრები: საკუთარ ინტერესებსა და შეხედულებებზე მაღლა საქმისა და თანამშრომლების ინტერესების დაყენება, სწორი გადაწყვეტილების მიღების უნარი, ანალიტიკური/კრიტიკული/ლოგიკური აზროვნება, ინტუიცია და ადაპტურობა.



ნახ. 3. ტექნიკური უნარების დაჯგუფება კატეგორიებისა და პარამეტრების მიხედვით

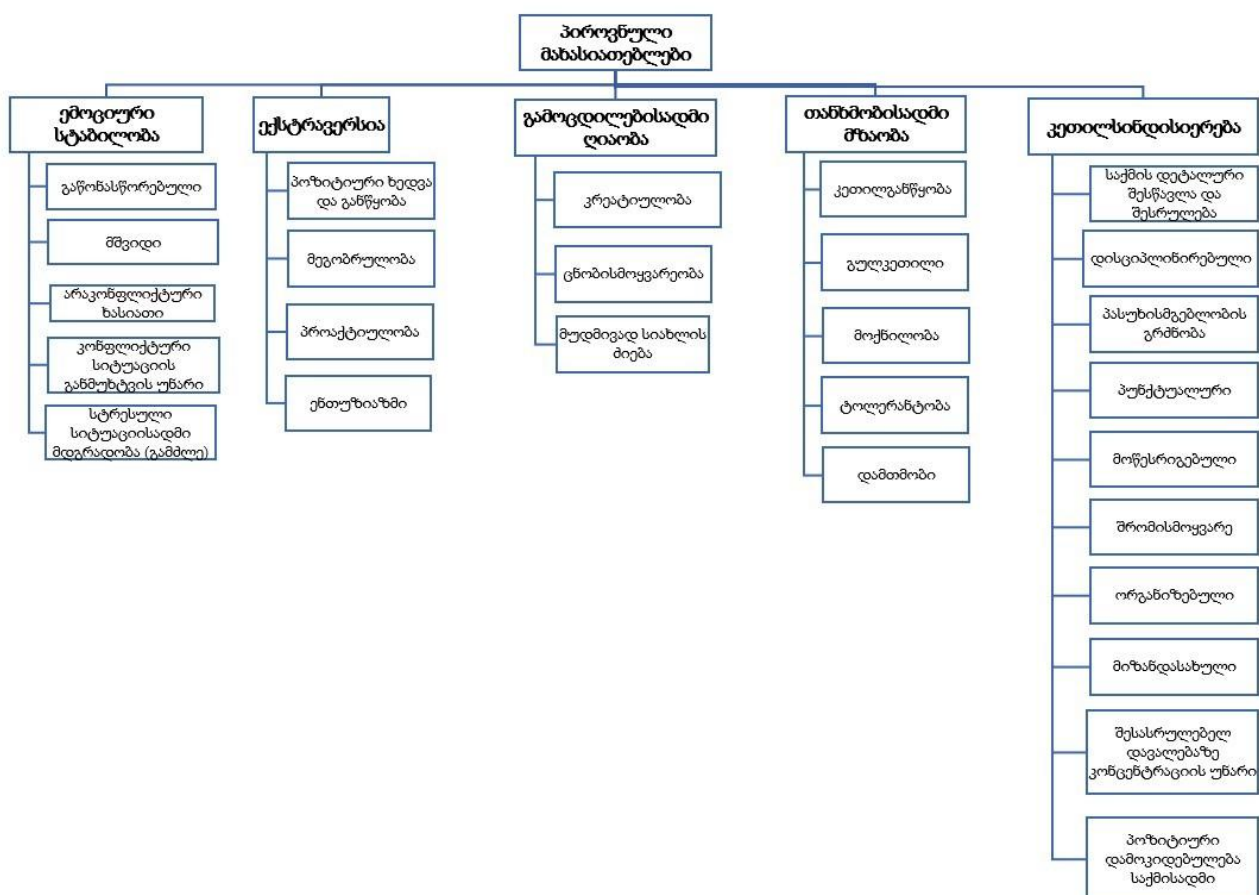


ნახ. 4. რბილი უნარების დაჯგუფება კატეგორიებისა და პარამეტრების მიხედვით

ფოკუს-ჯგუფის მონაწილეთა მიერ ჩამოთვლილი მარკეტინის სამსახურის თანამშრომლებისთვის დამახასიათებელი პიროვნული თვისებები, საბოლოო ჯამში, დიდი ხუთეულის (big five) მოდელის ფაქტორების ქვეშ განთავსდა (იხ. ნახ. N5).

კოსტა და მაკკრეის (Costa & McCrae, 1992) მიერ შემუშავებული დიდი ხუთეულის მოდელის (The Big Five Personality Traits) მიხედვით, ითვლება, რომ პიროვნების აღწერა შესაძლებელია ხუთი ძირითადი განზომომილებით, ესენია: ექსტრავერსია (Extraversion),

თანხმობისადმი მზაობა (Agreeableness), პატიოსნება/ კეთილსინდისიერება (Conscientiousness), გამოცდილებისადმი ღიაობა (Openness) და ნეიროტიციზმი (Neuroticism). თითოეული მათგანი ერთგვარი დიაპაზონია ორ ერთმანეთის საწინააღმდეგო მხარეს (პოლუსს) შორის. მაგალითისთვის, ექსტრავერსიის სკალა ასახავს დიაპაზონს უკიდურეს ინტროვერსიასა და ექსტრავერსიას შორის, ნეიროტიციზმი - ემოციურ სტაბილურობასა და ნეიროტიციზმის მაღალ მაჩვენებელს შორის და ა.შ. ამასთან, კვლევები ცხადყოფს, რომ აღნიშნული პიროვნული მახასიათებლები უახლოვდება ნორმალური განაწილების ფორმას და თითოეულ სკალაზე ადამიანთა უმრავლესობის მიერ მიღებული მაჩვენებლები, როგორც წესი, კონცენტრირებულია განაწილების საშუალო მნიშვნელობების გარშემო. ექსტრავერსიის სკალაზე მაღალი ქულის მქონე ადამიანები აქტიურები, ოპტიმისტები, კომუნიკაბელურები არიან. ნეიროტიციზმის სკალაზე მაღალი ქულის მქონე პირები, როგორც წესი, გადაჭარბებული ემოციურობით და შფოთვით გამოირჩევიან, მაშინ როდესაც, აღნიშნული სკალის დაბალი მაჩვენებელი (ემოციურად სტაბილური) მიუთითებს ადამიანის სიმშვიდეზე, ამტანობასა და ზომიერად ემოციურობაზე. თითოეულ პარამეტრში შემავალი ნიშან-თვისებები გავლენას ახდენს თავად პარამეტრების მნიშვნელობებზე.



ნახ. 5. პიროვნული მახასიათებლების დაჯგუფება ხუთფაქტორიანი თეორიის პიროვნული მახასიათებლების მიხედვით

ფოკუს ჯგუფის მონაწილეთა მიერ ჩამოთვლილი პარამეტრები, რა თქმა უნდა, ნაწილობრივ ემთხვევა სხვა მკვლევრების მიერ წარმოდგენილ შედეგებთან (*Gregorio, Maggioni, Mauri, & Mazzucchelli, 2019; Kovacs & Vamosi Zarandne, 2022; Kotabe & Helsen, 2022; Morgan & Feng, 2024; Santos, et al., 2021*), თუმცა წინამდებარე კვლევაში მიღებული პარამეტრების სისტემა უფრო ფართო და დეტალიზებულია, რაც ძალზედ მნიშვნელოვანია დინამიურ და სწრაფად ცვალებად ორგანიზაციულ გარემოში ეფექტიანი და ობიექტური შეფასების სისტემის დანერგვისათვის. ამასთან, რეკომენდირებულია ორგანიზაციებში არსებული შეფასების სისტემების პერიოდული გადახედვა, რათა შეესაბამებოდეს შრომის ბაზრის ცვალებად მოთხოვნებსა და თანამედროვე გამოწვევებს.

დასკვნა

ჩატარებული კვლევის, ფოკუს-ჯგუფის მუშაობის შედეგად ჩამოყალიბდა მარკეტინგის სამსახურის თანამშრომლების/კანდიდატების შესაფასებლად შესაბამისი უნარებისა და მახასიათებლების ნაკრები. ისინი დაიყო 3 ძირითად ჯგუფად, კერძოდ, ტექნიკური უნარები, რბილი უნარები, და პიროვნული მახასიათებლები. განისაზღვრა თითოეულ ჯგუფში შემავალი კატეგორიები, შესაბამისი უნარებისთვის - პარამეტრები და პიროვნული მახასიათებლებისათვის - ნიშან-თვისებები. შესაბამისად, აღნიშნული შეფასების სისტემა გაცილებით უფრო ვრცელი, სიღრმისეული და კომპლექსურია არსებულ ლიტერატურაში განხილულ უნარებთან შედარებით. კერძოდ, წინამდებარე კვლევის ფარგლებში, დეტალურად ჩამოყალიბდა თითოეულ კატეგორიაში შემავალი პარამეტრები და ნიშან-თვისებები. მაგალითისთვის, სიღრმისეულად განისაზღვრა დარგობრივი უნარები, კომპეტენციები, ასევე დაზუსტდა ციფრული მარკეტინგისა და ანალიტიკური ინსტრუმენტების კონკრეტული პროგრამები და სისტემები, გამოიკვეთა ისეთი მნიშვნელოვანი ასპექტები, როგორიცაა: გადაწყვეტილების მიღების დროს პერსონალურ ინტერესებზე უარის თქმის უნარი და სამუშაო პროცესის პრიორიტეტული მართვა, კონფლიქტური სიტუაციების განმუხტვისა და მოლაპარაკების უნარები, პროაქტიულობა, საქმისადმი პოზიტიური დამოკიდებულება, თანამშრომელთა მოტივაციასა და შთაგონებაზე ზრუნვა, და სხვა. კვლევის შედეგად მიღებული პარამეტრების სისტემით მარკეტინგის თანამშრომელი/ კანდიდატი ფასდება კომპლექსურად - ტექნიკური/პროფესიული, რბილი უნარებისა და პიროვნული მახასიათებლების საფუძველზე.

- Costa, P., & McCrae, R. R. (1992). Neo PI-R professional manual. Psychological Assessment Resources.
- Fantozzi, I., Martuscelli, L., Di Luozzo, S., & Schiraldi, M. (2024). Soft Skills, Attitudes, and Personality Traits: How Does the Human Factor Matter? A Systematic Review and Taxonomy Proposal through ProKnow-C Methodology. *Businesses*, 4, 156–176.
doi:10.3390/businesses4020011
- Gregorio, A. D., Maggioni, I., Mauri, C., & Mazzucchelli, A. (2019). Employability skills for future marketing professionals. *European Management Journal*, 37(3), 251-258.
doi:10.1016/j.emj.2019.03.004
- Johnson, D. S., Sihi, D., & Muzellec, L. (2021). Implementing Big Data Analytics in Marketing Departments: Mixing Organic and Administered Approaches to Increase Data-Driven Decision Making. *Informatics*, 8(4). doi:10.3390/informatics8040066
- Kalaighnam, K., Tuli, K. R., Kushwaha, T., Lee, L., & Ga, D. (2020). Marketing Agility: The Concept, Antecedents, and a Research Agenda. *Journal of Marketing*, 85(1).
doi:10.1177/0022242920952760
- Kotabe, M. M., & Helsen, K. (2022). *Global Marketing Management* (9th ed.). JOHN WILEY, [S.l.].
- Kovacs, I., & Vamosi Zarandne, K. (2022). Digital marketing employability skillsDigital marketing employability skills in job advertisements – must-have soft skills for entry level workers: A content analysis. *Economics and Sociology*, 15(1), 178-192.
doi:10.14254/2071789X.2022/15-1/11
- Madhani, P. M. (2021). Sales and Marketing Integration: Enhancing Customer Value. *Marketing Mastermind*, 18(3), 21-28. Retrieved from <https://ssrn.com/abstract=3932180>
- Morgan, N. A., & Feng, H. (2024). Marketing capabilities and Shelby D. Hunt: contributions, current state, and the future. *Journal of Marketing Management*, 40(7), 1224-1244.
doi:10.1080/0267257X.2024.2311110
- Qiu, J., Boukis, A., & Storey, C. (2022). Internal Marketing: A Systematic Review. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 30(1), 53-67. doi:10.1080/10696679.2021.1886588
- Santos, G., Sá, J. C., Félix, M. J., Barreto, L., Carvalho, F., Doiro, M., . . . Stefanović, M. (2021). New Needed Quality Management Skills for Quality Managers 4.0. *Sustainability*, 13(11).
doi:10.3390/su13116149

Shah, D., & Murthi, B. (2021). Marketing in a data-driven digital world: Implications for the role and scope of marketing. *Journal of Business Research*, 125, 772 - 779. doi:10.1016/j.jbusres.2020.06.062

Stone, M., & Woodcock, N. (2021). Developments in B to B and B to C Marketing and Sales Automation Systems. *Journal of Business-to-Business Marketing*, 28(2), 203–222. doi:10.1080/1051712X.2021.1920702

Wang, X., Bendle, N., & Pan, Y. (2024). Beyond text: Marketing strategy in a world turned upside down. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 52, 939–954. doi:10.1007/s11747-023-01000-x

Establishing a system of assessment parameters for marketing department employees

Ana Gergauli

PhD Candidate, Georgian Technical University, <https://orcid.org/0009-0005-7371-0251>,
gergauli.ana@gtu.ge

Abstract

To achieve the goals of the organization, it is extremely important to have personnel with appropriate knowledge, experience and qualifications, since the success of the organization and its competitiveness in the market depend on their work. In order to select candidates and evaluate the work performed by employees, it is necessary to develop a relevant system of assessment parameters. This article discusses the development of a system of parameters important for an employee using the example of a marketing department, which, in turn, will be used as input parameters in an artificial neural network model. To determine the parameter system, at the first stage of the study, an analysis of scientific literature was carried out, as a result of which it was determined that technical and soft skills, as well as personal characteristics, can be taken into account when assessing employees/candidates. At the next stage, using one of the qualitative research methods - a focus group, experts in the field clarified and identified the categories of these skills and the parameters corresponding to each category. In the case of personal characteristics, specific characteristics included in them were named, for which the Big Five model was used. Ultimately, based on the research conducted and the results of the focus group, a fairly extensive list of evaluation parameters for a marketing department employee has been obtained, which combines job-specific sectoral skills, strategic/analytical competencies, leadership and interpersonal skills, as well as decision-making skills, and other categories, with relevant parameters.

Key words: Personnel selection and assessment, technical and soft skills, Big Five personality model, focus group method.

კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანების ჰეტეროგენულობის, ფენოტიპური თავისებურებისა და პროგრესიის რისკის მახასიათებლები (კრიტიკული მიმოხილვა)

ანა ბენიძე¹; თინათინ კილასონია²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი;

ექიმი ოფთალმოლოგი; ²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ოფთალმოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ³თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; ⁴თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის პათოლოგანატომი; მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი;

აბსტრაქტი

კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებები წარმოადგენს ჰეტეროგენულ ჯგუფს, რომელიც მოიცავს კეთილთვისებიან, პრეავთვისებიან და ავთვისებიან პროცესებს, მათ შორის ნევუსებს, პირველად შემენილ მელანომას (PAM) და კონიუნქტივურ მელანომას. აღნიშნული დაზიანებები განსხვავდება კლინიკური მიმდინარეობით, ჰისტოპათოლოგიური სტრუქტურით, მოლეკულური პროფილითა და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პოტენციალით. თანამედროვე ოფთალმოპათოლოგიაში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება იმ ფენოტიპური და მოლეკულური მახასიათებლების იდენტიფიცირებას, რომლებიც ასოცირებულია პროგრესიის, რეციდივისა და მეტასტაზირების რისკთან.

წინამდებარე კრიტიკული მიმოხილვის მიზანია კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებების თანამედროვე კლასიფიკაციის, ჰისტოპათოლოგიური და იმუნოჰისტოქიმიური თავისებურებების, ეპიდემიოლოგიური მონაცემებისა და პროგრესიის მექანიზმების ანალიზი. განხილულია კონიუნქტივის ნორმალური ჰისტოპათოლოგიური სტრუქტურა, მელანოციტების ბიოლოგიური ფუნქცია, მათი განაწილების თავისებურებები და ისეთი მარკერების მნიშვნელობა, როგორიცაა S-100, HMB-45, Melan-A, Ki-67 და p53. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მოლეკულურ ცვლილებებს, მათ შორის BRAF, NRAS და KIT გენების მუტაციებს, რომლებიც დაკავშირებულია მელანოციტური დაზიანებების ავთვისებიან პროგრესიასთან.

მიმოხილვაში ასევე განხილულია ხელოვნური ინტელექტისა და ციფრული პათოლოგიის როლი დიაგნოსტიკაში, პროგნოზირებასა და რისკის სტრატეგიკაში.

ხაზგასმულია სიმსივნური მიკროგარემოს, სიმსივნის ინფილტრაციული ლიმფოციტების (TILs), ანგიოგენეზისა და იმუნური რეგულაციის მნიშვნელობა კონიუნქტივური მელანომის ბიოლოგიურ ქცევაში. კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებების მრავალფეროვნება და იშვიათობა დიაგნოსტიკურ და თერაპიულ სირთულეებს ქმნის, რაც საჭიროებს ინტერდისციპლინურ მიდგომასა და თანამედროვე მოლეკულური მეთოდების ინტეგრაციას. აღნიშნული მიმართულებით შემდგომი კვლევები მნიშვნელოვანია ადრეული დიაგნოსტიკის, ინდივიდუალიზებული მკურნალობისა და პროგნოზის გაუმჯობესებისთვის.

საკვანძო სიტყვები: კონიუნქტივა; მელანოციტური დაზიანებები; კონიუნქტივური ნევუსი; პირველადი შეძენილი მელანოზი; კონიუნქტივის მელანომა; ჰეტეროგენულობა; იმუნოჰისტოქიმია; BRAF; Ki-67; ციფრული პათოლოგია.

კონიუნქტივა არის თხელი, გამჭვირვალე ლორწოვანი გარსი, რომელიც აუცილებელია თვალის ჯანმრთელობის შესანარჩუნებლად, თვალის მოძრაობის გასაადვილებლად და თვალის ზედაპირის გარე პათოგენებისგან დასაცავად. [1]

კონიუნქტივის დაზიანებები ავლენს მნიშვნელოვან გავრცელების ცვალებადობას, რაც განპირობებულია სხვადასხვა გარემო ფაქტორებისა და გენეტიკურ მიდრეკილებების არსებობით. კონიუნქტივიტი, რომელიც კონიუნქტივის ყველაზე გავრცელებული მდგომარეობაა, ყოველწლიურად მილიონობით ადამიანს აწუხებს მთელს მსოფლიოში, მხოლოდ შეერთებულ შტატებში ყოველწლიურად დაფიქსირებულია დაახლოებით 6 მილიონი შემთხვევა. ის გვხვდება როგორც ვირუსული, ბაქტერიული ან ალერგიული მიმდინარეობით, მაღალი სიხშირით აღინიშნება მთელს მსოფლიოში, განსაკუთრებით რეგიონებში, სადაც მაღალია ალერგენის ექსპოზიცია ან არაადეკვატური ჰიგიენა. კეთილთვისებიანი ნეოპლაზიები, როგორიცაა კონიუნქტივის ნევუსები, გავლენას ახდენს მოსახლეობის დაახლოებით 0.3-1%-ზე გლობალურად, უფრო მაღალი გავრცელებით გვხვდება უფრო ღია ფერის კანის მქონე პირებში.[2], [3] ავთვისებიანი მდგომარეობა, როგორიცაა კონიუნქტივის მელანომა, თუმცა შედარებით იშვიათია, წარმოადგენს მნიშვნელოვან რისკს ადგილობრივი ინვაზიისა და მეტასტაზირების პოტენციალის გამო. კონიუნქტივის მელანომა შეადგენს ყველა თვალის სიმსივნეების დაახლოებით 2-5%-ს, სიხშირის მატება შეინიშნება მაღალი ულტრაიისფერი (UV) ზემოქმედების მქონე რეგიონებში, როგორიცაა ავსტრალია და ევროპის სხვადასხვა ნაწილში. ამ შემთხვევების მზარდი რაოდენობა ხაზს უსვამს კეთილთვისებიანი და ავთვისებიანი დაზიანებების ადრეული იდენტიფიკაციისა და დიფერენცირების მნიშვნელობას, რათა უზრუნველყოს სწრაფი და ეფექტური მკურნალობა, საბოლოოდ

გააუმჯობესოს პაციენტის შედეგები და შეამციროს ავთვისებიანი სიმსივნემდე პროგრესირების რისკი.[3]

კონიუნქტივის **ჰისტოლოგიური სტრუქტურის** სიღრმისეული ცოდნა გადამწყვეტია პათოლოგიური ცვლილებების ამოცნობისას ისეთ დაავადების მიმდინარეობაში, როგორცაა კონიუნქტივიტი, ნეოპლაზიები და კონიუნქტივის დეგენერაციული ცვლილებები.

კონიუნქტივა იყოფა სამ განსხვავებულ რეგიონად მისი ანატომიური მდებარეობის მიხედვით:

- პალპებრალური კონიუნქტივა: ქუთუთოების შიდა ზედაპირის მფარავი;
- ბულბალური კონიუნქტივა: ფარავს სკლერას (თვალის თეთრი გარსი) ლიმბუსამდე.
- ფორნიქსის კონიუნქტივა (Forniceal conjunctiva): წარმოქმნის კონიუნქტივურ ფორნიქსს, ნაკეცს, რომელიც აკავშირებს პალპებრულ და ბულბალურ კონიუნქტივას.

ეს რეგიონები ოდნავ განსხვავდებიან თავიანთი ჰისტოლოგიური მახასიათებლებით, თუმცა მათ აქვთ საერთო სტრუქტურული ორგანიზაცია. კონიუნქტივა შედგება სამი ფენისგან: ეპითელიური შრე, საკუთარი შრე (ასევე უწოდებენ ლამინა პროპრიას ან სუბსტანციას პროპრიას), სუბეპითელიური შემაერთებელი ქსოვილი;

კონიუნქტივის ეპითელიუმი არის ყველაზე გარე შრე და მისი სისქე განსხვავდება კონიუნქტივის რეგიონის მიხედვით. ზოგადად, ეს არის სტრატეფიცირებული ცილინდრული ან კუბოიდური ეპითელიუმი უმეტეს უბნებში, გარდა ლიმბუსის მახლობლად, სადაც ის გადადის რქოვანას ეპითელიუმში და ხდება სტრატეფიცირებული ბრტყელი.

- პალპებრალური კონიუნქტივა: ეპითელიუმი აქ შედარებით თხელია, როგორც წესი, სტრატეფიცირებული ცილინდრული უჯრედების 2-4 ფენა. ის ეყრდნობა კარგად გამოკვეთილ ბაზალურ მემბრანას, კუბოიდური უჯრედებით მჭიდროდ დასახლებულია.
- ფორნიქსის კონიუნქტივა (Forniceal Conjunctiva): ეპითელიუმი ამ მიდამოში ხდება სქელი კონიუნქტივის დაკეცვის გამო, წარმოქმნის ცილინდრული უჯრედების მრავალ ფენას. კონიუნქტივაში გამოკვეთილია ფიალისებური უჯრედები.
- ბულბარული კონიუნქტივა: ეპითელიუმი ამ რეგიონში უფრო თხელია ფორნიქსისა და პალპებრალური მიდამოებთან შედარებით, როგორც წესი, შედგება კუბური და ცილინდრული უჯრედების 2-3 ფენისგან. როდესაც კონიუნქტივა უახლოვდება რქოვანას ლიმბუსში, ეპითელიუმი გარდაიქმნება სტრატეფიცირებულ ბრტყელ შრედ.

კონიუნქტივის ეპითელიუმის ერთ-ერთი განმსაზღვრელი მახასიათებელია **ფიალისებური უჯრედების** არსებობა. ეს სპეციალიზებული უჯრედები პასუხისმგებელი არიან მუცინის გამომუშავებაზე, რომელიც ქმნის ცრემლსადენი მილის ყველაზე შიდა ფენას და გადაწყვეტ როლს ასრულებს თვალის ზედაპირის ტენიანობისა და ჯანმრთელობის შენარჩუნებაში. ფიალისებური უჯრედები უფრო მრავალრიცხოვანია ფორნიქსში, მაგრამ მიმოფანტულია კონიუნქტივის ყველა რეგიონში. ისინი გამოიყურებიან როგორც დიდი, ფერმკრთალად შეღებილი უჯრედები დამახასიათებელი „ფიალის“ ფორმის, ციტოპლაზმური მუცინის გრანულების შემცველობით.[4]

ეპითელიური და ფიალისებური უჯრედების გარდა, კონიუნქტივის ეპითელიუმი შეიცავს იმუნურ უჯრედებს, მათ შორის **ლანგერჰანსის უჯრედებს**, რომლებიც სპეციალიზებული დენდრიტული უჯრედებია. ლანგერჰანსის უჯრედები ფუნქციონირებს როგორც ანტიგენის წარმდგენი უჯრედები და თვალის ზედაპირის იმუნური დაცვის სისტემის ნაწილია. ისინი ძირითადად განლაგებულია ეპითელიუმის ბაზალურ შრეში და მათი იდენტიფიცირება შესაძლებელია იმუნოჰისტოქიმიური მარკერებით, როგორიცაა CD1a და HLA-DR.

საკუთარი შრე ეპითელიური შრის ქვეშ მდებარებს და წარმოადგენს ფაშარი შემადგენელი ქსოვილის შრეს, რომელიც მხარს უჭერს ეპითელიუმს და უზრუნველყოფს კონიუნქტივის სტრუქტურულ მთლიანობას. სუბსტანცია პროპრია შეიძლება დაიყოს ორ ფენად:

- **ზედაპირული ადენოიდური შრე:** ლიმფოიდური ქსოვილით მდიდარი ეს ფენა შეიცავს ლიმფოციტებს, პლაზმურ უჯრედებს და სხვა იმუნურ უჯრედებს. ის მნიშვნელოვან როლს ასრულებს კონიუნქტივის იმუნოლოგიურ დაცვაში და განსაკუთრებით გამოხატულია ბავშვებში. მოზრდილებში ლიმფოიდური ქსოვილი მცირდება, მაგრამ მაინც შეიძლება გააქტიურდეს ანთებითი პირობების დროს.[5], [6]

- **ღრმა ბოჭკოვანი შრე:** ეს ფენა ძირითადად შედგება კოლაგენისა და ელასტიური ბოჭკოებისგან. იგი შეიცავს უფრო დიდ სისხლძარღვებს, ნერვულ ბოჭკოებსა და დამხმარე საცრემლე ჯირკვლებს. ბოჭკოვანი ფენა ემსახურება კონიუნქტივის ძირითად საყრდენს და უზრუნველყოფს მექანიკურ სიმტკიცეს.

სუბსტანცია პროპრია ასევე შეიცავს ფიბრობლასტების იშვიათ პოპულაციას, რომლებიც პასუხისმგებელი არიან კოლაგენისა და ელასტინის უჯრედგარე მატრიქსის შენარჩუნებაზე. ამ ფენაში ნაპოვნი სხვა უჯრედების ტიპები მოიცავს მაკროფაგებს, პოხიერ უჯრედებს და ალაგ მელანოციტებს.[7]

სუბსტანცია პროპრიაში ჩაშენებულია კრაუზესა და ვოლფრინგის დამხმარე ცრემლსადენი ჯირკვლები. ეს ჯირკვლები ხელს უწყობენ ცრემლსადენი მილის წყლის შემცველი კომპონენტის წარმოქმნას, ავსებენ ცრემლსადენი ჯირკვლის სეკრეციას.

- კრაუზეს ჯირკვლები: ისინი განლაგებულია კონიუნქტივის ფორნიკებში და სტრუქტურულად მსგავსია მთავარი ცრემლსადენი ჯირკვლისა, რომელიც შედგება სეკრეტორული უჯრედებისაგან.

- ვოლფრინგის ჯირკვლები: აღმოჩენილი ფირფიტის ზედა კიდის გასწვრივ, ამ ჯირკვლებს აქვთ კრაუზეს ჯირკვლების მსგავსი ჰისტოლოგია და ფუნქცია, თუმცა მათი შემცველობა ზოგადად ნაკლებია.

კონიუნქტივა უხვად ვასკულარიზებულია და სისხლძარღვები ძირითადად განლაგებულია სუბსტანცია პროპრიაში. მცირე კაპილარული მარყუჟები ვრცელდება ეპითელიუმში, განსაკუთრებით ლიმბუსის მახლობლად. ეს სისხლძარღვთა ქსელი არა მხოლოდ აწვდის ჟანგბადს და საკვებ ნივთიერებებს კონიუნქტივის ქსოვილებს, არამედ გადამწყვეტ როლს ასრულებს იმუნურ მეთვალყურეობაში.[8]

კონიუნქტივის სისხლძარღვები წარმოიქმნება წინა კილიარული არტერიებიდან და ოკულარული არტერიის პალპებრალური ტოტებიდან. ვენური დრენაჟი ხდება ოკულარული ვენების მეშვეობით.

ლიმფური სისხლძარღვები წარმოდგენილია კონიუნქტივის საკუთარ შრეში, განსაკუთრებით პალპებრალური და ფორნიქსის რეგიონებში. ეს დრენაჟი მიედინება პრეაურიკულარულ და სუბმანდიბულურ ლიმფურ კვანძებში. ლიმფური ქსელი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს კონიუნქტივის იმუნურ რეაქციაში, რაც საშუალებას იძლევა შეუფერხებლად განხორციელდეს ჭარბი სითხის გადინება და იმუნური უჯრედების ტრანსპორტირება რეგიონალურ ლიმფურ კვანძებში.[9]

კონიუნქტივა უხვად არის ინერვირებული სენსორული ნერვებით, რომლებიც წარმოიქმნება სამწვერა ნერვის ოკულარული დაყოფისგან. ნერვული დაბოლოებები შეადგენს ეპითელიუმში და უზრუნველყოფს კონიუნქტივას მისი სენსორული თვისებებით, მათ შორის შეხების, ტკივილისა და ტემპერატურის შეგრძნებით. ეს ნერვული დაბოლოებები გადამწყვეტია ქუთუთოების რეფლექსური დახურვისთვის გამღიზიანებლების საპასუხოდ და თვალის ზედაპირის მთლიანობის შესანარჩუნებლად.

კონიუნქტივის ჰისტოლოგიაში არსებობს ნორმალური ვარიაციები, რომლებიც არ უნდა მივიჩნიოთ პათოლოგიურ მდგომარეობებში:

- პიგმენტაცია: მუქი ფერის კანის მქონე პირებში, კონიუნქტივის მელანოციტები შეიძლება იყოს ეპითელიუმის ბაზალურ შრეში, რაც კონიუნქტივას აძლევს მოყავისფრო

შეფერილობას. ეს პიგმენტაცია, როგორც წესი, კეთილთვისებიანია, მაგრამ შეიძლება შეცდომით იყოს იდენტიფიცირებული პათოლოგიური დაზიანებებად, როგორიცაა კონიუნქტივის სხვადასხვა ტიპის ნევუსი ან მელანომა.

- ასაკთან დაკავშირებული ცვლილებები: დაბერებასთან ერთად, კონიუნქტივამ შეიძლება განიცადოს დეგენერაციული ცვლილებები, როგორიცაა ეპითელიუმის გათხელება და ფიბრობლასტებისა და კოლაგენის დეპონირების ზრდა საკუთარ ფირფიტაში. ეს ცვლილებები ხშირად შეიძლება ასოცირებული იყოს ისეთ მდგომარეობებთან, როგორიცაა პინგვენკულა და პტერიგიუმი. [10]

კონიუნქტივის ჰისტოლოგიური სტრუქტურა ასახავს მის მრავალფუნქციურ როლს თვალის ჯანმრთელობაში:

- ბარიერული ფუნქცია: კონიუნქტივის ეპითელიუმი ქმნის ბარიერს პათოგენებისა და გარემოს გამღიზიანებლების მიმართ. ეპითელიური უჯრედებს შორის მჭიდრო შეერთების არსებობა ხელს უწყობს მიკრობული შეჭრის თავიდან აცილებას.

- ცრემლსადენი ფენის შენარჩუნება: კონიუნქტივაში ფიალისებური უჯრედები გამოყოფენ მუცინს, რომელიც ხელს უწყობს წყლის შრის დამაგრებას თვალის ზედაპირზე, რაც უზრუნველყოფს რქოვანას დატენიანებასა და გამჭვირვალობას.

- იმუნური ზედამხედველობა: ლიმფოიდური ქსოვილი საკუთარ შრეში არის კონიუნქტივის იმუნური პასუხის განუყოფელი ნაწილი. დენდრიტული უჯრედები, ლიმფოციტები და მაკროფაგები უზრუნველყოფენ იმუნურ მეთვალყურეობას, ხოლო ლიმფური დრენაჟის სისტემა იძლევა საშუალებას იმუნური უჯრედების ეფექტური ტრანსპორტირებისა ადგილობრივ ლიმფურ კვანძებში.

- გაპოხვა და დაცვა: დამხმარე საცრემლე ჯირკვლები ხელს უწყობს ცრემლის წარმოქმნას, ხელს უწყობს თვალის ტენიანი ზედაპირის შენარჩუნებას და ნარჩენების ჩამორეცხვას.

კონიუნქტივის პათოლოგიები, როგორიცაა კონიუნქტივიტი, პტერიგიუმი და ნეოპლაზიები, ხშირად იწვევს ჰისტოლოგიურ ცვლილებებს, მათ შორის ეპითელიუმის ჰიპერპლაზიას, ფიალისებური უჯრედების შემცველობის დაქვეითებას, ლიმფოიდური ჰიპერპლაზიასა და სტრომულ ფიბროზს.

ისეთ პირობებში, როგორიცაა ალერგიული კონიუნქტივიტი, შეიძლება მოხდეს ეოზინოფილებისა და პოხიერი უჯრედების მატება საკუთარ ფირფიტაში, ხოლო ქრონიკულმა გაღიზიანებამ შეიძლება გამოიწვიოს კონიუნქტივის ეპითელიუმის ბრტყელუჯრედოვანი მეტაპლაზია. ანალოგიურად, ნეოპლაზიური მდგომარეობები, როგორიცაა კონიუნქტივის ბრტყელუჯრედოვანი კარცინომა, ავლენს გამოხატულ ატიპიას და ნორმალური ეპითელიური არქიტექტურის დაკარგვას.[11]

კონიუნქტივა არის რთული, მრავალფუნქციური ქსოვილი მისი ჰისტოლოგიური სტრუქტურის მკაფიო რეგიონალური ვარიაციით. მისი ნორმალური ჰისტოლოგიის დეტალური გაგება აუცილებელია კონიუნქტივის დაავადებების დიაგნოსტიკისა და მართვისთვის. მისი დამცავი ეპითელიური შრიდან მის იმუნოლოგიურად აქტიურ სუბსტანცია პროპრიამდე, კონიუნქტივა მნიშვნელოვან როლს ასრულებს თვალის ჯანმრთელობაში, უზრუნველყოფს როგორც ფიზიკურ დაცვას, ასევე იმუნურ მეთვალყურეობას. [12]

კონიუნქტივის მელანოციტები არის სპეციალიზებული პიგმენტის წარმომქმნელი უჯრედები, რომლებიც გვხვდება კონიუნქტივის ეპითელიუმის ბაზალურ შრეში. ეს უჯრედები ასინთეზირებენ მელანინს, პიგმენტს, რომელიც იცავს თვალის ქსოვილებს ულტრაიისფერი გამოსხივებისგან (UV) მიყენებული დაზიანებისგან. მელანოციტები კონიუნქტივაში უმთავრესად პასუხისმგებელი არიან სხვადასხვა ადამიანებში პიგმენტაციის ცვალებადობაზე, მუქი კანის მქონე პირებს აქვთ უფრო გამოხატული კონიუნქტივური პიგმენტაცია უფრო ღია კანის მქონე პირებთან შედარებით.

მელანოციტები იშვიათად არის გავრცელებული კონიუნქტივაში, როგორც წესი, კონცენტრირებულია ლიმბალურ მიდამოში, მაგრამ ასევე წარმოდგენილია ბულბარულ და პალპებრულ რეგიონებში. მათი განაწილება შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს ინდივიდებს შორის და შეიძლება გავლენა იქონიოს რასობრივმა და ეთნიკურმა წარმომავლობამ.[13]

ჰისტოლოგიურად, მელანოციტები არის მრგვალი ან წაგრძელებული უჯრედები გამოხატული, დენდრიტული ციტოპლაზმური მორჩებით. ეს დენდრიტული გაფართოება ხელს უწყობს მელანინის გრანულების (მელანოსომების) გადატანას მეზობელ კერატინოციტებზე, პროცესი, რომელიც ცნობილია როგორც მელანოციტოზი. კლინიკურად გამოვლენილი პიგმენტაციის რაოდენობა დამოკიდებულია ამ მელანოციტების აქტივობაზე და მელანინის გრანულების სიმკვრივეზე კონიუნქტივის ეპითელიუმში.

- **ლიმბური მელანოციტები:** მელანოციტები ლიმბუსის მიდამოში განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან ისინი ხელს უწყობენ პიგმენტაციას რქოვანასა და სკლერას შორის შეერთების ადგილზე. კონიუნქტივის სხვა ნაწილებთან შედარებით ეს რეგიონი ავლენს გაზრდილ პიგმენტაციას.

- **პალპებრალური და ბულბარული მელანოციტები:** მიუხედავად იმისა, რომ გვხვდება ამ რეგიონებში, მელანოციტები ჩვეულებრივ ნაკლებად უხვია. პიგმენტაცია ამ ადგილებში ნაკლებად გამოხატულია, მაგრამ შეიძლება განსხვავდებოდეს, რაც იწვევს ნორმალურ ფიზიოლოგიურ პიგმენტაციას ან ლოკალიზებული პიგმენტური დაზიანებების ფორმირებას.

კონიუნქტივური მელანოციტების ძირითადი ფუნქციაა მელანინის გამომუშავება და განაწილება, რომელიც დამცავი მექანიზმია ულტრაიისფერი სხივებისგან გამოწვეული დაზიანებისგან. მელანინი შთანთქავს ულტრაიისფერ სხივებს, ხელს უშლის მას თვალის ღრმა შრეებში შეღწევაში და ამცირებს ეპითელური და სტრომული უჯრედების დნმ-ის დაზიანების რისკს.

- დაცვა UV გამოსხივებისგან: მელანინი მოქმედებს როგორც ბუნებრივი ბარიერი ულტრაიისფერი გამოსხივების მიმართ, რაც ზღუდავს მის უნარს შეაღწიოს თვალის ქსოვილებში. ეს დაცვა გადამწყვეტია ულტრაიისფერი გამოსხივებასთან დაკავშირებული თვალის პათოლოგიების რისკის შესამცირებლად, როგორიცაა კონიუნქტივური მელანომა ან სხვა ავთვისებიანი სიმსივნეები.

- პიგმენტაციის ნიმუშები: ნორმალურ კონიუნქტივაში, პიგმენტაცია მიდრეკილია ერთგვაროვანი ან ლაქოვანი განაწილებისკენ. თუმცა, მელანინის წარმოების გაზრდამ ან მელანოციტების რაოდენობის არანორმალურმა ზრდამ შეიძლება გამოიწვიოს ფოკალური პიგმენტური დაზიანებები, რომელთაგან ზოგიერთს შეიძლება ჰქონდეს კლინიკური მნიშვნელობა.

კონიუნქტივის მელანოციტები, როგორც წესი, მოსვენებულ მდგომარეობაშია, მაგრამ გარკვეულ პირობებში, ისინი შეიძლება გახდეს ჰიპერაქტიური ან განიცადოს სიმსივნური ტრანსფორმაცია. ზოგიერთ შემთხვევაში, მელანოციტების (მელანოციტოზი) გაზრდილმა რაოდენობამ ან მათმა არანორმალურმა პროლიფერაციამ (მელანოციტური ნეოპლაზმები) შეიძლება გამოიწვიოს პიგმენტური დაზიანებები, რაც მნიშვნელოვანია პათოლოგიის იდენტიფიცირებისთვის და კლასიფიკაციისთვის.[14], [15]

მელანოციტების აქტივობის ან მორფოლოგიის ატიპური ცვლილებები შეიძლება გახდეს ავთვისებიანი დაზიანებების წინამორბედი. მაგალითად, მელანოციტების არანორმალურმა პროლიფერაციამ შეიძლება გამოიწვიოს კეთილთვისებიანი მელანოციტური ნევუსებიდან ავთვისებიანი კონიუნქტივის მელანომამდე ტრანსფორმაცია. მნიშვნელოვანი ამ ცვლილებებთან დაკავშირებული ძირითადი ჰისტოლოგიური მახასიათებლები, რათა ზუსტად დადგინდეს და მოხდეს კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებების კლინიკური მართვა.

- **მელანოციტების ჰიპერპლაზია:** ეს შეიძლება წარმოადგენდეს როგორც ფიზიოლოგიური პასუხი ულტრაიისფერი სხივების გაზრდილი ზემოქმედების ან გაღიზიანების მიმართ. ის ზოგადად კეთილთვისებიანია, მაგრამ შეიძლება გამოიწვიოს პიგმენტაციის გაზრდა ან პიგმენტური დაზიანებების წარმოქმნა.

- **ნეოპლაზიური ცვლილებები:** კონიუნქტივური მელანოციტების ნეოპლაზიური ტრანსფორმაცია განსაკუთრებულ შემოთვალისწინებებს იწვევს, რადგან შეიძლება გამოიწვიოს

ისეთი პირობები, როგორიცაა პირველადი შეძენილი მელანოზი (PAM) ან მელანომა. ეს დაზიანებები საჭიროებს ფრთხილ ჰისტოლოგიურ შეფასებას მათი ავთვისებიანი პოტენციალის დასადგენად.

კონიუნქტივის მელანოციტების ჰისტოლოგიური თავისებურებები:

მელანოციტები ჰისტოლოგიურად შეიძლება გამოირჩეოდეს მათი უნიკალური გარეგნობით, მათ შორის დენდრიტული მორჩებითა და ციტოპლაზმური მელანინის გრანულებით. იმუნოჰისტოქიმიური მარკერები, როგორიცაა S-100, HMB-45 და Melan-A, ჩვეულებრივ გამოიყენება მელანოციტების იდენტიფიცირებისთვის განსაკუთრებით იმ შემთხვევებში, როდესაც აუცილებელია დიფერენცირება კეთილთვისებიანი და ავთვისებიანი დაზიანებების.[16]

კონიუნქტივური ნევუსი არის კონიუნქტივის ყველაზე გავრცელებული მელანოციტური დაზიანება, რომელიც ჩვეულებრივ ვლინდება, როგორც კარგად გამოკვეთილი პიგმენტური ან არაპიგმენტური დაზიანება. ხშირად ლოკალიზებულია ლიმბუსში ან ბოლქვის კონიუნქტივის შიგნით. ჰისტოლოგიურად იგი შედგება კეთილთვისებიანი მელანოციტების ბუდეებისგან ეპითელიუმში ან სუბსტანცია პროპრიაში. შეიძლება შეიცავდეს კისტოზურ სივრცეებს. კონიუნქტივის ნევუსები არის კონიუნქტივის ყველაზე გავრცელებული მელანოციტური დაზიანება, რომელიც შეადგენს კონიუნქტივის ყველა დაზიანების დაახლოებით 1%-ს. ისინი, როგორც წესი, გვხვდება ცხოვრების პირველ ორ ათწლეულში და ხშირად ვლინდება ბავშვებში და მოზარდებში.

კონიუნქტივის ნევუსების საერთო სიხშირე შეფასებულია 13 შემთხვევა მილიონ ადამიანზე წელიწადში. კონიუნქტივის ნევუსების უმეტესობა თანდაყოლილია ან ვითარდება ადრეულ ბავშვობაში, ყველაზე მაღალი გავრცელებით 5-დან 15 წლამდე. ისინი სტაბილური რჩებიან მთელი ცხოვრების განმავლობაში, თუმცა სქესობრივი მომწიფების პერიოდში ჰორმონალურმა ცვლილებებმა შეიძლება გაზარდოს პიგმენტაცია ან ზომა. კონიუნქტივური ნევუსები უფრო ხშირად გვხვდება კავკასიური წარმოშობის ინდივიდებში, ვიდრე კანის მუქი ფერის მქონე პირებში, სავარაუდოდ მელანოციტების განაწილებისა და გენეტიკური მიდრეკილებების განსხვავებულობის გამო. პიგმენტაციის განსხვავებებმა შეიძლება ასევე გაზარდოს ნევუსები უფრო ცხადი ღია კანის პოპულაციებში. კონიუნქტივის ნევუსები თანაბრად გავრცელებულია მამაკაცებსა და ქალებში, ეპიდემიოლოგიურ კვლევებში მნიშვნელოვანი გენდერული მიდრეკილები არ გამოვლინდა.[17], [18]

კონიუნქტივური ნევუსის სახეებია: **მოსაზღვრე ნევუსი** - ამ ტიპის ნევუსში მელანოციტები განლაგებულია ეპითელიუმსა და სუბსტანცია პროპრია (ეპითელიური ბაზალური მემბრანა) შორის შეერთების ადგილზე. ნევუსები, როგორც წესი, ბრტყელია და შეიძლება იყოს ოდნავ ამაღლებული. ისინი ხშირად პიგმენტირებულია და შეიძლება დროთა განმავლობაში შეიცვალოს ზომა და პიგმენტაცია, განსაკუთრებით პუბერტატის

პერიოდში. ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის რისკი ზოგადად დაბალია, მაგრამ შეიძლება იყოს უფრო მაღალი ნევუსის სხვა ქვეტიპებთან შედარებით.

შედგენილი ნევუსი - შეიცავს მელანოციტებს როგორც შეერთების მიდამოში (ეპითელიუმსა და სუბსტანცია პროპრიას შორის) და თავად სუბსტანცია პროპრიაში. ეს ორმაგი ლოკალიზაცია ნევუსს აძლევს დამახასიათებელ სახეს.

ეს ნევუსები ჩვეულებრივ ამადლებულია და შეიძლება იყოს პიგმენტირებული ან არაპიგმენტური. ისინი შეიძლება შეიცავდეს კისტოზურ სივრცეებს (გამჭვირვალე ცისტები), რომლებიც ხილული იქნება ნათურის გამოკვლევისას და ეხმარება მათ დიფერენცირებას სხვა პიგმენტური დაზიანებებისგან. შედგენილი ნევუსები ზოგადად კეთილთვისებიანია და კისტების არსებობა დამამშვიდებელი ნიშანია, რაც ამცირებს ავთვისებიანობის რისკის არსებობას. [19]

სუბეპითელური ნევუსი (ინტრადერმული ნევუსი) - მელანოციტები სუბეპითელურ ნევუსში განლაგებულია მთლიანად სუბსტანცია პროპრიაში (ეპითელიუმის ქვეშ), შეერთების არეალის ჩართვის გარეშე. დროთა განმავლობაში, შემაერთებული კომპონენტები შეიძლება დაიკარგოს და ნევუსი მთლიანად ღრმა ფენებში დარჩეს. ამ ტიპის ნევუსები უფრო ამადლებულია შეერთებულ და კომპოზიციურ ნევუსებთან შედარებით და, როგორც წესი, ნაკლებად პიგმენტირებულია. კისტის ფორმირება შეიძლება კვლავ შეგვხვდეს. ინტრადერმული ნევუსები ითვლება კეთილთვისებიანად და აქვთ ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის ძალიან დაბალი რისკი.

ლურჯი ნევუსი (ცისფერი ნევუსი) - ახასიათებს ძლიერად პიგმენტირებული, ღეროვანი ფორმის მელანოციტები, რომლებიც განლაგებულია საკუთარი ფირფიტის სიღრმეში. ჩნდება ლურჯ-შავი დაზიანების სახით პიგმენტური უჯრედების სიღრმის გამო (ტინდალის ეფექტი). ცისფერი ნევუსები ხშირად პატარაა, ცალკეული და კარგად შემოსაზღვრული. ცისფერი ნევუსები ზოგადად კეთილთვისებიანია და იშვიათად განიცდის ავთვისებიან ტრანსფორმაციას.[20]

კომბინირებული ნევუსი - ნევუსის ეს ტიპი შეიცავს ერთზე მეტი ნევუსის ქვეტიპის მახასიათებლებს, რომლებიც ხშირად აერთიანებს მოსაზღვრე, შედგენილ ან სუბეპითელურ კომპონენტებს. მაგალითად, კომბინირებულ ნევუსს შეიძლება ჰქონდეს როგორც შეერთების, ისე სუბეპითელური ნევუსის მახასიათებლები. კლინიკური გამოვლინება შეიძლება განსხვავდებოდეს, მაგრამ ხშირად ჰგავს ამადლებულ პიგმენტურ დაზიანებას კისტის წარმოქმნის უბნებით. ცალკეული კომპონენტების მსგავსად, კომბინირებული ნევუსი ჩვეულებრივ კეთილთვისებიანია და აქვს ავთვისებიანი სიმსივნეებად ტრანსფორმაციის დაბალი რისკი.[21], [22]

თანდაყოლილი ნევუსი - თანდაყოლილი ნევუსები გვხვდება დაბადებისას ან ვითარდებიან ადრეულ ასაკში და მათი ჰისტოლოგიური ნიშნები წააგავს შედგენილ ან

სუბეპითელურ ნევუსებს. ეს ნევუსები შეიძლება გამოჩნდეს მსხვილი, პიგმენტური დაზიანებების სახით, რომლებიც ხშირად გვხვდება დაბადებისას ან დაბადების შემდეგ გარკვეული ხნის შემდეგ. ისინი იზრდებიან პროპორციულად ბავშვის ზრდასთან ერთად. მიუხედავად იმისა, რომ უმეტესობა კეთილთვისებიანია, თანდაყოლილი ნევუსები, განსაკუთრებით მსხვილი, აქვთ ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის ოდნავ გაზრდილი რისკი შემენილ ნევუსთან შედარებით.

კონიუნქტივის მელანომა - კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებებიდან ყველაზე სერიოზულია, ის შეიძლება წარმოიშვას *de novo*, უკვე არსებული ნევუსიდან ან ატიპიის მქონე პირველადი შემენილი მელანოზიდან.

მელანომა, როგორც წესი, ვიზუალიზდება პიგმენტური კვანძების სახით, მაგრამ ასევე შეიძლება იყოს არაპიგმენტური (ამელანოზი). კონიუნქტივის მელანომა ჩვეულებრივ ლოკალიზებულია ლიმბალურ ან ბულბარულ კონიუნქტივაში. ჰისტოლოგიურად, ისინი ავლენენ ატიპიურ მელანოციტებს გაზრდილი მიტოზური აქტივობით და ადგილობრივი ინვაზიისა და მეტასტაზების პოტენციალით. ადრეული გამოვლენა და მკურნალობა გადამწყვეტია, რადგან კონიუნქტივის მელანომას აქვს რეციდივისა და მეტასტაზების მაღალი რისკი.[23]

კონიუნქტივის მელანომის სიხშირე შეფასებულია დაახლოებით 0,2-დან 0,8 შემთხვევამდე მილიონ ადამიანზე წელიწადში, რაც მას იშვიათ ავთვისებიან სიმსივნედ აქცევს. თუმცა, სიხშირე მატულობს ბოლო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში, განსაკუთრებით ღია კანის მქონე პოპულაციებში. კონიუნქტივის მელანომა უფრო ხშირია რეგიონებში, სადაც უფრო მაღალია UV ექსპოზიცია, როგორცაა ავსტრალია და ევროპისა და ჩრდილოეთ ამერიკის ნაწილებში. ეს მიუთითებს ულტრაიისფერი გამოსხივების პოტენციურ როლზე დაავადების პათოგენეზში. კონიუნქტივის მელანომების უმეტესობა დიაგნოზირებულია ხანდაზმულებში, პიკური სიხშირით 60-დან 70 წლამდე ასაკის პირებში. თუმცა, ეს ასევე შეიძლება განვითარდეს ახალგაზრდა პირებში, განსაკუთრებით მათ, ვისაც ანამნეზში აქვს PAM ან ადრე არსებული ნევუსი. კონიუნქტივური მელანომის დროს ჭარბობს მამრობითი სქესი, კვლევები აჩვენებენ მამაკაცსა და ქალს თანაფარდობას დაახლოებით 1.3:1. კონიუნქტივის მელანომის 5-წლიანი გადარჩენის მაჩვენებელი არის დაახლოებით 75-80%, თუმცა ეს მერყეობს სიმსივნის ზომის, ლოკალიზაციისა და ინვაზიის ხარისხის მიხედვით. სიმსივნეებს, რომლებიც მდებარეობს ლიმბალურ რეგიონში, უფრო კარგი პროგნოზი აქვთ, ვიდრე პალპებრულ ან ფორნიციალურ კონიუნქტივაში.

სხვა კონიუნქტივური მელანოციტური დაზიანებებს მიეკუთვნება **მელანოციტოზი**, რომელიც წარმოადგენს მელანოციტების არანორმალურ ზრდას კონიუნქტივაში, დისკრეტული დაზიანების წარმოქმნის გარეშე. შეიძლება იყოს თანდაყოლილი ან შემენილი. თვალის მელანოციტოზი არის მდგომარეობა, რომელსაც ახასიათებს

მელანოციტების მატება სკლერაში, უვებს და პერიოკულარულ კანში, რომელიც ხშირად ვლინდება დიფუზური პიგმენტაციის სახით. [24]

კონიუნქტივის სხვა ნაკლებად გავრცელებულ მელანოციტური დაზიანებებს მიეკუთვნება: ოკულოდერმული მელანოციტოზი (ოტას ნევუსი); კონიუნქტივური ეფელისი (ჭორფლი); კონიუნქტივის მელანოციტომა; მეორადი კონიუნქტივის მელანოციტური ჰიპერპლაზია; კონიუნქტივური ლენტიგო; ლიმბალური მელანოზი და ამელანოზური მელანომა.

შერეული ეპითელიური და მელანოციტური სიმსივნეები - კონიუნქტივის სიმსივნეების იშვიათი შემთხვევები, როდესაც მელანოციტური დაზიანებები თანაარსებობს ეპითელიუმის პროლიფერაციასთან, რაც იწვევს შერეულ ჰისტოპათოლოგიურ მახასიათებლებს.

კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებების განვითარებაზე გავლენას ახდენს გენეტიკური, გარემო და დემოგრაფიული ფაქტორების კომბინაცია. ამ რისკის ფაქტორების გააზრება გადამწყვეტია რისკის ქვეშ მყოფი პოპულაციების იდენტიფიცირებისთვის და შესაბამისი სკრინინგისა და პრევენციის სტრატეგიების განსახორციელებლად.[25]

UV ექსპოზიცია: ულტრაიისფერი (UV) გამოსხივება კარგად არის დადასტურებული რისკფაქტორი თვალის ზედაპირის სხვადასხვა ავთვისებიანი სიმსივნეებისთვის, მათ შორის კონიუნქტივის მელანომის შემთხვევებში. ითვლება, რომ მზის ქრონიკული ზემოქმედება იწვევს კონიუნქტივურ მელანოციტებში დნმ-ის დაზიანებას, რაც იწვევს დისპლაზიურ ცვლილებებს და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის რისკს. კონიუნქტივის მელანომის უფრო მაღალი სიხშირე შეინიშნება იმ რეგიონებში, სადაც უფრო მაღალია UV ექსპოზიცია, როგორიცაა ავსტრალია, სადაც მზის შუქის ინტენსივობა განსაკუთრებით მაღალია. ულტრაიისფერი სხივებისგან დამცავი სათვალეებისა და ქუდების გამოყენება შემოთავაზებულია როგორც დამცავი ღონისძიება, თუმცა პირდაპირი კლინიკურ მასალაზე დამყარებული მტკიცებულება, რომელიც ამ ინტერვენციებს აკავშირებს კონიუნქტივური მელანომის სიხშირის შემცირებასთან, შეზღუდულია.

გენეტიკური მიდრეკილება: გარკვეული გენეტიკური მუტაციები და ოჯახური სინდრომები დაკავშირებულია კონიუნქტივური მელანოციტური დაზიანების გაზრდილ რისკთან, განსაკუთრებით მელანომასთან. ეს მოიცავს მუტაციებს BRAF, NRAS და KIT გენებში, რომლებიც ასევე მონაწილეობენ კანის მელანომაში.[26], [27]

ისეთი პირობები, როგორიცაა ოჯახური ატიპური ხალი (FAMMM) და მელანომის სინდრომი და სხვა მემკვიდრეობითი მელანომის მიდრეკილების სინდრომები, შეიძლება გაზარდოს კონიუნქტივური მელანომის რისკი.

მოლეკულურმა კვლევებმა აჩვენა, რომ კონიუნქტივურ მელანომას აქვს გარკვეული გენეტიკური მსგავსება კანის მელანომასთან, განსაკუთრებით მუტაციებს MAPK/ERK სასიგნალო გზაზე. ასაკი მნიშვნელოვანი რისკფაქტორია როგორც PAM, ასევე კონიუნქტივური მელანომისთვის, უმეტეს შემთხვევაში ხანდაზმულებში. სქესობრივი მომწიფების ან ორსულობის დროს ჰორმონალურმა ცვლილებებმა ასევე შეიძლება გავლენა მოახდინოს კეთილთვისებიანი მელანოციტური დაზიანებების ზრდასა და პიგმენტაციაზე. კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებები, განსაკუთრებით მელანომა, უფრო ხშირია ევროპული წარმოშობის ინდივიდებში. ისინი იშვიათია აფრიკისა და აზიის პოპულაციებში, რაც შეიძლება დაკავშირებული იყოს გენეტიკურ მგრძნობელობასთან და ულტრაიისფერი გამოსხივების დაბალი კუმულაციურ ზემოქმედებასთან. პირები, რომლებსაც ანამნეზში აქვთ PAM ატიპიით ან კონიუნქტივის ნევუსები, არიან კონიუნქტივური მელანომის განვითარების მაღალი რისკის ქვეშ. ამ დაზიანებების რეგულარული მონიტორინგი ზომის, პიგმენტაციის ან მორფოლოგიის ცვლილებებისთვის გადამწყვეტია ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის თავიდან ასაცილებლად.

საექვო უბნების რეგულარული დაკვირვება და ბიოფსია გადამწყვეტია მელანომამდე პროგრესირების თავიდან ასაცილებლად. ატიპიური უბნების ადრეული გამოვლენა და ამოკვეთა მნიშვნელოვნად ამცირებს ავთვისებიანობის რისკს.

კონიუნქტივის მელანომა არის აგრესიული ავთვისებიანი სიმსივნე ადგილობრივი რეციდივის მაღალი სიხშირით (დაახლოებით 30-50%) და მეტასტაზების პოტენციალი რეგიონულ ლიმფურ კვანძებში, ფილტვებში, ღვიძლში და ტვინში. კონიუნქტივური მელანომის 5-წლიანი გადარჩენის საერთო მაჩვენებელი შეფასებულია 75-80%, თუმცა მცირე, ლოკალიზებული სიმსივნეებისთვის ეს შეიძლება იყოს 90%-მდე. სიმსივნეები უფრო დიდი ლოკალური ინვაზიით ან მეტასტაზებით ატარებენ მნიშვნელოვნად უარეს პროგნოზს, ამ შემთხვევებში 5-წლიანი გადარჩენის მაჩვენებელი მცირდება 50-60%-მდე. მეტასტაზების რისკი დაკავშირებულია ისეთ ფაქტორებთან, როგორიცაა სიმსივნის სისქე, მდებარეობა (არალიმბალური ადგილები აქვს უარესი პროგნოზი) და ჰისტოლოგიური მახასიათებლები (მაგ. ეპითელიოიდური უჯრედული ტიპი).[28], [29]

კონიუნქტივური მელანოციტური დაზიანებები წარმოდგენილია კლინიკური და ჰისტოპათოლოგიური მახასიათებლების ფართო სპექტრით. ამ დაზიანებებში დაფიქსირებული **ჰეტეროგენულობა** არა მხოლოდ ფენოტიპური, არამედ მოლეკულური, რაც გავლენას ახდენს მათ კლინიკურ ქცევაზე და ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის რისკზე. ფენოტიპური ინდიკატორების გააზრება, რომლებიც მიუთითებენ პოტენციურ ავთვისებიან პროგრესირებაზე, გადამწყვეტია ადრეული დიაგნოსტიკისთვის, პროგნოზული შეფასებისთვის და თერაპიული ჩარევისთვის.

კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებების ჰეტეროგენულობა შეიძლება შეინიშნოს მრავალ დონეზე:

- კლინიკური ჰეტეროგენულობა: დაზიანებების ზომის, ფორმის, ფერისა და ლოკალიზაციის ვარიაციები.
- ჰისტოპათოლოგიური ჰეტეროგენულობა: განსხვავებები უჯრედის მორფოლოგიაში, მიტოზურ აქტივობასა და არქიტექტურულ ნიმუშებში.
- მოლეკულური ჰეტეროგენულობა: გენეტიკური მუტაციები, ცვლილებები სასიგნალო გზებში და სპეციფიკური მარკერების გამოხატვის ვარიაციები, რამაც შეიძლება გავლენა მოახდინოს ავთვისებიანობის რისკზე.

კონიუნქტივური მელანოციტური დაზიანებები, მათ შორის ნევუსი, პირველადი შეძენილი მელანოზი (PAM) და მელანომა, ავლენს მნიშვნელოვან ცვალებადობას მათ კლინიკურ გამოვლინებასა და ბიოლოგიურ ქცევაში. ეს მრავალფეროვნება ართულებს ავთვისებიანი პროგრესირების პროგნოზირების უნარს, რაც ხაზს უსვამს სარწმუნო ფენოტიპური ინდიკატორების საჭიროებას.

- ციტოლოგიური ატიპია: ციტოლოგიური ატიპიის არსებობა, მათ შორის ბირთვის ზომების მატება, ჰიპერქრომაზია და პლეომორფიზმი, არის ავთვისებიანი პოტენციალის ძლიერი მაჩვენებელი. ატიპიური მელანოციტები პათოლოგიური მიტოზური ფიგურებით ასოცირდება მელანომამდე პროგრესირების უფრო მაღალ რისკთან.
- არქიტექტურული დეზორგანიზაცია: ნორმალური არქიტექტურული ნიმუშების დაკარგვა, როგორცაა მელანოციტების მოუწესრიგებელი ბუდეები ან პეჟეტოიდური გავრცელება (მელანოციტები ეპითელიუმის ზედა ფენებში ვრცელდება), არის პრეავთვისებიანი ან ავთვისებიანი დაზიანებების დამახასიათებელი ნიშანი.
- მიტოზური აქტივობა: გაზრდილი მიტოზური აქტივობა, განსაკუთრებით PAM-ში ატიპიით, არის აგრესიული ქცევისა და ავთვისებიანი პოტენციალის ძირითადი მაჩვენებელი. მიტოზური ფიგურების დაკვირვება შესაძლებელია რუტინული ჰემატოქსილინისა და ეოზინის (H&E) შეღებვის ან უფრო სპეციალიზებული მარკერების გამოყენებით.

- სიმსივნის ინფილტრაციული ლიმფოციტები (TILs): TIL-ების არსებობა დაკავშირებულია უკეთეს პროგნოზთან სხვადასხვა მელანომაში, მათ შორის კონიუნქტივურ მელანომაში. ძლიერი იმუნური პასუხი, რომელიც მითითებულია TIL-ების დიდი რაოდენობით, შეიძლება დაეხმაროს სიმსივნის ზრდის კონტროლს და შეამციროს მეტასტაზების რისკი.[30]

მოლეკულური და იმუნოჰისტოქიმიური ინდიკატორები: კონიუნქტივურ მელანომებში ხშირია BRAF გენის მუტაციები და მონაწილეობს მათ პათოგენეზში. ეს მუტაციები

ასოცირდება სიმსივნური უჯრედების გამრავლებასთან და გადარჩენასთან, რაც ხელს უწყობს აგრესიულ ქცევას. BRAF-ის მუტაციების ტესტირება შესაძლოა იმ პაციენტების იდენტიფიცირებაში აღმოჩნდეს დამხმარე, რომლებსაც შეუძლიათ ისარგებლონ დამიზნებითი თერაპიებით. გარდა BRAF მუტაციებისა, NRAS და KIT გენების ცვლილებები ასევე გვხვდება ზოგიერთ კონიუნქტივურ მელანომაში. ეს მუტაციები ააქტიურებს გზებს, რომლებიც ხელს უწყობენ მელანოციტების პროლიფერაციას და გადარჩენას, რაც ზრდის ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის რისკს.

მელანოციტური მარკერები, როგორიცაა HMB-45 და Melan-A სასარგებლოა მელანოციტური დაზიანებების იდენტიფიცირებისთვის და კეთილთვისებიანი და ავთვისებიანი პროცესების დიფერენცირებისთვის. HMB-45 მიდრეკილია უფრო ინტენსიურად შეღებვისკენ ავთვისებიანი დაზიანებების დროს, ხოლო მელან-A არის როგორც კეთილთვისებიანი, ასევე ავთვისებიანი მელანოციტებში.[31]

სისხლძარღვთა ენდოთელური ზრდის ფაქტორი (VEGF): VEGF ხელს უწყობს ანგიოგენეზს, სიმსივნის ზრდისა და მეტასტაზების საკვანძო პროცესს. VEGF-ის გაზრდილი ექსპრესია დაფიქსირებულია კონიუნქტივურ მელანომაში და ასოცირდება გაზრდილ ვასკულარიზაციასთან მეტასტაზების მაღალ რისკთან და უარეს პროგნოზთან.

ავთვისებიანი პროგრესირების რისკი იზრდება ასაკთან ერთად, განსაკუთრებით 50 წელზე უფროსი ასაკის პირებში. ხანდაზმული პაციენტები ადრე არსებული PAM-ით ან კონიუნქტივის ნევუსებით არიან მელანომის განვითარების უფრო მაღალი რისკის ქვეშ, განსაკუთრებით თუ ატიპიური ნიშნებია.

კონიუნქტივის მელანოციტური დაზიანებების მოლეკულური და გენეტიკური ლანდშაფტი ჯერ კიდევ აქტიური შესწავლის სფეროა. კანის მელანომასგან განსხვავებით, რომელიც ფართოდ იქნა შესწავლილი, კონიუნქტივის მელანომის მოლეკულური საფუძვლები ნაკლებად არის გასაგები. ჩართულია როგორც საერთო, ისე განსხვავებული გენეტიკური გზები და შემდგომი კვლევა გადამწყვეტია ამ პაციენტებისთვის მკურნალობის ახალი ვარიანტების შერჩევისათვის. კანის მელანომის მსგავსად, კონიუნქტივურ მელანომას ხშირად აქვს მუტაციები BRAF, NRAS და KIT გენებში, რომლებიც მონაწილეობენ მელანოციტების პროლიფერაციასა და გადარჩენაში. თუმცა, მათი შედარებით იშვიათობა და ანატომიური განსხვავებები კონიუნქტივურ მელანომას განსხვავებულ ერთეულებად აქცევს, რაც მოითხოვს სპეციფიკურ კვლევით ძალისხმევას მათი ქცევის სრულად გასაგებად.[32]

ბოლო კვლევები ფოკუსირებულია იმის დადგენაზე, თუ რომელი გზებია უნიკალური კონიუნქტივური მელანოციტური დაზიანებებისთვის. ამ განსხვავებების გაგება გადამწყვეტია კონიუნქტივის მელანომისთვის სპეციფიკური ახალი თერაპიის შემუშავებისთვის.

მოლეკულური დიაგნოსტიკის ბოლოდროინდელმა მიღწევებმა მოგვცა ღირებული შეხედულებები გენეტიკური ცვლილებების შესახებ, რომლებიც იწვევს კონიუნქტივურ მელანოციტურ დაზიანებებს. **შემდეგი თაობის თანმიმდევრობა (NGS)** და სხვა მოლეკულური პროფილირების ტექნიკა გამოიყენება ძირითადი მუტაციებისა და ბიომარკერების იდენტიფიცირებისთვის, რომლებსაც შეუძლიათ განსაზღვრონ მკურნალობის გადაწყვეტილებები.

NGS იქნა გამოყენებული კონიუნქტივური მელანომების გენეტიკური ლანდშაფტის ყოვლისმომცველი პროფილის შექმნისათვის. ამ მიდგომამ გამოავლინა ახალი მუტაციები მელანოციტების ბიოლოგიაში ჩართულ გენებში, როგორიცაა **TERT (ტელომერაზას საპირისპირო ტრანსკრიპტაზა)** და **SF3B1** (სპლისეოსომის გენი), რომლებიც დაკავშირებულია სხვა ორგანოთა ავთვისებიანი სიმსივნეებისათვის, მაგრამ შედარებით ახალია თვალის ნეოპლაზიებში.

იმუნური გამშვები პუნქტის ინჰიბიტორები, როგორიცაა ანტი-PD-1 და ანტი-CTLA-4 ანტისხეულები, მოახდინეს რევოლუცია მეტასტაზური მელანომის მკურნალობაში. ეს აგენტები ახლა აქტიური შესწავლის საგანია მათი ეფექტურობისთვის კონიუნქტივური მელანომის დროს, განსაკუთრებით პაციენტებში მაღალი სტადიის ან უკვე მეტასტაზური დაავადების მქონე პაციენტებში. კონიუნქტივის უნიკალურმა იმუნურმა გარემომ შეიძლება გავლენა მოახდინოს იმუნოთერაპიაზე პასუხზე და სხვადასხვა კვლევა მიზნად ისახავს ბიომარკერების იდენტიფიცირებას, რომლებიც პროგნოზირებენ მკურნალობის პასუხს.

გენის რედაქტირების ტექნოლოგიების განვითარება, როგორიცაა **CRISPR/Cas9**, გვთავაზობს ახალ შესაძლებლობებს კონიუნქტივური მელანოციტური დაზიანებების სამკურნალოდ. სიმსივნის ზრდის გამომწვევი სპეციფიკური მუტაციების მიზნობრივი გზით, გენის რედაქტირება შეიძლება პოტენციურად იყოს გამოყენებული მოლეკულურ დონეზე გენეტიკური დეფექტების გამოსასწორებლად.

ხელოვნური ინტელექტი და ციფრული პათოლოგიაზე ორიენტირებული დიაგნოსტიკა: ოფთალმოლოგიური პათოლოგიის კვლევის ერთ-ერთი ყველაზე ახალი და სწრაფად მზარდი სფერო მოიცავს ხელოვნური ინტელექტის (AI) და მანქანათმცოდნეობის (ML) ალგორითმების გამოყენებას. ხელოვნური ინტელექტის მოდელებს შეუძლიათ ხელი შეუწყოთ მელანოციტური დაზიანებების ადრეულ გამოვლენასა და კლასიფიკაციას ჰისტოპათოლოგიური სურათების, კლინიკური სურათების და გენომიური მონაცემების ანალიზით. ამ ინსტრუმენტებს შეუძლიათ განასხვავონ კეთილთვისებიანი ნევუსები ავთვისებიანი მელანომასგან უფრო დიდი სიზუსტით და სიჩქარით, ვიდრე ტრადიციული მეთოდების გამოყენებით.

ციფრული პათოლოგიის გამოჩენამ საშუალება მისცა AI-ის ინტეგრირება ყოველდღიურ კლინიკურ პრაქტიკაში. კონიუნქტივური დაზიანებების მაღალი გარჩევადობის

გამოსახულება, ხელოვნური ინტელექტის ანალიზთან ერთად, დაეხმარება სამომავლოდ კლინიკისტებს დახვეწილი მორფოლოგიური ცვლილებების იდენტიფიცირებაში, რომლებიც შეიძლება მიუთითებდეს ადრეულ ავთვისებიან ტრანსფორმაციაზე. ეს ტექნოლოგია ასევე გვპირდება დიაგნოზების სარწმუნოების გაუმჯობესებას და ასევე მეორე აზრის (Second opinion) კონსულტაციების შესაძლებლობების გაადვილებას.

კონიუნქტივური მელანოციტური დაზიანებების შესწავლა, განსაკუთრებით სხვადასხვა ჰისტოლოგიური ტიპის ნევუსების არის ოფთალმოპათოლოგიის კრიტიკულად მნიშვნელოვანი, მაგრამ ამავდროულად კომპლექსური მიმართულება. მიუხედავად ამ დაზიანებების იშვიათობისა, მათი ავთვისებიან სიმსივნედ ტრანსფორმაციის პოტენციალი და დიაგნოსტიკასა და მკურნალობაში არსებული სირთულეები მათ აქტიური შესწავლისა და კვლევის მნიშვნელოვან სამიზნედ აქცევს. ბოლოდროინდელმა მიღწევებმა მოლეკულურ გენეტიკაში, დამიზნებით თერაპიასა და იმუნოთერაპიაში გახსნა ახალი გზები მკურნალობისთვის, მაშინ როდესაც გამოწვევები, როგორიცაა დიაგნოსტიკური სირთულეების არსებობა და რეციდივის რისკის ზუსტი განსაზღვრა კვლავ გადაუჭრელი რჩება.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] M. C. Herwig-Carl, K. U. Loeffler, and H. E. Grossniklaus, “Melanocytoma of the conjunctiva: Clinicopathologic features of three cases,” *Ocul. Oncol. Pathol.*, vol. 5, no. 4, pp. 290–297, Jun. 2019, doi: 10.1159/000496557.
- [2] S. Nahon-Estève *et al.*, “Small but challenging conjunctival melanoma: New insights, paradigms and future perspectives,” *Cancers (Basel)*, vol. 13, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/CANCERS13225691
- [3] M. Sugiura, K. A. Colby, M. C. Mihm, and A. Zembowicz, “Low-risk and high-risk histologic features in conjunctival primary acquired melanosis with atypia: Clinicopathologic analysis of 29 cases,” *American Journal of Surgical Pathology*, vol. 31, no. 2, pp. 185–192, Feb. 2007, doi: 10.1097/01.PAS.0000213339.32734.64.
- [4] “Melanocytic lesions of the conjunctiva: an up-to-date review - ScienceDirect.” Accessed: May 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756231723001652>
- [5] C. L. Shields, S. Kaliki, S. A. Al-Dahmash, S. E. Lally, and J. A. Shields, “American joint committee on cancer (AJCC) clinical classification predicts conjunctival melanoma outcomes,” *Ophthalmic Plast. Reconstr. Surg.*, vol. 28, no. 5, pp. 313–323, Sep. 2012, doi: 10.1097/IOP.0B013E3182611670.

- [6] R. Folberg, I. W. McLean, and L. E. Zimmerman, "Primary acquired melanosis of the conjunctiva," *Hum. Pathol.*, vol. 16, no. 2, pp. 129–135, 1985, doi: 10.1016/S0046-8177(85)80061-7.
- [7] S. Seregard, "Pigmented spindle cell naevus of Reed presenting in the conjunctiva," *Acta Ophthalmol. Scand.*, vol. 78, no. 1, pp. 104–106, Feb. 2000, doi: 10.1034/J.1600-0420.2000.078001104.X.
- [8] C. L. Shields, H. Demirci, J. A. Shields, and C. Spanich, "Dramatic regression of conjunctival and corneal acquired melanosis with topical mitomycin C [2]," *British Journal of Ophthalmology*, vol. 86, no. 2, pp. 244–245, 2002, doi: 10.1136/BJO.86.2.244.
- [9] T. Vandenboom *et al.*, "Genomic fusions in pigmented spindle cell nevus of reed," *American Journal of Surgical Pathology*, vol. 42, no. 8, pp. 1042–1051, Aug. 2018, doi: 10.1097/PAS.0000000000001074.
- [10] A. Díaz *et al.*, "Pigmented spindle cell nevus: Clues for differentiating it from spindle cell malignant melanoma. a comprehensive survey including clinicopathologic, immunohistochemical, and FISH studies," *American Journal of Surgical Pathology*, vol. 35, no. 11, pp. 1733–1742, Nov. 2011, doi: 10.1097/PAS.0B013E318229CF66.
- [11] J. H. Francis, H. E. Grossniklaus, L. A. Habib, B. Marr, D. H. Abramson, and K. J. Busam, "BRAF, NRAS, and GNAQ mutations in conjunctival melanocytic nevi," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, vol. 59, no. 1, pp. 117–121, Jan. 2018, doi: 10.1167/IOVS.17-22517.
- [12] R. Folberg and C. I. W. McLean, "Primary acquired melanosis and melanoma of the conjunctiva: Terminology, classification, and biologic behavior," *Hum. Pathol.*, vol. 17, no. 7, pp. 652–654, 1986, doi: 10.1016/S0046-8177(86)80175-7.
- [13] R. Folberg, "Naming the Precursors of Conjunctival Melanoma," *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 162, pp. 1–2, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.AJO.2015.11.037.
- [14] T. Milman *et al.*, "Validation of the Newly Proposed World Health Organization Classification System for Conjunctival Melanocytic Intraepithelial Lesions: A Comparison with the C-MIN and PAM Classification Schemes," *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 223, pp. 60–74, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.AJO.2020.10.020.
- [15] G. S. Negretti, K. A. Roelofs, B. Damato, M. Sagoo, S. Parvizi, and V. M. L. Cohen, "The natural history of conjunctival naevi in children and adolescents," *Eye (Basingstoke)*, vol. 35, no. 9, pp. 2579–2584, Sep. 2021, doi: 10.1038/S41433-020-01273-4.

- [16] H. S. Mudhar *et al.*, “PRAME expression by immunohistochemistry and reverse transcription quantitative PCR in conjunctival melanocytic lesions—a comprehensive clinicopathologic study of 202 cases and correlation of cytogenetics with PRAME expression in challenging conjunctival...,” *Hum. Pathol.*, vol. 134, pp. 1–18, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.HUMPATH.2023.02.002.
- [17] G. Virgili *et al.*, “Incidence and Survival of Patients with Conjunctival Melanoma in Europe,” *JAMA Ophthalmol.*, vol. 138, no. 6, pp. 601–608, Jun. 2020, doi: 10.1001/JAMAOPHTHALMOL.2020.0531.
- [18] T. A. Weppelmann, K. T. Zimmerman, and V. Rashidi, “Trends in Incidence of Conjunctival Melanoma in the US,” *JAMA Netw. Open*, vol. 5, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.1001/JAMANETWORKOPEN.2022.37229.
- [19] T. J. LIESEGANG, “Pigmented Conjunctival and Scleral Lesions,” *Mayo Clin. Proc.*, vol. 69, no. 2, pp. 151–161, 1994, doi: 10.1016/S0025-6196(12)61042-8.
- [20] I. Sayed-Ahmed *et al.*, “Blue Nevi of the Ocular Surface: Clinical Characteristics, Pathologic Features, and Clinical Course,” *Ophthalmology*, vol. 125, no. 8, pp. 1189–1198, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.OPHTHA.2018.02.006.
- [21] L. Levecq, P. De Potter, and J. Jamart, “Conjunctival Nevi. Clinical Features and Therapeutic Outcomes,” *Ophthalmology*, vol. 117, no. 1, pp. 35–40, Jan. 2010, doi: 10.1016/J.OPHTHA.2009.06.018.
- [22] D. Šekoranja, G. Hawlina, and J. Pižem, “PRAME expression in melanocytic lesions of the conjunctiva,” *Histopathology*, vol. 79, no. 6, pp. 989–996, Dec. 2021, doi: 10.1111/HIS.14452.
- [23] C. L. Shields, A. Fasiuddin, A. Mashayekhi, and J. A. Shields, “Conjunctival Nevi: Clinical Features and Natural Course in 410 Consecutive Patients,” *Archives of Ophthalmology*, vol. 122, no. 2, pp. 167–175, Feb. 2004, doi: 10.1001/ARCHOPHT.122.2.167.
- [24] F. A. Jakobiec, P. Bhat, and K. A. Colby, “Immunohistochemical studies of conjunctival nevi and melanomas,” *Archives of Ophthalmology*, vol. 128, no. 2, pp. 174–183, Feb. 2010, doi: 10.1001/ARCHOPHTHALMOL.2009.394.
- [25] F. A. Jakobiec, K. Colby, A. M. Bajart, S. J. Saragas, and A. Moulin, “Immunohistochemical studies of atypical conjunctival melanocytic nevi,” *Archives of Ophthalmology*, vol. 127, no. 8, pp. 970–980, Aug. 2009, doi: 10.1001/ARCHOPHTHALMOL.2009.171.

- [26] A. Zembowicz, R. V. Mandal, and P. Choopong, “Melanocytic lesions of the conjunctiva,” *Arch. Pathol. Lab. Med.*, vol. 134, no. 12, pp. 1785–1792, Dec. 2010, doi: 10.5858/2009-0522-RAR.1.
- [27] Y. Y. Huang, S. M. Hrycaj, M. P. Chan, A. M. Stagner, R. M. Patel, and S. C. Bresler, “PRAME Expression in Junctional Melanocytic Proliferations of the Conjunctiva: A Potential Biomarker for Primary Acquired Melanosis/Conjunctival Melanocytic Intraepithelial Lesions,” *American Journal of Dermatopathology*, vol. 44, no. 10, pp. 734–740, Oct. 2022, doi: 10.1097/DAD.0000000000002201.
- [28] E. Zamir, H. Mechoulam, A. Micera, F. Levi-Schaffer, and J. Pe’er, “Inflamed juvenile conjunctival naevus: Clinicopathological characterisation,” *British Journal of Ophthalmology*, vol. 86, no. 1, pp. 28–30, 2002, doi: 10.1136/BJO.86.1.28.
- [29] K. Svedberg, “Recurrence of Primary Acquired Melanosis and Conjunctival Intraepithelial Neoplasia,” *Ocul. Oncol. Pathol.*, vol. 8, no. 4–6, pp. 236–241, Feb. 2023, doi: 10.1159/000526985.
- [30] R. Folberg, I. W. McLean, and L. E. Zimmerman, “Malignant melanoma of the conjunctiva,” *Hum. Pathol.*, vol. 16, no. 2, pp. 136–143, 1985, doi: 10.1016/S0046-8177(85)80062-9.
- [31] J. M. McDonnell, Y. Y. Sun, and D. Wagner, “HMB-45 Immunohistochemical Staining of Conjunctival Melanocytic Lesions,” *Ophthalmology*, vol. 98, no. 4, pp. 453–458, 1991, doi: 10.1016/S0161-6420(91)32281-4.
- [32] J. A. Van Ipenburg, J. Damman, D. Paridaens, and R. M. Verdijk, “Histopathological and Molecular Features of a Conjunctival Caruncular Deep Penetrating Nevus,” *Ocul. Oncol. Pathol.*, vol. 6, no. 4, pp. 293–296, Aug. 2020, doi: 10.1159/000504966.

Heterogeneity, Phenotypic Characteristics, and Risk Features of Malignant Progression in Conjunctival Melanocytic Lesions (Critical review)

Ana Benidze¹ Tinatin Kilasonia² Giorgi Burkadze³ Shota Kepuladze⁴

¹PhD student at Tbilisi State Medical University; Ophthalmologist; ²Associate Professor at the Department of Ophthalmology, Tbilisi State Medical University; ³Professor of the Department of Pathological Anatomy, Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; ⁴Pathologist, Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; Associate Professor of the Department of Molecular Pathology;

Abstract

Conjunctival melanocytic lesions represent a heterogeneous group of benign, premalignant, and malignant entities, including conjunctival nevi, primary acquired melanosis (PAM), and conjunctival melanoma. These lesions demonstrate considerable variability in clinical behaviour, histopathological architecture, molecular profile, and malignant transformation potential. In modern ophthalmic pathology, increasing attention is directed toward identifying phenotypic and molecular indicators associated with progression, recurrence, and metastatic risk. This critical review aims to analyse the current classification, histological and immunohistochemical characteristics, epidemiological aspects, and mechanisms of progression of conjunctival melanocytic lesions. The review discusses the normal histological structure of the conjunctiva, the biological role and distribution of melanocytes, and the diagnostic significance of markers such as S-100, HMB-45, Melan-A, Ki-67, and p53. Particular emphasis is placed on molecular alterations, including BRAF, NRAS, and KIT mutations, which are associated with malignant progression.

Additionally, the review highlights the emerging role of artificial intelligence and digital pathology in diagnostic assessment, prognostic evaluation, and risk stratification. The importance of the tumor microenvironment, tumour-infiltrating lymphocytes (TILs), angiogenesis, and immune regulation in the biological behaviour of conjunctival melanoma is also discussed. The heterogeneity and rarity of conjunctival melanocytic lesions continue to create significant diagnostic and therapeutic challenges, necessitating interdisciplinary approaches and integration of modern molecular technologies. Further research in this field is essential for improving early diagnosis, individualised treatment strategies, and patient prognosis.

Keywords: Conjunctiva; melanocytic lesions; conjunctival nevus; primary acquired melanosis; conjunctival melanoma; heterogeneity; immunohistochemistry; BRAF; Ki-67; digital pathology.

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ანა ბენიძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი
ოფთალმოლოგი;

Ana Benidze - PhD student at Tbilisi State Medical University; Ophthalmologist;

+995577000003

anabenidze92@gmail.com

თინათინ კილასონია - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის
ოფთალმოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი;

Tinatin Kilasonia - Associate Professor at the Department of Ophthalmology, Tbilisi State
Medical University;

[linkedin.com/in/tinatin-kilasonia-9305b916b](https://www.linkedin.com/in/tinatin-kilasonia-9305b916b)

t.kilasonia@tsmu.edu

ORCID: 0009-0000-7068-0513

შოთა კეპულაძე - თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული
პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi

State Medical University; Doctor of Pathology;

Shota.kepuladze@gmail.com sh.kepuladze@tsmu.edu

<https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

გიორგი ბურკაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი,
მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;

George Burkadze - Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department of
Molecular Pathology;

E-mail: burkadze@yahoo.com g.burkadze@tsmu.edu

Phone Number: 599578833

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

Study of the surface structure of membranes and correlation analysis with the conformational state of the polymer

George Bibileishvili*, Liana Ebanoidze, Nana Gogesashvili, Mzia Kezherashvili, Liana Kuparadze, Manana Mamulashvili

*Academic Doctor of Chemical and Biological Engineering - e-mail 75bibileishvili@mail.com ORCID <https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>

Engineering Institute of Membrane Technologies Georgian Technical University

Abstract

The paper presents a topographic study of the surface relief of the solidified phase of polymer composite membranes using scanning probe microscopy. The study was conducted using a high-resolution scanning probe and tunneling microscope, Certus Standart V, equipped with an NSG20-type cantilever, operating in non-contact mode. Tips with of radius of probe of 10 nm, 5 nm, 3 nm, 2 nm, and 1 nm were used, enabling nanoscale structural analysis.

Reducing the radius of the probe tip resulted in a consistent increase in spatial resolution, making it possible to perform detailed nanoscale structural characterization and to identify structural elements of different sizes and shapes. A correlation was identified between the conformational state of the polymer and the structural characteristics of the solidified phase. It was found that decreasing radius of probe enhances spatial resolution, which allows for more precise identification of nanostructural elements and inhomogeneities (heterogeneity).

Keywords: membrane, structure, morphology, relief, roughness, conformation

1. Introduction

Polysulfone and polyethersulfone membranes are widely used for the separation, purification, and concentration of substances. Owing to their high chemical and thermal stability, mechanical strength, and resistance to aggressive environments, these membranes play an important role in water treatment, pharmaceutical manufacturing, biotechnological processes, and the food industry [1-2].

The selectivity, specific performance, and fouling resistance of membranes depend on their structural and morphological characteristics, which are in turn determined by surface topography, pore size, and relief surface elevations and valleys (roughness) .

The conformational state of macromolecules (helical, extended, or aggregated forms) has a significant impact on the spatial organization of the polymer matrix (hard regions), including the three-dimensional arrangement of polymer macromolecules, their interconnection between crystalline and amorphous regions, and the resulting morphology (pore size, distribution, form, shape relief surface elevations and valleys). In-depth (a comprehensive) analysis of the relationship between polymer conformation and surface morphological parameters remains an unsolved scientific challenge [3-6].

A complete assessment of the structural and morphological characteristics of polyethersulfone membranes can be achieved using Scanning Probe Microscopy (SPM), which provides high-resolution imaging at the nanometric and subnanometric levels and delivers detailed information about the topography, morphology, and physical and mechanical properties of the membrane surface [7-12].

The aim of this research is to analyze the surface-relief topography of the solidified phase of polymer compositions of membranes using a scanning probe and tunneling microscope - Certus Standard V, equipped with an NSG20-type cantilever with tip radii of 10 nm, 5 nm, 3 nm, 2 nm, and 1 nm, and to correlate the conformational state of the polymer with the structure of its solidified phase

2. Research object

The object of research is selected as a polyethersulfone membrane.

2.1. Research materials and methods

Polymer compositions were prepared using a polymer (Polyethersulfone, PES), a solvent (Dimethylformamide, DMF), and organic additives (Polyethylene glycol, PEG), which ensured solution homogeneity, appropriate viscosity, and the required concentration.

Asymmetric, porous polyethersulfone (PES) membranes with a dense selective layer were fabricated by the wet phase inversion method (Non-solvent Induced Phase Separation, NIPS), which is based on the phase separation of a polymer solution due to diffusional exchange between solvent and non-solvent [13].

3. Experiment

The membrane structure was investigated using a Certus standard V scanning probe and tunneling microscope using an NSG20 type cantilever. Scanning was performed over an area of $13.047\mu\text{m} \times 13.002\mu\text{m} \approx 169.6\mu\text{m}^2$ in non-contact mode. Tips with radius of probe of 10 nm, 5 nm, 3 nm, 2 nm, and 1 nm were used, whereby the spatial resolution varied and different structural elements of the membrane were identified.

Before measurement, the membrane prepared by the phase inversion technique was washed with deionized water, dried at 4°C, and mounted on a solid support.

During the scanning process, dynamic changes in surface forces and electrical signals were recorded by moving the probe cantilever tip over the membrane surface. After signal processing, the screen displayed 2D (flat geometry, two dimensions - length and width) or 3D (spatial

geometry, three dimensions - length, width, and depth) images of the surface high-resolution. A detailed analysis of the porous microstructure of the membrane was performed by scanning. The results of the study are presented in Tables 1, 2, 3 and 4 and illustrated in Figures 1, 2, 3, 4, 5 and 6.

Table 1. Characteristics of measurements using with radius of probes 10 nm, 5 nm, 3 nm, 2 nm, and 1 nm

Parameter	Characteristic		
	Distortion type	Roughness, $S_{a_{meas}}$	Cause of loss
10 nm	Expressive convolution	Strong topographic smoothing	Significant loss of nanorelief
5 nm	Moderate convolution	Is partially is decreasing	Moderate loss of terrain
3 nm	Weak Convolution	Good compliance	Little loss of relief
2 nm	Very weak convolution	Maximum Compatibility	Minimal loss
1 nm	Minimal convolution	Almost real terrain	Practically lossless

Table 2. Comparison of probes

Probe radius, nm	Distortion	Expansion
10 nm	Strong	Low
5 nm	Moderate	Average
3 nm	Weak	High
2 nm	Very weak	Very high
1 nm	Minimum	Maximum

Table 3. Values of the radius of gyration (R_g) and the measured average roughness ($S_{a_{meas}}$) using with radius of probe 10 nm, 5 nm, 3 nm, 2 nm, and 1 nm

№	Radius of inertia R_g , nm	Roughness (True) S_a , nm	Average roughness (measured) depending on the radius of probe used, $S_{a_{meas}}$, nm				
			10 nm	5 nm	3 nm	2 nm	1 nm
1	3	3.32	1.59	2.03	2.35	2.57	2.88
2	4	3.13	1.67	2.09	2.37	2.55	2.80
3	5	2.43	1.40	1.72	1.92	2.05	2.22
4	6	2.06	1.26	1.52	1.68	1.78	1.91
5	7	1.83	1.17	1.40	1.53	1.61	1.71
6	8	1.51	1.01	1.18	1.29	1.35	1.42

Table 3. Values of radius of gyration (R_g), measured average roughness ($S_{a_{meas}}$), and loss (absolute and relative) accuracy when using 10 nm, 5 nm, 3 nm, 2 nm, and 1 nm radius of probes

№	Radius of inertia R_g , nm	Roughness (True) S_a , nm	Probe radius, R_t , nm	Average Roughness (measured), $S_{a_{meas}}$, nm	Loss accuracy	
					Absolute loss, nm	Relative loss, %
1	3	3.32	10	1.59	≈1.73	≈52.1
2	4	3.13		1.67	≈1.46	≈46.6
3	5	2.43		1.40	≈1.03	≈42.4
4	6	2.06		1.26	≈0.80	≈38.8
5	7	1.83		1.17	≈0.66	≈31.1
6	8	1.51		1.01	≈0.50	≈33.1
1	3	3.32	5	2.03	≈1.29	≈38.9
2	4	3.13		2.09	≈1.04	≈33.2

3	5	2.43		1.72	≈0.71	≈29.2
4	6	2.06		1.52	≈0.54	≈26.2
5	7	1.83		1.40	≈0.43	≈23.5
6	8	1.51		1.18	≈0.33	≈21.9
1	3	3.32	3	2.35	≈0.97	≈29.2
2	4	3.13		2.37	≈0.76	≈24.3
3	5	2.43		1.92	≈0.51	≈21.0
4	6	2.06		1.68	≈0.38	≈18.4
5	7	1.83		1.53	≈0.30	≈16.4
6	8	1.51		1.29	≈0.22	≈14.16
1	3	3.32	2	2.57	≈0.75	≈22.6
2	4	3.13		2.55	≈0.58	≈18,5
3	5	2.43		2.05	≈0.38	≈15.6
4	6	2.06		1.78	≈0.28	≈13.6
5	7	1.83		1.61	≈0.22	≈12.0
6	8	1.51		1.35	≈0.16	≈10.6
1	3	3.32	1	2.88	≈0.44	≈13.3
2	4	3.13		2.80	≈0.33	≈10.5
3	5	2.43		2.22	≈0.21	≈8.6
4	6	2.06		1.91	≈0.15	≈7.3
5	7	1.83		1.71	≈0.12	≈6.6
6	8	1.51		1.42	≈0.09	≈6.0

4. Judging and Concluding the Research Results

The analysis showed that when using a 10 nm radius of probe, the smoothness of the surface relief is clearly visible in high-resolution 2D and 3D images (Figure 1), due to the convolution

(curvature, distortion) effect, which is due to the imperfect geometry of the probe tip used (the probe tip is not thin/sharp enough). The arithmetic mean (R_a) and root mean square (R_q) values of surface roughness are relatively low - approximately 35-45% less than in the data obtained with a 1 nm radius of probe, which significantly limits the resolution of pores with diameters less than 30 nm. As a result of the convolution effect, the elevations of the polymer matrix are artificially enlarged, and the contrast of the image is reduced. The morphological picture of the surface is quite uniform. However, it still cannot fully reflect the microstructural differences caused by polymer conformation. At this level of resolution, it is impossible to accurately differentiate between both extended coil and collapsed globule conformations.

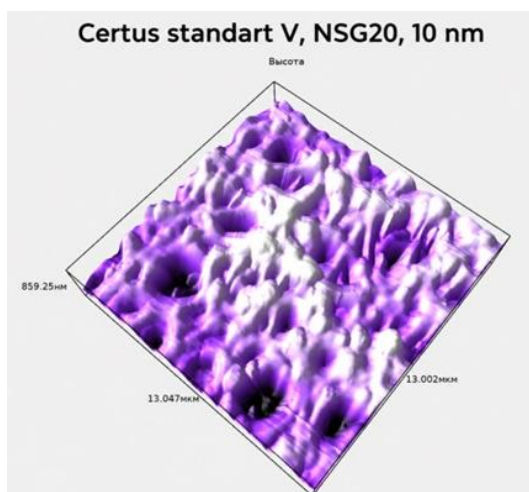


Figure 1. 3D image of the membrane surface obtained using Scanning probe microscope a 10 nm radius of probe

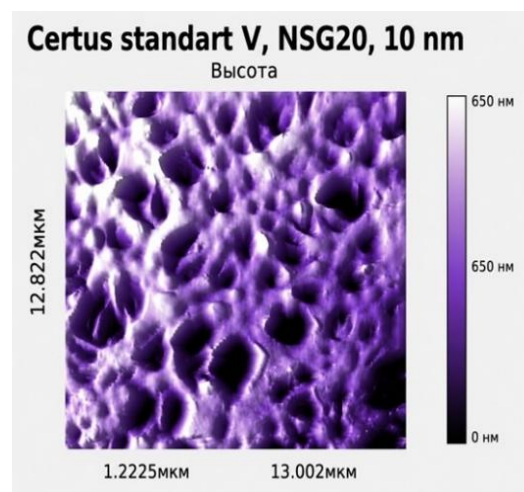


Figure 2. 2D image of the membrane surface obtained with Scanning probe microscope a 10 nm radius of probe

Reducing the probe tip radius to 5 nm revealed an improvement in lateral resolution, which provided relatively clear and detailed visualization of pores with sizes ranging from 15–60 nm. Under these conditions, a 15-20% increase in surface roughness (R_a and R_q) parameters was observed compared to the data obtained with a 10 nm radius of probe, indicating a more accurate reflection of the surface topography. The pore distribution has become adequate and more consistent. However, structures smaller than 10 nm are still subject to partial convolution effects, which in this case is also explained by the geometric limitations of the probe. At this level of resolution, morphological differences due to the conformational state of the polymer are relatively clearly visible. In particular, samples with an expanded coil polymer globule conformation, obtained from a good solvent ($\chi < 0.5$, good solvent), are dominated by a structured system of medium-sized (25-50 nm) pores and increased roughness. In contrast, in the case of a compact conformation ($\chi > 0.5$, poor solvent), the polymer chains are more tightly packed, which contributes to the formation of a denser structure, where small pores (<25 nm) predominate (sponge-like morphology).

By reducing the radius of probe to 3 nm, a significant improvement in surface relief detail at the micro- and nano-level is observed in the 2D image (Figure 2.), along with its clarity. The

roughness (R_a , and R_q) parameters increased by 25–45% compared to the 10 nm radius of probe, and proper identification of small pores with a diameter of 10–20 nm began. The morphological picture acquired a more pronounced asymmetric/gradient spatial organization (a more regular and ordered arrangement of pores and layers in space), which is typical for polymer membranes obtained by phase inversion. Here, a correlation with the polymer conformation was clearly revealed: the extended coil conformation of the macromolecules led to the formation of an open bi- or trimodal porous structure with well-developed nanofibrillar matrix elements and maximum pore size (R_{max}) values. In contrast, the partially collapsed globule promoted the formation of a denser layer - with a predominance of pores smaller than 15 nm and a 20–30% reduction in roughness.

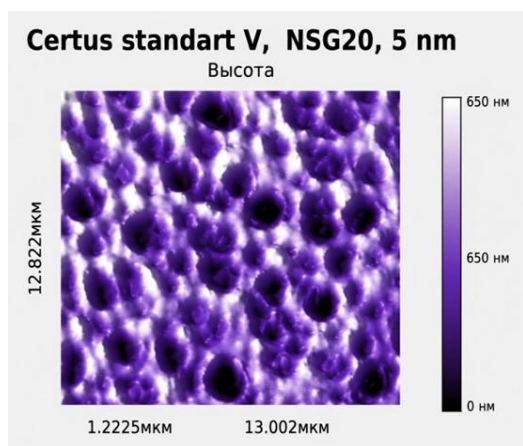


Figure 3. 2D image of the membrane surface obtained using Scanning probe microscope a 5 nm radius of probe

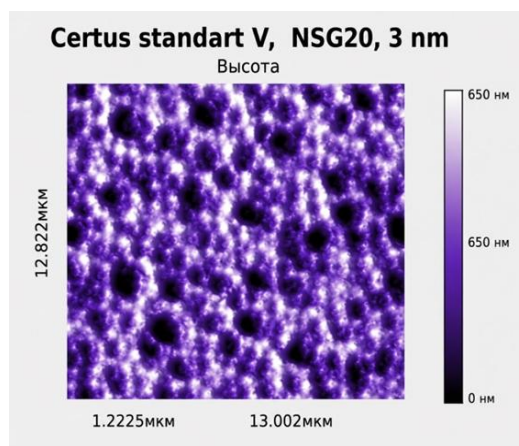


Figure 4. 2D image of the membrane surface obtained with Scanning probe microscope a 3 nm radius of probe

Comparative analysis of 2D images (Figure 3.) showed that the use of high-precision probes with a radius of 1–2 nm resulted in maximum surface detailing. Pores with a diameter of less than 10 nm and the smallest nanostructured elements of the polymer matrix were accurately and reliably distinguished (identified). The roughness parameters (R_a , R_q and R_{max}) reached their maximum values, and the pore distribution became more uniform and differentiated. It is at this level of resolution that the dependence of the membrane structure on the conformational state of the polymer becomes apparent, namely:

- In the case of the extended coil conformation of the polymer, a morphology with a wide pore distribution (from less than 10 nm to 60 nm) and maximum values of all thickness parameters roughness;
- Under the conditions of the compact conformation of the collapsed globule of the polymer, a denser and more uniform surface was formed, which is distinguished by a decrease in the number of pores less than 10 nm, a shift in the pore size distribution to the region less than 20 nm, as well as a 35–50% decrease in the roughness parameters (R_a , and R_q) compared to the expanded conformation. These changes indicate rapid globular aggregation of polymer chains.

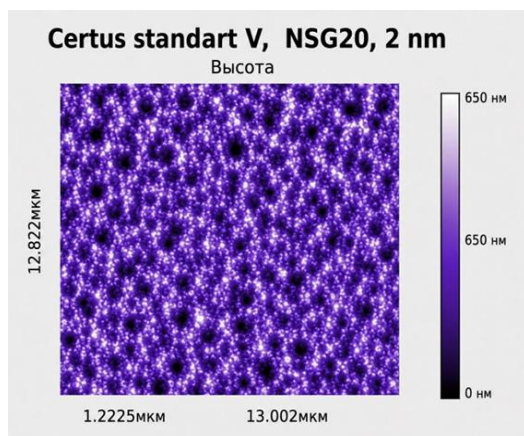


Figure 5. 2D image of the membrane surface obtained using Scanning probe microscope a 2 nm radius of probe

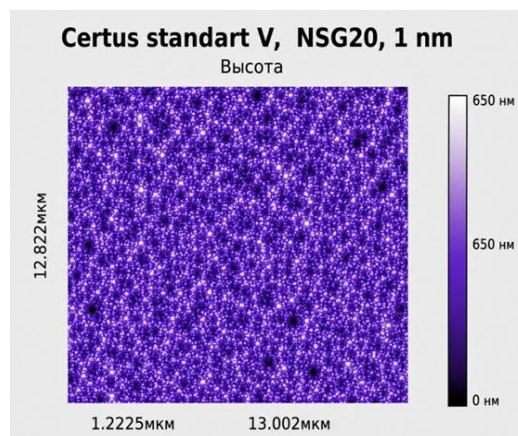


Figure 6. 2D image of the membrane surface obtained with Scanning probe microscope a 1 nm radius of probe

Thus, reducing the probe tip radius results in a substantial improvement in the spatial resolution of 2D and 3D images. A probe with a radius of 10 nm resulted in convolutional smoothing and a reduction in the roughness parameters, which limits the accurate identification of sub-nanometer (<30 nm) pores. Reducing the radius of probe to 3 nm, and especially to 1 nm, revealed the nanostructural features of the surface, maximum detailing of the roughness parameters (R_a , R_q , R_{max}), and a clear differentiation of the polymer conformational states (extended coil and collapsed globule) at the morphological level.

References

1. Rahma Tamime, Yvan Wyart, Laure Siozade, Isabelle Baudin, Carole Deumie, Karl Glucina, Philippe Moulin. Membrane Characterization by Microscopic and Scattering Methods: Multiscale Structure. *Membranes* 2011, 1, pp. 91-97. doi:10.3390/membranes1020091;
2. N. Ochoa, P. Prádanos, L. Palacio, C. Pagliero, J. Marchese, A. Hernández. Pore size distributions based on AFM imaging and retention of multidisperse polymer solutes: Characterisation of polyethersulfone UF membranes with dopes containing different PVP. *Journal of Membrane Science*, V.187, №1–2, 2001, pp.227-237.
3. G.Bibileishvili, M.Kezherashvili, N.Gogesashvili, L.Kuparadze, L.Ebanoidze, Z.Javashvili. Effect of the Temperature of the Non-Solvent on the Morphology of the Polymeric Membrane. *European Journal of Scientific Research (EJSR)*, V.161, №1, 2022. pp.5-15. ISSN: 1450-216X/1450-202X;

4. Bibileishvili G.V., Gogesashvili N.N., Mamulashvili M.A., Javashvili Z.D. Study of the Effect of Polymer Additive on the Structure of Membranes Obtained from Aliphatic Amides. Georgian Engineering News, V.93, №2, 2021. pp.107-109. ISSN: 1512-0287.
<https://doi.org/10.36073/1512-0287;>
5. Bibileishvili G.V., Gogesashvili N.N., Gogiberidze I.B. Study of Issues of Structural Organization of Polymer in Acceptable Compositions of Microfiltration Membranes. Georgian Engineering News, V.98, №2, 2023. pp.55. ISSN: 1512-0287.
<https://doi.org/10.36073/1512-0287;>
6. Bibileishvili G.V., Gogesashvili N.N., Kezherashvili M.G., Kakabadze E.G. Influence of Membrane Structure Forming Polymer Additive on Quantitative Characteristics of Porosity. Georgian Engineering News, V.95, №1, 2022. pp.130-131. ISSN: 1512-0287.
<https://doi.org/10.36073/1512-0287;>
7. G.Bibileishvili, M.Kezherashvili, Z.Javashvili, Kh.Zakroshvili. Influence of the Composition of the Molding Solution on the Structure and Porosity of the Membrane. Georgia Chemical Journal, V.18, №1, 2018. pp.126-128. ISSN: 1512-0686;
8. G.Bibileishvili, M.Kezherashvili, Z.Javashvili. Structural and Topographical Survey of Polymeric Materials for the Creation of Industrial Composite Membranes. Georgian Chemical Journal, V.17, №1, 2017. pp.174-176. ISSN: 1512-0686;
9. G.Bibileishvili, M.Kezherashvili, Z.Javashvili, M.Madzgarashvili. Study of Surface Roughness of Modified and Unmodified Membranes. Georgia Chemical Journal, V.18, №1, 2018. pp.124-125. ISSN: 1512-0686;
10. G.Bibileishvili, M.Kezherashvili, N.Gogesashvili, N.Mumladze, E.Kakabadze, L.Ebanoidze, T.Butkhuzi, Z.Javashvili. Processing of Methods for Topographical and Structural Studies of a Polymeric Membrane Using an Electronic Scanning Probe Microscope. Georgia Chemical Journal, V.18, №1, 2018. pp.133-135. ISSN: 1512-0686;
11. Bibileishvili G.V., Kezherashvili M.G., Mamulashvili M.A. Effect of Different Solvents and Fore-Forming Agents on Morphology and Performance of Polyethersulphone Membranes. Oxidation Communication, V.47, №3, 2024. pp.534-542. ISSN: 0209-4541.
<https://scibulcom.net/en/journal/0209-4541/issue/2024-47-3/>
<https://scibulcom.net/en/article/ZrGfjEAHMz45dN7qeWe;>
12. Bibileishvili G.V., Gogesashvili N.N., Ebanoidze L.O., Kezherashvili M.G. Research of the Influence of Organic Additives on the Structure of Polysulfone Membranes. Georgian Engineering News, V.93, №2, 2021. pp.110-112. ISSN: 1512-0287.
<https://doi.org/10.36073/1512-0287;>
13. Bibileishvili, G.V., Kujawski, M.W., Gogesashvili, N.N., Kezherashvili, M.G., Javashvili, Z.D., Ebanoidze, L.O., Kakabadze, E.D. Study of the Effect of Varying Amounts of Polyvinylpyrrolidone and LiCl on the Structure and Properties of Polyethersulphone Membranes. Oxidation Communications, V.48, №3, 2025. pp.992-999. ISSN: 0209-4541

მემბრანების ზედაპირის სტრუქტურის კვლევა სხვადასხვა სივრცითი გარჩევადობის პირობებში და კონფორმაციული მდგომარეობათა კორელაციური ანალიზი

გიორგი ბიბილეიშვილი*, ლიანა ებანოიძე, ნანა გოგესაშვილი, მზია კეჭერაშვილი,
ლიანა ყუფარაძე, მანანა მამულაშვილი

*ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერიის აკადემიური დოქტორი, მთავარი მეცნიერი -

e-mail 75bibileishvili@mail.com ORCID <https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მემბრანული ტექნოლოგიების საინჟინრო
ინსტიტუტი

აბსტრაქტი

ნაშრომში წარმოდგენილია პოლიმერული კომპოზიციების გამყარებული ფაზის - მემბრანების ზედაპირის რელიეფის ტოპოგრაფიული კვლევა მასკანირებული ზონდური მიკროსკოპიის გამოყენებით. კვლევა ჩატარებულია მაღალი რეზოლუციის მასკანირებულ ზონდურ და ტუნელურ მიკროსკოპზე - Certus standart V, NSG20 ტიპის კანტილევრით, უკონტაქტო რეჟიმის პირობებში და ზონდის ნემსის რადიუსით 10 ნმ, 5 ნმ, 3 ნმ, 2 ნმ და 1 ნმ, რამაც უზრუნველყო სტრუქტურული ანალიზის წარმოება ნანომასშტაბიან დონეზე. ზონდის ნემსის რადიუსის შემცირებამ უზრუნველყო სივრცითი გარჩევადობის თანმიმდევრული ზრდა, შესაძლებელი გახდა ნანომასშტაბიან დონეზე სტრუქტურული ანალიზის ჩატარება და განსხვავებული მასშტაბის (ზომის ან ფორმის) სტრუქტურული ელემენტების იდენტიფიკაცია. გამოვლენილია კორელაციური კავშირი პოლიმერის კონფორმაციულ მდგომარეობასა და გამყარებული ფაზის სტრუქტურულ მახასიათებლებს შორის. დადგინდა, რომ ზონდის ნემსის რადიუსის შემცირება ზრდის შესაძლებელ სივრცით გარჩევადობას, რაც ნანოსტრუქტურული ელემენტებისა და არაერთგვაროვნებების (ჰეტეროგენულობების) დეტალური იდენტიფიკაციის საშუალებას იძლევა.

საკვანძო სიტყვები: მემბრანა, სტრუქტურა, მორფოლოგია, რელიეფი, სიმქისე, კონფორმაცია

Integrated Particle Size Classification and Baromembrane Filtration for Fouling Control in Natural Water Treatment

George Bibileishvili¹, Kezherashvili Mzia², Zaza Javashvili, Nana Gogesashvili, Liana Kuparadze, Elene Kakabadze

Engineering Institute of Membrane Technologies of Georgian Technical University

¹Doctor, Chief Scientist- e-mail:75bibileishvili@gmail.com ORSID ID:<http://orsid/0009-0003-7712-2436>

²Doctor, Chief Scientist - e-mail: kezherashvilimzia@gmail.com ORSID ID:<http://orsid/0009-0001-9491-7949>

Abstract

This article presents the results of theoretical and experimental studies on the mechanisms of natural water contamination via nanofiltration under turbulent flow conditions. A particle size classifier for natural waters has been developed that effectively describes the composition of the water; based on this, appropriate baromembrane filtration processes can be selected to ensure the gradual removal of particles of various sizes. The particle size classifier for natural waters serves as a tool for elucidating the mechanisms of nanofiltration fouling. Filtration of natural waters and model solutions was conducted under turbulent flow conditions ($Re > 4000$) using a laboratory cross-flow module and polyamide membranes with varying selectivity. It was found that the particle size distribution (PSD) of the deposit formed on the membrane surface systematically changes with membrane selectivity. A membrane with 80% selectivity retained larger particles ($d_{50} \approx 5\text{--}15 \mu\text{m}$). A membrane with 96% selectivity retained smaller colloids ($d_{50} \approx 0.5\text{--}2 \mu\text{m}$), increasing the fraction of 10–500 nm particles. Direct nanofiltration of highly turbid solutions (FTU 10–50) leads to rapid membrane fouling and a significant reduction in flux (>70%). Therefore, it is recommended to perform preliminary micro- and ultrafiltration of highly turbid solutions, reducing turbidity to FTU 2, followed by nanofiltration, which ensures the production of sterile water from heavily contaminated natural water. It was found that as membrane selectivity increases, the particle size distribution (PSD) shifts toward smaller colloids (10–500 nm), leading to the formation of a more compact precipitate. The results confirm that the particle size classifier in natural waters is an effective tool for studying contamination mechanisms and optimizing nanofiltration systems.

Keywords: nanofiltration; membrane fouling; turbulent flow; classifier

Introduction

The deterioration in drinking water quality and the introduction of stricter standards have increased the demand for advanced drinking water treatment technologies, such as microfiltration, ultrafiltration and nanofiltration [1–4]. Nanofiltration membranes are sensitive to water contaminated with colloidal, organic, inorganic and biological particles, leading to membrane fouling, reduced flow, increased transmembrane pressure, higher energy consumption and reduced system efficiency [5–7].

The aim of this study is to conduct a theoretical and experimental investigation of the tangential baromembrane filtration process for industrial-scale flows and domestic water supply, taking into account turbulent flow; and to develop a suitable classification system based on dissolved and suspended particles present in natural waters.

Materials and Methods

Membranes with pore sizes of 5 μm , 1 μm , 0.45 μm and 0.1 μm were used for filtration. At each stage, the retentates were collected, weighed and characterised using elemental analysis, microscopy, IR spectroscopy, light scattering and zeta potential measurement. Model solutions were prepared and used: 0.5% NaCl, 0.4% MgSO_4 , 0.3% CaCl_2 , 0.15% LiCl, the turbidity of which was adjusted within the range of FTU-1, FTU-3, FTU-5, FTU-10 to FTU-50. Membranes and equipment: micro-, ultra- and nanofiltration polyamide membranes with selectivities of 80%, 90% and 96% were used. Filtration of natural waters was carried out under turbulent conditions using a laboratory cross-flow module with a Reynolds number $\text{Re} > 4000$. Operating conditions: transmembrane pressure: 5–10 bar; cross-flow velocity: 0.5–2.5 m/s; high-turbulence model solutions FTU-10, FTU-20, FTU-40 and FTU-50 were pre-treated by microfiltration (0.2–0.45 μm), ultrafiltration (0.1 μm) and nanofiltration (0.01 μm).

Results and conclusions

Particle size plays a decisive role in membrane surface fouling during nanofiltration: nanoparticles and colloids can penetrate the pores or be adsorbed within them, whilst larger particles settle on the surface and contribute to the formation of a fouling layer. Organic matter (NOM fractions), particularly polysaccharides and humic substances, interacts with ions (hydrated K, Cl, Ca, Mg and SO_4 ions), which further exacerbates fouling. Based on theoretical and experimental studies, a particle size classifier for natural waters has been developed.

Table 1. Classifier of particle size

Category	Size range (nm)	Examples
Dissolved substances	<1 nm	Hydrated ions K, Cl, Ca, Mg, SO ₄ . Simple sugars, amino acids
Colloids	1nm-1000nm	Viruses (20-30nm), humic and fulvic acids Proteins, polysaccharides (fibrous) (1-10nm), Natural nanoparticles: iron and silicon oxide (1-100nm); nanoplastics (1 to 1000nm) and microplastics (1000nm to 5000000nm).
Suspended solids	➤ 1000 nm	bacteria (1000nm-10000nm), sediment (2000-50000 nm), clay (500-2000nm), sand over 2000nm

Based on the classifier developed, a suitable baromembrane process was selected for the treatment of natural waters of varying turbidity. For the filtration of low-turbidity water, in which the ionic fraction (<1 nm) predominates, nanofiltration was selected, whilst water containing colloidal and suspended particles was pre-treated by micro- and ultrafiltration. Pre-treatment of heavily contaminated water using microfiltration/ultrafiltration is a critical step in the nanofiltration process, as it reduces the colloidal and solid load on the membrane, minimises pore blockage and sludge formation, and improves the stability of the nanofiltration flow and the service life of the membrane. Furthermore, pre-treatment reduces the rate of fouling, simplifies chemical cleaning cycles and ensures energy-efficient operation of the system. The integration of microfiltration/ultrafiltration processes is particularly effective when the water contains high concentrations of colloids, organic macromolecules, microbiological particles and suspended solids [8-10].

The particle size distribution (PSD) of the sediment formed on the membrane surface varied systematically depending on the membrane's selectivity. On a membrane with 80% selectivity, larger particles ($d_{50} \approx 5\text{--}15\ \mu\text{m}$) predominated in the deposit. A membrane with 96% selectivity retained smaller colloids ($d_{50} \approx 0.5\text{--}2\ \mu\text{m}$, increasing in the 10–500 nm fraction). Particles ranging in size from 0.3–100 nm were deposited on the membrane surface with higher selectivity, forming finer but more stable precipitates.

Scanning probe microscopy revealed that the membrane surface was covered with gel-like, sticky contaminants (Fig. 1, Fig.2, Fig.3, Fig.4), distributed in a layer of uneven thickness. The portion of the contamination in direct contact with the membrane surface and pores could not be removed mechanically, as evidenced by the brown residue remaining on the membrane after physical cleaning. Direct nanofiltration of solutions with high turbidity (FTU 10–50) resulted in a loss of more than 70% of the pure water flow within 30 minutes (and the formation of a thick deposit ($d_{50} > 20\ \mu\text{m}$) on the membrane surface. Pre-treatment of these solutions by

microfiltration/ultrafiltration reduced turbidity to <2 FTU, restoring the clear water flux by more than 95%.

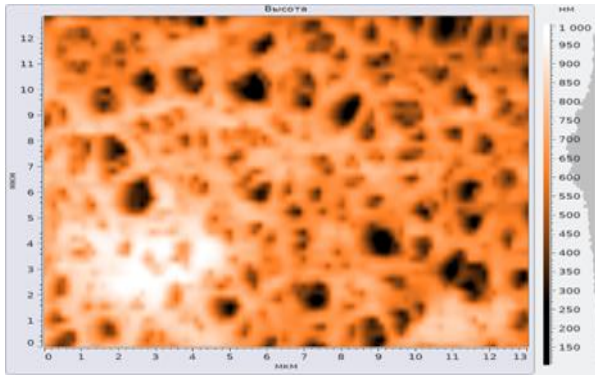


Fig.1 clean membrane

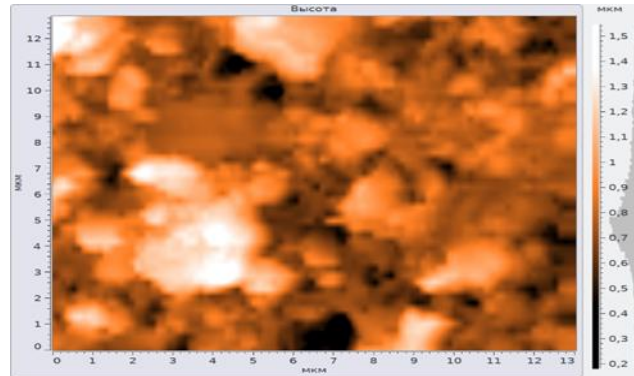


Fig.2 2D-image of sediment formed during filtration of FTU1 turbidity water

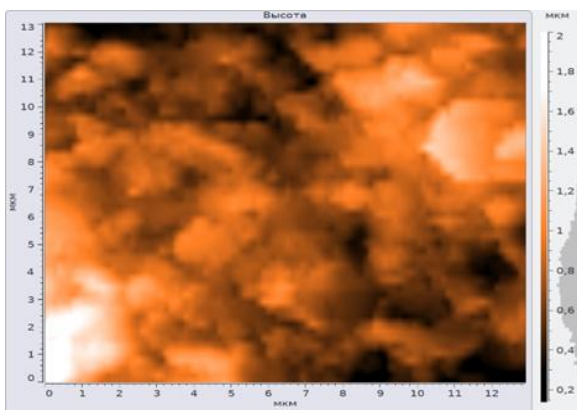


Fig. 3 2D-image of sediment formed during filtration of FTU5 turbidity water

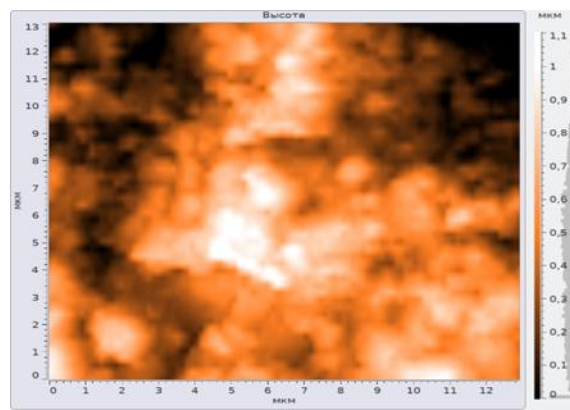


Fig.4 2D-image of sediment formed during filtration of FTU10 turbidity water

During the first two hours of filtration, particles 1–50 nm in size cause pore constriction, resulting in a 45% reduction in flux. Particles 50–500 nm in size block intermediate pores and moderately reduce the pure water flux. Particles 500 nm–2 μ m in size form a sediment layer on the membrane surface, which is the smallest initial reduction in flux.

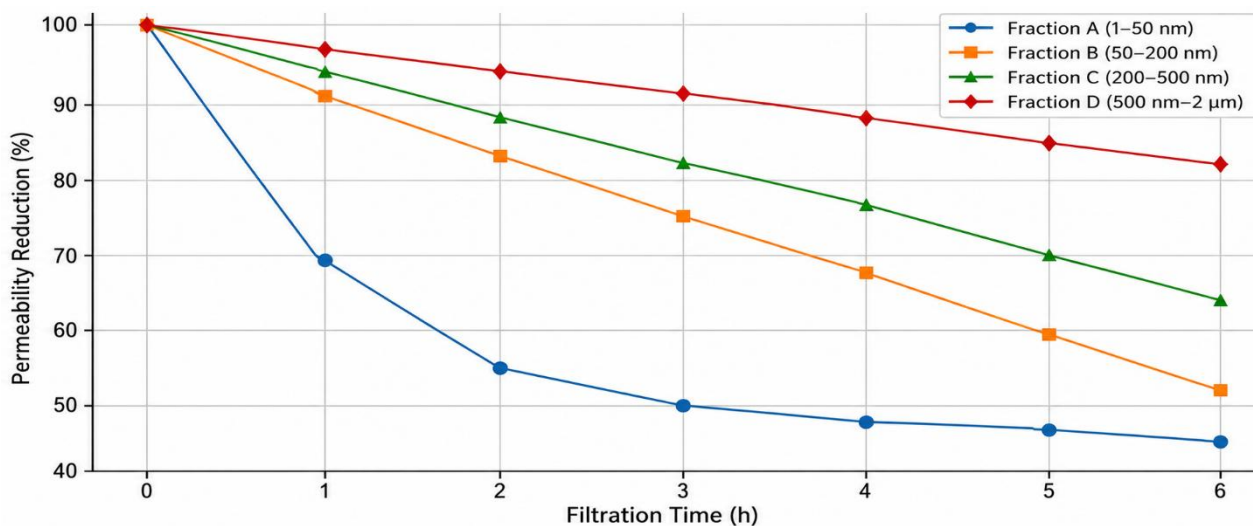


Fig.5 Reduced filter consumption for particles of different sizes

Thus, the fouling mechanism during the filtration of natural water containing particles ranging in size from 10 nm to 1 μm involves the formation of a dense gel layer that blocks the entrance to the pores, leading to the most undesirable type of fouling due to the irreversible loss of membrane selectivity. Particles smaller than 1 nm crystallise on the membrane surface and, due to increased concentration, may detach from the membrane surface. Dissolved macromolecules (NOM) ranging in size from 1 to 10 nm are adsorbed within the pores and on the surface of the membrane matrix, leading to pore narrowing and a change in the membrane's surface charge. Fine colloids adhere to the walls of the internal polyamide pores, whilst larger particles form a porous matrix that compacts under high operating pressure.

The particle-size-based classifier developed enables the rational selection of a specific baromembrane process for the filtration of natural waters with varying degrees of contamination. Natural waters containing particles smaller than 1 nm (dissolved substances, hydrated K and Cl ions (0.7–1 nm), simple sugars) constitute the ionic fraction and are directly subjected to nanofiltration. For waters containing colloids of 1–1000 nm in size, ultra- and nanofiltration are recommended, whilst for suspended colloids of 1 μm in size, microfiltration is recommended. The results obtained show that the efficiency of nanofiltration is determined by three main factors: membrane selectivity, particle size distribution and hydrodynamic conditions. Pre-treatment by microfiltration/ultrafiltration is essential for highly turbid waters, as it reduces the colloidal load and improves the stability of the nanofiltration process. The developed particle size classifier is an effective tool for selecting and optimising baromembrane processes. The results obtained enable the design of nanofiltration systems to be predicted and the treatment of complex waters to be managed.

Reference

- 1.H. Guo, X. Li, W. Yang, Z. Yao, Y. Mei, L.E. Peng, et al. Nanofiltration for drinking water treatment: a review *Front Chem Sci Eng*, pp. 681-698, (2022).
- 2.M. Wanjiya, J.-C. Zhang, B. Wu, M.-J. Yin, Q.-F. An Nanofiltration membranes for sustainable removal of heavy metal ions from polluted water: a review and future perspective *Desalination*, 578, Article 117441, (2024).
3. Guo Y, Yao J, Yan W, Du Y, Yu K, Wang X, Xiao K, Huang X. Membrane fouling in engineering nanofiltration process for drinking water treatment: The spatial and chemical aspects. *J Memb Sci*; 695; (2024).
4. Hendrik J. de Vries, Alfons J. M. Stams, Caroline M. Plugge CM. Biodiversity and ecology of microorganisms in high pressure membrane filtration systems. *Water Research*, Volume 172, 151, (2020).
5. Chon K, Cho J. Fouling behavior of dissolved organic matter in nanofiltration membranes from a pilot-scale drinking water treatment plant: an autopsy study. *Chem Eng J*. 295:268–77, (2016).
- 6.G. Bibileishvili, L. Ebanoidze, M. Kezherashvili, M. Mamulashvili, L. Kuparadze, N. Butkhuzi, I. Gogiberidze. Colloidal-Chemical Study of Sediment Formed Natural Water on a Microfiltration Membrane. *Georgian Scientists*, V.7, №4, pp.435-439, (2025).
- 7.G. Bibileishvili, M. Kezherashvili, Z. Javashvili, N. Gogesashvili, E. Kakabadze, N. Butkhuzi. Investigation of Optimal Mode Parameters of Nanofiltration Separation Process. *Georgian Scientists*, V.7, №4, 2025. pp.444-448, (2025).
8. G. V. Bibileishvili, M. G. Kezherashvili, M. A. Mamulashvili: Effect of Different Solvent and Fore-forming Agent on Morphology and Performance of Polyethersulfone Membranes. *Oxid Commun*, 47 (3), (2024).
9. G. Bibileishvili, M. Kezherashvili, N. Gogesashvili, L. Kuparadze: Influence of Some Factors on Characteristics of Poly-m-phenylene-isophthalamide Membranes-Preparation and Examination of Polyamide Membranes. *Oxid Commun*, 45 (2), 300 (2022).
10. Yu W, Liu T, Crawshaw J, Liu T, Graham N. Ultrafiltration and nanofiltration membrane fouling by natural organic matter: Mechanisms and mitigation by preozonation and pH. *Water Res*; 139:353–62, (2018).

ინტეგრირებული მიდგომა ბუნებრივი წყლების დამუშავებაში დაბინძურების კონტროლისთვის

გიორგი ბიბილეიშვილი, მზია კეჭერაშვილი, ზაზა ჯავაშვილი, ნანა გოგესაშვილი,
ლიანა ყუფარაძე, ელენე კაკაბაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მემბრანული ტექნოლოგიების საინჟინრო
ინსტიტუტი

რეზიუმე

ნაშრომში წარმოდგენილია ბუნებრივი წყლების ნანოფილტრაციის დაბინძურების მექანიზმების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები ტურბულენტური ნაკადის პირობებში. შემუშავებული იქნა ბუნებრივ წყლებში არსებული ნაწილაკების ზომის კლასიფიკატორი, რომელიც ეფექტურად აღწერს წყლის შედგენილობას, რომლის მიხედვით შესაძლებელია ფილტრაციისათვის შეირჩეს შესაბამისი ბარომემბრანული პროცესები და უზრუნველყოს სხვადასხვა ზომის ნაწილაკების ეტაპობრივი მოცილება. ბუნებრივ წყლებში ნაწილაკების ზომის კლასიფიკატორი წარმოადგენს ინსტრუმენტს ნანოფილტრაციული დაბინძურების მექანიზმების გასარკვევად. ბუნებრივი წყლების და მოდელური ხსნარების ფილტრაცია ხორციელდებოდა ტურბულენტურ რეჟიმის პირობებში $Re > 4000$ ლაბორატორიული კროს-ფლოუს მოდულის გამოყენებით სხვადასხვა სელექტიურობის მქონე პოლიამიდური მემბრანების გამოყენებით. დადგენილი იქნა, რომ მემბრანის ზედაპირზე წარმოქმნილი ნალექის ნაწილაკების ზომის განაწილება სისტემატურად იცვლებოდა მემბრანის სელექტიურობასთან ერთად. 80% სელექტიურობის მემბრანაზე ნალექი დომინირებული იყო უფრო დიდი ნაწილაკებით ($d_{50} \approx 5-15$ მკმ). 96% სელექტიურობის მემბრანამ შეინარჩუნა უფრო წვრილი კოლოიდები ($d_{50} \approx 0,5-2$ მკმ, 10-500 ნმ ფრაქციის ზრდა). მაღალი სიმღვრივის (FTU-10-50) ხსნარების პირდაპირი ნანოფილტრაცია იწვევს მემბრანის ზედაპირის სწრაფ დაბინძურებას და ნაკადის მნიშვნელოვან შემცირებას (>70%). ამიტომ რეკომენდირებულია მაღალი სიმღვრივის ხსნარების წინასწარი მიკრო- და ულტრაფილტრაცია, რაც ამცირებს სიმღვრივეს FTU2-მდე და შემდეგ ეტაპზე ნანოფილტრაცია, რაც უზრუნველყოფს მაღალი დაბინძურების მქონე ბუნებრივი წყლებიდან სტერილური წყლის მიღებას. დადგინდა, რომ მემბრანის სელექტიურობის ზრდასთან ერთად ნალექის ნაწილაკების ზომის განაწილება (PSD) გადადის უფრო წვრილი კოლოიდების მიმართულებით (10-500 ნმ), რაც იწვევს უფრო კომპაქტური ნალექის ფორმირებას. მიღებული შედეგები ადასტურებს, რომ ბუნებრივ წყლებში ნაწილაკების ზომის კლასიფიკატორი წარმოადგენს ეფექტურ ინსტრუმენტს დაბინძურების მექანიზმების კვლევისათვის და ნანოფილტრაციული სისტემების ოპტიმიზაციისთვის.

საკვანძო სიტყვები: ნანოფილტრაცია; მემბრანის დაბინძურება; ტურბულენტური ნაკადი; კლასიფიკატორი

Research on the processes of phase inversion and membrane partitioning of polymer of different compositions

George Bibileishvili¹, Nana Gogesashvili², Mzia Kezherashvili, Zaza Javashvili, Liana Kuparaddze, Nona Butkhuzi

Engineering Institute of Membrane Technologies of Georgian Technical University

¹Doctor of Chemical and Biological Engineering, Chief Scientific Officer email:75bibileishvili@gmail.com ORCID ID:<https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>

²Doctor of Chemistry, Chief Scientific Officer email:nanagogesashvili@gmail.com ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0001-5140-5815>

Abstract

The paper examines the process of obtaining 13% polyethersulfone (PES) microfiltration membranes by phase inversion using DMF (dimethylformamide) as the solvent and PEG400 (polyethylene glycol) with different mass percentages as the additive. The intensity and IR spectra of particle sizes in the cast composite solutions have been studied. Inversion of the compositions has been carried out at 30°C and 50°C. The influence of the coagulation bath temperature on the characteristics of membranes precipitated from solutions containing different amounts of PEG has been determined. Membranes have been tested. The surface morphology of the obtained membranes was also studied using a scanning probe microscope. Experimental studies have shown that membranes deposited at 50°C from solutions of the same composition have higher performance and pore size than membranes deposited at 30°C. Binodal curves were constructed when the system was subjected to phase inversion at 30°C and 50°C.

Keywords: membrane, PES, PEG 400, binodal, Performance

Conducting the phase inversion process is one of the important stages in the creation of membranes. During the mentioned process, a liquid-liquid dispersion, i.e. a homogeneous polymer solution, is transformed into a solid membrane, simultaneously evaporating and diffusing [1,2,3,4]. In the coagulation bath, the solvent and pore-forming additive are completely expelled and a non-solvent-impregnated membrane is formed. This process involves complex, rapid changes in the time interval of 1-2 seconds, accompanied by dispersion breakdown and coalescence and ultimately a decrease in the free energy of the system. The course of the process

is influenced by parameters such as polymer type and concentration, solvent, additives, humidity, membrane thickness, composition and temperature of the coagulation bath, and the angle and speed of sample entry into the bath [5,6].

The paper discusses the changes in the characteristics and morphology of membranes deposited from polymer compositions of different compositions under different temperature conditions of the coagulation bath. It is known that temperature is a critical parameter when conducting phase inversion, it affects both the kinetic (exchange rate) and thermodynamic (dissolution) processes occurring during the inversion. Increasing the bath temperature reduces the viscosity of the composite solutions and accelerates the solvent-nonsolvent exchange and the solidification process[7,8,9]. The morphology of the membrane is significantly dependent on the solvent diffusion rate, which means that the mass transfer rates of the solvent and nonsolvent are of decisive importance during phase separation. At higher temperatures, the viscosity of the casting solution decreases, the exchange rate and the solidification process are accelerated. Precipitation at high temperatures leads to an increase in pore size and performance.

The membrane-forming polymer polyethersulfone, dissolved in dimethylformamide and supplemented with varying amounts of PEG 400, was chosen as the object of study. The polyethersulfone was dissolved in dimethylformamide in a 100 ml flask by heating at 55°C for 24 h under constant stirring with a magnetic stirrer, and a 12% PES/DMF composition was obtained. PEG 400 was added to the resulting polymer solution in amounts of 3%, 5%, 7% and 9% (wt%) and stirring was continued for another 1 hour. The particle sizes and particle distribution intensity in the compositions were studied on a Malvern analyzer. Figure 1 shows the particle size distribution curves in the composite solutions.

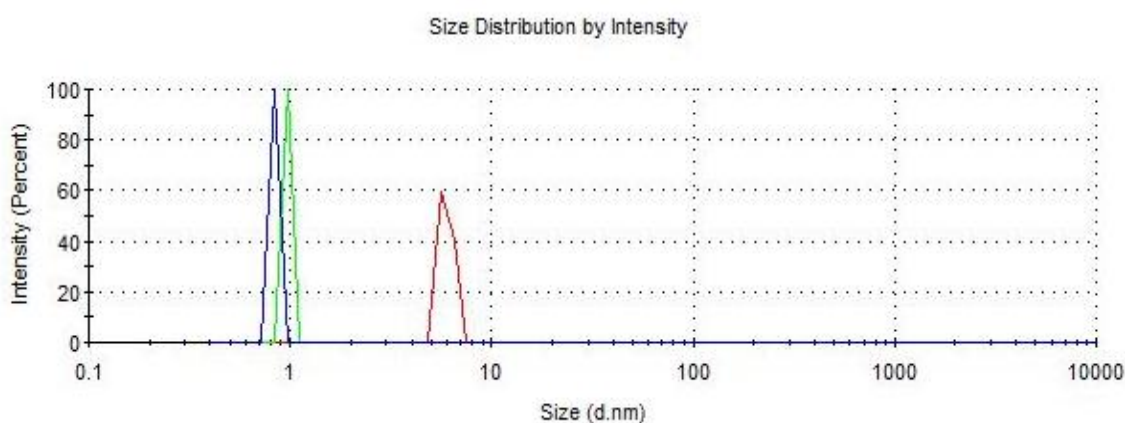


Figure 1. Particle size distribution in PES/DMF/5%PEG400, PES/DMF/10%PEG400, and PES/DMF/20%PEG400 compositions. 1. Curves of PES/DMF/5%PEG400.

In the polymer compositions, the particle sizes and intensities vary to match the change in PEG concentration, from 1 nm to 8 nm. In the composition of PES/DMF/20% PEG400, the intensity of 8 nm particles is 60%.

Infrared (IR) analysis of the resulting compositions was also performed. Figures 2 and 3 show IR spectra of the composite solutions of PES/DMF/5%PEG400 and PES/DMF/20%PEG400.

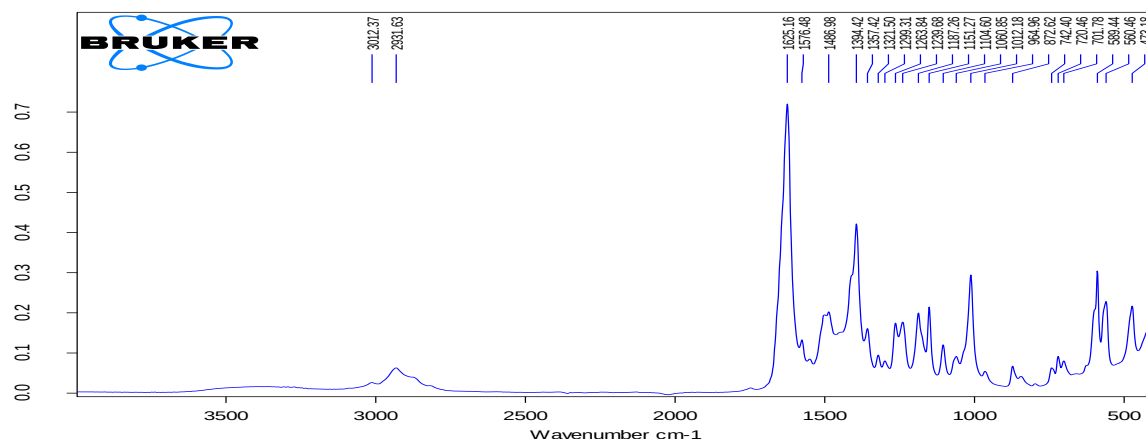


Figure 2. IR spectrum of the PES/DMF/5%PEG400 composition

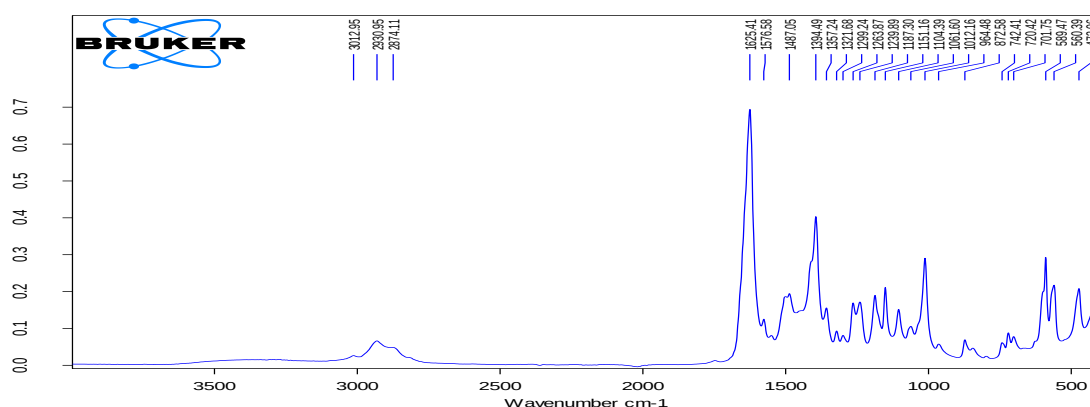


Figure 3. IR spectrum of the PES/DMF/20% PEG400 composition

For solutions containing 5% and 20% PEG the images of the polymer compositions are almost identical. The absorption band of aromatic nuclei in solution for both compositions is 1666 cm⁻¹. The (C-O-C) aromatic ether group corresponds to 1280- 1150 cm⁻¹, the absorption band of the aromatic (C=C) group is 1483 cm⁻¹ and 1510 cm⁻¹, the absorption band of the (O=S=O) groups corresponds to 1151 cm⁻¹, 1239 cm⁻¹, 1483 cm⁻¹, the peak at 621 cm⁻¹ corresponds to C.

The incomplete binodal of the 13% PES/DMF/PEG400 system, which is incomplete due to the constant concentration of PES, has been studied. Figure 4 shows the composition of the compositions, and Figure 5 shows the binodal segment for the given concentrations of PEG and PES.

N	PES, mass %	DMF mass %	PEG mass %
1	13	82	5
2	13	77	10
3	13	72	15
4	13	67	20

Figure 4. Composition of the polymer composition PES ▲)

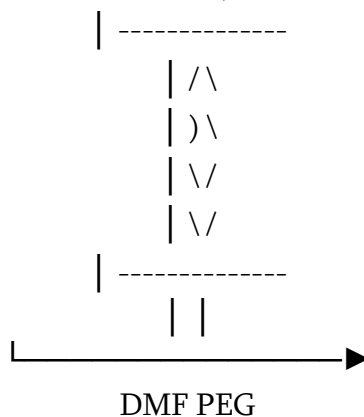


Figure 5. Incomplete binodal segment of the PES/DMPA/PEG400 system.

Three-component phase diagrams were constructed for this system in relation to precipitation temperatures of 30 °C and 50 °C. On figure 6 three-component phase diagrams of the 13% PES/DMF/PEG400 system during precipitation at 30 °C and 50 °C are given.

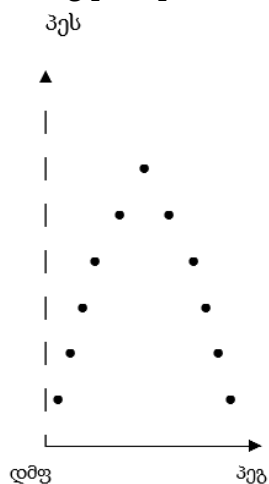


Figure 5. Phase diagram of the 13% PES/DMF/PEG400 system during precipitation at 30 °C.

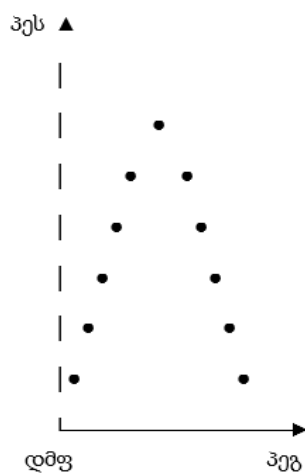


Figure 6. Phase diagram of the 13% PES/DMF/PEG400 system during precipitation at 50 °C.

Comparing the binomials, it can be seen that a low concentration of PES requires a larger amount of PEG for phase separation, while a high concentration of PES requires a larger amount of PEG, and a high concentration of PES requires a smaller amount of PEG. At high precipitation temperatures, the spinodal contracts and moves toward the solvent. Separation occurs due to nucleation, while at low precipitation temperatures, the spinodal expands and moves toward the nonsolvent, the system becomes more unstable, and the spinodal breaks down.

The surface topography of the membranes obtained by phase inversion was studied using a scanning probe microscope. The results showed that the N4 membrane had the best topography among membrane samples obtained from solutions containing different amounts of PEG at different temperatures. With increasing PEG concentration, the surface structure of the membranes changes from a dense, fine-pored to a more macroporous surface structure with interconnected channels. The N4 membrane is distinguished by its surface uniformity and pore frequency. Figure 7 and 8 show micrographs of the N4 and N8 membranes.

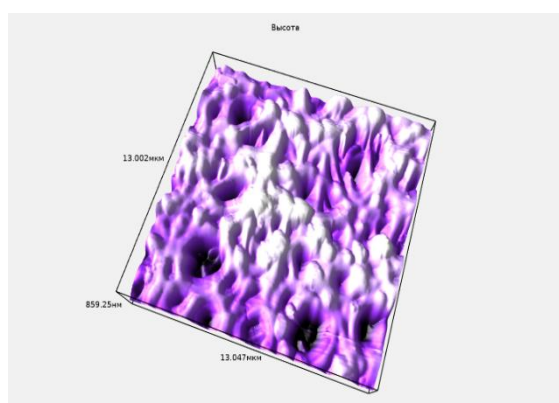


Figure 7. Micrograph of N4 membrane

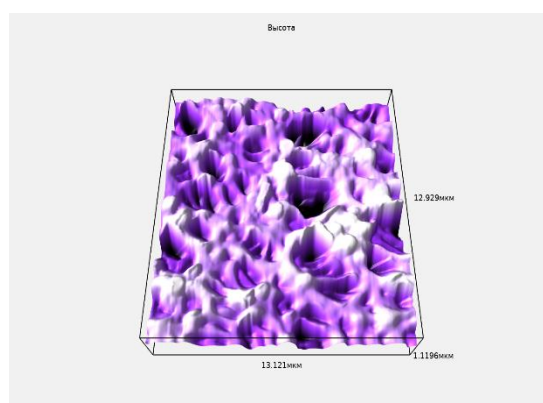


Figure 8. Micrograph of N8 membrane

The phase inversion process of the four resulting compositions was carried out at 30°C and 50°C. The composition of the compositions and the characteristics of the precipitated membranes when

tested on water are given in Table 1. The aim was to determine the effect of the additive concentration in the PES/DMF/PEG400 solution and the phase inversion temperature on the properties of the resulting membranes.

Composition of 13% PES	PEG mass %	Precipitation temperature°C	Membrane	Pore size, μm	Performance l/m ² h	Porosity, %
PES/DMF/PEG400	5	30	N1	0,42	745	15 $\pm$ 3
PES/DMF/PEG400	10	30	N2	0,53	921	20 $\pm$ 2
PES/DMF/PEG400	15	30	N3	0,67	1006	25 $\pm$ 4
PES/DMF/PEG400	20	30	N4	0,7	1128	54 $\pm$ 2
PES/DMF/PEG400	5	50	N5	0,58	804	33 $\pm$ 1
PES/DMF/PEG400	10	50	N6	0,61	1232	42 $\pm$ 3
PES/DMF/PEG400	15	50	N7	0, 67	1534	39 $\pm$ 2
PES/DMF/PEG400	20	50	N8	0,9	1723	46 $\pm$ 1

Membrane testing showed that increasing the PEG concentration at the same precipitation temperature increases the pore size and performance of the precipitated membranes. Increasing the coagulation bath temperature from 30°C to 50°C resulted in a more significant increase in pore size and performance for the precipitated membranes. This is also confirmed by the three-phase diagrams. A better porosity index was found for the N4 membrane. Of the membranes precipitated at 30°C, the N4 membrane had better characteristics, and of the membranes precipitated at 50°C, the N8 membrane. Three-phase diagrams of polymer compositions for a constant concentration of PES during precipitation at different temperatures have been studied. A semi-empirical thermodynamic model has been created.

Bibliography

1. Agnieszka K. Holda F.J. Vankelecom, Understanding and guiding the phase inversion process for synthesis of solvent resistant nanofiltration membranes, *Journal of Applied Polymer science*, Volume 132, 2015.
2. Fane, A.G.; Tang, C.Y.; Wang, R. Membrane technology for water: Microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, and reverse Osmosis. In *Treatise on Water Science*; Wilderer, P., Ed.; Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands, 2011; Volume 4, pp. 301–335. ISBN 978-0-444-53199-5.]
3. Al Hachim, Z.S.; Ridha, A.M.; Al-Baiati, M.N.; Alsahy, Q.F.; Majdi, H.S. Sustainable modification of polyethersulfone membrane with poly(maleic anhydride-co-glycerol) as novel copolymer. *Water* 2022, 14, 1207
4. N. GOGESASHVILI, L. KUPARADZE, L. EBANOIDZE, Z. JAVASHVILI: Obtaining of Natural Water Microfiltration Membranes Based on Polyethersulphone With PEG 300, PEG 600 and LiCl Additives. *Oxidation Communication* 47(3), 543–550 (2024).
5. G. BIBILEISHVILI, M. KEZHERASHVILI, N. GOGESASHVILI, L. KUPHARADZE, L. EBANOIDZE: Effect of the Temperature of the Non-Solvent on the Morphology of the Polymeric Membrane. *European Journal of Scientific Research*, 161(1), 5 – 15, (2022).
6. G. BIBILEISHVILI, M. KEZHERASHVILI, M. MAMULASHVILI: Effect of Different Solvents and Fore-Forming Agents on Morphology and Performance of Polyethersulphone Membranes. *Oxidation Communication* 47(3), 534–542 (2024).
7. Rahimpour, A.; Madaeni, S.S. Improvement of performance and surface properties of nano-porous polyethersulfone (PES) membrane using hydrophilic monomers as additives in the casting solution. *J. Membr. Sci.* 2010, 360, 371–379
8. Bibileishvili, G.V., Kujawski, M.W., Gogesashvili, N.N., Kezherashvili, M.G., Javashvili, Z.D., Ebanoidze L.O., Kakabadze, E.D. ; Study of the effect of varying amounts of polyvinylpyrrolidone and LiCl on the structure and properties of polyethersulphone membranes.; *Oxidation Communications*;; Vol.48, №3;
9. Bibileishvili, G.V., Bahtiyar Ozturk B, Kezherashvili, M.G., Gogesashvili, N.N., Javashvili, Z.D., Mamulashvili, M.A., Kuparadze, L. P.; Preparation and Research of Aromatic Polyamide Membranes Modified With Organic Acids, *Oxidation Communications*;; Vol.48, №3 ; 2025

განსხვავებული პოლიმერული კომპოზიციების ფაზური ინვერსიის და მემბრანული დაყოფის პროცესების კვლევა

გ.ბიბილეიშვილი¹, ნ.გოგესაშვილი², მზია კეჭერაშვილი, ზაზა ჟავაშვილი, ლიანა
ყუფარაძე, ნონა ბუთხუზი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მემბრანული ტექნოლოგიების საინჟინრო
ინსტიტუტი

¹ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერიის დოქტორი, მთავარი მეცნიერი თანამშრომელი
email:75bibileishvili@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>

²ქიმიის დოქტორი, მთავარი მეცნიერი თანამშრომელი email:nanagogesashvili@gmail.com
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5140-5815>

რეზიუმე

გამოკვლეულია 13%-იანი პოლიეთერსულფონის(პეს) მიკროფილტრაციული
მემბრანების ფაზური ინვერსიით მიღების პროცესი გამხსნელად დმფ-
ის(დიმეთილფორმამიდი) და დანამატად განსხვავებული მასური პროცენტით პეგ400
(პოლიეთილენგლიკოლი) გამოყენების შემთხვევაში. შესწავლილია დასასხმელ
კომპოზიციურ ხსნარებში ნაწილაკების ზომების ინტენსივობა და იწ სპექტრები.
კომპოზიციების ინვერსია ჩატარებულია 30-ზე და 50-ზე. დადგენილია საკოაგულაციო
აბაზანის ტემპერატურის გავლენა განსხვავებული რაოდენობით პეგ-ის შემცველი
ხსნარებიდან გამოლექილი მემბრანების მახასიათებლებზე. ჩატარებულია მემბრანების
ტესტირება. ასევე მასკანირებელი ზონდური მიკროსკოპით შესწავლილია მიღებული
მემბრანების ზედაპირული მორფოლოგია. ექსპერიმენტული კვლევებით დადგენილია,
რომ ერთნაირი შედგენილობის ხსნარებიდან 50-ზე ტემპერატურაზე გამოლექილ
მემბრანებს გააჩნიათ უფრო მაღალი წარმადობა და ფორის ზომა ვიდრე 30-ზე
გამოლექილ მემბრანებს. აგებულია ბინოდალური მრუდები სისტემის ფაზური
ინვერსიის ჩატარებისას 30-ზე და 50-ზე.

საკვანძო სიტყვები: მემბრანა, პეს, პეგ 400, ბინოდალი, წარმადობა.

Using modern statistical methods to predict peak data for pore size values

George Bibileishvili¹, Nana Gogesashvili², Manana Mamulashvili, Liana Ebanoidze, Elene Kakabadze, TinaTin Butkhuzi

Engineering Institute of Membrane Technologies of Georgian Technical University

¹Doctor of Chemical and Biological Engineering, Chief Scientific Officer email:75bibileishvili@gmail.com ORCID ID:<https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>

²Doctor of Chemistry, Chief Scientific Officer email:nanagogesashvili@gmail.com ORCID ID:
<https://orcid.org/0000-0001-5140-5815>

Summary

In this paper, a simple mathematical model is presented based on the changes in the pore size values of new membranes obtained from different concentrations of polymer systems PMIA/DMF/LiCl/PEG. Using modern statistical methods of organizing and planning experiments, a two-factor mathematical design is developed to predict the morphology of the membranes. The phase binodal diagrams of the PMIA/DMF/LiCl/PEG casting solutions were also studied. The physicochemical characteristics and surface morphology of the obtained new membranes were characterized using scanning probe microscopy.

Keywords: PMIA, membrane, phase inversion, binodal, planning.

Phase inversion processes, in which a liquid polymer film is transformed into a solid matrix, are widely used technologies for the preparation of polymer membranes [1,2,3,4,5]. The study of the relationship between the variable parameters of the inversion process and the final structure of the membranes remains a major challenge in the membrane technology process. In recent years, modeling efforts have been made to predict the final morphology of membranes by taking into account such factors as the composition of the casting solution, precipitation temperature, pressure, and separation rate [6,7,8,9,10]. Mathematical modeling allows us to investigate the relationship between the experimentally obtained pore size values and the phase inversion

conditions of membranes made from polymer compositions of different compositions. Subsequently, to predict the pore size and structure of the membranes.

Polyphenylene isophthalamide (PMIA) was used for the experiments. Different amounts of dried PMIA (PMIA content from 7% to 11% by weight) were placed in a 100 ml flask in a 5% solution of LiCl in DMF and the dissolution process was carried out by heating to 55°C with constant stirring with a magnetic stirrer. Polyethylene glycol (PEG was taken as 25% of the polymer mass) casting solutions were obtained in a similar manner. Table 1 shows the composition of the additive casting solutions.

PMIA	DMF	PEG
7	91,2	1,8
8	90	2
9	88,5	2,25
10	87,5	2,5

Table 1. Composition of polymer compositions containing PEG.

A binodal diagram was drawn for the resulting additive systems, which is presented in Figure 1.

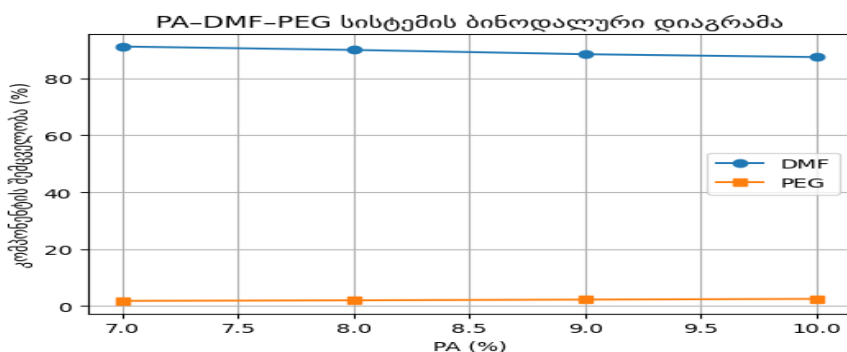


Figure 1. Binodal diagram of the PMIA/DMF/PEG system.

The figure shows that with increasing PMIA concentration, the DMF content decreases, while that of PEG gradually increases, indicating the tendency of the system to phase separation. The binodal curve shows the interaction of the components and changes in phase stability with increasing PMIA concentration. The resulting uniform, homogeneous, PMIA/DMF/ LiCl and PMIA/DMF/ LiCl/ PEG casting compositions were, after filtration and vacuum deaeration, applied to a polished glass plate (76mmx26mmx1mm) placed on a laboratory filler with the help of a stainless steel blade.

The precipitation procedures were carried out in a distilled water coagulation bath at 60°C. The obtained samples were washed with 60°C water for 6 hours and kept in the washing bath until the water-soluble substances were removed. The compositions of PMIA-compositions of different concentrations and the characteristics of the precipitated new membranes are given in the table.

PMIA, mass %	DMF mass %	PEG, mass %	membranes	The size of the pore, D μm	Bubble point pressure, Bar	Membrane porosity
7	93	-	P1	0,81	1	18±2
8	92	-	P2	0,59	1,36	20±3
9	91	-	P3	0,49	1,65	24±1
10	90	-	P4	0,42	1,92	29 ± 2
7	91,2	1,8	P5	0,37	2,2	31±3
8	90	2	P6	0,34	2,35	42±1
9	88,5	2,25	P7	0,33	2,4	54±4
10	87,5	2,5	P8	0,31	2,6	70±3

Table 2. Characteristics of polymer compositions and obtained membranes

Table 2 shows that with increasing PMIA concentration, the pore size decreases. In particular, the pore size of the P1 membrane was 0.81 μm, while the pore size of the P4 sample became 0.42 μm, almost twice reduced. Then, in the samples obtained with the addition of PEG (25% of the polymer mass), the pore size gradually decreases again, and the pore size value of the P10 sample becomes 0.31 μm. The difference between the pore size values of the P7 and P10 samples is 0.5 μm. The membrane tests have determined the following performances. The results are given in Table 3.

Obtained membrane	Productivity l/m ² h, 0,1mPa
P1	800
P2	678
P3	528
P4	430
P5	396
P6	289
P7	205
P8	180

Table 3. Productivity of the obtained membranes

It has been established that increasing the PMIA concentration from 7% to 11% decreases the membrane performance, but improves the surface morphology and porosity of the membranes (Figures 3 and 4). The performances of membranes P7 and P8 obtained from dilute polymer solutions are relatively high, but due to the heterogeneity of the polymer framework, structural disorder, and globular formations, the number of pores is relatively small, which is also confirmed by micrographic images (Figures 2 and 3). The decrease in the performance of membranes obtained with the addition of polyethylene glycol (400) for samples P5, P6, P7 and P8 is due to the ability of PEG to increase the viscosity of the casting solutions, slow down the phase inversion process, narrow and form new pores, suppress the formation of macrocavities and increase the porosity of the membranes (Table 2). These factors explain the minimum value of the performance of the P8 membrane and the improved surface morphology (Figure 4).

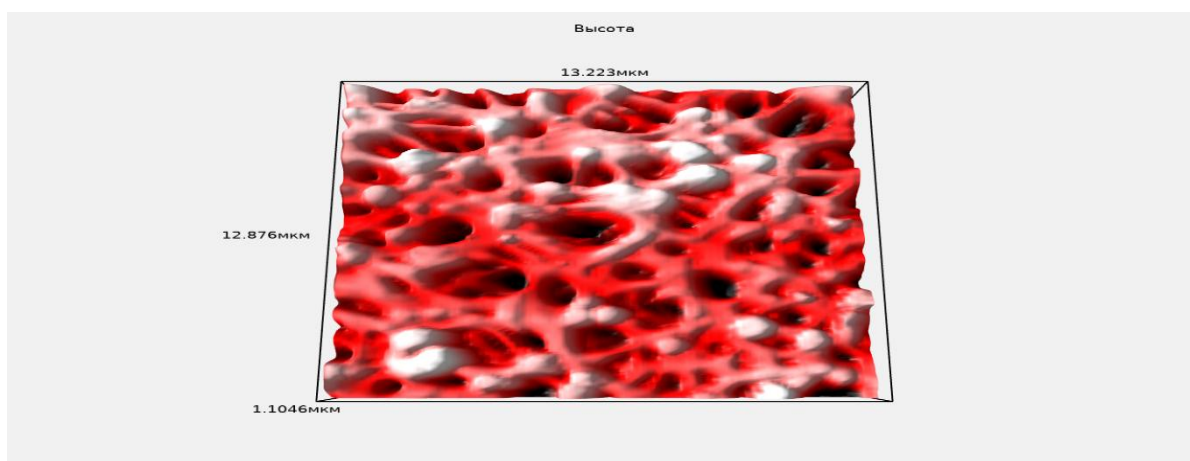


Figure 2. Micrograph of N2 membrane

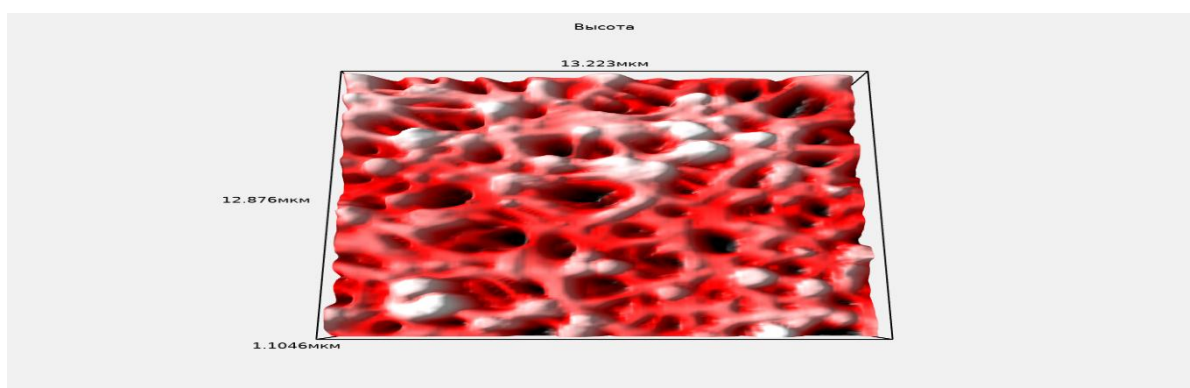


Figure 2. Micrograph of N3 membrane

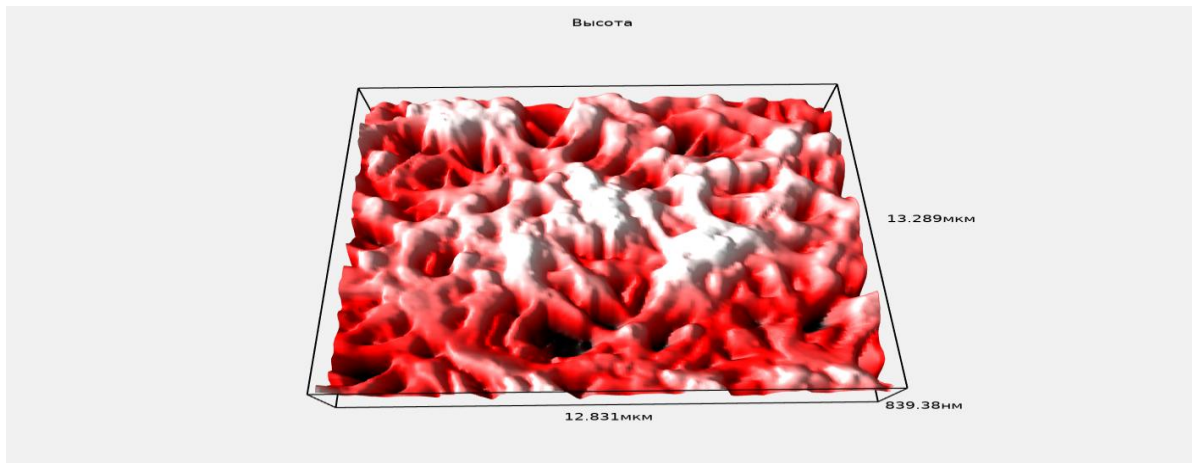


Figure 3. Micrograph of N4 membrane

Of the regression coefficients of the following linear equation was sought.

$$= b_0^1 + b_1^1 x_1 + b_2^1 x_1 \quad (1)$$

In the phase inversion experiments, the x_1 factor is a solution with different percentages, namely, 7% and 10%, and the x_2 factor is an additive with different percentages, namely, 0% and 25%. The pressure is denoted by y . The results of our experiments are given in the table (Table 1) as follows:

N	x_1	x_2	y
1	7	0	1
2	7	25	2,2
3	10	0	1,9
4	10	25	2,6

The center of the rectangle 0 is chosen as the origin of coordinates, whose coordinates are (1,5;12,5). First, changes were made to the upper and lower levels of both factors with the results obtained by trial and error for all their possible $N=2 \times 2=4$ combinations. For this, appropriate key points were created: 1 ($x_1^{(1)}; x_2^{(1)}$), 2 ($x_1^{(2)}; x_2^{(2)}$), 3 ($x_1^{(3)}; x_2^{(3)}$), 4 ($x_1^{(4)}; x_2^{(4)}$), from the trial data (Table 3) $x_1^{(1)} = 7, x_1^{(2)} = 7, x_1^{(3)} = 10, x_1^{(4)} = 10, x_2^{(1)} = 0, x_2^{(2)} = 25, x_2^{(3)} = 0, x_2^{(4)} = 25$. These changes are graphically presented in Figure 4.

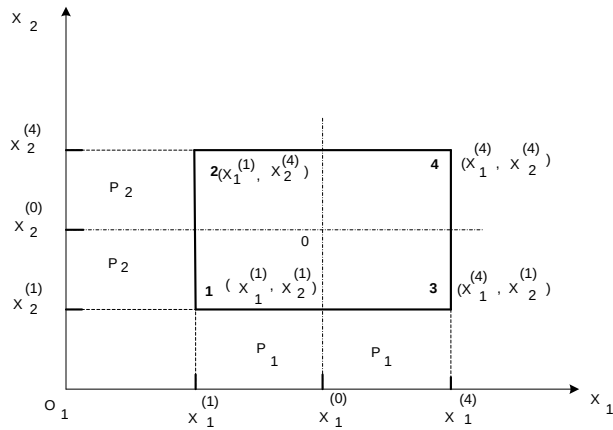


Figure 4. Calculation scheme.

The following sequence of steps has been performed: transition to dimensionless coded variables, first the coordinate origin was moved from point 0 to point 0₁ with the following coordinate transformation (Figure 1):

$$(x_1^{0_1}, x_2^{0_1}) \quad \text{and} \quad x_1^{0_1} = x_1^0 + \frac{x_1^{(4)} - x_1^{(1)}}{2} = 7 + \frac{10-7}{2} = 8,5, \quad x_2^{0_1} = 0 + \frac{x_2^{(4)} - x_2^{(1)}}{2} = \frac{25-0}{2} =$$

$$12,5 \quad \text{and on the following scale: } \tilde{x}_1 = \frac{x_1 - x_1^0}{P_1} \quad \text{and} \quad \tilde{x}_2 = \frac{x_2 - x_2^0}{P_2}, \quad \text{where } P_1 = \frac{x_1^{(4)} - x_1^{(1)}}{2}$$

$$= \frac{10-7}{2} = 1,5; \quad P_2 = \frac{x_2^{(4)} - x_2^{(1)}}{2} = \frac{25-0}{2} = 12,5. \quad \text{In this case, the square is obtained, in the new coordinate$$

system $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)$ (coded coordinate system). In this system, the coordinates of the corner points of the square are: 1(-1,-1), 2(-1,+1), 3(+1,-1), 4(+1,+1): A linear regression equation in coded variables will generally have the form: $\tilde{y} = b_0 + b_1 \tilde{x}_1 + b_2 \tilde{x}_2$ (2) and $b_0 =$

$$\frac{\sum_{u=1}^4 \tilde{x}_{0u} y_u}{4} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} = \frac{1+2,2+1,9+2,6}{4} = \frac{7,7}{4} = 1,925, \quad b_1 = \frac{\sum_{u=1}^4 \tilde{x}_{1u} y_u}{4} = \frac{-y_1 - y_2 + y_3 + y_4}{4} =$$

$$\frac{-1-2,2+1,9+2,6}{4} = \frac{1,3}{4} = 0,325, \quad b_2 = \frac{\sum_{u=1}^4 \tilde{x}_{2u} y_u}{4} = \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4}{4} = \frac{1+2,2-1,9+2,6}{4} = \frac{3,9}{4} = 0,975 \quad \text{The}$$

appropriate response values are calculated using the formula:

$$\tilde{Y}_N = b_0 + b_1 \tilde{x}_1^N + b_2 \tilde{x}_2^N = 1,925 + 0,325 \tilde{x}_1^N + 0,475 \tilde{x}_2^N \quad \text{and } N=1,2,3,4. \quad (3)$$

$\tilde{Y}_1 = 1,125; \tilde{Y}_2 = 2,075; \tilde{Y}_3 = 1,775; \tilde{Y}_4 = 2,725$ The difference between the experimental results and the theoretically obtained results is 12.5%.

To illustrate the method, the transition was made to the response report of a 9% solution. In this case, the planning center $(x_1^0, x_2^0) = (8,5; 12,5)$ is the same as it was before, only this time it will change $P_1 = \frac{x_1 - x_1^0}{2} = \frac{9-8,5}{2} = \frac{0,5}{2} = 0,25$, Therefore coefficient changes by 0,25 before $\tilde{x}_1$.

P_2 remains the same that is $\tilde{x}_2$ remains the same. By inserting these quantities, we obtain the following regression equation: $\tilde{y} = 1,925 + 0,325 \tilde{x}_1 + 0,475 \tilde{x}_2 = 1,925 + 0,25 \times 0,325 + 0,475 = 1,925 + 0,0813 + 0,475 = 2,4813$. The result obtained by experiment is $y = 2,4$. $y - \tilde{y} = -0,0813$, difference between theoretical and experimental data is up to $\approx 9\%$.

It has been established that the use of modern statistical methods for organizing and planning experiments for membranes obtained from PMIA/DMF/LiCl/PEG solutions with concentrations ranging from 7% to 11% allows predicting the results of pressures with sufficient accuracy for peak pore size data of samples precipitated from any concentration of the casting solution without conducting experiments.

ლიტერატურა

1. Yuanhui Tang, Yakai Lin, David m. Ford, Xianghong Qian, M. Rosario Cervellere, M. M. Paul G. Millett, Xiaolin Wang, A review A review on models and simulations of membrane formation via phase inversion, *Journal of Membrane Science*, v.640, 15 December, 2021.
2. G.R. Fernandes, J.C. Pinto, R. Nobrega, Modeling and simulation of the phase-inversion process during membrane preparation, *Journal of Applied Polymer Science* 82,(12), 3036-3051, 2001.
3. N. GOGESASHVILI, L. KUPARADZE, L. EBANOIDZE, Z. JAVASHVILI: Obtaining of Natural Water Microfiltration Membranes Based on Polyethersulphone With PEG 300, PEG 600 and LiCl Additives. *Oxidation Communication* 47(3), 543–550 (2024).
4. G. BIBILEISHVILI, M. KEZHERASHVILI, N. GOGESASHVILI, L. KUPHARADZE, L. EBANOIDZE: Effect of the Temperature of the Non-Solvent on the Morphology of the Polymeric Membrane. *European Journal of Scientific Research*, 161(1), 5 – 15, (2022).
5. G. BIBILEISHVILI, M. KEZHERASHVILI, M. MAMULASHVILI: Effect of Different Solvents and Fore-Forming Agents on Morphology and Performance of Polyethersulphone Membranes. *Oxidation Communication* 47(3), 534–542 (2024).
6. Johnson N.L, Leone F.C., *Statistics and Experimental design in engineering and the physical sciences (Probability and mathematical statistics)* 1977, 134-200.
7. Hald A., *Statistical Theory with engineering applications*, 1952, 122-164
8. Rahimpour, A.; Madaeni, S.S. Improvement of performance and surface properties of nanoporous polyethersulfone (PES) membrane using hydrophilic monomers as additives in the casting solution. *J. Membr. Sci.* **2010**, *360*, 371–379
9. Bibileishvili, G.V., Kujawsk, M.W., Gogesashvili, N.N., Kezherashvili, M.G., Javashvili, Z.D., Ebanoidze L.O., Kakabadze, E.D. ; Study of the effect of varying amounts of polyvinylpyrrolidone and LiCl on the structure and properties of polyethersulphone membranes.; *Oxidation Communications*,; Vol.48, №3;

10. Bibileishvili, G.V., Bahtiyar Ozturk B, Kezherashvili, M.G., Gogesashvili, N.N., Javashvili, Z.D., Mamulashvili, M.A., Kuparadze, L. P.; Preparation and Research of Aromatic Polyamide Membranes Modified With Organic Acids, Oxidation Communications,; Vol.48, №3 ; 2025

**თანამედროვე სტატისტიკური მეთოდების გამოყენება ფორის ზომების
მნიშვნელობების პიკური მონაცემების პროგნოზირებისათვის**

**გიორგი ბიბილეიშვილი,¹ ნანა გოგესაშვილი², მანანა მამულაშვილი, ლიანა ებანოიძე,
თინათინ ბუთხუზი, ელენე კაკაბაძე**

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მემბრანული ტექნოლოგიების საინჟინრო
ინსტიტუტი ¹ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერიის დოქტორი, მთავარი მეცნიერი
თანამშრომელი email:75bibileishvili@gmail.com ORCID ID:<https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>

²ქიმიის დოქტორი, მთავარი მეცნიერი თანამშრომელი email:nanagogesashvili@gmail.com
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5140-5815>

ნაშრომში განსხვავებული კონცენტრაციის პოლიმერული სისტემებიდან PMIA/DMF/
LiCl/PEG მიღებული ახალი მემბრანების ფორის ზომის მნიშვნელობების ცვლილებების
საფუძველზე მოცემულია მარტივი მათემატიკური მოდელი. ექსპერიმენტების
ორგანიზებისა და დაგეგმვის თანამედროვე სტატისტიკური მეთოდების გამოყენებით
შედგენილია ორფაქტორიანი მათემატიკური გეგმარება მემბრანების მორფოლოგიის
პროგნოზირებისათვის. შესწავლილია ასევე დასასხმელი ხსნარების PMIA/DMF/LiCl/PEG
ფაზური ბინოდალური დიაგრამები. განსაზღვრულია მიღებული ახალი მემბრანების
ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლები და ზედაპირული მორფოლოგია მასკანირებელი
ზონდური მიკროსკოპის გამოყენებით.

საკვანძო სიტყვები: PMIA, მემბრანა, ფაზური ინვერსია, ბინოდალი, დაგეგმარება.

Search and analysis of local and international patent works for the nanofiltration process of grape-based alcoholic beverage - Georgian Chacha - under conditions of variable temperature and viscosity

George BibileiSvili, Zaza JavaSvili, Elene Kakabadze, Leila Tananashvili, Manana MamulaSvili, Liana Ebanoidze.

Engineering Institute of Membrane technologies of Georgian Technical University

Abstract:

Analysis of local and international patents related to the nanofiltration process of grape-based alcoholic beverage - Georgian Chacha - under conditions of variable temperature and viscosity determines the consideration of technologies, technical means, basic technical level and prototypes created by local and international researchers for the ongoing scientific research work at the institute.

Keywords: nanofiltration process, alcoholic beverage, variable temperature, viscosity, Georgian Chacha.

Chacha is a traditional alcoholic beverage of grape origin, obtained by fermentation and distillation of the grape processing residue - chacha (skin, seeds and sometimes pulp). It is especially widespread in Georgia and is considered an important element of the country's agro-food and cultural heritage. The technology of chacha production is based on a combination of biochemical and physico-chemical processes, among which special importance is attached to the stages of alcoholic fermentation, formation of aromatic compounds and distillation separation.

Modern scientific research in the production of chacha is focused on optimizing the chemical composition of raw materials, controlling microbiological processes, and improving the quality indicators of the final product. In this context, membrane technologies (microfiltration, nanofiltration) play a special role, ensuring the effective removal of unwanted impurities, maintaining the aromatic profile, and increasing the stability of the product.

In addition, during the process of making chacha, significant attention is paid to controlling such parameters as temperature, viscosity, mass transfer rate, and molecular mass of components, which determine both the separation efficiency and the sensory and physicochemical properties of the resulting alcoholic beverage. A complex analysis of these factors creates the basis for the development of innovative methods of chacha production and the improvement of relevant technological processes.

"Chacha" is a traditional Georgian alcoholic beverage, obtained by distilling the liquid obtained after pressing grapes.

This drink carries a history spanning many generations, from simple recipes to complex and sophisticated variations.

Chacha was traditionally prepared at home, and each family might have its own unique recipe. The drink was used not only for pleasure, but also as a medicine, believed to have healing properties. In modern Georgia, chacha remains a symbol of hospitality.

The history of chacha dates back thousands of years and is closely linked to ancient Georgian winemaking methods. Georgia, often called the homeland of wine, has been using and developing distillation techniques to create chacha for many centuries. The basis of chacha is the grape pomace that remains after winemaking.

The main stages of the technology for producing chacha are given:

Harvesting the skins. The preparation of chacha begins with harvesting the skins - these are the grape skins, seeds, and sometimes stems that remain after the juice is pressed for wine.

Fermentation. The wort is placed in large containers where it undergoes primary fermentation. This process can last from a few days to a few weeks and helps convert the sugars into alcohol.

Distillation. After boiling, the mixture is distilled. In Georgia, a traditional still, called a "chacha kiln" or "chacha cauldron," is often used for this. Distillation is usually done twice to increase the strength of the drink and to purify it.

Purification and maturation. The spirit obtained after distillation can be further filtered and matured. Some producers leave the chacha to mature in oak barrels, which gives the drink additional aroma and smoothness.

Pouring the finished chacha. It can be colorless or slightly colored, depending on the production method and maturity.

Depending on the region and the producer, there may be variations in these basic steps, as well as the addition of herbs and fruits for flavor. This subtlety makes each chacha unique.

Tasting characteristics of chacha:

The tasting characteristics of chacha can vary significantly depending on the region of production, the grape varieties used, and the specifics of the distillation process. Chacha is generally known for its bright and strong aroma and flavor, which can include notes of fresh and dried fruits, herbs, and flowers. Nutty and vanilla nuances are also often found, especially if the drink is aged in oak barrels.

Chacha can be very smooth and smooth, or sharper and hotter, depending on the degree of purification and the strength of the alcohol. The typical alcohol strength of chacha ranges from 40 to 50 percent, making it a strong and intense drink. The taste of chacha is often described as deep and complex, with excellent tannic structure.[1]

The patent - All-Natural Accelerated Aging of Distilled Spirits - discusses a process for producing an aged beverage, preferably a wood-aged distilled spirit, in which the raw or partially aged beverage is processed in a closed system, under controlled temperature and oxygen concentration conditions, and is simultaneously in contact with the wood material intended for aging the beverage. In certain embodiments, ethyl acetate is added to the raw beverage before the aging process begins. {2}

Invention - The membrane process for dealcoholization of naturally fermented beverages includes the following stages:

Invention - membrane process for dealcoholization of naturally fermented beverages includes the following steps:

A) optionally, contacting the beverage with a microfiltration membrane, resulting in a permeate and a retentate containing, respectively, low and high concentrations of high molecular weight turbidity-causing compounds;

B) optionally, contacting the beverage or microfiltration permeate with a nanofiltration membrane, resulting in a permeate and a retentate containing, respectively, low and high concentrations of flavor and taste-determining compounds;

C) contacting the microfiltration or nanofiltration permeate with a reverse osmosis membrane that selectively passes ethanol and selectively retains aroma and flavor-determining compounds, In which, respectively, the concentration of ethanol is high and low, and the concentration of aromatic and flavor compounds is low and high. [3]

Artificial aging of alcoholic beverages is possible using carbon dioxide under high pressure. Under these conditions, carbon dioxide produces carbonic acid, which promotes the formation of various esters both in the presence and absence of wood, and at the same time provides a mellow taste.

The wood material can be pre-treated with ozone, which results in the extraction of lignin; then, when exposed to high-pressure CO₂, the lignin is converted to vanillin, which gives the beverage a vanilla flavor.

After CO₂ treatment, further treatment with ozone is possible, which results in mild oxidation and additional flavor harmonization.[4]

The invention, which concerns the method of producing Georgian "Chacha" vodka, is based on two-stage distillation: in the first stage, fermented grape chacha is distilled, and in the second stage, the resulting primary distillate (alcohol content 15–20%) is re-distilled.

According to the invention, in order to improve the quality of the product, the aqueous-alcoholic vapors generated during the distillation process are brought into contact with copper oxide, which is preheated to a temperature of 95–100°C and maintained at this temperature throughout the distillation process.

This approach ensures a reduction in methanol content and an improvement in the quality of the final product.[5]

The invention relates to a method for obtaining a final, aged distilled spirit, as well as a method for bottling distilled spirit, which uses an in-bottle finishing process. In one embodiment, the method comprises the following steps:

- (1) placing aged distilled spirit in a bottle;
- (2) placing a piece of wood in the bottle, said piece of wood being used in the bottling process and previously stored in a non-alcoholic liquid prior to being placed in the bottle;
- (3) hermetically sealing the bottle so that both the aged distilled spirit and the piece of wood are simultaneously placed inside the bottle [6]

The patent describes - the following steps for removing a complex of impurities from an alcoholic beverage:

First, an aqueous solution is prepared, which contains about 96% pure water and at least 4% honey by volume;

Then, a mixture is obtained, which consists of about 50% by volume of said aqueous solution and about 50% by volume of an alcoholic base containing impurities and at least 80% by volume of alcohol;

Then, about 1% by volume of a mixture of extracts is added to the resulting product to obtain the desired flavor;

About 4% or more by volume of sugar is also added;

About 0.5% by volume of a precipitate is added to obtain a two-phase colloidal system that catalyzes precipitation;

The impurities are adsorbed on the precipitate;

And finally, the precipitate is separated from the resulting product.[7]

Nanofiltration processes, which are carried out using one or more traditional nanofiltration membrane modules under positive pressure, are used to selectively change the concentration of one solute in a solution relative to another solute.

For example, it is possible to change the concentration of compounds containing monovalent ions (such as sodium chloride or sodium chlorate) relative to compounds containing polyvalent ions (e.g., sodium sulfate or sodium dichromate).

This process is particularly effective in reducing the concentration of undesirable ions (especially silicon and dichromate ions) in highly saline aqueous solutions in chlor-alkali and chlorate salt systems, as well as in increasing the concentration of sodium sulfate relative to sodium chloride in chlor-alkali solutions.[8]

References:

1. რა არის „ჭაჭა“ - radiocafe.ge

2. All natural accelerated aging of distilled spirits - II Remy F. Gross; John P. Delmore; Walter E. Buske; US6703060B1;

3. Membrane process for the dealcoholization of naturally fermented beverages - Cark-Erik Nielsen; Mette Moeller Thomsen; Klaus Heybach; WO1992008783A1;
4. Accelerated aging of alcohol spirits - James B. Mitchell; Avi R. Geiger; William H. Mitchell - US 11053467B2;
5. Способ получения национальной грузинский водки «Чача» - Александр Изетович Ногаидели; Георгий Иванович Беридзе; Зейнаб Семеновна Табидзе; Георгий Давидович Кахниашвили; Лили Карумовна Джаниашвили - SU480761A1
6. Method of producing a finished aged distilled spirit - Joseph Gildenzopf - US 11767496B2
7. Method of removing impurities in design alcoholic beverages - Yakov Shteyman - US20240026255A1;
8. Nanofiltration of concentrated aqueous salt solutions - Zbigniew Twardowski Judith G. Ulan - US5858240A;

ადგილობრივი და საერთაშორისო პატენტო ნამუშევრების მოძიება და ანალიზი
ყურძნისეული წარმოშობის სპირტიანი სასმელის - ქართული ჭაჭას -
ნანოფილტრაციული პროცესისათვის, ცვალებადი ტემპერატურისა და სიბლანტის
პირობებში.

გიორგი ბიბილეიშვილი, ზაზა ჯავაშვილი, ელენე კაკაბაძე, ლეილა თანანაშვილი, მანანა
მამულაშვილი, ლიანა ებანოიძე.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მემბრანული ტექნოლოგიების საინჟინრო
ინსტიტუტი

რეზიუმე:

ადგილობრივი და საერთაშორისო პატენტების ანალიზი, რომლებიც დაკავშირებულია
ყურძნისეული წარმოშობის სპირტიანი სასმელის -ქართული ჭაჭას - ნანოფილტრაციულ
პროცესთან ცვალებადი ტემპერატურისა და სიბლანტის პირობებში, განსაზღვრავს
ინსტიტუტში მიმდინარე სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოებისათვის ადგილობრივი და
საერთაშორისო მკვლევრების მიერ შექმნილი ტექნოლოგიების, ტექნიკური
საშუალებების, საბაზისო ტექნიკური დონისა და პროტოტიპების გათვალისწინებას.

საკვანძო სიტყვები: ნანოფილტრაციული პროცესი, სპირტიანი სასმელი, ცვალებადი
ტემპერატურა, სიბლანტე, ქართული ჭაჭა.

Search and analysis of local and international patent works related to the nanofiltration process of grape-derived alcoholic beverage - brandy - under conditions of variable temperature and viscosity.

George BibileiSvili, Zaza JavaSvili, Elene Kakabadze, Leila Tananashvili, Manana MamulaSvili, Liana Ebanoidze.

Engineering Institute of Membrane technologies of Georgian Technical University

Abstract

The local and international patented works discussed in the paper reflect the current global state of development and sector-specific features of microfiltration process methods used in the production of grape-derived alcoholic beverage—brandy—and determine the relevant priorities for ongoing scientific research at the institute.

Keywords: nanofiltration process; alcoholic beverage; variable temperature; viscosity; brandy;

Brandy is an alcoholic beverage derived from grapes, the quality and organoleptic properties of which depend largely on both the raw materials and the technological processes used to produce and process it. Today, the implementation of innovative methods that ensure purity, stability, and the preservation of the desired product properties is of particular importance.

In this context, membrane technologies, including microfiltration and nanofiltration, are considered a promising direction in the processing of alcoholic beverages. These processes allow for the effective separation of unwanted impurities, colloidal particles, and high molecular weight compounds, which directly affects the quality of the final product.

It is especially important to study the influence of physicochemical parameters, such as temperature and viscosity, on membrane processes, as they determine the efficiency and selectivity of filtration. Accordingly, the analysis of local and international research and patent works creates the basis for the development of new technological approaches, which contributes to the optimization of brandy production processes and quality improvement.

The invention relates to the field of brandy aging and describes a method aimed at improving the organoleptic properties of brandy. The method includes the following stages:

1. Placing the distilled brandy in an oak barrel and storing it for 8–12 months;
2. Transferring the brandy obtained in the first stage to an earthenware vessel (of the type of pitcher or ceramic vessel) and storing it for 2–3 months;
3. Transferring the brandy obtained in the second stage back to an oak barrel and aging it for 3–6 years.

According to the method, oak barrel aging and clay pot aging are alternately used, which increases the sensory perception of the same category of brandy. At the same time, the content of aromatic compounds, including neroli and ethyl acetate, increases significantly, as a result of which the brandy acquires pleasant floral (rose, neroli) and fruity (apple, banana) aromas. The aromatic characteristics of the young brandy become more pronounced, the purity, intensity and harmony of the aroma increase, which ultimately improves the overall sensory quality of the product.

In addition, the use of clay vessels significantly reduces costs compared to oak barrels, which ensures both improved quality and economic efficiency of production. [1]

The invention discusses the process of classification and aging after the production of brandy, which belongs to the technological field of brandy aging and includes the following stages:

- s1 – mixing and assemblage of the initial brandy wine aged in small oak barrels, resulting in brandy;
- s2 – determination of the tannin content and total acidity index of the resulting brandy;
- s3 – carrying out classified aging based on the analysis results;
- s4 – carrying out organoleptic evaluation and analysis of physicochemical indicators and bottling from the barrel when the parameters characteristic of the finished brandy are achieved;
- s5 – carrying out further technological processes to obtain the final product.

The invention is based on the quantitative assessment of tannin content and total acidity, on the basis of which different storage and classified aging regimes are used. This allows the selection of appropriate oak barrels for different types of brandy, improving the efficiency and intensity of aging, and enhancing the quality of the final product. [2]

The invention - Integrated nanofiltration process for reducing the alcohol content of alcoholic beverages, refers to the process of reducing the alcohol content of alcoholic beverages, in particular wine, in such a way as to preserve the organoleptic properties of the original beverage. The process involves the complete or partial removal of ethanol using nanofiltration membranes that pass a mixture of water, ethanol and certain salts, while retaining the aromatic compounds of the original beverage. The permeate stream passing through the membrane, which is a mixture of water and ethanol, is subjected to distillation to remove ethanol. After the ethanol has been separated, the resulting stream is recycled back to the beverage to be processed, which ensures the production of a beverage with a reduced alcohol content while preserving the organoleptic properties [3]

The present invention - high-value nanofiltered botanical alcohol refers to a nanotechnological process aimed at improving the quality of alcohol. In particular, the invention includes a special nanofiltration process using natural materials, through which medicinal and aromatic alcohol is obtained. The developed nanotechnology provides the alcohol production industry with an integrated filtration methodology and equipment, which makes it possible to replace or remove irritating and foreign impurities (such as aldehydes, esters, amines and fusel oils). In addition, the aging period in tanks (VAT) or barrels (CASK) is reduced, which reduces the duration of the technological process, reduces undesirable odors and contamination, and increases the taste, aroma, color and health benefits of the product.[4]

The patent - a system and method for purifying drinking water, ethanol and alcoholic beverages - is based on the effect of hydrodynamic cavitation on microbiological and chemical contaminants, microparticles and colloidal particles.

The fluid flow moves at high speed through a multi-stage cavitation device and a filtration module, as a result of which hydrodynamic cavitation effects are generated in the fluid flow. Cavitation effects cause changes in the fluid velocity, pressure, temperature, chemical composition and physical properties. In addition, cavitation prevents the deposition of contaminants on the surface of the filtration module, ensures the removal of already accumulated impurities, reduces the load on the filter elements and increases the service life of the filtration module. [5]

The invention - separation process - relates to the process of separating compounds with a low molecular weight from compounds with a molecular weight less than 1.9 times the mass of the low molecular weight compounds using nanofiltration.

Low molecular weight compounds are typically characterized by a molecular weight of less than 250 g/mol. In one embodiment of the invention, pentose sugars are separated from hexose sugars.

The method can be used, for example:

- for the recovery of xylose from spent solutions,
- for the recovery of betaine from sugar beet pulp extracts. [6]

In the patent - the method of production of the brand "Vaziani":

1. Technical result:

Simplification of the technological process.

2. Essence:

The method includes the following stages:

- Processing of grapes;
- Obtaining wine material intended for brandy;
- Production of brandy spirit;
- Aging of spirit in two stages:

The first stage:

Aging of spirit for three years at a temperature of 20–25°C, in the presence of treated oak staves;

The second stage:

Adding pre-treated oak chips to the spirit in the amount of 3% of the total volume, after which:

- The resulting spirit is heated at a temperature of 70–80°C for 7 hours;
- Then the mixture is left to stand (rest) for two weeks;

This is followed by:

- Blending of old alcohol, color component, sugar syrup and softened water;
- Resting of the resulting mixture;
- Finally, filtration.

Field of application:

Food industry, in particular, brandy production. [7]

References:

1. Ageing method for improving brandy pleasure - CN113897264B;
2. Classification ageing process after brandy is prepared - CN117363447A;
3. Integrated nanofiltration process to reduce the alcohol content of alcoholic beverages - Fernando Manuel DA SILVA GONÇALVES, Norberta Neves Correia De Pinnho Maria; WO2004113489A1;
4. High value nano filtered botanical alcohol - KiranVarsith VENKATASUBRAMANIYAN; Revathi DHANDAPANI; SADAIAPPA GOUNDER; Ravishankar RAMADOSS; Indrajith KATHIRESAN - WO2017122219A1;
5. Method for purification of drinking water, ethanol and alcohol beverages of impurities - Roman Gordon; Igor Gorodnitsky; Maxim A. Promptov; Naum Voloshin – US11377371B2 ;
6. Separation process - Heikki Heikkila; Mika Manttari ; Marianne Nystrom; Mirja Lindroos; Hannu Paananen; Outi Puuppo; Hannu Koivikko - US20040060868A1;
7. Method for Production of Brandy “Vaziani”- Kakha Archvadze; Marine Bezhuashvili; Gia Chekurishvili - GEP20002035B;

ადგილობრივი და საერთაშორისო საპატენტო ნამუშევრების მოძიება და ანალიზი
ყურძნისეული წარმოშობის სპირტიანი სასმელის - ბრენდის - ნანოფილტრაციული
პროცესისათვის, ცვალებადი ტემპერატურისა და სიბლანტის პირობებში.
გიორგი ბიბილეიშვილი, ზაზა ჯავაშვილი, ელენე კაკაბაძე, ლეილა თანანაშვილი, მანანა
მამულაშვილი, ლიანა ებანოიძე.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მემბრანული ტექნოლოგიების საინჟინრო
ინსტიტუტი

რეზიუმე

ნაშრომში განხილული ადგილობრივი და საერთაშორისო საპატენტო ნამუშევრები
ასახავს ყურძნისეული წარმოშობის სპირტიანი სასმელის - ბრენდის - მიღების
მიკროფილტრაციული პროცესების მეთოდების განვითარების დარგობრივი სპეციფიკის
თანამედროვე მდგომარეობას მსოფლიოში და განაპირობებს ინსტიტუტში მიმდინარე
სამეცნიერო კვლევებისთვის შესაბამისი პრიორიტეტების განსაზღვრას.

საკვანძო სიტყვები: ადგილობრივი და საერთაშორისო საპატენტო ნამუშევრები,
ცვალებადი ტემპერატურა, სიბლანტე, ბრენდი.

Microbial Diversity and Biofouling Characteristics of Deposits Recovered from Membrane Filtration Systems in Wine and Water Treatment

George Bibileishvili¹, Manana Mamulashvili², Tinatin Butkhuzi Elene Kakabadze, Liana Ebanoidze, Ia Gogiberidze

Engineering Institute of Membrane technologies of Georgian Technical University

¹Doctor of Chemical and Biological Engineering, Chief Scientist, email:

75bibileishvili@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>

²Doctor of Chemical and Biological Engineering, Senior Research Scientist,

email:mananamamula59@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3982-5515>

Abstract

The research concerns the microbiological and morphological characteristics of deposits accumulated on membrane filters after the filtration of wine material, drinking water, and wastewater. The aim of the study was to evaluate signs of microbial contamination and biofouling associated with membrane filtration processes. Samples collected from membrane surfaces were examined using the crushed drop (“hanging drop”) microscopic method combined with optical microscopy at $\times 400$ magnification.

The results of the study showed significant differences in the microbial composition of the filtered samples. The wine material was dominated by yeast cells, primarily oval-shaped *Saccharomyces cerevisiae*, which frequently formed aggregates and were associated with the fermentation process. No biological contamination was observed in the drinking water samples, indicating effective water purification and microbiological safety. Wastewater samples showed high microbial load, diverse bacterial morphology, activated sludge flocs, and biofilm-associated aggregates, indicating degree of membrane biofouling.

The study confirmed that the sediments accumulated on the membranes contain a variety of microbial organisms that may negatively affect the filtration efficiency and operational stability of the system. The results obtained emphasize the importance of microbiological monitoring in membrane filtration systems for optimizing the filtration process, reducing biofouling, and ensuring the long-term effective functioning of wine and water treatment technologies.

Keywords: microbiological analysis, membrane filtration, optical microscopy, wine materials, drinking and wastewater

Introduction

Membrane technologies are widely used in water and wine processing, but one of the main problems is the accumulation of microorganisms on the filters and the development of biofouling. This process leads to a decrease in filtration efficiency, increased energy costs, and deterioration of product quality.

Identification of microorganisms and their morphological study are important stages in managing this process. The “smashed drop” method is a simple and effective way to observe living microorganisms, which allows assessing their shape, movement, and aggregation ability. Filtration plays a crucial role in the wine industry. The final filtration of wine must ensure its crystal clarity, 100% denaturation, stability, and storage stability [1,2].

This leads to the production of ecologically clean, crystal clear, high-quality wine with extended shelf life. During wine production, microorganisms are introduced from the surface of grapes, fruits and berries. The wine material is infected with microorganisms of the genera *Rhizopus*, *Mucor*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Pullularia*, *Botrytis* and yeasts of the genera *Zygosaccharomyces*, *Hansenula*, *Pichia*, *Schizosaccharomyces*, *Asatanomyces*, *Saccharomycodes*, *Candida*, *Toruloptersis*. Wine microorganisms include wild yeast and mold bacteria. Bacterial contaminants are: acetic acid bacteria (*Acetobacter*), lactic acid bacilli (*Lactobacillus*) and micrococci [5]. *E. coli*, common coliform and mesophilic aerobes and facultative anaerobes are mainly found in drinking and wastewater [3].

Filtration of wine, drinking water, and wastewater was performed on a microfiltration device developed at the Membrane Technologies Engineering Institute, using membranes with 0.2 - 0.45 μm pore size [4].

Materials and methods

The object of the study was: the sediment remaining on the membrane surface after filtration of wine material, drinking water and wastewater. The sediment was collected from the surface of the filters using a sterile loop. The samples were placed in sterile containers and immediately examined using the “smashed drop” method. The preparation of the preparation was carried out in the following stages: a small part of the sediment was placed on a glass slide, 1 drop of sterile distillate was added and covered with glass again, after drying, the smear was stained. The observation included morphological analysis, assessment of movement, signs of aggregation and biofilm, for which an optical microscope with $\times 400$ magnification was used.

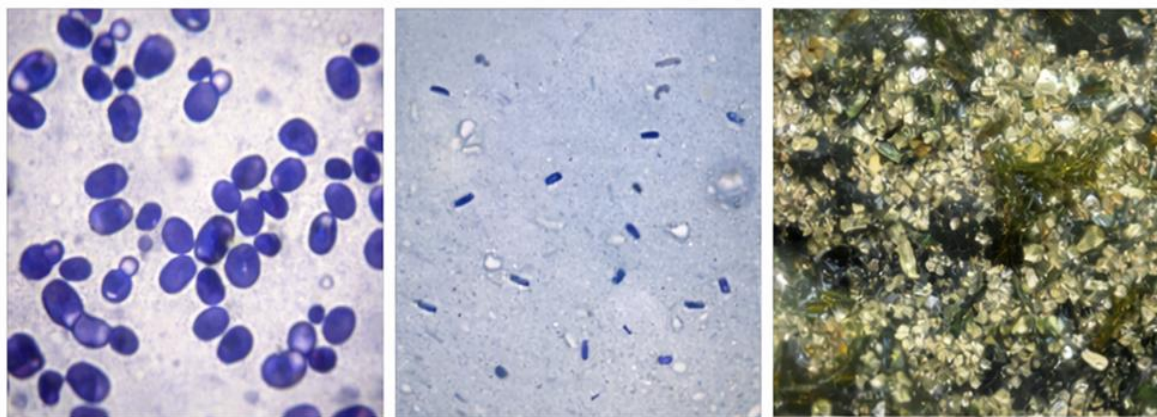


Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 1. Yeast cells in grape juice – oval-shaped *Saccharomyces cerevisiae* (×400)

Fig. 2. Bacteria found in wine lees – elongated (bacillary)-shaped *Lactobacillus* spp. (×400)

Fig. 3. Filtered wine lees – crystalline (tartrates) and mechanical impurities (×400)

Wastewater

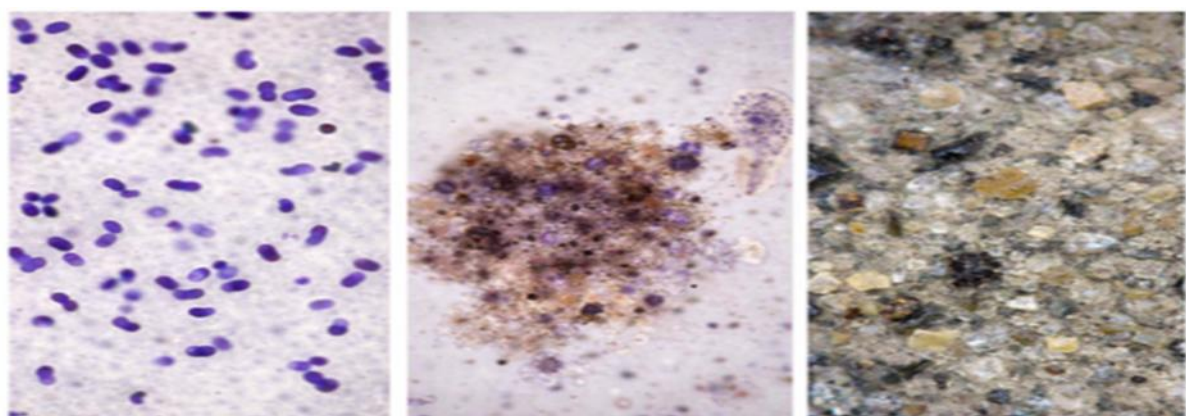


Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Figure 1. Microflora of wastewater – bacterial cells (×400) – bacteria of different morphology are shown (cocci, rods);

Figure 2. Activated sludge of wastewater – aggregates of microorganisms (×400) – bioflocs are visible, consisting of bacteria, protozoa and organic particles;

Figure 3. Filtered wastewater sediment – mechanical and mineral impurities (×400) – inorganic particles, crystals and the remaining solid fraction after filtration are presented.

Results

Wine samples were dominated by yeast, mainly oval-shaped cells that often formed aggregates. No biological contamination was observed in drinking water. High microbial load, diverse microflora, and biofilm structures were observed in wastewater. Microbial contamination levels were assessed qualitatively based on the observed abundance of microorganisms in microscopic fields. Comparative analysis was performed between wine, drinking water, and wastewater samples to assess differences in microbial load and biofouling characteristics.

Table 1. Number and characteristics of microorganisms in the test samples

Sample	Microorganisms	Quantity	Peculiarity
Wine ingredients	Yeast	High	Aggregation
Drinking water	Bacteria	wasn't	--
Wastewater	Mixed	Very high	Biofilm

The results obtained indicate that the type and quantity of microorganisms significantly depend on the water source. The dominance of yeast in wine is due to the fermentation process. No microbial content was confirmed in drinking water. The presence of biofilm observed in wastewater is a serious problem for membrane systems. The accumulation of contaminants on membranes can significantly reduce the efficiency of the system, increase energy consumption, and ultimately lead to deterioration of functioning and membrane replacement.

Conclusions

The study showed that the sediments accumulated on the filters after the membrane filtration process contain various types of microorganisms, the composition of which significantly depends on the nature of the filtered liquid. Yeast cells, which are associated with fermentation processes, dominated in the wine material, while high microbial load, diverse microflora and signs of biofilm formation were detected in the wastewater. No microbial contamination was observed in the drinking water samples, which indicates the effectiveness of water treatment.

The study confirmed that the “smashed drop” method and optical microscopy are effective and rapid methods for the initial identification and morphological assessment of microorganisms accumulated on membrane surfaces. The results obtained are important for a better understanding of the biofouling processes of membrane systems and for assessing the efficiency of filtration.

Biofilms and microbial aggregates detected in wastewater indicate that biofouling is one of the main problems in membrane filtration systems, as it leads to a decrease in membrane permeability, increased energy consumption, and a deterioration in the efficiency of system operation.

The results of the study provide opportunities for microbiological monitoring, optimization of the filtration process, and improvement of membrane operation in wine and water treatment technologies.

References

1. Manana Mamulashvili¹, Giorgi Bibileishvili², Zaza Javashvili³, Tinatin Butkhuzi⁴, Elene Kakabadze⁵ Determination of morphological and tinctorial characteristics of microorganisms in wine and water. Georgian Scientists Vol. 7 №2, 2025 <https://doi.org/10.52340/g.s.2025.07.02.59> pp. 647-651
2. ¹George Bibileishvili, ²Manana Mamulashvili, ³Elene Kakabadze, ⁴Liana Ebanoidze, ⁵Nona Butkhuzi, ⁶Ia Gogiberidze Microbiological analysis of wastewater, fruit juices, determination of microbial sizes, diagnostics and filtration of microorganisms. Georgian Scientists Vol. 7 №4 2025. Pp 440-443 <https://doi.org/10.52340/g.s.2025.07.04>.
3. Bibileishvili G.V., Mamulashvili M.A., Javashvili Z.D., Kakabadze E.G. Microbiological study of natural fresh waters treated with ultrafiltration membranes. Georgian Engineering News, Vol. 93 №2, 2021, pp. 113-114
4. G. Bibileishvili, N. Gogesashvili, M. Kezherashvili, L. Kuparadze, M. Mamulashvili, L. Ebanoidze Micro- and ultrafiltration treatment of water and fruit juices. Collection of abstracts of the international conference “Chemistry - Achievements and Prospects” dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician Givi Tsintsadze. GTU 2023
5. Fleet G. Yeasts in Wine Production Book. Chapter 1 - Yeast Ecology in Winemaking 2022
6. Mamulashvili M., Gogiberidze I. RESEARCH ON THE HYDROBIOCHEMICAL STATE OF LAKE LISI WATER. Slovak international scientific journal №105 2026. pp. 4-7

ღვინისა და წყლის დამუშავების მემბრანული ფილტრაციის სისტემებიდან ამოღებული ნალექების მიკრობული ორგანიზმები და ბიოდაბინძურების მახასიათებლები

გიორგი ბიბილეიშვილი¹, მანანა მამულაშვილი², თინათინ ბუთხუზი., ელენე კაკაბაძე.,
ლიანა ებანოიძე., ია გოგიბერიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის მემბრანული ტექნოლოგიების საინჟინრო
ინსტიტუტი

¹ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერიის დოქტორი, მთავარი მეცნიერი თანამშრომელი
email: 75bibileishvili@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-7712-2436>; ²ქიმიური და

ბიოლოგიური ინჟინერიის დოქტორი, უფროსი მეცნიერი თანამშრომელი
email: mananamamula59@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3982-5515>

რეზიუმე

კვლევა ეხება ღვინომასალის, სასმელი და ჩამდინარე წყლების მემბრანული ფილტრაციის შემდეგ ფილტრებზე დაგროვილი ნალექების მიკრობიოლოგიურ და მორფოლოგიურ შესწავლას. კვლევის მიზანს წარმოადგენდა მემბრანული ფილტრაციის პროცესებთან დაკავშირებული მიკრობული დაბინძურებისა და ბიოდაბინძურების (biofouling) ნიშნების შეფასება. მემბრანის ზედაპირიდან აღებული ნიმუშები შესწავლილ იქნა „გაჭყლელი წვეთის“ მეთოდისა და $\times 400$ გადიდების ოპტიკური მიკროსკოპის გამოყენებით.

კვლევის შედეგებმა აჩვენა განსხვავებები გაფილტრული სინჯებებს მიკრობულ შემადგენლობაში. ღვინომასალაში დომინირებდა საფუარის უჯრედები, ძირითადად ოვალური ფორმის *Saccharomyces cerevisiae*, რომლებიც ხშირად ქმნიდნენ აგრეგატებს და დაკავშირებული არიან ფერმენტაციის პროცესთან. სასმელი წყლის ნიმუშებში ბიოლოგიური დაბინძურება არ დაფიქსირდა, რაც წყლის ეფექტურ გაწმენდასა და მიკრობიოლოგიურ უსაფრთხოებაზე მიუთითებს. ჩამდინარე წყლების ნიმუშებში გამოვლინდა მაღალი მიკრობული დატვირთვა, მრავალფეროვანი ბაქტერიული მორფოლოგია, აქტიური ლამის ფლოკები და ბიოფილმთან ასოცირებული აგრეგატები, რაც მემბრანული ბიოდაბინძურების ხარისხზე მიუთითებს.

კვლევამ დაადასტურა, რომ მემბრანებზე დაგროვილი ნალექები შეიცავს მრავალფეროვან მიკრობულ ორგანიზმებს, რომლებიც შესაძლოა უარყოფითად მოქმედებდნენ ფილტრაციის ეფექტურობასა და სისტემის ოპერაციულ სტაბილურობაზე. მიღებული შედეგები ხაზს უსვამს მემბრანული ფილტრაციის სისტემებში მიკრობიოლოგიური მონიტორინგის მნიშვნელობას ფილტრაციის პროცესის ოპტიმიზაციის, ბიოდაბინძურების შემცირებისა და ღვინისა და წყლის დამუშავების ტექნოლოგიების გრძელვადიანი ეფექტური ფუნქციონირებისათვის.

საკვანძო სიტყვები მიკრობიოლოგიური ანალიზი, მემბრანული ფილტრაცია, ოპტიკური მიკროსკოპია, ღვინომასალა, სასმელი და ჩამდინარე წყალი;

სონოგრაფიის როლი ფილტვის კარდიოგენული შეშუპების დიაგნოსტიკაში.

დიმიტრი წვერავა, მიხეილ წვერავა

ივანე ჯავახიშვილი სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი. მედიცინის
ფაკულტეტი. შინაგან დაავადებათა კათედრა;

ჩაფიძის სახელობის გადაუდებელი კარდიოლოგიის ცენტრი;

მედიკალბჯორჯია თბილისი

რეზიუმე

კვლევის მიზანი ფილტვის სონოგრამის ცვლილებების შესწავლა გულის უკმარისობის
მქონე პაციენტებში.

კვლევის მასალა და მეთოდები: შევისწავლეთ სხვადასხვა მიზეზით გამოწვეული გუ-ს
მქონე 215 ავადმყოფი, საშუალო ასაკით $63,8 \pm 4,4$ წელი, მამაკაცი - 139, ქალი - 76.
საკონტროლო ჯგუფს შეადგენდა ჯანმრთელი ან გულ-სისხლძარღვთა სისტემის
გაურთულებელი დაავადების მქონე 74 პირი, საშუალო ასაკით $62,6 \pm 9,8$ წელი, მათგან
მამაკაცი - 42, ქალი - 32. ყველა პაციენტს ჩატარდა გულმკერდის რენტგენოგრაფიული
კვლევა 2 პროექციაში, ელექტროკარდიოგრაფიული და სტანდარტული
ექოკარდიოგრაფიული კვლევა. გულმკერდის სონოგრაფიულ კვლევას ვაწარმოებდით
2,5-3,5 მგჰც-იანი სექტორული ან კონვექსური გადამწოდით 2-განზომილებიან რეჟიმში.
სონოგრამას ვიწერდით გულმკერდის ორივე მხარეს 12 წერტილიდან, რომლებიც
შეესაბამებოდა ფილტვის წილებს პროექციას. გამოსახულებაზე ფასდებოდა ყველა
ულტრაბგერითი ფენომენი.

კვლევის შედეგები:

გუ-ს მქონე ჯგუფში სონოგრაფიით პლევრის ღრუში სითხე აღმოაჩნდა 78 ავადმყოფს
(36,3%). სონოგრაფიული კვლევით გუ-ს მქონე 207 ავადმყოფთან (96,3%) გამოვლინდა
რევერბერაციის თავისებური ვარიანტი ე.წ კომეტის კუდის ფენომენი (კვ) B-line.
საკონტროლო ჯგუფში კვ B-line დაფიქსირდა მხოლოდ 24 ავადმყოფთან (32,4%). გუ-ს
დროს ავადმყოფთა 91,6%-თან (კვ) B-line დაფიქსირდა სალოკაციო 6 და მეტი
წერტილიდან, საკონტროლო ჯგუფში შემთხვევათა 97,3%-ში (კვ) B-line ისახებოდა 3 ან

ნაკლები წერტილიდან. გულმკედრზე სალოკაციო წერტილიდან. თუ ნორმასა და ფშ-ს შორის განსხვავების ზღვრულ მაჩვენებელად მივიჩნევთ კვ-ის გამოვლენას გულმკერდის სალოკაციო 4-ზე მეტი პოზიციიდან სიმპტომის მგრძნობელობა 0.94-ია, სპეციფიურობა 0,97 დადებითი პრედიქტულობა 0,99, უარყოფითი 0,86, სიზუსტე 0,95-ია.

დასკვნები: გუ-თი განპირობებული ფშ-ის დროს გულმკერდის სონოგრამაზე აღინიშნება მრავლობითი, ხანგრძლივი კომეტის ფენომენის B-line-ს გამოჩენა, რომელიც გულმკერდის დიდ მონაკვეთზე ფიქსირდება. კომეტის ფენომენის B-line-ს გამოვლენა გულმკერდის სონოგრაფიის პროცეში 4 და მეტი სალოკაციო პოზიციიდან გუ-ით განპირობებული ფშ-ს მგრძნობიარე და სპეციფიური ნიშანია, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას დიაგნოსტიკის პროცესში.

საკვანძო სიტყვები: ფილტვის სონოგრაფია, გულის უკმარისობა, ფილტვის შეშუპება.

მზარდი მაღალი ავადობის და სიკვდილიანობის გამო გულის უკმარისობის (გუ) საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის სერიოზულ პრობლემას წარმოადგენს. მსოფლიოს წამყვან ქვეყნებში ყოველწლიურად გულის უკმარისობით ჰოსპიტალიზაციის შემთხვევები 1 მილიონს აჭარბებს. ამ შემთხვევების 90 % სითხით გადატვირთვით არის განპირობებული. აღნიშნულ პაციენტებში განმეორებითი ჰოსპიტალიზაციის რიცხვი 30 დღის განმავლობაში 24% აღწევს, ხოლო 6 თვის განმავლობაში 50%-ს. (1) 65 წელზე უფროსი ასაკის პაციენტებში მწვავე დეკომპენსირებული გულის უკმარისობა ჰოსპიტალიზაციის წამყვან მიზეზად რჩება და ყველა სამედიცინო მდგომარეობას შორის 30-დღიანი ხელახალი ჰოსპიტალიზაციის ყველაზე მაღალი მაჩვენებელი აქვს. [2] ყოველი ახალი ჰოსპიტალიზაცია გულის უკმარისობის სიკვდილიანობის რისკს 20%-ით ზრდის, ამის გამო გულის უკმარისონის მკურნალობის უმნიშვნელოვანეს მიზნად ითვლება მძიმე დეკომპენსაციის თავიდან აცილება. (3) გულის უკმარისობის მართვისას ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევა ორგანიზმში სითხის ოპტიმალური ბალანსის მიღწევაა (4, 5). შესაბამისად უკიდურესად დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მცირე წრის ჰიპერვოლემით გამოწვეული ფილტვის შეშუპების დროულ დიაგნოსტიკასა და მკურნალობა.

სასუნთქი სისტემა ერთ-ერთი პირველი პასუხობს გულის სისტოლური და დიასტოლური ფუნქციის დარღვევას. ფილტვის ექსტრავაზალურ ქსოვილში სითხის რაოდენობის მომატებას ფილტვის შეშუპებას (ფშ) უწოდებენ (6). გულის უკმარისობა ფშ-ს ყველაზე ხშირი მიზეზია(7). გუ-ს დროს ფშ განპირობებულია მცირე წრის ჰიპერტენზიით და ჰიპოვოლემიით, რომლებიც გუ-ს სიმძიმის და ცუდი პროგნოზის განმსაზღვრელი ფაქტორებია (8,9). დადგენილია, რომ ფილტვში სითხის შემცველობის გაზრდა იწვევს რა გაზთა დიფუზიის შეფერხებას და სუნთქვის რესტრიქციულ დარღვევას ამძიმებს ავადმყოფის მდგომარეობას და მნიშვნელოვნად აქვეითებს

ცხოვრების ხარისხს. ფშ-ის დროს ჩივილები არასპეციფიურია, აუსკულტაციური ნიშნები კი მხოლოდ ავადმყოფთა ნაწილს აღენიშნება(5). ზოგ შემთხვევაში ფშ-ს ბრონქის ლორწოვანის და პერიბრონქული ინტერსტიციური შეშუპებით გამოწვეული მშრალი ხიხინი ახლავს, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს დიაგნოსტიკურ პროცესს. ფშ-ს ინსტრუმენტული დიაგნოსტიკის სტანდარტულ მეთოდს წარმოადგენს გულმკერდის რენტგენოგრაფია. განსაკუთრებულ შემთხვევებსი გამოიყენება კომპიუტერული ტომოგრაფია. რენტგენოლოგიური კვლევის სიზუსტე მნიშვნელოვნად კლებულობს სასუნთქი სისტემის თანმხლები დავადებების დროს, ის დამოკიდებულია რენტგენოგრამის ხარისხზე, არ არის ავადმყოფის „საწოლთან კვლევის“ მეთოდი და დაკავშირებულია სხივურ დატვირთვასთან.

გულმკერდის ღრუს და ფილტვის სონოგრაფიული კვლევა სამედიცინო დიაგნოსტიკის შედარებით ახალი მიმართულებაა. მეთოდი უპირატესად გამოიყენებოდა ინტრაპლევრალური პროცესის დიაგნოსტიკაში (10,11,12). ჩვენი მიზანი იყო შეგვესწავლა ფილტვის სონოგრაფიის ცვლილებები გულის შეგუბებითი უკმარისობის მქონე პაციენტებში.

კვლევის მასალა და მეთოდები:

შევისწავლეთ სხვადასხვა მიზეზით გამოწვეული გუ-ს მქონე 215 ავადმყოფი, საშუალო ასაკით $63,8 \pm 4,4$ წელი, მათგანი მამაკაცი - 139, ქალი - 76. საკონტროლო ჯგუფს შეადგენდა ჯანმრთელი ან გულ-სისხლძარღვთა სისტემის გაურთულებელი დაავადების მქონე 74 პირი, საშუალო ასაკით $62,6 \pm 9,8$ წელი, მათგან მამაკაცი - 42, ქალი - 32. ყველა პაციენტს ჩაუტარდა გულმკერდის რენტგენოგრაფიული კვლევა 2 პროექციაში, ელექტროკარდიოგრაფიული და სტანდარტული ექოკარდიოგრაფიული კვლევა.

გულმკერდის სონოგრაფიულ კვლევას ვაწარმოებდით 2,5-3,5 მგჰც-იანი სექტორული ან კონვექსური გადამწოდით 2-განზომილებიან რეჟიმში. სონოგრამას ვიწერდით გულმკერდის ორივე მხარეს სულ 12 წერტილიდან ჩვეულებრივი და ღრმა სუნთქვის დროს. რეგისტრაციის წერტილები ჩვეულებრივ შეესაბამებოდა მარჯვნივ - მარჯვენა ფილტვის ზედა, შუა და ქვემო წილებს, მარცხნივ - ქვემო და ზედა წილების პროექციას გულმკერდის კედელზე. გამოსახულებაზე ფასდებოდა ყველა ის ულტრაბგერითი ფენომენი, რომელიც ჩნდებოდა კვლევის პროცესში.

სტატისტიკური ანალიზე შესრულდა პროგრამა Exel-ის მეშვეობით. ვითვლიდით პარამეტრების საშუალო მაჩვენებლებს, კვარდრატულ გადახრას საშუალოდან, მაჩვენებლის სხვაობის სარწმუნოებას (სტიუდენტის ტესტით), კორელაციის კოეფიციენტს, მაჩვენებლის მგრძნობელობას, სფეციფიკურობას, დადებით და უარყოფით პრედიქტულობას, მის დიაგნოსტიკურ ეფექტურობას.

კვლევის შედეგები:

გუ-ს მქონე ავადმყოფთა შორის 57-ს(26,5%) აღენიშნებოდა მოციმციმე არითმია, 8-ს (3,7%) ჰქონდა გუ-ს I ფკლ, 36 II ფკლ (16,7%), 105 III ფკლ (48,8%), 66 IV ფკლ (30,7%). ღამის ქოშინის შეტევა გამოვლინდა 69 ავადმყოფში (32,1%), ორთოპნოე 88-ს (40,9%). ფილტვის მოსმენით სველი ხიხინი ან კრეპიტაცია აღენიშნა 102 პაციენტს (47,4%), მშრალი მსტვენავი ხიხინი 4-ს (1,9%). სონოგრაფიულად ჰეპატომეგალია გამოვლინდა 106 (49,3%) ავადმყოფს. ძირითადი და საკონტროლო ჯგუფის ავადმყოფთა კლინიკური და ექოკარდიოგრაფიული მონაცემები მოცემულია ცხრილში.

ცხრილი. გულის უკმარისობის მქონე და საკონტროლო ჯგუფის პირების ზოგიერთი კლინიკური და ექოკარდიოგრაფიული მაჩვენებელი.

მაჩვენებელი	საკონტრ	გუ	პ<
გულის ცემის სიხშირე წუთში	72,3±10,1	84,9±13,4	0,001
მოციმციმე არითმიის მქონე პაციენტები	0 (0%)	26,5%(57)	0,001
არტერიული წნევა მმვსწვ:			
- სისტოლური	147,4±27,9	147,7±30,9	0,001
- დიასტოლური	82,4±18,7	85,2±18,9	0,001
სუნთქვის სიხშირე წუთში	17,2±1	22,6±2,9	0,001
ღვიძლის კრანოკაუდალური ზომა სონოგრამაზე (მმ)	113±8,6	140,9±14,3	0,001
მარცხენა პარკუჭის დიამეტრი დიასტოლაში (მმ)	4,84±0,53	6,11±0,91	0,001
მარცხენა პარკუჭის დიამეტრი სისტოლაში (მმ)	3,11±0,49	4,86±1,09	0,001
განდევნის ფრაქცია %	64,7±7,5%	41,1±12,5	0,001
სისტოლური წნევა ფილტვის არტერიაში მმვსწვ	11,3±6,1	52,4±10,1	0,001
დიასტოლური წნევა ფილტვის არტერიაში მმვსწვ	8,8±2,5	15,3±6,2	0,001
საშუალო წნევა ფილტვის არტერიაში მმვსწვ	17,1±6,1	38,1±6,1	0,001

გუ-ს მქონე ჯგუფში სონოგრაფიული კვლევისას პლევრის ღრუში სითხე აღმოაჩნდა 78 ავადმყოფს (36,3%). 43 ავადმყოფთან (55,1%) სითხე ორმხრივი იყო, 25-თან (32,1%) მარჯვენამხრივი, 10-თან კი (12,8%) მარცხენამხრივი. 4 ავადმყოფთან პლევრის ღრუში სითხის რაოდენობა დიდი იყო, 20-თან საშუალო რაოდენობა, 24-თან მცირე რაოდენობა (სითხე ისახებოდა მხოლოდ კოსტოდიაფრაგმულ სივრცეში).

სონოგრაფიული კვლევის დროს გუ-ს მქონე 207 ავადმყოფთან (96,3%) გამოვლინდა რევერბერაციის თავისებური ვარიანტი ე.წ კომეტის კუდის ფენომენი (კვ) B-line. ამავე დროს საკონტროლო ჯგუფში კვ B-line დაფიქსირდა მხოლოდ 24 ავადმყოფთან (32,4%).

სხვაობა ჯგუფებს შორის სარწმუნო იყო ($p < 0,001$). საკონტროლო ჯგუფში კვ B-line გულმკერდის შემოსაზღვრულ ნაწილზე ვლინდებოდა, ხანმოკლე გაელვების სახე ჰქონდა და ერთეული იყო. ძირითად ჯგუფში კი ის გულმკერდის შედარებით დიდი ზედაპირიდან ისახებოდა, ხანგრძლივი და მრავლობითი იყო. გუ-ს დროს ავადმყოფთა 91,6%-თან (კვ) B-line დაფიქსირდა ჩვენს მიერ შემოთავაზებული სალოკაციო 6 და მეტი წერტილიდან, ამავე დროს საკონტროლო ჯგუფში შემთხვევათა 97,3%-ში (კვ) B-line ისახებოდა მხოლოდ 3 ან ნაკლები წერტილიდან. გულმკერდზე სალოკაციო წერტილიდან რაოდენობა საიდანაც (კვ) B-line ისახებოდა დადებით კორელაციაში იყო გულმკერდის რენტგენოგრამაზე ფილტვის სეგუმების ხარისხთან ($r=0,82$), გულის უკმარისობის ფუნქციურ კლასთან ($r=0,57$), საშუალო წნევასთან ფილტვის არტერიაში ($r=0,31$). უარყოფით კორელაციაში იყო განდევნის ფრაქციასთან ($r=0,31$) და ადრეული დიასტოლური მიტრალური ნაკადის გავრცელების სიჩქარეთან ($r=0,30$).

თუ ნორმისა და ფშ-ს შორის დიფერენციების ზღვრულ მაჩვენებლად მივიჩნევთ (კვ) B-line-ის გამოვლენას გულმკერდის სალოკაციო 3-ზე მეტი პოზიციიდან სიმპტომის მგრძნობელობა 0,96-ია, სპეციფიურობა 0,91, დადებითი პრედიქტულობა 0,97, უარყოფითი 0,89, სიზუსტე კი 0,95-ია. თუ ნორმასა და (კვ) B-line-ს შორის განსხვავების ზღვრულ მაჩვენებლად მივიჩნევთ (კვ) B-line-ის გამოვლენას გულმკერდის სალოკაციო 4-ზე მეტი პოზიციიდან სიმპტომის მგრძნობელობა 0,94-ია, სპეციფიურობა 0,97, დადებითი პრედიქტულობა 0,99, უარყოფითი 0,86, სიზუსტე კი 0,95-ია. ამგვარად (კვ) B-line-ის გამოვლენა გულმკერდის სონოგრაფიის პროცესი 4 და მეტი სალოკაციო პოზიციიდან გულის უკმარისობის განპირობებული ფშ-ს მგრძნობიარე და სპეციფიური ნიშანია.

შედეგების განხილვა: გულმკერდის ღრუს და ფილტვის სონოგრაფიული კვლევა სამედიცინო დიაგნოსტიკის შედარებით ახალი მიმართულებაა. მეთოდი დიდხანია გამოიყენება ინტრაპლევრული პროცესის დიაგნოსტიკაში, დღეს კი მას სულ უფრო თამამად იყენებენ ფილტვის, უპირატესად გულმკერდის მიმდებარე პროცესების დიაგნოსტიკაში. შემუშავებულია ფილტვის პარენქიმის კონსოლიდაციის, ატელექტაზის და გულმკერდის კედლის და მის მიმდებარე პროცესების სადიაგნოზო სონოგრაფიული კრიტერიუმები (13,14). ჩვენს კვლევაში ფშ-ს დროს გამოვლინდა რევერბერაციის თავისებური ვარიანტი „კომეტის კუდის“ ფენომენი (კვ) B-line-ს მაღალი სიხშირე. მისი ინტენსიობის, ხანგრძლიობის და რეგისტრაციის არის გამოხატული გაზრდა გუ-ს მქონე პირებში. (კვ) B-line ვლინდება ჯანმრთელებშიც, მაგრამ ის ლოკალური, ხანმოკლე და ერთეული. მაღალი ინტენსიობის (კვ) B-line-ს ნახულობენ ფილტვის დიფუზური დაავადებების დროსაც, მაგრამ ფშ-სგან განსხვავებით ამ დროს ის ლოკალური ხასიათისაა და ფილტვის შემოსაზღვრულ მონაკვეთზე ისახება (15).

დასკვნები:

1. გუ-თი განპირობებული ფშ-ის დროს გულმკერდის სონოგრამაზე აღინიშნება მრავლობითი, ხანგრძლივი კომეტის ფენომენის B-line-ს გამოჩენა, რომელიც გულმკერდის დიდ მონაკვეთზე ფიქსირდება.
2. კომეტის ფენომენის B-line-ს გამოვლენა გულმკერდის სონოგრაფიის პროცესში 4 და მეტი სალოკაციო პოზიციიდან გუ-ით განპირობებული ფშ-ს მგრძნობიარე და სპეციფიური ნიშანია, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას დიაგნოსტიკის პროცესში.

გამოყენებული ლიტერატურა:

- 1.Crespo-Leiro M.G., Anker S.D., Maggioni A.P., Coats A.J., Filippatos G., Ruschitzka F., Ferrari R., Piepoli M.F., Jimenez J.F.D., Metra M., et al. European Society of Cardiology Heart Failure Long-Term Registry (ESC-HF-LT): 1-year follow-up outcomes and differences across regions. *Eur. J. Heart Fail.* 2016;18:613–625. doi: 10.1002/ejhf.566.
- 2.Hernandez A.F., Greiner M.A., Fonarow G.C., Hammill B.G., Heidenreich P.A., Yancy C.W., Peterson E.D., Curtis L.H. Relationship Between Early Physician Follow-up and 30-Day Readmission Among Medicare Beneficiaries Hospitalized for Heart Failure. *JAMA.* 2010; 303:1716–1722. doi: 10.1001/jama.2010.533.
- 3.Kleiner Shochat, M.; Fudim, M.; Kapustin, D.; Kazatsker, M.; Kleiner, I.; Weinstein, J.M.; Panjraht, G.; Rozen, G.; Roguin, A.; Meisel, S.R. Early Impedance-Guided Intervention Improves Long-Term Outcome in Patients With Heart Failure. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2021, 78, 1751–1752
- 4.Cosentino N., Marenzi G., Muratori M., Magrì D., Cattadori G., Agostoni P. Fluid balance in heart failure. *Eur J Prev Cardiol.* 2023;30(Suppl 2):ii9-ii15. doi:10.1093/eurjpc/zwad166
- 5.MullensWDammanK DhontSBanerjeeDBayes-GenisACannataAet alDietary sodium and fluid intake in heart failure. A clinical consensus statement of the heart failure association of the ESC. *Eur J Heart Fail.* (2024) 26(4):730–41. 10.1002/ejhf.3244
6. წვერავა. მ., ზაქარიაძე. თ., ჩხეტია. მ.: ფილტვის შეგუბების სონოგრაფიული დიაგნოსტიკა გულის უკმარისობის დროს“ ექიმთა დიპლომისშემდგ. განათლების სახ.სამედიცინო აკადემია. შრომათა კრებული 1997 გვ 193-195
7. Мязин А. А. “ Эхография в диагностике заболеваний легких у детей. “Новости лучевой диагностики 2002 1-2: 56-60.

8. Репик В.И. Ультразвуковое исследование лёгких и плевры //Клиническое руководство по ультразвуковой диагностике. Под ред. Митькова В.В., Медведева М.В. Т. III. М. Видар, 1997. С.242-244.
9. Abramson SV, Burke JF and Kelly JJ Jr et al. "Pulmonary hypertension predicts mortality and morbidity in patients with dilated cardiomyopathy." *Ann Intern Med* 1992, 116:888-895.
10. Beckh S, P. L. Bölskei, K-D. Lessnau "Real-Time Chest Ultrasonography. A Comprehensive Review for the Pulmonologist" *Chest*. 2002;V.122.1759-1773
11. Betsch B. "Diagnosis of pulmonary diseases with transthoracic ultrasound" *Radiologe* - 1998; 38(5): 364-369.
12. Brandt W.E. "Chest" p.575-597, in "Diagnostic ultrasound." V.1, 2-nd edition. Ed by Rumagk, Wilson S.R., Charbancieu J.W. 1998. Mosby-Year Book Inc.
13. Juhl J.H. "Circulatory disturbances." p.939-969. in "Essentials of radiologic imaging" ed. by Juhl J.H., Grumby A.B.; J.B. Lippincott Comp. Philadelphia. 1993.
14. Lucas C., Jonson W., Hamillon M.A., Fonarov G.C., Woo M.A., Flavell C.M., Creaser J.A., Werner Stevenson L. "Freedom from congestion predicts good survival despite previous class IV symptoms of heart failure." *Am.Heart J.* 2000, 140:840-847.
15. McLoud T.C., Flower C.D.R. "Imaging the pleura: sonography, CT and MR imaging. *AJR* 1991; 156:1145-1153.

The meaning of thoracic sonography in diagnosis of pulmonary congestion due to Heart failure

Tsverava Dimitri, Tsverava Mikheil

Ivane Javakhishvili Tbilisi State University. Faculty of medicine. Department of internal medicine.

Chapidze Emergency Cardiology Center.

MediClubGeorgia -MCG

Abstract

Goal: Pulmonary congestion is useful marker of decompensated congestive heart failure (CHF). The goal of the study was to evaluate the changes of pulmonary sonogram in patients with heart failure.

Methods: We studied 215 patients with heart diseases who had different grade CHF and X-ray signs of pulmonary congestion (I group) and 74 normal persons and patients with heart diseased who had no signs of heart failure (II group). Sonographic evaluation of a lung was done in horizontal and vertical positions of patient, from 12 points of thoracic wall which corresponded to the projection of lower, middle and upper lobes of a right lung and upper and lower lobes of left lung.

Results: In patients with CHF we significantly often found the one of the sorts of reverberation phenomenon - “Comet tail Phenomenon” (CTP) (96,3% versus 34,2%, $p < 0,001$). In HF group CTP was registered from 6 or more points in 91,6% of patients. In control group it was registered from 3 or less points in 97,3% of patients. If we take registration of a CTP from 4 and more points as a reference value the sensitivity of symptom in diagnosing of CHF is 0,94, specificity – 0,97, accuracy – 0,95. There was good correlation between the count of CTP registration points from the thoracic wall and the heart failure NYHA class ($r=0.56$). In CHF group CTP was prominent, protracted and multiple while in the II group it was single and short lasting.

Conclusion: Thoracic US is sensitive and accurate method for evaluation pulmonary congestion in patients with CHF. The US sign of pulmonary congestion in HF is a “Comet tail phenomenon”, which is protracted, prominent, multiple and registered from larger area of thoracic wall (4 points or more).

Key words: heart failure, pulmonary congestion, thoracic sonography

**კოლორექტული დისპლაზიური პოლიპებისა და ადენოკარცინომების
ჰეტეროგენულობა: სიმსივნის მაინფილტრირებელი ლიმფოციტებისა და
სიმსივნური მიკროკლასტერების ურთიერთკავშირი, პროგრესიისა და
პროგნოზის თავისებურებები
(ლიტერატურის კრიტიკული მიმოხილვა)**

ირინა ელიავა¹; რემა ღვამიჩავა²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴

¹სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; კლინიკური ონკოლოგი; ²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ონკოლოგიის დეპარტამენტის პროფესორი; ³თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის პროფესორი; ⁴თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის პათოლოგანატომი; მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი;

აბსტრაქტი

კოლორექტული კიბო წარმოადგენს მსოფლიოში ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ და კლინიკურად მნიშვნელოვან ავთვისებიან ნეოპლაზიას, რომლის განვითარება მჭიდროდ არის დაკავშირებული ადენომა-კარცინომის თანმიმდევრობასთან, გენეტიკურ და ეპიგენეტიკურ ცვლილებებთან, ასევე სიმსივნის მიკროგარემოს თავისებურებებთან. თანამედროვე კვლევები განსაკუთრებულ ყურადღებას ამახვილებს კოლორექტული დისპლაზიური პოლიპებისა და ადენოკარცინომების ჰეტეროგენულობაზე, რომელიც მოიცავს ჰისტოლოგიურ, მოლეკულურ, იმუნოლოგიურ და კლინიკურ მრავალფეროვნებას. აღნიშნული ჰეტეროგენულობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სიმსივნის პროგრესირებაზე, ინვაზიურობაზე, მეტასტაზურ პოტენციალსა და პაციენტის ზოგად პროგნოზზე.

წინამდებარე ლიტერატურის კრიტიკული მიმოხილვა აერთიანებს თანამედროვე მონაცემებს კოლორექტული პოლიპებისა და ადენოკარცინომების პათოგენეზის, კლასიფიკაციის, მოლეკულური მახასიათებლებისა და პროგნოზული ბიომარკერების შესახებ. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა სიმსივნის მაინფილტრირებელი ლიმფოციტების (TILs) და სიმსივნური მიკროკლასტერების (Tumor Buds) ურთიერთქმედებას, როგორც სიმსივნის აგრესიულობის, ეპითელურ-მეზენქიმური ტრანსფორმაციისა და იმუნური ზედამხედველობიდან თავის აცილების მნიშვნელოვან ინდიკატორებს. განხილულია ისეთი მოლეკულური მარკერები და გზები, როგორიცაა

APC, KRAS, TP53, BRAF, MSI, CIMP, E-cadherin, β -catenin, Ki-67, Bcl-2, VEGF და CD163, რომლებიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ კოლორექტული კარცინოგენეზის სხვადასხვა ეტაპზე.

ნაშრომში ასევე შეფასებულია TNM კლასიფიკაციის, კონსენსუსის მოლეკულური ქვეტიპების (CMS) და იმუნოსკორის ინტეგრაციის მნიშვნელობა პერსონალიზებული მედიცინის კონტექსტში. თანამედროვე კვლევების მიხედვით, TIL-ებისა და სიმსივნური „ბადების“ შეფასება შესაძლოა გამოყენებულ იქნას როგორც მნიშვნელოვანი პროგნოზული და პრედიქტიული მარკერი, რაც ხელს შეუწყობს პაციენტთა რისკის-სტრატეფიკაციასა და ინდივიდუალური თერაპიული მიდგომების განსაზღვრას.

საკვანძო სიტყვები: კოლორექტული კიბო, დისპლაზიური პოლიპები, ადენოკარცინომა, სიმსივნის მაინფილტრირებელი ლიმფოციტები, Tumor Buds, ჰეტეროგენულობა, ეპითელურ-მეზენქიმური ტრანსფორმაცია, ბიომარკერები, პროგნოზი, იმუნოსკორი;

კოლორექტური კიბო (კოლორექტული კარცინომა) წარმოადგენს მსოფლიოს მასშტაბით ჯანმრთელობის მნიშვნელოვან გამოწვევას, ყოველწლიურად დიაგნოსტირდება დაახლოებით 1,9 მილიონი ახალი შემთხვევა, რომელთაგანაც 935,000 შემთხვევას ლეტალური გამოსავალი მოსდევს[1]. სწორედ ამგვარი სტატისტიკური მონაცემები კოლორექტულ კიბოს მთელი მსოფლიოს მასშტაბით სიხშირით მესამე დიაგნოსტირებულ კიბოდ, ხოლო კიბოს სიკვდილიანობის მეორე მიზეზად აქცევს. კოლორექტული კიბოთი გამოწვეული სამედიცინო ტვირთი ჯანდაცვის სისტემაზე განსაკუთრებით მაღალია განვითარებულ ქვეყნებში, მაგრამ სიხშირის საგანგაშო ზრდა ასევე შეინიშნება განვითარებად რეგიონებშიც. ეს ტენდენცია განპირობებულია კვების, ფიზიკური აქტივობისა და ცხოვრების სტილის სხვა ფაქტორების ცვლილებებთან, რომლებიც ხელს უწყობენ ზოგადად კოლორექტური ნეოპლაზიების განვითარებას. [2] კოლორექტური კარცინომის პათოგენეზი, როგორც წესი, მიჰყვება კარგად შესწავლილ ადენომა-კარცინომის თანმიმდევრობას, სადაც კეთილთვისებიანი ადენომატოზური პოლიპები განიცდიან გენეტიკური და ეპიგენეტიკური ცვლილებების სერიას, რაც საბოლოოდ იწვევს ავთვისებიან ტრანსფორმაციას. ამ პროგრესირებაზე, პოლიპიდან ინვაზიურ კიბომდე, გავლენას ახდენს მრავალი ფაქტორი, მათ შორის გენეტიკური მიდრეკილება (როგორიცაა APC, KRAS და TP53 მუტაციები), გარემო ზემოქმედება და სიმსივნესა და მის მიმდებარე მიკროგარემოს კომპლექსური ურთიერთქმედება. [3], [4] კოლორექტული პოლიპები, განსაკუთრებით მაღალი ხარისხის დისპლაზიის მქონე პოლიპები, განიხილება ადენოკარცინომის წინამორბედ მდგომარეობად. ამ პოლიპების იდენტიფიკაცია და მოცილება სკრინინგული კოლონოსკოპიის დროს არის ძირითადი სტრატეგია კოლორექტული კარცინომების განვითარების პრევენციაში. თუმცა, ყველა პოლიპს არ გააჩნია კიბოს პროგრესირების თანაბარი რისკი. ამ პოლიპებში ჰეტეროგენულობა, როგორც ჰისტოლოგიური მახასიათებლების, ასევე მოლეკულური

პროფილების თვალსაზრისით, გადამწყვეტ როლს თამაშობს მათი ავთვისებიანი პოტენციალის განსაზღვრაში. უფრო მეტიც, კავშირი სიმსივნის მიკროგარემოს იმუნურ ლანდშაფტს შორის, რომელსაც ახასიათებს სიმსივნური ინფილტრატი ლიმფოციტებით და სიმსივნის მიკროკლასტერებით, სულ უფრო მეტად აღიარებულია, როგორც სიმსივნის პროგრესირებასა და პაციენტის პროგნოზზე მოქმედ კრიტიკულ ფაქტორად, რადგან ამ იმუნურ კომპონენტებს შეუძლიათ განაპირობონ სიმსივნის ქცევის შეცვლა და ასევე თერაპიაზე განსხვავებული რეაგირება.[2]

კოლორექტური კარცინომის ერთ-ერთი ყველაზე რთული ასპექტია მისი ჰეტეროგენულობა, რომელიც ვლინდება მრავალ დონეზე - ჰისტოლოგიურ, მოლეკულურ და კლინიკურ დონეზე. ჰისტოლოგიური ჰეტეროგენულობა ეხება ქსოვილის არქიტექტურისა და უჯრედული მორფოლოგიის მრავალფეროვნებას. მოლეკულური ჰეტეროგენულობა მოიცავს გენეტიკურ და ეპიგენეტიკურ ვარიაციებს, რომლებიც განაპირობებს სიმსივნის ქცევას, მათ შორის განსხვავებებს გენის ექსპრესიაში, მუტაციებსა და სასიგნალო გზებში. კლინიკურად, ეს ჰეტეროგენულობა ვლინდება დაავადების გამოვლენისას, მკურნალობაზე პასუხის და საერთო პროგნოზის ცვალებადობით.

კოლორექტული კარცინომის ჰეტეროგენულობის გაგება აუცილებელია რამდენიმე მიზეზის გამო. პირველ რიგში, მას აქვს მნიშვნელოვანი გავლენა დაავადების პროგრესირებაზე. მკვეთრად გამოხატული ჰეტეროგენულობის მქონე სიმსივნეები უფრო აგრესიულია, მეტასტაზებისა და თერაპიისადმი წინააღმდეგობის მაღალი ალბათობით. მეორეც, ჰეტეროგენულობა ართულებს ეფექტური მკურნალობის სტრატეგიების შემუშავებას, რადგან თერაპია, რომელიც მიზნად ისახავს სპეციფიკურ მოლეკულურ გზებს, შეიძლება ნაკლებად ეფექტური იყოს სხვადასხვა გენეტიკური დატვირთვის მქონე სიმსივნეებში და ბოლოს, ამ ჰეტეროგენულობის გამოვლენა და დახასიათება გადამწყვეტია პერსონალიზებული მედიცინის წინსვლისთვის, სადაც მკურნალობა მორგებულია თითოეული პაციენტის სიმსივნის სპეციფიკურ მახასიათებლებზე.[5]

ბოლო წლებში გაიზარდა ინტერესი სიმსივნის მიკროგარემოს როლის შესახებ კიბოს პროგრესირებაში. სიმსივნის მიკროგარემო შედგება სხვადასხვა არასიმსივნური უჯრედებისგან, მათ შორის იმუნური უჯრედებისგან, ფიბრობლასტებისა და ენდოთელური უჯრედებისგან, რომლებიც ურთიერთქმედებენ კიბოს უჯრედებთან და გავლენას ახდენენ მათ ქცევაზე. სიმსივნის მიკროგარემოს კომპონენტებს შორის სიმსივნის მაინფილტრირებელი ლიმფოციტები (TIL) და სიმსივნის მიკროკლასტერები, ცნობილია როგორც სიმსივნური „ზადები“, იბყრობს განსაკუთრებულ ყურადღებას კოლორექტული კარცინომის პროგრესირებაში.[6], [7]

სიმსივნის მაინფილტრირებელი ლიმფოციტები (TIL) არის იმუნური უჯრედების პოპულაცია, რომლებიც ვრცელდებიან სიმსივნეში და ითვლება, რომ ასახავს მასპინძლის იმუნურ პასუხს კიბოს მიმართ. TIL-ის მაღალი დონე ზოგადად ასოცირდება უკეთეს პროგნოზთან, რადგან ისინი მიუთითებენ ძლიერ იმუნურ რეაქციაზე სიმსივნის წინააღმდეგ. თუმცა, ურთიერთობა TIL-სა და კოლორექტულ კარცინომას შორის

კომპლექსურია, რადგან ზოგიერთმა სიმსივნემ შესაძლოა თავი აარიდოს იმუნურ ზედამხედველობას TIL-ის არსებობის მიუხედავად. იმ ფაქტორების გაგება, რომლებიც გავლენას ახდენენ TIL-ის აქტივობასა და ეფექტურობაზე კოლორექტულ კარცინომაში გადამწყვეტია იმუნოთერაპიული მიდგომების შემუშავებისთვის. [7], [8]

სიმსივნის „ბადები“ (Tumor Buds/TB), თავის მხრივ, არის დედიფერენცირებული კიბოს უჯრედების მცირე კლასტერი, რომელიც მდებარეობს სიმსივნის ინვაზიურ ფრონტზე. ითვლება, რომ ეს უჯრედები მონაწილეობენ ეპითელურ-მეზენქიმური ტრანსფორმაციის პროცესში (EMT), რომელიც არის კრიტიკულად მნიშვნელოვანი საფეხური კიბოს ინვაზირებასა და მეტასტაზების დროს. სიმსივნის „ბადების“ მაღალი მაჩვენებელი ასოცირდება მეტასტაზების უფრო მაღალ რისკთან და ზოგადად ცუდ პროგნოზთან, რაც მას ღირებულ პროგნოზულ მარკერად აქცევს კოლორექტულ კარცინომაში. TIL-სა და სიმსივნურ „ბადებს“ შორის ურთიერთქმედება განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს, რადგან მას შეუძლია წარმოაჩინოს იმუნური სისტემის მექანიზმები და სიმსივნის პროგრესირება. [9]

ურთიერთობა TIL-სა და სიმსივნის „ბადებს“ შორის წარმოადგენს კოლორექტული კარცინომების ჰეტეროგენურობის გადამწყვეტ ასპექტს, რომელსაც აქვს მნიშვნელოვანი გავლენა პაციენტის შედეგებზე. ამ ურთიერთქმედების შესწავლით, მკვლევარები იმედოვნებენ, რომ გამოავლენენ ახალ ბიომარკერებს პროგნოზისთვის და პოტენციური თერაპიული მიზნებისთვის, რომლებსაც შეუძლიათ გააუმჯობესონ კოლორექტული კარცინომის კლინიკური მენეჯმენტი.

კოლორექტური პოლიპები არის პათოლოგიური წარმონაქმნები, რომლებიც წარმოიქმნება მსხვილი ნაწლავისა და სწორი ნაწლავის ლორწოვანი გარსიდან. ისინი ჩვეულებრივ გამოვლენდება რუტინული კოლონოსკოპიის დროს და განსხვავდება მათი პოტენციალის მიხედვით, პროგრესირდეს კოლორექტური კიბოში (კოლორექტულ კარცინომა). პოლიპები კლასიფიცირდება მათი ჰისტოლოგიური მახასიათებლების მიხედვით, ძირითადი ტიპებია ჰიპერპლასტიური პოლიპები, ადენომატოზური პოლიპები და დაკბილული პოლიპები. მათ შორის განსაკუთრებით საინტერესოა ადენომატოზური და დაკბილული პოლიპები ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პოტენციალის გამო.[10]

კოლორექტური პოლიპების კლასიფიკაცია:

კოლორექტური პოლიპები, როგორც წესი, იყოფა სამ ძირითად ტიპად მათი ჰისტოლოგიის მიხედვით:

1. ჰიპერპლასტიკური პოლიპები: ეს არის, როგორც წესი, პატარა, კეთილთვისებიანი პოლიპები, რომლებიც ზოგადად კიბოს პროგრესირების დაბალი რისკის მქონე ნეოპლაზიად მიიჩნევა. ის ყველაზე ხშირად გვხვდება დისტალურ მსხვილ ნაწლავში და სწორ ნაწლავში.

2. ადენომატოზური პოლიპები (ადენომა): ეს პოლიპები განიხილება კიბოსწინარე და კლასიფიცირდება სამ ქვეტიპად: ტუბულოზური/მილაკოვანი, ვილოზური/ხაოიანი და ტუბულო-ვილოზური ადენომა. ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის რისკი იზრდება

პოლიპის ზომით, ვილოზური ნიშნების არსებობით და დისპლაზიის ხარისხის შესაბამისად.

3. დაკბილული პოლიპები: ამ კატეგორიაში შედის ჰიპერპლასტიკური პოლიპები, მჯდომარე დაკბილული ადენომა/პოლიპები (SSA/Ps) და ტრადიციული დაკბილული ადენომა (TSAs). დაკბილულმა პოლიპებმა ყურადღება მიიპყრეს კოლორექტური კარცინოგენეზის სპეციფიკურ გზასთან ასოცირების გამო, რომელიც ცნობილია როგორც დაკბილული გზა, რომელიც ხასიათდება მკაფიო მოლეკულური ცვლილებებით, მათ შორის BRAF მუტაციებით და CpG კუნძულის მეთილატორის ფენოტიპით (CIMP).

კოლორექტური პოლიპების გავრცელება იზრდება ასაკის მატებასთან ერთად, 50 წელზე უფროსი ასაკის პირთა დაახლოებით 30%-50%-ს აქვს მინიმუმ ერთი პოლიპი. პოლიპების განვითარების რისკის ფაქტორები მოიცავს კოლორექტური კიბოს ოჯახურ ანამნეზს, ზოგიერთ მემკვიდრეობით სინდრომს (როგორიცაა ოჯახური ადენომატოზური პოლიპოზი და ლინჩის სინდრომი), წითელი ხორცის აქტიური მოხმარება და ხელოვნურად პროცესირებული საკვებით მდიდარი დიეტა, სიმსუქნე, თამბაქოს მოწევა და ალკოჰოლის მოხმარება.

დაბალი ხარისხის დისპლასტიკური პოლიპები (Low Dysplastic Polyps) ხასიათდება ზომიერად გამოხატული უჯრედული და არქიტექტურული ატიპიით. მიუხედავად იმისა, რომ ისინი ზოგადად განიხილება, როგორც კოლორექტული კიბოს პროგრესირების დაბალი რისკი, ისინი შეიძლება იყოს ადრეული ინდიკატორი პაციენტის მიდრეკილების შესახებ უფრო აგრესიული დაზიანებების განვითარებისადმი.

ჰისტოლოგიური მახასიათებლები: დაბალი დისპლასტიკური პოლიპები, როგორც წესი, ავლენენ ზომიერ დისპლაზიას, უმნიშვნელო ბირთვული პოლიმორფიზმით, ჰიპერქრომაზიით და უპირატესად ჯირკვლის არქიტექტურის შენარჩუნებით. ეს პოლიპები ყველაზე ხშირად მილაკოვანი ადენომაა, რომელსაც ახასიათებს მილაკოვანი ჯირკვლის სტრუქტურა. მიუხედავად მათი დაბალი ავთვისებიანი პოტენციალისა, დაბალი დისპლასტიკური პოლიპების არსებობა საჭიროებს განსაკუთრებულ მონიტორინგს დამატებითი, პოტენციურად უფრო მეტად დისპლასტიკური პოლიპების განვითარების რისკის გამო.

დაბალი ხარისხის დისპლასტიკური პოლიპების მოლეკულური ანალიზი ხშირად ავლენს ადრეულ გენეტიკურ ცვლილებებს, რამაც შეიძლება ხელი შეუწყოს კოლორექტალურ კარცინოგენეზს. გავრცელებული მუტაციები მოიცავს APC გენში არსებულ მუტაციებს, რომლებიც გადამწყვეტ როლს თამაშობს უჯრედების ზრდისა და ადჰეზიის რეგულირებაში. ეს ადრეული მუტაციები ქმნის დამატებით გენეტიკური და ეპიგენეტიკური ცვლილებების საფუძველს, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს პროგრესირება კეთილთვისებიანი პოლიპიდან ავთვისებიან სიმსივნემდე.

დაბალი დისპლასტიკური პოლიპების გამოვლენა მნიშვნელოვანია კოლორექტური კიბოს სკრინინგისა და პროფილაქტიკისთვის. ამ პოლიპების მქონე პაციენტებს ჩვეულებრივ ურჩევენ გაიარონ რეგულარული ზედამხედველობის კოლონოსკოპია

ახალი პოლიპების გამოსავლენად ან არსებული პოლიპების დისპლაზიის უფრო მაღალ ხარისხებამდე პროგრესირების მონიტორინგისთვის.

მაღალი ხარისხის დისპლასტიკური პოლიპები ხასიათდება უფრო გამოხატული უჯრედული ატიპიით და არქიტექტურული დამახინჯებით, რაც მიუთითებს კოლორექტური კიბოს პროგრესირების მაღალ რისკზე. ეს პოლიპები ხშირად განიხილება ადენომა-კარცინომის თანმიმდევრობის მოწინავე სტადიებად.[11], [12]

მაღალი დისპლასტიკური პოლიპები (**High Dysplastic Polyps**) ავლენენ გამოხატულ ბირთვულ ატიპიას, მათ შორის გაზრდილი ბირთვ-ციტოპლაზმური თანაფარდობა, გამოკვეთილი ბირთვული პოლარობის დაკარგვა. ამ პოლიპების არქიტექტურული თავისებურებები შეიძლება მოიცავდეს ჯირკვლების სიუხვეს, კრიბრიფორმულ შენების უბნებს და ინტრალუმინალური ნეკროზის არსებობას. მაღალი ხარისხის დისპლაზია ხშირად შეიმჩნევა უფრო დიდ ადენომებში, განსაკუთრებით მათში, რომლებსაც აქვთ ვილოზური ნიშნები.

მაღალი დისპლასტიკური პოლიპები გამოირჩევა გენეტიკური მუტაციებისა და ეპიგენეტიკური ცვლილებების უფრო მაღალი სიხშირით, ვიდრე მათი დაბალი დისპლასტიკური ვარიანტები. ძირითადი მუტაციები ხშირად მოიცავს KRAS და TP53 გენებს, რომლებიც დაკავშირებულია უჯრედების გაზრდილ პროლიფერაციასთან და აპოპტოზისადმი რეზისტენტობასთან. გარდა ამისა, ამ პოლიპებმა შეიძლება აჩვენონ ცვლილებები Wnt სასიგნალო გზის მახასიათებლებში, რაც გადამწყვეტია უჯრედული ჰომეოსტაზის შესანარჩუნებლად და უჯრედული პროცესების შემდგომი გადაწყვეტილების კონტროლისთვის.

კლინიკური გამოვლინება მაღალი დისპლასტიკური პოლიპების არსებობა კოლორექტური კიბოს განვითარების გაზრდილი რისკის მაჩვენებელია. როგორც ასეთი, ამ პოლიპების მქონე პაციენტებს ესაჭიროებათ უფრო აქტიური მეთვალყურეობა და ზოგიერთ შემთხვევაში, ქირურგიული ჩარევა. მაღალი დისპლასტიკური პოლიპების მართვა ხშირად მოიცავს პოლიპექტომიას, რასაც მოჰყვება აქტიური კლინიკური დაკვირვება სრული მოცილების უზრუნველსაყოფად და რეციდივის მონიტორინგის მიზნით.

პროგრესირება დაბალიდან მაღალი ხარისხის დისპლაზიამდე: წარმოადგენს კრიტიკულ საფეხურს ადენომა-კარცინომის თანმიმდევრობაში. იმ ფაქტორების გაგება, რომლებიც ამ პროგრესირებას განაპირობებს, აუცილებელია კოლორექტური კიბოს განვითარების პრევენციის სტრატეგიების შემუშავებისთვის.

დაბალი ხარისხის დისპლაზიიდან მაღალზე გადასვლა აღინიშნება გენეტიკური მუტაციებისა და ეპიგენეტიკური ცვლილებების დაგროვებით, რაც არღვევს ნორმალურ უჯრედულ პროცესებს. ამ პროგრესირებაში ჩართული ძირითადი გზები მოიცავს Wnt სასიგნალო გზას, MAPK/ERK გზას და TP53 სიმსივნის სუპრესორული გზას. დისპლაზიის მატებასთან ერთად, ხდება გენომური არასტაბილურობის შესაბამისი ზრდა, რაც იწვევს დამატებითი მუტაციების მიღებას, რომლებიც განაპირობებენ სიმსივნის წარმოქმნას. [13], [14]

ქრონიკული ანთება ჩართულია, როგორც ძირითადი ფაქტორი კოლორექტური პოლიპების პროგრესირებაში. ქრონიკული ანთების დროს წარმოქმნილმა ანთებითმა ციტოკინებმა და რეაქტიულმა ჟანგბადის თავისუფალმა რადიკალებმა შეიძლება გამოიწვიოს დნმ-ის დაზიანება და ხელი შეუწყოს ონკოგენური მუტაციების შეძენას. ანთების როლი განსაკუთრებით აქტუალურია ნაწლავის ანთებითი დაავადების (IBD) მქონე პაციენტებში, რომლებსაც აქვთ დისპლაზიური პოლიპებისა და კოლორექტური კიბოს განვითარების გაზრდილი რისკი.

დაკბილული პოლიპები და დაკბილული გზა: დაკბილული პოლიპები წარმოადგენს კოლორექტური პოლიპების ცალკეულ კატეგორიას, რომლებიც მიჰყვებიან კოლორექტური კარცინოგენეზის ალტერნატიულ გზას, რომელიც ცნობილია როგორც დაკბილული გზა (Serrated Pathway). ამ გზას ახასიათებს უნიკალური მოლეკულური ცვლილებები, მათ შორის BRAF გენის მუტაციები და ფართოდ გავრცელებული დნმ-ის მეთილაცია (CIMP). [15]

ჰისტოლოგიური ჰეტეროგენულობა კოლორექტალურ პოლიპებში ასახავს უჯრედული და არქიტექტურული მახასიათებლების მრავალფეროვნებას, რომლებიც შეინიშნება სხვადასხვა ტიპის პოლიპებში. ეს ჰეტეროგენულობა არა მხოლოდ პოლიპის ბიოლოგიის დამახასიათებელი ნიშანია, არამედ მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს კლინიკურ მენეჯმენტზე.

კოლორექტურ პოლიპებს შეუძლიათ აჩვენონ არქიტექტურული ნიმუშების ფართო სპექტრი, მარტივი ტუბულარული სტრუქტურებიდან დაწყებული რთული ვილოზური წარმონაქმნებით დამთავრებული. არქიტექტურული სირთულე ხშირად დაკავშირებულია დისპლაზიის ხარისხთან, უფრო კომპლექსური შენების ნიმუშები ასოცირდება უფრო მაღალ ავთვისებიან პოტენციალთან. ამ არქიტექტურული ვარიაციების გაგება გადამწყვეტია ზუსტი ჰისტოლოგიური დიაგნოზისა და რისკის შეფასებისთვის.

პოლიპების უჯრედული შემადგენლობა მათი ჰისტოლოგიური ჰეტეროგენურობის კიდევ ერთი ასპექტია. პოლიპები შეიძლება შეიცავდეს ეპითელიური უჯრედების, ფიალისებური უჯრედებისა და ენდოკრინული უჯრედების ნაზავს, მათი ფარდობითი პროპორციების ცვალებადობით. გარდა ამისა, ეპითელიური უჯრედებისა და მიმდებარე სტრომული კომპონენტების, მათ შორის ფიბრობლასტების, იმუნური უჯრედებისა და უჯრედგარე მატრიქსის შორის ურთიერთქმედება გადამწყვეტ როლს თამაშობს პოლიპების ზრდასა და პროგრესირებაში.

კოლორექტური პოლიპების მოლეკულური ჰეტეროგენულობა აისახება მრავალფეროვან გენეტიკურ და ეპიგენეტიკურ ცვლილებებში, რომლებიც განაპირობებს მათ განვითარებას და პროგრესირებას. ამ მოლეკულური მრავალფეროვნების გააზრება აუცილებელია ადრეული გამოვლენისა და დამიჯნებითი თერაპიის პოტენციური ბიომარკერების იდენტიფიცირებისთვის.

კოლორექტური პოლიპები ავლენენ გენეტიკური მუტაციების სპექტრს, რაც ხელს უწყობს მათ განვითარებას. APC გენი ხშირად მუტაციას განიცდის ადენომატოზურ

პოლიპებში, რაც იწვევს Wnt სასიგნალო გზის დისრეგულაციას. დაკბილულ პოლიპებში BRAF მუტაციები სიმსივნური გენების საერთო მამოძრავებელია. მრავალჯერადი მუტაციების არსებობა ერთ პოლიპში შეიძლება ხელი შეუწყოს მის ჰეტეროგენულობას და გავლენა მოახდინოს მის ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პოტენციალზე.[16], [17]

ეპიგენეტიკური ცვლილებები, როგორიცაა დნმ-ის მეთილაცია და ჰისტონის მოდიფიკაციები, ასევე მნიშვნელოვან როლს თამაშობს კოლორექტური პოლიპების განვითარებაში. CpG კუნძულის მეთილაციის ფენოტიპი (CIMP) განსაკუთრებით აქტუალურია დაკბილულ პოლიპებში, სადაც ის იწვევს სიმსივნის სუპრესორული გენების დათრგუნვას. ეს ეპიგენეტიკური ცვლილებები კიდევ ერთ სირთულის ფენასმატებს კოლორექტური პოლიპების მოლეკულურ ლანდშაფტს.

კოლორექტური პოლიპების თანამედროვე მკურნალობა ფოკუსირებულია ქიმიოპრევენციული აგენტების გამოყენებაზე, როგორიცაა არასტეროიდული ანთების საწინააღმდეგო პრეპარატები (არასტეროიდული ანთების საწინააღმდეგო საშუალებები) და შერჩევითი COX-2 ინჰიბიტორები, რათა შემცირდეს პოლიპების წარმოქმნისა და პროგრესირების რისკი. გარდა ამისა, პოლიპების განვითარებაში ჩართული მოლეკულური გზების კვლევამ შეიძლება გამოიწვიოს ახალი თერაპიული მიზნების იდენტიფიცირება კოლორექტური კიბოს პროფილაქტიკისთვის.

კოლორექტური ადენოკარცინომა არის კოლორექტური კიბოს ყველაზე გავრცელებული ტიპი, რომელიც შეადგენს ყველა შემთხვევის დაახლოებით 90-95%-ს. ის წარმოიქმნება მსხვილი ნაწლავისა და სწორი ნაწლავის ეპითელური უჯრედებიდან, როგორც წესი, მიჰყვება ადენომა-კარცინომას თანმიმდევრობას, თუმცა ჩართულია სხვა გზები, როგორიცაა დაკბილული გზა. ადენოკარცინომის განვითარება არის მრავალსაფეხურიანი პროცესი, რომელიც მოიცავს გენეტიკური და ეპიგენეტიკური ცვლილებების დაგროვებას, რაც იწვევს ნორმალური ეპითელური უჯრედების ავთვისებიანად გარდაქმნას. [18]

კოლორექტური ადენოკარცინომა ავლენს მნიშვნელოვან ჰისტოლოგიურ ჰეტეროგენულობას, რომელიც შეიძლება ფართოდ დაიყოს სხვადასხვა ქვეტიპებად მორფოლოგიური მახასიათებლების მიხედვით. ამ ქვეტიპებს აქვთ განსხვავებული კლინიკური ქცევა და პროგნოზული შედეგები.

ჩვეულებრივი ადენოკარცინომა (Conventional Adenocarcinoma) არის ყველაზე გავრცელებული ჰისტოლოგიური ქვეტიპი და ხასიათდება ჯირკვლოვანი სტრუქტურებით, რომლებიც წააგავს მსხვილი ნაწლავის ნორმალურ ეპითელიუმს, მაგრამ დიფერენციაციის სხვადასხვა ხარისხით. დიფერენცირების ხარისხი (კარგად, ზომიერად ან ცუდად დიფერენცირებული) არის ძირითადი პროგნოზული ფაქტორი, ცუდად დიფერენცირებული სიმსივნეები, დაკავშირებულია ცუდ პროგნოზთან.

მუცინური ადენოკარცინომა შეადგენს კოლორექტური ადენოკარცინომების 10-15%-ს და განისაზღვრება უჯრედგარე მუცინის არსებობით, რომელიც შეადგენს სიმსივნის მოცულობის 50%-ზე მეტს. ეს სიმსივნეები უფრო აგრესიულია და დაკავშირებულია ლიმფური კვანძების მეტასტაზების უფრო მაღალი სიხშირით და ზოგადად სიმსივნის

უფრო ცუდი პროგნოზით, ჩვეულებრივ ადენოკარცინომასთან შედარებით. მუცინური ადენოკარცინომა ხშირად ავლენს მუტაციებს KRAS გენში და უფრო ხშირად ასოცირდება მიკროსატელიტურ არასტაბილურობასთან (MSI).

ბეჭდისებურ-უჯრედოვან კარცინომა არის კოლორექტური ადენოკარცინომის იშვიათი და უაღრესად აგრესიული ქვეტიპი, რომელიც ხასიათდება ბეჭდისებური უჯრედების არსებობით, რომლებიც შეიცავს ინტრაციტოპლაზმურ მუცინს, რომელიც ანაცვლებს ბირთვს პერიფერიაზე. ეს ქვეტიპი ხშირად დიაგნოზირებულია შორს წასულ სტადიაზე (pT3-pT4) და ასოცირდება ცუდ პროგნოზთან ადრეული გავრცელებისადმი მიდრეკილების და ჩვეულებრივი თერაპიისადმი რეზისტენტობის გამო.

მედულური კარცინომა არის კიდევ ერთი იშვიათი ქვეტიპი, რომელიც ხშირად ასოცირდება მიკროსატელიტურ არასტაბილურობასთან (MSI). მას ახასიათებს ცუდად დიფერენცირებული უჯრედები მინიმალური ჯირკვლის ფორმირებით და გამოკვეთილი ლიმფოციტური ინფილტრატით. მიუხედავად მისი ცუდი დიფერენციაციისა, მედულური კარცინომა ასოცირდება შედარებით ხელსაყრელ პროგნოზთან, შესაძლოა სიმსივნის მიერ გამოწვეული ძლიერი იმუნური პასუხის გამო. კოლორექტური ადენოკარცინომის მოლეკულური ლანდშაფტი ძალზე ჰეტეროგენულია, მრავალრიცხოვანი გენეტიკური და ეპიგენეტიკური ცვლილებებით, რომლებიც ხელს უწყობენ მის პათოგენეზს. ეს მოლეკულური მრავალფეროვნება მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს კოლორექტულ კარცინომ-ის დიაგნოზზე, მკურნალობასა და პროგნოზზე.

TNM სტადიის სისტემა არის ყველაზე ფართოდ გამოყენებული მეთოდი კიბოს გავრცელების მასშტაბის კლასიფიკაციისთვის. თუმცა, მოლეკულური მარკერების ინტეგრაცია TNM სტადიასთან შეიძლება უზრუნველყოს სიმსივნის ქცევისა და პაციენტის პროგნოზის უფრო ყოვლისმომცველი შეფასება.

TNM სისტემა კიბოს კლასიფიცირებს სამი პარამეტრის მიხედვით: T (სიმსივნე): პირველადი სიმსივნის ზომა; N (კვანძები): რეგიონალური ლიმფური კვანძების ჩართულობის არსებობა და ხარისხი; M (მეტასტაზები): შორეული მეტასტაზების არსებობა.

TNM სტადიის შერწყმა მოლეკულურ მარკერებთან, როგორიცაა MSI, KRAS/BRAF მუტაციები და CD163 ექსპრესია, შეუძლია გააუმჯობესოს პროგნოზის სიზუსტე და მიმართოს მკურნალობის ახალ გადაწყვეტილებებს. მაგალითად, II სტადიის კოლორექტული კარცინომის მქონე პაციენტებს, რომლებსაც აქვთ მაღალი რისკის მოლეკულური მახასიათებლები, როგორიცაა BRAF მუტაციები ან დაბალი MSI, შეიძლება ისარგებლონ დამხმარე ქიმიოთერაპიით, მიუხედავად იმისა, რომ მხოლოდ TNM სტადია შეიძლება სხვაგვარად მიუთითებდეს.[19]

სიმსივნური „ბადები“ (Tumor Buds) არის დედიფერენცირებული კიბოს უჯრედების მცირე კლასტერი, რომელიც განლაგებულია სიმსივნის ინვაზიურ ფრონტზე. ითვლება, რომ ეს უჯრედები მონაწილეობენ ეპითელურ-მეზენქიმული გადასვლის პროცესში (EMT), რაც ხელს უწყობს სიმსივნის შეჭრას და მეტასტაზებს.

მორფოლოგია: სიმსივნური „ბადები“, როგორც წესი, მცირეა, შედგება ხუთზე ნაკლები უჯრედისაგან და ხასიათდება ეპითელური მარკერების დაკარგვით, როგორიცაა E-კადჰერინი და მეზენქიმული ნიშნების შეძენით, როგორიცაა ვიმენტინის ექსპრესია.[20] პროგნოზული ღირებულება: სიმსივნის მაღალი „ბადებ“ არის აგრესიული სიმსივნური ქცევის მარკერი და ასოცირდება უფრო ცუდ შედეგებთან, მათ შორის მეტასტაზების უფრო მაღალ მაჩვენებლებთან და გადარჩენის შემცირებასთან. სიმსივნის „ბადები“ სულ უფრო და უფრო აღიარებულია, როგორც ძირითადი პროგნოზული ფაქტორი კოლორექტულ კარცინომაში.

სიმსივნური „ბადები“ ხშირად განლაგებულია იმუნური უჯრედების დაბალი ინფილტრაციის მქონე ადგილებში, რაც იმაზე მეტყველებს, რომ ამ უჯრედებს შეიძლება ჰქონდეთ შემუშავებული მექანიზმები იმუნური მეთვალყურეობის თავიდან ასაცილებლად. შესაძლო მექანიზმები მოიცავს:

MHC I კლასის დაქვეითება: სიმსივნურმა „ბადებმა“ შეიძლება შეამცირონ MHC I კლასის მოლეკულები, რაც მათ ნაკლებად ხილულს გახდის CD8+ T უჯრედებისთვის.

იმუნური გამშვები პუნქტების ექსპრესია: სიმსივნის „ბადებმა“ შეიძლება დააექსპრესირონ იმუნური გამშვები პუნქტის მოლეკულები, როგორიცაა PD-L1, რომელსაც შეუძლია დათრგუნოს T უჯრედების აქტივობა და ხელი შეუწყოს იმუნურ გაქცევას.

TIL-სა და სიმსივნურ „ბადებ“ შორის ურთიერთქმედება კვლევის კრიტიკული სფეროა, რადგან მას შეუძლია წარმოაჩინოს სიმსივნის პროგრესირების მექანიზმები და იმუნური აცილება.

იმუნური გამორიცხვის ფენოტიპი (**Immune-Exclusion Phenotype**): სიმსივნეები მაღალი სიმსივნის „ბადებ“ით ხშირად ავლენენ იმუნური გამორიცხვის ფენოტიპს, სადაც იმუნური უჯრედები გამორიცხულია სიმსივნის ინვაზიური ფრონტიდან. ითვლება, რომ ეს გამორიცხვა ხელს უწყობს ამ სიმსივნეების აგრესიულობას.

თერაპიული მიზნობრივი პოტენციალი: იმ მექანიზმების გაგებამ, რომლითაც სიმსივნის „ბადები“ თავს არიდებენ იმუნურ მეთვალყურეობას, შეიძლება გამოიწვიოს თერაპიის განვითარება, რომელიც აძლიერებს იმუნურ პასუხს ამ უჯრედების მიმართ. მაგალითად, სტრატეგიებმა, რომლებიც ბლოკავს იმუნურ საკონტროლო პუნქტებს ან აპროგრამებს Tregs-ს, შეიძლება პოტენციურად გააუმჯობესოს იმუნოთერაპიის ეფექტურობა პაციენტებში, რომლებსაც აქვთ სიმსივნის მაღალი „ბადები“.

EMT ხასიათდება ეპითელური მარკერების დაკარგვით, როგორიცაა E-კადჰერინი, და მეზენქიმული მარკერების მომატებით, როგორიც არის ვიმენტინი, N-კადჰერინი და ფიბრონექტინი. ეს ცვლილებები რეგულირდება ტრანსკრიფციის ფაქტორებით, როგორიცაა Snail, Slug და Twist.[21], [22]

E-cadherin: E-cadherin-ის დაკარგვა EMT-ის დამახასიათებელი ნიშანია და ხშირად აღინიშნება სიმსივნის „ბადებში“. შემცირებული E-კადჰერინის ექსპრესია ასოცირდება გაზრდილ ინვაზიურობასთან და მეტასტაზურ პოტენციალთან.

ვიმენტინი: ვიმენტინი არის მეზენქიმური მარკერი, რომელიც ხშირად რეგულირდება სიმსივნის „ბადებში“. ვიმენტინის მაღალი ექსპრესია დაკავშირებულია ცუდ პროგნოზთან და მეტასტაზების გაზრდილ რისკთან.

ორივე EMT და სიმსივნის „ბადები“ დამოუკიდებლად ასოცირდება ცუდ პროგნოზთან კოლორექტულ კარცინომაში. ერთად ყოფნისას ისინი მიუთითებენ უაღრესად აგრესიულ სიმსივნის ფენოტიპზე მეტასტაზების მაღალი ალბათობით. EMT მარკერების და სიმსივნური „ბადებ“ის შეფასებამ შეიძლება მოგვაწოდოს ღირებული პროგნოზული ინფორმაცია და დაეხმაროს მკურნალობის გადაწყვეტილების მიღებას.[65], [66]

TIL-ების როლი იმუნოთერაპიაზე პასუხის პროგნოზირებაში არის კვლევის სწრაფად განვითარებადი სფერო. იმუნოთერაპია, განსაკუთრებით იმუნური გამშვები პუნქტის ინჰიბიტორები, პერსპექტიულია კოლორექტულ კარცინომის მკურნალობაში, განსაკუთრებით პაციენტებში რომელთაც აქვთ მაღალი მიკროსატელიტური არასტაბილურობა (MSI-H).

MSI-H სიმსივნეები და TIL-ები: MSI-H სიმსივნეებს, როგორც წესი, აქვთ მაღალი მუტაციური დატვირთვა, რაც იწვევს ნეოანტიგენების წარმოქმნას, რომელთა ამოცნობა შესაძლებელია TIL-ებით. ამიტომაც MSI-H სიმსივნეები უფრო მეტად რეაგირებს იმუნური გამშვები პუნქტის ინჰიბიტორებზე, როგორიცაა პემბროლიზუმაბი და ნივოლუმაბი.

PD-L1 ექსპრესია და TIL-ები: PD-L1 ექსპრესიას სიმსივნეებში შეუძლია დათრგუნოს TIL აქტივობა T უჯრედებზე PD-1 რეცეპტორის ჩართვით. იმუნური გამშვები პუნქტის ინჰიბიტორებთან ამ ურთიერთქმედების ბლოკირებამ შეიძლება აღადგინოს TIL ფუნქცია და გააძლიეროს სიმსივნის საწინააღმდეგო იმუნური პასუხი.

შესწავლილია რამდენიმე სტრატეგია TIL-ების აქტივობის გასაძლიერებლად კოლორექტულ კარცინომაში:

ადაპტური უჯრედების ტრანსფერი (ACT): ეს მიდგომა გულისხმობს TIL-ების გამოყოფას სიმსივნეიდან, ექსკლუზიურად გაფართოებას და შემდეგ პაციენტში ხელახლა შეყვანას. ACT-მა აჩვენა პოტენციური სიმსივნის საწინააღმდეგო იმუნური პასუხის გაძლიერებაში ზოგიერთ კიბოს, მათ შორის კოლორექტულ კარცინომაში.[23], [24]

კომბინირებული თერაპია: იმუნური გამშვები პუნქტის ინჰიბიტორების კომბინირება სხვა თერაპიებთან, როგორიცაა რადიაციული ან მიზანმიმართული თერაპია, შეუძლია პოტენციურად გააძლიეროს TIL ინფილტრაცია და აქტივობა, რაც გამოიწვევს მკურნალობის გაუმჯობესებულ შედეგებს.

სიმსივნური „ბადების“ მაღალი ზრდა არის აგრესიული სიმსივნის ქცევის ძლიერი მაჩვენებელი და შეიძლება მოითხოვოს უფრო აგრესიული მკურნალობა, მათ შორის დამხმარე ქიმიოთერაპიის გამოყენება. შეფასება შეიძლება დაეხმაროს ადრეული სტადიის კოლორექტულ კარცინომის მქონე პაციენტების იდენტიფიცირებას, რომლებსაც აქვთ რეციდივის მაღალი რისკი და შეიძლება ისარგებლონ დამატებითი თერაპიით.

TIL-ების და სიმსივნური „ბადების“ შესწავლა კოლორექტულ კარცინომაში არის აქტიური კვლევის სფერო, მომავალი გამოკვლევისთვის რამდენიმე პერსპექტიული მიმართულებით:

იმუნური აცილების მექანიზმების გაგება: საჭიროა შემდგომი კვლევა იმ მექანიზმების გასარკვევად, რომლითაც სიმსივნის „ბადები“ თავს არიდებენ იმუნურ მეთვალყურეობას და როგორ შეიძლება ამ პროცესების თერაპიული დამიზნება.[25]

კლინიკურ პრაქტიკაში ინტეგრაცია: საჭიროა მუდმივი ძალისხმევა კლინიკურ პრაქტიკაში TIL-ების და სიმსივნური „ბადების“ შეფასების სტანდარტიზებისთვის, იმის უზრუნველსაყოფად, რომ ეს მარკერები თანმიმდევრულად და ზუსტად გამოყენებულ იქნას მკურნალობის გადაწყვეტილებების წარმართვისთვის.

პროლიფერაცია და აპოპტოზი არის ფუნდამენტური პროცესები, რომლებიც არეგულირებენ ქსოვილების ჰომეოსტაზს. ნორმალურ ქსოვილებში ბალანსი უჯრედების გამრავლებასა და უჯრედის სიკვდილს შორის ინარჩუნებს ქსოვილის მთლიანობას. თუმცა კიბოს დროს ეს ბალანსი ირღვევა, რაც იწვევს უჯრედების უკონტროლო ზრდას და სიმსივნის განვითარებას.

უჯრედების პროლიფერაცია განპირობებულია უჯრედული ციკლით, მჭიდროდ რეგულირებული საფეხურების სერია, რომელიც აკონტროლებს უჯრედების გაყოფას. უჯრედული ციკლის ძირითადი რეგულატორები მოიცავს ციკლინებს, ციკლინდამოკიდებულ კინაზებს (CDK) და მათ ინჰიბიტორებს. კიბოს დროს უჯრედული ციკლის დისრეგულაცია იწვევს უკონტროლო პროლიფერაციას, რაც ხელს უწყობს სიმსივნის ზრდას. [26]

კოლორექტალური კიბოს პროგნოზზე გავლენას ახდენს კლინიკური, პათოლოგიური და მოლეკულური ფაქტორების კომპლექსური ურთიერთქმედება. ტრადიციული პროგნოზული ფაქტორები მოიცავს სიმსივნის სტადიას, ჰისტოლოგიური დიფერენციაციის ხარისხს და ლიმფური კვანძების ჩართულობას, რაც განისაზღვრება TNM კლასიფიკაციის სისტემით. თუმცა, მოლეკულური მარკერების, ჰისტოლოგიური მახასიათებლებისა და იმუნური პროფილების ინტეგრაცია პროგნოზულ მოდელებში სულ უფრო მნიშვნელოვანი ხდება.

კოლორექტულ კარცინომის ჰისტოლოგიურ ქვეტიპს შეუძლია მნიშვნელოვნად იმოქმედოს პროგნოზზე: ჩვეულებრივი ტიპის ადენოკარცინომა - ზოგადად აქვს ცვლადი პროგნოზი დამოკიდებულია დიფერენცირების ხარისხზე; მუცინური ადენოკარცინომა - როგორც წესი, ასოცირდება უფრო ცუდ პროგნოზთან მისი აგრესიული ხასიათისა და დიაგნოზის შორს წასული სტადიისადმი მიდრეკილების გამო; ბეჭდისებურ უჯრედოვანი კარცინომა - აქვს ყველაზე ცუდი პროგნოზი კოლორექტულ კარცინომის ქვეტიპებს შორის, მეტასტაზების მაღალი სიხშირით და რეზისტენტობით ჩვეულებრივი თერაპიის მიმართ. მედულარული კარცინომა - ცუდი დიფერენციაციის მიუხედავად, ხშირად აქვს შედარებით ხელსაყრელი პროგნოზი, პოტენციურად დაკავშირებული ძლიერი იმუნური პასუხის გამო.[27]

TNM სტადიის შერწყმა მოლეკულურ მარკერებთან (მაგ., MSI სტატუსი, KRAS/BRAF მუტაციები, იმუნოსკორი) საშუალებას გვაძლევს შევექმნათ რისკის სტრატეგიკაციის მოდელები, რომლებსაც შეუძლიათ უფრო ზუსტად განსაზღვრონ შედეგები და წარმართონ მკურნალობის გადაწყვეტილებები. მაგალითად, პაციენტებს II სტადიის კოლორექტულ კარცინომით, მაგრამ მაღალი რისკის მოლეკულური მახასიათებლებით (მაგ., MSI-Low, BRAF მუტაცია) შეუძლიათ ისარგებლონ დამხმარე ქიმიოთერაპიით, მიუხედავად იმისა, რომ ტრადიციული TNM სტადია შეიძლება არ მიუთითებდეს ამის საჭიროებაზე.

ამ მარკერების კლინიკურ პრაქტიკაში ინტეგრირებით, ონკოლოგებს შეუძლიათ მკურნალობის სტრატეგიების მორგება თითოეული პაციენტის სიმსივნის სპეციფიკურ ბიოლოგიურ მახასიათებლებზე. ეს პერსონალიზებული მიდგომა მიზნად ისახავს თერაპიული ეფექტურობის ოპტიმიზაციას, ხოლო მკურნალობასთან დაკავშირებული არასასურველი ტოქსიკურობის მინიმუმამდე შემცირებას.

ახალი ბიომარკერების იდენტიფიკაცია გრძელდება კოლორექტულ კარცინომის პროგნოზის სფეროს წინსვლაში. განვითარებადი ბიომარკერები, როგორიცაა სიმსივნის მიკროგარემოსთან დაკავშირებული, მეტაბოლური რეპროგრამირება და ახალი აპოპტოზური გზები, გვპირდება პროგნოზული მოდელების შემდგომ დახვეწას.

სიმსივნური სტრომის შემადგენლობა და აქტივობა, მათ შორის კიბოსთან ასოცირებული ფიბრობლასტების (CAFs) და უჯრედგარე მატრიქსის კომპონენტების არსებობა, სულ უფრო მეტად აღიარებულია, როგორც მნიშვნელოვანი ფაქტორები კოლორექტულ კარცინომის პროგრესირებასა და პროგნოზში.

ბიომარკერები, რომლებიც დაკავშირებულია იმუნურ საკონტროლო პუნქტთან (მაგ., PD-L1 ექსპრესია, CTLA-4) გამოკვლეულია მათი პროგნოზული მნიშვნელობისა და იმუნოთერაპიის გადაწყვეტილების წარმართვის პოტენციალის გამო.

ლაქტატდეჰიდროგენაზა (LDH): კოლორექტულ კარცინომაში LDH-ის მომატებული დონე ასოცირდება სიმსივნის გლიკოლიზის მომატებასთან (ვარბურგის ეფექტი) და ცუდ პროგნოზთან. LDH და სხვა მეტაბოლური მარკერები შეიძლება იყოს სიმსივნის აგრესიულობის ინდიკატორი და მეტაბოლური თერაპიის პოტენციური სამიზნე.

TRAIL რეცეპტორები: სიმსივნის ნეკროზის ფაქტორთან დაკავშირებული აპოპტოზის გამომწვევი ლიგანდის (TRAIL) რეცეპტორები ჩართული არის გარე აპოპტოზურ გზაზე. TRAIL რეცეპტორების და მათი ლიგანდების ექსპრესიის დონეები შესწავლილია მათი პოტენციური პროგნოზული მნიშვნელობისა და როგორც თერაპიული მიზნებისათვის.[28]

ამ მრავალფეროვანი პროგნოზული მარკერების ინტეგრაცია კლინიკურ პრაქტიკაში მიმდინარეობს, კვლევებით ფოკუსირებულია ძლიერი და სარწმუნო, კლინიკურად გამოსაყენებელი მოდელების შემუშავებაზე, რომლებიც აერთიანებს ტრადიციულ გაგებას მოლეკულურ და ჰისტოლოგიურ შეხედულებებთან.

როგორც მტკიცებულება გროვდება, ეს მარკერები სავარაუდოდ ჩართული იქნება კოლორექტულ კარცინომის მართვის კლინიკურ გაიდლაინებში, რაც ხელს უწყობს კლინიკურ პრაქტიკაში მათი გამოყენების სტანდარტიზაციას.

კოლორექტული კიბოს პროგნოზი სულ უფრო რთული ხდება, რადგან ფორმირდება მრავალი ფაქტორით, მათ შორის ჰისტოლოგიური ქვეტიპებით, მოლეკულური მარკერებით, იმუნური პროფილებით და პროლიფერაციული და აპოპტოზური დინამიკით. ამ მრავალფეროვანი მარკერების ტრადიციულ კლინიკურ სტადიებთან ინტეგრირებით, ჩვენ შეგვიძლია მივაღწიოთ კოლორექტულ კარცინომის პროგნოზის უფრო სიღრმისეულ გაგებას, რაც საშუალებას იძლევა უფრო პერსონალიზებული და ეფექტური მკურნალობის სტრატეგიების შემუშავებაში. [29]

კოლორექტული კიბო კვლავ რჩება ჯანმრთელობის მთავარ გამოწვევად, მაგრამ მისი ბიოლოგიური სირთულის გაგებაში მიღწეული წინსვლა გვთავაზობს უფრო ეფექტური მართვის სტრატეგიების შესაძლებლობებს. კლინიკურ პრაქტიკაში ჰისტოლოგიური, მოლეკულური და იმუნური მიკროგარემოს მახასიათებლების ინტეგრირებით, ჩვენ შეგვიძლია მივუახლოვდეთ მომავალს, სადაც კოლორექტულ კარცინომის მკურნალობა ზუსტად იქნება მორგებული თითოეული პაციენტის სიმსივნის ინდივიდუალურ მახასიათებლებზე. კვლევების წინსვლასთან ერთად, ახალი ბიომარკერების აღმოჩენის, პროგნოზული მოდელების დახვეწისა და მიზანმიმართული თერაპიის შემუშავების მუდმივი მცდელობა გადამწყვეტი იქნება კოლორექტულ კარცინომის პაციენტების გადარჩენისა და ცხოვრების ხარისხის გასაუმჯობესებლად.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Y. Chen *et al.*, “A Novel Immune Marker Model Predicts Oncological Outcomes of Patients with Colorectal Cancer,” *Ann. Surg. Oncol.*, vol. 23, no. 3, pp. 826–832, Mar. 2016, doi: 10.1245/S10434-015-4889-1.
- [2] V. Deschoolmeester, M. Baay, F. Lardon, P. Pauwel, and M. Peeters, “Immune cells in colorectal cancer: Prognostic relevance and role of MSI,” *Cancer Microenvironment*, vol. 4, no. 3, pp. 377–392, Dec. 2011, doi: 10.1007/S12307-011-0068-5.
- [3] F. Pagès *et al.*, “International validation of the consensus Immunoscore for the classification of colon cancer: a prognostic and accuracy study,” *The Lancet*, vol. 391, no. 10135, pp. 2128–2139, May 2018, doi: 10.1016/S0140-6736(18)30789-X.
- [4] H. H. Yoon, J. M. Orrock, N. R. Foster, D. J. Sargent, T. C. Smyrk, and F. A. Sinicrope, “Prognostic impact of FoxP3+ regulatory T cells in relation to CD8+ T lymphocyte density in human colon carcinomas,” *PLoS One*, vol. 7, no. 8, Aug. 2012, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0042274.

- [5] J. W. Huh, J. H. Lee, and H. R. Kim, "Prognostic significance of tumor-infiltrating lymphocytes for patients with colorectal cancer," *Archives of Surgery*, vol. 147, no. 4, pp. 366–371, Apr. 2012, doi: 10.1001/ARCHSURG.2012.35.
- [6] C. H. Richards, C. S. D. Roxburgh, A. G. Powell, A. K. Foulis, P. G. Horgan, and D. C. McMillan, "The clinical utility of the local inflammatory response in colorectal cancer," *Eur. J. Cancer*, vol. 50, no. 2, pp. 309–319, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.EJCA.2013.09.008.
- [7] K. Nosho *et al.*, "Tumour-infiltrating T-cell subsets, molecular changes in colorectal cancer, and prognosis: Cohort study and literature review," *Journal of Pathology*, vol. 222, no. 4, pp. 350–366, Dec. 2010, doi: 10.1002/PATH.2774.
- [8] V. Deschoolmeester *et al.*, "Tumor infiltrating lymphocytes: An intriguing player in the survival of colorectal cancer patients," *BMC Immunol.*, vol. 11, Apr. 2010, doi: 10.1186/1471-2172-11-19.
- [9] P. Salama *et al.*, "Tumor-infiltrating FOXP3+ T regulatory cells show strong prognostic significance in colorectal cancer," *Journal of Clinical Oncology*, vol. 27, no. 2, pp. 186–192, Jan. 2009, doi: 10.1200/JCO.2008.18.7229.
- [10] "The Prognostic Implications of Tumor Infiltrating Lymphocytes in Colorectal Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis - PMC." Accessed: May 28, 2026. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7042281/>
- [11] C. S. Grasso *et al.*, "Genetic mechanisms of immune evasion in colorectal cancer," *Cancer Discov.*, vol. 8, no. 6, pp. 730–749, Jun. 2018, doi: 10.1158/2159-8290.CD-17-1327.
- [12] J. F. Gao, G. Arbman, T. I. Wadhwa, H. Zhang, and X. F. Sun, "Relationships of tumor inflammatory infiltration and necrosis with microsatellite instability in colorectal cancers," *World J. Gastroenterol.*, vol. 11, no. 14, pp. 2179–2183, Apr. 2005, doi: 10.3748/WJG.V11.I14.2179.
- [13] G. E. Idos, J. Kwok, N. Bonthala, L. Kysh, S. B. Gruber, and C. Qu, "The Prognostic Implications of Tumor Infiltrating Lymphocytes in Colorectal Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 3360, Feb. 2020, doi: 10.1038/S41598-020-60255-4.
- [14] T. Saito *et al.*, "Two FOXP3 + CD4 + T cell subpopulations distinctly control the prognosis of colorectal cancers," *Nat. Med.*, vol. 22, no. 6, pp. 679–684, Jun. 2016, doi: 10.1038/NM.4086.
- [15] F. Cianchi *et al.*, "Lymph node recovery from colorectal tumor specimens: Recommendation for a minimum number of lymph nodes to be examined," *World J. Surg.*, vol. 26, no. 3, pp. 384–389, Mar. 2002, doi: 10.1007/S00268-001-0236-8.

- [16] M. Guidoboni *et al.*, “Microsatellite instability and high content of activated cytotoxic lymphocytes identify colon cancer patients with a favorable prognosis,” *American Journal of Pathology*, vol. 159, no. 1, pp. 297–304, 2001, doi: 10.1016/S0002-9440(10)61695-1.
- [17] T. Chiba *et al.*, “Intraepithelial CD8+ T-cell-count becomes a prognostic factor after a longer follow-up period in human colorectal carcinoma: Possible association with suppression of micrometastasis,” *Br. J. Cancer*, vol. 91, no. 9, pp. 1711–1717, Nov. 2004, doi: 10.1038/SJ.BJC.6602201.
- [18] A. Ling, S. Edin, M. L. Wikberg, Å. Öberg, and R. Palmqvist, “The intratumoural subsite and relation of CD8+ and FOXP3 + T lymphocytes in colorectal cancer provide important prognostic clues,” *Br. J. Cancer*, vol. 110, no. 10, pp. 2551–2559, May 2014, doi: 10.1038/BJC.2014.161.
- [19] F. Prall *et al.*, “Prognostic role of CD8+ tumor-infiltrating lymphocytes in stage III colorectal cancer with and without microsatellite instability,” *Hum. Pathol.*, vol. 35, no. 7, pp. 808–816, Jul. 2004, doi: 10.1016/J.HUMPATH.2004.01.022.
- [20] L. S. Rozek *et al.*, “Tumor-Infiltrating lymphocytes, Crohn’s-like lymphoid reaction, and survival from colorectal cancer,” *J. Natl. Cancer Inst.*, vol. 108, no. 8, Aug. 2016, doi: 10.1093/JNCI/DJW027.
- [21] A. Buckowitz *et al.*, “Microsatellite instability in colorectal cancer is associated with local lymphocyte infiltration and low frequency of distant metastases,” *Br. J. Cancer*, vol. 92, no. 9, pp. 1746–1753, May 2005, doi: 10.1038/SJ.BJC.6602534.
- [22] J. Galon, H. K. Angell, D. Bedognetti, and F. M. Marincola, “The Continuum of Cancer Immunosurveillance: Prognostic, Predictive, and Mechanistic Signatures,” *Immunity*, vol. 39, no. 1, pp. 11–26, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.IMMUNI.2013.07.008.
- [23] D. F. Hayes *et al.*, “Tumor marker utility grading system: A framework to evaluate clinical utility of tumor markers,” *J. Natl. Cancer Inst.*, vol. 88, no. 20, pp. 1456–1466, Oct. 1996, doi: 10.1093/JNCI/88.20.1456.
- [24] M. S. Reimers *et al.*, “Prognostic value of HLA class I, HLA-E, HLA-G and Tregs in rectal cancer: A retrospective cohort study,” *BMC Cancer*, vol. 14, no. 1, Jul. 2014, doi: 10.1186/1471-2407-14-486.
- [25] K. Klintrup *et al.*, “Inflammation and prognosis in colorectal cancer,” *Eur. J. Cancer*, vol. 41, no. 17, pp. 2645–2654, Nov. 2005, doi: 10.1016/J.EJCA.2005.07.017.
- [26] A. G. Menon *et al.*, “Immune system and prognosis in colorectal cancer: A detailed immunohistochemical analysis,” *Laboratory Investigation*, vol. 84, no. 4, pp. 493–501, 2004, doi: 10.1038/LABINVEST.3700055.

- [27] K. Mori *et al.*, “Systemic Analysis of Predictive Biomarkers for Recurrence in Colorectal Cancer Patients Treated with Curative Surgery,” *Dig. Dis. Sci.*, vol. 60, no. 8, pp. 2477–2487, Aug. 2015, doi: 10.1007/S10620-015-3648-2.
- [28] L. Wang, Z. W. Zhai, D. B. Ji, Z. W. Li, and J. Gu, “Prognostic value of CD45RO(+) tumor-infiltrating lymphocytes for locally advanced rectal cancer following 30 Gy/10f neoadjuvant radiotherapy,” *Int. J. Colorectal Dis.*, vol. 30, no. 6, pp. 753–760, Jun. 2015, doi: 10.1007/S00384-015-2226-6.
- [29] D. A. Lieberman, D. K. Rex, S. J. Winawer, F. M. Giardiello, D. A. Johnson, and T. R. Levin, “Guidelines for colonoscopy surveillance after screening and polypectomy: A consensus update by the us multi-society task force on colorectal cancer,” *Gastroenterology*, vol. 143, no. 3, pp. 844–857, 2012, doi: 10.1053/J.GASTRO.2012.06.001.

Heterogeneity of Colorectal Dysplastic Polyps and Adenocarcinomas: The Relationship Between Tumor-Infiltrating Lymphocytes and Tumor Buds, Features of Progression and Prognosis

Abstract:

Colorectal cancer remains one of the most common and clinically significant malignancies worldwide, characterized by complex molecular, histopathological, and immunological mechanisms underlying tumor initiation and progression. The adenoma-carcinoma sequence, accompanied by progressive genetic and epigenetic alterations, represents the principal pathway of colorectal carcinogenesis. Increasing evidence highlights the substantial heterogeneity of colorectal dysplastic polyps and adenocarcinomas, which significantly influences tumor behavior, metastatic potential, therapeutic response, and patient prognosis.

This critical literature review summarizes contemporary data regarding the pathogenesis, classification, molecular characteristics, and prognostic biomarkers of colorectal dysplastic polyps and adenocarcinomas. Particular emphasis is placed on the interaction between tumor-infiltrating lymphocytes (TILs) and tumor buds, which are increasingly recognized as key indicators of epithelial-mesenchymal transition, immune evasion, invasive potential, and tumor aggressiveness. The review discusses major molecular pathways and biomarkers involved in colorectal tumorigenesis, including APC, KRAS, TP53, BRAF, microsatellite instability (MSI), CpG island methylator phenotype (CIMP), E-cadherin, β -catenin, Ki-67, Bcl-2, VEGF, and CD163.

Furthermore, the manuscript evaluates the clinical significance of integrating TNM staging, Consensus Molecular Subtypes (CMS), and immunoscore systems into modern personalized oncology approaches. Current evidence suggests that assessment of TILs and tumor budding may

serve as valuable prognostic and predictive biomarkers, contributing to improved risk stratification and individualized therapeutic decision-making in colorectal cancer patients.

Keywords:

Colorectal cancer, dysplastic polyps, adenocarcinoma, Tumor-infiltrating lymphocytes, Tumor buds, heterogeneity, epithelial-mesenchymal transition, biomarkers, prognosis, immunoscore

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ირინა ელიავა - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; კლინიკური ონკოლოგი;

Irina Eliava - PhD student at Tbilisi State Medical University; Clinical Oncologist;

E-mail: irina.eliava87@gmail.com

რემა ღვამიჩავა - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ონკოლოგიის დეპარტამენტის პროფესორი;

Rema Ghvamichava - Professor at the Department of Oncology, Tbilisi State Medical University;

E-mail: r.gvamichava@tsmu.edu

გიორგი ბურკაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;

George Burkadze - Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department of Molecular Pathology;

E-mail: burkadze@yahoo.com g.burkadze@tsmu.edu

Phone Number: 599578833

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

შოთა კეპულაძე - თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi

State Medical University; Doctor of Pathology;

E-mail: Shota.kepuladze@gmail.com sh.kepuladze@tsmu.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

**მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის თავისებურებები სხვადასხვა ტიპის
კოლორექტულ პოლიპებში, მისი კავშირი პროლიფერაციულ-აპოპტოზური,
ჰორმონული რეცეპტორების ექსპრესიასა და ღეროვან უჯრედულ
მახასიათებლებთან
(ლიტერატურის კრიტიკული მიმოხილვა)**

ლაშა ჩინჩალაძე¹; თამარ სალამძე²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ³თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი; ⁴თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

აბსტრაქტი

კოლორექტული პოლიპები წარმოადგენს ჰეტეროგენულ ჯგუფს, რომელიც მოიცავს როგორც კეთილთვისებიან, ასევე კიბოსწინარე დაზიანებებს და მნიშვნელოვან როლს ასრულებს კოლორექტული კარცინოგენეზის პროცესში. ბოლო წლებში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მელატონინისა და მისი რეცეპტორების (MT1, MT2) მონაწილეობას სიმსივნური პროცესების რეგულაციაში. მელატონინის რეცეპტორები დაკავშირებულია უჯრედული პროლიფერაციის, აპოპტოზის, ანგიოგენეზის, იმუნური პასუხისა და ღეროვანი უჯრედების ბიოლოგიის კონტროლთან, რაც მათ პერსპექტიულ ბიომარკერებად აქცევს სხვადასხვა ნეოპლაზიური პროცესის შეფასებისათვის.

წინამდებარე ლიტერატურული მიმოხილვის მიზანია კოლორექტულ პოლიპებში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის თანამედროვე მონაცემების ანალიზი და მათი კავშირის შეფასება დისპლაზიის ხარისხთან, პროლიფერაციულ-აპოპტოზურ აქტივობასთან, ჰორმონული რეცეპტორების ექსპრესიასა და ღეროვანი უჯრედების მახასიათებლებთან. განხილულია MT1 და MT2 რეცეპტორების ბიოლოგიური როლი, მათი მონაწილეობა Wnt/ β -კატენინის, MAPK/ERK და სხვა სასიგნალო გზების რეგულაციაში, აგრეთვე მათი გავლენა კოლორექტული ნეოპლაზიის განვითარებასა და პროგრესირებაზე.

ლიტერატურაში არსებული მონაცემები მიუთითებს, რომ მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის შემცირება შეიძლება ასოცირებული იყოს დისპლაზიის პროგრესირებასთან, უჯრედული პროლიფერაციის გაძლიერებასთან, აპოპტოზის დათრგუნვასთან და უფრო აგრესიული ბიოლოგიური ქცევის ფორმირებასთან. ასევე სავარაუდოა მათი კავშირი ჰორმონული რეგულაციისა და ღეროვანი უჯრედების მარკერებთან, რაც დამატებით უსვამს ხაზს მელატონინის სასიგნალო სისტემის მნიშვნელობას კოლორექტალური კარცინოგენეზის პროცესში.

მელატონინის რეცეპტორების დეტალური შესწავლა შეიძლება გახდეს ახალი პროგნოზული ბიომარკერების იდენტიფიკაციის საფუძველი და ხელი შეუწყოს პერსონალიზებული თერაპიული მიდგომების განვითარებას კოლორექტული პოლიპებისა და კოლორექტული კიბოს მართვაში.

საკვანძო სიტყვები: მელატონინი, მელატონინის რეცეპტორები, MT1, MT2, კოლორექტული პოლიპები, დისპლაზია, კოლორექტული კიბო, β -კატენინი, პროლიფერაცია, აპოპტოზი, ღეროვანი უჯრედები, ჰორმონული რეცეპტორები.

მელატონინი, ეს არის ჰორმონი, რომელიც ძირითადად წარმოიქმნება თავის ტვინის ჰიპოფიზში გადამწყვეტ როლს ასრულებს სხეულის ცირკადული რიტმის, მათ შორის ძილ-ღვიძილის ასევე სითხური ბალანსის რეგულირებაში. ეს ჰორმონი აუცილებელია სხეულის ბუნებრივი ძილ-ღვიძილის პატერნის შესანარჩუნებლად, რადგან მისი სინთეზი და გამოყოფა მჭიდრო კავშირშია სინათლისა და სიბნელის ციკლთან. ღამის განმავლობაში, სინათლის არარსებობის შემთხვევაში, მელატონინის დონე იზრდება, რაც ორგანიზმს ძილისთვის მომზადების სიგნალს აძლევს. სინათლის ზემოქმედება აფერხებს მელატონინის გამომუშავებას, რაც ხელს უწყობს სიფხიზლის განვითარებას.[1] ძილის რეგულაციის ცნობილი ფუნქციის გარდა, მელატონინს გააჩნია ბიოლოგიური თვისებების მრავალფეროვნება. ის მოქმედებს როგორც ძლიერი ანტიოქსიდანტი, ხელს უწყობს მავნე თავისუფალი რადიკალების განეიტრალებას და ამცირებს ოქსიდაციურ სტრესს ორგანიზმში. მელატონინი ასევე თამაშობს გადამწყვეტ როლს იმუნური სისტემის მოდულაციაში, იმუნური უჯრედების აქტივობის გაძლიერებაში და სხეულის ბუნებრივი თავდაცვის მექანიზმების მხარდაჭერაში. გარდა ამისა, ეს ჰორმონი მონაწილეობს რეპროდუქციული ჰორმონების რეგულირებაში, გავლენას ახდენს სექსუალური ფუნქციისა და ნაყოფიერების სხვადასხვა ასპექტზე.[2]

მელატონინი თავის ეფექტს ახდენს სპეციფიკური რეცეპტორების მეშვეობით, უპირველეს ყოვლისა MT1 და MT2 რეცეპტორების მეშვეობით, რომლებიც წარმოადგენს უჯრედების ზედაპირზე განლაგებულ G- პროტეინთან დაწყვილებულ რეცეპტორებს. ეს რეცეპტორები ფართოდ არის გავრცელებული მთელ სხეულში, მათ შორის ტვინში, გულ-სისხლძარღვთა სისტემაში, ღვიძლში და კუჭ-ნაწლავის ტრაქტში. ამ რეცეპტორებთან შეკავშირებით, მელატონინი გავლენას ახდენს ფიზიოლოგიური პროცესების

მრავალფეროვნებაზე და გადამწყვეტ როლს ასრულებს სხეულის ცირკადული რიტმის, ძილ-ღვიძილის ციკლების, განწყობის, იმუნური ფუნქციისა და სიმსივნის ზრდის რეგულირებაში. ამ რეცეპტორებთან მელატონინის შეკავშირება იწვევს კომპლექსურ სასიგნალო კასკადებს, რომლებიც საბოლოოდ მოდულირებენ გენის ექსპრესიას და უჯრედულ აქტივობას, რაც მათ მნიშვნელოვან სამიზნეებად აქცევს ჯანმრთელობის სხვადასხვა მდგომარეობის გასაგებად და პოტენციურად სამკურნალოდ, მათ შორის ავთვისებიანი პროცესების დროს.[2], [3]

მელატონინის როლმა კიბოს ბიოლოგიაში მნიშვნელოვანი ინტერესი გამოიწვია ბოლო წლებში. ვრცელი კვლევა ვარაუდობს, რომ მელატონინის რეცეპტორები, განსაკუთრებით MT1 და MT2 ქვეტიპები, გადამწყვეტ როლს თამაშობენ კიბოს უჯრედების გამრავლების ინჰიბირებაში, აპოპტოზის (უჯრედების დაპროგრამებული სიკვდილი) ხელშეწყობაში და მეტასტაზების ჩახშობაში. მელატონინის რეცეპტორების ეს ძლიერი კიბოს საწინააღმდეგო თვისებები აქცევს მათ მიმზიდველ სამიზნედ თერაპიული ინტერვენციებისთვის სხვადასხვა ტიპის კიბოს, მათ შორის კოლორექტული კიბოს დროს. სპეციფიკური სასიგნალო გზებისა და მოლეკულური მექანიზმების გაგებით, რომლითაც მელატონინის რეცეპტორები ახდენენ თავის სიმსივნის საწინააღმდეგო ეფექტს, მკვლევარები ცდილობენ ახალი თერაპიული საშუალებების შემუშავებას, რომელსაც შეუძლია გამოიყენოს ამ რეცეპტორების დამცავი შესაძლებლობები კოლორექტული კიბოს პრევენციისა და მკურნალობის უფრო ეფექტურად წარმართვისათვის.[3], [4], [5]

კოლორექტული კიბო კიბოს ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული და ლეტალური ფორმაა მთელს მსოფლიოში. კოლორექტული კიბოს განვითარება, როგორც წესი, მიჰყვება ეტაპობრივ პროგრესს, იწყება კეთილთვისებიანი კიბოსწინარე პოლიპების წარმოქმნით, რომლებიც საბოლოოდ შეიძლება გარდაიქმნას ავთვისებიან სიმსივნედ. ამ მრავალსაფეხურიან კანცეროგენულ პროცესზე გავლენას ახდენს გენეტიკური, ეპიგენეტიკური და გარემო ფაქტორების რთული ურთიერთქმედება. ამ პროგრესირების საფუძველში მოლეკულური მექანიზმების გაგება გადამწყვეტია კოლორექტული კიბოს პროფილაქტიკისთვის, ადრეული გამოვლენისა და დამიზნებითი მკურნალობის უფრო ეფექტური სტრატეგიების შემუშავებისთვის.[6]

ახალი მტკიცებულებები ვარაუდობენ, რომ მელატონინის რეცეპტორებმა შესაძლოა გადამწყვეტი როლი შეასრულონ კოლორექტული კიბოს პროგრესირებაში, ცნობილია, რომ მას გააჩნია სხვადასხვა კიბოს საწინააღმდეგო თვისებები, მათ შორის უჯრედების პროლიფერაციის დათრგუნვის, აპოპტოზის ხელშეწყობისა და მეტასტაზების ჩახშობის უნარი. მელატონინის შეკავშირება მის სპეციფიკურ რეცეპტორებთან, ძირითადად MT1 და MT2, იწვევს რთულ სასიგნალო კასკადებს, რომლებსაც შეუძლიათ გენის ექსპრესიისა და უჯრედული პროცესების მოდულირება. ამ მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის, განაწილებისა და ფუნქციური მნიშვნელობის გამოკვლევა კოლორექტალურ ქსოვილებში შეიძლება მოგაწოდოთ ღირებული ინფორმაცია მოლეკულური მექანიზმების შესახებ, რომლებიც ხელს უწყობენ კეთილთვისებიანი პოლიპების

ტრანსფორმაციას ავთვისებიან სიმსივნეებად. ამ ცოდნამ შეიძლება გზა გაუხსნას ახალი თერაპიული მიდგომების შემუშავებას, რომლებიც მიზნად ისახავს მელატონინის რეცეპტორების შუამავლობით გზებს, პოტენციურად გვთავაზობს ახალ გზებს კოლორექტული კიბოს პროფილაქტიკისა და მკურნალობისთვის.[6], [7]

მელატონინი თავის ბიოლოგიურ ეფექტს ახორციელებს ძირითადად ორი რეცეპტორის ქვეტიპის მეშვეობით: MT1 (Mel1a) და MT2 (Mel1b). ეს რეცეპტორები მიეკუთვნება G-პროტეინ-დაწყვილებული რეცეპტორების ოჯახს (GPCR), რომელიც არის ერთ-ერთი ყველაზე დიდი და მრავალფეროვანი რეცეპტორების ოჯახი ადამიანის გენომში.

MT1 რეცეპტორი (Mel1a): MT1 რეცეპტორი არის GPCR, რომელიც შედგება შვიდი ტრანსმემბრანული ხვეულისგან. ის კოდირებულია MTNR1A გენით, რომელიც მდებარეობს 4q35.1 ქრომოსომაზე. MT1 რეცეპტორი გამოხატულია სხვადასხვა ქსოვილებში, მათ შორის ტვინში (განსაკუთრებით სუპრაქიაზმურ ბირთვში), გულ-სისხლძარღვთა სისტემაში, ღვიძლში, თირკმელებში და კუჭ-ნაწლავის ტრაქტში.

MT1 რეცეპტორი უპირველეს ყოვლისა შუამავალია მელატონინის ძილის გამაძლიერებელ ეფექტებზე, ცირკადული რიტმის რეგულირებით. ის ასევე თამაშობს როლს ვაზოკონსტრიქციაში, იმუნური პასუხის მოდულაციაში და კიბოს უჯრედების პროლიფერაციის ინჰიბირებაში.[8]

MT2 რეცეპტორი (Mel1b): MT1-ის მსგავსად, MT2 რეცეპტორი არის GPCR შვიდი ტრანსმემბრანული დომენით. ის კოდირებულია MTNR1B გენით, რომელიც მდებარეობს 11q21-q22 ქრომოსომაზე. MT2 რეცეპტორი ფართოდ არის გავრცელებული ბადურაზე, ტვინში, სისხლძარღვებში და სხვადასხვა პერიფერიულ ქსოვილებში, მათ შორის კუჭ-ნაწლავის ტრაქტში. [8], [9] MT2 რეცეპტორი ჩართულია ცირკადული რიტმის ფაზის ცვლაში, გლუკოზის ცვლის მოდულაციაში და იმუნურ პასუხებში. ის ასევე გავლენას ახდენს კიბოს ბიოლოგიაზე აპოპტოზის ხელშეწყობით, ანგიოგენეზის ინჰიბირებით და სიმსივნის ზრდის ჩახშობით.

სხვა პოტენციური მელატონინის რეცეპტორები: მიუხედავად იმისა, რომ MT1 და MT2 არის პირველადი რეცეპტორები, რომელთა მეშვეობითაც მელატონინი ახორციელებს თავის ეფექტს, არსებობს მტკიცებულება, რომელიც მიუთითებს მელატონინის დამაკავშირებელი სხვა ადგილების არსებობაზე, როგორცაა MT3, რომელიც შეიძლება დაკავშირებული იყოს ქინონ რედუქტაზა 2-თან (QR2). ამ დამატებითი რეცეპტორების როლი კიბოს ბიოლოგიაში ჯერ კიდევ გამოკვლევის პროცესშია და რჩება აქტიური შესწავლის სფეროდ.[10]

ორივე MT1 და MT2 რეცეპტორები არის GPCR, რომლებიც ააქტიურებენ უჯრედშიდა სასიგნალო კასკადებს მელატონთან შეკავშირებისას. ამ რეცეპტორებთან დაკავშირებული ძირითადი სასიგნალო გზები მოიცავს:

G-პროტეინის სიგნალის გადაცემა : მელატონინის შებოჭვისას, MT1 და MT2 რეცეპტორები წყვილდება სხვადასხვა ტიპის G-პროტეინებთან, კონკრეტულად ინჰიბიტორულ Gi პროტეინებთან და მასტიმულირებელ Gq პროტეინებთან. ეს ორმაგი

შეერთება იწვევს კომპლექსურ სასიგნალო კასკადებს, რომლებიც კონვერტირდება ადენილილ ციკლაზას აქტივობის მოდულაციაზე.

მელატონინის დაკავშირება მის რეცეპტორებთან იწვევს ადენილილ ციკლაზას, ფერმენტის დათრგუნვას, რომელიც პასუხისმგებელია ციკლური AMP-ის (cAMP) სინთეზზე. უჯრედშია cAMP დონის შემდგომი შემცირება იწვევს პროტეინ კინაზა A-ს, სხვადასხვა უჯრედული პროცესების ძირითადი რეგულატორის აქტივაციის შემცირებას.

ეს G-პროტეინის შუამავლობით სასიგნალო გზა გადამწყვეტია სხეულის ცირკადული რიტმის რეგულირებისთვის, მილ-ღვიძილის ციკლის კონტროლისთვის, ასევე უჯრედების გამრავლების მოდულაციისთვის. cAMP/PKA სიგნალის ინჰიბირებით, მელატონინის რეცეპტორებს შეუძლიათ დათრგუნონ კიბოს უჯრედების პროლიფერაცია, რაც ამ გზას აქცევს ცენტრალურ მექანიზმად, რომლის მეშვეობითაც მელატონინი ახდენს თავის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტს.

ფოსფოლიპაზა C (PLC) გზა: მელატონინის რეცეპტორების მიერ Gq ცილების გააქტიურებამ ასევე შეიძლება გამოიწვიოს ფოსფოლიპაზა C (PLC) სტიმულირება, რაც იწვევს ინოზიტოლ ტრიფოსფატის (IP3) და დიაცილგლიცეროლის (DAG) გამომუშავებას. ეს მოლეკულები ზრდის უჯრედშია კალციუმის დონეს და ააქტიურებს პროტეინ კინაზა C (PKC), რომელიც ჩართულია სხვადასხვა უჯრედულ პროცესებში, მათ შორის აპოპტოზისა და იმუნურ პასუხებში.[11], [12]

MAPK/ERK გზა: მელატონინის რეცეპტორებს ასევე შეუძლიათ გავლენა მოახდინონ მიტოგენით გააქტიურებულ პროტეინ კინაზაზე/უჯრედგარე სიგნალით რეგულირებულ კინაზაზე (MAPK/ERK) გზაზე. ეს გზა გადამწყვეტ როლს ასრულებს უჯრედების დიფერენციაში, პროლიფერაციაში და გადარჩენაში. კიბოს უჯრედებში MAPK/ERK გზის მოდულაციას მელატონინის რეცეპტორებით შეუძლია დათრგუნოს სიმსივნის ზრდა და ხელი შეუწყოს აპოპტოზს.

ბირთვული სიგნალის გადაცემა: მემბრანასთან დაკავშირებული რეცეპტორების გარდა, მელატონინს შეუძლია გავლენა მოახდინოს ბირთვული რეცეპტორების მეშვეობით, როგორცაა რეტინოიდებთან დაკავშირებული რეცეპტორების ოჯახი (ROR). ეს რეცეპტორები მონაწილეობენ იმუნურ ფუნქციასთან, ანთებასთან და კიბოსთან დაკავშირებული გენების ტრანსკრიპციულ რეგულირებაში.

მელატონინის რეცეპტორების როლი კანცეროგენეზში მრავალმხრივია და მოიცავს სხვადასხვა მექანიზმებს, რომლებსაც შეუძლიათ დათრგუნონ ან ხელი შეუწყონ კიბოს განვითარებას. [12], [13]

ნაჩვენებია, რომ მელატონინის რეცეპტორები აფერხებენ კიბოს უჯრედების პროლიფერაციას ციკლინის D1-ის, უჯრედული ციკლის მთავარი რეგულატორის დაქვეითებით. ეს ეფექტი ხდება cAMP/PKA სიგნალიზაციის ჩახშობისა და MAPK/ERK გზის მოდულაციის გზით .

აპოპტოზის ხელშეწყობა: მელატონინის რეცეპტორების გააქტიურებამ შეიძლება ხელი შეუწყოს აპოპტოზს კიბოს უჯრედებში პრო-აპოპტოზური ცილების (მაგ., ბაქსი) და

ანტიაპოპტოზური ცილების (მაგ., Bcl-2) რეგულაციის გზით. ეს აპოპტოზური ეფექტი ხშირად შუამავლობს PLC/PKC გზის და კასპაზების გააქტიურების მეშვეობით.[14]

მელატონინის რეცეპტორებს შეუძლიათ დათრგუნონ კიბოს მეტასტაზები მატრიქსის მეტალოპროტეინაზების (MMPs) ექსპრესიის შემცირებით, რომლებიც წარმოადგენენ ფერმენტებს, რომლებიც ანადგურებენ უჯრედგარე მატრიქსს და ხელს უწყობენ სიმსივნის შეჭრას. გარდა ამისა, მელატონინის რეცეპტორებს შეუძლიათ დათრგუნონ ანგიოგენეზი, ახალი სისხლძარღვების ფორმირება, რომლებიც აწვდიან საკვებ ნივთიერებებს სიმსივნეებს, სისხლძარღვთა ენდოთელური ზრდის ფაქტორის (VEGF) ექსპრესიის დაქვეითებით.

მელატონინის რეცეპტორები თამაშობენ როლს იმუნური პასუხის მოდულაციაში, რაც გადამწყვეტია კარცინოგენეზში. მელატონინს შეუძლია გააძლიეროს ბუნებრივი მკვლელი (NK) უჯრედების, ციტოტოქსიური T ლიმფოციტების და მაკროფაგების აქტივობა, რაც ხელს უწყობს იმუნური სისტემის უნარს, მიზანმიმართოს და გაანადგუროს კიბოს უჯრედები.

მიუხედავად იმისა, რომ მელატონინის რეცეპტორები ზოგადად განიხილება კიბოს საწინააღმდეგოდ, ზოგიერთი კვლევა ვარაუდობს, რომ გარკვეულ პირობებში, მელატონინის სიგნალის გადაცემას შეიძლება ჰქონდეს პრო-სიმსივნური ეფექტი. მაგალითად, ჰორმონზე დამოკიდებულ კიბოებში, როგორიცაა ძუძუს კიბო, მელატონინს შეუძლია ურთიერთქმედება ესტროგენის რეცეპტორებთან და გავლენა მოახდინოს სიმსივნის ზრდაზე სხვადასხვა კომპლექსური გზებით.

კოლორექტული კიბოს ქსოვილებში მელატონინის რეცეპტორების იმუნოჰისტოქიმიურმა ანალიზმა შეიძლება მოგვაწოდოს ღირებული ინფორმაცია სიმსივნეების ბიოლოგიური ქცევის შესახებ. მაგალითად, კვლევებმა აჩვენა, რომ MT1 და MT2 რეცეპტორების ექსპრესია კოლორექტულ სიმსივნეებში ხშირად მცირდება ნორმალურ ქსოვილებთან შედარებით, რაც მიუთითებს მელატონინის სიგნალის პოტენციურ დაკარგვაზე კიბოს პროგრესირებაში. ამ რეცეპტორების ექსპრესიის დონე შეიძლება იყოს დაკავშირებული სხვადასხვა კლინიკურ პარამეტრებთან, როგორიცაა სიმსივნის ხარისხი, სტადია და პაციენტის ზოგადი პროგნოზი.[15]

მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის პროგნოზული მნიშვნელობა შესწავლილია სხვადასხვა ტიპის შემთხვევებში. მელატონინის რეცეპტორების მაღალი ექსპრესია, განსაკუთრებით MT1, დაკავშირებულია ხელსაყრელ პროგნოზთან ზოგიერთ კვლევაში, სავარაუდოდ, ამ რეცეპტორების შუამავლობით გამოწვეული ანტიპროლიფერაციული და პრო-აპოპტოზური ეფექტების გამო. პირიქით, მელატონინის რეცეპტორების შემცირებული ან არარსებობა შეიძლება დაკავშირებული იყოს უფრო აგრესიულ სიმსივნის ქცევასთან და ცუდ შედეგებთან.

β-კატენინის გზა, რომელიც ასევე ცნობილია როგორც Wnt სასიგნალო გზა, მნიშვნელოვან როლს ასრულებს უჯრედების პროლიფერაციის, დიფერენციაციისა და გადარჩენის რეგულირებაში. კოლორექტული კიბოს კონტექსტში, β-კატენინის გზის არასწორად გააქტიურება სიმსივნის წარმოქმნის მთავარი მამოძრავებელია. APC გენში ან

თავად β -კატენინის მუტაციამ შეიძლება გამოიწვიოს ბირთვში β -კატენინის დაგროვება, სადაც ის მოქმედებს როგორც ტრანსკრიპციული კო-აქტივატორი უჯრედების პროლიფერაციასა და გადარჩენაში ჩართული გენებისთვის.[16]

უახლესმა კვლევამ ხაზგასმით გამოავლინა პოტენციური ურთიერთქმედება მელატონინის სიგნალიზაციასა და β -კატენინის გზას კოლორექტული კიბოს დროს. მელატონინს, მისი რეცეპტორების მეშვეობით, შეუძლია β -კატენინის გზის მოდულირება β -კატენინის სტაბილურობაზე და ლოკალიზაციაზე ზემოქმედებით. კერძოდ, ნაჩვენებია, რომ მელატონინი ხელს უწყობს β -კატენინის დეგრადაციას მისი ფოსფორილირებისა და შემდგომი უბიქვითინაციის გაძლიერებით. ეს იწვევს ბირთვული β -კატენინის დონის შემცირებას, რითაც აფერხებს ონკოგენების ტრანსკრიფციას, როგორიცაა c-Myc და ციკლინი D1.[17]

მელატონინის უნარი, დათრგუნოს β -კატენინის გზა, ვარაუდობს, რომ მელატონინი ან მისი ანალოგები შეიძლება იყოს შესწავლილი, როგორც პოტენციური თერაპიული აგენტები კოლორექტული კიბოს დროს, განსაკუთრებით სიმსივნეებში, რომლებსაც ახასიათებთ ჰიპერაქტიური Wnt/ β -კატენინის სიგნალიზაცია. როგორც მელატონინის რეცეპტორების, ასევე β -კატენინის იმუნოჰისტოქიმიურმა ანალიზმა კოლორექტული კიბოს ქსოვილებში შეიძლება უზრუნველყოს ამ გზების ურთიერთქმედების შესახებ დამატებითი ინფორმაცია და დაეხმაროს პაციენტების იდენტიფიცირებას, რომლებსაც შეუძლიათ ისარგებლონ მელატონინზე დაფუძნებული თერაპიებით.

ეპიდემიოლოგიურმა კვლევებმა აჩვენა პოტენციური კავშირი მელატონინის დონესა და კოლორექტული კიბოს განვითარების რისკს შორის. მაგალითად, პოპულაციებს, რომლებსაც აქვთ უფრო მაღალი დამის მელატონინის გამომუშავება, როგორიცაა ის, ვინც ცხოვრობს მცირედ განათებულ ადგილებში, ან პირები, რომლებიც ინარჩუნებენ ძილის რეგულარულ რეჟიმს, შეიძლება ჰქონდეთ შემცირებული კოლორექტული კიბოს რისკი. ამ დაკვირვებას მხარს უჭერს ცხოველური მოდელების და უჯრედული ხაზების ექსპერიმენტული კვლევები, რომლებმაც აჩვენეს, რომ მელატონინს შეუძლია შეაფერხოს კოლორექტული კიბოს უჯრედების ზრდა.

მსხვილი ნაწლავის კიბოს დროს მელატონინის დამცავი ეფექტი ძირითადად განპირობებულია MT1 და MT2 რეცეპტორებთან მისი ურთიერთქმედებით. შემოთავაზებულია შემდეგი მექანიზმები: 1. უჯრედების პროლიფერაციის დათრგუნვა: მელატონინს, მისი რეცეპტორების მეშვეობით, შეუძლია შეაფერხოს კოლორექტული კიბოს უჯრედების პროლიფერაცია ციკლინის D1-ის და სხვა უჯრედული ციკლის რეგულატორების ექსპრესიის დაქვეითებით. ეს ეფექტი ნაწილობრივ განპირობებულია cAMP/PKA სასიგნალო გზის დათრგუნვით და MAPK/ERK გზის მოდულირებით. 2. აპოპტოზის ხელშეწყობა: მელატონინის რეცეპტორებს შეუძლიათ გამოიწვიონ აპოპტოზი კოლორექტული კიბოს უჯრედებში პრო-აპოპტოზური ცილების გააქტიურებით, როგორიცაა Bax და ამცირებენ ანტიაპოპტოზურ ცილებს, როგორიცაა Bcl-2. PLC/PKC გზა და კასპაზის აქტივაცია გადამწყვეტია ამ პროცესისთვის. 3. ანგიოგენეზის დათრგუნვა: VEGF და სხვა პრო-ანგიოგენური ფაქტორების დაქვეითებით,

მელატონინის რეცეპტორებს შეუძლიათ შეამცირონ სიმსივნეების სისხლით მომარაგება, აფერხონ მათი ზრდა და მეტასტაზები. 4. იმუნური მოდულაცია: მელატონინს შეუძლია გააძლიეროს იმუნური პასუხი კოლორექტული კიბოს უჯრედების წინააღმდეგ NK უჯრედების, ციტოტოქსიური T უჯრედების და მაკროფაგების აქტივობის გაზრდით. ეს იმუნიტეტის გაძლიერებელი ეფექტი ხდება მელატონინის რეცეპტორების მეშვეობით და გადამწყვეტია სიმსივნის ზრდის კონტროლისა და მეტასტაზების თავიდან ასაცილებლად. 5. β -კატენინის ბილიკის რეგულირება: როგორც ადრე განვიხილეთ, მელატონინის რეცეპტორებს შეუძლიათ მოდულირება გაუკეთონ β -კატენინის გზას, რომელიც ხშირად დისრეგულირებულია კოლორექტული კიბოს დროს. β -კატენინის დეგრადაციის ხელშეწყობით და მისი ბირთვული ტრანსლოკაციების ინჰიბირებით, მელატონინს შეუძლია შეამციროს ონკოგენების ექსპრესია და დათრგუნოს სიმსივნის წარმოქმნა. 6. ანტიოქსიდანტური ეფექტი: მელატონინი არის ძლიერი ანტიოქსიდანტი და მის რეცეპტორებს შეუძლიათ გააძლიერონ ანტიოქსიდანტური თავდაცვის სისტემები კოლორექტალურ უჯრედებში. ოქსიდაციური სტრესის შემცირებით, მელატონინი იცავს უჯრედებს დნმ-ის დაზიანებისა და მუტაციებისგან, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს კიბო. კოლორექტული კიბო არის ჰეტეროგენული დაავადება რამდენიმე ქვეტიპით, რომელთაგან თითოეული ხასიათდება განსხვავებული მოლეკულური და ჰისტოლოგიური თავისებურებებით. მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია შეიძლება განსხვავდებოდეს ამ ქვეტიპებს შორის, რაც პოტენციურად იმოქმედებს სიმსივნის ქცევაზე და პაციენტის შედეგებზე. [18], [19], [20]

ადენოკარცინომა: კოლორექტალურ ადენოკარცინომაში, ყველაზე გავრცელებული ქვეტიპი, მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია ხშირად მცირდება ნორმალურ კოლორექტალურ ქსოვილებთან შედარებით. ეს შემცირება შეიძლება დაკავშირებული იყოს უფრო აგრესიულ სიმსივნის მახასიათებლებთან, როგორიცაა სიმსივნის დიფერენციაციის დაბალი ხარისხი და მაღალი სტადია და შესაბამისად ცუდი პროგნოზი.

მუცინური ადენოკარცინომა: კოლორექტული კიბოს ამ ქვეტიპს ახასიათებს მუცინის, ჟელეს მსგავსი ნივთიერების გამომუშავება. ზოგიერთი კვლევა ვარაუდობს, რომ მუცინურ ადენოკარცინომას შეიძლება ჰქონდეს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის უფრო დაბალი დონე, ვიდრე არამუცინოზურ ადენოკარცინომას, რამაც შეიძლება ხელი შეუწყოს მათ განსხვავებულ ბიოლოგიურ ქცევას და რეზისტენტობას ჩვეულებრივი თერაპიის მიმართ.

ბეჭდიდესებურ უჯრედოვანი კარცინომა: კოლორექტული კიბოს იშვიათი და აგრესიული ქვეტიპი, ბეჭდიდესებურ უჯრედოვანი კარცინომა ხშირად ასოცირდება ცუდ პროგნოზთან. ამ სიმსივნეებში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია კარგად არ არის შესწავლილი, მაგრამ მათი როლის გაგებამ შეიძლება უზრუნველყოს პოტენციური თერაპიული სამიზნეების შესახებ ინფორმაცია.

მელატონინის რეცეპტორების დიფერენციალური გამოხატულება კოლორექტული კიბოს სხვადასხვა ქვეტიპებში ვარაუდობს, რომ ეს რეცეპტორები შეიძლება იყვნენ

ბიომარკერები პროგნოზისა და თერაპიული პასუხისთვის. მაგალითად, პაციენტებს სიმსივნეებით, რომლებიც აექსპრესირებენ მელატონინის რეცეპტორების მაღალ დონეს, შესაძლოა ისარგებლონ მელატონზე დაფუძნებული თერაპიებით ან მელატონინის რეცეპტორების აგონისტებით.

გარდა ამისა, მელატონინის ან მისი ანალოგების სტანდარტულ ქიმიოთერაპიასთან კომბინირებამ შეიძლება გააძლიეროს მკურნალობის ეფექტურობა კიბოს უჯრედების აპოპტოზისადმი სენსიბილიზაციის გზით, ანგიოგენეზის შეშუპებით და იმუნური პასუხის მოდულირებით. კლინიკური კვლევები, რომლებიც იკვლევენ ასეთ კომბინირებულ თერაპიას, მიზანმიმართულია მათი პოტენციური სარგებლის შესაფასებლად.

მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია კოლორექტალურ სიმსივნეებში ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნას პაციენტის შედეგების პროგნოზირებისთვის. MT1 და MT2 რეცეპტორების მაღალი ექსპრესია ასოცირდება ზოგიერთ კვლევაში უკეთეს საერთო გადარჩენასთან, სავარაუდოდ მელატონინის სიგნალიზაციის სიმსივნის საწინააღმდეგო ეფექტის გამო. პირიქით, რეცეპტორების დაბალი ან არარსებობა გამოხატულება შეიძლება მიუთითებდეს უფრო აგრესიულ სიმსივნის ფენოტიპზე და რეციდივის უფრო მაღალ რისკზე.[21]

მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის ცვალებადობა კოლორექტული კიბოს ქვეტიპებს შორის ხაზს უსვამს პერსონალიზებული მედიცინის მნიშვნელობას. ცალკეულ სიმსივნეებში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის პროფილზე დაფუძნებული მკურნალობის სტრატეგიების შერჩევამ შეიძლება გააუმჯობესოს პაციენტის შედეგები და შეამციროს მკურნალობასთან დაკავშირებული გვერდითი ეფექტების რისკი.

კოლორექტული პოლიპები არის სიმსივნური წარმონაქმნები, რომლებიც წარმოიქმნება მსხვილი ნაწლავის ან სწორი ნაწლავის ლორწოვანი გარსიდან. მიუხედავად იმისა, რომ პოლიპების უმეტესობა კეთილთვისებიანია, ზოგიერთს აქვს კოლორექტული კიბოს პროგრესირების პოტენციალი. პოლიპების კლასიფიკაცია ეფუძნება მათ ჰისტოლოგიურ მახასიათებლებს:

1. **ჰიპერპლასტიური პოლიპები:** ეს არის კეთილთვისებიანი პოლიპების ყველაზე გავრცელებული ტიპი, როგორც წესი, პატარა და მდებარეობს დისტალურ მსხვილ ნაწლავში. მათ აქვთ მცირე ან საერთოდ არ აქვთ პოტენციალი კიბოსკენ გადასვლის.
2. **ადენომატოზური პოლიპები (ადენომა):** ადენომა განიხილება კიბოსწინარე დაზიანებებად, კოლორექტული კიბოში ტრანსფორმაციის პოტენციალით. ისინი შემდგომში იყოფა:

ტუბულარული ადენომა: შედგება მილისმაგვარი ჯირკვლებისგან, ისინი ადენომის ყველაზე გავრცელებული ტიპია და აქვთ ავთვისებიანი სიმსივნეების შედარებით დაბალი რისკი.

ვილოზური ადენომა: ამ ადენომებს აქვთ კიბოს პროგრესირების მაღალი რისკი.

ტუბულოვილოზური ადენომა: მილაკოვანი და ვილოზური პატერნების ნაზავი, ამ პოლიპებს აქვთ ავთვისებიანი სიმსივნის საშუალო ხარისხის რისკი.

3. დაკბილული პოლიპები: მათ შორისაა ჰიპერპლასტიკური პოლიპები, მჯდომარე დაკბილული ადენომა (SSAs) და ტრადიციული დაკბილული ადენომა (TSAs). SSA-ს და TSA-ებს აქვთ კოლორექტული კიბოს პროგრესირების მაღალი რისკი.

4. ანთებითი პოლიპები: ხშირად ასოცირდება ნაწლავის ანთებით დაავადებასთან (IBD), როგორცაა წყლულოვანი კოლიტი ან კრონის დაავადება, ეს პოლიპები ზოგადად კეთილთვისებიანია, მაგრამ შეიძლება მიუთითებდეს კოლორექტული კიბოს გაზრდილ რისკზე ძირითადი ანთების გამო.

პოლიპების ტრანსფორმაცია კოლორექტალურ კიბოდ არის მრავალსაფეხურიანი პროცესი, რომელიც მოიცავს გენეტიკურ და ეპიგენეტიკურ ცვლილებებს. ადენომა, განსაკუთრებით მაღალი ხარისხის დისპლაზიის მქონე ადენომა, უმეტესად კიბოსკენ ტრანსფორმირდება მკურნალობის გარეშე არსებულ შემთხვევებში. ადენომა-კარცინომის თანმიმდევრობა აღწერს ამ პროგრესირებას, სადაც კეთილთვისებიანი ადენომა აგროვებს მუტაციებს ონკოგენებსა და სიმსივნის სუპრესორულ გენებში, რაც იწვევს მის შემდგომ ავთვისებიანობას.[22], [23]

მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია კოლორექტალურ პოლიპებში და მათი როლი კიბოს პროგრესირებაში მზარდი ინტერესის სფეროა. კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინის რეცეპტორები, განსაკუთრებით MT1 და MT2, ექსპრესირებულია სხვადასხვა ტიპის პოლიპებში, მათ შორის ადენომატოზურ და დაკბილულ პოლიპებში. ამ რეცეპტორების დაკარგვა ან შემცირება შეიძლება ასოცირებული იყოს კოლორექტული კიბოს პროგრესირების რისკთან.

1. ადენომატოზური პოლიპები: ადენომატოზურ პოლიპებში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიამ შეიძლება შეაფერხოს ავთვისებიან სიმსივნეზე ტრანსფორმაცია უჯრედების პროლიფერაციის, აპოპტოზის და იმუნური რეაქციების მოდულირებით. ამ პოლიპებში მელატონინის რეცეპტორების არსებობა შეიძლება იყოს დამცავი ფაქტორი, რაც ამცირებს კიბოს პროგრესირების ალბათობას.

2. დაკბილული პოლიპები: დაკბილულ პოლიპებს, განსაკუთრებით SSA-ებს, აქვთ უფრო მაღალი ავთვისებიანი პოტენციალი, ვიდრე სხვა ტიპის პოლიპებს. მელატონინის რეცეპტორების როლი ამ პოლიპებში ნაკლებად არის შესწავლილი მაგრამ ვარაუდობენ, რომ მათ შეუძლიათ ხელი შეუწყონ დაკბილული ნეოპლაზიური გზის რეგულირებას, პოტენციურად შეამცირონ კიბოს პროგრესირების რისკი.

მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია კოლორექტალურ სიმსივნეებსა და პოლიპებში შეიძლება იყოს ბიომარკერი კიბოს რეციდივის რისკის პროგნოზირებისთვის. პაციენტებს სიმსივნეებით, რომლებიც აექსპრესირებენ მელატონინის რეცეპტორების მაღალ დონეს, შეიძლება ჰქონდეთ რეციდივის დაბალი რისკი მელატონინის სიგნალიზაციის დამცავი ეფექტის გამო.

პროგნოზული მნიშვნელობა: მელატონინის რეცეპტორების მაღალი ექსპრესია პირველად კოლორექტალურ სიმსივნეებში ასოცირებულია საერთო გადარჩენის

უკეთესთან და რეციდივების დაბალ მაჩვენებელთან. ეს ვარაუდობს, რომ მელატონინის რეცეპტორები შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც პროგნოზული მარკერი პაციენტების იდენტიფიცირებისთვის, რომლებსაც აქვთ რეციდივის დაბალი რისკი.

პოლიპებსა და სიმსივნეებში მელატონინის რეცეპტორების არსებობა ან არარსებობა ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნას დაავადების პროგრესირების მონიტორინგისთვის. მაგალითად, მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის დაკარგვა ადენომატოზურ პოლიპებში შეიძლება მიუთითებდეს კიბოს პროგრესირების გაზრდილ რისკზე, რაც მოითხოვს უფრო აქტიურ მეთვალყურეობას.

მელატონინი შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც დამხმარე თერაპია ტრადიციულ მკურნალობასთან ერთად, როგორცაა ქიმიოთერაპია და რადიაცია, მათი ეფექტურობის გასაძლიერებლად და რეციდივის რისკის შესამცირებლად. მელატონზე დაფუძნებული თერაპიის ეფექტურობა შეიძლება იყოს უფრო მაღალი სიმსივნეების მქონე პაციენტებში, რომლებიც აექსპრესირებენ მელატონინის რეცეპტორების მაღალ დონეს.

მაღალი რისკის მქონე პოლიპების ან კოლორექტული კიბოს ანამნეზის მქონე პაციენტებში, მელატონინი შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც პრევენციული აგენტი რეციდივის რისკის შესამცირებლად. ამ პაციენტებში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიამ შეიძლება დაეხმაროს იმ ადამიანების იდენტიფიცირებას, ვინც ყველაზე მეტად ისარგებლებს ასეთი პრევენციული სტრატეგიებით.

მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიამ კოლორექტალურ პოლიპებსა და სიმსივნეებში შეიძლება გავლენა მოახდინოს სკრინინგისა და ზედამხედველობის სტრატეგიებზე. მაგალითად, პაციენტებს, რომლებსაც აქვთ პოლიპები, რომლებიც აექსპრესირებენ მელატონინის რეცეპტორების მაღალ დონეს, შეიძლება მოითხოვონ ნაკლებად ხშირი მეთვალყურეობა, ხოლო რეცეპტორების დაბალი ან არარსებობის მქონე პაციენტებს შეიძლება დასჭირდეთ უფრო ინტენსიური მონიტორინგი.

მელატონინის რეცეპტორების შესწავლას კოლორექტული კიბოსა და პოლიპებში აქვს ასევე მნიშვნელოვანი დიაგნოსტიკური მნიშვნელობა. ქსოვილის ნიმუშებში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის იდენტიფიცირებამ შეიძლება უზრუნველყოს გადამწყვეტი ინფორმაცია სიმსივნეების ბიოლოგიური ქცევის შესახებ, რაც ხელს უწყობს კეთილთვისებიანი და ავთვისებიანი დაზიანებების დიფერენცირებას და დაავადების პროგრესირების შესახებ ინფორმაციას.

მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიამ შეიძლება ხელი შეუწყოს კოლორექტული სიმსივნის სხვადასხვა ქვეტიპებს შორის განსხვავებას, რაც აუცილებელია ზუსტი დიაგნოზისთვის და მკურნალობის დაგეგმვისთვის. მაგალითად, მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის შემცირებამ შეიძლება მიუთითოს უფრო აგრესიული სიმსივნის ფენოტიპი, რაც იწვევს უფრო აგრესიულ თერაპიულ მიდგომას. სტანდარტიზაციის გამოწვევები: ამ სფეროში ერთ-ერთი გამოწვევაა მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის გამოვლენისა და ინტერპრეტაციის სტანდარტიზებული პროტოკოლების არარსებობა.

მიუხედავად პოტენციური სარგებლისა, არსებობს რამდენიმე გამოწვევა მელატონინის რეცეპტორების კვლევის კლინიკურ პრაქტიკაში დანერგვისათვის. ონკოლოგებმა უნდა გაუმკლავდნენ ამ გამოწვევებს, რათა ეფექტურად ჩართონ მელატონინის რეცეპტორების კვლევა პაციენტების მოვლაში: 1. რეცეპტორების ექსპრესიის ცვალებადობა: ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევაა მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის ცვალებადობა სხვადასხვა პაციენტებსა და სიმსივნის ქვეტიპებში. ეს ცვალებადობა ართულებს მკურნალობის უნივერსალური გაიდლაილების ჩამოყალიბებას და ხაზს უსვამს პერსონალიზებული მედიცინის მიდგომების საჭიროებას. 2. შეზღუდული კლინიკური მონაცემები: მიუხედავად იმისა, რომ პრეკლინიკურმა კვლევებმა აჩვენა იმედისმომცემი შედეგები, კლინიკური მონაცემების შედარებით ნაკლებობაა მელატონინზე დაფუძნებული თერაპიის ეფექტურობის შესახებ კოლორექტული კიბოს დროს. საჭიროა მეტი კლინიკური კვლევები ამ აღმოჩენების დასადასტურებლად და საუკეთესო გზების დასადგენად მელატონინის რეცეპტორებზე დამიზნებითი თერაპიების ინტეგრირებისთვის ონკოლოგიურ პრაქტიკაში.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] T. H. Kim and S. G. Cho, “Melatonin-induced KiSS1 expression inhibits triple-negative breast cancer cell invasiveness,” *Oncol. Lett.*, vol. 14, no. 2, pp. 2511–2516, 2017, doi: 10.3892/OL.2017.6434.
- [2] D. M. Chitimus *et al.*, “Melatonin’s impact on antioxidative and anti-inflammatory reprogramming in homeostasis and disease,” *Biomolecules*, vol. 10, no. 9, pp. 1–28, Sep. 2020, doi: 10.3390/BIOM10091211.
- [3] E. Nooshinfar, A. Safaroghli-Azar, D. Bashash, and M. E. Akbari, “Melatonin, an inhibitory agent in breast cancer,” *Breast Cancer*, vol. 24, no. 1, pp. 42–51, Jan. 2017, doi: 10.1007/s12282-016-0690-7.
- [4] M. Sánchez-Hidalgo, J. Guerrero, I. Villegas, G. Packham, and C. de la Lastra, “Melatonin, A Natural Programmed Cell Death Inducer in Cancer,” *Curr. Med. Chem.*, vol. 19, no. 22, pp. 3805–3821, Jul. 2012, doi: 10.2174/092986712801661013.
- [5] R. J. Reiter, “Melatonin: The chemical expression of darkness,” *Mol. Cell. Endocrinol.*, vol. 79, no. 1–3, 1991, doi: 10.1016/0303-7207(91)90087-9.
- [6] D. Acuña-Castroviejo *et al.*, “Extrapineal melatonin: Sources, regulation, and potential functions,” *Cellular and Molecular Life Sciences*, vol. 71, no. 16, pp. 2997–3025, 2014, doi: 10.1007/S00018-014-1579-2.

- [7] E. J. Sanchez-Barcelo, M. D. Mediavilla, D. X. Tan, and R. J. Reiter, "Clinical Uses of Melatonin: Evaluation of Human Trials," *Curr. Med. Chem.*, vol. 17, no. 19, pp. 2070–2095, May 2010, doi: 10.2174/092986710791233689.
- [8] B. Claustrat, J. Brun, and G. Chazot, "The basic physiology and pathophysiology of melatonin," *Sleep Med. Rev.*, vol. 9, no. 1, pp. 11–24, 2005, doi: 10.1016/J.SMRV.2004.08.001.
- [9] G. A. Bubenik, "Localization of melatonin in the digestive tract of the rat. Effect of maturation, diurnal variation, melatonin treatment and pinealectomy," *Horm. Res.*, vol. 12, no. 6, pp. 313–323, 1980, doi: 10.1159/000179137.
- [10] R. Pariente, I. Bejarano, J. Espino, A. B. Rodríguez, and J. A. Pariente, "Participation of MT3 melatonin receptors in the synergistic effect of melatonin on cytotoxic and apoptotic actions evoked by chemotherapeutics," *Cancer Chemother. Pharmacol.*, vol. 80, no. 5, pp. 985–998, Nov. 2017, doi: 10.1007/s00280-017-3441-3.
- [11] M. L. Dubocovich and M. Markowska, "Functional MT1 and MT2 melatonin receptors in mammals," *Endocrine*, vol. 27, no. 2, pp. 101–110, 2005, doi: 10.1385/ENDO:27:2:101.
- [12] V. N. Anisimov, I. G. Popovich, and M. A. Zabezhinski, "Melatonin and colon carcinogenesis: I. Inhibitory effect of melatonin on development of intestinal tumors induced by 1,2-dimethylhydrazine in rats," *Carcinogenesis*, vol. 18, no. 8, pp. 1549–1553, Aug. 1997, doi: 10.1093/CARCIN/18.8.1549.
- [13] J. Cipolla-Neto and F. G. Do Amaral, "Melatonin as a Hormone: New Physiological and Clinical Insights," *Endocr. Rev.*, vol. 39, no. 6, pp. 990–1028, Dec. 2018, doi: 10.1210/ER.2018-00084.
- [14] N. Kipiani, M. Kharashvili, Z. Bokhua, G. Burkadze, and S. Kepuladze, "Features of Melatonin Receptor Expression in Endometrial Precancerous and Neoplastic Processes," *Georgian Scientists*, vol. 8, no. 1, pp. 227–239, Mar. 2026, doi: 10.52340/g.s.2026.08.01.21.
- [15] K. J. Min, J. H. Jang, and T. K. Kwon, "Inhibitory effects of melatonin on the lipopolysaccharide-induced CC chemokine expression in BV2 murine microglial cells are mediated by suppression of Akt-induced NF- κ B and STAT/GAS activity," *J. Pineal Res.*, vol. 52, no. 3, pp. 296–304, Apr. 2012, doi: 10.1111/J.1600-079X.2011.00943.X.
- [16] H. Ishiguro *et al.*, "NOTCH1 activates the Wnt/ β -catenin signaling pathway in colon cancer," *Oncotarget*, vol. 8, no. 36, pp. 60378–60389, 2017, doi: 10.18632/ONCOTARGET.19534.

- [17] M. Fishman *et al.*, “Overall survival by clinical risk category for high dose interleukin-2 (HD IL-2) treated patients with metastatic renal cell cancer (mRCC): data from the PROCLAIM(SM) registry,” *J. Immunother. Cancer*, vol. 7, no. 1, p. 84, Mar. 2019, doi: 10.1186/s40425-019-0567-3.
- [18] V. Kannen *et al.*, “The melatonin action on stromal stem cells within pericryptal area in colon cancer model under constant light,” *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 405, no. 4, pp. 593–598, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.BBRC.2011.01.074.
- [19] S. S. Joo and Y. M. Yoo, “Melatonin induces apoptotic death in LNCaP cells via p38 and JNK pathways: Therapeutic implications for prostate cancer,” *J. Pineal Res.*, vol. 47, no. 1, pp. 8–14, Aug. 2009, doi: 10.1111/J.1600-079X.2009.00682.X.
- [20] “Therapeutic potential of melatonin in colorectal cancer: Focus on lipid metabolism and gut microbiota - ScienceDirect.” Accessed: May 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925443921002143>
- [21] H. Shibuya, H. Iinuma, R. Shimada, A. Horiuchi, and T. Watanabe, “Clinicopathological and prognostic value of microRNA-21 and microRNA-155 in colorectal cancer,” *Oncology*, vol. 79, no. 3–4, pp. 313–320, Mar. 2011, doi: 10.1159/000323283.
- [22] N. Arber *et al.*, “Celecoxib for the prevention of colorectal adenomatous polyps,” *New Engl. J. Med.*, vol. 355, no. 9, pp. 885–895, Aug. 2006, doi: 10.1056/nejmoa061652.
- [23] T. Higurashi *et al.*, “Metformin for chemoprevention of metachronous colorectal adenoma or polyps in post-polypectomy patients without diabetes: a multicentre double-blind, placebo-controlled, randomised phase 3 trial,” *Lancet Oncol.*, vol. 17, no. 4, pp. 475–483, Apr. 2016, doi: 10.1016/s1470-2045(15)00565-3.

Melatonin Receptor Expression in Colorectal Polyps: Associations with Proliferative-Apoptotic Activity, Hormone Receptor Expression, and Stem Cell Characteristics

(Critical Review of Literature)

Lasha Chinchaladze¹; Tamar Saladze²; Giorgi Burkadze³; Shota Kepuladze⁴

¹PhD student at Tbilisi State Medical University; ²Associate Professor, Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; ³Professor, Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; ⁴Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; MD; Pathologist;

Abstract

Colorectal polyps represent a heterogeneous group of lesions ranging from benign proliferations to precancerous conditions with significant malignant potential. In recent years, increasing attention has been directed toward the role of melatonin and its receptors (MT1 and MT2) in the regulation of tumorigenesis. Melatonin receptors are involved in the control of cellular proliferation, apoptosis, angiogenesis, immune responses, and stem-cell-related pathways, making them promising biomarkers in colorectal neoplasia.

The aim of this critical literature review is to evaluate current evidence regarding melatonin receptor expression in dysplastic and non-dysplastic colorectal polyps and to explore its relationship with dysplasia grade, proliferative-apoptotic activity, hormone receptor expression, and stem cell characteristics. The review discusses the biological functions of MT1 and MT2 receptors, their involvement in major signalling pathways including Wnt/ β -catenin and MAPK/ERK, and their potential contribution to colorectal tumor initiation and progression.

Available evidence suggests that reduced melatonin receptor expression may be associated with dysplastic progression, increased cellular proliferation, impaired apoptosis, and a more aggressive biological phenotype. Furthermore, melatonin signalling appears to interact with hormonal regulatory mechanisms and stem-cell-associated pathways, highlighting its potential role in colorectal carcinogenesis. A better understanding of melatonin receptor biology may contribute to the identification of novel diagnostic, prognostic, and predictive biomarkers and support the development of personalised therapeutic strategies for patients with colorectal polyps and colorectal cancer.

Keywords: Melatonin, Melatonin Receptors, MT1, MT2, Colorectal Polyps, Dysplasia, Colorectal Cancer, β -Catenin, Cell Proliferation, Apoptosis, Stem Cells, Hormone Receptors.

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ლაშა ჩინჩალაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი;

Lasha Chinchaladze - PhD student at Tbilisi State Medical University;

E-mail: lashachinchaladze1993@gmail.com

+995568 011 886

თამარ სალაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი

Tamar Saladze - Associate Professor, Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University

E-mail: t.saladze@tsmu.edu

გიორგი ბურკაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;

George Burkadze - Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department of Molecular Pathology;

E-mail: burkadze@yahoo.com g.burkadze@tsmu.edu

Phone Number: 599578833

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

შოთა კეპულაძე - თსსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; MD; Pathologist;

E-mail: Shota.kepuladze@gmail.com sh.kepuladze@tsmu.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

მელატონინის რეცეპტორების განაწილების თავისებურებები ძუძუს კიბოსა და კიბოსწინარე დაზიანებების სხვადასხვა ჰისტოლოგიურ ტიპებში (ლიტერატურის კრიტიკული მიმოხილვა)

თამარ ყატაშვილი¹; ირაკლი კოხრეიძე²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ონკოლოგიის კათედრის ასოცირებული პროფესორი; ³თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის პროფესორი; ⁴თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის პათოლოგანატომი; მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი

აბსტრაქტი

მელატონინი წარმოადგენს მრავალფუნქციურ ჰორმონს, რომელიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ცირკადული რიტმების რეგულაციაში, ანტიოქსიდანტურ დაცვაში, იმუნური პასუხის მოდულაციაში და სიმსივნის საწინააღმდეგო მექანიზმებში. ბოლო წლებში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მელატონინის რეცეპტორების (MT1 და MT2) როლს ძუძუს კიბოს ბიოლოგიაში, მათ შორის სიმსივნის პროგრესირებაში, ჰორმონულ რეგულაციასა და მკურნალობისადმი მგრძნობელობაში.

აღნიშნული ლიტერატურის მიმოხილვის მიზანია ლიტერატურული მონაცემების კრიტიკული ანალიზი მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის, ბიოლოგიური ფუნქციებისა და კლინიკური მნიშვნელობის შესახებ ძუძუს კიბოსა და კიბოსწინარე დაზიანებების სხვადასხვა ჰისტოლოგიურ და მოლეკულურ ტიპებში.

არსებული ლიტერატურული მონაცემები მიუთითებს, რომ MT1 და MT2 რეცეპტორები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ უჯრედული ციკლის რეგულაციაზე, აპოპტოზის ინდუქციაზე, ანგიოგენეზისა და მეტასტაზირების პროცესებზე. მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია უფრო მაღალია ჰორმონრეცეპტორ-დადებით სიმსივნეებში, განსაკუთრებით ლუმინალურ ქვეტიპებში, ხოლო სამმაგად უარყოფით კარცინომებში ხშირად დაქვეითებულია. მელატონინის სიგნალიზაცია ასოცირებულია ესტროგენის რეცეპტორული აქტივობის შემცირებასთან, ოქსიდაციური სტრესის დათრგუნვასთან და სიმსივნის პროგრესირების შეზღუდვასთან. ასევე აღინიშნება მელატონინის

რეცეპტორების არსებობა ძუძუს სადინის ატიპიურ ჰიპერპლაზიასა და სადინრულ კარცინომა in situ-ში, რაც მათ პოტენციურ პროგნოზულ ბიომარკერებად წარმოაჩენს.

მელატონინის რეცეპტორები წარმოადგენენ პერსპექტიულ ბიოლოგიურ და კლინიკურ სამიზნეებს ძუძუს კიბოსა და კიბოსწინარე დაზიანებების კვლევაში. მათი ექსპრესიის შეფასებამ შესაძლოა ხელი შეუწყოს დაავადების პროგნოზის გაუმჯობესებას, რისკის სტრატეგიკაციასა და ინდივიდუალურად მორგებული თერაპიული სტრატეგიების შემუშავებას.

საკვანძო სიტყვები: მელატონინი, MT1, MT2, ძუძუს კიბო, კიბოსწინარე დაზიანებები, სადინრის კარცინომა in situ, ატიპიური ჰიპერპლაზია, ესტროგენის რეცეპტორი, აპოპტოზი, ოქსიდაციური სტრესი.

მელატონინი არის ჰორმონი, რომელიც ძირითადად წარმოიქმნება ჰიპოფიზში და გადამწყვეტ როლს ასრულებს ცირკადული რიტმების რეგულირებასა და სხვადასხვა ფიზიოლოგიურ პროცესებში.[1] ის სინთეზირდება სეროტონინისაგან ფერმენტული რეაქციების სერიის მეშვეობით, მათ შორის არილალკილამინის N-აცეტილტრანსფერაზას (AANAT) და ჰიდროქსიინდოლ-O-მეთილტრანსფერაზას (HIOMT) მოქმედებით. მელატონინის გამომუშავება მჭიდროდ არის დაკავშირებული სინათლისა და სიბნელის ციკლთან, ის პიკურ დონეს ღამის განმავლობაში აღწევს. ძილის მარეგულირებელი ეფექტის გარდა, მელატონინი ავლენს ბიოლოგიური აქტივობის ფართო სპექტრს, მათ შორის ანტიოქსიდანტურ, ანთების საწინააღმდეგო და ონკოსტატიკურ თვისებებს, რაც ხელს უწყობს კიბოს პრევენციასა და მკურნალობას.[2] მელატონინის ანტიოქსიდანტური მოქმედება ხელს უწყობს თავისუფალი რადიკალებისა და ჟანგბადის რეაქტიული სახეობების (ROS) განეიტრალებას, რომლებიც მონაწილეობენ დნმ-ის დაზიანებასა და კანცეროგენეზში. გარდა ამისა, მელატონინი აძლიერებს ანტიოქსიდანტური ფერმენტების აქტივობას, როგორიცაა სუპეროქსიდ დისმუტაზა (SOD) და გლუტათიონ პეროქსიდაზა (GPx), რაც უზრუნველყოფს არაპირდაპირ ანტიოქსიდანტურ ეფექტს.[3]

ნაჩვენებია, რომ მელატონინი არეგულირებს იმუნურ ფუნქციას, არეგულირებს უჯრედულ მეტაბოლიზმს და ახდენს ანტიპროლიფერაციულ ეფექტს, რაც მას კიბოს ბიოლოგიის უკეთ შესწავლისათვის ინტერესის მთავარ მოლეკულად აქცევს. მელატონინის ანთების საწინააღმდეგო თვისებები განპირობებულია მისი უნარით დათრგუნოს პრო-ანთებითი ციტოკინების გამომუშავება, როგორიცაა სიმსივნის ნეკროზის ფაქტორი-ალფა (TNF- α) და ინტერლეიკინ-6 (IL-6), ასევე მოახდინოს მისი დათრგუნვა. ბირთვული ფაქტორის კაპა B (NF- κ B) სიგნალიზაციის საშუალებით. ეს

თვისებები განსაკუთრებით აქტუალურია კიბოს კონტექსტში, სადაც ანთება და ოქსიდაციური სტრესი მნიშვნელოვან როლს თამაშობს სიმსივნის ინიცირებაში, პროგრესირებასა და მეტასტაზირების საფეხურზე.

მელატონინი ავლენს თავის ბიოლოგიურ ეფექტს ორი ძირითადი რეცეპტორის, MT1 და MT2 მეშვეობით, რომლებიც მიეკუთვნებიან G-პროტეინის დაწყვილებული რეცეპტორების (GPCR) ოჯახს. ეს რეცეპტორები ჩართულნი არიან სხვადასხვა უჯრედშიდა სასიგნალო გზებში, მათ შორის ციკლური ადენოზინმონოფოსფატის მოდულაციაში (cAMP), კალციუმის ჰომეოსტაზისა და ესტროგენის გზებთან ურთიერთქმედებაში. [3]

MT1 რეცეპტორი, კოდირებული MTNR1A გენით, უპირველეს ყოვლისა მონაწილეობს cAMP-ის წარმოქმნის ინჰიბირებაში, რითაც ამცირებს პროტეინ კინაზა A (PKA) აქტივობას და ცვლის უჯრედულ პასუხს. MT2 რეცეპტორი, კოდირებული MTNR1B გენით, ჩართულია ცირკადული რიტმების რეგულირებასა და უჯრედშიდა კალციუმის დონის მოდულაციაში. [4]

MT1 და MT2 რეცეპტორები ექსპრესირებულია სხვადასხვა პერიფერიულ ქსოვილებში, მათ შორის ძუძუს ქსოვილში, სადაც ისინი შუამავლობენ მელატონინის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტს. ამ რეცეპტორების გააქტიურება იწვევს სასიგნალო მოვლენების ჩართვას, რომლებსაც შეუძლიათ გავლენა მოახდინონ უჯრედების პროლიფერაციაზე, აპოპტოზსა და ანგიოგენეზზე, რაც გადამწყვეტია კიბოს განვითარებაში. MT1 და MT2 რეცეპტორებს ასევე შეუძლიათ ურთიერთქმედება ესტროგენის რეცეპტორის (ER) სასიგნალო გზასთან, რითაც მოდულირებენ ესტროგენის შუამავლობით უჯრედების პროლიფერაციას. ძუძუს კიბოს დროს მელატონინი ამცირებს ER α ტრანსკრიპციულ აქტივობას, რამაც შეიძლება ხელი შეუწყოს მის ანტიპროლიფერაციულ ეფექტს ჰორმონის რეცეპტორებზე დადებითი ძუძუს კიბოს ქვეტიპებში. [4], [5]

MT1 რეცეპტორი უპირველეს ყოვლისა აფერხებს ციკლური ადენოზინმონოფოსფატის (cAMP) დაგროვებას ადენილატციკლასას ინჰიბირებით, რითაც ამცირებს პროტეინ კინაზა A (PKA) აქტივობას. ეს დათრგუნვა იწვევს შეცვლილ უჯრედულ პასუხებს, რამაც შეიძლება გავლენა მოახდინოს უჯრედების ზრდაზე, დიფერენციაციაზე და აპოპტოზზე. MT1 რეცეპტორი ასევე თამაშობს როლს უჯრედული ციკლის პროგრესირების რეგულირებაში G1 ფაზიდან S ფაზაზე გადასვლის ინჰიბირებით, რითაც ამცირებს უჯრედების პროლიფერაციას. ძუძუს კიბოს კონტექსტში, MT1 რეცეპტორის უნარი მოახდინოს უჯრედული ციკლის პროგრესირება და ხელი შეუწყოს აპოპტოზს, ხდის მას მელატონინის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტების მნიშვნელოვან მედიატორად. [6]

MT2 რეცეპტორი მონაწილეობს ცირკადული რიტმების რეგულირებაში და კალციუმის სიგნალის მოდულაციაში. ნაჩვენებია, რომ ის არეგულირებს კალციუმის იონების შემოდინებას და გადინებას, რომლებიც გადამწყვეტია სხვადასხვა უჯრედული

ფუნქციისთვის, მათ შორის კუნთების შეკუმშვა, ნეიროტრანსმიტერების განთავისუფლება და უჯრედების პროლიფერაცია. ძუძუს კიბოს უჯრედებში MT2 რეცეპტორი მონაწილეობს უჯრედების სიცოცხლისუნარიანობის შემცირებაში და აპოპტოზის ინდუქციაში კალციუმის უჯრედშიდა დონის მოდულაციის გზით. MT2 რეცეპტორი ასევე თამაშობს როლს ორგანიზმის შიდა საათის შესანარჩუნებასა და ფიზიოლოგიური პროცესების გარე გარემოსთან სინქრონიზაციაში.[7]

MT1 და MT2 რეცეპტორების უჯრედული ლოკალიზაცია გადამწყვეტია მათი როლის გასაგებად მელატონინის ეფექტების შუამავლობაში. ორივე რეცეპტორი უპირველეს ყოვლისა ლოკალიზებულია პლაზმურ მემბრანაში, სადაც ისინი ურთიერთქმედებენ უჯრედგარე მელატონინთან, რათა დაიწყოს უჯრედშიდა სასიგნალო კასკადები. თუმცა, კვლევებმა ასევე აჩვენა მელატონინის რეცეპტორების არსებობა უჯრედშიდა განყოფილებებში, მათ შორის მიტოქონდრიაში და ბირთვში. მელატონინის რეცეპტორების მიტოქონდრიული ლოკალიზაცია მიუთითებს როლზე მიტოქონდრიის ფუნქციის რეგულირებაში, მათ შორის ოქსიდაციური სტრესის კონტროლის, მიტოქონდრიული მემბრანის პოტენციალისა და აპოპტოზის ჩათვლით. კიბოს უჯრედების მეტაბოლიზმსა და გადარჩენაში მიტოქონდრიის მნიშვნელობის გათვალისწინებით, ამ ორგანოებში მელატონინის რეცეპტორების არსებობამ შეიძლება მნიშვნელოვანი გავლენა მოახდინოს ძუძუს კიბოს ბიოლოგიაზე.[8], [9]

მელატონინის რეცეპტორების, განსაკუთრებით MT1-ის ბირთვული ლოკალიზაცია ასევე დაფიქსირდა უჯრედების გარკვეულ ტიპებში. ბირთვულ MT1 რეცეპტორებს შეუძლიათ უშუალოდ იმოქმედონ ტრანსკრიფციის ფაქტორებთან და გავლენა მოახდინონ გენის ექსპრესიაზე, რითაც მოდულირებენ უჯრედულ რეაქციას მელატონინზე. ბირთვულმა სასიგნალო გზამ შეიძლება ხელი შეუწყოს უჯრედების პროლიფერაციის, დიფერენციაციისა და აპოპტოზის რეგულირებას, რაც კიბოს განვითარებისა და პროგრესირების კრიტიკულ პროცესებს წარმოადგენს. მელატონინის რეცეპტორების არსებობა სხვადასხვა უჯრედულ ნაწილებში მელატონინის სიგნალიზაციის მექანიზმებს განსაკუთრებულ სირთულეს მატებს და ხაზს უსვამს შემდგომი კვლევის საჭიროებას.

მელატონინის რეცეპტორები ააქტიურებენ სხვადასხვა უჯრედშიდა სასიგნალო გზებს, რომლებიც შუამავლობენ ჰორმონების ბიოლოგიურ ეფექტს. პირველადი სასიგნალო გზა, რომელიც გააქტიურებულია MT1 და MT2 რეცეპტორებით, მოიცავს ადენილატ ციკლაზას ინჰიბირებას, რაც იწვევს cAMP-ის დონის შემცირებას. cAMP-ის შემცირებული დონე იწვევს PKA-ს აქტივაციის შემცირებას, რაც თავის მხრივ გავლენას ახდენს უჯრედების ზრდაში, დიფერენციაციასა და აპოპტოზში ჩართული სხვადასხვა სამიზნე ცილების ფოსფორილირებაზე. ეს cAMP-PKA გზა არის ერთ-ერთი მთავარი მექანიზმი, რომლითაც მელატონინი ახდენს თავის ანტიპროლიფერაციულ ეფექტს ძუძუს კიბოს უჯრედებში.[9]

cAMP-PKA გზის გარდა, მელატონინის რეცეპტორები ასევე ააქტიურებენ სხვა სასიგნალო გზებს, რომლებიც გარკვეულ როლს თამაშობენ კიბოს ბიოლოგიაში. ეს მოიცავს მიტოგენით გააქტიურებული პროტეინ კინაზას (MAPK) გზას, ფოსფოინოზიტიდ 3-კინაზას (PI3K)/Akt გზას და კალციუმ/კალმოდულინზე დამოკიდებული პროტეინ კინაზას (CaMK) გზას. MAPK გზა ჩართულია უჯრედების ზრდის, დიფერენციაციისა და აპოპტოზის რეგულირებაში და მელატონინის რეცეპტორების მიერ მისმა გააქტიურებამ შეიძლება გამოიწვიოს პრო-აპოპტოზური ან ანტიაპოპტოზური ეფექტები, რაც დამოკიდებულია უჯრედულ კონტექსტზე. ძუძუს კიბოს უჯრედებში მელატონინი ააქტიურებს p38 MAPK გზას, რომელიც დაკავშირებულია აპოპტოზის ინდუქციასთან და უჯრედების პროლიფერაციის ინჰიბირებასთან.[10]

PI3K/Akt გზა არის კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი სასიგნალო გზა, რომელიც გააქტიურებულია მელატონინის რეცეპტორებით. PI3K-ის გააქტიურება იწვევს ფოსფატიდილინოზიტოლ-3,4,5-ტრიფოსფატის (PIP3) გამომუშავებას, რომელიც თავის მხრივ ააქტიურებს Akt-ს, სერინს/თრეონინ კინაზას, რომელიც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს უჯრედების გადარჩენისა და ზრდის ხელშეწყობაში. ნაჩვენებია, რომ მელატონინი აფერხებს PI3K/Akt გზას ძუძუს კიბოს უჯრედებში, რაც იწვევს უჯრედების სიცოცხლისუნარიანობის შემცირებას და აპოპტოზის გაზრდას. ეს ინჰიბიტორული ეფექტი PI3K/Akt გზაზე განსაკუთრებით აქტუალურია ძუძუს კიბოს კონტექსტში, რადგან ამ გზის ჰიპერაქტივაცია ჩვეულებრივ ასოცირდება სიმსივნის ზრდასთან, აპოპტოზისადმი რეზისტენტობასთან და ცუდ პროგნოზთან.

კალციუმ/კალმოდულინზე დამოკიდებული პროტეინ კინაზას (CaMK) გზა ასევე გააქტიურებულია მელატონინის რეცეპტორებით, განსაკუთრებით MT2-ით, რომელიც არეგულირებს უჯრედშიდა კალციუმის დონეს. კალციუმი არის მნიშვნელოვანი მეორე მესენჯერი, რომელიც მონაწილეობს უჯრედულ პროცესების ფართო სპექტრში, მათ შორის უჯრედების პროლიფერაციაში, აპოპტოზისა და დიფერენციაციაში. უჯრედშიდა კალციუმის დონის მოდულირებით, მელატონინის რეცეპტორებს შეუძლიათ გავლენა მოახდინონ ამ პროცესებზე და ხელი შეუწყონ მელატონინის კიბოს საწინააღმდეგო მოქმედებას. უჯრედშიდა კალციუმის დონის მატებამ შეიძლება გამოიწვიოს პრო-აპოპტოზური გზების გააქტიურება, როგორცაა ციტოქრომის c გამოყოფა მიტოქონდრიიდან და კასპაზების გააქტიურება, რომლებიც არის ფერმენტები, რომლებიც ცენტრალურ როლს ასრულებენ აპოპტოზის განხორციელებაში.[11]

ერთ-ერთი მთავარი მექანიზმი, რომლითაც მელატონინი ავლენს თავის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტს ძუძუს კიბოს დროს, არის მისი ურთიერთქმედება ესტროგენის რეცეპტორების (ER) სასიგნალო გზებთან. ნაჩვენებია, რომ მელატონინი აფერხებს ესტროგენის სიგნალიზაციას ER α -ის ექსპრესიის შემცირებით. ER α ექსპრესიის ეს შემცირება იწვევს ესტროგენის ტრანსკრიფციის შემცირებას და სიმსივნის ზრდის დათრგუნვას.

მელატონინს ასევე შეუძლია შეაფერხოს ესტრადიოლის, ესტროგენის ყველაზე ძლიერი ფორმა, ER α -სთან შეკავშირება, რითაც ხელს უშლის ესტროგენზე პასუხისმგებელი გენების გააქტიურებას. ეს კონკურენტული დათრგუნვა შუამავლობით ხდება MT1 რეცეპტორების გააქტიურებით, რომლებიც ცნობილია ურთიერთქმედებით ER α -სთან და ამცირებს მის ტრანსკრიპციულ აქტივობას. ესტროგენის სიგნალის დათრგუნვით, მელატონინს შეუძლია ეფექტურად შეამციროს ER-დადებითი ძუძუს კიბოს უჯრედების პროლიფერაცია და გააძლიეროს ანტიესტროგენული თერაპიის ეფექტურობა, როგორცაა ტამოქსიფენი. მელატონინის უნარი, მოახდინოს ესტროგენის რეცეპტორების გზების მოდულირება, ხაზს უსვამს მის პოტენციალს, როგორც დამხმარე თერაპიას ჰორმონ-რეცეპტორზე დადებითი ძუძუს კიბოს შემთხვევებში.

მელატონინის რეცეპტორები თამაშობენ გადამწყვეტ როლს უჯრედული ციკლის რეგულირებაში და აპოპტოზის ხელშეწყობაში, ორივე აუცილებელი ფაქტორია უჯრედების უკონტროლო ზრდისა და სიმსივნის განვითარების თავიდან ასაცილებლად. მელატონინის მიერ MT1 და MT2 რეცეპტორების გააქტიურება იწვევს უჯრედული ციკლის პროგრესირების დათრგუნვას G1/S გადასვლაზე, რაც წარმოადგენს საკვანძო პუნქტს უჯრედების პროლიფერაციის რეგულირებაში. ეს დათრგუნვა შუამავლობით ხდება ციკლინის D1-ის, პროტეინის დაქვეითებით, რომელიც საჭიროა უჯრედული ციკლის G1 ფაზიდან S ფაზაზე გადასასვლელად. ციკლინის D1 დონის შემცირებით, მელატონინს შეუძლია ეფექტურად შეაჩეროს ძუძუს კიბოს უჯრედების პროლიფერაცია და თავიდან აიცილოს სიმსივნის ზრდა.

უჯრედულ ციკლზე მისი ზემოქმედების გარდა, მელატონინი ასევე ხელს უწყობს აპოპტოზს როგორც შინაგანი, ასევე გარეგანი აპოპტოზური გზების გააქტიურების გზით. შინაგანი გზა, რომელიც ასევე ცნობილია როგორც მიტოქონდრიული გზა, გააქტიურებულია პრო-აპოპტოზური ფაქტორების, როგორცაა ციტოქრომი c, მიტოქონდრიიდან განთავისუფლებით. ნაჩვენებია, რომ მელატონინი აძლიერებს ციტოქრომ c-ის გამოყოფას პრო-აპოპტოზური ცილების ექსპრესიის გაზრდით, როგორცაა Bax, და ამცირებს ანტიაპოპტოზური ცილების ექსპრესიას, როგორცაა Bcl-2. პრო- და ანტი-აპოპტოზური ცილების ბალანსის ეს ცვლილება იწვევს კასპაზების გააქტიურებას, რომლებიც პასუხისმგებელნი არიან აპოპტოზის აღსრულებაზე.[12]

გარეგანი აპოპტოზური გზა გააქტიურებულია სიკვდილის ლიგანდების, როგორცაა Fas ლიგანდის (FasL) შეკავშირებით უჯრედის ზედაპირზე არსებულ შესაბამის რეცეპტორებთან. ნაჩვენებია, რომ მელატონინი ზრდის FasL-ისა და მისი რეცეპტორის, Fas-ის ექსპრესიას ძუძუს კიბოს უჯრედებში, რითაც ხელს უწყობს გარეგანი აპოპტოზური გზის გააქტიურებას. მელატონინის რეცეპტორების მიერ როგორც შინაგანი, ასევე გარეგანი გზების ერთობლივი გააქტიურება იწვევს აპოპტოზის მნიშვნელოვან ზრდას და ძუძუს კიბოს უჯრედების სიცოცხლისუნარიანობის შემცირებას.[13]

მელატონინი არის ცნობილი ანტიოქსიდანტი, რომელიც ავლენს თავის ეფექტს როგორც უშუალოდ, თავისუფალი რადიკალების განადგურებით, ასევე არაპირდაპირი გზით, ენდოგენური ანტიოქსიდანტური ფერმენტების აქტივობის გაძლიერებით. მელატონინის რეცეპტორების, განსაკუთრებით MT1-ის გააქტიურება გადამწყვეტ როლს თამაშობს ამ ანტიოქსიდანტური ეფექტების შუამავლობაში. მელატონინის რეცეპტორებს შეუძლიათ დაარეგულირონ ანტიოქსიდანტური ფერმენტების ექსპრესია, როგორცაა სუპეროქსიდის დისმუტაზა (SOD), გლუტათიონ პეროქსიდაზა (GPx) და კატალაზა, რომლებიც პასუხისმგებელნი არიან რეაქტიული ჟანგბადის სახეობების (ROS) ნეიტრალიზაციაზე და უჯრედების დაცვაზე ჟანგვითი დაზიანებისგან.

ოქსიდაციური სტრესი, რომელიც ხასიათდება დისბალანსით ROS-ის გამომუშავებასა და ორგანიზმის დეტოქსიკაციის უნარს შორის, არის კიბოს განვითარებისა და პროგრესირების მთავარი ხელშემწყობი ფაქტორი. ROS დონის შემცირებით და ანტიოქსიდანტური დაცვის გაძლიერებით, მელატონინის რეცეპტორები ხელს უწყობენ ნორმალური უჯრედების დაცვას ჟანგვითი დაზიანებისგან და ხელს უშლიან კარცინოგენეზის დაწყებას. ძუძუს კიბოს უჯრედებში მელატონინის რეცეპტორების გააქტიურება ამცირებს ოქსიდაციურ სტრესს, თრგუნავს უჯრედების პროლიფერაციას და ხელს უწყობს აპოპტოზს, რითაც ხელს უწყობს მელატონინის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტს.[14], [15]

მელატონინის ანტიოქსიდანტური ეფექტი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ძუძუს კიბოს კონტექსტში, რადგან გაზრდილი ROS დონე ასოცირდება სიმსივნის ზრდასთან, მეტასტაზებთან და თერაპიისადმი რეზისტენტობასთან. ROS დონის მოდულირებით და ანტიოქსიდანტური თავდაცვის გაძლიერებით, მელატონინის რეცეპტორებმა შეიძლება ხელი შეუწყონ კიბოს ჩვეულებრივი მკურნალობის ეფექტურობის გაუმჯობესებას, როგორცაა ქიმიოთერაპია და რადიაციული თერაპია, რომლებიც ხშირად ეყრდნობიან ROS-ს წარმოქმნას კიბოს უჯრედების სიკვდილის გამოწვევის მიზნით. გარდა ამისა, მელატონინის ანტიოქსიდანტურმა ეფექტებმა შეიძლება ხელი შეუწყოს ამ მკურნალობის გვერდითი ეფექტების შემცირებას ნორმალური უჯრედების დაცვით ოქსიდაციური დაზიანებისგან.

ძუძუს კიბო არის უაღრესად ჰეტეროგენული დაავადება, რომელიც ხასიათდება სხვადასხვა ჰისტოლოგიური ქვეტიპებით, თითოეული განსხვავებული ბიოლოგიური და კლინიკური ქცევით. ყველაზე გავრცელებული ჰისტოლოგიური ტიპია ინვაზიური სადინროვანი კარცინომა (IDC), რომელიც შეადგენს ძუძუს კიბოს ყველა შემთხვევის დაახლოებით 70-80%-ს. ინვაზიური ლობულური კარცინომა (ILC) არის მეორე ყველაზე გავრცელებული ტიპი, რომელიც მოიცავს ძუძუს კიბოს შემთხვევების დაახლოებით 10-15%-ს. ILC გამოირჩევა ზრდის უნიკალური ნიმუშით, რომლის დროსაც კიბოს უჯრედები ვრცელდება ცალკეული, იზოლირებული უჯრედის სახით, ხშირად პალპაციური მასის წარმოქმნის გარეშე. ზრდის ამ ტიპს შეუძლია ILC უფრო რთულად

აღმოსაჩენი გახადოს ფიზიკური გამოკვლევისა და ვიზუალიზაციის ტექნიკით IDC-სთან შედარებით.

ძუძუს კიბოს სხვა ნაკლებად გავრცელებული ჰისტოლოგიური ქვეტიპები მოიცავს მუცინურ კარცინომას, ტუბულურ კარცინომას, მედულარული კარცინომას და მეტაპლაზიურ კარცინომას. მუცინური კარცინომა, რომელიც ასევე ცნობილია როგორც კოლოიდური კარცინომა, ხასიათდება უჯრედგარე მუცინის წარმოქმნით, რომელიც აკრავს სიმსივნურ უჯრედებს. ამ ქვეტიპს ზოგადად ხელსაყრელი პროგნოზი აქვს IDC-სთან შედარებით. ტუბულარული კარცინომა შედგება კარგად ჩამოყალიბებული მილაკოვანი სტრუქტურებისგან და როგორც წესი, ასოცირდება შესანიშნავ პროგნოზთან. მედულარული კარცინომა ხასიათდება მაღალი ხარისხის სიმსივნის ლიმფოციტური ინფილტრაციით, რამაც შეიძლება ხელი შეუწყოს მის შედარებით უკეთეს შედეგს, მიუხედავად მისი აგრესიული ჰისტოლოგიური ნიშნებისა. მეტაპლაზიური კარცინომა იშვიათი და აგრესიული ქვეტიპია, რომელიც ავლენს შერეულ ეპითელურ და მეზენქიმურ დიფერენციაციას, რაც ხშირად უფრო ცუდი კლინიკური შედეგების საფუძველი ხდება.[16]

ჰისტოლოგიური კლასიფიკაციის გარდა, ძუძუს კიბო შეიძლება დაიყოს მოლეკულური მახასიათებლების მიხედვით, რაც უზრუნველყოფს სიმსივნის ბიოლოგიურ ქცევას და მის რეაქციას მკურნალობაზე. ძუძუს კიბოს მოლეკულური კლასიფიკაცია მოიცავს ოთხ ძირითად ქვეტიპს: ლუმინალური A, ლუმინალურ B, HER2-დადებითი და სამმაგად უარყოფითი ძუძუს კიბო (TNBC). ლუმინალური A და B ქვეტიპები ორივე ჰორმონიულ რეცეპტორზე დადებითია, აქვსპრესირებს ესტროგენის რეცეპტორს (ER) და/ან პროგესტერონის რეცეპტორს (PR), მაგრამ განსხვავდება მათი პროლიფერაციული აქტივობით და კლინიკური შედეგებით. ლუმინალური A სიმსივნეები დაბალი ხარისხისაა, აქვთ დაბალი პროლიფერაციის მაჩვენებელი და ასოცირებულია ხელსაყრელ პროგნოზთან. მეორეს მხრივ, ლუმინალური B სიმსივნეები ავლენენ პროლიფერაციის უფრო მაღალ მაჩვენებელს, შეიძლება დააქვსპრესირონ HER2 და ზოგადად აქვთ ნაკლებად ხელსაყრელი პროგნოზი ლუმინალს A სიმსივნეებთან შედარებით.[17], [18]

HER2-დადებითი ძუძუს კიბო ხასიათდება ადამიანის ეპიდერმული ზრდის ფაქტორის რეცეპტორ 2 (HER2) ცილის გადაჭარბებული ექსპრესიით, რაც ხელს უწყობს სიმსივნის აგრესიულ ზრდას. HER2-დადებითი სიმსივნეები, როგორც წესი, მაღალი ხარისხისაა და დაკავშირებულია უფრო ცუდ პროგნოზთან, მაგრამ დამიზნებითი თერაპია, როგორიცაა ტრასტუზუმაბი (ჰერცეპტინი) მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს შედეგებს ამ ქვეტიპის მქონე პაციენტებისთვის. TNBC განისაზღვრება ER, PR და HER2 ექსპრესიის არარსებობით, არ რეაგირებს ჰორმონალურ თერაპიასა და HER2-ზე დამიზნებით მკურნალობაზე. TNBC ხშირად მაღალი ხარისხისაა, ავლენს უფრო აგრესიულ კლინიკურ მიმდინარეობას და აქვს მეტასტაზების უფრო მაღალი ალბათობა, განსაკუთრებით

ვისცერალურ ორგანოებსა და ცენტრალურ ნერვულ სისტემაში სპეციალიზირებული დამიზნებითი თერაპიის არარსებობის გამო, TNBC-ის მკურნალობის ვარიანტები შემოიფარგლება ქიმიოთერაპიით და პროგნოზი რჩება უფრო ცუდი სხვა ქვეტიპებთან შედარებით.[19]

ძუძუს კიბოსწინარე დაზიანება, როგორცაა სადინროვანი ატიპიური ჰიპერპლაზია (ADH) და სადინროვანი კარცინომა in situ (DCIS), წარმოადგენს ძუძუს ინვაზიური კიბოს პროგრესირების ადრეულ ეტაპებს. ADH ხასიათდება სადინრის ეპითელური უჯრედების ჭარბი პროლიფერაციით, დაბალი ხარისხის DCIS-ის ზოგიერთი, მაგრამ არა ყველა მახასიათებლით. ADH განიხილება ძუძუს კიბოს გაზრდილი რისკის მარკერად, ქალებს, რომლებსაც ADH-ის დიაგნოზი აქვთ, აქვთ ოთხიდან ხუთჯერ მეტი ინვაზიური ძუძუს კიბოს განვითარების რისკი ზოგად პოპულაციასთან შედარებით. მეორეს მხრივ, DCIS არის არაინვაზიური ძუძუს დაზიანება, რომელშიც პათოლოგიური უჯრედები შემოიფარგლება სადინრის შიდა სივრცეში და ჯერ არ შეჭრილა მიმდებარე ძუძუს ქსოვილში. DCIS კლასიფიცირებულია ბირთვული ხარისხის (დაბალი, შუალედური ან მაღალი) და კომედო ნეკროზის არსებობის ან არარსებობის საფუძველზე, რაც მნიშვნელოვანი ფაქტორებია ინვაზიური კარცინომის პროგრესირების რისკის განსაზღვრაში.

DCIS განიხილება ინვაზიური ძუძუს კიბოს უშუალო წინამორბედად, მკურნალობის გარეშე ავთვისებიანი პროგრესირების პოტენციალით. DCIS-დან ინვაზიურ კარცინომამდე პროგრესირების რისკი დამოკიდებულია სხვადასხვა ფაქტორზე, მათ შორის ბირთვული პოლიმორფიზმის ხარისხზე, დაავადების ხარისხზე და კომედო ნეკროზის არსებობაზე. დაბალი ხარისხის DCIS-ს აქვს პროგრესირების შედარებით დაბალი რისკი მაღალი ხარისხის DCIS-თან შედარებით, რომელიც უფრო სავარაუდოა, რომ გადაიზარდოს აგრესიულ ინვაზიურ კარცინომაში. DCIS-ის მკურნალობა, როგორც წესი, მოიცავს ძუძუს შემანარჩუნებელ ოპერაციას (ლამფექტომი) სხივური თერაპიით ან მის გარეშე და ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება რეკომენდებული იყოს ენდოკრინული თერაპია რეციდივის ან პროგრესირების რისკის შესამცირებლად.[20]

პროგრესირება კიბოსწინარე დაზიანებიდან ძუძუს ინვაზიურ კიბომდე, მიჩნეულია, რომ მოიცავს გენეტიკურ და ეპიგენეტიკურ ცვლილებებს, რაც იწვევს ნორმალური ეპითელური უჯრედების ავთვისებიან უჯრედებად ტრანსფორმაციას. ეს ცვლილებები მოიცავს ონკოგენებსა და სიმსივნის სუპრესორული გენების მუტაციებს, დნმ-ის მეთილაციის ტიპების ცვლილებებს და უჯრედების სასიგნალო გზების ცვლილებას, რომლებიც არეგულირებენ უჯრედების პროლიფერაციას, აპოპტოზს და დიფერენციაციას.

მოლეკულური ცვლილებების გაგება, რომლებიც ხდება ADH-დან და DCIS-დან ინვაზიურ ძუძუს კიბოსკენ პროგრესირების დროს, გადამწყვეტია რისკის პოტენციური

ბიომარკერების იდენტიფიცირებისთვის და მიზნობრივი ინტერვენციების შემუშავებისთვის ინვაზიური დაავადების განვითარების თავიდან ასაცილებლად.

ძუძუს კიბო არსებითად ჰეტეროგენულია, როგორც პაციენტებს შორის (სიმსივნეთაშორისი ჰეტეროგენულობა), ასევე ცალკეულ სიმსივნეებში (სიმსივნისშიდა ჰეტეროგენულობა). სიმსივნეთაშორისი ჰეტეროგენულობა გულისხმობს განსხვავებებს სიმსივნეების გენეტიკურ, ეპიგენეტიკურ და ფენოტიპურ მახასიათებლებში სხვადასხვა პაციენტისგან, რამაც შეიძლება გავლენა მოახდინოს მათ პასუხზე მკურნალობაზე და საერთო პროგნოზზე. თავის მხრივ, სიმსივნის შიდა ჰეტეროგენულობა გულისხმობს კიბოს უჯრედების მრავალჯერადი სუბპოპულაციის არსებობას განსხვავებული მოლეკულური და ფენოტიპური პროფილებით ერთი სიმსივნის შიგნით. ეს ჰეტეროგენულობა შეიძლება წარმოიშვას გენეტიკური მუტაციების, ეპიგენეტიკური ცვლილებებისა და სიმსივნის მიკროგარემოს ვარიაციებიდან და ის მნიშვნელოვან გამოწვევებს უქმნის ძუძუს კიბოს ეფექტურ მკურნალობას.

ერთი სიმსივნე შეიძლება შეიცავდეს ER-დადებით რეგიონებს და ER-უარყოფით რეგიონებს, რამაც შეიძლება გავლენა მოახდინოს სიმსივნის პასუხზე ენდოკრინულ თერაპიაზე. ანალოგიურად, HER2-ის ექსპრესია შეიძლება იყოს ჰეტეროგენული სიმსივნის შიგნით, ზოგიერთი უბანი ავლენს ძლიერ გადაჭარბებულ ექსპრესიას და სხვები მცირე ან საერთოდ ექსპრესიის არარსებობას. ამ სიმსივნურმა ჰეტეროგენულობამ შეიძლება გამოიწვიოს რეზისტენტობა დამიზნებითი თერაპიის მიმართ, რადგან კიბოს უჯრედების ქვეპოპულაციებმა შეიძლება გააგრძელონ პროლიფერაცია მკურნალობის მიუხედავად.

ძუძუს კიბოს ჰეტეროგენულობას აქვს მნიშვნელოვანი კლინიკური გავლენა, განსაკუთრებით დიაგნოზის, მკურნალობისა და პროგნოზის თვალსაზრისით. მრავალი მოლეკულური ქვეტიპის არსებობა ერთ სიმსივნეში შეიძლება გახდეს დაბრკოლება სიმსივნის ზუსტად კლასიფიკაციისა და მისი ქცევის პროგნოზირების საქმეში. ამან განაპირობა მულტიგენური ანალიზის განვითარება, როგორიცაა Oncotype DX და MammaPrint, რომლებიც აანალიზებენ მრავალი გენის ექსპრესიას, რათა უზრუნველყონ სიმსივნის რეციდივის რისკისა და მკურნალობაზე პასუხის ალბათობის უფრო სრულყოფილი შეფასება. ეს ანალიზები გახდა ღირებული ინსტრუმენტები მკურნალობის გადაწყვეტილების წარმართვისთვის, განსაკუთრებით იმ პაციენტებისთვის, რომლებსაც აქვთ ჰორმონული რეცეპტორ-დადებითი, HER2-უარყოფითი ძუძუს კიბო.[21], [22]

ძუძუს კიბოს ჰეტეროგენულობა ასევე ხაზს უსვამს პერსონალიზებული მკურნალობის მიდგომების საჭიროებას, რომელიც ითვალისწინებს თითოეული პაციენტის სიმსივნის უნიკალურ მოლეკულურ და ფენოტიპურ მახასიათებლებს. მიზანმიმართულმა თერაპიამ, როგორიცაა HER2 ინჰიბიტორები და CDK4/6 ინჰიბიტორები, გააუმჯობესა

შედეგები პაციენტებში ძუძუს კიბოს სპეციფიკური ქვეტიპებით, მაგრამ სიმსივნური ჰეტეროგენურობის არსებობამ შეიძლება გამოიწვიოს რეზისტენტული ქვეკლონების გაჩენა და მკურნალობის წარუმატებლობა. კომბინირებული თერაპია, რომელიც მიზნად ისახავს რამდენიმე გზას ერთდროულად, შეიძლება დაეხმაროს ამ გამოწვევის დაძლევაში რეზისტენტული უჯრედების პოპულაციების ზრდის თავიდან ასაცილებლად.

ძუძუს კიბოს სხვადასხვა ჰისტოლოგიურ და მოლეკულურ ქვეტიპებში MT1 და MT2 რეცეპტორების ექსპრესია მნიშვნელოვნად განსხვავდება, რამაც შეიძლება ხელი შეუწყოს სიმსივნის ქცევის, პროგნოზის და მკურნალობაზე რეაგირების განსხვავებას. კვლევებმა აჩვენა, რომ MT1 რეცეპტორების ექსპრესია ზოგადად უფრო მაღალია ჰორმონულ რეცეპტორებზე დადებით სიმსივნეებში, ვიდრე ჰორმონის რეცეპტორ-უარყოფითი ქვეტიპები, როგორიცაა TNBC. MT1 რეცეპტორების ეს უფრო მაღალი ექსპრესია ჰორმონის რეცეპტორ-დადებით სიმსივნეებში შეიძლება ხელი შეუწყოს ამ პაციენტებში დაფიქსირებულ უკეთეს პროგნოზს, რადგან მელატონინს შეუძლია ეფექტურად დათრგუნოს ესტროგენის სიგნალიზაცია და შეამციროს სიმსივნის ზრდა.

ამის საპირისპიროდ, TNBC, რომელსაც არ აქვს ER, PR და HER2 ექსპრესია ხშირად აჩვენებს მელატონინის რეცეპტორების დაქვეითებულ რაოდენობას ან სრულ არარსებობას. TNBC-ში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის ნაკლებობამ შეიძლება ხელი შეუწყოს ამ ქვეტიპის აგრესიულ კლინიკურ ქცევას, რადგან მელატონინის ანტიპროლიფერაციული და პროაპოპტოზური ეფექტები ნაკლებად ეფექტურია მისი რეცეპტორების არარსებობის შემთხვევაში. მელატონინის რეცეპტორების შემცირებული ექსპრესია TNBC-ში ასევე ხაზს უსვამს ალტერნატიული თერაპიული საშუალებების საჭიროებას ძუძუს კიბოს ამ რთული ქვეტიპისთვის.[23]

HER2-დადებითი ძუძუს კიბოს შემთხვევებმა გარკვეულმა კვლევებმა აჩვენა მელატონინის რეცეპტორების ცვლადი ექსპრესია, ზოგიერთ კვლევაში მოხსენებულია MT1 და MT2 რეცეპტორების მაღალი დონე, ზოგში კი დაბალი ან არარსებულ ექსპრესია. მელატონინის რეცეპტორების როლი HER2-დადებითი ძუძუს კიბოს შემთხვევებში ნაკლებად მკაფიო რჩება, მაგრამ არსებობს მტკიცებულება, რომ მელატონინს შეუძლია გააძლიეროს HER2 მიზნობრივი თერაპიის ეფექტურობა, HER2 სასიგნალო გზების მოდულირებით და სიმსივნის ზრდის შემცირებით. საჭიროა შემდგომი კვლევა, რათა სრულად გავიგოთ მელატონინის რეცეპტორების როლი HER2-დადებითი ძუძუს კიბოს და მისი როგორც თერაპიული სამიზნის პოტენციალის გასაგებად.[24]

მელატონინსა და ER α -ს შორის ურთიერთქმედებამ MT1-ის საშუალებით შეიძლება გამოიწვიოს ესტროგენზე პასუხისმგებელი გენების ტრანსკრიპციული აქტივობის დაქვეითება, რითაც შეზღუდავს სიმსივნის ზრდას. ეს მექანიზმი ხაზს უსვამს მელატონინის პოტენციალს, გახდეს დამხმარე თერაპია ჰორმონ-რეცეპტორ-დადებითი

ძუძუს კიბოსთვის, განსაკუთრებით ლუმინალური A პაციენტებში, რომლებსაც აქვთ დაბალი რისკის დაზიანება და შეიძლება ისარგებლონ მელატონინის ანტიპროლიფერაციული ეფექტებით მნიშვნელოვანი დამატებითი გვერდითი ეფექტების გარეშე.

ლუმინალური B ძუძუს სიმსივნეები, რომლებსაც აქვთ უფრო მაღალი პროლიფერაციული აქტივობა და შეუძლიათ აექსპრესირებდნენ HER2, ასევე აჩვენებენ მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიას, თუმცა უფრო დაბალ დონეზე ვიდრე ლუმინალ A. მელატონინის როლი ლუმინალ B სიმსივნეებში შეიძლება უფრო რთული იყოს ჰორმონის რეცეპტორების პოზიტიურობის და HER2 გაძლიერების თანაარსებობის გამო. მელატონინის უნარს მოახდინოს როგორც ER, ასევე HER2 სასიგნალო გზების მოდულირება, შეიძლება უზრუნველყოს უნიკალური თერაპიული უპირატესობა. კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინს შეუძლია გააძლიეროს ენდოკრინული თერაპიის ეფექტურობა, როგორცაა ტამოქსიფენი, ისევე როგორც HER2-ზე მიზნობრივი თერაპიები, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ მელატონინი შეიძლება იყოს განსაკუთრებით სასარგებლო ლუმინალ B სიმსივნეების მქონე პაციენტებისთვის.

მელატონინის უნარმა შეამციროს ოქსიდაციური სტრესი და მოახდინოს იმუნური რეაქციების მოდულირება, შესაძლოა დაეხმაროს TNBC პროგრესირების დათრგუნვას და პაციენტის შედეგების გაუმჯობესებას. გარდა ამისა, მიმდინარეობს კვლევა TNBC-ში მელატონინის რეცეპტორების პოტენციური ამალღების რეგულაციის შესახებ ეპიგენეტიკური მოდიფიკაციების საშუალებით, რამაც შეიძლება გააძლიეროს TNBC უჯრედების რეაგირება მელატონინზე დაფუძნებულ თერაპიაზე.[25], [26], [27], [28]

მელატონინის, როგორც დამხმარე თერაპიის პოტენციური გამოყენება ძუძუს კიბოს მართვაში, მხარს უჭერს მის უნარს მოახდინოს ძირითადი სასიგნალო გზების მოდულირება, რომლებიც მონაწილეობენ სიმსივნის ზრდასა და პროგრესირებაში. ჰორმონის რეცეპტორებზე დადებითი ძუძუს კიბოს დროს, მელატონინის ურთიერთქმედება ER სასიგნალო გზებთან შეიძლება გაზარდოს ენდოკრინული თერაპიის ეფექტურობა, შეამციროს სიმსივნის ზრდა და გააუმჯობესოს პაციენტის შედეგები. HER2-დადებითი ძუძუს კიბოს დროს, მელატონინის უნარი დათრგუნოს HER2 სიგნალიზაცია და გააძლიეროს მიზნობრივი თერაპიის ეფექტები, იძლევა დასაბუთებას მისი გამოყენების HER2 ინჰიბიტორებთან ერთად.

TNBC-სთვის, სადაც მკურნალობის ვარიანტები შეზღუდულია, მელატონინის ანტიოქსიდანტურმა და იმუნომოდულატორულმა ეფექტებმა შეიძლება მოიტანოს გარკვეული თერაპიული სარგებელი, თუნდაც მელატონინის რეცეპტორების არარსებობის შემთხვევაში. საჭიროა შემდგომი კვლევა TNBC-ში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის გაძლიერების სტრატეგიების შესასწავლად და ამ რთულ ქვეტიპში მელატონინის პოტენციური სარგებლობის შესაფასებლად.

მელატონინის რეცეპტორები, კონკრეტულად MT1 და MT2, გამოვლენილია ძუძუს კიბოსწინარე დაზიანებებში, როგორიცაა ატიპიური სადინროვანი ჰიპერპლაზია (ADH) და სადინროვანი კარცინომა in situ (DCIS). ეს კიბოსწინარე მდგომარეობები წარმოადგენს ძუძუს ნორმალური ეპითელიუმიდან ინვაზიურ კარცინომამდე ტრანსფორმაციის პროცესის ადრეულ ეტაპებს. ამ დაზიანებებში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიას სავარაუდოა, რომ შეუძლია შეაფერხოს კიბოსწინარე უჯრედების პროგრესირება ინვაზიურ მდგომარეობამდე.

გარკვეული კვლევებით DCIS-ში ასევე აღინიშნა მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია, თუმცა კვლავ საჭიროებს დამატებით კვლევებს აღინიშნებოდა თუ არა მსგავსი ცვლილებები ყველა ტიპის (მაღალი და დაბალი ხარისხის) DCIS-ის შემთხვევებში. მელატონინის უნარი მოახდინოს ძირითადი პროცესების კორექცია, როგორიცაა ოქსიდაციური სტრესი, ანთება და ესტროგენის სიგნალიზაცია, შესაძლოა გადამწყვეტი იყოს DCIS-ის ინვაზიურ ძუძუს კარცინომად პროგრესირების ასაცილებლად.

კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინის რეცეპტორების არსებობა ამ კიბოსწინარე დაზიანებებში ასოცირდება პროგრესირების დაბალ რისკთან, რაც ვარაუდობს, რომ მელატონინის რეცეპტორის სტატუსი შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც ბიომარკერი ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის ალბათობის შესაფასებლად.

ითვლება, რომ მელატონინის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტი ძუძუს კიბოსწინარე დაზიანებებში განპირობებულია რამდენიმე ძირითადი მექანიზმით, მათ შორის ესტროგენის რეცეპტორების სიგნალიზაციის რეგულირება, უჯრედული ციკლის პროგრესირების მოდულაცია, აპოპტოზის ინდუქცია და ჟანგვის შემცირება. სტრესი. ADH და DCIS-ში მელატონინის ურთიერთქმედება ესტროგენის რეცეპტორებთან განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან ეს დაზიანებები ხშირად ჰორმონზეა დამოკიდებული და გამოწვეულია ესტროგენის სიგნალით. ნაჩვენებია, რომ მელატონინი აფერხებს ესტროგენის შეკავშირებას ER α -სთან, რითაც ამცირებს ესტროგენით შუამავლობით უჯრედულ პროლიფერაციას და ხელს უწყობს უფრო დიფერენცირებულ, ნაკლებად პროლიფერაციულ მდგომარეობას კიბოსწინარე უჯრედებში.[1], [29], [30], [31]

ესტროგენის სიგნალიზაციაზე მისი ზემოქმედების გარდა, მელატონინი ასევე არეგულირებს უჯრედული ციკლის პროგრესირებას ძუძუს კიბოსწინარე უჯრედებში ციკლინის ექსპრესიის დაქვეითებით და ციკლინდამოკიდებული კინაზას ინჰიბიტორების (CKI) რეგულაციებით, როგორიცაა p21 და p27. ეს იწვევს უჯრედული ციკლის გაჩერებას G1/S საგუშაგოზე, რაც ხელს უშლის პათოლოგიური უჯრედების უკონტროლო გამრავლებას. მელატონინის უნარი, გამოიწვიოს აპოპტოზი კიბოსწინარე უჯრედებში, კიდევ უფრო უწყობს ხელს მის დამცავ ეფექტს, რადგან ის ეხმარება

უჯრედების აღმოფხვრას გენეტიკური ან ეპიგენეტიკური ცვლილებებით, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ავთვისებიანი ტრანსფორმაცია.

მიუხედავად პერსპექტიული დასკვნებისა მელატონინის რეცეპტორების როლის შესახებ ძუძუს კიბოსწინარე დაზიანებებში, საჭიროა შემდგომი კვლევა მათი კლინიკური მნიშვნელობისა და პოტენციური გამოყენების სრულად გასაგებად. მომავალი კვლევები ფოკუსირებული უნდა იყოს მოლეკულური მექანიზმების გარკვევაზე, რომლებიც საფუძვლად უდევს მელატონინის დამცავ ეფექტებს ADH და DCIS-ში, ასევე იმ ფაქტორების იდენტიფიცირებაზე, რომლებიც არეგულირებენ მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიას ამ დაზიანებებში. მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე მოქმედი ფაქტორების გაგება შეიძლება დაგვეხმაროს კიბოსწინარე უჯრედებში რეცეპტორების დონის გაზრდის ახალი სტრატეგიების იდენტიფიცირებაში, რითაც გაზრდის მათ რეაგირებას მელატონინზე დაფუძნებულ თერაპიაზე.

გარდა ამისა, საჭიროა კლინიკური კვლევები მელატონინის, როგორც პროფილაქტიკური აგენტის ეფექტურობის შესაფასებლად პაციენტებში, რომლებსაც აქვთ კიბოსწინარე ძუძუს დაზიანება. ამ კვლევებმა უნდა შეაფასოს მელატონინის დანამატის ეფექტი დაზიანების პროგრესირებაზე, რეცეპტორების ექსპრესიასა და პაციენტის შედეგებზე, რათა დადგინდეს, შეუძლია თუ არა მელატონინს ეფექტურად შეამციროს ინვაზიური კიბოს პროგრესირების რისკი.

მიუხედავად იმედისმომცემი პრეკლინიკური და ადრეული კლინიკური მონაცემებისა, რომლებიც მხარს უჭერენ მელატონინის გამოყენებას ძუძუს კიბოს მართვაში, საჭიროა შემდგომი კვლევა მისი თერაპიული პოტენციალის სრულად გასარკვევად და ოპტიმალური დოზირების, დროისა და კომბინირებული სტრატეგიების დასადგენად. საჭიროა ფართომასშტაბიანი, რანდომიზებული კლინიკური კვლევები, რათა შეფასდეს მელატონინის, როგორც დამხმარე თერაპიის ეფექტურობა ძუძუს კიბოს სხვადასხვა ქვეტიპებში და შეფასდეს მისი გავლენა პაციენტის შედეგებზე, მათ შორის საერთო გადარჩენაზე, დაავადებისგან თავისუფალ გადარჩენაზე და ცხოვრების ხარისხზე.[32]

მელატონინის რეცეპტორების რეგულირების მოლეკულური მექანიზმების გაგებამ შეიძლება ხელი შეუწყოს თერაპიული ჩარევის ახალი საშუალებების იდენტიფიცირებას და გააუმჯობესოს ძუძუს კიბოს უჯრედების რეაგირება მელატონინზე დაფუძნებულ თერაპიაზე. გარდა ამისა, უნდა იქნას შესწავლილი მელატონინის როლი იმუნური პასუხის მოდულაციაში და მისი პოტენციური ურთიერთქმედება იმუნური გამშვები პუნქტის ინჰიბიტორებთან, განსაკუთრებით TNBC-ში, სადაც იმუნოთერაპია აჩვენა იმედისმომცემი შედეგები.

მელატონინის რეცეპტორების აგონისტების გამოყენებამ სხვა მიზანმიმართულ თერაპიასთან ერთად შეიძლება უზრუნველყოს ახალი მიდგომა რეზისტენტობის დაძლევისა და შედეგების გასაუმჯობესებლად ძუძუს კიბოს პაციენტებში.

აქტიური შესწავლის საგანია სინათლის ზემოქმედების გავლენა მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე კიბოს პროფილაქტიკისა და მკურნალობისთვის. ხელოვნური სინათლის ქრონიკულმა ზემოქმედებამ, განსაკუთრებით ღამის საათებში, შეიძლება გამოიწვიოს ძუძუს ქსოვილში მელატონინის რეცეპტორების დაქვეითება, რითაც ამცირებს ჰორმონის უნარს, მოახდინოს კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტი. ეს ხაზს უსვამს ბუნებრივი სინათლისა და სიბნელის ციკლის შენარჩუნების მნიშვნელობას და ღამით ხელოვნური სინათლის ზემოქმედების მინიმუმამდე შემცირებას, როგორც პოტენციურ სტრატეგიას ძუძუს კიბოს რისკის შესამცირებლად.[33]

იმის გაგება, თუ როგორ მოქმედებს ცირკადული დარღვევები მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე, ასევე შეიძლება მიუთითებდეს მელატონინის დანამატების ან მსუბუქი თერაპიის, როგორც პოტენციურ ინტერვენციებზე ძუძუს კიბოს პროფილაქტიკისთვის.

ესტროგენი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ძუძუს ქსოვილში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის რეგულირებაში. ნაჩვენებია, რომ ესტროგენის მაღალი დონე ამცირებს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიას, განსაკუთრებით MT1, რამაც შეიძლება შეამციროს მელატონინის ეფექტურობა ძუძუს კიბოს უჯრედების პროლიფერაციის ინჰიბირებაში. ესტროგენისა და მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიას შორის ეს ურთიერთქმედება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ჰორმონ-რეცეპტორზე დადებითი ძუძუს კიბოს დროს, სადაც ესტროგენის სიგნალიზაცია ხელს უწყობს სიმსივნის ზრდას. ესტროგენის მიერ მელატონინის რეცეპტორების დაქვეითებამ შეიძლება ხელი შეუწყოს ამ კიბოს განვითარებას და პროგრესირებას მელატონინის უნარის შემცირებით, მოახდინოს ესტროგენის რეცეპტორების აქტივობა და დათრგუნოს უჯრედების პროლიფერაცია.

ამის საპირისპიროდ, ნაჩვენებია, რომ მელატონინი ახდენს ინჰიბიტორულ ეფექტს ესტროგენის სინთეზზე არომატაზას აქტივობის დაქვეითებით, ფერმენტი, რომელიც პასუხისმგებელია ანდროგენების ესტროგენებად გარდაქმნაზე. მელატონინსა და ესტროგენს შორის ეს ორმხრივი ურთიერთობა ვარაუდობს, რომ მელატონინის დამატებამ შეიძლება ხელი შეუწყოს ესტროგენის მაღალი დონის ზემოქმედებას მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე, რითაც გააძლიეროს ჰორმონის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტი. მელატონინის რეცეპტორების ჰორმონალური რეგულირების გააზრება გადამწყვეტია მიზნობრივი თერაპიების შემუშავებისთვის, რომლებიც ხელს უწყობენ ძუძუს კიბოს დროს მელატონინისა და ესტროგენის სიგნალის ურთიერთკავშირს.[34]

გარემო ფაქტორებმა და ცხოვრების სტილის არჩევანმა ასევე შეიძლება გავლენა მოახდინოს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე ძუძუს ქსოვილში. ფაქტორები, როგორიცაა დიეტა, სტრესი, ფიზიკური აქტივობა და გარემო ტოქსინების ზემოქმედება,

ნაჩვენებია, რომ გავლენას ახდენს მელატონინის დონეზე და რეცეპტორების აქტივობაზე. ანტიოქსიდანტებით მდიდარი დიეტა, როგორიცაა ხილი და ბოსტნეული, შეიძლება დაეხმაროს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის შენარჩუნებას ოქსიდაციური სტრესის შემცირებით და უჯრედული ჰომეოსტაზის ხელშეწყობით. ამის საპირისპიროდ, დამუშავებული საკვების, გაჯერებული ცხიმებისა და შაქრის მაღალი შემცველობით დიეტამ შეიძლება ხელი შეუწყოს ოქსიდაციურ სტრესს და ანთებას, რაც იწვევს მელატონინის რეცეპტორების დაქვეითებას და ძუძუს კიბოს გაზრდის რისკს.

ქრონიკული სტრესი ასოცირდება მელატონინის გამომუშავების დაქვეითებასთან და რეცეპტორების ექსპრესიის ცვლილებასთან, რამაც შეიძლება ხელი შეუწყოს ძუძუს კიბოს განვითარებას და პროგრესირებას.

ჰიპოთალამუს-ჰიპოფიზურ-თირკმელზედა ჯირკვლის (HPA) ღერძის სტრესით გამოწვეული აქტივაცია იწვევს კორტიზოლის გამოყოფას, ჰორმონს, რომელსაც შეუძლია ხელი შეუშალოს მელატონინის სინთეზს და რეცეპტორების აქტივობას. სტრესის მართვა ისეთი ტექნიკით, როგორიცაა მედიტაცია და რეგულარული ფიზიკური აქტივობა, შეიძლება დაეხმაროს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის შენარჩუნებას და ძუძუს კიბოს რისკის შემცირებას.

ნაჩვენებია, რომ ფიზიკური აქტივობა დადებითად მოქმედებს მელატონინის გამომუშავებაზე და რეცეპტორების ექსპრესიაზე. რეგულარული ვარჯიში ხელს უწყობს ცირკადული რითმების დარეგულირებას, სტრესის შემცირებას და ძილის ხარისხის გაუმჯობესებას, რაც ხელს უწყობს მელატონინის ჯანსაღი დონის შენარჩუნებას და რეცეპტორების აქტივობას. ფიზიკური აქტივობის სასარგებლო ეფექტი მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე შეიძლება იყოს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი ძუძუს კიბოს პროფილაქტიკისთვის, რადგან ისინი ხელს უწყობენ ჰორმონის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტების გაძლიერებას და სიმსივნის განვითარების რისკს.[35]

გარემო ტოქსინების ზემოქმედება, როგორიცაა ენდოკრინული დამრღვევი ქიმიკატები (EDC), აჩვენა, რომ ხელს უშლის მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიასა და ფუნქციონირებას. EDC-ები, რომლებიც გვხვდება სხვადასხვა სამომხმარებლო პროდუქტებში, პლასტმასებში, პესტიციდებში და სამრეწველო ქიმიკატებში, შეუძლიათ მიბადონ ან დაბლოკონ ბუნებრივი ჰორმონების, მათ შორის მელატონინის მოქმედება. ამ ქიმიკატებმა შეიძლება დაარღვიონ მელატონინის სიგნალიზაცია მელატონინის რეცეპტორებთან შეკავშირებით ან მათი ექსპრესიის შეცვლით, რითაც ამცირებენ ჰორმონის უნარს განახორციელოს მისი დამცავი ეფექტი ძუძუს კიბოს წინააღმდეგ. EDC-ზე ზემოქმედების შემცირება ცხოვრების წესის ცვლილებებით, როგორიცაა ორგანული საკვების არჩევა, პლასტმასის კონტეინერების თავიდან აცილება და ბუნებრივი პირადი მოვლის საშუალებების გამოყენება, შეიძლება დაეხმაროს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის შენარჩუნებას და ძუძუს კიბოს რისკის შემცირებას.

გენეტიკური და ეპიგენეტიკური ფაქტორები ასევე თამაშობენ როლს ძუძუს ქსოვილში მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის რეგულირებაში. [65]მელატონინის რეცეპტორების, MTNR1A და MTNR1B მაკოდირებელი გენების ცვალებადობამ შეიძლება გავლენა მოახდინოს რეცეპტორების ფუნქციასა და ექსპრესიის დონეზე, რაც პოტენციურად იმოქმედებს ინდივიდის მგრძნობელობაზე ძუძუს კიბოს მიმართ. ამ გენებში გენეტიკური პოლიმორფიზმი დაკავშირებულია მელატონინის რეცეპტორების აქტივობასთან და ზოგიერთ პოპულაციაში ძუძუს კიბოს გაზრდილ რისკთან. გენეტიკური ვარიანტების იდენტიფიცირება, რომლებიც გავლენას ახდენენ მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე, შეიძლება დაგეხმაროს ძუძუს კიბოს განვითარების მაღალი რისკის მქონე პირების იდენტიფიცირებაში და პერსონალიზებული პრევენციისა და მკურნალობის სტრატეგიების წარმართვაში.

ეპიგენეტიკური მოდიფიკაციები, როგორცაა დნმ-ის მეთილაცია და ჰისტონის აცეტილაცია, ასევე შეიძლება გავლენა იქონიოს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე. MTNR1A გენის პრომოტორის ჰიპერმეთილაცია დაფიქსირდა ძუძუს კიბოს ზოგიერთ შემთხვევაში, რაც იწვევს რეცეპტორების ექსპრესიის შემცირებას და მელატონინის სიგნალის დაქვეითებას. ეპიგენეტიკურ ცვლილებებზე შეიძლება გავლენა იქონიოს გარემო ფაქტორებმა, ცხოვრების წესის არჩევანმა და ჰორმონალურმა სტატუსმა, რაც ხაზს უსვამს გენეტიკას, გარემოს და მელატონინის რეცეპტორების რეგულაციას შორის რთულ ურთიერთკავშირს. მელატონინის რეცეპტორების ეპიგენეტიკური რეგულაციის გაგება შეიძლება მოგვცეს ახალი შეხედულებები ძუძუს კიბოს პრევენციის შესახებ და მიგვიყვანოს მიზნობრივი თერაპიების შემუშავებამდე, რომელიც მიზნად ისახავს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიისა და ფუნქციის აღდგენას.

ჰორმონის რეცეპტორებზე დადებით ძუძუს კიბოს დროს, სტრატეგიებმა, რომლებიც მიმართულია ესტროგენის მიერ მელატონინის რეცეპტორების დაქვეითების საწინააღმდეგოდ, შეიძლება გააძლიეროს მელატონინზე დაფუძნებული თერაპიის ეფექტურობა. ეს შეიძლება მოიცავდეს არომატაზას ინჰიბიტორების გამოყენებას ესტროგენის დონის შესამცირებლად, რითაც თავიდან აიცილებს მელატონინის რეცეპტორების დაქვეითებას და საშუალებას მისცემს მელატონინს განახორციელოს თავისი კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტი. სამმაგი უარყოფითი ძუძუს კიბოს დროს, სადაც მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესია ხშირად დაბალია ან არ არსებობს, მომავალი კვლევა უნდა იყოს ფოკუსირებული რეცეპტორების ექსპრესიის რეგულაციის გზების იდენტიფიცირებაზე ეპიგენეტიკური მოდიფიკაციების ან სხვა მიზანმიმართული ინტერვენციების მეშვეობით, რაც პოტენციურად გაზრდის ამ სიმსივნეების რეაგირებას მელატონინზე დაფუძნებულ თერაპიაზე.[36], [37]

ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევაა მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის ცვალებადობა, რომელიც შეინიშნება სხვადასხვა კვლევებში. ფაქტორებმა, როგორიცაა განსხვავებები პაციენტების პოპულაციაში, სიმსივნის ჰეტეროგენულობა და ექსპერიმენტული პირობების ცვალებადობა, შეიძლება ხელი შეუწყოს ამ შეუსაბამობებს. მაგალითად, ზოგიერთმა კვლევამ აჩვენა მაღალი MT1 ექსპრესია HER2-დადებითი ძუძუს კიბოებში, ხოლო სხვებმა დაადგინეს დაბალი ან არარსებობის ექსპრესია. ფაქტორების გაგება, რომლებიც ხელს უწყობენ ამ ცვალებადობას, გადამწყვეტია მელატონინის რეცეპტორის სტატუსის კლინიკური რელევანტურობის და მისი პოტენციური გამოყენების, როგორც ბიომარკერის, ძუძუს კიბოს პროგნოზისა და მკურნალობის პასუხის დასადგენად.[38], [39]

გაურკვევლობის კიდევ ერთი სფეროა მელატონინის როლი სამმაგ ნეგატიურ ძუძუში (TNBC). მიუხედავად იმისა, რომ TNBC ზოგადად ავლენს მელატონინის რეცეპტორების დაბალ ან არარსებულ ექსპრესიას, ბოლო კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინს შეუძლია კვლავ განახორციელოს კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტი TNBC-ზე რეცეპტორებისგან დამოუკიდებელი მექანიზმების მეშვეობით, როგორიცაა მისი ანტიოქსიდანტური და ანთების საწინააღმდეგო თვისებები. თუმცა, რამდენად შეუძლია მელატონინს დათრგუნოს TNBC პროგრესირება მისი რეცეპტორების არარსებობის შემთხვევაში, გაურკვეველია და საჭიროა შემდგომი კვლევა, რათა განისაზღვროს მელატონინის ზემოქმედების მექანიზმები ამ აგრესიული ძუძუს კიბოს ქვეტიკში.

ბოლოდროინდელმა მიღწევებმა მელატონინის რეცეპტორების სიგნალიზაციის გაგებაში მოგვცა ახალი შეხედულებები მელატონინსა და სხვადასხვა უჯრედულ გზებს შორის, რომლებიც მონაწილეობენ ძუძუს კიბოს პროგრესირებაში. მაგალითად, კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინს შეუძლია ურთიერთქმედება G- პროტეინთან დაწყვილებულ რეცეპტორ კინაზებთან (GRKs) და β -არესტინებთან, რომლებიც მონაწილეობენ რეცეპტორების დესენსიტილიზაციასა და ინტერნალიზებაში. ამ ურთიერთქმედებამ შეიძლება გავლენა მოახდინოს მელატონინის სიგნალიზაციის ხანგრძლივობასა და ინტენსივობაზე, რითაც იმოქმედოს მის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტურობაზე. გარდა ამისა, კვლევამ აჩვენა, რომ მელატონინის რეცეპტორებმა შეიძლება შექმნან ჰეტეროდიმერები სხვა GPCR-ებთან, როგორიცაა დოფამინის რეცეპტორები, რაც იწვევს სიგნალიზაციის შეცვლილ შედეგებს. ეს დასკვნები ხაზს უსვამს მელატონინის რეცეპტორების სიგნალიზაციის სირთულეს და შემდგომი კვლევის საჭიროებას, რათა სრულად გავიგოთ ამ ურთიერთქმედების გავლენა ძუძუს კიბოს მკურნალობაზე.[40]

გენეტიკური, ეპიგენეტიკური და გარემო ფაქტორების გაგებამ, რომლებიც გავლენას ახდენენ მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიაზე, შეიძლება უზრუნველყოს რეცეპტორების დონის გაზრდის ახალი სტრატეგიები სიმსივნეებში დაბალი ან არარსებული ექსპრესიით, რითაც გაზრდის მათ რეაგირებას მელატონინზე დაფუძნებულ თერაპიაზე. მაგალითად, ეპიგენეტიკური მოდიფიკაციები, როგორიცაა

დნმ-ის მეთილაცია და ჰისტონის აცეტილაცია, ნაჩვენებია, რომ არეგულირებს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიას და ამ მოდიფიკაციების მიზანმიმართულმა მიდგომამ შეიძლება შექმნას ახალი მიდგომა რეცეპტორების ფუნქციის აღსადგენად ძუძუს კიბოს უჯრედებში.

მომავალი კვლევისთვის კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი სფეროა მელატონინის როლი მეტასტაზურ გარემოში. მიუხედავად იმისა, რომ კვლევების უმეტესობა ფოკუსირებულია მელატონინის ეფექტებზე ძუძუს პირველად სიმსივნეებში, შეზღუდულია ინფორმაცია მის როლზე მეტასტაზური ძუძუს კიბოში, განსაკუთრებით მეტასტაზების ადგილებში, როგორიცაა ტვინი, ძვლები და ღვიძლი. იმის გაგება, თუ როგორ ექსპრესირებულია მელატონინის რეცეპტორები მეტასტაზურ დაზიანებებში და როგორ მოქმედებს მელატონინი მეტასტაზურ პროგრესირებაზე, შეიძლება მოგვცეს ღირებული ინფორმაცია მელატონინის, როგორც თერაპიული აგენტის პოტენციური გამოყენების შესახებ, ძუძუს მეტასტაზური კიბოს პროფილაქტიკისა და მკურნალობისთვის.

გარდა ამისა, მელატონინისა და იმუნური სისტემის ურთიერთქმედება ძუძუს კიბოს კონტექსტში რჩება აქტიური კვლევის სფეროდ.

ბოლო კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინს შეუძლია გააძლიეროს სიმსივნის საწინააღმდეგო იმუნიტეტი სიმსივნური ინფილტრაციული ლიმფოციტების (TILs) და სხვა იმუნური უჯრედების აქტივობის მოდულირებით სიმსივნის მიკროგარემოში. თუმცა, კონკრეტული მექანიზმები, რომლითაც მელატონინი გავლენას ახდენს იმუნური უჯრედების ფუნქციონირებაზე და როგორ უწყობს ხელს ეს ეფექტები მის საერთო კიბოს საწინააღმდეგო მოქმედებას, ჯერ ბოლომდე არ არის გასაგები. საჭიროა შემდგომი კვლევა, რათა გაირკვეს მელატონინის როლი ძუძუს კიბოს დროს იმუნური პასუხის რეგულირებაში და იმის დასადგენად, შეიძლება თუ არა მელატონინის გამოყენება იმუნოთერაპიასთან ერთად მკურნალობის ეფექტურობის გასაზრდელად.[41]

ძუძუს კიბოს მელატონინის რეცეპტორების ბოლოდროინდელმა კვლევამ მოგვცა ღირებული ინფორმაცია მელატონინის კიბოს საწინააღმდეგო ეფექტისა და მისი, როგორც თერაპიული აგენტის პოტენციური გამოყენების შესახებ. თუმცა, რჩება რამდენიმე შეუსაბამო და პასუხგაუცემელი კითხვა, რაც ხაზს უსვამს შემდგომი კვლევის საჭიროებას, რათა სრულად გავიგოთ მელატონინის რეცეპტორების როლი ძუძუს კიბოს პროგრესირებასა და მკურნალობაში. ამ კვლევის ხარვეზების აღმოფხვრით და მელატონინის რეცეპტორების ბიოლოგიის გაგების გაღრმავებით, ჩვენ შეგვიძლია გავუხსნათ გზა უფრო ეფექტური, პერსონალიზებული მკურნალობის სტრატეგიების შემუშავებას ძუძუს კიბოს პაციენტებისთვის.

პრეკლინიკურმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინს შეუძლია შეაფერხოს ძუძუს კიბოს უჯრედების მიგრაცია და შეჭრა, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ მას შეიძლება ჰქონდეს

პოტენციალი, როგორც მეტასტაზების საწინააღმდეგო აგენტი. თუმცა, შემდგომი კვლევაა საჭირო ამ ეფექტების საფუძვლიანი მექანიზმების დასადგენად და მელატონინის ეფექტურობის შესაფასებლად მეტასტაზების თავიდან აცილებაში *in vivo*. ასევე უნდა ჩატარდეს კლინიკური კვლევები იმის დასადგენად, შეუძლია თუ არა მელატონინის დამატებას ძუძუს კიბოს მქონე პაციენტებში მეტასტაზების სიხშირის შემცირება და საერთო გადარჩენის გაუმჯობესება.

ახალი ბიომარკერების შემუშავება მელატონინზე დაფუძნებულ თერაპიაზე პასუხის პროგნოზირებისთვის მნიშვნელოვანი სფეროა მომავალი კვლევისთვის. პაციენტების იდენტიფიცირება, რომლებიც ყველაზე მეტად სარგებლობენ მელატონინით მკურნალობით, შეიძლება დაეხმაროს ძუძუს კიბოს თერაპიის პერსონალიზირებას და პაციენტის შედეგების გაუმჯობესებას. მელატონინის რეცეპტორის სტატუსი, განსაკუთრებით MT1 ექსპრესია, იმედისმომცემია როგორც პოტენციური ბიომარკერი მელატონინზე დაფუძნებულ თერაპიაზე პასუხის პროგნოზირებისთვის. თუმცა, შემდგომი კვლევებია საჭირო მელატონინის რეცეპტორების ტესტირების კლინიკური სარგებლობის დასადასტურებლად და იმის დასადგენად, შეიძლება თუ არა სხვა ბიომარკერების გამოყენება, როგორიცაა გენეტიკური ან ეპიგენეტიკური ცვლილებები, მელატონინის მკურნალობაზე პასუხის პროგნოზირებისთვის.

გარდა მელატონინის რეცეპტორის სტატუსისა, უნდა იქნას შესწავლილი სხვა ფაქტორები, რომლებმაც შეიძლება გავლენა მოახდინონ მელატონინზე დაფუძნებულ თერაპიაზე პასუხზე. მაგალითად, სიმსივნური ინფილტრაციული ლიმფოციტების (TILs) და სხვა იმუნური მარკერების არსებობამ შეიძლება მოგვაწოდოს ღირებული ინფორმაცია მელატონინის იმუნომოდულატორულ ეფექტებზე და მის პოტენციურ როლზე სიმსივნის საწინააღმდეგო იმუნიტეტის გაძლიერებაში. მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიასა და სხვა ბიომარკერებს შორის ურთიერთობის გაგება, როგორიცაა ჰორმონის რეცეპტორის სტატუსი, HER2 სტატუსი და იმუნური უჯრედების ინფილტრაცია, შეიძლება დაეხმაროს პაციენტების იმ ქვეჯგუფების იდენტიფიცირებას, რომლებიც ყველაზე მეტად ისარგებლებენ მელატონინის მკურნალობით.

მელატონინის უნარი მოახდინოს იმუნური პასუხის მოდულაცია და გააძლიეროს სიმსივნის საწინააღმდეგო იმუნიტეტი, ვარაუდობს, რომ ის შეიძლება გამოყენებულ იქნას იმუნური გამშვები პუნქტის ინჰიბიტორებთან ერთად მკურნალობის შედეგების გასაუმჯობესებლად. პრეკლინიკურმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინს შეუძლია გაზარდოს ბუნებრივი მკვლეელი (NK) უჯრედების აქტივობა, გააძლიეროს ანთების პრო-ციტოკინების გამომუშავება და ხელი შეუწყოს სიმსივნური ინფილტრაციული ლიმფოციტების გააქტიურებას, რაც ხელს შეუწყობს უფრო ძლიერი სიმსივნის საწინააღმდეგო იმუნიტეტის პასუხს.

მომავალი კვლევები ფოკუსირებული უნდა იყოს მელატონინის ეფექტურობის შეფასებაზე იმუნური გამშვები პუნქტის ინჰიბიტორებთან ერთად, როგორცაა ანტი-PD-1 და ანტი-CTLA-4 ანტისხეულები, ძუძუს კიბოს პრეკლინიკურ მოდელებში. ასევე უნდა ჩატარდეს კლინიკური კვლევები იმის დასადგენად, შეუძლია თუ არა მელატონინს გააძლიეროს იმუნოთერაპიის ეფექტურობა ძუძუს კიბოს მქონე პაციენტებში, განსაკუთრებით TNBC-ით ან სხვა ქვეტიპებით, რომლებიც ნაკლებად რეაგირებენ ჩვეულებრივ მკურნალობაზე. მელატონინსა და იმუნურ სისტემას შორის ურთიერთქმედების მექანიზმების გაგებამ შეიძლება მოგვაწოდოს მნიშვნელოვანი ინფორმაცია იმის შესახებ, თუ როგორ უნდა მოხდეს კომბინირებული სტრატეგიების ოპტიმიზაცია და პაციენტის შედეგების გაუმჯობესება.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] S. R. Pandi-Perumal *et al.*, “Physiological effects of melatonin: Role of melatonin receptors and signal transduction pathways,” *Prog. Neurobiol.*, vol. 85, no. 3, pp. 335–353, Jul. 2008, doi: 10.1016/J.PNEUROBIO.2008.04.001.
- [2] S. Agbaria, A. Haim, F. Fares, and A. E. Zubidat, “Epigenetic modification in 4T1 mouse breast cancer model by artificial light at night and melatonin—the role of DNA-methyltransferase,” *Chronobiol. Int.*, vol. 36, no. 5, pp. 629–643, May 2019, doi: 10.1080/07420528.2019.1574265.
- [3] K. Linowiecka *et al.*, “Melatonin: A Potential Regulator of DNA Methylation,” *Antioxidants*, vol. 12, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.3390/ANTIOX12061155.
- [4] X. Kong *et al.*, “Melatonin: A Potential Therapeutic Option for Breast Cancer,” *Trends in Endocrinology and Metabolism*, vol. 31, no. 11, pp. 859–871, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.TEM.2020.08.001.
- [5] B. Del Río, J. M. García Pedrero, C. Martínez-Campa, P. Zuazua, P. S. Lazo, and S. Ramos, “Melatonin, an endogenous-specific inhibitor of estrogen receptor α via calmodulin,” *Journal of Biological Chemistry*, vol. 279, no. 37, pp. 38294–38302, Sep. 2004, doi: 10.1074/JBC.M403140200.
- [6] M. Ashrafizadeh, M. Najafi, N. Kavyiani, R. Mohammadinejad, T. Farkhondeh, and S. Samarghandian, “Anti-Inflammatory Activity of Melatonin: a Focus on the Role of NLRP3 Inflammasome,” *Inflammation*, vol. 44, no. 4, pp. 1207–1222, Aug. 2021, doi: 10.1007/S10753-021-01428-9.

- [7] M. A. Abd El-Aziz, H. A. Hassan, M. H. Mohamed, A. R. M. A. Meki, S. K. H. Abdel-Ghaffar, and M. R. Hussein, "The biochemical and morphological alterations following administration of melatonin, retinoic acid and *Nigella sativa* in mammary carcinoma: An animal model," *Int. J. Exp. Pathol.*, vol. 86, no. 6, pp. 383–396, Dec. 2005, doi: 10.1111/J.0959-9673.2005.00448.X.
- [8] G. B. Gelaleti *et al.*, "Efficacy of melatonin, IL-25 and siIL-17B in tumorigenesis-associated properties of breast cancer cell lines," *Life Sci.*, vol. 183, pp. 98–109, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.LFS.2017.06.013.
- [9] J. Liu, S. J. Clough, A. J. Hutchinson, E. B. Adamah-Biassi, M. Popovska-Gorevski, and M. L. Dubocovich, "MT1 and MT2 Melatonin Receptors: A Therapeutic Perspective," *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.*, vol. 56, pp. 361–383, Jan. 2016, doi: 10.1146/ANNUREV-PHARMTOX-010814-124742.
- [10] B. Bojková, P. Kubatka, T. Qaradakh, A. Zulli, and K. Kajo, "Melatonin may increase anticancer potential of pleiotropic drugs," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 19, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.3390/IJMS19123910.
- [11] W. H. Talib, A. R. Alsayed, A. Abuawad, S. Daoud, and A. I. Mahmood, "Melatonin in cancer treatment: Current knowledge and future opportunities," *Molecules*, vol. 26, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/MOLECULES26092506.
- [12] C. Rodriguez *et al.*, "Regulation of antioxidant enzymes: A significant role for melatonin," *J. Pineal Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2004, doi: 10.1046/J.1600-079X.2003.00092.X.
- [13] "Melatonin and Breast Cancer: A Review Article - PMC." Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12133437/>
- [14] J. B. Zawilska, D. J. Skene, and J. Arendt, "Physiology and pharmacology of melatonin in relation to biological rhythms," *Pharmacological Reports*, vol. 61, no. 3, pp. 383–410, 2009, doi: 10.1016/S1734-1140(09)70081-7.
- [15] J. A. Gastel, P. H. Roseboom, P. A. Rinaldi, J. L. Weller, and D. C. Klein, "Melatonin production: Proteasomal proteolysis in serotonin N- acetyltransferase regulation," *Science (1979).*, vol. 279, no. 5355, pp. 1358–1360, Feb. 1998, doi: 10.1126/SCIENCE.279.5355.1358.
- [16] R. Jockers, P. Maurice, J. A. Boutin, and P. Delagrang, "Melatonin receptors, heterodimerization, signal transduction and binding sites: What's new?," *Br. J. Pharmacol.*, vol. 154, no. 6, pp. 1182–1195, Jul. 2008, doi: 10.1038/BJP.2008.184.

- [17] S. Kepuladze, G. Burkadze, I. Kokhreidze, S. Kepuladze, G. Burkadze, and I. Kokhreidze, “Epithelial-Mesenchymal Transition Indexes in Triple-Negative Breast Cancer Progression and Metastases,” *Cureus*, vol. 16, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.7759/CUREUS.68761.
- [18] Kepuladze Shota+Burkadze George+Kokhreidze Irakli, “THE CHARACTERISTICS OF EPITHELIAL MESENCHYMAL TRANSITION IN DIFFERENT MOLECULAR SUBTYPES OF PRIMARY AND METASTATIC INVASIVE DUCTAL CARCINOMA OF THE BREAST (CRITICAL REVIEW),” *Experimental.and.clinical.medicine*, no. Number2, 2021, Accessed: Sep. 06, 2024. [Online]. Available: <https://journals.4science.ge/index.php/jecm/article/view/334/344>
- [19] S. Kepuladze, I. Kokhreidze, and G. Burkadze, “COMPARING CHANGES IN EPITHELIAL-MESENCHYMAL TRANSFORMATION MARKERS IN DIFFERENT TUMOR SITES OF BREAST CANCER WITH HER2-POSITIVE MOLECULAR SUBTYPE,” *ქართველი მეცნიერები*, vol. 5, no. 2, pp. 134–149, May 2023, doi: 10.52340/g.2023.05.02.17.
- [20] N. Amin, R. Shafabakhsh, R. J. Reiter, and Z. Asemi, “Melatonin is an appropriate candidate for breast cancer treatment: Based on known molecular mechanisms,” *J. Cell. Biochem.*, vol. 120, no. 8, pp. 12208–12215, Aug. 2019, doi: 10.1002/JCB.28832.
- [21] J. P. I. L. J. K. S. P. J. K. NR Shin, “Melatonin suppresses fibrotic responses induced by cigarette smoke via downregulation of TGF-beta1,” *Oncotarget*, vol. 8, pp. 95692–95703, 2017.
- [22] D. Cataldo, G. Aravena, A. Escobar, J. C. Tapia, O. A. Peralta, and C. G. Torres, “Effect of Melatonin on Chemoresistance Exhibited by Spheres Derived from Canine Mammary Carcinoma Cells,” *Animals (Basel)*, vol. 14, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.3390/ani14081229.
- [23] P. Lotfinejad *et al.*, “Prognostic Role and Clinical Significance of Tumor-Infiltrating Lymphocyte (TIL) and Programmed Death Ligand 1 (PD-L1) Expression in Triple-Negative Breast Cancer (TNBC): A Systematic Review and Meta-Analysis Study,” *Diagnostics*, vol. 10, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.3390/diagnostics10090704.
- [24] R. Goyal, T. Gupta, A. Bal, D. Sahni, and G. Singh, “Role of Melatonin in Breast Carcinoma: Correlation of Expression Patterns of Melatonin-1 Receptor with Estrogen, Progesterone, and HER2 Receptors,” *Applied Immunohistochemistry and Molecular Morphology*, vol. 28, no. 7, pp. 518–523, Aug. 2020, doi: 10.1097/PAI.0000000000000788.

- [25] S. Kepuladze, I. Kokhraidze, and G. Burkadze, “Comparative analysis of phenotypic features in the primary tumor, tumour buds and metastatic lymph nodes within Luminal A and Luminal B molecular subtypes of invasive ductal carcinoma of the breast,” *ქართველი მეცნიერები*, vol. 4, no. 2, pp. 117–140, Apr. 2022, doi: 10.52340/gS.2022.04.02.09.
- [26] S. Kepuladze, I. Kokhraidze, and G. Burkadze, “Comparative analysis of phenotypic features in the primary tumor, tumour buds and metastatic lymph nodes within Luminal A and Luminal B molecular subtypes of invasive ductal carcinoma of the breast,” *GEORGIAN SCIENTISTS*, vol. 4, no. 2, pp. 117–140, Apr. 2022, doi: 10.52340/gS.2022.04.02.09.
- [27] P. D. Rädler *et al.*, “Highly metastatic claudin-low mammary cancers can originate from luminal epithelial cells,” *Nat. Commun.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/S41467-021-23957-5.
- [28] C. M. Heaphy *et al.*, “Shorter telomeres in luminal B, HER-2 and triple-negative breast cancer subtypes,” *Modern Pathology*, vol. 24, no. 2, pp. 194–200, 2011, doi: 10.1038/MODPATHOL.2010.198.
- [29] K. Ennour-Idrissi, E. Maunsell, and C. Diorio, “Telomere length and breast cancer prognosis: A systematic review,” *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention*, vol. 26, no. 1, pp. 3–10, Jan. 2017, doi: 10.1158/1055-9965.EPI-16-0343.
- [30] P. Liu *et al.*, “Melatonin Regulates Breast Cancer Progression by the lnc010561/miR-30/FKBP3 Axis,” *Mol. Ther. Nucleic Acids*, vol. 19, pp. 765–774, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.OMTN.2019.12.019.
- [31] M. Kammori *et al.*, “Telomere shortening in breast cancer correlates with the pathological features of tumor progression,” *Oncol. Rep.*, vol. 34, no. 2, pp. 627–632, Aug. 2015, doi: 10.3892/OR.2015.4063.
- [32] J. J. García *et al.*, “Protective effects of melatonin in reducing oxidative stress and in preserving the fluidity of biological membranes: A review,” *J. Pineal Res.*, vol. 56, no. 3, pp. 225–237, 2014, doi: 10.1111/JPI.12128.
- [33] S. M. Hill, L. L. Spriggs, M. A. Simon, H. Muraoka, and D. E. Blask, “The growth inhibitory action of melatonin on human breast cancer cells is linked to the estrogen response system,” *Cancer Lett.*, vol. 64, no. 3, pp. 249–256, Jul. 1992, doi: 10.1016/0304-3835(92)90050-6.
- [34] P. R. Custódio, J. Colombo, F. V. Ventura, T. B. Castro, and D. A. P. C. Zuccari, “Melatonin Treatment Combined with TGF- β Silencing Inhibits Epithelial-

Mesenchymal Transition in CF41 Canine Mammary Cancer Cell Line,” *Anticancer Agents Med. Chem.*, vol. 20, no. 8, pp. 989–997, Apr. 2020, doi: 10.2174/1871520620666200407122635.

- [35] M. Rondanelli, M. A. Faliva, S. Perna, and N. Antonello, “Update on the role of melatonin in the prevention of cancer tumorigenesis and in the management of cancer correlates, such as sleep-wake and mood disturbances: Review and remarks,” *Aging Clin. Exp. Res.*, vol. 25, no. 5, pp. 499–510, Oct. 2013, doi: 10.1007/S40520-013-0118-6.
- [36] W. H. Talib, “A ketogenic diet combined with melatonin overcomes cisplatin and vincristine drug resistance in breast carcinoma syngraft,” *Nutrition*, vol. 72, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.NUT.2019.110659.
- [37] S. Proietti *et al.*, “Melatonin down-regulates MDM2 gene expression and enhances p53 acetylation in MCF-7 cells,” *J. Pineal Res.*, vol. 57, no. 1, pp. 120–129, 2014, doi: 10.1111/JPI.12150.
- [38] A. González, A. González-González, C. Alonso-González, J. Menéndez-Menéndez, C. Martínez-Campa, and S. Cos, “Complementary actions of melatonin on angiogenic factors, the angiotensin/Tie2 axis and VEGF, in co-cultures of human endothelial and breast cancer cells,” *Oncol. Rep.*, vol. 39, no. 1, pp. 433–441, Jan. 2018, doi: 10.3892/OR.2017.6070.
- [39] S. Xiang *et al.*, “Epigenetic inhibition of the tumor suppressor ARHI by light at night-induced circadian melatonin disruption mediates STAT3-driven paclitaxel resistance in breast cancer,” *J. Pineal Res.*, vol. 67, no. 2, 2019, doi: 10.1111/JPI.12586.
- [40] N. F. Maroufi *et al.*, “Inhibitory effect of melatonin on hypoxia-induced vasculogenic mimicry via suppressing epithelial-mesenchymal transition (EMT) in breast cancer stem cells,” *Eur. J. Pharmacol.*, vol. 881, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.EJPHAR.2020.173282.
- [41] H. Schwimmer *et al.*, “Light at night and melatonin have opposite effects on breast cancer tumors in mice assessed by growth rates and global DNA methylation,” *Chronobiol. Int.*, vol. 31, no. 1, pp. 144–150, Feb. 2014, doi: 10.3109/07420528.2013.842925.

Distribution Patterns of Melatonin Receptors in Different Histological Types of Breast Cancer and Precancerous Breast Lesions

Tamar Katashvili¹ Irakli Kokhreidze²; Giorgi Burkadze³; Shota Kepuladze⁴

¹PhD student at Tbilisi State Medical University; ²Associate Professor at the Department of Oncology, Tbilisi State Medical University; ³Professor at the Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; ⁴Pathologist at the Department of Pathological Anatomy, Tbilisi State Medical University; Associate Professor at the Department of Molecular Pathology;

Abstract

Melatonin is a multifunctional hormone involved in the regulation of circadian rhythms, antioxidant defense, immune modulation, and antitumor activity. Increasing evidence suggests that melatonin receptors (MT1 and MT2) play a significant role in breast cancer biology, influencing tumor progression, hormonal regulation, and therapeutic responsiveness.

Available evidence indicates that MT1 and MT2 receptors are involved in the regulation of the cell cycle, apoptosis, angiogenesis, and metastatic processes. Melatonin receptor expression is generally higher in hormone receptor-positive breast cancers, particularly luminal subtypes, whereas triple-negative breast cancers frequently demonstrate reduced receptor expression. Melatonin signaling is associated with suppression of estrogen receptor activity, reduction of oxidative stress, and inhibition of tumor progression. Furthermore, melatonin receptors have been identified in atypical ductal hyperplasia and ductal carcinoma in situ, suggesting their potential value as prognostic biomarkers during early breast carcinogenesis.

Melatonin receptors represent promising biological and clinical targets in breast cancer and precancerous breast lesions. Assessment of their expression may improve prognostic stratification, facilitate personalized therapeutic approaches, and contribute to a better understanding of breast cancer heterogeneity.

Keywords: Melatonin, MT1 receptor, MT2 receptor, breast cancer, precancerous lesions, ductal carcinoma in situ, atypical ductal hyperplasia, estrogen receptor, apoptosis, oxidative stress.

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

თამარ ყატაშვილი - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი;

Tamar Katashvili - PhD student at Tbilisi State Medical University;

+995599 89 08 89

ირაკლი კოხრეიძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ონკოლოგიის კათედრის პროფესორი;

Irakli Kokhreidze - Professor of the Department of Oncology, Tbilisi State Medical

University;

i.kokhreidze@gmail.com

ORCID: [0009-0005-5534-4905](https://orcid.org/0009-0005-5534-4905)

გიორგი ბურკაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;

George Burkadze - Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department of Molecular Pathology;

E-mail: burkadze@yahoo.com g.burkadze@tsmu.edu

Phone Number: 599578833

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

შოთა კეპულაძე - თსუ მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

Shota Kepuladze - Associate Professor of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi

State Medical University; Doctor of Pathology;

E-mail: Shota.kepuladze@gmail.com sh.kepuladze@tsmu.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

კვანტური სისტემების დეტალური ანალიზი და ხარისხის კონტროლის მნიშვნელობა

მარინა ქურდაძე¹ გივი მურჯიკნელი²

¹პროფესორი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების აკადემიური დეპარტამენტის უფროსი. 555441020, m.kurdadaze@gtu.ge, orcid-0009-0001-2918-3328; ²პროფესორი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიების აკადემიური დეპარტამენტი. 599500054, g.murjikneli@gtu.ge, orcid-0009-0007-7781-6904

რეზიუმე

ნაშრომში განხილულია კვანტური სისტემების დეტალური ანალიზისა და ხარისხის კონტროლის მნიშვნელობა თანამედროვე კვანტურ ტექნოლოგიებში. ყურადღება გამახვილებულია კვანტური ტესტირების და კვანტური დონის სკანირების მოწყობილობებზე, რომლებიც გამოიყენება კუბიტების მდგომარეობის მონიტორინგის, ენერგეტიკული დონეების განსაზღვრისა და კვანტური სისტემების ოპტიმიზაციისათვის. განხილულია კვანტური ფიზიკის ფუნდამენტური პრინციპები-სუპერპოზიცია, კვანტური ჩახლართულობა და ენერგეტიკული დისკრეტულობა. ნაშრომში წარმოდგენილია სიმკვრივის მატრიცის, ფიდელობის ფუნქციისა და ჰამილტონიანის გამოყენება კვანტური მდგომარეობების ანალიზში. ასევე განხილულია სპექტროსკოპიული მეთოდები, ჯოზეფსონის კვანძზე დაფუძნებული სენსორები და მრავალკუბიტიანი სისტემების კონტროლის პრობლემები. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა დეკორენციის, ხმაურისა და ტემპერატურული არასტაბილურობის შემცირებას. ნაშრომი აჩვენებს, რომ კვანტური ტესტირების და სკანირების სისტემები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ კვანტური კომპიუტერების, კვანტური კომუნიკაციებისა და სენსორული ტექნოლოგიების განვითარებაში.

ნაშრომში განხილულია კვანტური სისტემების ანალიზის ძირითადი თეორიული და პრაქტიკული ასპექტები, ფიდელობის ფუნქციისა და ჰამილტონიანის როლი კვანტური მდგომარეობების შეფასებაში, აგრეთვე ხარისხის კონტროლის მექანიზმები და კვანტური ტესტირების და კვანტური დონის სკანირების სისტემების თეორიული და

ტექნოლოგიური საფუძვლები, მათი მნიშვნელობის შეფასება და არსებული გამოწვევების ანალიზი.

საკვანძო სიტყვები: კვანტური სისტემები, კვანტური ტესტირება, კვანტური დონის სკანირება, კუბიტი, კვანტური ჩახლართულობა, სუპერპოზიცია, ფიდელობის ფუნქცია, ჰამილტონიანი, სპექტროსკოპია, დეკოჰერენცია, კვანტური კომპიუტერი.

შესავალი

კვანტური ტექნოლოგიები თანამედროვე მეცნიერებისა და ინჟინერიის ერთ-ერთ ყველაზე სწრაფად განვითარებად მიმართულებას წარმოადგენს. კვანტური მექანიკის საფუძველზე შესაძლებელია მიკროსამყაროში მიმდინარე პროცესების, ნაწილაკთა ურთიერთქმედებისა და კვანტური მდგომარეობების სიღრმისეული შესწავლა. კვანტური სისტემების დეტალური ანალიზი ეფუძნება ისეთი ფუნდამენტური ცნებების გამოყენებას, როგორიცაა ჰამილტონიანი, ტალღური ფუნქცია, ფიდელობის ფუნქცია და კვანტური ევოლუციის ოპერატორები. აღნიშნული მეთოდები იძლევა შესაძლებლობას განისაზღვროს სისტემის ენერგეტიკული მდგომარეობები, დინამიკა და დროში ცვლილების კანონზომიერებები.

კვანტური სისტემების დეტალური ანალიზისას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ხარისხის კონტროლს, რადგან კვანტური სისტემები მაღალი მგრძნობელობით გამოირჩევიან გარე ზემოქმედებებისა და ხმაურის მიმართ. ხარისხის კონტროლი მოიცავს კვანტური მდგომარეობების სიზუსტის, სტაბილურობისა და ფიდელობის შეფასებას, რაც აუცილებელია კვანტური ოპერაციების ეფექტიანობისა და ინფორმაციის საიმედო გადაცემის უზრუნველსაყოფად.

კვანტური კომუნიკაციების და მაღალსიზუსტიანი სენსორული სისტემების განვითარებამ განსაკუთრებული მნიშვნელობა მიანიჭა კვანტური სისტემების დეტალურ ანალიზსა და ხარისხის კონტროლს. აღნიშნული პროცესები აუცილებელია კვანტური ელემენტების საიმედოობის, სტაბილურობისა და ეფექტურობის უზრუნველსაყოფად.

აღნიშნული ნაშრომის მიზანია კვანტური სისტემების დეტალური ანალიზისა და ხარისხის კონტროლის მნიშვნელობის შესწავლა თანამედროვე კვანტურ ტექნოლოგიებში. ნაშრომში განხილულია კვანტური ფიზიკის ძირითადი პრინციპები, კვანტური მდგომარეობების ანალიზის მეთოდები, ჰამილტონიანისა და ფიდელობის ფუნქციის გამოყენება, აგრეთვე კვანტური ტესტირების, სკანირების და კონტროლის თანამედროვე სისტემები. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა დეკოჰერენციისა და ხმაურის შემცირების პრობლემებს, რადგან სწორედ ეს ფაქტორები განსაზღვრავს კვანტური ტექნოლოგიების პრაქტიკულ ეფექტიანობასა და მომავალ განვითარებას.

ძირითადი კვლევითი ნაწილი

თანამედროვე მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების განვითარებაში განსაკუთრებული ადგილი უკავია კვანტურ ფიზიკას და კვანტური სიგნალების დამუშავებას, რომელმაც მნიშვნელოვნად შეცვალა ადამიანის წარმოდგენა მიკროსამყაროს შესახებ. კვანტურმა მექანიკამ შესაძლებელი გახადა ისეთი ფენომენების ახსნა, რომლებიც კლასიკური ფიზიკის ფარგლებში აუხსნელი იყო. ატომებისა და ელემენტარული ნაწილაკების დონეზე მიმდინარე პროცესები ემორჩილება სრულიად განსხვავებულ კანონზომიერებებს, სადაც მოქმედებს ალბათური ბუნება, ენერგიის დისკრეტულობა, სუპერპოზიცია და კვანტური ჩახლართულობა. სწორედ ამ პრინციპებზეა დაფუძნებული თანამედროვე კვანტური ტექნოლოგიები, რომლებიც მეცნიერებისა და ინჟინერიის ერთ-ერთ ყველაზე სწრაფად განვითარებად მიმართულებად მიიჩნევა.

დღეს კვანტური სისტემების კვლევა, განსაკუთრებით ტელეკომუნიკაციაში, აქტუალურია. რომელიც ეფუძნება როგორც თეორიულ კვანტურ ფიზიკას, ისე პრაქტიკული თვალსაზრისით ტექნიკა/ტექნოლოგიების განვითარებას. თანამედროვე კვანტური კომუნიკაციები, კვანტური სენსორები და კრიპტოგრაფიული სისტემები ეფუძნება კვანტური მდგომარეობების მართვასა და კონტროლს. კვანტური კომპიუტერები, რომლებიც იყენებენ კუბიტებს კლასიკური ბიტების ნაცვლად, საშუალებას იძლევა შესრულდეს ისეთი რთული გამოთვლები, რომელთა განხორციელება კლასიკური კომპიუტერებისთვის პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამასთანავე, კვანტური კომუნიკაციები უზრუნველყოფს ინფორმაციის გადაცემის მაღალ უსაფრთხოებას, კვანტური სენსორები კი გამოიყენება ზუსტი გაზომვებისათვის მედიცინაში, ასტროფიზიკაში და ტელეკომუნიკაციის ინჟინერიაში.

კვანტური სისტემების დეტალური ანალიზი წარმოადგენს მნიშვნელოვან წინაპირობას კვანტური ტექნოლოგიების ეფექტური განვითარებისათვის. კვანტური მდგომარეობების შესწავლისას აუცილებელია ისეთი ფუნდამენტური ცნებების გამოყენება, როგორიცაა ტალღური ფუნქცია, სიმკვრივის მატრიცა, ჰამილტონიანი, ფიდელობის ფუნქცია და კვანტური ევოლუციის ოპერატორები. ჰამილტონიანი აღწერს სისტემის სრულ ენერგიას და განსაზღვრავს კვანტური მდგომარეობების დროში ცვლილების კანონებს. ფიდელობის ფუნქცია კი საშუალებას იძლევა შეფასდეს ორი კვანტური მდგომარეობის მსგავსება და დადგინდეს კვანტური ოპერაციების სიზუსტე. აღნიშნული მეთოდები მნიშვნელოვან როლს ასრულებს როგორც თეორიულ ანალიზში, ისე კვანტური მოწყობილობების პრაქტიკულ ტესტირებასა და ოპტიმიზაციაში.

თანამედროვე კვანტური სისტემების ერთ-ერთ მთავარ პრობლემას წარმოადგენს დეკოჰერენცია და გარემო ხმაურის გავლენა. კვანტური მდგომარეობები ძალიან მგრძნობიარეა გარე ფაქტორების მიმართ, როგორიცაა ტემპერატურული რყევები, ელექტრომაგნიტური ველები და გარემოსთან ურთიერთქმედება. აღნიშნული

ფაქტორები იწვევს კვანტური ინფორმაციის დაკარგვას და ამცირებს სისტემის სტაბილურობას. სწორედ ამიტომ განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ხარისხის კონტროლს, რომლის მიზანია კვანტური მდგომარეობების სიზუსტის, სტაბილურობისა და საიმედოობის შეფასება. ხარისხის კონტროლის ეფექტური მექანიზმები აუცილებელია კვანტური ოპერაციების სიზუსტის გაზრდისა და კვანტური ტექნოლოგიების პრაქტიკული გამოყენებისათვის. [3]

კვანტური სისტემების კვლევის პროცესში ფართოდ გამოიყენება კვანტური ტესტირების და სკანირების თანამედროვე მეთოდები. სპეციალური მოწყობილობები გამოიყენება კუბიტების მდგომარეობის მონიტორინგის, ენერგეტიკული დონეების განსაზღვრისა და კვანტური სისტემების ოპტიმიზაციისათვის. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება სპექტროსკოპიულ მეთოდებს, რომლებიც საშუალებას იძლევა მოხდეს კვანტური სისტემების ენერგეტიკული სპექტრის დეტალური შესწავლა. ასევე აქტიურად გამოიყენება ალბათურ გათვლებზე დაფუძნებული სენსორები და სუპერგამტარი კუბიტები, რომლებიც თანამედროვე კვანტური გამომთვლელი მოწყობილობების საფუძველს წარმოადგენს. აღნიშნული ტექნოლოგიები უზრუნველყოფს კვანტური მდგომარეობების ზუსტ კონტროლსა და გაზომვას.

მრავალკუბიტური სისტემების განვითარებასთან ერთად იზრდება კვანტური კონტროლის სირთულეც. კუბიტებს შორის ჩახლართულობის მართვა, ხმაურის შემცირება და კვანტური შეცდომების კორექცია თანამედროვე კვანტური ინჟინერიის ერთ-ერთ მთავარ გამოწვევად რჩება. ამ პრობლემების გადასაჭრელად მეცნიერები ქმნიან ახალ ალგორითმებს, სენსორებსა და კონტროლის მეთოდებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ კვანტური სისტემების სტაბილურ და ეფექტურ ფუნქციონირებას.

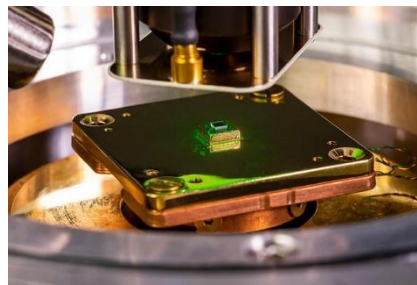
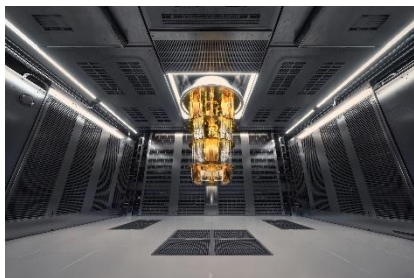
კვანტური სატელეკომუნიკაციო სისტემების მართვა შეგვიძლია განვიხილოთ, კვანტური მექანიკის ფუნდამენტურ პრინციპებად, როგორებიცაა სუპერპოზიცია, კვანტური ჩახლართულობა და ენერგეტიკული დისკრეტულობა. ამ პრინციპების პრაქტიკული გამოყენება მოითხოვს მაღალი სიზუსტის მქონე ტესტირების და სკანირების მოწყობილობებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ კუბიტების მდგომარეობის მონიტორინგს, ენერგეტიკული დონეების განსაზღვრასა და კვანტური პროცესების კონტროლს.

კლასიკური ფიზიკისგან განსხვავებით, კვანტურ სისტემებში ნაწილაკების მდგომარეობა განისაზღვრება ტალღური ფუნქციით, რომელსაც აქვს ალბათური ხასიათი და ეფუძნება კვანტური ფიზიკის ფუნდამენტურ პრინციპებს და აღწერს მიკროსამყაროში მიმდინარე პროცესებს.[1]

კვანტური მდგომარეობის ზოგადი ფორმა წარმოდგენილია როგორც: $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ სადაც: $|0\rangle$ და $|1\rangle$ — საბაზისო მდგომარეობებია, α და β — კომპლექსური

ამპლიტუდებია. ხოლო ნორმირების პირობა: $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ რომელიც აღწერს კუბიტის სუპერპოზიციურ მდგომარეობას..

კვანტური ტესტირების მოწყობილობები



გამოიყენება კვანტური სისტემების ფუნქციონირების სიზუსტის შესამოწმებლად, მათი მთავარი დანიშნულებაა კუბიტების მდგომარეობის მონიტორინგი: კვანტური მდგომარეობების სიზუსტის, სტაბილურობისა და მუშაობის ხარისხის შეფასება, კვანტური ლოგიკური ელემენტების დიაგნოსტიკა და კვანტური ალგორითმების ვალიდაცია. კვანტური მდგომარეობების აღწერისათვის გამოიყენება სიმკვრივის მატრიცა: $\rho = \sum_i p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$

თანამედროვე კვანტურ პროცესორებში მნიშვნელოვანი პრობლემაა კუბიტებს შორის ჩახლართულობის მართვა. ორი კუბიტის Bell მდგომარეობა წარმოადგენს კვანტური ჩახლართულობის (Quantum Entanglement) ყველაზე ცნობილ და ფუნდამენტურ მაგალითს. ასეთ მდგომარეობაში ორი კუბიტი ერთმანეთთან ისე არის დაკავშირებული, რომ ერთის მდგომარეობის გაზომვა ავტომატურად განსაზღვრავს მეორის მდგომარეობას — მაშინაც კი, თუ ისინი ერთმანეთისგან დიდ მანძილზე არიან დაშორებულნი. ყველაზე გავრცელებული Bell მდგომარეობაა:

$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ სადაც- $|00\rangle$ ნიშნავს, რომ ორივე კუბიტი 0 მდგომარეობაშია; $|11\rangle$ ნიშნავს, რომ ორივე კუბიტი 1 მდგომარეობაშია; $\frac{1}{\sqrt{2}}$ — ნორმირების კოეფიციენტი.

ამ ფორმულის მნიშვნელობაა, რომ სისტემა ერთდროულად ორივე მდგომარეობაში იმყოფება (სუპერპოზიცია), მაგრამ გაზომვისას: თუ პირველი კუბიტი აღმოჩნდა „0“, მეორეც აუცილებლად „0“ იქნება; თუ პირველი „1“ აღმოჩნდა, მეორეც „1“ იქნება.

ეს არის ჩახლართულობა — კუბიტების ერთმანეთთან ძლიერი კვანტური კავშირი.

Bell მდგომარეობები გამოიყენება: კვანტურ კრიპტოგრაფიაში; კვანტურ ტელეპორტაციაში; კვანტურ კომუნიკაციებში; კვანტურ კომპიუტერებში.

არსებობს ოთხი ძირითადი Bell მდგომარეობა: $|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle)$; $|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$; $|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$ [1]

ეს მდგომარეობები ქმნის ორკუბიტური კვანტური სისტემების სრულ ბაზისს და თანამედროვე კვანტური ინფორმატიკის საფუძველს წარმოადგენს.

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \text{ ჩახლართული მდგომარეობები განსაკუთრებით}$$

მგრძნობიარეა: ხმაურის, ფაზური შეცდომების, ტემპერატურული არასტაბილურობის მიმართ.[2]

სისტემის ხარისხი რომ შეფასდეს, გამოიყენება ფიდელობის ფუნქცია: $F = |\langle \phi | \psi \rangle|^2$ აქ. ($|\phi\rangle$) — იდეალური მდგომარეობა, ($|\psi\rangle$) — მიღებული მდგომარეობა. ცნობილია თუ $F=1$ მდგომარეობები სრულად ემთხვევა ერთმანეთს. $F \approx 0$ სისტემაში მნიშვნელოვანი შეცდომებია. ანუ ფიდელობა $F(\rho, \sigma) = \left(\text{Tr} \sqrt{\sqrt{\rho} \sigma \sqrt{\rho}} \right)^2$ განსაზღვრავს, რამდენად ახლოსაა ექსპერიმენტულად მიღებული მდგომარეობა თეორიულად განსაზღვრულ მდგომარეობასთან. [Lecture 4: Purifications and fidelity.]

კვანტური დონის სკანირების მოწყობილობები განკუთვნილია ენერგეტიკული დონეების კვლევისა და სპექტრული ანალიზისთვის. კვანტური სისტემების ენერგეტიკული სტრუქტურა განისაზღვრება ჰამილტონიანით: $H |\phi_n\rangle = E_n |\phi_n\rangle$ ენერგეტიკულ დონეებს შორის გადასვლა გამოიხატება ფორმულით: $\hbar \omega_{mn} = E_m - E_n$ სადაც ω_{mn} აღნიშნავს გადასვლის კუთხურ სიხშირეს.

სპექტროსკოპიული მეთოდები.--ლაზერული აბსორბცია, ფლუორესცენცია, რეზონანსული გაზომვებზე დაფუძნებული სენსორები, უზრუნველყოფენ კვანტური სისტემების მაღალსიხშირის ანალიზს.

თეორიული ანალიზისა და თანამედროვე კვლევების საფუძველზე გამოკვეთილი კვანტური სისტემების ხარისხის კონტროლი, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს კვანტური მოწყობილობების ეფექტიანობაზე.

კერძოდ: ერთკუბიტური სისტემების ფიდელობა თანამედროვე სუპერგამტარ პლატფორმებზე აღწევს: $F \approx 0.99$; მრავალკუბიტური სისტემებში ფიდელობა მცირდება ხმაურისა და დეკოჰერენციის გამო: $F \approx 0.90 - 0.95$; მნიშვნელოვნად გაიზარდა კოჰერენტულობის დრო: $T_2 \approx 100 \mu s$ კრიოგენული სისტემების გამოყენებისას კვანტური ტექნოლოგიების ძირითადი გამოწვევები არის დეკოჰერენცია, ხმაური, ტემპერატურული არასტაბილურობა და მასშტაბურობა. მრავალკუბიტური სისტემების მართვისას განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია გარემოს ზემოქმედების მინიმიზაცია და კვანტური მდგომარეობების სტაბილურობის შენარჩუნება.

დასკვნა

კვანტური ტესტირების და კვანტური დონის სკანირების მოწყობილობები წარმოადგენს თანამედროვე კვანტური ტექნოლოგიების ფუნდამენტურ კომპონენტებს.

მათი გამოყენება შესაძლებელს ხდის კვანტური სისტემების დეტალურ მონიტორინგს, ხარისხის კონტროლსა და ოპტიმიზაციას. აღნიშნული ტექნოლოგიები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ კვანტური კომპიუტერების, კვანტური კომუნიკაციებისა და მაღალსიზუსტიანი სენსორული სისტემების განვითარებაში.

კვლევამ აჩვენა, რომ კვანტური სისტემების ეფექტური მართვისათვის აუცილებელია მაღალი მგრძნობელობის მქონე ტესტირების მეთოდების, სტაბილური სკანირების ტექნოლოგიებისა და ინტელექტუალური მონაცემთა დამუშავების სისტემების განვითარება. სამომავლოდ, კვანტური მანქანათმცოდნეობის, ახალი მასალებისა და ტოპოლოგიური ფაზების ინტეგრაცია კიდევ უფრო გააუმჯობესებს კვანტური მოწყობილობების სიზუსტეს, საიმედოობასა და პრაქტიკულ გამოყენებას.

ლიტერატურა

1. Chapeau-Blondeau, François. **Quantum Information and Quantum Signal Processing**. Springer Nature Switzerland AG; 2026; ISBN-13: 9783032274984; UAK: 004.38; 530.145
2. Bergou, János A.; Hillery, Mark; Saffman, Mark. **Quantum Information Processing: Theory and Implementation**. Springer; 2021/2022; ISBN-13: 9783030754358; ISBN-10: 3030754359; UAK: 004.1 : 530.145
3. Djordjevic, Ivan B. **Quantum Information Processing, Quantum Computing, and Quantum Error Correction: An Engineering Approach**. Academic press; 2021; ISBN-13: 9780128219829; ISBN-10: 0128219823; UAK: 004.38 : 530.145
4. Cariolaro, Gianfranco. **Quantum Communications (Signals and Communication Technology)**. Springer; 2016; ISBN-13: 9783319343754; ISBN-10: 3319343750; UAK: 621.391 : 530.145
5. [Lecture 4: Purifications and fidelity](#).

A Comprehensive Analysis of Quantum Systems and the Significance of Quality Control

Marina Kurdadze¹, Givi Murjikneli²

¹Professor, Georgian Technical University, Head of the Academic Department of Digital Telecommunication Technologies. Tel.: +995 555 44 10 20, E-mail: m.kurdadaze@gtu.ge, ORCID: 0009-0001-2918-3328; ²Professor, Georgian Technical University, Academic Department of Digital Telecommunication Technologies. Tel.: +995 599 50 00 54, E-mail: g.murjikneli@gtu.ge, ORCID: 0009-0007-7781-6904

Abstract

The study of quantum systems represents one of the most important directions in modern Quantum Physics. Based on the principles of quantum mechanics, it is possible to conduct an in-depth investigation of microscopic processes, particle interactions, and quantum states. The detailed analysis of quantum systems relies on the application of fundamental concepts such as the Hamiltonian, wave function, fidelity function, and quantum evolution operators. These methods make it possible to determine the energy states, dynamics, and temporal evolution of a system.

In the detailed analysis of quantum systems, quality control is of particular importance because quantum systems are highly sensitive to external influences and noise. Quality control includes the evaluation of the accuracy, stability, and fidelity of quantum states, which is essential for ensuring the efficiency of quantum operations and the reliable transmission of information.

This paper discusses the main theoretical and practical aspects of quantum system analysis, the role of the Hamiltonian and fidelity function in the evaluation of quantum states, as well as quality control mechanisms.

The paper also examines the significance of detailed quantum system analysis and quality control in modern quantum technologies. Special attention is paid to quantum testing and quantum-level scanning devices used for monitoring qubit states, determining energy levels, and optimizing quantum systems. Fundamental principles of quantum physics — superposition, quantum entanglement, and energy discreteness — are also discussed. The paper presents the application of the density matrix, fidelity function, and Hamiltonian in the analysis of quantum states. In addition, spectroscopic methods, sensors based on Josephson Junction technology, and the control problems of multi-qubit systems are examined. Particular attention is devoted to reducing decoherence, noise, and temperature instability. The study demonstrates that quantum testing and scanning systems play a significant role in the development of quantum computers, quantum communication technologies, and advanced sensing systems.

Keywords: quantum systems, quantum testing, quantum level scanning, qubit, quantum entanglement, superposition, fidelity function, Hamiltonian, spectroscopy, decorrelation, quantum computer.

მელატონინის MT1 რეცეპტორის იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის თავისებურებები საკვერცხის ეპითელურ სიმსივნეებში

ნინო იმერლიშვილი¹; ზაზა ბოხუა²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴;

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი გინეკოლოგი;

²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მეანობა-გინეკოლოგიისა და რეპროდუქციული ჯანმრთელობის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, პროფესორი; ³თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი; ⁴თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი; პათოლოგანატომი

აბსტრაქტი

მელატონინი ახორციელებს მრავალ ბიოლოგიურ ეფექტს მისი მემბრანული რეცეპტორების მეშვეობით, განსაკუთრებით მელატონინის რეცეპტორ 1-ის (MT1)მონაწილეობით, რომელიც პასუხისმგებელია უჯრედების პროლიფერაციის, აპოპტოზის, ჟანგვითი სტრესის და სიმსივნის პროგრესირების რეგულირებაში. თუმცა, საკვერცხის ეპითელურ სიმსივნეებში MT1-ის ექსპრესიის პროფილი ჯერ კიდევ არასაკმარისად არის დახასიათებული.

აღნიშნული კვლევის მიზანია საკვერცხის ეპითელურ სიმსივნეებში MT1-ის იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის შესწავლა და მისი განაწილების შეფასება სხვადასხვა ჰისტოლოგიურ ქვეტიპებსა და სიმსივნის პროგრესირების სტადიებს შორის.

კვლევა წარმოადგენს რეტროსპექტულ კოჰორტულ იმუნოჰისტოქიმიურ კვლევას საკვერცხის ეპითელურ ქსოვილის ნიმუშებზე, რომლებიც წარმოადგენენ ნორმალურ საკვერცხის ზედაპირულ ეპითელიუმს, კეთილთვისებიან სეროზულ ცისტადენომას, სეროზულ მოსაზღვრე სიმსივნეს, დაბალი ხარისხის სეროზულ კარცინომას, მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომას და ენდომეტრიოიდულ კარცინომას. MT1 ექსპრესია შეფასდა იმუნოჰისტოქიმიის გამოყენებით და რაოდენობრივად განისაზღვრა H-ქულის მეთოდოლოგიით, შედეგის ინტენსივობისა და დადებითი სიმსივნური უჯრედების პროცენტული მაჩვენებლის საფუძველზე.

კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ MT1 ექსპრესია აღმოჩენილი იქნა ყველა გამოკვლეულ ჯგუფში, მაგრამ გამოავლინა მნიშვნელოვანი ჰეტეროგენულობა ჰისტოლოგიურ

ქვეტიპებს შორის. ნორმალური საკვერცხის ეპითელიუმი ავლენდა დაბალ ექსპრესიას, ხოლო კეთილთვისებიანი სეროზული ცისტადენომები და სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნეები აჩვენებდნენ ზომიერ ექსპრესიას. MT1-ის ყველაზე მაღალი ექსპრესია დაფიქსირდა მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში, ხოლო ენდომეტრიოიდულ კარცინომაში - ყველაზე დაბალი ექსპრესიის დონე. შესაბამისად, ჩვენს შესწავლილ კოჰორტაში MT1 ექსპრესია არ იყო დაკავშირებული ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის დროს თანდათანობით შემცირებასთან, არამედ ავლენდა ჰისტოლოგიურ ქვეტიპ-სპეციფიკურ განაწილების ნიმუშს.

საკვერცხის ეპითელურ სიმსივნეებში MT1 ექსპრესია ხასიათდება მნიშვნელოვანი ჰისტოლოგიური ჰეტეროგენულობით. მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა ავლენს MT1-ის გამოხატულ ზედმეტ ექსპრესიას სხვა ეპითელურ საკვერცხის სიმსივნის ქვეტიპებთან შედარებით.

საკვანძო სიტყვები: მელატონინის რეცეპტორი; MT1; საკვერცხის ეპითელური სიმსივნეები; საკვერცხის კარცინომა; მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა; იმუნოჰისტოქიმია; საკვერცხის კიბო; სიმსივნის ჰეტეროგენულობა.

შესავალი

საკვერცხის კიბო ქალთა რეპროდუქციული სისტემის ერთ-ერთ ყველაზე ლეტალურ ავთვისებიან სიმსივნედ რჩება და მსოფლიოში გინეკოლოგიური კიბოთი გამოწვეული სიკვდილიანობის მნიშვნელოვან წილს შეადგენს. [1] საკვერცხის კიბოს არახელსაყრელი პროგნოზი ძირითადად განპირობებულია სპეციფიკური ადრეული კლინიკური გამოვლინებების არარსებობით, საკმარისად მგრძნობიარე სკრინინგის მეთოდების დეფიციტითა და დაავადების გვიან სტადიაზე დიაგნოზირების ტენდენციით. საკვერცხის ეპითელური სიმსივნეები საკვერცხის ყველა ავთვისებიანი სიმსივნის დაახლოებით 90%-ს შეადგენს და მოიცავს ნეოპლაზმების ჰეტეროგენულ ჯგუფს განსხვავებული მორფოლოგიური, მოლეკულური და კლინიკური მახასიათებლებით. ძირითადი ჰისტოლოგიური ქვეტიპებია სეროზული, ენდომეტრიოიდული, მუცინური და ნათელ უჯრედული კარცინომა, რომელთაგან თითოეულს ახასიათებს სიმსივნის გენეზისა და პროგრესირების უნიკალური გზები.[2]

ამჟამინდელი მტკიცებულებები მიუთითებს, რომ საკვერცხის ეპითელური სიმსივნეები არ წარმოადგენს ერთ დაავადებას, არამედ მოიცავს მრავალ ბიოლოგიურად განსხვავებულ ნეოპლაზიას, რომლებიც წარმოიქმნება სხვადასხვა მოლეკულური მექანიზმებით. მათ შორის, მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა (HGSC) ყველაზე გავრცელებული და კლინიკურად აგრესიული ქვეტიპია, რომელიც საკვერცხის კიბოთი გამოწვეული სიკვდილიანობის უმრავლესობას შეადგენს. ამის საპირისპიროდ, დაბალი ხარისხის სეროზული კარცინომა (LGSC), მოსაზღვრე სეროზული სიმსივნეები და

კეთილთვისებიანი სეროზული ნეოპლაზიები ავლენენ მნიშვნელოვნად განსხვავებულ ბიოლოგიურ ქცევასა და გენეტიკურ ცვლილებებს. შესაბამისად, თანამედროვე გინეკოლოგიური ონკოლოგიის მნიშვნელოვან მიზანს წარმოადგენს ახალი ბიომარკერების იდენტიფიცირება, რომლებიც ამ ბიოლოგიურ განსხვავებებს ასახავენ.[3]

მელატონინი (N-აცეტილ-5-მეტოქსიტრიპტამინი) არის ნეიროენდოკრინული ჰორმონი, რომელიც ძირითადად სინთეზირდება ეპიფიზის მიერ და გამოიყოფა ცირკადული რიტმების შესაბამისად. ძილის რეგულირებაში მისი კარგად დამკვიდრებული როლის გარდა, მელატონინმა მნიშვნელოვანი სამეცნიერო ინტერესი მიიპყრო მისი ანტიოქსიდანტური, ანთების საწინააღმდეგო, იმუნომოდულატორული, ანტიანგიოგენური და ანტინეოპლასტიკური თვისებების გამო.[4] ექსპერიმენტულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინი გავლენას ახდენს კანცეროგენუზში ჩართულ მრავალ უჯრედულ პროცესზე, მათ შორის უჯრედული ციკლის რეგულირებაზე, აპოპტოზზე, დნმ-ის აღდგენაზე, ჟანგვითი სტრესული რეაქციებისა და სიმსივნის მიკროგარემოს რემოდელირებაზე. ამ დაკვირვებებმა გაზარდა ინტერესი მელატონინის სიგნალის გადაცემის პოტენციური როლის მიმართ ადამიანის ავთვისებიან სიმსივნეებში.

მელატონინის ბიოლოგიური ეფექტები ძირითადად განპირობებულია ორი G-ცილასთან დაკავშირებული მემბრანული რეცეპტორის, მელატონინის რეცეპტორი 1-ის (MT1, კოდირებული MTNR1A-ს მიერ) და მელატონინის რეცეპტორი 2-ის (MT2, კოდირებული MTNR1B-ს მიერ) მეშვეობით. MT1 ფართოდ არის ექსპრესირებული ნორმალურ ქსოვილებში და მონაწილეობს უჯრედების პროლიფერაციის, დიფერენციაციისა და გადარჩენის რეგულირებაში. MT1 ექსპრესიის ცვლილებები აღინიშნა რამდენიმე ავთვისებიან სიმსივნეში, მათ შორის სარძევე ჯირკვლის, მსხვილი ნაწლავის, პროსტატის და ენდომეტრიუმის კიბოში. მრავალ ექსპერიმენტულ მოდელში, მელატონინის სიგნალის გადაცემა MT1-ის მეშვეობით ასოცირდება სიმსივნის ზრდის დათრგუნვასთან, ანგიოგენუზის ინჰიბირებასთან, ჰორმონდამოკიდებული გზების მოდულაციასთან და აპოპტოზის ინდუქციასთან.[5,6]

თუმცა, საკვერცხის კიბოს დროს მელატონინის რეცეპტორების ექსპრესიის მნიშვნელობა ბოლომდე შესწავლილი არ არის. ექსპერიმენტულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინს შეუძლია შეაფერხოს საკვერცხის კიბოს უჯრედების პროლიფერაცია, შეამციროს მეტასტაზური პოტენციალი და გაზარდოს მგრძნობელობა ქიმიოთერაპიული საშუალებების მიმართ. გარდა ამისა, ცნობილია, რომ მელატონინი გავლენას ახდენს ჟანგვითი სტრესის გზებსა და იმუნურ რეაქციებზე საკვერცხის სიმსივნის მიკროგარემოში. ამ დაკვირვებების მიუხედავად, შედარებით მცირე რაოდენობის კვლევამ შეაფასა MT1-ის ექსპრესია უშუალოდ ადამიანის საკვერცხის ეპითელურ სიმსივნეებში და არსებული მონაცემები კვლავ შეუსაბამოა.[7,8] ზოგიერთი ავტორი ვარაუდობს, რომ რეცეპტორების ექსპრესიის შემცირება შეიძლება თან ახლდეს

სიმსივნის პროგრესირებას, ზოგი კი აღნიშნავს რეცეპტორების ექსპრესიის მუდმივ ან თუნდაც გაზრდილ მატებას საკვერცხის კიბოს კონკრეტულ ქვეტიპებში.[9]

ეს შეუსაბამობები შეიძლება ნაწილობრივ ასახავდეს საკვერცხის ეპითელიური სიმსივნეების ბიოლოგიურ ჰეტეროგენულობას. ჰისტოლოგიური ქვეტიპები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან მოლეკულური ცვლილებების, ჰორმონალური რეგულირების, გენომური არასტაბილურობისა და სიმსივნის მიკროგარემოს შემადგენლობის თვალსაზრისით. შესაბამისად, MT1 ექსპრესიის შეფასება საკვერცხის ეპითელიური დაზიანებების მთელ სპექტრში, მათ შორის კეთილთვისებიანი, მოსაზღვრე და ავთვისებიანი სიმსივნეების ჩათვლით, შეიძლება მნიშვნელოვან ინფორმაციას გვაწვდიდეს მელატონინის სიგნალის გადაცემასა და საკვერცხის კანცეროგენეზს შორის ურთიერთობის შესახებ.

განსაკუთრებული ინტერესი ბოლო დროს გაჩნდა მელატონინის რეცეპტორებსა და უჯრედების პროლიფერაციის, აპოპტოზის, ღეროვანი უჯრედების შენარჩუნებასა და ჰორმონების მიმართ მგრძნობელობაში ჩართულ გზებს შორის პოტენციურ ურთიერთქმედებასთან დაკავშირებით.[10] ეს მექანიზმები კრიტიკულ როლს თამაშობენ საკვერცხის სიმსივნის განვითარებასა და პროგრესირებაში და შეიძლება ხელი შეუწყონ კლინიკური ქცევის განსხვავებებს ჰისტოლოგიურ ქვეტიპებს შორის. საკვერცხის ეპითელიურ სიმსივნეებში MT1 ექსპრესიის განაწილების გაგება წარმოადგენს აუცილებელ პირველ ნაბიჯს საკვერცხის ნეოპლაზიაში მელატონინის სიგნალის გადაცემის ბიოლოგიური მნიშვნელობის გარკვევისკენ.

ამ კვლევის მიზანს წარმოადგენდა MT1-ის იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის დადგენა ნორმალურ საკვერცხის ეპითელიუმის, საკვერცხის კეთილთვისებიანი ეპითელიური სიმსივნეების, მოსაზღვრე სიმსივნეებისა და ავთვისებიანი ეპითელიური ნეოპლაზიების დროს. გარდა ამისა, კვლევის მიზანი იყო MT1 ექსპრესიის განაწილების დახასიათება ძირითად ჰისტოლოგიურ ქვეტიპებს შორის და მისი კავშირის შეფასება კლინიკურ-პათოლოგიურ

კვლევის მასალა და მეთოდები

კვლევის დიზაინი და შემთხვევის შერჩევა: რეტროსპექტული დაკვირვებითი იმუნოჰისტოქიმიური კვლევა ჩატარდა თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტსა და სამეცნიერო-დიაგნოსტიკურ ლაბორატორიაში. ფორმალინით ფიქსირებული, პარაფინში ჩაყალიბებული (FFPE) ქსოვილის ნიმუშები, რომლებიც მიღებული იყო რუტინული დიაგნოსტიკური პრაქტიკიდან, ამოღებული იქნა დაწესებულების არქივიდან და შემდგომში დამატებით გაანალიზდა. კვლევა მოიცავდა საკვერცხის ეპითელიური

დაზიანებებს, რომლებიც წარმოადგენდა სეროზული და ენდომეტრიოიდული ნეოპლაზიების სრულ სპექტრს, მათ შორის საკვერცხის ზედაპირის ნორმალურ ეპითელიუმს, კეთილთვისებიან სეროზულ ცისტადენომას, სეროზულ მოსაზღვრე სიმსივნეს, დაბალი ხარისხის სეროზულ კარცინომას (LGSC), მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომას (HGSC) და ენდომეტრიოიდულ კარცინომას.

შემთხვევები შეირჩა ადეკვატური ქსოვილოვანი მასალის ხელმისაწვდომობისა და შენარჩუნებული ჰისტომორფოლოგიის მიხედვით. გამოირიცხა ნიმუშები ფართო ნეკროზით, მძიმე ფიქსაციის არტეფაქტებით, არასაკმარისი სიმსივნური ქსოვილით ან არაადეკვატური იმუნოჰისტოქიმიური ხარისხით. ყველა დიაგნოზი დამოუკიდებლად გადაიხედა და დადასტურდა გამოცდილი პათოლოგანატომების მიერ ქალის სასქესო ტრაქტის სიმსივნეების მსოფლიო ჯანდაცვის ორგანიზაციის (WHO) მოქმედი კრიტერიუმების შესაბამისად.

კლინიკოპათოლოგიური მონაცემების შეგროვება: კლინიკური და პათოლოგიური ინფორმაცია შეგროვდა პათოლოგიის ანგარიშებიდან/მომართვის ფურცლებიდან და ინსტიტუციური მონაცემთა ბაზებიდან. აღწერილი პარამეტრები მოიცავდა პაციენტის ასაკს, მენოპაუზის სტატუსს, ნიმუშის ტიპს, სიმსივნის ლატერალურობას, სიმსივნის ზომას, FIGO სტადიას, სიმსივნის ხარისხს, კაფსულის დაზიანებას/რღვევას, ლიმფოვასკულური სივრცის ინვაზიას (LVSI), პერიტონეალურ იმპლანტებს, ლიმფური კვანძის სტატუსს, მეტასტაზურ დაავადებას, რეციდივის სტატუსს, დაკვირვების ხანგრძლივობას და გადარჩენის სტატუსს.

სიმსივნეები კლასიფიცირებული იქნა ჰისტოლოგიური ქვეტიპის მიხედვით და შემდგომში დაჯგუფდა კეთილთვისებიან, მოსაზღვრე და ავთვისებიან კატეგორიებად სტატისტიკური შედარებითი ანალიზისთვის.

იმუნოჰისტოქიმია: იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზისთვის შეირჩა FFPE ქსოვილის ბლოკები. მომზადდა და დაფიქსირდა დადებითად დამუხტულ სლაიდებზე 3-4 მკმ სისქის ანათლები. დეპარაფინიზაციისა და რეჰიდრატაციის შემდეგ, ანტიგენის აღდგენა ჩატარდა სითბურად ინდუცირებული ეპიტოპის მოპოვების გამოყენებით, მწარმოებლის რეკომენდაციების შესაბამისად.

იმუნოჰისტოქიმიური შეღებვა ჩატარდა მელატონინის რეცეპტორ 1A-ს (MT1/MTNR1A) წინააღმდეგ მიმართული მონოკლონური ანტისხეულის გამოყენებით. ვიზუალიზაცია მიღწეული იქნა პოლიმერზე დაფუძნებული დეტექციის სისტემის გამოყენებით, 3,3'-დიამინობენზიდინის (DAB) ქრომოგენის სახით და ჰემატოქსილინის კონტრშეღებვით.

შედეგების თითოეულ ცდაში ჩართული იყო შესაბამისი დადებითი და უარყოფითი კონტროლი. დადებითი იმუნორეაქტიულობა იდენტიფიცირებული იყო, როგორც ეპითელურ სიმსივნურ უჯრედებში მემბრანული და/ან ციტოპლაზმური შედეგა.

MT1 ექსპრესიის შეფასება: იმუნოჰისტოქიმიური შეფასება ჩატარდა დამოუკიდებლად ორი პათოლოგანატომის მიერ, რომლებიც არ იყვნენ ინფორმირებულები კლინიკურ-პათოლოგიურ მონაცემებზე. MT1 ექსპრესია შეფასდა ნახევრად რაოდენობრივად, შედეგების ინტენსივობისა და დადებითად შეღებილი სიმსივნური უჯრედების პროცენტული მაჩვენებლის საფუძველზე.

შედეგების ინტენსივობა შეფასდა შემდეგნაირად: 0 – შედეგების არარსებობა; 1 – სუსტი შედეგა; 2 – საშუალო შედეგა; 3 – ძლიერი შედეგა.

დადებითი სიმსივნური უჯრედების პროცენტული მაჩვენებელი დაფიქსირდა 0%-დან 100%-მდე.

H-ქულა გამოითვალა ფორმულის გამოყენებით:

H-ქულა = $(1 \times \% \text{ სუსტი}) + (2 \times \% \text{ ზომიერი}) + (3 \times \% \text{ ძლიერი})$.

შედეგად, ჯამური ქულა 0-დან 300-მდე მერყეობდა. H-ქულის მნიშვნელობების საფუძველზე, MT1 ექსპრესია კატეგორიზებული იყო შემდეგნაირად: დაბალი ექსპრესია: H-ქული <100; საშუალო ექსპრესია: H-ქული 100–199; მაღალი ექსპრესია: H-ქული ≥ 200 . შედეგების ინტენსივობის გარდა, დომინანტური შედეგების ნიმუში დაფიქსირდა, როგორც მემბრანული, ციტოპლაზმური ან შერეული მემბრანულ-ციტოპლაზმური ექსპრესია.

სტატისტიკური ანალიზი: სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა IBM SPSS Statistics პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით (IBM Corp., Armonk, NY, აშშ).

უწყვეტი ცვლადები გამოიხატა საშუალო $\pm$ სტანდარტული გადახრის, მედიანური მნიშვნელობების და დიაპაზონების სახით, ხოლო კატეგორიული ცვლადები წარმოდგენილი იყო სიხშირეების და პროცენტების სახით. ვინაიდან იმუნოჰისტოქიმიურმა მონაცემებმა აჩვენა არაპარამეტრული განაწილება, მრავალ ჯგუფს შორის შედარება ჩატარდა კრუსკალ-ვალის ტესტის გამოყენებით. ცალკეულ ჯგუფებს შორის წყვილური შედარებები ჩატარდა მან-უიტნის U ტესტის გამოყენებით.

MT1 ექსპრესიასა და კლინიკურ-პათოლოგიურ პარამეტრებს შორის კავშირი შეფასდა სპირმანის რანგული კორელაციის კოეფიციენტის და პირსონის ქი-კვადრატის ტესტის გამოყენებით. სტატისტიკურად სარწმუნო მნიშვნელობა განისაზღვრა, როგორც ორმხრივი p-მნიშვნელობა 0.05-ზე ნაკლები.

კვლევა ჩატარდა ჰელსინკის დეკლარაციის პრინციპების შესაბამისად და დამტკიცებულია თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ეთიკის კომიტეტის მიერ. ყველა ქსოვილის ნიმუში აღებულია არქივირებული დიაგნოსტიკური მასალიდან და გაანალიზდა ანონიმურად. პაციენტის კონფიდენციალურობა დაცული იყო კვლევის განმავლობაში.

კვლევის შედეგები

კვლევის კოჰორტაში შედიოდა საკვერცხის ეპითელიური ქსოვილის 72 ნიმუში, მათ შორის ნორმალური საკვერცხის ზედაპირული ეპითელიუმი (საკონტროლო ჯგუფი), კეთილთვისებიანი სეროზული ცისტადენომა, სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნე, დაბალი ხარისხის სეროზული კარცინომა, მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა და ენდომეტრიოიდული კარცინომა. MT1 იმუნორეაქტიულობა გამოვლინდა დიაგნოსტიკური შემთხვევების უმეტეს ნაწილში, მაგრამ მისი განაწილება არ შეესაბამებოდა ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის პროგრესულ მატებას. ამის ნაცვლად, MT1 ექსპრესიამ აჩვენა მკაფიოდ ჰისტოტიპზე დამოკიდებული ნიმუში, ყველაზე ძლიერი ექსპრესია დაფიქსირდა მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში და ყველაზე სუსტი ექსპრესია ენდომეტრიოიდულ კარცინომაში (ცხრილი 1).

ჯგუფი	შემთხვევების რაოდენობა (n)	პროცენტი (%)
ნორმალური საკვერცხის ზედაპირული ეპითელიუმი	12	16.7
სეროზული ცისტადენომა	12	16.7
სასაზღვრო (Borderline) სეროზული სიმსივნე	12	16.7
სეროზული კარცინომა (LGSC)	12	16.7
სეროზული კარცინომა (HGSC)	12	16.7
ენდომეტრიოიდული კარცინომა	12	16.7
სულ	72	100.0

ცხრილი 16. კვლევაში ჩართული შემთხვევების განაწილება ჰისტოლოგიური ჯგუფების მიხედვით

ნორმალურ საკვერცხის ზედაპირულ ეპითელიუმში MT1 ექსპრესია უპირატესად დაბალი იყო, H-ქულებით 50-დან 80-მდე. კეთილთვისებიან სეროზულ ცისტადენომებში

ექსპრესიის ზომიერი ზრდა დაფიქსირდა, H-ქულებით 100-110-ის გარშემო. სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნეები ავლენდნენ მსგავს ზომიერ ექსპრესიის პროფილს, H-ქულებით ძირითადად 110-დან 120-მდე. ეს მონაცემები მიუთითებს, რომ არაინვაზიური სეროზული ეპითელიური დაზიანებები ინარჩუნებენ MT1 ექსპრესიას.

ავთვისებიანი სიმსივნეებიდან MT1 ექსპრესიამ აჩვენა მნიშვნელოვანი ინტერტუმორალური ჰეტეროგენულობა. დაბალი ხარისხის სეროზულმა კარცინომამ აჩვენა დაბალიდან საშუალო ექსპრესიამდე, H-ქულებით 60-დან 100-მდე. ამის საპირისპიროდ, მაღალი ხარისხის სეროზულმა კარცინომამ აჩვენა მუდმივად ძლიერი MT1 იმუნორეაქტიულობა, H-ქულებით 210-დან 270-მდე. ეს ნიმუში განმეორებადი იყო მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომის ქვეჯგუფში და ხასიათდებოდა შეღებვის მაღალი ინტენსივობით და სიმსივნური უჯრედების ფართო განაწილებით. ენდომეტრიოიდულმა კარცინომამ აჩვენა საპირისპირო ნიმუში, ერთგვაროვნად შემცირებული MT1 ექსპრესიით და H-ქულებით 20-დან 60-მდე (ცხრილი 2).

ჰისტოლოგიური ჯგუფი	MT1 ინტენსივობა (0-3)	MT1 (%)	MT1 H-Score
ნორმალური ეპითელიუმი	1-2	40-50	50-80
სეროზული ცისტადენომა	2	50-55	100-110
მოსაზღვრე სეროზული სიმსივნე	2-3	40-55	110-120
LGSC	2	30-50	60-100
HGSC	3	70-90	210-270
ენდომეტრიოიდული კარცინომა	1-2	20-30	20-60

ცხრილი 17. MT1 რეცეპტორის ექსპრესიის მაჩვენებლები სხვადასხვა ჰისტოლოგიურ ჯგუფში;

შედარებითმა ანალიზმა აჩვენა, რომ MT1 ექსპრესია ძირითადად არ იყო დაკავშირებული კეთილთვისებიან-მოსაზღვრე-ავთვისებიან თანმიმდევრობასთან.

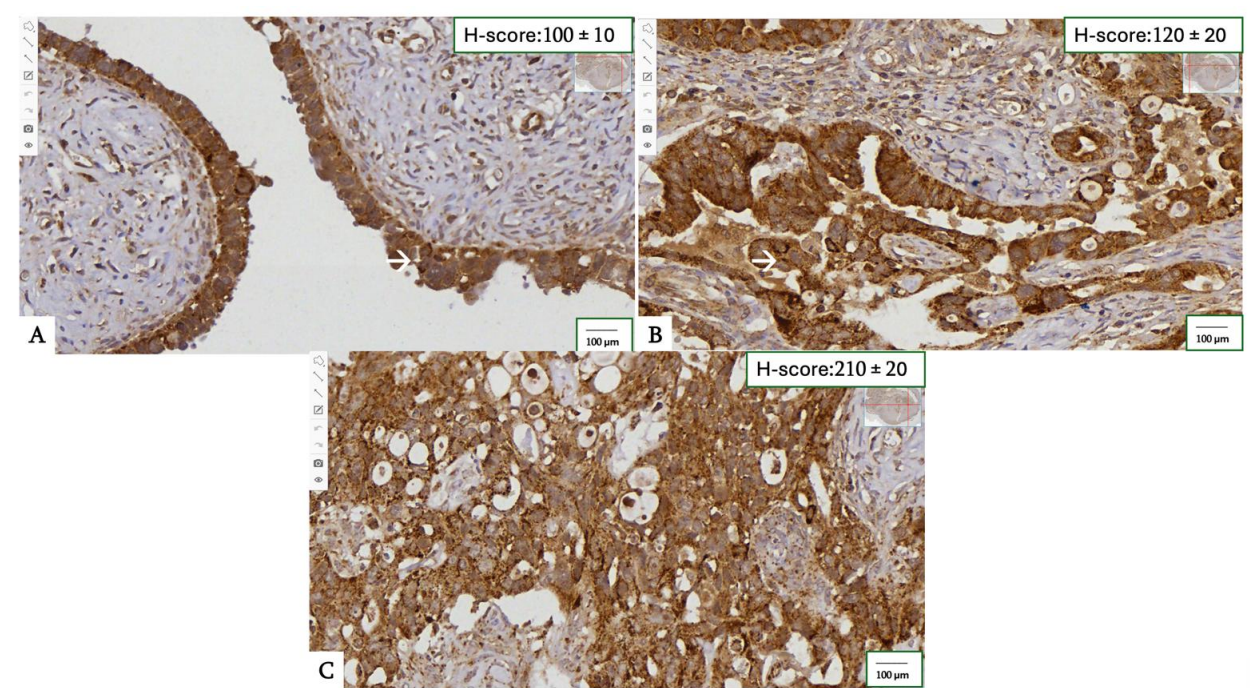
მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა წარმოადგენდა MT1-ის მაღალ ფენოტიპს, ხოლო ენდომეტრიოიდული კარცინომა - MT1-ის დაბალ ფენოტიპს. დაბალი ხარისხის სეროზული კარცინომა შუალედურ პოზიციას იკავებდა, ხოლო კეთილთვისებიანი სეროზული ცისტადენომა და სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნე ზომიერ რეცეპტორულ ექსპრესიას ავლენდა (ცხრილი 3).

სიმსივნის ტიპი	MT1 H-Score (დიაპაზონი)
LGSC	60–100
HGSC	210–270
ენდომეტრიოიდული კარცინომა	20–60

ცხრილი 18. MT1 H-Score-ის შედარება ავთვისებიანი ეპითელური სიმსივნეების ქვეჯგუფებში;

როდესაც MT1 ექსპრესია თვისებრივად კატეგორიზებული იყო, ყველა მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომა მაღალი ექსპრესიის კატეგორიას მიეკუთვნებოდა, ხოლო ყველა ენდომეტრიოიდული კარცინომა დაბალი ექსპრესიის კატეგორიას. კეთილთვისებიანი სეროზული ცისტადენომები და სეროზული მოსაზღვრე სიმსივნეები უპირატესად კლასიფიცირებული იყო, როგორც ზომიერი ექსპრესიის დაზიანებები. ეს კატეგორიული განაწილება კიდევ უფრო ადასტურებს იმ ინტერპრეტაციას, რომ MT1 ექსპრესია ასახავს სიმსივნის ჰისტოტიპს და არა მხოლოდ სიმსივნის პროგრესირებას.

უფრო მაღალი MT1 H-ქულები დაფიქსირდა სიმსივნეებში არასასურველი პათოლოგიური მახასიათებლებით, როგორიცაა მაღალი ხარისხის მორფოლოგია, ლიმფური კვანძების დაზიანება და პერიტონეალური იმპლანტები; თუმცა, ეს ასოციაციები დიდწილად განპირობებული იყო მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომის MT1-ის მაღალი ექსპრესიის პროფილით. ამიტომ, ამ მონაცემთა ნაკრებში MT1 არ უნდა იქნას განმარტებული უბრალოდ, როგორც აგრესიულობის მარკერი. მისი ექსპრესია უფრო მჭიდრო კავშირშია სეროზულ მაღალი ხარისხის დიფერენციაციასთან, ვიდრე უნივერსალურ პროგრესირებასთან დაკავშირებულ მექანიზმთან.



სურათი 9. MT1 (Melatonin Receptor 1) იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესია საკვერცხის სეროზული ეპითელიური სიმსივნეების სხვადასხვა ტიპებში. *A.* სეროზული ცისტადენომა ($H\text{-score} = 100 \pm 10$). *B.* მოსაზღვრე (borderline) სეროზული სიმსივნე ($H\text{-score} = 120 \pm 20$). *C.* სეროზული ცისტადენოკარცინომა (HGSC) ($H\text{-score} = 210 \pm 20$). ისრები მიუთითებს MT1-პოზიტიურ სიმსივნურ ეპითელიურ უჯრედებზე. მასშტაბი: 100 μm .

საერთო ჯამში, შედეგები აჩვენებს, რომ საკვერცხის ეპითელიურ სიმსივნეებში MT1-ის ექსპრესია ჰეტეროგენული და ჰისტოტიპ-სპეციფიკურია. ამ კვლევის მთავარი დასკვნა არის MT1 გამოხატული მნიშვნელოვანი ექსპრესიის არსებობა მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში, რაც განსხვავდება ენდომეტრიოიდულ კარცინომაში დაბალი ექსპრესიისგან და ზომიერი ექსპრესიისგან კეთილთვისებიან და მოსაზღვრე სეროზულ ეპითელიურ სიმსივნეებში. ეს დასკვნები მიუთითებს, რომ MT1-ს შეიძლება ჰქონდეს ბიოლოგიური მნიშვნელობა მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომის მოლეკულურ ფენოტიპში და შემდგომ ანალიზებში უნდა შეფასდეს პროლიფერაციულ აქტივობასთან, ჰორმონულ რეცეპტორების სტატუსთან, აპოპტოზურ რეგულაციასთან და ღეროვან უჯრედებთან ასოცირებულ მარკერებთან მიმართებაში.

შედეგების ანალიზი/განსჯა

მელატონინი მრავალფუნქციური ჰორმონია, რომელიც მონაწილეობს ცირკადული რიტმის, ოქსიდაციური სტრესის, იმუნური რეაქციების, პროლიფერაციისა და აპოპტოზის რეგულირებაში. ამ ეფექტებიდან ბევრი განპირობებულია MT1 რეცეპტორის მეშვეობით, რომელიც მონაწილეობს ადამიანის რამდენიმე ავთვისებიანი სიმსივნის პათოგენეზში. თუმცა, MT1-ის როლი საკვერცხის ეპითელიურ სიმსივნეებში ჯერ კიდევ არასაკმარისად არის დახასიათებული.[11]

ჩვენი კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ MT1 ექსპრესია შენარჩუნებულია საკვერცხის ეპითელიური სიმსივნეების მთელ სპექტრში, მაგრამ ავლენს გამოხატულ ჰეტეროგენულობას ჰისტოლოგიურ ქვეტიპებს შორის. ყველაზე მნიშვნელოვანი კვლევის შედეგი იყო მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში დაფიქსირებული MT1-ის ძლიერი ექსპრესია, მაშინ როდესაც ენდომეტრიოიდულმა კარცინომებმა აჩვენეს მუდმივად დაბალი ექსპრესია. კეთილთვისებიანმა სეროზულმა ცისტადენომებმა და სეროზულმა მოსაზღვრე სიმსივნეებმა აჩვენეს ექსპრესიის შუალედური დონეები. ეს დასკვნები შეიძლება მიუთითებს, რომ MT1 ექსპრესია ძირითადად ასოცირდება სიმსივნის ჰისტოტიპთან და არა მარტივ კეთილთვისებიანიდან ავთვისებიანამდე პროგრესირების თანმიმდევრობასთან.

წინა ექსპერიმენტულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ მელატონინი ახდენს ანტიპროლიფერაციულ და სიმსივნის საწინააღმდეგო ეფექტებს საკვერცხის კიბოს დროს. [12]ამ დაკვირვებებზე დაყრდნობით, რეცეპტორების ექსპრესიის შემცირება

შეიძლება მოსალოდნელი იყოს აგრესიულ სიმსივნეებში. თუმცა, ჩვენი შედეგები საპირისპირო ტენდენციას ავლენს მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში. ეს შეუსაბამობა იმაზე მიუთითებს, რომ მხოლოდ რეცეპტორების ექსპრესია შესაძლოა არ ასახავდეს რეცეპტორების ფუნქციონირებას და MT1-ის მომატებული ექსპრესია შესაძლოა წარმოადგენდეს კომპენსატორულ რეაქციას გაზრდილ ჟანგვით სტრესზე, გენომურ არასტაბილურობაზე ან მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომისთვის დამახასიათებელ სხვა ბიოლოგიურ პროცესებზე.

მაღალი ხარისხის სეროზულ და ენდომეტრიოიდულ კარცინომებს შორის დაფიქსირებული MT1-ის ექსპრესიის განსხვავება კიდევ უფრო ადასტურებს იმ კონცეფციას, რომ საკვერცხის ეპითელიური სიმსივნეები წარმოადგენენ ბიოლოგიურად განსხვავებულ ერთეულებს. ვინაიდან ეს ქვეტიპები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან თავიანთი მოლეკულური გზებითა და კლინიკური ქცევით.

MT1-ის მაღალი ექსპრესია ასევე დაფიქსირდა სიმსივნეებში, რომლებსაც ჰქონდათ არასასურველი პათოლოგიური მახასიათებლები, მათ შორის ლიმფური კვანძების დაზიანება და პერიტონეალური იმპლანტები. თუმცა, როგორც ჩანს, ეს ასოციაციები დიდწილად განპირობებულია მაღალი ხარისხის სეროზული კარცინომის ქვეჯგუფში MT1-ის მაღალი ექსპრესიის უპირატესობით. შესაბამისად, MT1 არ უნდა იქნას განმარტებული, როგორც სიმსივნის აგრესიულობის დამოუკიდებელი მარკერი მხოლოდ ამჟამინდელი მონაცემების საფუძველზე.

ამ კვლევის ძირითადი შეზღუდვები მოიცავს მის რეტროსპექტულ დიზაინს და MT1 ცილის ექსპრესიის ექსკლუზიურ შეფასებას რეცეპტორების ფუნქციონალურობის ან შემდგომი სიგნალიზაციის გზების შეფასების გარეშე. მიუხედავად ამისა, დასკვნები აჩვენებს, რომ MT1 ექსპრესია საკვერცხის ეპითელიურ სიმსივნეებს შორის ძალიან ჰეტეროგენულია და განსაკუთრებით გამოხატულია მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში.

დასკვნა

ამ კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ MT1 მელატონინის რეცეპტორის ექსპრესია მეტწილად შენარჩუნებულია საკვერცხის ეპითელიური სიმსივნეების მთელ სპექტრში, მაგრამ ავლენს მნიშვნელოვან ჰისტოტიპ-დამოკიდებულ ცვალებადობას. ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის დროს პროგრესული შემცირების კონცეფციის საწინააღმდეგოდ, MT1 ექსპრესიის ყველაზე მაღალი დონე დაფიქსირდა მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში, მაშინ როდესაც ენდომეტრიოიდულმა კარცინომამ აჩვენა მუდმივად დაბალი ექსპრესია. კეთილთვისებიანმა სეროზულმა

ცისტადენომებმა და სეროზულმა მოსაზღვრე სიმსივნეებმა აჩვენა შუალედური ექსპრესიის პროფილები.

ეს დასკვნები მიუთითებს, რომ MT1 ექსპრესია უფრო მჭიდრო კავშირშია საკვერცხის კარცინომის კონკრეტული ქვეტიპების ბიოლოგიურ მახასიათებლებთან, ვიდრე კეთილთვისებიან-მოსაზღვრე-ავთვისებიანი პროგრესირების თანმიმდევრობასთან. MT1 ექსპრესიის მნიშვნელოვანი მატება მაღალი ხარისხის სეროზულ კარცინომაში მიუთითებს მელატონინის სიგნალის გადაცემის პოტენციურ როლზე ამ სიმსივნის ქვეტიპის მოლეკულურ ფენოტიპში.

საერთო ჯამში, MT1 შეიძლება წარმოადგენდეს სასარგებლო ბიომარკერს საკვერცხის ეპითელიური სიმსივნის ჰეტეროგენულობის დასახასიათებლად. საკვერცხის კარცინოგენეზში მისი ბიოლოგიური და პოტენციური პროგნოზული მნიშვნელობის გასარკვევად საჭიროა შემდგომი კვლევები, რომლებიც დამატებით შეისწავლის MT1 ექსპრესიას პროლიფერაციულ აქტივობასთან, აპოპტოზურ რეგულაციასთან, ჰორმონის რეცეპტორების სტატუსთან, ღეროვან უჯრედებთან ასოცირებულ მარკერებთან და კლინიკურ შედეგებთან.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Cancer Genome Atlas Research Network. Integrated genomic analyses of ovarian carcinoma. Nature 2011;474:609–15. <https://doi.org/10.1038/nature10166>.
- [2] Kipiani N, Kharaishvili M, Bokhua Z, Burkadze G, Kepuladze S. Features of Melatonin Receptor Expression in Endometrial Precancerous and Neoplastic Processes. Georgian Scientists 2026;8:227–39. <https://doi.org/10.52340/g.s.2026.08.01.21>.
- [3] Ricciardi E, Baert T, Ataseven B, Heitz F, Prader S, Bommert M, et al. Low-grade Serous Ovarian Carcinoma. Geburtshilfe Frauenheilkd 2018;78:972–6. <https://doi.org/10.1055/a-0717-5411>.
- [4] Linowiecka K, Slominski AT, Reiter RJ, Böhm M, Steinbrink K, Paus R, et al. Melatonin: A Potential Regulator of DNA Methylation. Antioxidants 2023;12. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX12061155>.
- [5] Dubocovich ML, Markowska M. Functional MT1 and MT2 melatonin receptors in mammals. Endocrine 2005;27:101–10. <https://doi.org/10.1385/ENDO:27:2:101>.
- [6] Liu J, Clough SJ, Hutchinson AJ, Adamah-Biassi EB, Popovska-Gorevski M, Dubocovich ML. MT1 and MT2 Melatonin Receptors: A Therapeutic Perspective.

Annu Rev Pharmacol Toxicol 2016;56:361–83. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-PHARMTOX-010814-124742>.

- [7] Yuan L, Collins AR, Dai J, Dubocovich ML, Hill SM. MT1 melatonin receptor overexpression enhances the growth suppressive effect of melatonin in human breast cancer cells. *Mol Cell Endocrinol* 2002;192:147–56. [https://doi.org/10.1016/S0303-7207\(02\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S0303-7207(02)00029-1).
- [8] Lai L, Yuan L, Cheng Q, Dong C, Mao L, Hill SM. Alteration of the MT1 melatonin receptor gene and its expression in primary human breast tumors and breast cancer cell lines. *Breast Cancer Res Treat* 2009;118:293–305. <https://doi.org/10.1007/S10549-008-0220-1>.
- [9] Ram PT, Dai J, Yuan L, Dong C, Kiefer TL, Lai L, et al. Involvement of the mt1 melatonin receptor in human breast cancer. *Cancer Lett* 2002;179:141–50. [https://doi.org/10.1016/S0304-3835\(01\)00873-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3835(01)00873-4).
- [10] Collins A, Yuan L, Kiefer TL, Cheng Q, Lai L, Hill SM. Overexpression of the MT1 melatonin receptor in MCF-7 human breast cancer cells inhibits mammary tumor formation in nude mice. *Cancer Lett* 2003;189:49–57. [https://doi.org/10.1016/S0304-3835\(02\)00502-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3835(02)00502-5).
- [11] González A, Martínez-Campa C, Mediavilla MD, Alonso-González C, Sánchez-Mateos S, Hill SM, et al. Effects of MT1 melatonin receptor overexpression on the aromatase-suppressive effect of melatonin in MCF-7 human breast cancer cells. *Oncol Rep* 2007;17:947–53. <https://doi.org/10.3892/OR.17.4.947>.
- [12] Kadekaro AL, Andrade LNS, Floeter-Winter LM, Rollag MD, Virador V, Vieira W, et al. MT-1 melatonin receptor expression increases the antiproliferative effect of melatonin on S-91 murine melanoma cells. *J Pineal Res* 2004;36:204–11. <https://doi.org/10.1111/J.1600-079X.2004.00119.X>.

Features of immunohistochemical expression of melatonin MT1 receptor in epithelial ovarian tumors

Nino Imerlishvili¹; Zaza Bokhua²; Giorgi Burkadze³; Shota Kepuladze⁴

¹PhD Candidate at Tbilisi State Medical University; Gynaecologist; ²Professor, Head of the Department of Obstetrics, Gynaecology, and Reproductive Health, Tbilisi State Medical University; ³Professor, Head of the Department of Molecular Pathology, Tbilisi State University; Pathologist; ⁴Associate Professor, Department of Molecular Pathology, Tbilisi State Medical University; MD, Pathologist

Abstract

Melatonin exerts multiple biological effects through its membrane receptors, particularly Melatonin Receptor 1 (MT1), which has been implicated in the regulation of cellular proliferation, apoptosis, oxidative stress, and tumour progression. However, the expression profile of MT1 in ovarian epithelial tumours remains insufficiently characterised. To investigate the immunohistochemical expression of MT1 in ovarian epithelial tumors and evaluate its distribution across different histological subtypes and stages of tumor progression. A retrospective immunohistochemical study was performed on ovarian epithelial tissue specimens representing normal ovarian surface epithelium, benign serous cystadenoma, serous borderline tumour, low-grade serous carcinoma, high-grade serous carcinoma, and endometrioid carcinoma. MT1 expression was assessed using immunohistochemistry and quantified by H-score methodology based on staining intensity and the percentage of positive tumour cells. MT1 expression was detected in all examined groups but demonstrated substantial heterogeneity among histological subtypes. Normal ovarian epithelium showed low expression, while benign serous cystadenomas and serous borderline tumours demonstrated moderate expression. The highest MT1 expression was observed in high-grade serous carcinoma, whereas endometrioid carcinoma exhibited the lowest expression levels. MT1 expression was therefore not associated with a gradual decrease during malignant transformation but rather displayed a subtype-specific distribution pattern.

MT1 expression in ovarian epithelial tumours is characterised by significant histological heterogeneity. High-grade serous carcinoma demonstrates marked MT1 overexpression compared with other epithelial ovarian tumour subtypes. These findings suggest that MT1 may be associated with subtype-specific biological mechanisms rather than serving as a simple marker of tumour progression.

Keywords: *Melatonin receptor; MT1; ovarian epithelial tumours; ovarian carcinoma; high-grade serous carcinoma; immunohistochemistry; ovarian cancer; tumour heterogeneity.*

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია:

ნინო იმერლიშვილი - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის დოქტორანტი; ექიმი გინეკოლოგი;

Nino Imerlishvili – PhD Student at Tbilisi State Medical University, MD, OBG;

Email: z.bokhua@tsmu.edu

ზაზა ბოხუა - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მეანობა-გინეკოლოგიისა და რეპროდუქციული ჯანმრთელობის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, პროფესორი;

Zaza Bokhua – Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department OBG,

Email: z.bokhua@tsmu.edu

გიორგი ბურკაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;
George Burkadze - Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department of Molecular Pathology;

E-mail: burkadze@yahoo.com g.burkadze@tsmu.edu

Phone Number: 599578833

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

შოთა კეპულაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

Shota Kepuladze – Associate Professor at Tbilisi State Medical University Molecular Pathology Department, MD, Clinical Pathologist;

E-mail: shota.kepuladze@gmail.com Sh.kepuladze@tsmu.edu

Phone Number: +995 598297600

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

მიწის სამუშაოთა უსაფრთხოების ამაღლება გრუნტის კედლების გამაგრების ინოვაციური მეთოდების გამოყენებით.

ნიკოლოზ შავერდაშვილი¹, ნანა რაზმაძე², ნინო რატიანი³, მზია ქიტოშვილი⁴, ნუცა
გუმბერიძე⁵

¹საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის“ დეპარტამენტი, დოქტორანტი, Nikoloz298@gmail.com; ²საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის“ დეპარტამენტი, პროფესორი, n.razmadze@gtu.ge; ³საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის“ დეპარტამენტი, პროფესორი, n.ratiani@gtu.ge; ⁴საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „შრომის უსაფრთხოებისა და საგანგებო სიტუაციების მართვის“ დეპარტამენტი, ასოცირებული პროფესორი, m.qitoshvili@gtu.ge; ⁵საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „ფილოსოფიისა და საზოგადოებასთან ურთიერთობის“ დეპარტამენტი, ასოცირებული პროფესორი, nutsa.gumberidze@gmail.com

აბსტრაქტი

დასაქმებულთა უფლებრივი მდგომარეობა, შრომის პირობები და უსაფრთხოება სამუშაო ადგილებზე, საქართველოსათვის ერთ-ერთი უმთავრესი გამოწვევაა. ქვეყანა ევროკავშირის ასოცირებულ ხელშეკრულების მიხედვით ნაკისრ ვალდებულებებს ეტაპობრივად ასრულებს, მათ შორის შრომის უსაფრთხოების დადგენილებების შემოღებით. სამწუხაროდ, ამ ეტაპზე არ გაგვაჩნია მიწის სამუშაოების უსაფრთხოებასთან დაკავშირებით დადგენილება, რომელშიც გაწერილი იქნება თითოეული ნაბიჯი.

საჭიროა ბიზნესმა კარგად განსაზღვროს შრომის უსაფრთხოების ხარჯები და გვჭირდება გარკვეული დრო, რათა მოქალაქეების ცნობიერება ამაღლდეს ჯანმრთელობის დაცვისა და შრომის უსაფრთხოების მხრივ.

სტატიაში განხილულია ინოვაციური ტექნოლოგიების დანერგვა მიწის დამუშავებისას და ნათხარის კედლების გამაგრებისას. კონკრეტულად მოყვანილია ჰიდრავლიკური გამბრჯენების გამოყენების უპირატესობა ტრადიციულ ტექნოლოგიებთან შედარებით.

სხვადასხვა სამშენებლო ობიექტებზე ვიზიტისას, სადაც მიმდინარეობდა მიწის სამუშაოები, ნათლად გამოჩნდა, რომ მშენებლები უკვე ნაცნობი აპრობირებული მეთოდების გამოყენებას ირჩევენ. ჩვენ ვურჩიეთ თანამედროვე ჰიდრავლიკური გამბრჯენები/მისაბჯენები, რომელზეც ცოდნაც ნაკლები აქვთ და ცვლილებების მთავარ მიზეზად ფინანსებს ასახელებენ. უნდა ითქვას, რომ კვალიფიკაციის და ცოდნის

გაღმავებაც საჭიროა. ამისთვის საჭიროა კადრები, ვინც გადაამზადებს ადგილობრივ პერსონალს, ასწავლის ტექნიკის სწორად და უსაფრთხოდ გამოყენებას.

გვინდა აღვნიშნოთ, რომ ჰიდრავლიკური გამბრჯენები, თავისი უპირატესობებით ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი გამოგონებაა, რომელიც უსაზღვრო საშუალებას აძლევს მშენებლებს მიწის სამუშაოების დროს. ამის მაგალითია განვითარებულ ქვეყნებში მშენებლობები, სადაც ამ მექანიზმის გამოყენებით უბედური შემთხვევა არ დაფიქსირებულა.

ამ ტექნოლოგიის შემოღება ქართულ ბაზარზე საკმაოდ მნიშვნელოვანია. ახალი მრავალსართულიანი შენობებისა და სხვა სამრეწველო დანიშნულების ნაგებობებისათვის დროის, უსაფრთხოების და მატერიალური ხარჯების მნიშვნელოვანი დანაზოგის გაკეთება კი მოგებას თავისთავად გაზრდის.

საკვანძო სიტყვები: მშენებლობა; შრომის უსაფრთხოება; უბედური შემთხვევა; კედლების ჩამოშლა; ელექტროდენით დაზიანება; ფოლადის კონსტრუქცია; მიწის სამუშაოები.

მიწის სამუშაოების წარმოება მომუშავეთა უსაფრთხოებისათვის დიდ რისკებს შეიცავს. ორმოების ამოღება, ქვაბულების, ტრანშეების, არხების და სხვა ტიპის თხრილების გათხრა შესაძლებელია შეიცავდეს დიდ საფრთხეებს დაუმაგრებელი კედლების უეცრად და მოულოდნელად ჩამოშლისას, რის გამოც, თუნდაც ყველაზე გამოცდილი მუშაკები მოუმზადებლები აღმოჩნდებიან ხოლმე სათანადო რეაგირებისთვის. გრუნტის ქვეშ აღმოჩენილ ადამიანს, გულზე დაწოლილი მიწის წონის გამო უჭირს სუნთქვა. შესაბამისად, იმისდა მიუხედავად, აქვს თუ არა ტრამეები, ადამიანმა შეიძლება ვერ ისუნთქოს, გაიგუდოს და დაიღუპოს.

მიწის სამუშაოების მიმდინარეობის დროს წარმოებს გრუნტის ან/და მყარი ქანების მოცილება. ამასთანავე, პრაქტიკულად ყოველთვის არსებობს წყალი, თუნდაც გრუნტში ტენიანობის სახით, ხოლო ძლიერი წვიმები ხშირად ხდება მეწყერის წარმოშობის მიზეზი. დამატებითი საფრთხე, რომელიც არასდროს არ უნდა დავივიწყოთ, არის დატბორვის შესაძლებლობა. გრუნტის ამოღების შედეგად წნევის შემცირების ან ცხელ ამინდებში მისი გამოშრობის შედეგად კი ჩნდება ბზარები.

უბედური შემთხვევების გამომწვევ ძირითად მიზეზებს მიწის სამუშაოების წარმოების დროს წარმოადგენს:

- ნათხარის (ქვაბულის, თხრილის) კედლების ჩამოშლის შედეგად მუშაკების დაფარვა ჩამონაქცევით;
- ნათხარში იმ სხვადასხვა მასალებისა და ნივთების ჩავარდნა, რომლებმაც მუშაკებს შეიძლება მიაყენონ ტრავმები;
- თანამშრომელთა ჩავარდნა ნათხარში;

- ჩამარხვისას ადგილზე მიღწევის უსაფრთხო და ევაკუაციისთვის არასაკმარისი საშუალებები;
- ნათხარის კედლების ჩამოშლა სატრანსპორტო საშუალების ნათხარში ჩასვლისას ან სატრანსპორტო საშუალების ნათხარის კიდეებთან სახიფათო მიახლოებისას, განსაკუთრებით უკუსვლის დროს;
- კვამლისა და აირისაგან გაგუდვა, ან მოწამვლა ნათხარში დალექილი კვამლით ან აირით, იმის გამო, რომ ისინი ჰაერზე მძიმე არიან (მაგალითად, დიზელის ან ბენზინის გამონაბოლქვი აირი).

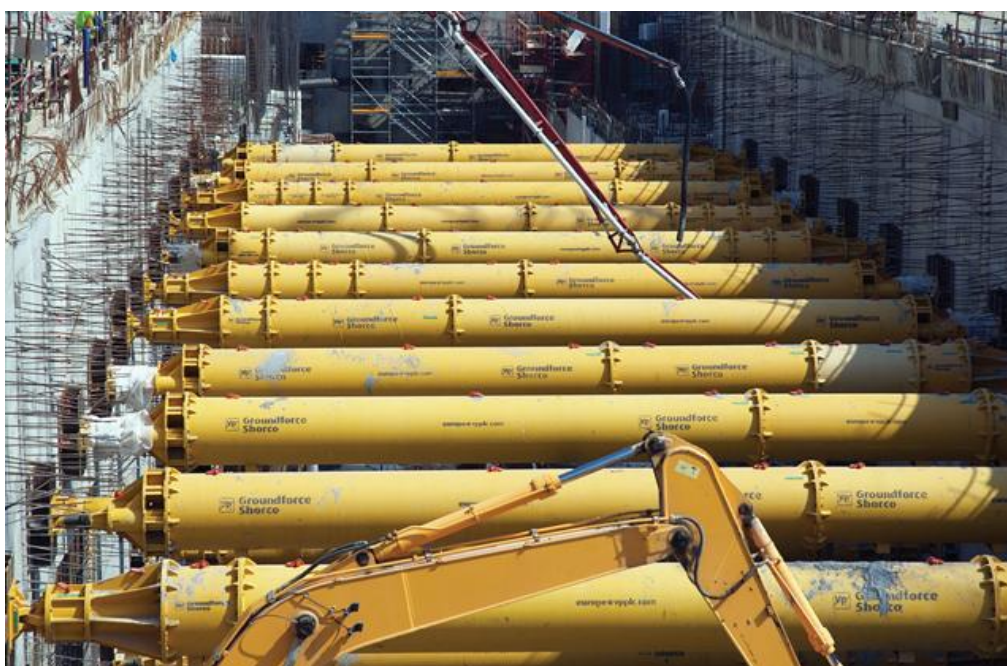
ვიდრე დავიწყებდეთ რაიმე სახის მიწის სამუშაოებს, როგორც ექსკავატორით, ისე ხელით, აუცილებელია გვახსოვდეს, რომ ყოველთვის შესაძლებელია მიწის ქვეშ არსებობდეს მიწისქვეშა კომუნიკაციები. განაშენიანებულ უბნებზე მუშაობის დროს, ყოველთვის უნდა ვივარაუდოთ, რომ მიწისქვეშ გადის ელექტროკაბელები, წყალსადენი და კანალიზაცია. ზოგიერთ უბნებზე მიწისქვეშ შესაძლებელია გადიოდეს გაზსადენის მილები. ზემოჩამოთვლილი კომუნიკაციები შესაძლებელია გამოიყურებოდეს ერთნაირად, ამიტომ მათი აღმოჩენისას ყოველთვის უნდა ვივარაუდოთ ყველაზე სახიფათო შემთხვევა. ელექტროკაბელის გახვრეტისას ელექტროდენით დაზიანებამ შესაძლებელია გამოიწვიოს სიკვდილი, მძიმე ტრავმა ან დამწვრობა. გაზსადენის დაზიანება გამოიწვევს აირის გაჟონვას, რამაც თავის მხრივ შესაძლებელია მიგვიყვანოს ხანძრამდე ან აფეთქებამდე. წყალსადენის და კანალიზაციის დაზიანებამ შესაძლებელია მიგვიყვანოს თხრილის უეცარ დატბორვამდე ან მისი კედლების ჩამოშლამდე.

თუ ნათხარის კედლები ვერტიკალური ან ციცაბოა, მას აუცილებლად სჭირდება გამაგრება. ღრმა მიწის ნაგებობების (ქვაბულების) კედლების გამაგრება შესაძლებელია გამბრჯენებითა და მისაბჯენებით. გამბრჯენებად და მისაბჯენებად გამოიყენება ფოლადის კონსტრუქციები : ფოლადის წრიული, მართკუთხა და კვადრატული განივკვეთის მილები, ნაგლინი პროფილები (ორტესებრი, შველერი, კუთხოვანა). გამბრჯენები და მისაბჯენები, ქვაბულის სიღრმიდან გამომდინარე, შეიძლება მოეწყოს ერთი ან რამდენიმე. (სურ. 1.).



სურ. 1. ქვაბულში გამბრჯენებისა და მისაბჯენების მოწყობა.

თანამედროვე მშენებლობებზე (აშშ, დიდი ბრიტანეთი, ავსტრალია და ა.შ.) იყენებენ ახალ ინოვაციურ ჰიდრავლიკურ გამბრჯენებს და მისაბჯენებს. (სურ. 2.)



სურ.2. ჰიდრავლიკური გამბრჯენის ერთერთი ტიპი.

წარმოდგენილ სტატიაში განხილულია ჰიდრავლიკური გამბრჯენების მოწყობის თანამედროვე ინოვაციური მეთოდი. დროებითი ჰიდრავლიკური საყრდენების გამოყენების სარგებელი ბევრია და იგი გამოიყენება როგორც დიდ, ისე მცირე გათხრებზე.

თუმცა, უფრო დიდი ხანგრძლივობის პერიოდში, ინდუსტრიაში ისტორიულად არსებობდა და დღემდე არსებობს ტენდენცია, რომ დაამონტაჟონ დამზადებული ფოლადის სხვადასხვა კონსტრუქციები. თანამედროვე მშენებლობაში მიმდინარე ბოლოდროინდელმა მოვლენებმა ექვეყნებში დააყენა ამ ტრადიციული შეხედულების მართებულობა და განვითარებული ქვეყნების კომპანიები მიისწრაფიან სიახლეების დანერგვისკენ.

ჰიდრავლიკური სისტემის გამოყენების ძირითადი უპირატესობებია:

- სწრაფი მონტაჟი და მოხსნა;
 - ჩაშენებული/ჩამონტაჟებული დატვირთვის მონიტორინგის შესაძლებლობა;
 - წინასწარი დაჭიმვა, რომელიც ხელს უწყობს გადახრის შეზღუდვას;
 - უაღრესად მრავალმხრივი გამოყენება - ემსახურება გათხრების ყველა ფორმისა და ზომის თხრილებს;
 - მექანიკური იზოლაციის ვარიანტი;
 - შესაძლებელია მისი დახრილი ან ვერტიკალური ვარიანტები;
- მდგრადია - გამორიცხავს ადგილზე შედუღების, ჭრის და ნარჩენების არსებობას. შემუშავებულია ე.წ. „ხელებისგან თავისუფალი“ სისტემა, რომელიც იყენებს უკაბელო ტექნოლოგიას, რათა უზრუნველყოს 24/7 დატვირთვის მონიტორინგის სერვისი მათი ჰიდრავლიკური საყრდენებისთვის. ამ სისტემის გასაღები არის სპეციალურად შექმნილი და გამოყოფილი ელექტრონული დატვირთვის პინი, ინტეგრირებული წინასწარ კალიბრირებული დამაბვის ლიანდაგებში.

ინოვაციური სისტემა აკონტროლებს გარემოს ტემპერატურას და საყრდენ დატვირთვას; ხდება მოქმედების მყისიერი და ზუსტი კითხვა; შედეგები ხელმისაწვდომია კომპანიის ვებსაიტზე; არის მარტივი და უსაფრთხო ოპერაცია; ხდება წინასწარი აწყობა კომპანიის პერსონალის მიერ; კაბელი არ არის საჭირო. მომხმარებელს შეუძლია ნახოს მონაცემები მკაფიო და ლაკონური გრაფიკული ფორმატით პაროლით დაცულ ტერიტორიაზე კომპანიის ვებსაიტზე. მოსახერხებელი ხელის მონიტორი ასევე ხელმისაწვდომია სამშენებლო საიტზე მუშაობის დროს. შეტყობინებების გაგზავნა შესაძლებელია SMS-ით ან ელექტრონული ფოსტით.

ქვაბულის კედლების გამაგრება ასევე ხდება გრუნტული ანკერებით. გრუნტული ანკერები წარმოადგენს ფოლადის (ბაგროვან ან არმატუროვან) მჭიმს, რომელიც, ერთი მხრივ, ბეტონის ფესვის საშუალებით ჩაანკერებულია გრუნტში (არაჩამონგრევად ნაწილში), ხოლო, მეორე მხრივ, მიმაგრებულია ქვაბულის კედლის ვერტიკალურ მდგომარეობაში დამჭერ კონსტრუქციაზე/სიბრტყეზე ან შპუნტზე. (სურ.3.) შპუნტი არის ფოლადის ნარანდიანი ხიმინჯი. ფოლადის ნარანდის ხიმინჯები გამოიყენება

სხვადასხვა დროებითი და მუდმივი კონსტრუქციების მშენებლობისას. სექციები უზრუნველყოფენ მაქსიმალურ გამძლეობას, მინიმალური დანახარჯებით. ხიმინჯების შეერთების კონსტრუქცია იძლევა მათი ჩაჭედების ან ჩაფლვის შესაძლებლობას, ისე რომ წარმოიქმნება უწყვეტი კედელი, რომელიც გაერთიანებული სექციებისგან შედგება.



სურ.3. სამშენებლო შპუნტი.

გრუნტული ანკერები, ქვაბულის სიღრმიდან გამომდინარე, შეიძლება მოეწყოს ერთ ან რამდენიმე იარუსად. გრუნტული ანკერები არსებობს ორი სახის ესენია : მუდმივი და დროებითი ანკერები. (სურ.4.)



სურ.4. გრუნტული ანკერები.

დასკვნის სახით შესაძლებელია ითქვას, რომ ქვეყანაში დასაქმებულთა უფლებრივი მდგომარეობა, შრომის პირობები და უსაფრთხოება სამუშაო ადგილებზე, საქართველოსათვის ერთ-ერთი უმთავრესი გამოწვევაა. ამ ეტაპზე არ გაგვაჩნია მიწის სამუშაოების უსაფრთხოებასთან დაკავშირებით ცალკე დადგენილება, რომელშიც გაწერილი იქნება თითოეული ნაბიჯი.

ჩვენი კვლევის ფარგლებში გამოკითხული დეველოპერები / სამშენებლო კომპანიების წარმომადგენლები იზიარებენ იმ მოსაზრებას, რომ მშენებლობაზე სრულყოფილად არ არის დაცული უსაფრთხოების ნორმები, ამის მიზეზს კი დასაქმებული პერსონალის ცნობიერებასა და მენტალიტეტში ხედავენ. ასევე საჭიროა ბიზნესმა კარგად განსაზღვროს შრომის უსაფრთხოების ხარჯები და გვჭირდება გარკვეული დრო მომუშავეთა ცნობიერების ასამაღლებლად.

სხვადასხვა სამშენებლო ობიექტებზე ვიზიტისას, სადაც მიმდინარეობდა მიწის სამუშაოები, ნათლად გამოჩნდა, რომ მშენებლები უკვე ნაცნობი აპრობირებული მეთოდების გამოყენებას უფრო ირჩევენ ვიდრე, ახალი თანამედროვე ინოვაციური მეთოდებისა. მაგალითისთვის თანამედროვე ჰიდრაულიკური გამბრჯენები/მისაბჯენები მოგვყავდა, რომელზეც იშვიათად თუ რომელიმე მშენებელს ცოდნოდა. ამ ყველაფრის მთავარ მიზეზად ფინანსებს ასახელებენ, მაგრამ უნდა ითქვას, რომ კვალიფიკაციის და ცოდნის გაღმავებაც საჭიროა. ამისთვის საჭიროა კვალიფიციური კადრების ჩამოყვანა, ვინც გადაამზადებს ადგილობრივ პერსონალს, ასწავლიან მათ სიახლეების სწორად და უსაფრთხოდ გამოყენებას.

ჰიდრაულიკური გამბრჯენები, თავისი უპირატესობებით ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი გამოგონებაა, რომელიც უსაზღვრო საშუალებას აძლევს მშენებლებს მიწის სამუშაოების დროს. ამის მაგალითია განვითარებულ ქვეყნებში მშენებლობები, სადაც ამ მექანიზმის გამოყენები შედეგად უბედური შემთხვევა არ დაფიქსირებულა.

ამ ტექნოლოგიის შემოღება ქართულ ბაზარზე საკმაოდ მნიშვნელოვანია, რადგან თანამედროვე მშენებლობაში საჭიროა ახალი სიტემების დანერგვა. ახალი მრავალსართულიანი შენობებისა და სხვა სამრეწველო დანიშნულების ნაგებობების მშენებლობისათვის დროის, უსაფრთხოების და მატერიალური ხარჯების მნიშვნელოვანი დანაზოგის გაკეთება შეიძლება, რაც მოგებას თავისთავად გაზრდის.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. ნ. რაზმაძე, ნ. რატიანი „შრომის უსაფრთხოება მშენებლობაში“. გამ-ბა „ტექნიკური უნივერსიტეტი“. ISBN 978-9941-28-841-8. 2023 წ.
2. N. Razmadze, N. Ratiani, A. Korkotadze. „Improvement of safety measures in construction by using modern railing and fall arrest systems“. TASHKENT INTERNATIONAL CONGRESS ON MODERN SCIENCES - III. TASHKENT CHEMICAL-TECHNOLOGICAL INSTITUTE. April 22-23, 2024. Tashkent, Uzbekistan. ნ.რაზმაძე ნ. რატიანი, ა. კორკოტაძე. „მშენებლობაზე უსაფრთხოების ღონისძიებათა გაუმჯობესება თანამედროვე მოაჯირული და საჭერი სისტემების გამოყენებით“. ტაშკენტის ინტერნაციონალური კონგრესი თანამედროვე მეცნიერებებში-III.
3. ნ. რაზმაძე, ნ.რატიანი მ.ქიტოშვილი,ა.კორკოტაძე. „უბედური შემთხვევების და პროფდაავადებათა რისკ-ფაქტორები მშენებლობაში“. ქართულენოვანი მრავალდარგობრივი სამეცნიერო რეფერირებადი ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“ #1 (744). 2024 წ. ISSN 0130-7061 Index 76127
4. ნ.რაზმაძე, ნ. რატიანი, მ.ქიტოშვილი. ნ.მაჭავარიანი. „უსაფრთხოებისა და ჯანმრთელობის რისკების შეფასება მშენებლობაში“. ქართულენოვანი მრავალდარგობრივი სამეცნიერო რეფერირებადი ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“. #1 (747). 2025 წ.
5. N. Ratiani, M. Darakhvelidze. N. Razmadze. “Establishing a system of hazard identification and risk assessment and existing flaws”. Georgian Engineering News. #2, vol.101, 2024. 14-20 pg. ნ. რატიანი, მ. დარახველიძე, ნ.რაზმაძე „საფრთხის იდენტიფიცირებისა და რისკის შეფასების სისტემის ჩამოყალიბება და არსებული ხარვეზები“.
6. ნ. რაზმაძე, ა. კორკოტაძე, ნ.რატიანი . “სიმაღლეზე მუშაობის შესაძლო საფრთხეების კონტროლი მოაჯირული და საჭერი სისტემების მაგალითზე“. სტუ, შრომების კრებული #1 (531). 2024 წ. UDS 658. 382. SCOPUS CODE 2213.
7. ნ. რაზმაძე, ნ.რატიანი, ა. კორკოტაძე. „სიმაღლეზე მომუშავეთა ფიზიკური საფრთხეების მინიმიზაციის საშუალებები“ (მოხსენება და სტატია ინგლ. ენაზე) მეოთხე საერთაშორისო კონფერენცია: „ინოვაციური ტექნოლოგიები მშენებლობაში“. სტუ. სამშენებლო ფაკულტეტი. 15-16 თებერვალი, 2024 წ. „Means of minimizing physical hazards of workers at height“.
8. N. Razmadze, N. Ratiani, A. Korkotadze. “IMPROVING SAFETY MEASURES FOR WORKERS AT HEIGHT”. International Marmara scientific research and innovation congress. ISTANBUL, JANUARY 27-28. 2024. ნ. რაზმაძე, ნ. რატიანი, ა. კორკოტაძე. “სიმაღლეზე მომუშავეთა უსაფრთხოების ღონისძიებების გაუმჯობესება”.

საერთაშორისო სამეცნიერო კვლევებისა და ინოვაციების კონგრესი. სტამბოლი, 27-28 იანვარი, 2024წ.

9. ნ. რატიანი, ნ. რაზმაძე, მ. დარაზველიძე. „შრომის უსაფრთხოების სისტემის დანერგვა და განვითარება საქართველოსა და სხვა ქვეყნებში“. *ქართველი მეცნიერები*, 150-166გვ. (2024).

<https://journals.4science.ge/index.php/GS/article/view/3097/3089>

Enhancing earthwork safety through innovative soil wall reinforcement methods

Nikoloz Shaverdashvili, Nana Razmadze, Nino Ratiani, Mzia Kitoshvili, Nutsa Gumberidze

Abstract

The rights of employees, working conditions and safety at work are one of the main challenges for Georgia. The country is gradually fulfilling its obligations under the EU Association Agreement, including by introducing occupational safety regulations. Unfortunately, at this stage we do not have a regulation on the safety of earthworks, which would spell out each step.

Businesses need to properly assess the costs of occupational safety and we need some time to raise citizens' awareness of health and occupational safety.

The article discusses the introduction of innovative technologies in land cultivation and reinforcement of retaining walls. Specifically, the advantages of using hydraulic fracturing compared to traditional technologies are highlighted.

During visits to various construction sites where earthworks were underway, it became clear that builders prefer to use familiar, proven methods. We recommended modern hydraulic spreaders/rollers, which they have less knowledge about, and they cite finances as the main reason for the changes. It must be said that upgrading qualifications and knowledge is also necessary. For this, staff are needed who will retrain local personnel and teach them how to use the equipment correctly and safely.

We would like to note that hydraulic rammers, with their advantages, are one of the most important inventions that provide unlimited opportunities for builders during earthworks. An example of this is construction sites in developed countries, where no accidents have been recorded using this mechanism.

The introduction of this technology to the Georgian market is quite important. The significant savings in time, safety, and material costs for new multi-story buildings and other industrial facilities will increase profits in itself.

Keywords: Construction; Occupational safety; Accident; Wall collapse; Electrical injury; Steel construction; Earthworks.

2024-2025 წლების საქართველოს მაკროეკონომიკური მაჩვენებლების პროგნოზირება, მანქანური სწავლების ჰიბრიდული მოდელის გამოყენებით

ზურაბ ტუსკია

ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი, საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტი, კოსტავას ქ. 77, თბილისი, 0160, საქართველო

ანოტაცია

ეკონომიკური პოლიტიკის ანალიზი და შეფასება, როგორც რეალურ, ისე სიმულაციურ გარემოში, დიდწილად ეფუძნება მაკროეკონომიკური მდგომარეობის სანდო და ზუსტ პროგნოზირებას. აღნიშნული ამოცანის გადასაჭრელად ნაშრომში განხილულია ღრმა ნეირონული ქსელების არქიტექტურული შესაძლებლობები და შემოთავაზებულია ჰიბრიდული მოდელი, რომელიც აერთიანებს Long Short-Term Memory (LSTM) კომპონენტს, attention-მექანიზმს და nudging-ზე დაფუძნებულ კორექციულ მიდგომას.

მაკროეკონომიკური ინდიკატორების პროგნოზირების ხარისხის გასაუმჯობესებლად ჩამოყალიბებულია ადაპტირებადი ალგორითმული სისტემა, რომელიც ჰიბრიდული ნეირონული ქსელის ფარგლებში აერთიანებს ღროითი მწკრივების დამუშავების, მნიშვნელოვანი ცვლადების იდენტიფიცირებისა და პროგნოზის კორექციის მექანიზმებს. აღნიშნული მიდგომა პროგნოზის შედეგებს ეტაპობრივად აუმჯობესებს მონაცემთა ასიმილაციის პრინციპზე დაფუძნებული nudging-კორექციის გამოყენებით.

ექსპერიმენტული შეფასებისათვის გამოყენებულ იქნა საქართველოს რეალური მაკროეკონომიკური მონაცემები. მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ შემოთავაზებული სისტემა უზრუნველყოფს პროგნოზირების მაღალ სიზუსტეს და ინარჩუნებს მდგრადობას მოდელის გარე პარამეტრების ცვლილების პირობებშიც.

საკვანძო სიტყვები: ჰიბრიდული მოდელი; მონაცემთა ასიმილაცია; attention-მექანიზმი; nudging-კორექცია; ღრმა სწავლება; ნეირონული ქსელები; მაკროეკონომიკური ინდიკატორები.

1. შესავალი

მაკროეკონომიკური ინდიკატორების პროგნოზირების სისტემის აგებისას მიზანშეწონილია გამოყენებულ იქნეს მრავალკომპონენტიანი მოდელური არქიტექტურა, რომელიც აერთიანებს როგორც კლასიკურ ეკონომეტრიკულ მიდგომებს, ისე თანამედროვე მანქანური სწავლებისა და ღრმა ნეირონული ქსელების მეთოდებს. ასეთი მიდგომა განსაკუთრებით აქტუალურია იმ შემთხვევაში, როდესაც პროგნოზირებას ექვემდებარება ისეთი ცვლადები, როგორიცაა მთლიანი შიდა პროდუქტი, ინფლაცია, უმუშევრობა, სახელმწიფო შემოსავლები, ფულადი მასა, ინვესტიციები და სხვა მაკროეკონომიკური მაჩვენებლები.

პროგნოზირების პროცესში მნიშვნელოვანია არა მხოლოდ ისტორიული ტრენდებისა და განმეორებადი დინამიკის დაფიქსირება, არამედ იმ სტრუქტურული ურთიერთკავშირების იდენტიფიცირებაც, რომლებიც ეკონომიკურ ცვლადებს შორის არსებობს. სტრუქტურული მიდგომა საშუალებას იძლევა გაანალიზდეს, როგორ შეიძლება აისახოს კონკრეტული ეკონომიკური პოლიტიკა, საბიუჯეტო გადაწყვეტილება, საინვესტიციო ცვლილება ან სხვა ტიპის გარე ზემოქმედება პროგნოზირებად მაჩვენებლებზე. ამასთან, არასტრუქტურული მოდელები ეფექტიანია მაშინ, როდესაც პრიორიტეტულია მონაცემებზე დაფუძნებული პროგნოზი და არა წინასწარ განსაზღვრული თეორიული კავშირის ფორმალიზება.

მაკროეკონომიკური პროგნოზირების თანამედროვე ლიტერატურაში პროგნოზირების მეთოდები ხშირად იყოფა ორ ძირითად მიმართულებად: სტრუქტურულ და არასტრუქტურულ მიდგომებად. არასტრუქტურული პროგნოზირება ფართოდ გამოიყენება ემპირიულ კვლევებში, მათ შორის ბიუჯეტური და ფინანსური მაჩვენებლების წინასწარი შეფასებისას [13], [14], [15], [16]. აღნიშნული მიდგომა განსაკუთრებით პრაქტიკულია მაშინ, როდესაც მონაცემთა დინამიკა რთულია, ცვლადებს შორის კავშირები კი დროში ცვალებადია.

პირველ ეტაპზე შეიძლება გამოყენებულ იქნეს კლასიკური სტატისტიკური მოდელები, მათ შორის ARIMA, SARIMA და ექსპონენციალური გასწორების მეთოდები. ეს მოდელები ეფექტიანია სტაბილური დროითი მწკრივებისათვის, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც მონაცემებში შეინიშნება სეზონურობა, პერიოდულობა ან შედარებით მარტივი ტენდენციური სტრუქტურა. მათი უპირატესობა მდგომარეობს ინტერპრეტაციის სიმარტივესა და ეკონომეტრიკულ გამჭვირვალობაში.

მეორე მიმართულებას წარმოადგენს მანქანური სწავლების მოდელები, რომლებიც უკეთ უმკლავდებიან მრავალცვლადიან მონაცემთა სტრუქტურას. Random Forest შეიძლება გამოყენებულ იქნეს რთული ურთიერთკავშირების გამოსავლენად; Elastic Net სასარგებლოა რეგულარიზაციისა და მნიშვნელოვანი ცვლადების შერჩევისათვის; ხოლო gradient boosting-ის მეთოდები, მათ შორის XGBoost, უზრუნველყოფს პროგნოზის მაღალი სიზუსტით გენერირებას და მოდელის შედეგების შედარებით მკაფიო ინტერპრეტაციას. თუმცა, დროითი დამოკიდებულებების სრულყოფილად

ასახვისათვის საჭიროა ისეთი არქიტექტურების გამოყენება, რომლებიც უკეთ ამუშავებენ მიმდევრობით მონაცემებს.

ამ თვალსაზრისით განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ღრმა სწავლების მოდელებს, მათ შორის რეკურენტულ ნეირონულ ქსელებს, LSTM არქიტექტურას, attention-მექანიზმებზე დაფუძნებულ მოდელებსა და ტრანსფორმერულ მიდგომებს. გრძელვადიანი და ალბათური პროგნოზირებისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ისეთი მოდელები, როგორიცაა DeepAR და Temporal Fusion Transformer, რომლებიც საშუალებას იძლევა პროგნოზში გათვალისწინებულ იქნეს როგორც დროითი დინამიკა, ისე მაკროეკონომიკურ ცვლადებს შორის ფარული დამოკიდებულებები.

მესამე მიმართულებად შეიძლება განვიხილოთ გაძლიერებით სწავლება, რომელიც პროგნოზირების სისტემაში უმეტესად გამოიყენება არა როგორც პირველადი პროგნოზირების მექანიზმი, არამედ როგორც გადაწყვეტილების კორექციისა და ოპტიმიზაციის ფენა. ასეთი მიდგომა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ შემთხვევებში, როდესაც საჭიროა პროგნოზის საფუძველზე პოლიტიკის, რესურსების განაწილების ან მართვის სტრატეგიის ადაპტირება. განმტკიცებითი სწავლების ელემენტების ინტეგრაცია ზრდის სისტემის შესაძლებლობას, არა მხოლოდ შეაფასოს მოსალოდნელი შედეგი, არამედ შესთავაზოს ოპტიმალური რეაგირების სცენარი.

დამატებით, nudging-ის კონცეფციისა და განმტკიცებითი სწავლების კომბინაცია შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ხელოვნური ინტელექტის მხარდაჭერით გადაწყვეტილების მიღების პროცესში. აღნიშნული მიდგომა საშუალებას იძლევა პროგნოზირების შედეგები გარდაიქმნას რეკომენდაციებად, რომლებიც მიმართულია ეკონომიკური პოლიტიკის ან ადმინისტრაციული გადაწყვეტილებების უფრო ეფექტიანად ფორმირებისაკენ.

საბოლოოდ, მაკროეკონომიკური პროგნოზირებისათვის ყველაზე გამართლებულია ჰიბრიდული და ანსამბლური არქიტექტურა, რომელიც აერთიანებს ეკონომეტრიკულ მოდელებს, მანქანური სწავლების ალგორითმებსა და ღრმა ნეირონულ ქსელებს. ასეთი კომბინაცია ამცირებს ერთი კონკრეტული მოდელის შეზღუდვებზე დამოკიდებულებას, აუმჯობესებს პროგნოზის მდგრადობას და ზრდის მოდელის უნარს, იმუშაოს როგორც მოკლევადიან, ისე საშუალოვადიან პროგნოზირების ამოცანებში.

2. პრობლემის ფორმულირება

2.1. მაკროეკონომიკის ზოგადი ფორმალური მოდელი

ნებისმიერი სფეროს ზოგადი ფორმალური მაკროეკონომიკური მოდელი შეიძლება წარმოდგენილი იყოს დინამიკური არაწრფივი განტოლებების შემდეგი სისტემით:

$$\mathbf{y}_{t+1} = \mathcal{F}(\mathbf{y}_t, \mathbf{x}_t) \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_t = \mathcal{H}(\mathbf{y}_t, \boldsymbol{\xi}_t) \quad (2)$$

სადაც $\mathbf{y}_t \in \mathbb{R}^{n_y}$ – არის ენდოგენური მაკროეკონომიკური ცვლადების ვექტორი (მაგ., გამოშვება, GDP, ინფლაცია და სხვ.) t მომენტში; $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^{n_x}$ – წარმოადგენს ეგზოგენურ შეყვანის ვექტორს t მომენტში, რომელიც, სავარაუდოდ, დაკავშირებულია $\mathbf{y}_t$ -თან და რომლის მნიშვნელობებიც განისაზღვრება მოდელის გარეთ არსებული ფაქტორებით და შეიძლება გამოიწვიოს შოკები; $\mathcal{F}: \mathbb{R}^{n_x+n_y} \rightarrow \mathbb{R}^m$ არის არაწრფივი იმპლიციტური ოპერატორი; $\mathcal{H}$ არის დაკვირვების ოპერატორი; $\mathbf{z}_t \in \mathbb{R}^m$ – დაკვირვებადი ცვლადები; $\boldsymbol{\xi}_t \in \mathbb{R}^m$ – ხმაურის ვექტორი; ხოლო $t \in [0, t_c]$ – არის განსაზღვრულ დიაპაზონში ცვლადი დროითი ცვლადი (წელი, კვარტალი, თვე, დღე).

როგორც დინამიკურ სისტემებში, როგორცაა მაკროეკონომიკა, შეყვანისა და გამოსვლის ინდიკატორებს შორის კავშირი შეიძლება უფრო ღრმა იყოს; მოცემულ მომენტში გამოსვლის მახასიათებლის სიდიდე შეიძლება დამოკიდებული იყოს არა მხოლოდ სისტემის წინა მდგომარეობაზე, არამედ უფრო ადრინდელ მდგომარეობებზეც. მრავალ შეფასებაში მნიშვნელოვანია ასეთი დამოკიდებულებების ფორმის განსაზღვრა. პროგნოზირების ამოცანებში ასევე მნიშვნელოვანია ჯგუფური დროითი დამოკიდებულებების განსაზღვრა, მაგალითად, კვარტალური ინდიკატორებისგან შედგენილი წლიური მაჩვენებელი როგორ არის დამოკიდებული წინა პერიოდის ინდიკატორებზე. ასეთ მოდელს შეიძლება ეწოდოს მრავალგანზომილებიანი დროითი მწკრივების მრავალსაფეხურიანი პროგნოზირების მოდელი:

$$[\hat{\mathbf{y}}_{t+1}, \hat{\mathbf{y}}_{t+2}, \dots, \hat{\mathbf{y}}_{t+H}]^T = \mathcal{F}([\mathbf{y}_t, \dots, \mathbf{y}_{t-W}]^T, [\mathbf{x}_t, \dots, \mathbf{x}_{t-W}]^T) + \boldsymbol{\xi}_t \quad (3)$$

$\hat{\mathbf{y}}$ არის დაკვირვებადი მიზნობრივი ცვლადი; H და W შესაბამისად წარმოადგენენ პროგნოზირების ჰორიზონტისა და დაკვირვების ფანჯრის განზომილებებს. ამგვარად დასმული პრობლემები ფართოდ გამოიყენება მართვაში, რისკის შეფასებასა და პროგნოზირებაში და კარგად არის შესწავლილი სამეცნიერო ლიტერატურაში [16], [17]. მაკროეკონომიკური ინდიკატორების პროგნოზირებაში ხმაურის დონე შეიძლება ჩაითვალოს მცირე სასარგებლო ინფორმაციის დონესთან შედარებით, ხოლო ფორმულა (3) შეიძლება გადაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\hat{\mathbf{Y}}_{t+H} = \mathcal{F}(\mathbf{X}_t) + \boldsymbol{\xi}_t \quad (4)$$

სადაც $\hat{\mathbf{Y}}_t \in \mathbb{R}^{m \times H}$ არის პროგნოზული მიზნობრივი გამოსვლის მახასიათებელთა მატრიცა, $\mathbf{X}_t = [\mathbf{X}_t, \mathbf{Y}_t] \in \mathbb{R}^{W \times (n_x+n_y)}$ კი წარმოადგენს ფორმულა (3)-ში განსაზღვრულ შეყვანის ცვლადების მატრიცას. შემდგომში ორი ცვლადის კომბინაციას კონკრეტული მიმართულებით ორ წერტილიანი აღნიშვნით წარმოვადგენთ.

ჩვენი ამოცანის მიზანია ფორმულა (4)-ით აღწერილი და ინტერვალზე ($t_c < t \leq t_c + H$) გაზომილი გამოსვლის ვექტორების $\hat{\mathbf{y}}_t$ მნიშვნელობების პროგნოზირება ისტორიული მონაცემების საფუძველზე, რომლებიც მიღებულია ინტერვალში $[0, t_c]$ ცხადია, $W < t_c$.

$\mathcal{F}$ ოპერატორის იმპლიციტური ბუნება პრობლემის ეფექტურად გადაწყვეტას ართულებს. ამ საკითხის გადასაჭრელად ნაშრომში შემოთავაზებულია ღრმა

ნეირონული ქსელის მოდელი, რომელიც ისტორიულ მონაცემებზე დაყრდნობით ახორციელებს F ოპერატორის მრავალსაფეხურიან ადაპტურ აპროქსიმაციას ჰიბრიდული (LSTM-Attention-Nudging) არქიტექტურის ღრმა ნეირონული ქსელებით.

2.2. შემოთავაზებული მეთოდოლოგიური მიდგომა

შემოთავაზებული მოდელი მოიცავს ორ ქვემოდელს: LSTM-Attention და Nudge ქვემოდელებს. თავდაპირველად მოვამზადოთ ამ მოდელების ფორმალური საფუძველი.

ვივარაუდოთ, რომ გვაქვს ისტორიული მონაცემების ნაკრები $D = \{\tilde{x}_t, \tilde{y}_{t+1} \mid t = \overline{0, N}\}$, რომელიც მოიცავს მაკროეკონომიკური ინდიკატორების დაკვირვებებს დროით ინტერვალში $[0, t_N]$ და წარმოდგენილია N -ელემენტის დროითი მწკრივის სახით.

იყოს $\tilde{x}_t = [x_t, \tilde{y}_t] \in \mathbb{R}^n$, სადაც $n = n_x + n_y$. აქ x_t და $\tilde{y}_t$ შესაბამისად წარმოადგენენ ეგზოგენური და ენდოგენური ცვლადების ვექტორებს დროის t მომენტში, ხოლო $\tilde{y}_{t+1}$ არის $t+1$ მომენტში მიზნობრივი დაკვირვებადი ცვლადების მრავალგანზომილებიანი ვექტორი. მაკროეკონომიკური მახასიათებლების შემთხვევაში D არის სასწავლო დროითი მწკრივი, ხოლო ამოცანა წარმოადგენს დროითი მწკრივების მრავალგანზომილებიან, მრავალსაფეხურიან ზედამხედველობით მანქანური სწავლების პროგნოზირების ამოცანას, რომელიც შემდეგნაირად იწერება:

მოცემული მრავალგანზომილებიანი სასწავლო ნაკრების D პირობებში განისაზღვრება სრული მანქანური სწავლების პროგნოზირების ოპერატორი $\mathcal{M}$, რომელიც ფორმულა (4)-ში განსაზღვრულ F ოპერატორს აახლოებს და სისტემის გამოსვლის ცვლადებს შემდეგი ფორმულით პროგნოზირებს:

$$\{\tilde{y}_{t+1:t+H}\} = \hat{\mathcal{M}}(\{\tilde{x}_{t-W:t}\} \mid \Theta), \quad t \in [0, t_N] \quad (5)$$

სადაც $\{\tilde{y}_{t+1:t+H}\}$ არის პროგნოზის მრავალსაფეხურიანი დროითი მწკრივი, ხოლო Θ — მოდელის პარამეტრების ვექტორი.

ფორმულა (5)-ში მოცემული $\mathcal{M}$ ოპერატორის ეფექტიანობა შეიძლება შეზღუდული იყოს, განსაკუთრებით რთულ სისტემებში, სადაც კომპონენტებს შორის დამოკიდებულებები არასაკმარისად არის განსაზღვრული. ამის გადასაჭრელად შემოთავაზებულია მრავალფენიანი არქიტექტურა: საბაზისო ფენა იყენებს LSTM-Attention (L-A) მოდელს წინასწარი ამოხსნისთვის, ხოლო მეორე ფენა, Nudge (N), ადაპტურად არეგულირებს ნასწავლ პარამეტრებს Nudging მეთოდის მეშვეობით თითოეული მიზნობრივი ინდიკატორის პროგნოზის სიზუსტის გასაუმჯობესებლად.

სიცხადისთვის შემოვიტანოთ აღნიშვნა, რომლის მიხედვითაც მრავალგანზომილებიანი ოპერატორები და ცვლადები წარმოდგენილია სამწერტილიანი აღნიშვნით, ხოლო ერთგანზომილებიანი — ერთწერტილიანი აღნიშვნით.

$\mathcal{M}$ ოპერატორის ადაპტური, მრავალფენიანი იმპლემენტაცია წარმოვადგინოთ L-A მოდელის ერთი $\hat{\mathcal{M}}^\theta$ ოპერატორით, რომელსაც აქვს ღრმა ნეირონული ქსელის (DNN)

ნეირონის წონები Θ , და k ერთგანზომილებიანი პროგნოზირების nudging (N) მოდელ-
ოპერატორებით $\dot{\mathcal{M}}_i$ თითოეული მიზნობრივი მახასიათებლისთვის i . პროგნოზი
შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\hat{y}_{t+1}^i = \dot{\mathcal{M}}_i(\{\ddot{x}_{t-w:t}\} | \Theta_i), \quad i = 0, \dots, k \quad (6)$$

სადაც $\hat{y}_{t+1}^i \in \mathbb{R}$ არის i -ე მიზნობრივი მახასიათებლის პროგნოზი, ხოლო სასწავლო
ნაკრების მწკრივი $\ddot{x}_t = [x_t, y_t] \in \mathbb{R}^n$, ($n = n_x + 1$), $k = m + q$. ცვლადები m და q
შესაბამისად წარმოადგენენ მიზნობრივი მახასიათებლებისა და კვარტალების
რაოდენობებს. $\dot{\mathcal{M}}_i$ შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი ფორმულით:

$$\dot{\mathcal{M}}_i = \hat{\mathcal{M}} \circ \rho_i \circ \mathcal{B}_i \quad (7)$$

სადაც ρ_i -ის პროექციის ოპერატორი, რომელიც მახასიათებელთა ვექტორიდან
მიზნობრივ მახასიათებელს განსაზღვრავს. $\mathcal{B}_i$ ოპერატორი ასახავს i -ე კონკრეტული
მახასიათებლის მოდელის იმპლემენტაციას DNN-ით, რომელიც წარმოდგენილია L-A-N
არქიტექტურით.

$$\mathcal{B}_i^{\theta_i} = \mathcal{C}_i \circ \mathcal{N}_i^{\theta_i} \quad (8)$$

სადაც $\mathcal{C}_i$ არის კალიბრაციის ოპერატორი, რომელიც $\dot{\mathcal{M}}_i$ მოდელის წონებს (bias)
ითვლის $\hat{\mathcal{M}}$ მოდელის წონებითა და $\mathcal{N}_i$ ოპერატორით მიღებული მნიშვნელობების
საფუძველზე:

$$\dot{\theta}_i = \hat{\theta}_i + \alpha_i, \quad \alpha_i = \lambda \times \|\delta\| \quad (9)$$

რაც დამოკიდებულია მონაცემთა nudging-ის, რიცხვითი მოდელისა და რიცხვითი
პროგნოზირების მოდელის პირობით რიცხვებზე, სადაც $\delta = \hat{y}_t - \ddot{y}_t$ არის შეცდომა
პროგნოზულ მახასიათებელსა და მის ნამდვილ მნიშვნელობას შორის. ნასწავლი
კორექცია განისაზღვრება როგორც:

$$y_{t+1}^* = \hat{y}_{t+1} + \mathcal{B}_i^{-1}(\hat{y}_t - y_t) \quad (10)$$

თითოეული i -ე მახასიათებლის პროგნოზირებისთვის ახალი $\mathcal{B}$ მოდელების შექმნა
შეიძლება გაგრძელდეს მანამდე, სანამ $\delta < \delta_{thresh}$, ან ნაბიჯების რაოდენობა წინასწარ
განისაზღვრება. L-A-N ქსელის პირველი ფენისთვის დანაკარგის ფუნქცია შეიძლება
წარმოდგენილი იყოს შემდეგნაირად:

$$\mathcal{L}(\theta) = \sum_{t=1}^{N-H} \|\hat{\mathcal{M}}_{\theta}(\ddot{x}_t) - \hat{y}_t\| \quad (11)$$

შესაბამისად, პარამეტრების ოპტიმიზაციის პრობლემა შეიძლება ჩაიწეროს როგორც
 $\theta^* = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \{ \mathcal{L}(\theta) \}$. აქ $\|\cdot\|$ განისაზღვრება ან L1 ნორმით, ან L2 ნორმით.

$i=0$ -დან $m \times q$ -მდე თითოეული $\mathcal{B}_i$ -სთვის პარამეტრები θ_i გამოითვლება შემდეგი
ფორმულით:

$$\theta_i^* = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \|\mathcal{B}_i^{\theta}(\ddot{x}_{t+1}) - \hat{y}_t\| \quad (12)$$

სადაც საწყისი მნიშვნელობა $\theta_i^0 = \theta^*$. პარამეტრების გამოთვლის სიზუსტის გასაზრდელად ზემოთ განხილული სქემა შეიძლება ორგანიზდეს მრავალსაფეხურიან ადაპტურ პროცესად. $\mathbf{B}_i^{k+1 \rightarrow \theta_i^{k+1}} \rightarrow \mathbf{B}_i^{k \rightarrow \theta_i^k}$, θ_i^0 პროცესი შეიძლება შეიზღუდოს ნაბიჯების რაოდენობით $k_{\max}$ ან შეცდომის ზღვრული მნიშვნელობით δ_{tresh}

3. პრობლემის გადაწყვეტა

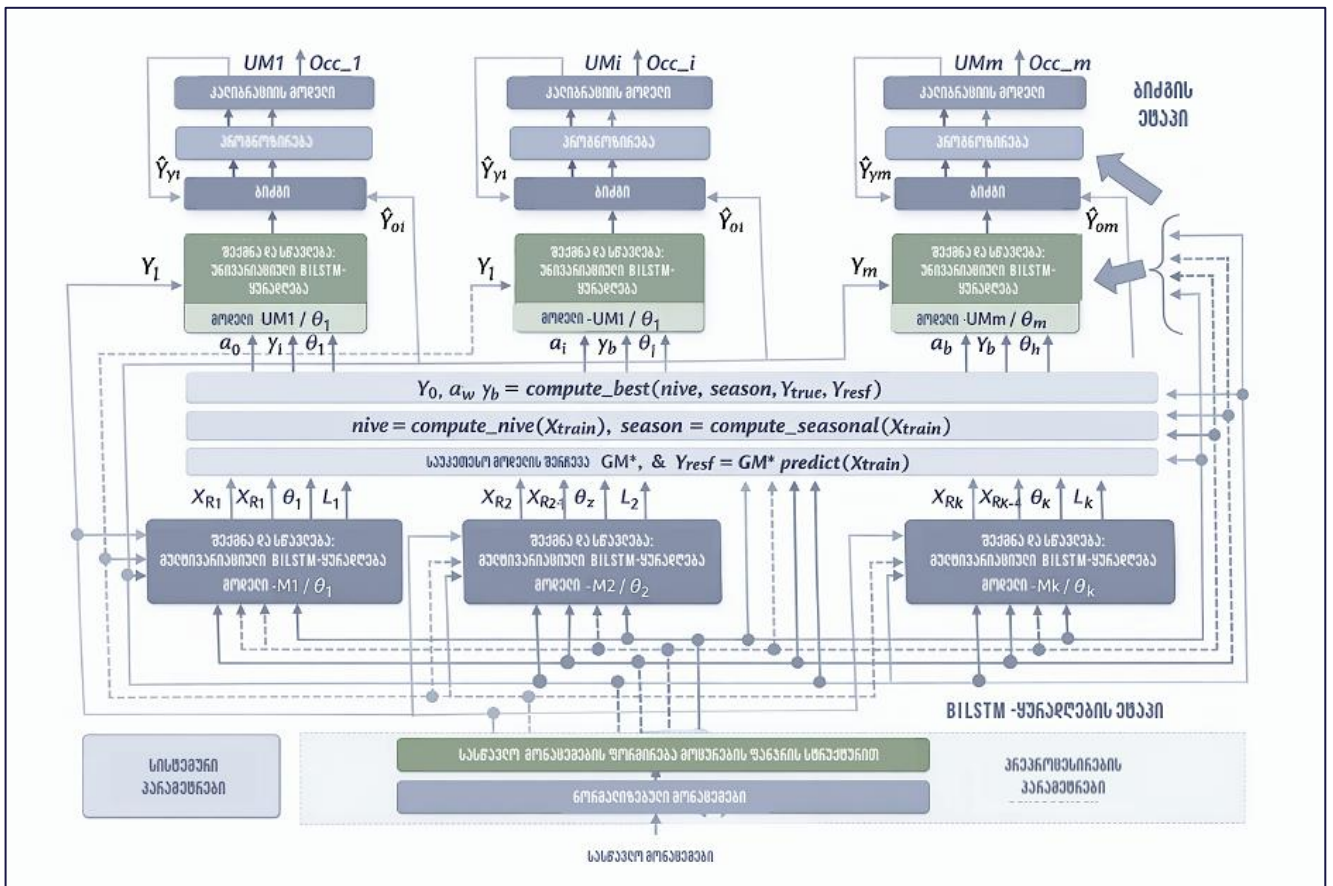
მრავალგანზომილებიანი დროითი მწკრივების მრავალსაფეხურიანი შეფასებისთვის ზემოთ განხილული მეთოდოლოგიის საფუძველზე შემუშავდა ჰიბრიდული მრავალფენიანი, ადაპტური მოდელი, რომლის არქიტექტურა ნაჩვენებია ნახ. 1-ზე. განვიხილოთ თითოეული ფენა ცალ-ცალკე.

3.1. წინასწარი დამუშავების ფენა

პირველი ფენის საწყის ეტაპზე, სხვადასხვა მახასიათებლების მასშტაბების გასათვალისწინებლად და რიცხვითი სტაბილურობის უზრუნველსაყოფად, თითოეული მახასიათებლის ვექტორი უნდა ნორმალიზდეს $[0, 1]$ დიაპაზონში min-max ნორმალიზაციის გამოყენებით. მასშტაბირების პარამეტრები აღებულია მხოლოდ სასწავლო ნაკრებიდან, რათა თავიდან იქნას აცილებული მონაცემთა გაჟონვა.

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (13)$$

ფენის შემდეგ ეტაპზე პროგნოზირების ამოცანა ჩამოყალიბდა როგორც ზედამხედველობითი სწავლების პრობლემა sliding window მიდგომის გამოყენებით, რომელიც მიმდევრობით მონაცემებს ზედამხედველობითი სწავლების ამოცანად გარდაქმნის გადაფარვადი input-output წყვილების შექმნით. დროითი მწკრივების პროგნოზირებაში sliding window მიდგომა მიმდევრობით მონაცემებს ფიქსირებული სიგრძის input-output წყვილებად გარდაქმნის მონაცემთა ნაკრებზე ფანჯრის გადაადგილებით [13]. ეს მეთოდი მოდელს საშუალებას აძლევს ისწავლოს დროითი დამოკიდებულებები წარსული დაკვირვებების (შეყვანის) გამოყენებით მომავალი მნიშვნელობების (გამოსვლის) პროგნოზირებისთვის. ის ფართოდ გამოიყენება რეგრესიაზე დაფუძნებულ მოდელებში და ზრდის პროგნოზირების სიზუსტეს რთული ნიმუშების დაჭერით. ნახ. 2-ზე ნაჩვენებია სასწავლო მონაცემების აგება sliding window-ის გამოყენებით. შედეგად მიიღება ორი მონაცემთა ნაკრები: X_{train} და Y_{train} , სადაც შეყვანისა და გამოსვლის მიმდევრობები აგებულია გადაფარვადი ფანჯრებით.



ნახაზი 1. LSTM-Attention-Nudging მოდელის არქიტექტურა.

3.2. LSTM-Attention ფენა

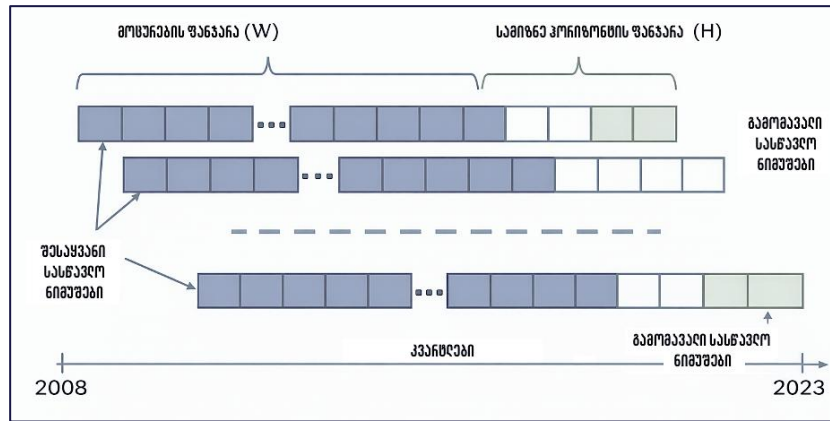
როგორც ნახ. 1-დან ჩანს, ეს ფენა შედგება k პარალელურად მომუშავე LSTM-Attention მოდულისგან. თითოეული მოდული შედგება BiLSTM და Attention მოდულებისგან, რომლებიც სერიულადაა დაკავშირებული. განვიხილოთ ისინი ცალ-ცალკე.

BiLSTM ფენა ამუშავებს შეყვანის მიმდევრობას და ამოიღებს მდიდარ კონტექსტურ მახასიათებლებს როგორც წინამავალი, ისე უკუმიმართული დროითი მიმართულებებიდან. „ორმიმართულებიანობა“ საშუალებას აძლევს ორივე ინტერპრეტაციის ჩაშენებას დამალულ მდგომარეობებში.

BiLSTM და LSTM ქსელების აგება და გამოყენება ფართოდ არის განხილული მრავალ ნაშრომში [18], [19]. ეს ჩვენი კვლევის მთავარი ფოკუსი არ არის. ამიტომ აქ მხოლოდ მოკლედ შევეხებით მათ კავშირებს სხვა ფენებთან.

ეს ფენა წარმოვადგინოთ მიმდევრობების შემდეგი გარდაქმნის სახით:

$$\tilde{\mathbf{h}}_t, \mathbf{h}_t, \mathbf{c}_t = \text{BiLSTM}(\mathbf{x}_t, \mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{c}_{t-1}) \quad (14)$$



ნახაზი 2. სასწავლო მონაცემების აგების ილუსტრაცია sliding window-ის გამოყენებით: პროგნოზირების ჰორიზონტი $H=4$ კვარტალი და მოძრავი ფანჯრის ზომა $W=k \cdot T_h$.

სადაც h_t არის BiLSTM მოდულის დამალული მდგომარეობა t მომენტში, c_t — უჯრედის მდგომარეობა, ხოლო $\tilde{h}_t = [h_{t-w}, h_{t-2}, \dots, h_{t-1}]$ არის ყველა დამალული მდგომარეობის კონკატენაცია, რომელიც w დროით ნაბიჯზე იქმნება. ისტორიულ მახასიათებლებში რთული დროითი ნიმუშების უკეთ დასაჭერად ვიყენებთ ორ BiLSTM ფენას (რომლებიც აბრუნებენ მიმდევრობებს), additive attention ფენას (რომელიც სწავლობს დროითი მნიშვნელობის წონებს) კონტექსტური ვექტორის მისაღებად და შემდეგ Dense ფენას $\text{horizon} \times \text{features}$ გამოსვლების წარმოებისთვის.

Attention მოდული განსაზღვრავს, დროის რომელი მომენტები უფრო მნიშვნელოვანია პროგნოზისთვის. იმისათვის, რომ მოდელმა დინამიკურად მოახდინოს ფოკუსირება ყველაზე რელევანტურ დროით ნაბიჯებზე, ინტეგრირებულია Bahdanau-ის ტიპის attention-მექანიზმი [20]. Bahdanau attention-მექანიზმი ითვლის შესაბამისობის ქულებს დეკოდერის წინა დამალულ მდგომარეობასა (query) და ენკოდერის ყველა დამალულ მდგომარეობას (keys/values) შორის. Attention ფენა ითვლის კონტექსტურ ვექტორს ctx , როგორც BiLSTM-ის დამალული მდგომარეობების შეწონილ ჯამს. მექანიზმი ითვლის შესაბამისობის ქულებს e_t , რომლებიც შემდეგ ნორმალიზდება softmax ფუნქციით attention-ის წონების α_t მისაღებად.

$$ctx_t = \sum_{i=t-w}^t \alpha_i h_i \quad (15)$$

ქულის ფუნქცია გამოითვლება LSTM ქსელის პარამეტრებიდან W_h, b_h და აქვს შემდეგი სახე:

$$e_t = v_a^T \tanh(W_a h_t + b_a) \quad (16)$$

სადაც v_a, W_a, b_a — სასწავლო წონითი მატრიცები/ვექტორებია. Attention-ის წონები α_t გამოითვლება feedforward ნეირონული ქსელის გამოყენებით:

$$\alpha_t = \frac{\exp(e_t)}{\sum_{k=1}^T \exp(e_k)} \quad (17)$$

ეს მოდელს საშუალებას აძლევს დინამიკურად ფოკუსირდეს შეყვანის მიმდევრობის რელევანტურ ნაწილებზე და მიიღოს ისტორიის შეწონილი წარმოდგენა.

LSTM-Attention ქსელის შეჯამება გადაეცემა საბაზისო პროგნოზირების ქვეფენას, რომელიც წარმოდგენილია Dense კვანძებით აგებული MLP-ის სახით.

საბოლოო ოპერაციაა პროგნოზის residual და naïve მნიშვნელობების შეფასება. Naive baseline უბრალოდ იმეორებს ბოლო დაკვირვებულ ვექტორს თითოეული მომავალი ნაბიჯისთვის (ძლიერი და მარტივი baseline მრავალი რეალური მწკრივისთვის) და წარმოდგენილია შემდეგი ფორმით:

$$\hat{y}_{t:t+H}^n = \hat{y}_t \quad (18)$$

Residual baseline გამოითვლება როგორც:

$$\hat{y}_{t:t+H}^r = \hat{y}_{t:t+H} - \hat{y}_{t:t+H}^n \quad (19)$$

სადაც $\hat{y}_{t-H:t}$ არის მიზნობრივი მახასიათებლების პროგნოზი, რომელიც აგებული მოდელით შესრულდა. მოდელი end-to-end რეჟიმში სწავლობს საშუალო აბსოლუტური შეცდომის (MAE) დანაკარგის მინიმიზაციით Adam ოპტიმიზატორის გამოყენებით. პროგნოზი გაკეთდა საბოლოო სასწავლო ფანჯრისთვის და შეფასდა residual და naïve მნიშვნელობები.

რადგან ღრმა ნეირონული ქსელების ოპტიმიზაციის შედეგი მნიშვნელოვნად დამოკიდებულია პარამეტრების საწყისი მნიშვნელობების არჩევაზე, ამ ნაშრომში ერთდროულად აირჩევა v რაოდენობის LSTM-Attention ნეირონული ფენა და ოპტიმიზაცია მათზე დამოუკიდებლად, შემთხვევით არჩეული საწყისი მნიშვნელობებით სრულდება. შესაბამისად, ერთი შედეგის ნაცვლად მიიღება v შედეგი.

i -ე BiLSTM-Attention მოდელის განშტოების მილსადენი შემდეგნაირად გამოიყურება:

$$(X, Y)_{train}, \theta_0 \rightarrow LSTM - Attention_i \rightarrow (ctx, h^*)_i \rightarrow MLP_i \rightarrow (\hat{y}, \hat{y}^r, \hat{y}^n, \mathcal{A})_i \quad (20)$$

შემდეგი ნაბიჯი გულისხმობს ყველა v მილსადენიდან ოპტიმალური განშტოების შერჩევას და მის დაყვანას შერეული მოდელების წრფივ ინტერპოლაციამდე. ამისთვის განხორციელდა შემდეგი ნაბიჯები: I) შერჩეული v მოდელიდან ირჩევა მაქსიმალური პროგნოზირების სიზუსტის მქონე მოდელი; II) გამოითვლება მიზნობრივი ცვლადების პროგნოზული residual მნიშვნელობების საშუალო- $\bar{y}_{t-H:t}^r = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \hat{y}_{i,t-H:t}^r$; III) თითოეული მიზნობრივი f ინდიკატორისა და q -ე სეზონური მახასიათებლისთვის მნიშვნელობა გამოითვლება საშუალო კვადრატული გადახრის მიხედვით; IV) შერჩეული α და γ კოეფიციენტებით residual პროგნოზი მაქსიმალურად უახლოვდება მიზნობრივი მახასიათებლების ნამდვილ მნიშვნელობებს; V) აგებული მოდელების პარამეტრები, წონები და შეფასებები ინახება შემდგომი ფენების გამოთვლებში უკუკავშირისთვის.

LSTM-Attention მოდელის თითოეული განშტოებიდან მიღებული გამოსავალი გადაეცემა nudging ფენას და იქმნება ერთიანი განშტოება. განვიხილოთ nudging ფენის ფუნქციონალი.

3.3. Nudging ფენა

ერთგანზომილებიანი მრავალსაფეხურიანი პროგნოზისთვის nudging მოდელის კორექციის პროცესი წარმოვადგინოთ შემდეგი Algorithm 1-ის სახით. **Algorithm 1:** Nudging correction for the i-th branch in the univariate multiple-step prediction

```

1: Input:  $\theta_1^i$ - LSTM-Attention network weights,  $X^i, y^i$  – last window train data,  $\mathcal{A}_1^i$ - accuracy prediction from the previous stage,  $\mathcal{A}^{thresh}$ -threshold of the accuracy for all branches.

2: Outcome: Corrected LSTM-Attention network weights,  $\mathcal{A}_k^i$ - accuracy;

3:  $k \leftarrow 1$ ;

4: if  $\mathcal{A}_k^i \geq \mathcal{A}^{thresh}$  : return  $\theta_k^i, \mathcal{A}_k^i$ ;

5: Initialize univariate LSTM-Attention model  $M_k$  with parameters  $\theta_k^i$ ;

6: Compile  $M_k$ ;

7:  $\theta_k^i \leftarrow \text{Train}(M_k, X^i, y^i)$  ;

8:  $X_T^i \leftarrow \text{LastWindow}(X^i)$ ;

9:  $\tilde{y}_e^i \leftarrow \text{Predict}(M_k, X_e^i)$ ; # predict for the last window

10:  $\tilde{y}_{e-1}^i \leftarrow \text{GetFromHistory}(X^i, y^i)$ ;

11:  $\hat{y}_n^i \leftarrow \text{CalculateNudgePrm}(\tilde{y}_e^i, \tilde{y}_{e-1}^i, y_e^i, \mathcal{A}_k^i)$ ;

12:  $\theta_k^i \leftarrow \text{CalibrateModel}(M_k, \tilde{y}_e^i, \hat{y}_n^i)$ 

13:  $\mathcal{A}_k^i \leftarrow \text{CalculateAccuracy}(\tilde{y}_e^i)$ ;

14:  $k \leftarrow k+1$ ;

15: goto 4;

```

აქ ყურადღებას გავამახვილებთ შემოთავაზებული ალგორითმის მხოლოდ ორ პუნქტზე — 11-ე და 13-ე პუნქტებზე.

3.3.1. Nudging პარამეტრების გამოთვლა

განვიხილოთ მოქმედებები თანმიმდევრობით.

- ნაჯინგის კორექცია გამოითვლება შერჩეული პოლიტიკებისა და სისტემური პარამეტრების შესაბამისად:

$$\tilde{y}_{\text{nudged}} = \begin{cases} \tilde{y}_e - \delta, & \mathcal{A}_k \geq \mathcal{A}_{\text{thresh}} \text{ \& } y_e < \tilde{y}_e \\ \tilde{y}_e + \delta, & \mathcal{A}_k \geq \mathcal{A}_{\text{thresh}} \text{ \& } y_e > \tilde{y}_e \end{cases}$$

სადაც $\delta = \text{FEEDBACK\_SHIFT}$ არის სისტემური პარამეტრი.

2. სეზონურობის კომპონენტი y_{season} გამოითვლება ისტორიული მონაცემების საფუძველზე.
3. მიზნობრივი მნიშვნელობა გამოითვლება საბაზისო და სეზონური კომპონენტების შეწონვით:

$$\hat{y}_{\text{nudged}} = (1 - \lambda) \times \tilde{y}_{\text{nudged}} + \lambda \times y_{\text{season}}, \quad \lambda \in [0,1].$$

4. პროგნოზის ნდობის რეგიონი $\text{tr} = [c_{\min}, c_{\max}]$ ყალიბდება წინა პროგნოზის შესაბამისად.
5. მიზნობრივი მნიშვნელობა იზღუდება ნდობის ინტერვალის შესაბამისად:

$$\hat{y}_{\text{nudged}} = \text{clip}(\hat{y}_{\text{nudged}}, \text{tr}).$$

3.3.2. მოდელის კალიბრაცია

კალიბრაცია ხორციელდება შემდეგი ნაბიჯებით:

2. პროგნოზირებულ და ნაჯინგით კორექტირებულ მახასიათებლებს შორის გადახრა გამოითვლება შემდეგნაირად:

$$\Delta = \tilde{y}_e^i - \hat{y}_h^i.$$

4. მოდელიდან აღებულია წონები და bias პარამეტრები.
5. ხორციელდება bias პარამეტრის კორექტირება:

$$\text{bias} = \text{bias} + \Delta.$$

ალგორითმი 1 უზრუნველყოფს პროგნოზირების პროცესის ადაპტირებადობას, რადგან თითოეული მახასიათებლის პროგნოზირებისას k -ნაბიჯების რაოდენობა შეიძლება განსხვავებული იყოს და იგი შეიძლება დარეგულირდეს როგორც ავტომატურად, ისე ხელით.

4. ექსპერიმენტი

4.1. მონაცემთა ნაკრებები

პრაქტიკული პროგნოზირების შედეგიანობის შესაფასებლად შემოთავაზებული მოდელი შემოწმდა როგორც სინთეზურ მონაცემებზე, ისე შემდეგ რეალურ მონაცემთა ნაკრებებზე: 1) საქართველოს კვარტალური მაკროეკონომიკური მონაცემთა ნაკრები (2008–2025) geostat.ge-დან, რომელიც შეიცავს 18 ცვლადს, რომელთაგან რვა იყო პროგნოზირების მიზნობრივი ცვლადი;

4.2. ჰიპერპარამეტრები

მოდელისთვის ჰიპერპარამეტრების არჩევა მნიშვნელოვნად მოქმედებს მის ეფექტიანობასა და სიზუსტეზე. ჰიპერპარამეტრების ოპტიმალური შერჩევისთვის გამოვიყენეთ Keras tuner, რომელიც TensorFlow-სთან ერთად სთავაზობს ჩაშენებულ მიების ალგორითმებსა და ინსტრუმენტებს განსაზღვრულ სივრცეში საუკეთესო

ჰიპერპარამეტრების ეფექტურად მოსაძებნად, რითაც აუმჯობესებს მოდელის სიზუსტესა და განზოგადებას.

პარამეტრი	მნიშვნელობა
მიმდევრობის სიგრძე (L)	128
ბიჯი (S)	1
დამალული განზომილება (თითო BiLSTM ფენაზე)	64
BiLSTM ფენების რაოდენობა	2
Dropout-ის ალბათობა	0.2
ოპტიმიზატორი	Adam
სწავლის სიჩქარე	0.001
Batch Size	64
ეპოქების რაოდენობა	50
Sliding windows პროგნოზის ჰორიზონტის ზომა	4
პროგნოზის ჰორიზონტის ზომა	4

ცხრილი 1. ჩვენი ჰიპრიდული მოდელის სწავლებისთვის გამოყენებული ჰიპერპარამეტრების მნიშვნელობები.

ცხრილი 1 ასახავს საქართველოს ბიუჯეტის პროგნოზირების მაგალითისთვის გამოყენებულ ჰიპერპარამეტრებს. Nudging ფენისთვის FEEDBACK_SHIFT სისტემური პარამეტრი არჩეულია 0.15. ჰიპერპარამეტრების უმეტესობა მონაცემთა ნაკრებებს შორის უცვლელი დარჩა, გარდა ეპოქების რაოდენობისა.

4.3. ექსპერიმენტული დიზაინი

პირველი ექსპერიმენტი იყენებს საქართველოს კვარტალურ მაკროეკონომიკურ ინდიკატორებს 2008Q1-2023Q4 პერიოდისთვის და პროგნოზირებს 2024Q1-2024Q4 პერიოდს. მიზნობრივი ცვლადები მოიცავს GDP-ს, GDP per capita-ს, imports-ს, state revenues-ს, broad money M3-ს, საშუალო გაცვლით კურსს, დასაქმებულთა რაოდენობას და agricultural production output-ს. შემოთავაზებული მოდელი სამჯერ გაეშვა განმეორებით გაშვებებს შორის სტაბილურობის შესაფასებლად. ამ ექსპერიმენტის დროს მოდელის მონაცემებში არ იყო შეყვანილი 2024 წლის მაკროეკონომიკური მონაცემების მნიშვნელობები და შედარება ხორციელდებოდა სისტემის გრეთ.

მეორე ექსპერიმენტი იყენებს საქართველოს კვარტალურ მაკროეკონომიკურ ინდიკატორებს 2008Q1-2024Q4 პერიოდისთვის და პროგნოზირებს 2025Q1-2025Q4 პერიოდს. მიზნობრივი ცვლადები მოიცავს GDP-ს, GDP per capita-ს, exports-ს, imports-ს, state revenues-ს, broad money M3-ს, საშუალო გაცვლით კურსს. ამ ექსპერიმენტის დროს მოდელის მონაცემებში არ იყო შეყვანილი 2025 წლის მაკროეკონომიკური მონაცემების მნიშვნელობები და შედარება ხორციელდებოდა სისტემის გარეთ.

4.4. შედეგები

შემოთავაზებულმა მოდელმა, 2024 წლის მონაცემების პროგნოზირებისას, სამი თანმიმდევრული გაშვებისას სტაბილური შედეგები აჩვენა: 94.09%, 93.91% და 94.16%. იმავე პირობებში 2025 წლის მონაცემების პროგნოზირებისას, აჩვენა: საშუალო პროგნოზირების სიზუსტე - 92.16%.

მთავარი დასკვნა ის არის, რომ შემოთავაზებული მოდელი კონკურენტუნარიანია და აჩვენებს პროგნოზირების მაღალ სიზუსტეს სხვადასხვა ტიპის და ხმაურის მონაცემების პირობებში. შემოთავაზებულ მოდელს აქვს მკაფიო მონაცემთა მილსადენი, განტოლებებით განსაზღვრული პროგნოზირების ოპერატორი, ფიქსირებული ჰიპერპარამეტრები, განსაზღვრული დანაკარგის ფუნქცია და შეზღუდული კორექციის მექანიზმი. ეს აუმჯობესებს რეპროდუცირებადობას და შედეგებს უფრო შესაფერისს ხდის აკადემიური შეფასებისთვის.

ინდიკატორი	გაშვება 1	გაშვება 2	გაშვება 3
GDP (M \$)	94.83	94.28	94.69
GDP PER CAPITA \$	94.49	94.40	94.60
Imports (M \$)	92.57	92.16	92.88
State Revenues (M \$)	92.06	92.36	92.10
Broad Money M3 (M \$)	92.00	92.02	92.00
AV. Exchange USD-\$	97.50	97.11	98.07
Number Of Employees	97.15	96.31	97.29
Agricult. Products Outp. (M \$)	92.10	92.66	91.65
Overall average	94.09	93.91	94.16

ცხრილი 2. საქართველოს 2024 წლის მაკროეკონომიკური მაჩვენებლების პროგნოზირების საშუალო სიზუსტე %.

ინდიკატორი	წელი	კვარტალი	მოდულის პროგნოზი	რეალური მონაცემი	პროგნოზის სიზუსტე %
GDP (MILLION \$)	2025	I	8034.73	7896.90	98.28
GDP (MILLION \$)	2025	II	8841.25	9328.60	94.78
GDP (MILLION \$)	2025	III	9530.19	10334.60	92.22
GDP (MILLION \$)	2025	IV	9601.90	10644.80	90.20
GDP PER CAPITA \$	2025	I	2170.25	2131.70	98.22
GDP PER CAPITA \$	2025	II	2354.25	2492.70	94.45
GDP PER CAPITA \$	2025	III	2590.74	2818.90	91.91
GDP PER CAPITA \$	2025	IV	2594.72	2888.90	89.82
EXPORTS (MILLION \$)	2025	I	1486.14	1397.40	94.03
EXPORTS (MILLION \$)	2025	II	1662.64	1837.10	90.50
EXPORTS (MILLION \$)	2025	III	1940.80	1916.60	98.75
EXPORTS (MILLION \$)	2025	IV	1849.20	2140.00	86.41
IMPORTS (MILLION \$)	2025	I	3954.17	4457.80	88.70
IMPORTS (MILLION \$)	2025	II	4457.53	4522.30	98.57
IMPORTS (MILLION \$)	2025	III	4652.39	4670.40	99.61
IMPORTS (MILLION \$)	2025	IV	4915.95	4961.50	99.08
STATE REVENUES (MILLION \$)	2025	I	2149.70	2363.80	90.94
STATE REVENUES (MILLION \$)	2025	II	2036.13	2439.70	83.46
STATE REVENUES (MILLION \$)	2025	III	2044.40	2640.40	77.43
STATE REVENUES (MILLION \$)	2025	IV	2111.71	2701.10	78.18
BROAD MONEY M3 (MILLION \$)	2025	I	17312.24	17379.30	99.61
BROAD MONEY M3 (MILLION \$)	2025	II	17490.65	18382.10	95.15
BROAD MONEY M3 (MILLION \$)	2025	III	18659.64	20018.50	93.21
BROAD MONEY M3 (MILLION \$)	2025	IV	19006.09	21311.20	89.18

AVERAGE EXCHANGE RATE USD-\$	2025	I	2.76	2.81	92.20
AVERAGE EXCHANGE RATE USD-\$	2025	II	2.85	2.74	91.94
AVERAGE EXCHANGE RATE USD-\$	2025	III	2.77	2.71	91.82
AVERAGE EXCHANGE RATE USD-\$	2025	IV	2.86	2.71	91.81
Overall average					92.16

ცხრილი 3. საქართველოს 2025 წლის მაკროეკონომიკური მაჩვენებლების პროგნოზირების საშუალო სიზუსტე %. კვარტლების მიხედვით

6. დასკვნა და მომავალი სამუშაო

ჩატარებული ანალიზის ფარგლებში შეფასდა ნეირონული ქსელების სხვადასხვა არქიტექტურის ფუნქციური შესაძლებლობები და შეზღუდვები, განსაკუთრებით მაკროეკონომიკური ინდიკატორების პროგნოზირების ამოცანებთან მიმართებით. მიღებული შედეგების საფუძველზე გამოიკვეთა, რომ **LSTM-Attention-Nudge** ტიპის ჰიბრიდული მიდგომა აღნიშნულ კონტექსტში მაღალი პრაქტიკული ეფექტიანობით ხასიათდება. ამ არქიტექტურულ საფუძველზე შესაძლებელია პროგნოზირების ახალი სისტემის ფორმირება, რომელიც ერთდროულად ითვალისწინებს დროით დინამიკას, ყურადღების მექანიზმებზე დაფუძნებულ წონადასასა და კორექციული ზემოქმედების კომპონენტს.

სინთეზურ და რეალურ მონაცემებზე განხორციელებულმა ექსპერიმენტულმა ტესტირებამ აჩვენა მოდელის მაღალი პროგნოზული სიზუსტე და პარამეტრული ცვლილებების მიმართ შედარებითი მდგრადობა. ამასთან, გამოვლინდა ის მიმართულებები, რომელთა შემდგომი განვითარებაც შესაძლებელს გახდის მოდელის განმარტებადობის, სტაბილურობისა და გამოყენებითი ღირებულების დამატებით გაძლიერებას.

შემდგომი კვლევითი და ტექნიკური ნაბიჯები:

- მოდელის მათემატიკური საფუძვლების უფრო ღრმა ფორმალიზება და თეორიული ვალიდაციის გაძლიერება.
- შესაბამისი საკორექციო სიგნალების გამოყენება **Nudge** კომპონენტის პარამეტრების ოპტიმალური კალიბრაციისათვის.

• პროგნოზირების არქიტექტურაში დარგობრივად სპეციფიკური, სექტორული და სტრუქტურული შეზღუდვების ინტეგრირება მოდელის ახსნადობისა და სანდოობის გასაზრდელად.

ლიტერატურა

1. Ammara Laeeq, Jie Li, Usman Adeel, A Hybrid LSTM–Attention Model for Multivariate Time Series Imputation: Evaluation on Environmental Datasets, *Mach. Learn. Knowl. Extr.* 2026, 8, 18, <https://doi.org/10.3390/make8010018>
2. Dominik Stempien, and Robert Slepaczuk, Hybrid Models for Financial Forecasting: Combining Econometric, Machine Learning, and Deep Learning Models, *arXiv:2505.19617v1 [q-fin.TR]* 26 May 2025.
3. Kehang Feng, Yuxin Zhang, LSTM-Attention: A Novel Deep Learning Model for Sustainable Development Goals Achievement Prediction, *MLSC '25: Proceedings of the 2025 International Symposium on Machine Learning and Social Computing*, Pages 46–50, <https://doi.org/10.1145/3778450.3778457>
4. Navid Hajizadeh, S. Yazdani, Sara Ershadi-Nasab, Attentional Bi-LSTM for Multivariate Time Series Forecasting on Edge Devices: A Case Study on NanoPi Neo Plus2, DOI:10.1109/ICCKE68588.2025.11273888
5. Inna Polichtchouk, Simon Lang, Sarah-Jane Lock, Michael Maier-Gerber, Peter Dueben, Hybrid ensemble forecasting combining physics-based and machine-learning predictions through spectral nudging, 5 Mar 2026, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.05570>
6. Jiangcheng Zhu, Shuang Hu, Rossella Arcucci, Chao Xu, Jihong Zhu, and Yi-ke Guo, Model Error Correction in Data Assimilation by Integrating Neural Networks, *BIG DATA MINING AND ANALYTICS*, Volume 2, Number 2, June 2019, DOI: 10.26599/BDMA.2018.9020033
7. Heaney, C. E., Tang, J., Yan, J., Guo, D., Ipock, J., Kaluvakollu, S., et al. (2024). Data assimilation with machine learning for dynamical systems: Modelling indoor ventilation. *Physica A*, 643, 129783. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129783>
8. Sun, H., Lei, L., Liu, Z., Ning, L., & Tan, Z. M. (2025). An online paleoclimate data assimilation with a deep learning-based network. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 17(6).
9. Jaemin Oh, Jinsil Lee, Youngjoon Hong, Machine Learning-Based Nonlinear Nudging for Chaotic Dynamical Systems, 7 Aug 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.05778>
10. Harbir Antil, Rainald Löhner, Randy Price, Data Assimilation with Deep Neural Nets Informed by Nudging, 22 Nov 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.11505>
11. Yingjun Peng, Yulong Bai, Xufeng Wang, Qinghe Yu, Xiaoxin Yue, Nudging-Based Data Assimilation Method for Error Correction Coupled With Huber Loss Functions and BiLSTM-GRU Hybrids, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, DOI: 10.1029/2025MS005306

12. Hassanzadeh, P., Chattopadhyay, A., Bach, E., Nabizadeh, E. (2023): Deep learning-enhanced ensemble-based data assimilation for high-dimensional nonlinear dynamical systems, <https://doi.org/10.57757/IUGG23-3118>
13. Defu Cao, Yixiang Zheng, Parisa Hassanzadeh, Simran Lamba, Xiaomo Liu, and Yan Liu. Large Scale Financial Time Series Forecasting with Multi-faceted Model. ICAIF '23, <https://doi.org/10.1145/3604237.3626868>
14. Ta-Chung Chi, Ting-Han Fan, Raffaele M. Ghigliazza, Domenico Giannone, Zixuan (Kevin) Wang, Macroeconomic Forecasting and Machine Learning, arXiv:2510.11008v1 [econ.EM] 13 Oct 2025.
15. Cook, Thomas R., and Aaron Smalter Hall. "Macroeconomic Indicator Forecasting with Deep Neural Networks." Federal Reserve Bank of Kansas City, Research Working Paper 17-11, <https://doi.org/10.18651/RWP2017-11>
16. Qi Tang, Ruchen Shi, Tongmei Fan, Yidan Ma, and Jingyan Huang, Prediction of Financial Time Series Based on LSTM Using Wavelet Transform and Singular Spectrum Analysis, Mathematical Problems in Engineering, 2021, <https://doi.org/10.1155/2021/9942410>
17. Bryan Lima, Sercan O. Arik, Nicolas Loeff, Tomas Pfister, Temporal Fusion Transformers for Interpretable Multi-horizon Time Series Forecasting, arXiv:1912.09363v3 [stat.ML] 27 Sep 2020.
18. Zurab Bosikashvili, Tamar Bosikashvili, Ketevan Bosikashvili - Using Blocking Meta-heuristics in the Models of Deep Learning, International scientific practical conference modern challenges and achievements in information and communication technologies – 2023, ISBN 978-9941-512-06-, <http://www.gtu.ge>.
19. Pierre Beaujuge, Multivariate Time Series Forecasting with a Bidirectional LSTM: Building a Model Geared to Multiple Input Series, Medium, Sep 24, 2020.
20. Gholam Reza Alipour Modab, Attention-driven deep learning models for multivariate time series forecasting of reservoir water levels, Water Sci Technol (2025) 92(12): 1650–1668. <https://doi.org/10.2166/wst.2025.182>

Evaluation of the Storage Dynamics of Tomatoes Treated with a 7% Edible Coating Based on an L-Leucine-Derived Pseudoprotein (PP)

Salome Cheishvili

Associate Professor, Georgian Technical University (GTU), 598 198 540,
cheishvili.salome@gtu.ge

Abstract

During the storage of agricultural products, one of the major challenges is the rapid deterioration of fruit quality attributes, which is associated with moisture loss, respiratory activity, and the degradation of cellular structures. In contemporary research, particular attention is given to biodegradable edible coatings that reduce the intensity of metabolic processes and extend the shelf life of produce

The aim of the present study was to evaluate the storage dynamics of tomatoes treated with a 7% edible coating based on a pseudoprotein (PP) derived from the α -amino acid L-leucine. The study was conducted under conditions selected through preliminary optimization, at a temperature of 16°C, relative humidity of $70 \pm 5\%$, and a storage period of 27 days. The dynamics of weight loss, total soluble solids ($^{\circ}\text{Brix}$), and crude fiber content were assessed.

The obtained results demonstrated that the PP coating significantly reduced weight loss, slowed the decline in total soluble sugars, and ensured a relatively stable retention of crude fiber content compared to the control samples. It was established that the 7% pseudoprotein-based coating effectively limits dehydration and metabolic processes, thereby contributing to the preservation of the commercial and structural quality of tomatoes.

Keywords: tomato, pseudoprotein, edible coating, weight loss, soluble sugars, crude fiber.

Introduction

During the storage of agricultural products, one of the major challenges is the rapid alteration of their quality characteristics, which is associated with physiological and biochemical processes occurring within the fruit. During the storage period of fruits and vegetables, respiration, moisture evaporation, metabolic consumption of organic compounds, and degradation of cellular structures actively occur, ultimately leading to a reduction in the commercial quality and nutritional value of the product. [1].

Tomato (*Solanum lycopersicum L.*) is classified as a highly respiring agricultural product and is particularly sensitive to storage conditions. Under ambient or moderately low-temperature storage, major challenges include weight loss, reduction of sugar content, tissue softening, and the degradation of structural components of the cell wall.

In recent years, considerable attention has been devoted to the development and application of biodegradable edible coatings, which form a semipermeable protective layer on the fruit surface and reduce the intensity of water vapor and gas exchange. Of particular interest are pseudoproteins based on α -amino acids, which are characterized by biocompatibility, biodegradability, and favorable barrier properties. [2-6].

Within the framework of preliminary studies, the effect of a 7% pseudoprotein-based coating on biochemical parameters of tomatoes, including pH, titratable acidity, vitamin C content, and water-soluble dry matter, was evaluated. Based on the mathematical design of the experiment, the practically optimal conditions were determined to be a storage temperature of 16°C, a dipping time of 15 s, and a storage period of 27 days. [7,8].

The aim of the present study is to further evaluate the storage dynamics of tomatoes under these optimized conditions by assessing key quality parameters, including weight loss, total soluble solids (°Brix), and crude fiber content.

Methodology

The object of the study was red table tomatoes (*Solanum lycopersicum L.*) at the full-ripe stage, selected according to the principle of uniformity in size and maturity.

A 7% alcoholic solution of a pseudoprotein (PP) based on the α -amino acid L-leucine was used as the edible coating. The samples were coated by the dipping method for 15 seconds, after which the tomatoes were allowed to dry at room temperature. [9,10].

The storage conditions were selected based on the results of a preliminary optimization study, which established that a temperature of 16°C, a dipping time of 15 s, and a storage period of 27 days provided relatively stable preservation of the quality attributes of tomatoes.

The experiment was conducted in two variants: a control group without coating and an experimental group consisting of samples treated with a 7% PP coating.

Tomatoes were stored at a temperature of 16°C and a relative humidity of $70 \pm 5\%$ for a period of 27 days. Within the scope of the study, analyses were performed at 3-day intervals (days 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, and 27).

The following parameters were determined: weight loss (%) based on the difference between initial and current weight; total soluble solids (°Brix) using the refractometric method; and crude fiber content (%) according to the AOAC methodology. All determinations were performed in triplicate, and the results are presented as mean values. [11].

Results and Discussion

Based on the preliminary optimization study, it was established that the practically optimal storage regime for tomatoes treated with a 7% pseudoprotein (PP) edible coating consisted of a temperature of 16°C, a dipping time of 15 s, and a storage period of 27 days. Under these conditions, relatively stable values of key quality parameters, including °Brix, pH, titratable acidity, and vitamin C content, were obtained, providing the basis for the design of the present study. [8-9].

In the present study, the dynamics of additional key parameters during storage, including weight loss, total soluble solids (°Brix), and crude fiber content, were evaluated. These parameters provide important information regarding changes in the commercial, structural, and organoleptic quality of the fruit.

Table 1. Dynamics of Tomato Quality Parameters During Storage

Day	Weight Loss*, (%)		Total Soluble Solids (°Brix)		Crude Fiber, (%)	
	CTRL	Coated	CTRL	Coated	CTRL	Coated
0	0.0	0.0	5.8	5.8	1.18	1.18
3	1.1	0.7	5.92	5.88	1.19	1.19
6	2.3	1.4	6.05	5.96	1.18	1.19
9	3.6	2.2	5.85	5.92	1.15	1.18
12	5.0	3.1	5.55	5.82	1.11	1.16
15	6.5	4.1	5.20	5.65	1.06	1.13
18	8.2	5.3	4.82	5.35	1.00	1.09
21	10.1	6.6	4.45	5.05	0.94	1.05
24	12.0	7.9	4.12	4.72	0.86	1.00
27	13.8	9.0	3.82	4.52	0.81	0.95

A gradual increase in weight loss was observed in both treatments during storage; however, this process was significantly slower in the samples treated with the PP coating. By day 27, weight loss reached 13.8% in the control samples, whereas it was limited to 9.0% in the PP-coated samples. These results indicate that the pseudoprotein coating reduces the rate of moisture evaporation and partially restricts respiratory processes.

Analysis of changes in total soluble solids (°Brix) in both treatments showed that the slight increase observed during the initial stage of storage was associated with partial moisture loss and the consequent concentration of soluble constituents. During the subsequent storage period, a decline in °Brix values was recorded, which can be attributed to the utilization of sugars in respiration and other metabolic transformations. Nevertheless, the rate of decrease in total soluble solids was lower in the PP-coated samples. While the control samples exhibited a value of 3.82°Brix on day 27, the PP-coated samples maintained a higher value of 4.52°Brix. These findings are consistent with the results of the preliminary optimization study, in which relatively higher °Brix values were preserved under the optimized storage conditions.

During the initial stage of storage, no significant changes in crude fiber content were observed, which may be partially attributed to the concentration effect resulting from moisture loss. During the later stages of storage, however, a gradual decrease in crude fiber content was recorded, associated with the enzymatic degradation of structural polysaccharides in the cell wall and the consequent softening of tissues. This process was more pronounced in the control samples, where crude fiber content decreased to 0.81% by day 27. In contrast, the PP-coated samples maintained a crude fiber content of 0.95%, indicating a relatively better preservation of the fruit tissue structure.

The obtained results confirm that the 7% edible coating based on a pseudoprotein derived from the α -amino acid L-leucine effectively slows down dehydration and metabolic processes in tomatoes during storage. Particularly noteworthy is the fact that the application of the coating ensured a relatively stable preservation of both commercial quality and structural–biochemical characteristics throughout the 27-day storage period.

Conclusions

Under the conditions selected on the basis of the preliminary optimization study, namely a storage temperature of 16°C, an immersion time of 15 s, and a storage period of 27 days, the effect of a 7% edible coating based on a pseudoprotein derived from the α -amino acid L-leucine on the storage dynamics of tomatoes was evaluated.

The results of the study demonstrated that the application of the PP coating significantly reduced weight loss, slowed the decline in total soluble solids, and ensured better preservation of crude fiber content compared with the control samples.

It was established that the 7% pseudoprotein-based coating reduced the intensity of dehydration and metabolic processes, thereby contributing to the preservation of the commercial, structural, and organoleptic quality of tomatoes under prolonged storage conditions.

The obtained results complement the findings of the preliminary optimization study and confirm the potential of pseudoprotein-based edible coatings for application in agricultural product storage technologies.

References:

1. Scientific-Research Center of Agriculture. *Storage of Vegetables in Warehouse and Refrigeration Facilities*. Tbilisi, Georgia; 2015. p. 1–12. Available from: <http://www.moa.gov.ge>
2. Momin MC, Jamir AR, Ankalagi N, Henny T, Devi OB. Edible coatings in fruits and vegetables: A brief review. *The Pharma Innovation Journal*. 2021;10(SP-7):71–78.
3. Moradinezhad F, Adiba A, Ranjbar A, Dorostkar M. Edible coatings to prolong the shelf life and improve the quality of subtropical fresh/fresh-cut fruits: A review. *Horticulturae*. 2025;11(6):577.
4. Yaashikaa PR, Kamalesh R, Kumar PS, Saravanan A, Vijayasri K, Rangasamy G. Recent advances in edible coatings and their application in food packaging. *Food Research International*. 2023;173:113366.
5. Yousefzade O, Katsarava R, Puiggali J. Biomimetic hybrid systems for tissue engineering. *Biomimetics*. 2020;5:49.
6. Tsitlanadze G, Machaidze M, Kviria T, Djavakhishvili N, Chu CC, Katsarava R. Biodegradation of amino acid based poly(ester amide)s: In vitro weight loss and preliminary in vivo studies. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*. 2004;15(4):1–24.
7. Cheishvili S, Palavandishvili T, Beridze V, Kalandia A, Katsarava R. Optimization of tomato shelf life using a pseudoprotein-based edible coating. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2026. Accepted for publication.
8. Cheishvili S, Palavandishvili T, Jibladze T, Beridze V, Kalandia A, Katsarava R. Factorial design and mathematical modeling of tomato postharvest storage with a pseudoprotein edible coating. In: *Proceedings of the International Scientific Conference “Smart Solutions in Urban and Rural Resilience”*; 2026 Apr 27–28; Kutaisi, Georgia. 2026.
9. Jibladze T, Palavandishvili T, Li Citra K, Cinquanta L, Katsarava R. Pseudoprotein-based edible coating for enhancing the shelf life of banana fruit. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2024;18(2):80–86.
10. Jibladze T, Palavandishvili T, Katsarava R. Preservation of agricultural products using polymeric biomimetics: Mathematical design of the process. In: *Chemistry – Achievements and Prospects*. Proceedings of the International Scientific Conference Dedicated to the 90th Anniversary of Academician Givi Tsintsadze; 2023. p. 190–198. [in Georgian]
11. Danelia G, Palavandishvili T, Barateli N. *Laboratory Practicum in Eco-Chemical Expertise of Food Products*. Tbilisi, Georgia; 2011. [in Georgian]

პომიდვრის შენახვის დინამიკის შეფასება α -ამინომჟავა L-ლეიცინზე დაფუძნებული ფსევდოპროტეინის (ფპ) 7%-იანი საკვები საფარით სალომე ჭეიშვილი

ანოტაცია

აგროპროდუქტების შენახვის პროცესში ერთ-ერთ მნიშვნელოვან პრობლემას წარმოადგენს ნაყოფის ხარისხობრივი მაჩვენებლების სწრაფი გაუარესება, რაც დაკავშირებულია ტენის დაკარგვასთან, სუნთქვით პროცესებთან და უჯრედული სტრუქტურების დეგრადაციასთან. თანამედროვე კვლევებში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ბიოდეგრადირებად საკვებ საფარებს, რომლებიც ამცირებენ მეტაბოლური პროცესების ინტენსივობას და ახანგრძლივებენ პროდუქტის შენახვის ვადას.

წინამდებარე კვლევის მიზანს წარმოადგენდა პომიდვრის შენახვის დინამიკის შეფასება α -ამინომჟავა L-ლეიცინზე დაფუძნებული ფსევდოპროტეინის (ფპ) 7%-იანი საკვები საფარის გამოყენებით. კვლევა განხორციელდა წინასწარი ოპტიმიზაციის საფუძველზე შერჩეულ პირობებში 16°C ტემპერატურაზე, $70\pm 5\%$ ფარდობითი ტენიანობის პირობებში და 27-დღიანი შენახვის რეჟიმში. შეფასდა წონითი დანაკარგის, საერთო ხსნადი შაქრების ($^{\circ}\text{Brix}$) და ნედლი უჯრედანას დინამიკა.

მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა, რომ ფპ საფარი მნიშვნელოვნად ამცირებს წონით დანაკარგს, ანელებს შაქრების შემცირებას და უზრუნველყოფს ნედლი უჯრედანას შედარებით სტაბილურ შენარჩუნებას კონტროლის ნიმუშებთან შედარებით. დადგენილია, რომ 7%-იანი ფსევდოპროტეინული საფარი ეფექტურად ზღუდავს დეჰიდრატაციულ და მეტაბოლურ პროცესებს, რაც ხელს უწყობს პომიდვრის სასაქონლო და სტრუქტურული ხარისხის შენარჩუნებას.

საკვანძო სიტყვები: პომიდორი, ფსევდოპროტეინი, საკვები საფარი, წონითი დანაკარგი, შაქრები, ნედლი უჯრედანა.

The Science Behind Wine and Food Pairing

Giorgi Patsatsia

Department of Artificial Intelligence, Georgian Technical University Tbilisi, Georgia

Abstract

Wine and food pairing is usually associated with culinary experience, cultural traditions, and sommelier expertise. However, a successful pairing is not determined only by personal preference. It also depends on the interaction between the sensory and physicochemical characteristics of wine and food. Acidity, sweetness, tannins, alcohol level, body, fat content, saltiness, spiciness, texture, and flavor intensity can all influence whether a wine and a dish create a balanced and pleasant tasting experience.

This paper examines the scientific principles behind wine and food pairing, with particular attention to the main characteristics of wine and food and the way they interact. The discussion focuses on common pairing mechanisms such as balance, contrast, complementarity, flavor intensity matching, acidity-fat interaction, sweetness-spiciness balance, and tannin-protein interaction. The paper also considers wine-food pairing as a structured decision-making task that may support the development of AI-based recommendation systems in the wine industry. From an informatics perspective, sensory and physicochemical characteristics can be treated as input features for models that evaluate the compatibility between wines and dishes. The paper contributes a structured synthesis of expert-based pairing principles and a conceptual mapping of these principles to content-based recommendation logic, providing a foundation for future AI-supported wine recommendation research.

Keywords: wine and food pairing, sensory science, artificial intelligence, content-based recommendation, machine learning, sensory attributes

I. Introduction

Wine and food pairing is an important part of gastronomic culture and wine consumption. In restaurants, wine tourism, and everyday dining, the selection of an appropriate wine for a particular dish can strongly influence the overall sensory experience. Traditionally, such decisions have been based on culinary traditions, regional habits, and the practical knowledge of sommeliers and wine experts. However, successful pairing is not entirely subjective. It is also affected by the interaction between the sensory characteristics of wine and food (Harrington, 2007).

From a scientific perspective, wine and food pairing can be understood through the relationship between taste, aroma, texture, and physicochemical properties. Wine characteristics such as acidity, sweetness, tannins, alcohol level, body, and flavor intensity interact with food characteristics such as fat content, saltiness, sweetness, acidity, spiciness, texture, and flavor strength. These interactions may create balance, contrast, or complementarity. For example, acidic wines can reduce the heaviness of fatty dishes, sweet wines may soften the perception of spiciness, and tannic wines often pair well with protein-rich foods (Jackson, 2022).

The scientific study of wine and food pairing is also relevant from an informatics perspective. Recommender systems are widely used to provide users with suitable suggestions based on item characteristics, user preferences, or previous interaction data (Aggarwal, 2016). If wine and food characteristics can be described as structured attributes, they can be used as input features for computational models. This creates a basis for artificial intelligence-based recommendation systems that suggest suitable wine and food combinations. In this context, wine-food pairing is not only a culinary practice but also a decision-making problem that can be supported by data, expert rules, and user feedback (Ricci, Rokach, & Shapira, 2021).

The aim of this paper is to synthesize the existing scientific literature on wine and food pairing and to organize its core sensory and physicochemical principles into a structured overview. While prior work has addressed pairing from culinary (Harrington, 2007), sensory (Lawless & Heymann, 2010), or computational (Trattner & Elswailer, 2017) perspectives individually, this paper bridges these domains by showing how established pairing principles can be interpreted as decision criteria for AI-based recommendation systems. The contribution of this paper is thus twofold: it provides a consolidated reference for researchers entering this interdisciplinary field, and it proposes a conceptual mapping between expert-based sensory rules and content-based recommendation logic, illustrated in Table 1.

II. Methodology

This paper is based on a narrative literature review conducted across three academic databases: Google Scholar, Scopus, and Web of Science. A narrative review approach was selected because the aim of this paper is to synthesize knowledge across multiple disciplines - sensory science, food chemistry, and informatics - rather than to conduct a quantitative analysis of a

homogeneous body of research. No publication date restriction was applied, as the topic draws on foundational works in sensory science and wine evaluation, as well as more recent studies related to computational food pairing and recommendation systems. The search combined keywords related to three thematic areas: sensory and physicochemical properties of wine and food, including “wine food pairing,” “sensory evaluation,” and “tannin protein interaction”; scientific pairing principles, including “acidity fat interaction” and “flavor intensity matching”; and computational approaches, including “food recommendation system,” “content-based filtering,” and “AI wine recommendation.”

Sources were selected according to their relevance to the research topic, publication in peer-reviewed outlets or by established academic publishers, and contribution to the sensory, scientific, or computational understanding of wine and food pairing. The reviewed sources included peer-reviewed journal articles, academic books, and conference papers. Sources were excluded if they were not written in English, lacked a clear empirical or theoretical basis, or were not directly related to the sensory, scientific, or computational dimensions of wine and food pairing.

The final selection comprised 17 sources, which informed the thematic structure of this review. The reviewed literature was organized into three thematic areas corresponding to the main sections of this paper: the sensory characteristics of wine and food, the scientific principles governing their interaction, and the computational approaches that may support AI-based pairing recommendations.

III. Sensory Characteristics of Wine and Food

Wine and food pairing depends on the sensory characteristics of both components. These characteristics determine how wine and food are perceived during consumption and how they influence each other when consumed together. In this context, sensory characteristics include taste, aroma, texture, mouthfeel, body, and flavor intensity. Some of these characteristics are directly perceived by the consumer, while others are related to physicochemical properties that shape sensory perception (Lawless & Heymann, 2010).

Wine Characteristics. Wine contains several sensory and physicochemical characteristics that affect its compatibility with food. One of the most important is acidity, which contributes to freshness and sharpness. Wines with higher acidity are often perceived as more refreshing and can balance rich or fatty dishes. Sweetness is another important attribute, mainly associated with the level of residual sugar in wine. Sweet wines may reduce the perception of spiciness and can also complement desserts or slightly sweet dishes.

Tannins are especially relevant in red wines. They create a sensation of bitterness and astringency and interact strongly with protein-rich and fatty foods. Alcohol level also affects the sensory profile of wine by contributing to warmth, body, and flavor perception. In addition, the body of wine refers to its overall weight and fullness in the mouth, ranging from light-bodied to

full-bodied. Flavor intensity, including aroma strength and persistence, is also important because wines with weak flavor intensity may be dominated by strongly flavored dishes, while very intense wines may overpower delicate foods (Kustos, Heymann, Jeffery, & Goodman, 2020).

Food Characteristics. Food also has sensory characteristics that influence pairing decisions. Fat content is one of the key factors, because fatty foods often require wines with sufficient acidity or tannins to create balance. Saltiness can change the perception of wine by reducing bitterness and making some wines taste smoother. Sweetness in food is important because dishes that are sweeter than the wine may make the wine taste flat, sour, or overly dry.

Acidity in food, such as that found in citrus, vinegar, or fermented ingredients, should be considered carefully because it can strongly affect the perception of wine acidity. Spiciness is another important factor, especially in dishes containing chili or strong spices. Spicy foods may increase the perception of alcohol and bitterness in wine, which is why they are often paired with wines that have moderate alcohol, good acidity, and some residual sweetness. Texture also plays an important role, since creamy, crispy, tender, or oily foods create different mouthfeel effects. Finally, flavor intensity determines how strong the dish tastes overall and should be considered together with the intensity of the wine (Lawless & Heymann, 2010).

Interaction Between Wine and Food Characteristics. Wine and food characteristics should not be evaluated separately. A successful pairing depends on the interaction between them. Some combinations create balance, such as acidic wine with fatty food, while others create contrast, such as sweet wine with spicy food. In other cases, wine and food may be paired through similarity, for example, a full-bodied wine with a heavy dish or an aromatic wine with a strongly flavored meal.

These interactions show that wine and food pairing can be analyzed as a structured process based on identifiable sensory attributes. More generally, food pairing can be studied through systematic relationships between flavor compounds and ingredient combinations, which supports the idea that pairing is not only intuitive but can also be analyzed computationally (Ahn, Ahnert, Bagrow, & Barabási, 2011). For informatics-oriented applications, structured wine and food descriptors may also be represented computationally and used in graph-based or recommendation-oriented pairing models (Simas, Ficek, Diaz-Guilera, & Obrador, 2017; Gawrysiak, 2024).

IV. Scientific Principles of Wine and Food Pairing

Wine and food pairing is based on the interaction of sensory characteristics that may either support or weaken each other during consumption. Although pairing is often associated with personal taste and culinary tradition, several general principles can explain why certain combinations are perceived as more balanced than others (Spence, 2020). These principles

include balance, contrast, complementarity, flavor intensity matching, acidity and fat interaction, sweetness and spiciness balance, and tannin and protein interaction (Galmarini, 2020).

One of the most important principles is balance. In a successful pairing, neither the wine nor the food should dominate the overall sensory experience. For example, a delicate dish is usually better paired with a light-bodied wine, while a rich and heavy dish often requires a fuller-bodied wine. Similarly, the flavor intensity of wine and food should be comparable. If the wine is too light for a strongly flavored dish, it may be overwhelmed. If it is too intense for a delicate dish, it may dominate the food.

Another important principle is contrast. Some pairings work because the wine and food provide different but complementary sensory effects. A common example is the combination of acidic wine with fatty food. Acidity can create freshness and reduce the perception of heaviness in rich dishes. Sweetness can also function as a contrasting element, especially in pairings with spicy food, where a slightly sweet wine may reduce the burning sensation and create a smoother overall impression (Keast & Breslin, 2003).

Complementarity is also central to wine and food pairing. In this case, the wine and food share similar sensory characteristics or reinforce each other. For example, an aromatic wine may pair well with a dish that contains herbs or expressive spices, while a full-bodied red wine may complement a rich meat dish. Tannins are particularly important in this context because they interact with proteins and fats, especially in meat-based dishes. This interaction can reduce the perception of astringency in the wine and create a more balanced mouthfeel (Bajec & Pickering, 2008).

Several expert-based pairing principles have been formulated in the literature to describe these relationships more systematically. Harrington's work is useful in this context because it presents wine and food pairing as a sensory process based on the interaction of wine and food characteristics such as sweetness, acidity, tannins, fatness, body, flavor intensity, and persistence (Harrington, 2007). Table 1 summarizes these principles and shows how they can also be interpreted from the perspective of recommendation systems.

Flavor intensity matching is another important principle in pairing decisions. When the overall flavor strength of a wine and a dish are similar, neither component overshadows the other, resulting in a more harmonious sensory experience. A strongly flavored dish requires a wine with sufficient intensity, while delicate dishes suit wines with more restrained profiles. Flavor persistence is equally relevant, as wines and dishes sharing a similar length of finish tend to create more cohesive pairings (Harrington, 2007; Spence, 2020).

Table 1: Expert-Based Wine and Food Pairing Principles (Harrington, 2007)

Rule No.	Pairing Dimension	Pairing Principle	Interpretation for Recommendation Systems
1	Sweetness balance	The sweetness level of food should be less than or equal to the sweetness level of wine.	Avoid recommending dry wines for dishes with high sweetness.
2	Acidity balance	The acidity level of food should be less than or equal to the acidity level of wine.	Prefer wines with sufficient acidity for acidic dishes.
3	Saltiness and effervescence	Highly salty foods pair better with wines that have high effervescence.	Increase the compatibility score of sparkling wines for salty foods.
4	Bitterness reduction	The negative effect of bitter food may be reduced by wines with moderate to high effervescence.	Treat effervescence as a balancing attribute for bitter foods.
5	Tannin-fat interaction	Wine tannin level should correspond to the fattiness of animal-based foods.	Recommend tannic wines for fatty meat-based dishes.
6	Acidity-fat interaction	Wine acidity should correspond to the fattiness of vegetable-based foods.	Recommend acidic wines for fatty vegetable-based dishes.
7	Body matching	The overall body of wine and food should be similar.	Match light dishes with lighter wines and heavier dishes with fuller-bodied wines.
8	Spiciness matching	Food spiciness and wine spiciness should be balanced.	Consider the spice intensity of both wine and food.
9	Spicy food pairing	Spicy food is often suitable with off-dry, acidic white wines.	Give higher scores to off-dry acidic white wines for spicy dishes.
10	Flavor type matching	Wine and food flavors can be matched through similarity or contrast.	Use either complementary or contrasting flavor profiles.
11	Flavor intensity matching	Wine and food flavor intensity should be similar.	Pair strongly flavored dishes with wines of sufficient flavor intensity.
12	Flavor persistence matching	Wine and food flavor persistence should be similar.	Pair long-lasting food flavors with wines that also have persistent flavor.

The principles summarized in Table 1 show that wine and food pairing can be viewed as a structured evaluation process. Although these rules come from culinary knowledge and sensory observation, they can also be converted into practical decision criteria. This is relevant for informatics-oriented research because wine and food characteristics can be used as features in recommendation models. In this way, expert-based pairing principles provide a useful foundation

for AI-supported wine recommendation systems. It should be noted that the fourth column of Table 1, which interprets each pairing principle from the perspective of recommendation systems, represents a conceptual mapping proposed in this paper based on the original rules described in the wine and food pairing literature (Harrington, 2007). This mapping illustrates how domain knowledge from sensory science can be translated into computational logic applicable in AI-based pairing tools.

V. Wine and Food Pairing as a Structured Decision-Making Problem

Wine and food pairing can be considered a structured decision-making problem because it requires the evaluation of several characteristics at the same time. A suitable pairing is not determined by one attribute alone, but by the combined effect of acidity, sweetness, tannins, body, fat content, saltiness, spiciness, texture, and flavor intensity. Therefore, the selection of a wine for a particular dish can be understood as a process of comparing wine attributes with food attributes and estimating their compatibility.

From an informatics perspective, these characteristics can be represented as input features. For example, a wine may be described by acidity, sweetness, tannin level, alcohol content, body, and flavor intensity, while a dish may be described by fat content, saltiness, sweetness, acidity, spiciness, texture, and flavor strength. This approach is close to content-based recommendation, where suggestions are generated by using item descriptions and user preferences (Pazzani & Billsus, 2007). Such feature-based representation makes it possible to analyze pairing decisions in a more systematic way.

The expert-based principles discussed in the previous section may serve as decision rules for a recommendation system. For instance, if a dish has high fat content, the system may give higher priority to wines with higher acidity or tannins. If a dish is spicy, the system may recommend wines with moderate alcohol, good acidity, and some sweetness. This logic is consistent with knowledge-based recommendation, where domain knowledge and explicit constraints are used to guide recommendation decisions (Burke, 2000).

This approach is also relevant for artificial intelligence-based recommendation systems. In a simple model, expert rules may be used to generate initial recommendations. Later, user ratings and feedback can be collected to improve the quality of suggestions. Such a structure is close to hybrid recommendation, where different recommendation strategies are combined to improve performance and overcome the limitations of a single method (Burke, 2002).

Several machine learning models are relevant to the wine and food pairing recommendation task. Decision tree models offer a natural fit for rule-based pairing logic, as they partition the feature space according to attribute thresholds and produce interpretable outputs that mirror the expert rules summarized in Table 1. Support vector machines (SVMs) can be applied to binary compatibility classification tasks, where a pairing is labelled as suitable or unsuitable based on wine and food feature vectors (Ahn, Ahnert, Bagrow, & Barabási, 2011). Neural network models

offer greater flexibility by learning non-linear relationships between attributes, but require larger datasets and produce less interpretable outputs. Graph-based models represent another promising direction, where wines, dishes, and shared flavor compounds are represented as nodes and edges in a network, allowing compatibility to be estimated through structural proximity (Gawrysiak, 2024; Simas, Ficek, Diaz-Guilera, & Obrador, 2017). Each approach has different strengths depending on data availability, interpretability requirements, and task complexity.

Overall, the structured nature of wine and food pairing makes it a well-suited domain for AI-based recommendation research. The availability of sensory descriptors, the existence of expert-based pairing rules, and the potential for user feedback collection create a foundation for developing recommendation systems that are both scientifically grounded and practically useful.

VI. Discussion

The analysis presented in this paper shows that wine and food pairing can be understood as more than a matter of personal taste or culinary tradition. Although individual preference remains important, many pairing decisions are influenced by recognizable sensory and physicochemical relationships. Acidity, sweetness, tannins, body, fat content, saltiness, spiciness, texture, and flavor intensity all contribute to the way wine and food are perceived together.

The expert-based principles discussed in the previous section demonstrate that pairing knowledge can be organized into structured rules. These rules explain why certain combinations are commonly recommended, such as acidic wines with fatty dishes, sweet wines with spicy foods, or tannic wines with protein-rich meals. Such principles do not eliminate subjectivity, but they provide a practical basis for making pairing decisions more consistent and explainable.

From an informatics perspective, this structured approach is especially useful. If wine and food characteristics are represented as attributes, they can be used in recommendation systems to estimate compatibility between wines and dishes. A rule-based model may apply expert knowledge directly, while a more advanced AI-based model may combine these rules with user ratings and feedback. This creates the possibility of developing recommendation systems that are both explainable and adaptable to individual preferences.

At the same time, wine and food pairing remains a complex problem. Sensory perception can vary between individuals, cultures, and contexts. The same pairing may be evaluated differently depending on personal taste, previous experience, serving temperature, cooking method, portion composition, and regional food habits. Therefore, AI-supported pairing systems should not be viewed as replacing human expertise, but rather as tools that can support decision-making and improve the accessibility of wine knowledge.

Overall, the scientific and computational interpretation of wine and food pairing can be useful for the wine industry. It may support restaurants, wineries, wine tourism platforms, online wine shops, and digital recommendation services. For research in informatics, wine and food pairing provides a relevant example of how sensory knowledge, expert rules, and user feedback can be combined in intelligent decision-support systems.

VII. Conclusion

This paper examined the scientific principles behind wine and food pairing and showed that pairing decisions can be explained through the interaction of sensory and physicochemical characteristics. Although wine and food pairing is often associated with tradition, personal preference, and sommelier experience, many pairing patterns are based on identifiable relationships between wine and food attributes. Acidity, sweetness, tannins, body, fat content, saltiness, spiciness, texture, and flavor intensity all contribute to the overall compatibility of a wine and a dish.

The discussion showed that successful pairings are commonly based on principles such as balance, contrast, complementarity, flavor intensity matching, acidity and fat interaction, sweetness and spiciness balance, and tannin and protein interaction. These principles make it possible to interpret wine and food pairing as a structured evaluation process rather than as a purely subjective practice.

From an informatics perspective, the same principles can support the development of AI-based recommendation systems in the wine industry. Wine and food characteristics can be represented as input features, while expert-based pairing principles can be used as decision rules. In more advanced systems, these rules may be combined with user ratings and feedback to improve recommendation quality over time. Therefore, wine and food pairing represents a useful example of how sensory science, expert knowledge, and artificial intelligence can be integrated in practical decision-support applications.

Future research may focus on creating datasets of wine and food attributes, testing compatibility models with real users, and developing personalized recommendation systems that consider both sensory principles and individual preferences.

References

- Aggarwal, C. (2016). *Recommender systems*. Springer International Publishing.
- Ahn, Y. Y., Ahnert, S. E., Bagrow, J. P., & Barabási, A. L. (2011). *Flavor network and the principles of food pairing*. Scientific reports.
- Bajec, M., & Pickering, G. (2008). Astringency: mechanisms and perception. *Critical reviews in food science and nutrition*, 48(9), 858-875.
- Burke, R. (2000). Knowledge-based recommender systems. *Encyclopedia of library and information systems*, 69(Supplement 32), 175-186.
- Burke, R. (2002). Hybrid recommender systems. *User modeling and user-adapted interaction*, 12(4), 331-370.

- Galmarini, M. V. (2020). The role of sensory science in the evaluation of food pairing. . *Current Opinion in Food Science*, 33, , 149-155.
- Gawrysiak, Z. Ż. (2024). WineGraph: A Graph Representation for Food-Wine Pairing. *Springer Nature Switzerland*, 24-31.
- Harrington, R. J. (2007). *Food and wine pairing: A sensory experience*. John Wiley & Sons.
- Jackson, R. (2022). *Wine tasting: a professional handbook*. Elsevier.
- Keast, R., & Breslin, P. (2003). An overview of binary taste–taste interactions. *Food quality and preference*, 14(2),, 111-124.
- Kustos, M., Heymann, H., Jeffery, D. W., & Goodman, S. (2020). Intertwined: What makes food and wine pairings appropriate? *Food Research International*, 136, 109463.
- Lawless, H., & Heymann, H. (2010). *Sensory evaluation of food: principles and practices*. Springer Science & Business Media.
- Pazzani, M., & Billsus, D. (2007). Content-based recommendation systems. In *The adaptive web: methods and strategies of web personalization*, 325-341.
- Ricci, F., Rokach, L., & Shapira, B. (2021). Recommender systems: Techniques, applications, and challenges. In *Recommender systems handbook*, 1-35.
- Simas, T., Ficek, M., Diaz-Guilera, A., & Obrador, P. (2017). Food-bridging: a new network construction to unveil the principles of cooking. *Frontiers in ICT*, 4, 14.
- Spence, C. (2020). Wine psychology: basic & applied. . *Cognitive research: principles and implications*, 5(1), 22.
- Trattner, C., & Elswailer, D. (2017). Food recommender systems: important contributions, challenges and future research directions. *arXiv preprint arXiv:1711.02760*.

საქართველოს საპენსიო რეფორმის მმართველობითი გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები

ეკა გეგეშიძე¹; რუსუდან რუხაძე²

¹საქართველოს უნივერსიტეტი, +995599152580; e.gegeshidze@ug.edu.ge; ORCID: 0000-0003-0592-079X;

²საქართველოს უნივერსიტეტი, +995 577 775505; rus.rukhadze@ug.edu.ge; ORCID: 0009-0004-0938-4562

ანოტაცია

სტატია აანალიზებს საქართველოს საპენსიო პოლიტიკის რეფორმას მმართველობითი პერსპექტივიდან და აფასებს, რამდენად ქმნის მრავალსვეტიანი მოდელი ადეკვატური, ფისკალურად მდგრადი და ინსტიტუციურად სანდო საპენსიო უზრუნველყოფის წინაპირობებს. კვლევა ეფუძნება სამაგისტრო ნაშრომში თავმოყრილ დოკუმენტურ მასალას, ნორმატიული აქტების შინაარსობრივ ანალიზს, ოთხი ქვეყნის – სომხეთის, შვედეთის, ყაზახეთისა და ჩილეს – შედარებით განხილვას და ხუთ სიღრმისეულ ინტერვიუს, რომლებიც ჩატარდა საპენსიო სააგენტოს, ეკონომიკისა და მდგრადი განვითარების სამინისტროსა და სადაზღვევო სექტორის წარმომადგენლებთან. კვლევის ძირითადი კითხვა ეხება იმას, რა მმართველობითი გამოწვევები გამოვლინდა საპენსიო რეფორმის განხორციელებისას და რომელი ინსტიტუციური პირობებია აუცილებელი რეფორმის შემდეგი ეტაპისათვის.

სტატიის შედეგები აჩვენებს, რომ პირველი სვეტი კვლავ აუცილებელია სიღარიბის პრევენციისა და სოციალური მინიმუმის უზრუნველსაყოფად, თუმცა მისი გრძელვადიანი მდგრადობა დამოკიდებულია ინდექსაციის წესის თანმიმდევრულ გამოყენებაზე და საბიუჯეტო წნეხის კონტროლზე. მეორე სვეტის შემთხვევაში მთავარ გამოწვევებს წარმოადგენდა ინსტიტუციური სტრუქტურის მოქნილობა, საინვესტიციო ინფრასტრუქტურის ჩამოყალიბება, აქტივების მართვის კვალიფიციური რესურსის დეფიციტი, განუვითარებელი კაპიტალის ბაზარი, საინვესტიციო ინსტრუმენტების შეზღუდული არჩევანი და მოსახლეობის ნდობა. 2024 წლის საკანონმდებლო ცვლილებებმა, რომლებმაც ორსაბჭოიანი მოდელი ერთიანი მმართველობითი საბჭოთი შეცვალა, ნაწილობრივ უპასუხა კვლევაში იდენტიფიცირებულ პრობლემას, თუმცა ახალმა მოდელმა გააჩინა პოლიტიკური გავლენისგან დაცულობისა და ფიდუციური დამოუკიდებლობის დამატებითი მოთხოვნები. მესამე სვეტის ამოქმედება კი ქმნის

შესაძლებლობას კერძო დანაზოგების, კონკურენციისა და დამსაქმებლის ბენეფიტების განვითარებისთვის, მაგრამ მისი ეფექტიანობა დამოკიდებული იქნება საგადასახადო სტიმულებზე, ზედამხედველობის ხარისხზე და მოქალაქეთა ფინანსურ განათლებაზე. დასკვნის სახით ნაშრომი ამტკიცებს, რომ რეფორმის წარმატება არ უნდა შეფასდეს მხოლოდ დაგროვებული აქტივების მოცულობით; გადამწყვეტია მმართველობის გამჭვირვალობა, რისკების მართვის ხარისხი და სამივე სვეტის თანმიმდევრული კოორდინაცია.

საკვანძო სიტყვები: საპენსიო რეფორმა; დაგროვებითი პენსია; მმართველობა; ფისკალური მდგრადობა; ნებაყოფლობითი კერძო პენსია; კაპიტალის ბაზარი.

შესავალი

საქართველოს საპენსიო რეფორმა ერთ-ერთი იმ საჯარო პოლიტიკის მიმართულებაა, რომელიც ერთდროულად უკავშირდება სოციალურ სამართლიანობას, ფისკალურ მდგრადობას, შრომის ბაზრის ფორმალიზაციას, ფინანსური სექტორის განვითარებასა და მოქალაქეთა ნდობას სახელმწიფო ინსტიტუტების მიმართ. 2018 წლამდე საქართველოს საპენსიო სისტემა ძირითადად ეყრდნობოდა უნივერსალურ, სოლიდარობის პრინციპზე დაფუძნებულ სახელმწიფო პენსიას, რომელიც მნიშვნელოვანი ინსტრუმენტი იყო ხანდაზმულთა სიღარიბის შესამცირებლად, თუმცა ვერ ქმნიდა საკმარის კავშირს დასაქმების პერიოდში მიღებულ შემოსავალსა და საპენსიო ასაკში მისაღებ შემოსავალს შორის. სწორედ ამ ვითარებამ გააჩინა მრავალსვეტიანი მოდელის საჭიროება, რომელშიც პირველ სვეტს უნდა შეენარჩუნებინა სოციალური დაცვის ფუნქცია, მეორე სვეტს – ინდივიდუალური დაგროვებისა და გრძელვადიანი ინვესტირების ფუნქცია, ხოლო მესამე სვეტს – ნებაყოფლობითი კერძო დაზოგვისა და კონკურენტული საპენსიო პროდუქტების განვითარების ფუნქცია.

რეფორმის საწყის ეტაპზე პოლიტიკის მიზნები დაკავშირებული იყო ჩანაცვლების კოეფიციენტის ზრდასთან, საპენსიო შემოსავლების წყაროების დივერსიფიკაციასთან, სახელმწიფო ბიუჯეტზე მომავალი წნეხის შემცირებასთან და კაპიტალის ბაზრისთვის გრძელვადიანი ლარის რესურსის შექმნასთან. თუმცა საპენსიო პოლიტიკა მხოლოდ ეკონომიკური ან აქტუარული საკითხი არ არის. მისი შედეგიანობა დიდწილად დამოკიდებულია იმაზე, როგორ არის მოწყობილი მართვის სისტემა, რამდენად დაცულია მონაწილეთა აქტივები, რამდენად გამჭვირვალეა საინვესტიციო მანდატი და რამდენად ენდობა მოსახლეობა ინსტიტუციას, რომელიც მის სახელზე შექმნილ დანაზოგს მართავს.

ამ სტატიაში საპენსიო რეფორმა განიხილება არა მხოლოდ როგორც სოციალური დაცვის მოდელი, არამედ როგორც ინსტიტუციური მმართველობის პროექტი. სტატიის მიზანია,

გამოავლინოს საქართველოს საპენსიო პოლიტიკის ძირითადი მმართველობითი გამოწვევები, შეაფასოს რეფორმის განხორციელების პროცესში მიღწეული შედეგები და ჩამოაყალიბოს რეკომენდაციები იმ პირობების შესახებ, რომლებიც აუცილებელია სამსვეტიანი სისტემის მდგრადი ფუნქციონირებისთვის. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა იმ ფაქტს, რომ თავდაპირველი კვლევა განხორციელდა იმ პერიოდში, როდესაც მესამე სვეტი ჯერ კიდევ კანონპროექტის დონეზე განიხილებოდა, ხოლო 2024 წელს განხორციელებულმა ცვლილებებმა უკვე შეცვალა მეორე სვეტის მმართველობითი არქიტექტურა. ამიტომ სტატია აერთიანებს ორ განხილვას: რეფორმის საწყისი განხორციელების ემპირიულ შეფასებას და შემდგომი საკანონმდებლო განვითარებების ანალიტიკურ ინტერპრეტაციას.

თეორიული და ინსტიტუციური ჩარჩო

თანამედროვე საპენსიო სისტემების ანალიზში მრავალსვეტიანი მოდელი განიხილება როგორც რისკების განაწილებისა და საპენსიო შემოსავლების დივერსიფიკაციის მექანიზმი (Holzmann & Hinz, 2005; OECD, 2021). მხოლოდ სოლიდარობის პრინციპზე დაფუძნებული სისტემა ძლიერია სიღარიბის პრევენციის თვალსაზრისით, მაგრამ დემოგრაფიული დაბერებისა და სამუშაო ძალის შემცირების პირობებში იგი ზრდის ბიუჯეტურ ვალდებულებებს. მხოლოდ კერძო დაგროვებით სისტემაზე გადატანა კი ზრდის ინდივიდუალურ საინვესტიციო რისკს და შეიძლება გაამწვავოს უთანაბრობა მათ შორის, ვისაც სტაბილური შემოსავალი აქვს, და მათ შორის, ვინც შრომის ბაზარზე ფრაგმენტულად მონაწილეობს. ამიტომ მრავალსვეტიანი მიდგომის არსი სწორედ ბალანსის პოვნაში მდგომარეობს: პირველი სვეტი უზრუნველყოფს მინიმალურ გარანტიას, მეორე სვეტი – შრომით შემოსავალთან დაკავშირებულ დანაზოგს, ხოლო მესამე სვეტი – დამატებით, ნებაყოფლობით და უფრო მოქნილ დანაზოგს.

საქართველოს შემთხვევაში პირველი სვეტი უნივერსალური სახელმწიფო პენსიის სახით რჩება სოციალური დაცვის ცენტრალურ ელემენტად. „სახელმწიფო პენსიის შესახებ“ კანონში ინდექსაციის წესის ასახვამ მიზნად დაისახა პენსიის რეალური ღირებულების დაცვა (საქართველოს კანონი „სახელმწიფო პენსიის შესახებ“, 2005/2020) და პოლიტიკურად მოტივირებული, ფისკალურად არამდგრადი გადაწყვეტილებების რისკის შემცირება. 70 წლამდე ასაკის პენსიონერებისთვის პენსია იზრდება ბოლო 12 თვის ინფლაციის საშუალო მაჩვენებლით, ხოლო 70 წლისა და მეტი ასაკის პირთათვის – ინფლაციისა და ეკონომიკური ზრდის კომპონენტის კომბინაციით. ამგვარი წესი, ერთის მხრივ, იცავს პენსიონერებს ფასების ზრდისგან, მაგრამ, მეორეს მხრივ, მოითხოვს მუდმივ ფისკალურ მონიტორინგს, რადგან ხარჯის ზრდამ არ უნდა შეამციროს სხვა სოციალური და განვითარების პროგრამების შესაძლებლობები.

მეორე სვეტი – დაგროვებითი პენსია – საქართველოში განსაზღვრული შენატანის პრინციპზეა დაფუძნებული (საქართველოს კანონი „დაგროვებითი პენსიის შესახებ“, 2018/2024). მისი ძირითადი ლოგიკა მოიცავს დასაქმებულის, დამსაქმებლისა და სახელმწიფოს თანადაფინანსებას. ეს მოდელი ქმნის ინდივიდუალურ ანგარიშებს, სადაც საპენსიო აქტივები უნდა იმართებოდეს მონაწილეთა საუკეთესო ინტერესების შესაბამისად. ამასთან, დაგროვებითი პენსიის კანონი პირდაპირ აყალიბებს მონაწილეთა აქტივების მართვის ფიდუციურ პრინციპს. შესაბამისად, მთავარი საკითხი ხდება არა მხოლოდ რამდენი თანხა გროვდება, არამედ როგორია ამ თანხის მართვის წესები, რისკის კონტროლი, ანგარიშვალდებულება და მოქალაქეთა ინფორმირებულობა.

მესამე სვეტი – ნებაყოფლობითი კერძო პენსია – საქართველოსთვის განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან იგი ქმნის შესაძლებლობას, მოქალაქემ და დამსაქმებელმა დაგროვების სავალდებულო მინიმუმს დაამატონ დამატებითი, მოქნილი და კონკურენტული დანაზოგი. 2023 წელს მიღებული კანონი მიზნად ისახავს ნებაყოფლობითი კერძო საპენსიო ბაზრის განვითარებას (საქართველოს კანონი „ნებაყოფლობითი კერძო პენსიის შესახებ“, 2023), კონკურენციის უზრუნველყოფას, ფინანსურ მდგრადობას, გრძელვადიანი ინვესტიციების წახალისებას და მონაწილეთა ინტერესების დაცვას. თუმცა ამ სვეტის წარმატება დამოკიდებულია იმაზე, რამდენად შეძლებს ბაზარი მოსახლეობისთვის გასაგები, სანდო და ეკონომიკურად მიმზიდველი პროდუქტების შეთავაზებას.

კვლევის მეთოდოლოგია

სტატია ეფუძნება თვისებრივ-ანალიტიკურ დიზაინს. საწყისი კვლევის ფარგლებში გამოყენებული იყო აღწერილობითი, შედარებითი და თვისებრივი მეთოდები. აღწერილობითი კომპონენტი მოიცავდა საქართველოს საპენსიო სისტემის სამართლებრივი, ადმინისტრაციული და ფინანსური არქიტექტურის აღწერას. შედარებითი კომპონენტი ეყრდნობოდა სომხეთის, შვედეთის, ყაზახეთისა და ჩილეს საპენსიო მოდელების ანალიზს, რათა საქართველოს რეფორმის თავისებურებები შეფასებულიყო საერთაშორისო გამოცდილების ფონზე. თვისებრივი კომპონენტი კი მოიცავდა სიღრმისეულ ინტერვიუებს პოლიტიკის განხორციელებაში ჩართულ პირებთან და კერძო სექტორის წარმომადგენლებთან.

სულ ჩატარდა ხუთი ინტერვიუ: ორი – საპენსიო სააგენტოს ხელმძღვანელ პირებთან, ერთი – ეკონომიკისა და მდგრადი განვითარების სამინისტროს წარმომადგენელთან, ხოლო ორი – სადაზღვევო კომპანიების წარმომადგენლებთან. რესპონდენტები შეირჩნენ მიზნობრივი შერჩევის პრინციპით, მათი ინსტიტუციური როლისა და საპენსიო რეფორმასთან უშუალო კავშირის გათვალისწინებით. ინტერვიუები დაფუძნებული იყო ღია კითხვებისგან შემდგარ სადისკუსიო გეგმაზე, რაც რესპონდენტებს აძლევდა საშუალებას, დეტალურად აეხსნათ როგორც მიღწევები, ისე პროცესში წარმოშობილი

პრობლემები. თვისებრივი მონაცემების მიზანი არ იყო სტატისტიკური განზოგადება; მათი ღირებულება მდგომარეობდა იმაში, რომ შესაძლებელი გახდა რეფორმის შიდა მმართველობითი დინამიკის, საკადრო და ინფრასტრუქტურული სირთულეების, კომუნიკაციის პრობლემებისა და კერძო სექტორის მოლოდინების სიღრმისეული ინტერპრეტაცია.

სტატიის მომზადებისას გამოყენებულია აგრეთვე 2023–2025 წლებში მიღებული საკანონმდებლო და ნორმატიული ცვლილებების ანალიზი, რადგან ამ ცვლილებებმა არსებითად შეცვალა კვლევაში იდენტიფიცირებული ზოგიერთი გამოწვევის კონტექსტი. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია 2024 წლის ცვლილებები, რომელთა შედეგად საპენსიო სააგენტოს სახელწოდება შეიცვალა საქართველოს საპენსიო ფონდით, ხოლო ორსაბჭოიანი მმართველობითი სტრუქტურა ჩანაცვლდა ერთიანი მმართველობითი საბჭოთი. ამგვარად, სტატია არა მხოლოდ თავდაპირველი კვლევის შედეგების შეკუმშული ვერსიაა, არამედ რეფორმის შემდგომი განვითარების ინტერპრეტაცია.

საქართველოს საპენსიო სისტემის სამსვეტიანი მოდელი

საქართველოს საპენსიო სისტემის სამსვეტიანი სტრუქტურა შეიძლება განვიხილოთ როგორც გარდამავალი ეკონომიკისთვის დამახასიათებელი ჰიბრიდული მოდელი.

იგი ცდილობს შეინარჩუნოს უნივერსალური პენსიის სოციალური ფუნქცია, მაგრამ თანდათან შექმნას ინდივიდუალური დაგროვების კულტურა და კერძო საპენსიო ბაზარი. პირველი სვეტი ფარავს ყველა საპენსიო ასაკის მოქალაქეს და ამით უზრუნველყოფს მინიმალურ სოციალურ გარანტიას. მისი მთავარი უპირატესობა არის უნივერსალურობა, ხოლო მთავარი სისუსტე – დაბალი ჩანაცვლების კოეფიციენტი და ბიუჯეტზე მაღალი დამოკიდებულება. სწორედ ამიტომ პირველი სვეტის გაუქმება ან სწრაფი შემცირება შეიძლება სოციალური თვალსაზრისით რისკიანი იყოს, განსაკუთრებით იმ მოქალაქეებისთვის, ვისაც არ ჰქონია სტაბილური სამუშაო ისტორია ან რომელთა შემოსავალი დაბალი იყო.

მეორე სვეტი 2019 წლიდან ამოქმედდა და ყველაზე მასშტაბური ინსტიტუციური სიახლე აღმოჩნდა საქართველოს სოციალური პოლიტიკის სფეროში. მონაწილეთა ინდივიდუალური ანგარიშები, ელექტრონული ადმინისტრირება, დამსაქმებლის ვალდებულებები, სახელმწიფოს თანადაფინანსება და საინვესტიციო მანდატი ქმნის კომპლექსურ სისტემას, რომლის შედეგები სრული მასშტაბით მხოლოდ მაშინ გამოჩნდება, როდესაც მონაწილეთა დიდი ნაწილი საპენსიო ასაკს მიაღწევს. მიუხედავად ამისა, უკვე საწყის წლებში გამოიკვეთა მნიშვნელოვანი სარგებელი: გრძელვადიანი ლარის რესურსის დაგროვება, საინვესტიციო ინფრასტრუქტურის

ჩამოყალიბება, მონაწილეთა ანგარიშებზე ინფორმაციის ხელმისაწვდომობის ზრდა და კაპიტალის ბაზარზე ახალი მსხვილი ინსტიტუციური ინვესტორის გამოჩენა.

მესამე სვეტი რეფორმის თავდაპირველ ხედვაში აუცილებელ კომპონენტად იყო გათვალისწინებული, მაგრამ მისი ამოქმედება ყველაზე გვიან განხორციელდა. ნებაყოფლობითი კერძო პენსიის კანონით ბაზარზე მონაწილეობის შესაძლებლობა მიეცათ აქტივების მმართველ კომპანიებს, მზღვეველებსა და საპენსიო კომპანიებს. ამ სვეტს შეუძლია შეასრულოს ორი ფუნქცია: ერთი მხრივ, გაზარდოს საპენსიო ასაკში მისაღები შემოსავალი იმ პირებისთვის, ვისაც დამატებითი დაზოგვის შესაძლებლობა აქვს; მეორე მხრივ, შექმნას დამსაქმებლის ბენეფიტების ახალი კულტურა, სადაც სამუშაო პირობების კონკურენტუნარიანობა მხოლოდ ხელფასით კი არა, გრძელვადიანი სოციალური პაკეტითაც განისაზღვრება. თუმცა არსებობს რისკიც: თუ მესამე სვეტი მხოლოდ მაღალი შემოსავლის მქონე ჯგუფებისთვის იქნება ხელმისაწვდომი, იგი უთანაბრობის შემცირების ნაცვლად უთანაბრობის ზრდას შეუწყობს ხელს. ამიტომ საჭიროა პროდუქტის დიზაინის, საგადასახადო შეღავათებისა და ფინანსური განათლების კოორდინირებული პოლიტიკა.

მმართველობითი გამოწვევები და განხორციელების ეტაპები

კვლევამ გამოავლინა ოთხი ძირითადი მმართველობითი გამოწვევა: 1. ინსტიტუციური არქიტექტურის მოქნილობა, 2. საინვესტიციო შესაძლებლობებისა და რისკების ბალანსი, 3. მოსახლეობის ნდობა და 4. მესამე სვეტში კერძო სექტორის ჩართულობის სტიმულირება. ეს გამოწვევები ერთმანეთთან მჭიდროდ არის დაკავშირებული. მაგალითად, მმართველობის სირთულე ამცირებს გადაწყვეტილებების მიღების სისწრაფეს; საინვესტიციო მანდატის სივიწროვე ამცირებს დივერსიფიკაციის შესაძლებლობას; კაპიტალის ბაზრის სისუსტე ზრდის კონცენტრაციის რისკს; ხოლო დაბალი ნდობა ამცირებს ნებაყოფლობითი ჩართულობის ალბათობას.

საწყის ეტაპზე საპენსიო სააგენტო ორსაბჭოიანი მმართველობითი მოდელით ფუნქციონირებდა: სამეთვალყურეო საბჭო პასუხისმგებელი იყო ადმინისტრაციულ და საოპერაციო საკითხებზე, ხოლო საინვესტიციო საბჭო – საინვესტიციო პოლიტიკაზე. ინტერვიუებში აღნიშნული მოდელი შეფასდა როგორც ქართულ რეალობაში ახალი და გარკვეულწილად მოუქნელი. რესპონდენტების აზრით, გადაწყვეტილებების მიღება ხშირად მოითხოვდა სხვადასხვა რგოლის კოორდინაციას, რაც ზრდიდა პროცესის სირთულეს. 2024 წლის ცვლილებებმა ეს პრობლემა ფორმალურად გადაჭრა ერთიანი მმართველობითი საბჭოს შექმნით (საქართველოს მთავრობის დადგენილება №396, 2024). თუმცა ახალი მოდელის შეფასებისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ არა მხოლოდ მართვის გამარტივება, არამედ დანიშვნის წესის, დამოუკიდებლობის, ფიდუციური ანგარიშვალდებულებისა და პოლიტიკური ნეიტრალიტეტის საკითხებიც. მმართველობითი რეფორმა წარმატებულად ჩაითვლება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ

იგი გააძლიერებს პროფესიულ გადაწყვეტილებებს და არა მხოლოდ შეამცირებს სტრუქტურულ რგოლებს.

საინვესტიციო ინფრასტრუქტურის შექმნა კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი გამოწვევა იყო. საქართველოში აქტივების მართვის ინდუსტრია შედარებით ახალი და მცირე მასშტაბისაა. შესაბამისად, საპენსიო სააგენტოს მოუწია არა მხოლოდ გუნდის დაკომპლექტება, არამედ იმ სერვისების, კონტრაქტების, კონტრაგენტების, დეპოზიტარისა და ბროკერული არხების შექმნა, რომლებიც განვითარებულ ფინანსურ სისტემებში უკვე სტანდარტულად არსებობს. ინტერვიუებში განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო ადამიანური რესურსის დეფიციტს, რადგან საბანკო სექტორის გამოცდილება სრულად ვერ ჩანაცვლებს საინვესტიციო პორტფელის მართვის კომპეტენციებს. ეს გარემოება აჩვენებს, რომ საპენსიო რეფორმა პარალელურად მოითხოვს ფინანსური პროფესიის განვითარებასაც.

მოსახლეობის ნდობა საპენსიო რეფორმის ერთ-ერთ ყველაზე რთულად სამართავ კომპონენტად რჩება. საქართველოში წარსულში დანაშოგების დაკარგვის გამოცდილება, ფინანსური განათლების დაბალი დონე და სახელმწიფო ინსტიტუტებისადმი სკეპტიკური დამოკიდებულება ქმნის ისეთ გარემოს, სადაც სავალდებულო დაგროვება მოქალაქეთა ნაწილის მიერ თავისუფლების შეზღუდვად იქნა აღქმული. ამიტომ ადმინისტრირების ტექნიკური გამართულობა საკმარისი არ არის. აუცილებელია მუდმივი კომუნიკაცია, ინდივიდუალური ანგარიშების გამჭვირვალობა, მარტივად გასაგები ინფორმაცია საინვესტიციო პორტფელების შესახებ და მექანიზმები, რომლებიც მონაწილეებს საკუთარ დანაშოგზე კონტროლის განცდას მისცემს. ბანკის აპლიკაციებში დაგროვილი თანხის ჩვენება, იუსტიციის სახლის ფილიალებში მომსახურების ხელმისაწვდომობა და რისკის პორტფელების არჩევანის უფლება ამ მიმართულებით დადებითი ნაბიჯებია, თუმცა ისინი უნდა გაგრძელდეს სისტემური ფინანსური განათლების პროგრამებით.

მესამე სვეტის შემთხვევაში გამოწვევა უფრო მეტად ბაზრის შექმნას უკავშირდება. სადაზღვევო კომპანიებისა და აქტივების მმართველი კომპანიების წარმომადგენლები ხაზს უსვამენ, რომ ნებაყოფლობითი საპენსიო პროდუქტის გაყიდვა რთული იქნება, თუ მოქალაქეებს არ ექნებათ საგადასახადო სტიმული, ფინანსური მოტივაცია და ნდობა. მეორე სვეტი ავტომატურად აგროვებს რესურსს სავალდებულო მონაწილეობის გამო, მაშინ როდესაც მესამე სვეტს მოუწევს მოქალაქეების დარწმუნება, რომ დამატებითი დაზოგვა მათთვის რეალურ სარგებელს ქმნის. სახელმწიფოს როლი ამ შემთხვევაში არ უნდა შემოიფარგლოს მხოლოდ სამართლებრივი ჩარჩოს შექმნით; საჭიროა ისეთი სტიმულები, რომლებიც კერძო სექტორს მისცემს ინოვაციური და დაბალღირებულებიანი პროდუქტების შექმნის მოტივაციას, ხოლო მოქალაქეებს – მონაწილეობის ეკონომიკურ საფუძველს.

ცხრილი 1. რეფორმის ძირითადი მმართველობითი გამოწვევები

გამოწვევა	კვლევაში გამოვლენილი საფუძველი	პოლიტიკის პასუხი	დარჩენილი რისკი
ფისკალური მდგრადობა	დემოგრაფიული დაბერება და სახელმწიფო პენსიის ხარჯის ზრდა	ინდექსაციის წესის შემოღება და ხარჯების მონიტორინგის საჭიროება	სოციალური მინიმუმის შესუსტების რისკი, თუ პირველი სვეტი ნაჩქარევად შემცირდება
მმართველობითი სტრუქტურა	ორსაბჭოიანი სისტემა შეფასდა როგორც რთული და შედარებით მოუქნელი	2024 წლის ცვლილებებით შეიქმნა ერთიანი მმართველობითი საბჭო	დანიშვნის გამჭვირვალობა და პოლიტიკური გავლენისგან დაცულობა
საინვესტიციო ინფრასტრუქტურა	აქტივების მართვის გამოცდილებისა და ადგილობრივი ბაზრის სიღრმის ნაკლებობა	დეპოზიტარის, ბროკერებისა და რისკების მართვის სისტემის ჩამოყალიბება	დივერსიფიკაციის შეზღუდვები და ადგილობრივი ინსტრუმენტების სიმცირე
მოსახლეობის ნდობა	სავალდებულო ჩართულობა ნაწილობრივ აღიქმებოდა როგორც თავისუფლების შეზღუდვა	ელექტრონული ანგარიშები, სერვისების გაფართოება, პორტფელის არჩევა	ფინანსური განათლებისა და მუდმივი კომუნიკაციის საჭიროება
მესამე სვეტი	კერძო სექტორის ინტერესი დამოკიდებულია სტიმულებზე და მოთხოვნაზე	ნებაყოფლობითი კერძო პენსიის კანონის მიღება	დაბალი ჩართულობა, მაღალი საკომისიოები და პროდუქტის გაუმჭვირვალობა

საერთაშორისო შედარებითი კონტექსტი

საერთაშორისო გამოცდილება აჩვენებს, რომ საპენსიო რეფორმის ტექნიკური დიზაინი არასაკმარისია, თუ მას არ ახლავს ძლიერი ინსტიტუციური ზედამხედველობა და საზოგადოებრივი ლეგიტიმაცია. ჩილეს მაგალითი ხშირად განიხილება როგორც სავალდებულო კერძო დაგროვებითი სისტემის ისტორიული პრეცედენტი. მან ხელი შეუწყო დანაზოგებისა და კაპიტალის ბაზრის ზრდას, თუმცა მოგვიანებით გამოავლინა მნიშვნელოვანი სოციალური რისკები: დაბალი პენსიები, უთანაბრობა და მოსახლეობის უკმაყოფილება. ამ მაგალითიდან საქართველოსთვის მთავარი გაკვეთილია, რომ მხოლოდ მეორე სვეტის გაძლიერება ვერ უზრუნველყოფს ადეკვატურობას; აუცილებელია მინიმალური გარანტიის შენარჩუნება და სუსტ ჯგუფებზე მორგებული პოლიტიკა.

სომხეთის გამოცდილება უფრო ახლოს დგას რეგიონის ინსტიტუციურ რეალობასთან. იქ დაგროვებითი საპენსიო რეფორმა ეტაპობრივად და წინააღმდეგობებით განხორციელდა, მნიშვნელოვანი როლი კი გარე აქტივების მმართველებმა და ცენტრალურმა ბანკმა შეასრულეს. საქართველოსთვის ეს გამოცდილება საინტერესოა იმიტომ, რომ აჩვენებს მმართველობის უფრო დისტანცირებულ, რეგულატორზე ორიენტირებულ მოდელს, რომელიც პოლიტიკურ ასოცირებას ნაწილობრივ ამცირებს. ამავე დროს, ასეთი მოდელის ეფექტიანობა დამოკიდებულია ზედამხედველობის ინსტიტუციურ ხარისხზე, აქტივების მმართველების შერჩევის გამჭვირვალობაზე და ბაზარზე რეალური კონკურენციის არსებობაზე.

შვედეთის მოდელი საქართველოსთვის განსაკუთრებით სასწავლოა მრავალსვეტიანი ბალანსის თვალსაზრისით. შვედეთში საჯარო პენსია, პროფესიული პენსიები და ინდივიდუალური დანაზოგები ერთმანეთის შემავსებელ ფუნქციებს ასრულებს. მონაწილეებს აქვთ ფონდის მენეჯერების არჩევის შესაძლებლობა, თუმცა სისტემაში არსებობს ნაგულისხმევი სახელმწიფო ალტერნატივაც იმ პირებისთვის, ვისაც აქტიური საინვესტიციო არჩევანის გაკეთება არ სურს. საქართველოსთვის ეს მიუთითებს, რომ არჩევანის უფლება მნიშვნელოვანია, მაგრამ თანაბრად მნიშვნელოვანია უსაფრთხო, დაბალღირებული და კარგი ზედამხედველობის მქონე ვარიანტი.

ყაზახეთის გამოცდილება აჩვენებს, რომ ერთიანი დაგროვებითი ფონდის არსებობა შეიძლება ეფექტიანი იყოს აქტივების მობილიზაციისთვის, თუმცა დროთა განმავლობაში იზრდება მონაწილეთა მოთხოვნა აქტივების მართვაში მეტი არჩევანისა და მოქნილობის მიმართ. საქართველოს შემთხვევაში 2023 წლიდან რისკის პორტფელების არჩევის შესაძლებლობა და მომავალში აქტივების მმართველებს შორის კონკურენციის განვითარება ამავე ლოგიკას ეხმიანება. თუმცა არჩევანის გაფართოებას აუცილებლად უნდა ახლდეს საინვესტიციო რისკების მკაფიო და სისტემური

კომუნიკაცია. წინააღმდეგ შემთხვევაში, მოქალაქეთა ნაწილმა შესაძლოა არასწორად შეაფასოს მაღალი, საშუალო და დაბალი რისკის პორტფელებს შორის განსხვავება, მოკლევადიანი დანაკარგები აღიქვას როგორც სისტემური მარცხი, ან მიიღოს გადაწყვეტილება არა საკუთარი ასაკის, შემოსავლის, საპენსიო ჰორიზონტისა და რისკისადმი მზაობის მიხედვით, არამედ არასრული ინფორმაციისა და საზოგადოებრივი განწყობების გავლენით. ამიტომ პორტფელების არჩევის თავისუფლება ეფექტიანი იქნება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ მას თან ახლავს ფინანსური განათლების გაძლიერება, რისკების მარტივად გასაგები განმარტება და მონაწილეებისთვის გადაწყვეტილების მიღების პროცესში საკონსულტაციო მხარდაჭერა.

დისკუსია

საქართველოს საპენსიო რეფორმის შეფასებისას ხშირად ყურადღება ექცევა დაგროვილი აქტივების მოცულობას, მონაწილეთა რაოდენობას და საინვესტიციო ამონაგებს. ეს ინდიკატორები მნიშვნელოვანია, მაგრამ რეფორმის გრძელვადიანი წარმატება უფრო ფართო კრიტერიუმებით უნდა შეფასდეს. პირველი კრიტერიუმია ადეკვატურობა: რამდენად შეძლებს სისტემა მომავალში ისეთი საპენსიო შემოსავლის უზრუნველყოფას, რომელიც მოქალაქეს სიღარიბისგან დაიცავს და ცხოვრების მინიმალურ სტანდარტს შეუნარჩუნებს. მეორე კრიტერიუმია მდგრადობა: რამდენად შეინარჩუნებს სახელმწიფო ბიუჯეტი სოციალური ვალდებულებების დაფინანსების შესაძლებლობას დემოგრაფიული დაბერების პირობებში. მესამე კრიტერიუმია სამართლიანობა: რამდენად თანაბრად ნაწილდება სარგებელი დაბალი, საშუალო და მაღალი შემოსავლის მქონე ჯგუფებზე. მეოთხე კრიტერიუმია მმართველობა: რამდენად დამოუკიდებელი, პროფესიული და გამჭვირვალეა საპენსიო აქტივების მართვის პროცესი.

ამ კრიტერიუმებიდან ჩანს, რომ პირველი სვეტის გაუქმების ან შემცირების შესახებ დისკუსია ფრთხილ მიდგომას საჭიროებს. მიუხედავად იმისა, რომ ფისკალური წნეხი რეალურია, უნივერსალური პენსია ასრულებს ისეთი სოციალური დაცვის ფუნქციას, რომლის ჩანაცვლებაც მეორე და მესამე სვეტებით შეუძლებელია მათთვის, ვისაც შრომის ბაზარზე არასაკმარისი მონაწილეობა ჰქონდა. უფრო მიზანშეწონილია არა პირველი სვეტის გაუქმება, არამედ მისი ინდექსაციის წესის დაცვა, ხარჯების პროგნოზირება და მეორე-მესამე სვეტების განვითარება ისე, რომ მომავალში სახელმწიფო პენსიის ტვირთი ბუნებრივად შემცირდეს, ხოლო სოციალური მინიმუმი არ დაიკარგოს.

მეორე სვეტის მთავარი გამოწვევა მომდევნო წლებში იქნება საინვესტიციო მანდატის გაფართოებასა და რისკის კონტროლს შორის ბალანსი. ძალიან კონსერვატიული პორტფელმა შესაძლოა ვერ დაფაროს ინფლაცია გრძელვადიან პერსპექტივაში, მაგრამ ზედმეტად რისკიანმა სტრატეგიამ შეიძლება შეარყიოს ნდობა. ამიტომ საჭიროა ასაკზე, რისკის პროფილზე და მონაწილეთა ინფორმირებულობაზე დაფუძნებული მიდგომა.

საინვესტიციო პოლიტიკის დოკუმენტები, ყოველთვიური ანგარიშები, აქტივების განაწილების საჯაროობა და დამოუკიდებელი აუდიტი უნდა იყოს არა ფორმალური ვალდებულება, არამედ ნდობის მშენებლობის ცენტრალური ინსტრუმენტი.

მესამე სვეტის განვითარებისას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ექნება დამსაქმებლის როლს. საქართველოში დაზოგვის კულტურა ჯერ კიდევ სუსტია, ამიტომ ინდივიდუალური მოტივაციით მხოლოდ მცირე სეგმენტი შეიძლება ჩაერთოს ნებაყოფლობით სქემებში. დამსაქმებლის თანადაფინანსება, პროფესიული ასოციაციების ჯგუფური სქემები და საგადასახადო შეღავათები შეიძლება გახდეს ის მექანიზმი, რომელიც ნებაყოფლობით პენსიას არა ელიტურ პროდუქტად, არამედ ადამიანური რესურსების მართვის ფართოდ გამოყენებულ ინსტრუმენტად აქცევს. ამავე დროს საჭიროა მკაცრი ზედამხედველობა, რათა კერძო საპენსიო პროდუქტები არ გადაიქცეს მაღალი საკომისიოების ან გაუმჭვირვალე რისკების წყაროდ.

საბოლოოდ, საქართველოს საპენსიო რეფორმის პოლიტიკის ლოგიკა უნდა გადავიდეს მხოლოდ „სისტემის შექმნიდან“ „სისტემის ხარისხის მართვაზე“. შექმნილია პირველი და მეორე სვეტების ძირითადი სამართლებრივი და ადმინისტრაციული ჩარჩო; მიღებულია მესამე სვეტის სამართლებრივი საფუძველი; დაწყებულია მმართველობითი სტრუქტურის მოდიფიკაცია. მომდევნო ეტაპზე გადამწყვეტია კოორდინაცია: სახელმწიფო, საპენსიო ფონდი, ეროვნული ბანკი, სადაზღვევო ზედამხედველობა, კერძო კომპანიები და დამსაქმებლები ერთიანად უნდა მუშაობდნენ ისე, რომ თითოეული სვეტი აძლიერებდეს მეორეს და არა ანაცვლებდეს მას.

პოლიტიკის მონიტორინგი და განხორციელების მექანიზმები

რეფორმის შემდეგი ეტაპისთვის განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს მონიტორინგის ისეთ სისტემას, რომელიც ერთდროულად დააკვირდება სოციალურ, ფინანსურ და ინსტიტუციურ შედეგებს. საპენსიო პოლიტიკის ეფექტიანობა ვერ განისაზღვრება მხოლოდ იმით, რამდენი ადამიანი გაწევრიანდა სქემაში ან რამდენი ლარი დაგროვდა ფონდში. მონაწილეთა რაოდენობა და აქტივების მოცულობა წარმოადგენს მასშტაბის მაჩვენებელს, მაგრამ არა ხარისხის საბოლოო საზომს. საჭიროა შეფასდეს, რა გავლენა აქვს სისტემას საპენსიო ასაკში მოსალოდნელ შემოსავალზე, რამდენად სამართლიანად ნაწილდება სარგებელი შემოსავლების ჯგუფებს შორის, როგორია ადმინისტრაციული ხარჯები, რა ხარისხითაა დაცული აქტივები და რამდენად ესმით მონაწილეებს რისკისა და სარგებლის ურთიერთკავშირი. ამგვარი მონიტორინგი რეფორმის მმართველობას უფრო პროაქტიულს გახდის და პრობლემების გამოვლენას მანამდე შეძლებს, სანამ ისინი სისტემურ კრიზისად გადაიქცევა.

პირველი სვეტის მონიტორინგისას მთავარ ინდიკატორებად უნდა დარჩეს პენსიის რეალური ღირებულება, ჩანაცვლების კოეფიციენტი, სახელმწიფო პენსიის ხარჯის წილი საბიუჯეტო შემოსავლებში და ხანდაზმულთა სიღარიბის დონე. მხოლოდ ნომინალური

ზრდა საკმარისი არ არის, თუ პენსიის მსყიდველობითი უნარი ინფლაციის გამო მცირდება. ამასთან, ინდექსაციის წესმა არ უნდა დაკარგოს პროგნოზირებადობა. თუ პენსიის ზრდა ყოველწლიურად პოლიტიკური გადაწყვეტილების საგნად დარჩება, სისტემა ვერ შეასრულებს ფისკალური სტაბილიზაციის ფუნქციას. ამიტომ რეკომენდებულია, რომ სახელმწიფო პენსიის შესახებ ყოველწლიურ ბიუჯეტურ დოკუმენტაციას ახლდეს მოკლე განმარტებითი ანგარიში: როგორ განისაზღვრა ზრდა, როგორია მისი გავლენა ხანდაზმულთა კეთილდღეობაზე და რა ფისკალური რისკები ჩანს საშუალოვადიან პერიოდში.

მეორე სვეტის მონიტორინგი უფრო კომპლექსურია, რადგან იგი მოიცავს როგორც ადმინისტრირებას, ისე ინვესტირებას. ადმინისტრირების ნაწილში მნიშვნელოვანია, რამდენად დროულად ასრულებენ დამსაქმებლები შენატანების ვალდებულებას, რამდენი დავალიანება ან შეცდომა ფიქსირდება ინდივიდუალურ ანგარიშებზე, რამდენად სწრაფად ხდება მონაწილეთა მომსახურება და რამდენად ხელმისაწვდომია ინფორმაცია რეგიონებში. საინვესტიციო ნაწილში უნდა შეფასდეს პორტფელის დივერსიფიკაცია, რეალური ამონაგები ინფლაციასთან შედარებით, საკრედიტო და საბაზრო რისკი, საკომისიოები, ლიკვიდურობა და შესაბამისობა საინვესტიციო პოლიტიკის დოკუმენტთან. ამ მაჩვენებლების საჯარო და რეგულარული გამოქვეყნება გაზრდის ანგარიშვალდებულებას და შეამცირებს სპეკულაციურ შიშებს იმის შესახებ, რომ საპენსიო აქტივები შეიძლება არამიზნობრივად იქნას გამოყენებული.

განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს მონაწილეთა ქცევით ფაქტორებს. პენსიის არჩევანი და საინვესტიციო პორტფელის არჩევა მოქალაქეების დიდ ნაწილს რთულად ესმის, რადგან გადაწყვეტილება უკავშირდება გრძელვადიან ჰორიზონტს, გაურკვეველ მომავალ შემოსავალს და რისკის აბსტრაქტულ აღქმას. საერთაშორისო გამოცდილება აჩვენებს, რომ მოქალაქეები ხშირად ინარჩუნებენ ნაგულისხმევ ვარიანტს არა იმიტომ, რომ იგი მათთვის ოპტიმალურია, არამედ იმიტომ, რომ გადაწყვეტილების მიღება უჭირთ. ამიტომ ნაგულისხმევი პორტფელის დიზაინი უნდა იყოს განსაკუთრებით ფრთხილი და უნდა ეყრდნობოდეს ასაკის, რისკის ტოლერანტობისა და საპენსიო ასაკამდე დარჩენილი პერიოდის გათვალისწინებას. არჩევანის თავისუფლება უნდა იყოს რეალური, მაგრამ არ უნდა გადაიქცეს ინფორმაციულად დაუცველი მოქალაქის რისკად.

მესამე სვეტის მონიტორინგის შემთხვევაში სახელმწიფომ და ზედამხედველმა ორგანოებმა უნდა შეაფასონ არა მხოლოდ რეგისტრირებული სქემების რაოდენობა, არამედ მათი რეალური გამოყენება. მნიშვნელოვანია, ვინ ერთვება ნებაყოფლობით კერძო პენსიაში: მაღალი შემოსავლის მქონე მცირე ჯგუფი თუ უფრო ფართო დასაქმებული მოსახლეობა. თუ სქემა მხოლოდ მაღალშემოსავლიანთა საგადასახადო ოპტიმიზაციის ინსტრუმენტად ჩამოყალიბდა, იგი ვერ შეასრულებს სოციალური პოლიტიკის ამოცანას. ამიტომ მონაცემები უნდა იშლებოდეს შემოსავლის ჯგუფების, სქემის ტიპის, დამსაქმებლის მონაწილეობითა და მონაწილეთა ასაკობრივი

სტრუქტურით. ასეთი ანალიზი დაეხმარება სახელმწიფოს, დროულად შეცვალოს სტიმულების დიზაინი და უფრო სამართლიანად მიმართოს შეღავათები.

მნიშვნელოვანია აგრეთვე კერძო საპენსიო პროდუქტების ხარისხის ზედამხედველობა. ნებაყოფლობით სქემებში მონაწილეები უფრო მეტად არიან დამოკიდებული იმ ინფორმაციაზე, რომელსაც სთავაზობს კომპანია. ამიტომ პროდუქტების აღწერა უნდა იყოს მარტივი, შედარებადი და სტანდარტიზებული. მოქალაქემ უნდა იცოდეს არა მხოლოდ მოსალოდნელი სარგებელი, არამედ ყველა საკომისიო, შეზღუდვა, ვადაზე ადრე გატანის პირობები, საინვესტიციო რისკი და აქტივების გადატანის შესაძლებლობა. რეგულატორმა შეიძლება დაწერგოს ერთიანი საინფორმაციო ფურცლის ფორმატი, სადაც ყველა საპენსიო პროდუქტი ერთნაირი ლოგიკით იქნება აღწერილი. ეს გაამარტივებს შედარებას და შექმნის რეალურ კონკურენციას, რომელიც მხოლოდ მარკეტინგზე კი არა, არამედ ხარჯსა და ხარისხზე იქნება დაფუძნებული.

მონიტორინგის სისტემაში ცალკე ადგილი უნდა ჰქონდეს კაპიტალის ბაზრის ინდიკატორებს. საპენსიო ფონდის არსებობა ქმნის მოთხოვნას გრძელვადიან ფინანსურ ინსტრუმენტებზე, მაგრამ თუ ბაზარი ვერ აწარმოებს საკმარისად ხარისხიან და ლიკვიდურ ინსტრუმენტებს, ფონდი იძულებული იქნება დარჩეს დეპოზიტებსა და შეზღუდულ ობლიგაციურ ბაზარზე. ამიტომ უნდა შეფასდეს კორპორატიული ობლიგაციების ახალი ემისიების რაოდენობა, მეორადი ბაზრის ლიკვიდურობა, ემიტენტების გამჭვირვალობა, საკრედიტო რეიტინგების ხელმისაწვდომობა და საინვესტიციო ინსტრუმენტების სექტორული დივერსიფიკაცია. ეს მონაცემები აჩვენებს, რამდენად რეალისტურია მოლოდინი, რომ საპენსიო დანაზოგები ადგილობრივ ეკონომიკაში ეფექტიანად იმუშავებს მონაწილეთა ინტერესების დაზიანების გარეშე.

საბოლოოდ, საჭიროა რეფორმის კოორდინაციის მუდმივი პლატფორმა. საპენსიო ფონდი, ეროვნული ბანკი, დაზღვევის ზედამხედველობა, ეკონომიკისა და ფინანსთა სამინისტროები, დამსაქმებელთა გაერთიანებები და მომხმარებელთა უფლებებზე მომუშავე ორგანიზაციები რეგულარულად უნდა განიხილავდნენ სისტემის ინდიკატორებს. ასეთი პლატფორმა არ უნდა იყოს ფორმალური საკონსულტაციო შეხვედრა; იგი უნდა აწარმოებდეს საჯარო ანგარიშებს, აფასებდეს რისკებს და სთავაზობდეს პოლიტიკის კორექტირებას. სწორედ ამგვარი კოორდინაცია მისცემს საქართველოს შესაძლებლობას, საპენსიო რეფორმა გახდეს გრძელვადიანი ნდობის ინსტიტუტი და არა მხოლოდ სავალდებულო შენატანების ადმინისტრაციული სისტემა.

დასკვნები და რეკომენდაციები

კვლევის საფუძველზე შეიძლება ჩამოყალიბდეს რამდენიმე დასკვნა. პირველი, საქართველოს საპენსიო რეფორმა პრინციპულად სწორად პასუხობს იმ დემოგრაფიულ და ფისკალურ გამოწვევებს, რომლებიც მხოლოდ უნივერსალურ პენსიაზე დაფუძნებულ

სისტემას გრძელვადიანად ასუსტებდა. თუმცა მრავალსვეტიანი მოდელის არსებობა თავისთავად არ ნიშნავს წარმატებას; აუცილებელია თითოეული სვეტის ფუნქციის მკაფიო გამიჯვნა და ერთმანეთთან კოორდინაცია. პირველი სვეტი უნდა დარჩეს სოციალური მინიმუმის გარანტად, მეორე სვეტი – ინდივიდუალური დაგროვებისა და გრძელვადიანი საინვესტიციო შემოსავლის წყაროდ, ხოლო მესამე სვეტი – დამატებითი ნებაყოფლობითი დაზოგვისა და კერძო სექტორის ჩართულობის სივრცედ.

მეორე, მმართველობის რეფორმა უნდა შეფასდეს ფიდუციური დამოუკიდებლობისა და პროფესიული კომპეტენციის კრიტერიუმებით. ორსაბჭოიანი მოდელის გაუქმება და ერთიანი მმართველობითი საბჭოს შექმნა შეიძლება ზრდიდეს მოქნილობას, მაგრამ იგი მხოლოდ მაშინ იქნება დადებითი ნაბიჯი, თუ დანიშვნის პროცედურები გამჭვირვალე, კონკურენტული და პოლიტიკური გავლენისგან მაქსიმალურად დაცული იქნება. საპენსიო აქტივები არ უნდა აღიქმებოდეს როგორც სახელმწიფო განვითარების პროექტების დაფინანსების ინსტრუმენტი; მათი ძირითადი დანიშნულება მონაწილეთა ინტერესების დაცვა და გრძელვადიანი რეალური ამონაგების უზრუნველყოფაა.

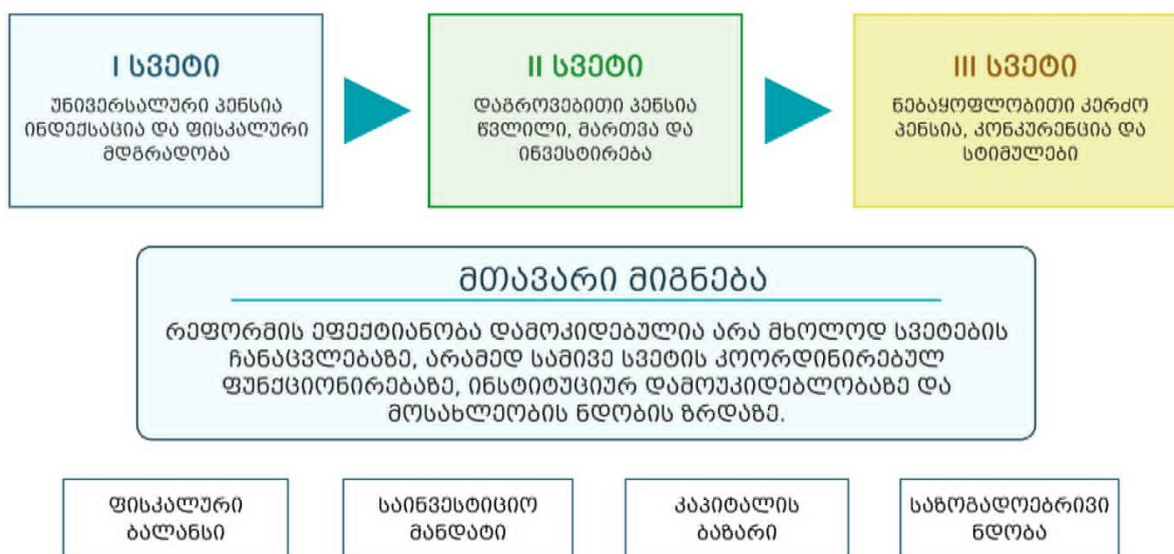
მესამე, აუცილებელია საინვესტიციო ინფრასტრუქტურისა და კაპიტალის ბაზრის პარალელური განვითარება. საპენსიო ფონდი შეიძლება იყოს კაპიტალის ბაზრის მნიშვნელოვანი სტიმული, მაგრამ იგი ვერ იქნება ბაზრის განვითარების ერთადერთი პასუხისმგებელი აქტორი. საჭიროა კორპორატიული ობლიგაციების ბაზრის გამჭვირვალობა, ფასიანი ქაღალდების ლიკვიდურობის ზრდა, ემიტენტთა კორპორაციული მართვის ხარისხის გაუმჯობესება და რეგულატორების კოორდინაცია. ეს უზრუნველყოფს დივერსიფიკაციას და შეამცირებს ერთ სექტორზე ან ერთ ინსტრუმენტზე გადაჭარბებულ დამოკიდებულებას.

მეოთხე, მოსახლეობის ნდობის ზრდა უნდა გახდეს რეფორმის დამოუკიდებელი პოლიტიკის მიმართულება. რეკომენდებულია რეგულარული, მარტივად გასაგები ანგარიშები მონაწილეთა დანაზოგების შესახებ; რისკის პორტფელების შესახებ ვიზუალური და პრაქტიკული განმარტებები; სკოლებში, უნივერსიტეტებსა და სამუშაო ადგილებზე ფინანსური განათლების მოდულები; რეგიონებში კონსულტაციის ხელმისაწვდომობა; და ისეთი კომუნიკაცია, რომელიც მოქალაქეებს აჩვენებს არა მხოლოდ ვალდებულებას, არამედ სარგებელსაც.

მეხუთე, მესამე სვეტის ამოქმედება უნდა დაეფუძნოს კერძო სექტორის რეალური მოტივაციის შექმნას. სახელმწიფომ უნდა უზრუნველყოს საგადასახადო სტიმულები, ზედამხედველობის მკაფიო წესები და კონკურენციის გარემო, ხოლო სადაზღვევო და აქტივების მმართველმა კომპანიებმა უნდა შექმნან გამჭვირვალე, შედარებით მცირე ღირებულების მქონე და სხვადასხვა შემოსავლის ჯგუფზე მორგებული პროდუქტები. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დამსაქმებლის ჯგუფური სქემების წახალისება, რადგან ისინი ნებაყოფლობით პენსიას ფართო მასშტაბს მისცემს.

სურათი 1. საქართველოს საპენსიო რეფორმის სამსვეტიანი ლოგიკა და მმართველობითი გამოწვევები.

საქართველოს საპენსიო რეფორმა: მმართველობა და მდგრადობა



წყარო: მომზადებულია ავტორების მიერ

საბოლოო რეკომენდაციაა, რომ საპენსიო რეფორმის მონიტორინგი არ შემოიფარგლოს მხოლოდ ფინანსური მაჩვენებლებით. საჭიროა ინდიკატორების სისტემა, რომელიც მოიცავს ჩანაცვლების კოეფიციენტის პროგნოზს, მონაწილეთა ნდობის დონეს, საინვესტიციო რისკის მაჩვენებლებს, ადმინისტრაციულ ხარჯებს, მომსახურების ხარისხს, კერძო სექტორის მონაწილეთა რაოდენობას და დაბალშემოსავლიანი ჯგუფების დაცულობას. ამგვარი მმართველობითი ხედვა შექმნის შესაძლებლობას, საქართველოს საპენსიო სისტემა გადაიქცეს არა მხოლოდ დაგროვებითი აქტივების მექანიზმად, არამედ სოციალური დაცვის, ფინანსური განვითარების და გრძელვადიანი ეკონომიკური მდგრადობის ინსტრუმენტად.

გამოყენებული ლიტერატურა

- საქართველოს კანონი „სახელმწიფო პენსიის შესახებ“. (2005). საქართველოს საკანონმდებლო მაცნე.
- საქართველოს კანონი „სახელმწიფო პენსიის შესახებ“ საქართველოს კანონში ცვლილების შეტანის თაობაზე. (2020). საქართველოს საკანონმდებლო მაცნე.
- საქართველოს კანონი „დაგროვებითი პენსიის შესახებ“. (2018). საქართველოს საკანონმდებლო მაცნე.
- საქართველოს კანონი „ნებაყოფლობითი კერძო პენსიის შესახებ“. (2023). საქართველოს საკანონმდებლო მაცნე.
- საქართველოს მთავრობის დადგენილება №396. (2024). საჯარო სამართლის იურიდიული პირის – საქართველოს საპენსიო ფონდის მმართველობითი საბჭოს წევრების შერჩევისა და დანიშვნის წესის დამტკიცების შესახებ.
- საქართველოს ეკონომიკისა და მდგრადი განვითარების სამინისტრო. (2016). არსებული სოციალური საპენსიო სისტემის მოდიფიკაცია და კერძო დაგროვებითი საპენსიო სისტემის დანერგვა.
- საქართველოს მთავრობა. (2018). რეგულირების გავლენის შეფასება დაგროვებით საპენსიო რეფორმაზე.
- საქართველოს ფინანსთა სამინისტრო. (2021). პენსიების ინდექსირება.
- ინფორმაციის თავისუფლების განვითარების ინსტიტუტი (IDFI). (2023). ქართული საპენსიო რეფორმის მომავალი.
- OECD. (2021). Pensions at a Glance 2021: OECD and G20 Indicators. OECD Publishing.
- Davis, E. P., & Hu, Y.-W. (2008). Does funding of pensions stimulate economic growth? *Journal of Pension Economics and Finance*, 7(2), 221–249.
- Holzmann, R., & Hinz, R. (2005). Old-Age Income Support in the 21st Century: An International Perspective on Pension Systems and Reform. World Bank.
- Meng, C., & Pfau, W. (2010). The Role of Pension Funds in Capital Market Development. GRIPS Policy Research Center.
- Schwarz, A. M., & Arias, O. S. (2014). The Inverting Pyramid: Pension Systems Facing Demographic Challenges in Europe and Central Asia. World Bank.
- Whitehouse, E. (2012). Reversals of systemic pension reforms in Central and Eastern Europe: Implications. OECD.

Governance Challenges and Future Development Prospects of Georgia's Pension Reform

Eka gegeshidze, Rusudan Rukhadze

Abstract

This article examines Georgia's pension reform from a governance perspective and assesses whether the emerging multi-pillar model can ensure adequate, fiscally sustainable and institutionally credible old-age income protection. The study is based on documentary material developed in a master's thesis, content analysis of legal and policy documents, a comparative review of four pension systems – Armenia, Sweden, Kazakhstan and Chile – and five in-depth interviews with representatives of the Pension Agency, the Ministry of Economy and Sustainable Development and the insurance sector. The central research question concerns the governance challenges revealed during the implementation of the pension reform and the institutional conditions required for the next stage of reform.

The findings indicate that the first pillar remains indispensable for poverty prevention and for guaranteeing a minimum social income in old age. Its long-term viability, however, depends on the consistent application of the indexation rule and on the monitoring of budgetary pressure. In the second pillar, the main challenges were the flexibility of the institutional structure, the establishment of investment infrastructure, the shortage of domestic expertise in asset management, the limited depth of the capital market and the level of public trust. The 2024 legislative amendments, which replaced the previous two-board model with a unified governing board, partly responded to the governance weakness identified in the research. At the same time, the new arrangement increases the importance of fiduciary independence, transparent appointments and safeguards against political influence. The introduction of the third pillar creates an opportunity to develop voluntary savings, private-sector competition and employer-based benefits; however, its effectiveness will depend on tax incentives, prudent supervision, product quality and citizens' financial literacy. The article concludes that the success of Georgia's pension reform should not be measured only by the amount of accumulated assets. More decisive indicators are the transparency of governance, the quality of risk management, the protection of participants' interests and the coherent coordination of all three pillars.

Keywords: *pension reform; funded pension; governance; fiscal sustainability; voluntary private pension; capital market.*

The Impact of the Russia–Ukraine War on Georgia’s Financial System (2022–2025)

Maia Tetrushvili¹; Natia Kakhniashvili²; Khatuna Barbakadze³; Nato kakashvili⁴

¹Candidate of Economic Sciences, Visiting Professor of Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, Faculty of Economics and Business; ²Doctor of Business Administration, Assistant Professor, Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, Faculty of Economics and Business; ³Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, Faculty of Economics and Business; ⁴Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Iv. Javakhishvili Tbilisi State University, Faculty of Economics and Business

Abstract

The article presents a comprehensive analysis of the impact of the Russo–Ukrainian War on Georgia’s financial system. The study is based on macroeconomic and financial data from 2022–2025. It examines the dynamics of economic growth, the factors contributing to the appreciation of the Georgian lari, the increase in remittances, the profitability of the banking sector, inflationary pressures, and the response of monetary policy.

The paper concludes that Georgia’s financial stability during 2022–2025 was largely driven by temporary external inflows, which, in the long term, create risks of increased economic concentration and heightened geopolitical vulnerabilities.

Keywords: financial stability, foreign exchange inflows, remittances, banking sector, inflation, monetary policy.

Introduction

The Russia–Ukraine War, which began in February 2022, triggered significant geoeconomic changes worldwide. Large-scale sanctions imposed on Russia, shifts in capital flows, and migration movements substantially transformed the financial environment of the Caucasus region, including Georgia.

As a small and open economy, Georgia is integrated into the international trade and financial system, making it highly vulnerable to external shocks that are rapidly transmitted to domestic markets.

The present study aims to assess the impact of the war on the structural and functional elements of Georgia's financial system. The paper is based on a mixed research methodology, including descriptive analysis, forecasting assessment, and comparative analysis of Georgia, European Union member states, and selected Transcaucasian countries.

The study analyzes Georgia's macroeconomic indicators, such as gross domestic product (GDP), inflation, capital flows, and foreign exchange and banking markets. (The macroeconomic indicators for 2024 are based on official statistical data, while the figures for 2025 are largely projected estimates and may be subject to official revision.)

The findings demonstrate that economic growth in Georgia, in addition to real economic activity, has been significantly dependent on external factors.

The resilience of the financial system is ensured by institutional transparency, the quality of regulation, and the ability to adapt to external shocks. Structural diversification also represents a critically important factor and serves as a key prerequisite for long-term stability.

Macroeconomic Dynamics of Georgia in 2022–2025

Theoretically, external shocks affect countries with small and open economies through exchange rates, capital movements, and interest rates. Under a floating exchange rate regime, an influx of capital and foreign currency leads to currency appreciation, while outflows result in depreciation. Georgia's economy is characterized by a relatively high level of dollarization, which increases the impact of exchange rate fluctuations on financial stability.

Against the backdrop of the Russo–Ukrainian War, Georgia recorded high rates of real economic growth during 2022–2025.

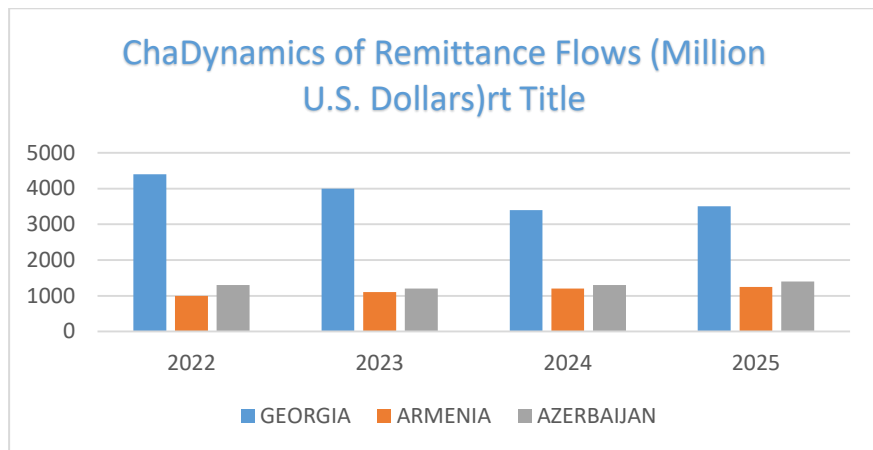
In 2022, real economic growth exceeded approximately 10 percent. The main drivers of this growth were the expansion of service exports, increased domestic consumption, and a sharp rise in foreign exchange inflows. This figure significantly surpassed the forecasts made prior to the war, indicating that the economic expansion was, to some extent, paradoxical, as it occurred amid a geopolitical crisis.

During the first months of the war, there were negative expectations regarding the Georgian lari, with concerns over depreciation. However, from the second half of the year, the currency began to appreciate. The growth of foreign currency inflows depended on the increase in remittances, visitors, and foreign investments in Georgia. It should be noted that today direct

foreign investments represent an important factor for the economic development of Georgia³²(Kakhniashvili, N., 2022), while the increase in remittances raised household incomes, consumption, and deposits.

Figure 1. - Dynamics of Remittance Inflows

Source: International Monetary Fund

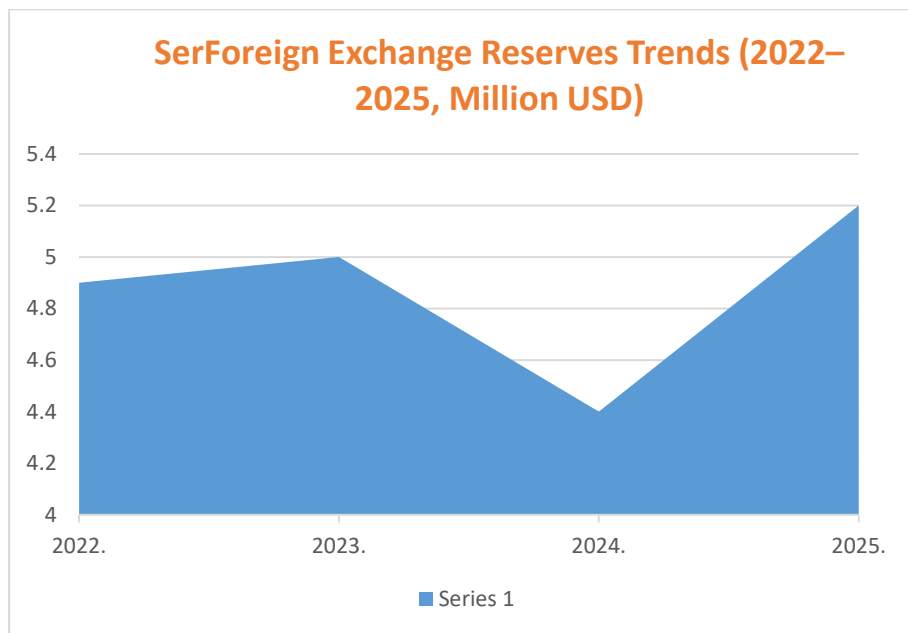


In 2022, the volume of foreign investment doubled compared to 2021.

Starting from 2022, Georgia’s international reserves began to grow significantly and exceeded USD 4 billion. This process indicates that exchange rate stability was largely based on external inflows rather than on structural improvements in exports.³³

Figure 2. - Dynamics of Foreign Exchange Reserves

Source: National Bank of Georgia



1.Kakhniashvili, N., in 2022

³³ <https://www.imf.org/en/countries/geo>

The Russia–Ukrainian War created significant uncertainty for the central banks and banking systems of many countries. The anticipated risks were largely negative in nature, which was reflected in investor sentiment and behavior across the region. As a result, global economic growth forecasts deteriorated, particularly for countries directly involved in the war and the related economic sanctions.

In 2022, credit activity within the Georgian banking sector remained stable, while economic growth indicators were sustained at a relatively high level.

Significant improvements were also observed in the financial performance of banks. From the beginning of 2022 until April, the National Bank conducted three swap operations as part of its monetary policy framework aimed at supporting the banking sector.

Despite the increase in compliance costs associated with sanctions and tighter operational controls, commercial banks continued to demonstrate overall financial stability and resilience.

The increase in deposits strengthened banks' funding base, while the expansion of the credit portfolio increased profitability. This, in turn, enabled the National Bank to reduce the interest rate on foreign currency reserves held by commercial banks at the central bank to zero. At the same time, the interest rate on reserves denominated in the national currency remained unchanged.

To reduce volatility in interbank interest rates and stimulate money market activity, the National Bank introduced an interest rate corridor. From March 2022, the overnight lending rate was set at 0.75 percentage points, while the overnight deposit rate was set at 1.75 percentage points.³⁴ Through this adjustment, the National Bank increased the relative attractiveness of interbank overnight deposits compared to overnight deposits held at the central bank.

In the same year, the collateral market for monetary operations utilized a range of instruments, including National Bank certificates of deposit; issuances by international financial institutions, specifically lari-denominated debt securities; government securities; lari-denominated securities issued by legal entities; commercial banks' loan assets; and other financial instruments.

The global inflationary wave also affected Georgia. Inflation reached double-digit levels. Monetary policy remained tight, with the refinancing rate maintained at a high level in order to contain inflationary expectations. This restrictive monetary policy moderated domestic demand; however, it strengthened macroeconomic confidence.

In 2023, the National Bank eased its monetary policy, which supported an increase in credit activity within the country. This was followed by a decline in market interest rates and,

3. National Bank of Georgia. Annual Report 2022.

consequently, an increase in the volume of loans issued by commercial banks. This development also stimulated aggregate demand.

In the same year, lending to the economy increased, supported by the stability of the country's financial system. As for the net international investment position, it deteriorated by USD 1,734 million compared to the previous year and amounted to negative USD 30,025 million.

According to the European Bank for Reconstruction and Development (EBRD), in 2024 the risks of economic slowdown remained high, driven by both external and internal factors. Despite this, the country's economy grew by 9.5 percent, exceeding the forecasted level. The main driving force of real GDP growth was domestic demand.

Inflation remained at 1.1 percent, representing a decrease of 2.5 percentage points compared to the previous year. The inflation rate was also significantly below the National Bank's target level of 3 percent.

Liquidity risk remains one of the most critical challenges for commercial banks, especially in the face of increased market volatility, changing customer behavior, and growing regulatory demands. Traditionally, liquidity risk has been managed through conservative methods, such as holding excess reserves, central bank support, and stress testing. However, the dynamic nature of modern financial systems requires the adoption of more advanced and data-driven strategies. (kakhniashvili, N, Barbakadze k, kakashvili N., 2025). In 2024, the level of dollarization in the country remained a significant challenge, reaching 52.3 percent by the end of the year.

The year 2025 was also significant in terms of structural changes in deposits. A shift of funds from current accounts to time deposits was observed. At the same time, the lariization rate improved significantly, increasing by 4.5 percent.

The level of dollarization in the assets of individuals remained below 20 percent. However, dollarization among legal entities remained a challenge, with the rate standing at approximately 68 percent.

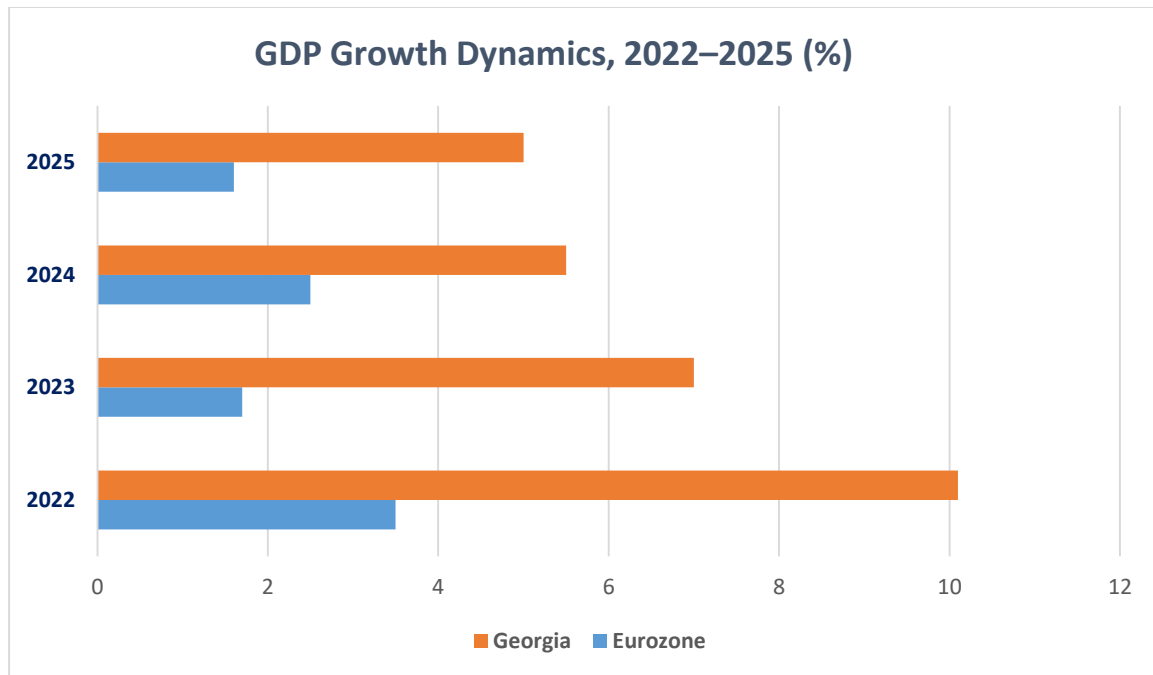
According to the international credit rating agency Moody's, the outlook for Georgia's banking system improved in 2025, shifting from negative to stable at the Ba2 rating level.

Amid the ongoing Russo-Ukrainian War, central banks in various countries continued to implement the tight monetary policies that had been introduced during the pandemic period.

The geopolitical situation created additional pressure on the global economy as a whole, particularly on the economies of countries directly involved in the war and participating in economic sanctions.

Figure 3. -GDP Growth Dynamics, 2022–2025 (%)

Note: The indicators for 2025 are approximate estimates for both Georgia and Eurozone countries.



Between 2022 and 2025, economic growth in European Union countries was characterized by a noticeable slowdown. In 2022, GDP growth averaged between 1.0 percent and 3.5 percent. In 2023, a sharp deceleration was observed, with growth ranging between 0.4 percent and 1.7 percent. In 2024, a partial recovery began, with growth recorded in the range of 1.1 percent to 2.5 percent. In 2025, according to preliminary estimates, economic growth stabilized within the range of 1.5 percent to 1.6 percent.

In Georgia, GDP growth followed a different trajectory: 10.1 percent in 2022, 7.0 percent in 2023, 5.5 percent in 2024, and an estimated 5.0 percent in 2025.

Conclusion

A comparative analysis of the economic dynamics of Georgia and the Eurozone during 2022–2025 demonstrates that the same geoeconomic shock can produce different effects across countries, depending on the structural characteristics of their economies and the degree of integration into the global financial system.

During this period, Georgia's economic growth significantly exceeded the average level observed in the Eurozone. This growth was primarily driven by inflows of foreign capital, increased remittances, and rising domestic demand.

Unlike Georgia, Eurozone economies during the war period experienced energy resource shortages, rising production costs, and inflationary pressures, all of which constrained economic growth.

These developments indicate that Georgia's economic growth was heavily influenced by exogenous factors that produced positive short-term effects.

Despite the high rates of economic growth, GDP growth has gradually normalized over the last two years, suggesting that a substantial portion of economic expansion was associated with temporary financial inflows.

In this context, Georgia's economic growth may be characterized as structurally mixed, where real economic activity and external financial factors jointly determine macroeconomic dynamics. However, dependence on external factors creates potential long-term risks for economic and financial stability.

References

1. Council on Foreign Relations. (2023). *The Russia-Ukraine war: Global implications*. <https://www.cfr.org>
2. International Monetary Fund. (2022). *Regional economic outlook*. International Monetary Fund.
3. Kakhniashvili, N. (2022). Directions for improving the investment environment in Georgia. In *Proceedings of the VII International Scientific Conference: Challenges of Globalization in Economics and Business* (pp. 227–233). Ivane Javakhishvili Tbilisi State University Press.
4. Kakhniashvili, N., Barbakadze, K., & Kakashvili, N. (2025). Modern approaches to liquidity risk management in the context of technological transformation. In *Proceedings of the International Scientific Conference: Georgia's Economic Security: Current Situation and Challenges* (pp. 262–267). Ivane Javakhishvili Tbilisi State University Press.
5. Liu, T.-Y., & Lee, C.-C. (2025). Impacts of the Russia–Ukraine war on energy prices: Evidence from OECD countries. *Policy Studies*, 46(3), 460–492.
6. Ministry of Economy and Sustainable Development of Georgia. (n.d.). <https://www.economy.ge>
7. Ministry of Finance of Georgia. (n.d.). <https://www.mof.ge>
8. National Bank of Georgia. (2022). *Annual report 2022*.
9. National Bank of Georgia. (2023). *Annual report 2023*.
10. National Bank of Georgia. (2024). *Annual report 2024*.
11. National Bank of Georgia. (2025). *Annual report 2025*.
12. National Bank of Georgia. (n.d.). *Financial stability reports*.
13. National Statistics Office of Georgia (Geostat). (n.d.). <https://www.geostat.ge>
14. Parliamentary Budget Office of Georgia. (2024). *Annual report 2024*.
15. World Bank. (2023). *Europe and Central Asia economic update*. World Bank.

სინონიმია საზღვაო ტერმინოლოგიაში

ნინო ფუტკარაძე¹; ლეილა ხარდინა²

¹ფილოლოგიის დოქტორი, ასისტენტ პროფესორი, ბათუმის სახელმწიფო საზღვაო აკადემია, ბათუმი, საქართველო; E-mail: n.putkaradze@bsma.edu.ge; ²ფილოლოგიის დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, ბათუმის სახელმწიფო საზღვაო აკადემია, ბათუმი, საქართველო E-mail: l.khardina@bsma.edu.ge

აბსტრაქტი

ტერმინოლოგიის კიდეც ერთი მნიშვნელოვანი თავისებურება უკავშირდება ტერმინთა სინონიმის ზრდას. სინონიმია საზღვაო ტერმინოლოგიაში არის ისეთი ენობრივი მოვლენა, როდესაც ორი ან მეტი ტერმინი ერთსა და იმავე საზღვაო ცნებას აღნიშნავს ან იმდენად ახლო მნიშვნელობა აქვთ, რომ პროფესიურ პრაქტიკაში ერთის ნაცვლად მეორეც გამოიყენება. გამომდინარე იქედან, რომ ინგლისური ენა წარმოადგენს საერთაშორისო საზღვაო ენას და მისი ცოდნა პროფესიულ ცოდნასთან ერთად აუცილებელი პირობაა ყველა მეზღვაურისთვის, შესაბამისად ნაშრომი ძირითადად ემყარება აღწერით მეთოდს, მოიცავს ლინგვისტური მასალის ანალიტიკური დაკვირვებისა და სემანტიკური ანალიზის მეთოდებს სინონიმის მაგალითებზე, რომლებსაც იყენებს ქართველი მეზღვაური ორივე ენაში, როგორც ქართულში, ისე ინგლისურშიც.

საკვანძო სიტყვები: სინონიმია, საზღვაო ტერმინოლოგია

შესავალი. ტერმინი განსაკუთრებული ენობრივი ნიშანია, რომელიც სამეცნიერო ცნებას აღნიშნავს და, ამდენად, უზრუნველყოფს სპეციალისტთა შორის კომუნიკაციასა და ურთიერთგაგებას ამა თუ იმ დარგის ფარგლებში. ტერმინთა ერთობლიობას კი ტერმინოლოგია ეწოდება, მაგ. საზღვაო ტერმინოლოგია არის საზღვაო ტერმინთა ერთობლიობა, სამედიცინო ტერმინოლოგია - სამედიცინო ტერმინთა ერთობლიობა და ა.შ. ტერმინის ბუნების უკეთ გასაგებად მნიშვნელოვანია მისი სემანტიკური დახასიათება. ტერმინს ძირითადად აღწერენ როგორც მონოსემიურ სიტყვებს, რომლებსაც არ უნდა ჰქონდეს პოლისემია, სინონიმია; სიტყვებს, რომლებიც ზუსტად უნდა ასახავდეს შესაბამისი ცნების შინაარსს, უნდა გამოირჩეოდეს ლექსიკური სისტემურობით, ექსპრესიულად და ემოციურად უნდა იყოს ნეიტრალური, უნდა იყოს

მოკლე და სხარტი. ზემოთ ჩამოთვლილი თვისებები ახასიათებს ტერმინთა დიდ ნაწილს, თუმცა არა ყოველთვის. ტერმინოლოგია, ზოგადად, დიდი სინონიმით არ ხასიათდება, მაგრამ საზღვაო სფეროში გვხვდება ტერმინთა სინონიმის არაერთი შემთხვევა.

ტერმინთა სინონიმის ყველაზე გავრცელებული შემთხვევებია, როდესაც ქართული ტერმინის გვერდით ფეხს იკიდებს საერთაშორისო ტერმინი, ან პირიქით, უკვე დამკვიდრებული საერთაშორისო ტერმინისათვის იქმნება ქართული შესატყვისი, ან ასევე ხშირია შემთხვევები, როდესაც საერთო ენის კუთვნილი სიტყვა იმენს ტერმინოლოგიურ მნიშვნელობას. შესაბამისად, ტერმინოლოგიის კიდევ ერთი თავისებურება უკავშირდება ტერმინთა სინონიმას.

შედეგები და მსჯელობა. სინონიმია საზღვაო ტერმინოლოგიაში არის ისეთი ენობრივი მოვლენა, როდესაც ორი ან მეტი ტერმინი ერთსა და იმავე საზღვაო ცნებას აღნიშნავს ან იმდენად ახლო მნიშვნელობა აქვთ, რომ პროფესიურ პრაქტიკაში ერთის ნაცვლად მეორეც გამოიყენება. თუმცა, საზღვაო დარგშიც სინონიმია არასასურველია. შეიძლება ვთქვათ, რომ სინონიმები ტერმინოლოგიური ენის კიდევ ერთი პრობლემაა. სინონიმას დ. ს. ლოტე ტერმინოლოგიის დიდ ნაკლს უწოდებდა და აღნიშნავდა, რომ ისინი ზედმეტად ტვირთავენ მახსოვრობას და ქმნიან საშიშროებას, რომ ზოგიერთი ერთმანეთისაგან ავტორის მიერ არასწორად იქნეს გამიჯნული (ლოტე, 1968: 9-10). მეტად საინტერესოა ტერმინოლოგიაში სინონიმების ბუნება და ფუნქცია. აქ ისინი ერთ ცნებას ეხებიან და არ აქვთ ემოციურ-ექსპრესიული ფუნქცია, არც სტილისტური ნიუანსები, ამიტომაც მათ ეწოდებათ დუბლეტები (ტოლიკინა, 1971: 78-79). სინონიმური წყვილები ერთგვარ ობიექტურ სინამდვილეს ასახავენ და ერთი აღსანიშნავ მიუთითებენ, მათ ერთი საერთო ნიშანი აერთიანებს — ეს მათი ნომინაციური ფუნქციაა: ისინი ერთსა და იმავე დენოტანს, საგანს, მოვლენას აღნიშნავენ.

იმგვარ სინონიმებს, რომლებიც არც მნიშვნელობით, არც კონტექსტურად არ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან, აბსოლუტურ სინონიმებს, ანუ ლექსიკურ დუბლეტებს ეძახიან. აქ სინონიმურ წყვილში მნიშვნელობა ემთხვევა ერთმანეთს.

ქართული საზღვაო ტერმინების სინონიმური დუბლეტები, მწკრივები:

ანემომეტრი		ქარსაზომი	
კვანძი		ნასკვი	
გემი		ხომალდი	
წნეხი		პრესი	
საჭე	ტიმონი	დიუმენი	აფთიონი ძვ.ქ
სივრცე	განი	არე	
სილა	ქვიშა		
ხოპი	ნიჩაბი		
საჭე	ხალასი	სამართი	
საბელი	თოკი	ბაგირი	
ცალფა	ნიში	ვარცლი	

სინონიმებს შეიძლება არა მხოლოდ წყვილი სიტყვები ქმნიდეს, არამედ სამი, ოთხი და მეტი ერთეულიც ერთიანდებოდეს და ერთ სინონიმურ მწკრივს იძლეოდეს. გამოიყოფა ერთი ძირითადი სიტყვა ანუ დომინანტი, დანარჩენი კი ნიუანსებს შეიცავს. ამგვარი სინონიმური მწკრივები ახასიათებს ინგლისურ საზღვაო ტერმინოლოგიას. გამომდინარე იქედან, რომ ინგლისური ენა წარმოადგენს საერთაშორისო საზღვაო საკომუნიკაციო ენას და მისი ცოდნა პროფესიულ ცოდნასთან ერთად აუცილებელი პირობაა იმისათვის, რომ მეზღვაურმა მიიღოს გემზე მუშაობის უფლება, მეზღვაურისთვის ინგლისური ენის გარკვეულ დონეზე ცოდნა გათვალისწინებულია საერთაშორისო საზღვაო კონვენციის „მეზღვაურთა მომზადების, დიპლომირებისა და ვახტის გაწევის შესახებ“ (STCW 78/79) სტანდარტებითაც, შესაბამისად ჩვენი კვლევის **მეთოდოლოგიურ** საფუძველს წარმოადგენს აღწერითი მეთოდი, რომელიც მოიცავს ლინგვისტური მასალის ანალიტიკური დაკვირვებისა და სემანტიკური ანალიზის მეთოდებს სინონიმის მაგალითებზე, რომლებსაც იყენებს ქართველი მეზღვაური ორივე ენაში, როგორც ქართულში, ისე ინგლისურშიც.

მწკრივები, რომლებიც გვხვდება ინგლისურ საზღვაო ტერმინოლოგიაში, მაგალითად:

1. **Harbor**, shelter – ნავსადგური
2. **boat**, vessel, ship, craft – გემი, ხომალდი
3. **place**, position, location, station – ადგილი, ადგილმდებარეობა
4. **rescue**, save – გადარჩენა, დახმარების გაწევა
5. **method**, mode, manner, way ხერხი, მეთოდი
6. **lift**, rise, hoist, rear, elevate, heave – მაღლა აწევა
7. **command**, order, direct, instruct – განკარგულების მიცემა
8. **help**, aid, assist – დახმარების გაწევა

ძირითადი ენის ლექსიკურ სისტემაში სინონიმთა ორ ჯგუფს გამოყოფენ:

- ა) ლექსიკური ჯგუფი
- ბ) გრამატიკული ჯგუფი (მორფოლოგიურს, სინტაქსურს)

ლექსიკურ-სემანტიკური საზღვაო სინონიმია ჩვენ ზემოთ მოყვანილ მაგალითებში დავინახეთ, გრამატიკული სინონიმები ფუნქციურად მსგავსი გრამატიკული მაჩვენებლების მქონე ერთნაირ სიტყვებს ეწოდება, მაგალითად:

ინგლისურ საზღვაო ტერმინოლოგიაში გვხვდება შემდეგი ტერმინები:

Disconnection / disconnecting – განცალკევება/განაცალკევებს

Encasing / encasement – ფუთავს/ კორპუსი

ქართული საზღვაო ტერმინოლოგიაში გვხვდება შემდეგი ტერმინები:

სამკუთხიანი / სამკუთხა

მიუვალი/მიუდგომელი/გაუვალი

უშრეტი/ დაუშრეტელი

სტილისტური სინონიმები ერთგვარი სემანტიკის მქონე სიტყვებია, ამიტომ ისინი არ გვხვდება საზღვაო დარგში.

საზღვაო ტერმინოლოგიაში სინონიმების გაჩენის მიზეზი არის ტერმინების ფორმირების სხვადასხვა წყარო (დანილენკო,1977: 73). ქართული საზღვაო ტერმინის გვერდით ფეხს იკიდებს საერთაშორისო ტერმინი, როგორცაა მაგ:

ქართული ტერმინი	საერთაშორისო ტერმინი
1.აირი	გაზი
2. მინანქარი	ემალი
3.საწური	ფილტრი
4.განმხოლოება	იზოლაცია
5.დაკეცვა	ფოლდინგი

ქართულ საზღვაო ტერმინოლოგიაში გვხვდება ისეთი სინონიმები, როდესაც ამა თუ იმ ტერმინის როლში „ყოფითი“ სიტყვებია გამოყენებული (პროცესისა და თვისების კატეგორიის აღმნიშვნელი ტერმინებიდან), მაგალითად:

1. ქანაობა / რხევა / რწევა
2. მსხვრევა / მტრევა
3. მონიშვნა / აღნიშვნა
4. საყრდენი/საბრჯენი
5. სახელური / ტარი
6. რიგი / მწკრივი
7. საზეთი /საპოხი
8. ჩქარი/ სწრაფი
9. მყარი / მაგარი

სინონიმია განსაკუთრებით დამახასიათებელია ტერმინოლოგიის ფორმირების საწყის ეტაპზე, როცა მეცნიერული ცნება ხშირად წარმოდგენილია ტერმინების ანალოგებით (კუტინა,1970:85). ასეთი ტერმინოლოგიური სერიები დიდხანს არ არსებობს. ამიტომ სინონიმია ტერმინოლოგიაში შედარებით მცირე მოცულობით ჩნდება, ვიდრე საერთო ენაში, და როგორც პოლისემია, რეგულაციას ექვემდებარება. ტერმინი არ არის განსაკუთრებული სიტყვა, ის განსაკუთრებული ფუნქციის მატარებელი სიტყვაა; ამიტომ მას, როგორც სხვა ნებისმიერ ზოგადსაღიგერატურო სიტყვას, უნდა ჰქონდეს მსგავსი ლინგვისტური კატეგორიები, ეს ეხება სინონიმებსაც.

ცნობილია, რომ სინონიმთა არსებობა საერთო-საღიგერატურო ენაში უფრო მეტია ვიდრე ტერმინოლოგიაში და ის დადებით მოვლენადაა მიჩნეული ტერმინოლოგიისაგან განსხვავებით. რაც უფრო მეტია სინონიმთა რიცხვე, მით უფრო მდიდარია ენა. სინონიმური ტერმინები საშუალებას გვაძლევს სამეცნიერო ტექსტი უფრო ლამაზად, მრავალფეროვნად გადმოვცეთ. ეს მისწრაფება, რასაკვირველია, ტერმინოლოგიურ ლექსიკაზეც ვრცელდება.

საზღვაო ტერმინოლოგიაში ჭარბობს სემანტიკური და აბსოლუტური სინონიმები. ქართულ საზღვაო ტერმინოლოგიასთან შედარებით ინგლისური საზღვაო ტერმინოლოგია უფრო მდიდარია სემანტიკური სინონიმური წყვილებითა და მწკრივებით. კვლევის შედეგად შეგვიძლია წარმოვადგინოთ არსებითი სახელით გამოხატული სინონიმური წყვილები ინგლისურ საზღვაო ტერმინოლოგიაში.

- 1.mouth/flow –ნაკადი
- 2.bow-/fore –ქიმი
- 3.stern /aft –კიზო
- 4.bollard/ bitt /dolphin –კნეხტი
- 5.rope / line/ hawser –ბაგირი
- 6.wheel /helm –საჭე
7. cable/ chain –ჯაჭვი
- 9.care / caution –სიფრთხილე
- 10.shore / coast– სანაპირო
- 11hull/shell –კორპუსი

ასევე შეგვიძლია მოვიყვანოთ მაგალითები ზმნით გამოხატული სინონიმური წყვილებისა ინგლისურ საზღვაო ტერმინოლოგიაში. ავღნიშნავთ, რომ ზოგიერთი მათგანი გამოირჩევა ნიუანსობრივი სხვაობით. მაგალითად:

- 1.reduce / decrease– შემცირება
- 2.include / involve –ჩართვა,შეცვა
- 3.avoid / escape– თავიდან არიდება
- 4.sail / swim– ცურვა
- 5.embark / board –ასვლა გემზე
- 6.operate / run –მართვა, მუშაობა

საანალიზო მასალა გვამღწევს იმის თქმის საშუალებას, რომ ინგლისურ საზღვაო ტერმინოლოგიაში მოიპოვება უფრო მეტი სინონიმური წყვილი, ვიდრე ქართულში.

დასკვნა. ამგვარად, მეცნიერებისა და ტექნიკის სწრაფმა განვითარებამ და დიდი რაოდენობით ტერმინების წარმოქმნამ მეცნიერებისა და ტექნიკის ყველა სფეროში, გამოიწვია ტერმინთა სემანტიკური მახასიათებლების ცვლილება. ენამ აამოქმედა რა მის ხელთ არსებული რესურსები ახალი ცნებებისთვის სახელის დასარქმევად, გახშირდა საერთო ლექსიკის სიტყვების გამოყენება ტერმინოლოგიაში, ასევე უკვე არსებული ტერმინების გადასვლა ერთი დარგიდან მეორეში, როგორც მონათესავე დარგებში, ისე სრულიად არამონათესავე დარგებში, მომრავლდა ტერმინოლოგიური აბრევიატურები, მრავალსიტყვიანი ტერმინები, გახშირდა ტერმინთა სინონიმია და სხვა.

ის ფაქტი, რომ ზოგიერთი მკვლევარი სინონიმთა ლიკვიდაციას გვთავაზობს ტერმინოლოგიის მოწესრიგებისთვის, ჩვენი აზრით, საკმაოდ რთული ამოცანაა. ერთი ხელის მოსმით ტერმინთა გაუქმება შეუძლებელია. სინონიმური ტერმინების ნაკლად იმასაც ასახელებენ, რომ მათ მოაქვთ ზიანი ურთიერთგაგების თვალსაზრისით,

რადგანაც შესაძლოა საზოგადოებამ ეს სხვადასხვაგვარად აღიქვას. მიუხედავად ნეგატიური დამოკიდებულებისა, სინონიმების არსებობა ტერმინოლოგიურ სისტემებში რეალური ფაქტია.

გამოყენებული ლიტერატურა:

- მარგალიტაძე, თ. ნაშრომი „ტერმინოლოგიური პოლიტიკის საკითხისათვის საქართველოში“
ლამბაშიძე, რ. (1986) *ქართული სამეცნიერო ტერმინოლოგია და მისი შედგენის ძირითადი პრინციპები*. თბილისი.
ღლონტი, ა. (1988). *ქართული ლექსიკოლოგიის საფუძვლები*. თბილისი.
რიჩკოვი, რ. (2010). *რუსულ-ინგლისურ-ქართული საზღვაო ლექსიკონი*. ბათუმი.
ფუტყარაძე, ნ. (2018), „ქართული საზღვაო ტერმინოლოგიის თანამედროვე მდგომარეობა და პერსპექტივები (ინგლისურ მასალაზე დაყრდნობით), (დისერტაცია), ბათუმი 2018
Арнольд, И. В. (1973). *Лексикология современного английского языка*. Москва.
Бобин, В. И. (2005). *Терминологический справочник капитана по ведению дел и документации на английском языке*. Москва.
Akmajian, A., & Demers, R. (1995). *Linguistics an introduction to Language and Communication*. Cambridge
Bezhanovi Z. A., (2010) *Guide to Maritime English*, Batumi.
Yule, G., (2006). *The study of Language*. Cambridge.
Fromkin, V., & Rodman, R. (2003). *An introduction to Language*. USA.
Oxford English Dictionary on Historical Principles (OED). (1989). Oxford University Press.

Synonymy in Maritime Terminology

Abstract

One of the significant features of terminology is related to the increase in terminological synonymy. Synonymy in maritime terminology is a linguistic phenomenon in which two or more terms denote the same maritime concept, or are so close in meaning that they can be used interchangeably in professional practice. Since English is recognized as the international maritime language, and its proficiency, along with professional competence, is an essential requirement for every seafarer, this study is based on a descriptive method and includes analytical observation of linguistic material as well as semantic analysis. The discussion of synonymy is presented through examples that are used by Georgian seafarers in both the Georgian and English languages.

Keywords: Synonymy, Maritime Terminology

„ნინფა“ გარგარის (*Prunus armeniaca* L.) ინტროდუცირებული ჯიშის აგრობიოლოგიური შეფასება შიდა ქართლის პირობებში

ელენე მაღლაკელიძე¹; ზვიად ბობოქაშვილი²; ვანო კაკაშვილი³

¹სოფლის მეურნეობის აკადემიური დოქტორი, ²სოფლის მეურნეობის აკადემიური დოქტორი,
³მაგისტრი

სსიპ სოფლის მეურნეობის სამეცნიერო-კვლევითი ცენტრი

აბსტრაქტი

სტატიაში წარმოდგენილია გარგარის (*Prunus armeniaca* L.) ინტროდუცირებული ჯიშის „ნინფა“ აგრობიოლოგიური და სამეურნეო მახასიათებლების კვლევის შედეგები. ჯიშის შესწავლა განხორციელდა საქართველოს მეხილეობის ერთ-ერთ წამყვან რეგიონში – ქართლში (სოფ. ჯილაურა, მცხეთის მუნიციპალიტეტი – საგურამო), სსიპ სოფლის მეურნეობის სამეცნიერო-კვლევითი ცენტრის მეხილეობის კვლევის სამსახურის მიერ, 2021–2024 წლებში.

კვლევა მოიცავდა ჯიშის კომპლექსურ აგრობიოლოგიურ შეფასებას შემდეგი მიმართულებებით: მცენარის განვითარების ფენოლოგიური ფაზების კალენდარული ვადების დადგენა, სიმწიფის პერიოდის განსაზღვრა, დაავადებების მიმართ გამძლეობის შეფასება, ნაყოფის პომოლოგიური აღწერა, ნაყოფის მექანიკური და ბიოქიმიური მაჩვენებლების ანალიზი, მოსავლიანობისა და პროდუქტიულობის აღრიცხვა.

კვლევის შედეგად დადგინდა, რომ გარგარის ჯიშში „ნინფა“ მიეკუთვნება საადრეო სიმწიფის პერიოდის ჯიშთა ჯგუფს და გამოირჩევა მაღალი სასოფლო-სამეურნეო ღირებულებით: ნაყოფის გამორჩეული კომერციული თვისებებით, სტაბილური მოსავლიანობითა და ზოგიერთი დაავადების მიმართ ტოლერანტობით. აღნიშნული მახასიათებლების საფუძველზე, ჯიშს მიეცა რეკომენდაცია გასაშენებლად საქართველოს მეხილეობის წამყვან რეგიონებში: ქართლში, მცხეთა-მთიანეთში, კახეთში.

საკვანძო სიტყვები: ჯიში, ყვავილი, ნაყოფი, ვეგეტაცია, მოსავალი.

შესავალი

გარგარი ერთ-ერთი საინტერესო და მაღალი საგემოვნო თვისებებით გამორჩეული კურკოვანი კულტურაა, რომლის წარმოშობის პირველადი კერაა ჩინეთის ჩრდილო-აღმოსავლეთი და ცენტრალური რაიონები, სადაც გარგარის 1000-ზე მეტი ჯიშია გავრცელებული [Zhebentyayeva et al., 2012; Martínez Mora et al., 2009; Paunovic & Paunovic, 1995]. გარგარის მეორადი დომესტიკაციის კერაა – ავღანეთი, შუა აზია, ირანი და სამხრეთ კავკასია [Ristevski & Mitreski, 1986; Zhebentyayeva et al., 2012].

ჩვეულებრივი გარგარი (*Prunus armeniaca* L.) მიეკუთვნება ვარდისებრთა (*Rosaceae*) ოჯახს, *Prunus*-ის გვარს. გარგარის გვარი აერთიანებს 8 სახეობას. ყველა სახეობა დიპლოიდურია ($2n=16$) [UPOV, 2007; UPOV, 2011]. საქართველოში გვხვდება მხოლოდ ჩვეულებრივი გარგარის (*Prunus armeniaca* L.) სახეობიდან წარმოშობილი ჯიშები და ჭერმის (გარგარის ადგილობრივი ფორმა, რომელიც წვრილი ნაყოფებითა და მწარე კურკიანი ნაყოფებით ხასიათდება) ფორმები [კვალიაშვილი, 2001; ბობოქაშვილი და მერია, 2010; საქართველოს აგრობიომრავალფეროვნება, 2015].

გარგარი მეტად სასარგებლო და არომატული ნაყოფის მქონე ხილია, რომელსაც აქვს როგორც სადესერტო დანიშნულება, ასევე ფართო გამოყენება გადასამუშავებლად. მისგან ამზადებენ საუკეთესო ხარისხის ჩირს, წვენებს, ჯემებს და სხვ. [Ercisli, 2009; Pomologia, 1997; მეხილეობის აგროწესები, 1986]. თესლი შეიცავს ცხიმოვან ზეთს, რომელიც წარმატებით გამოიყენება ფარმაცოლოგიაში [Imrak et al., 2021].

გარგარის ნაყოფები გამოირჩევა თავისი კვებითი ღირებულებით. ისინი მდიდარია ნახშირწყლებით (8–15 %), მინერალური ნივთიერებებით, ვიტამინებით, ფერმენტებითა და ჯანმრთელობისთვის სასარგებლო სხვა ნივთიერებებით [Gurrieri et al., 2001; Burgos et al., 1991; Polat & Caliskan, 2010]. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ნაყოფებში ბეტა-კაროტინისა და კალიუმის შემცველობას, რომლებიც ადამიანისთვის ადვილად ასათვისებელ ფორმებშია წარმოდგენილი [Çuhaci et al., 2021; Bianco et al., 2010].

გარგარი კულტივირებულია მსოფლიოს თითქმის ყველა კონტინენტზე. 2022 წელს მისმა მსოფლიო წლიურმა წარმოებამ შეადგინა დაახლოებით 3,86 მილიონი ტონა [FAOSTAT, 2022; Ercisli, 2009]. გარგარის მსხვილი მწარმოებელი ქვეყნებია იტალია, არგენტინა, მაროკო და ესპანეთი. წარმოების ლიდერია თურქეთი (803 000 ტონა, 21 %), შემდეგ მოდის უზბეკეთი (451 000 ტონა, 11,7 %), ირანი (306 000 ტონა), იტალია (230 000 ტონა) და ალჟირი (204 000 ტონა) [FAOSTAT, 2022; Angmo et al., 2023].

საქართველოში 2022 წელს დაფიქსირდა 2 600 ტონა გარგარის წარმოება. ეს მაჩვენებელი თითქმის 30 %-ით მეტი იყო 2021 წელთან შედარებით (2 000 ტონა) [GEOstat, 2023; Maghlakelidze et al., 2021]. გარგარის გავრცელება საქართველოში ძირითადად თვალსაჩინოა აღმოსავლეთ რეგიონებში: ქართლში (გორი, კასპი, თბილისის გარეუბნები) და კახეთში (თელავი, გურჯაანი, ლაგოდეხი) [კვალიაშვილი, 2001; საქართველოს აგრობიომრავალფეროვნება, 2015]. თუმცა, სხვა კურკოვანებთან

შედარებით, მისი წარმოება შეზღუდულია, რადგან გარგარი განსაკუთრებით მგრძნობიარეა გაზაფხულის გვიანი წაყინვებისა და სოკოვანი დაავადებების მიმართ [Programm, 1999; Paunovic & Paunovic, 1995]. გარგარის გავრცელებულ ჯიშებს შორის ადგილობრივი „ალიპრიალა“ და სომხური წარმოშობის „შალახი“ დომინირებს [კვალიაშვილი, 2001; ბობოქაშვილი და ძერია, 2010]. ბოლო წლების განმავლობაში რამდენიმე უცხოური ჯიში შემოტანილი იქნა საქართველოში, მათ შორის „ნინფა“, რომელიც გამოირჩევა ადრეულობითა და კომერციული თვისებებით [Maghlakelidze et al., 2021; Angmo et al., 2023].

კვლევის მიზანი

გარგარის ახალი, პერსპექტიული ჯიშის „ნინფას“ კომპლექსური საველე და ლაბორატორიული შესწავლა საქართველოს მეხილეობის კლასიკურ სამრეწველო ზონაში – ქართლში [Maghlakelidze et al., 2021; Polat & Caliskan, 2010; Milatovic et al., 2016]. ინტროდუცირებული ჯიშის „ნინფას“ აგრონომიული და კომერციული თვისებებების შესწავლა მეტად მნიშვნელოვანი და აქტუალურია [Licznar Małańczuk & Sosna, 2005; Plant Genetic Resources, 2021]. კვლევის საფუძველზე შესაძლებელია ჯიშის რეკომენდება ფერმერებისათვის მეხილეობის ძირითად სამრეწველო ზონებში გავრცელების მიზნით [Maghlakelidze et al., 2021; Angmo et al., 2023].

კვლევის მეთოდика

კვლევის ობიექტს წარმოადგენდა იტალიური წარმოშობის ჯიში „ნინფა“, რომელიც მიღებულია 1981 წელს ბოლონიის უნივერსიტეტში (University of Bologna) ჰიბრიდიზაციით (Ouardi × Tirynthos) [Zhebentyayeva et al., 2012; Polat & Caliskan, 2010]. საქართველოში აღნიშნული ჯიში პირველად ინტროდუცირებულია 2012 წელს ვაზისა და ხეხილის სარგავი მასალის წარმოების ეროვნული ცენტრის (აიპ „აგრო“) მიერ. ჯიშის პირველადი შესწავლა ჩატარდა 2020–2024 წლებში სოფლის მეურნეობის სამეცნიერო-კვლევითი ცენტრის საკოლექციო ბაღში (სოფ. ჯიდაურა, მცხეთის მუნიციპალიტეტი), რომელიც გაშენებულია 2012 წელს [Maghlakelidze et al., 2021; ბობოქაშვილი და ძერია, 2010]. ბაღის გაშენების სქემა – 5,0 მ × 2,5 მ. დაკვირვება წარმოებდა ერთგვაროვანი სტანდარტული აგროფონის პირობებში მყოფ 15 სამოდულო მცენარეზე [Programm, 1999; UPOV, 2011].

სოფელი ჯიდაურა ხასიათდება ზომიერი, თბილი კლიმატით, ზომიერი ტენიანობით, ნაწილობრივ ცივი ზამთრით და ცხელი ზაფხულით [Maghlakelidze et al., 2021; საქართველოს აგრობიომრავალფეროვნება, 2015]. ჰაერის საშუალო მრავალწლიური ტემპერატურა შეადგენს 10,6–10,8 °C, ყველაზე ცხელი თვეებია ივლისი და აგვისტო. საშუალო ტემპერატურა ამ პერიოდში აღწევს 22,3–22,8 °C, აქტიურ ტემპერატურათა ჯამი (>5 °C) Σ 3540–3870 °C, ხოლო წლიური ნალექები 520–590 მმ ფარგლებშია [Maghlakelidze et al., 2021; მეხილეობის აგროწესები, 1986].

საცდელ ნაკვეთში გავრცელებულია მდელოს ყავისფერი ნიადაგები, მარცვლოვან-კომპოვანი სტრუქტურით, რომელსაც ახასიათებს ფხვიერი აგებულება, ალაგ-ალაგ ქვიან-კენჭოვანი ხირხატიანობა. მას აქვს კარგი ფიზიკური თვისებები და საკმარისად ინარჩუნებს ტენიანობას. სიღრმის მატებასთან ერთად ხასიათდება მაღალი კარბონატობით (18–20 %) და ტუტე რეაქციით ($\text{pH} = 7,8\text{--}8,1$). ორგანული ნივთიერება აღწევს 1,4–1,6 %, ნიადაგი ღარიბია აზოტითა და ფოსფორით, კალიუმით უზრუნველყოფა საშუალოა [Maghlakelidze et al., 2021; მეხილეობის აგროწესები, 1986].

კვლევის მეთოდით გათვალისწინებული იყო მცენარის ძირითადი ორგანოების (ხე, ყლორტი, ყვავილი, ფოთოლი, ნაყოფი) აღწერა UPOV-ის დესკრიპტორის მიხედვით [UPOV, 2007; UPOV, 2011]. აღირიცხა ფენოლოგიური ფაზების (კვირტების გაშლა, ყვავილობა – დაწყება, მასიური, დასასრული; ნაყოფის მომწიფება – დაწყება, მასიური; ფოთოლცვენა – დასასრული) მიმდინარეობის კალენდარული ვადები BBCH სკალის მოდიფიცირებული ვარიანტის მიხედვით [Meier, 2001; Vachun, 2002].

შესწავლილი იქნა ჯიშის ბიოლოგიურ-სამეურნეო მახასიათებლები. აღირიცხა ხის სიმაღლე, ვარჯის მოცულობა, მოსავალი (ერთი ხის საშუალო მოსავლიანობა კგ-ში), დაავადებების მიმართ მიდრეკილების ხარისხი (მცენარის ცალკეულ ორგანოებზე შეფასდა თვალზომით, 5-ბალიანი სისტემით: 0 ბალი – დაზიანება არ არის, 5 ბალი – დაზიანებულია ორგანოს 50 %-ზე მეტი) ხეხილოვანი, კენკროვანი და კაკლოვანი კულტურების ჯიშთაშესწავლის მეთოდის მიხედვით [Programm, 1999; Pomologia, 1997]. საკონტროლოდ გამოყენებულ იქნა საადრეო სიმწიფის ჯიში „ალიპრიალა“ [კვალიაშვილი, 2001; Ristevski & Mitreski, 1986].

ჩატარდა ნაყოფის მექანიკური და ბიოქიმიური ანალიზი. განისაზღვრა: ნაყოფის მასა (გ) – ანალიზური სასწორით; სიდიდე (სიმაღლე (მმ) და სიგანე (მმ)) – ციფრული შტანგენფარგალით; ხსნადი მშრალი ნივთიერება (Brix, %) – ციფრული რეფრაქტომეტრით „Atago“; საერთო შაქარი და მჟავიანობა – აციდომეტრული მეთოდით, ავტომატური ტიტრატორით „Hanna“ [Bianco et al., 2010; Çuhacı et al., 2021; Gurrieri et al., 2001; Licznar Małańczuk & Sosna, 2005].

ნაყოფის დეგუსტაციური შეფასება მოხდა დახურული ანკეტირების გზით, ნაყოფის მოხმარებითი სიმწიფის ფაზაში, მოდიფიცირებული 10-ბალიანი სისტემით, 10 მახასიათებლის მიხედვით: ვიზუალური (ფერი, ზომა, სასაქონლო სახე), ორგანოლეპტიკური (რბილობის სიმკვრივე, წვნიანობა, სიტკბო, მჟავიანობა, გემო) და საერთო [Angmo et al., 2023; Imrak et al., 2021; Ruiz & Egea, 2008].

მონაცემების სტატისტიკური დამუშავება და ჯიშის მახასიათებლებს შორის სხვაობა წლების მიხედვით დადასტურდა ერთფაქტორიანი ANOVA-ს სტატისტიკური ანალიზით ($\text{LSD} = 0,05$) [Programm, 1999; Plant Genetic Resources, 2021].

კვლევის შედეგები

ფენოლოგიური ფაზების მიმდინარეობა

ფენოლოგიური ფაზების მიმდინარეობაზე ჩატარებული ოთხი წლის (2021–2024) დაკვირვებების შედეგად დადგინდა, რომ განვითარების ფაზების კალენდარული ვადები მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ჯიშის ბიოლოგიურ თავისებურებებზე და მიმდინარე წლის კლიმატურ პირობებზე [Vachun, 2002; Burgos et al., 1991; Milatovic et al., 2016].

ფენოფაზების კალენდარულ ვადებზე ოთხწლიანი (2021–2024) დაკვირვების შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში 1.

დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ ჯიში „ნინფა“ ვეგეტაციას (კვირტების დაბერვა) საშუალოდ იწყებს მარტის პირველ დეკადაში. კვლევის პერიოდში ყველაზე ადრეული ვეგეტაცია დაფიქსირდა 2023 წელს (1 მარტი), ხოლო ყველაზე გვიან – 2021 წელს (5 მარტი). ცვალებადობამ შეადგინა დაახლოებით 4 დღე.

საშუალო მონაცემებით, ჯიში ყვავილობას იწყებს მარტის მეორე დეკადაში (11–13 მარტი), ხანგრძლივობა შეადგენს 12–14 დღეს (საშუალოდ 13 დღე). „ნინფას“ ახასიათებს უხვი ყვავილობა, რომლის სიძლიერე შეფასდა საშუალოდ 4,7 ბალით. ყველაზე ადრე ყვავილობა აღინიშნა 2023 წელს (10–12 მარტი), ხოლო ყველაზე გვიან – 2021 წელს (12–14 მარტი).

ჯიშის „ნინფა“ ფენოლოგიური ფაზების კალენდარული ვადები (2021–2024 წწ.)

ცხრილი 1

წელი	კვირტების დაბერვა	ყვავილობა (დასაწყისი)	ყვავილობა (მასობრივი)	ყვავილობა (დასასრული)	ყვავილობის სიძლიერე (1–5 ბალი)	ხანგრძლივობა (დღე)	სიმწიფის პერიოდი	ფოთოლცვენა
2021	05.03	12–14.03	16–19.03	25–27.03	4.8	14	06–09.06	24–28.10
2022	03.03	11–13.03	16–18.03	23–25.03	4.6	13	02–05.06	20–25.10
2023	01.03	10–12.03	15–17.03	22–24.03	4.4	12	30.05–02.06	16–20.10
2024	04.03	12–14.03	17–19.03	24–26.03	5.0	13	04–07.06	22–26.10
საშ.	03.03	11–13.03	16–18.03	23–25.03	4.7	13	03–06.06	21–25.10

უცხოელი ავტორების მონაცემებით, „ნინფა“ ყვავილობას იწყებს მარტის ბოლოს ან აპრილის დასაწყისში, ხანგრძლივობით 10–12 დღე [Scorza et al., 2007; Fideghelli et al., 2010; Milatović et al., 2016]. ჩვენს პირობებში მიღებული მონაცემები (ადრეული ყვავილობა) შეესაბამება ჯიშის ბიოლოგიურ თავისებურებებს, ხოლო უფრო ხანგრძლივი ყვავილობის პერიოდი (12–14 დღე) შესაძლოა განპირობებული იყოს ადგილობრივი კლიმატური პირობებით.

სიმწიფის პერიოდის მონაცემების ანალიზით დადგინდა, რომ ნაყოფის სრული სიმწიფე იწყება ივნისის პირველ დეკადაში (საშუალოდ 03–06 ივნისი). ყველაზე ადრე სიმწიფე დაფიქსირდა 2023 წელს (30 მაისი), ყველაზე გვიან – 2021 წელს (6 ივნისი). ლიტერატურის მიხედვით, „ნინფას“ ნაყოფის სიმწიფე მაისის ბოლოდან ივნისის პირველ ნახევრამდეა, რაც ემთხვევა ჩვენს მონაცემებს [Ruiz et al., 2010; Bassi et al., 2014].

ფოთოლცვენა აღინიშნება ოქტომბრის მესამე დეკადაში და გრძელდება ნოემბრის შუა რიცხვებამდე, რაც შეესაბამება ტიპურ ფენოლოგიურ ციკლს [Hartmann et al., 2011].

ცდის პერიოდში „ნინფას“ ფენოფაზების კალენდარული ვადები შედარებული იქნა საკონტროლო ჯიშ „ალიპრიალასთან“. ოთხი წლის (2021–2024) საშუალო მონაცემები მოცემულია ცხრილში 2.

ჯიშების (ნინფა, ალიპრიალა) ფენოლოგიური მაჩვენებლების შედარება (საშუალოდ 2021–2024 წწ.)

როგორც ცხრილიდან ირკვევა, „ნინფა“ გამოირჩევა ვეგეტაციისა და სიმწიფის საადრეო პერიოდით. „ნინფას“ ყვავილობა უფრო ადრე იწყება და ასევე გრძელდება ოდნავ უფრო ხანგრძლივად.

ჯიში „ნინფა“ ყვავილობას იწყებს 6–7 დღით ადრე საკონტროლო ჯიშთან („ალიპრიალა“) შედარებით. ყვავილობის პერიოდი ხანგრძლივია – 12–14 დღე (სოფ. ჯილაურას პირობებში). ჯიში თვითფერტილია, მაგრამ მაღალი მოსავლის მისაღებად მოითხოვს ჯვარედინ დამტვერვას. საუკეთესო დამამტვერიანებელი ჯიშია „სან კასტრეზე“.

ჯიშების (ნინფა, ალიპრიალა) ფენოლოგიური მაჩვენებლების შედარება (საშუალოდ 2021–2024 წწ.)

ცხრილი 2

ჯიში	კვირტის დაბერვა	ყვავილობის დაწყება	ყვავილობა მასობრივი	ყვავილობა (დასასრული)	ყვავილობის ხანგრძლივობა (დღე)	ნაყოფის სიმწიფე	საკონტროლო ლთან შედარება
ნინფა	03.03	11-13.03	16-18.03	23-25.03	12.5	03-06.06	- 28-30 დღე
ალიპრიალა	10.03	16-19.03	20-23.03	24-29.03	9-10	30.06-05.07	

როგორც ცხრილიდან ირკვევა, „ნინფა“ გამოირჩევა ვეგეტაციისა და სიმწიფის საადრეო პერიოდით. „ნინფას“ ყვავილობა უფრო ადრე იწყება და ასევე გრძელდება ოდნავ უფრო ხანგრძლივად.

ჯიში „ნინფა“ ყვავილობას იწყებს 6–7 დღით ადრე საკონტროლო ჯიშთან („ალიპრიალა“) შედარებით. ყვავილობის პერიოდი ხანგრძლივია – 12–14 დღე (სოფ. ჯილაურას პირობებში). ჯიში თვითფერტილია, მაგრამ მაღალი მოსავლის მისაღებად მოითხოვს ჯვარედინ დამტკვერვას. საუკეთესო დამამტკვერიანებელი ჯიშია „სან კასტრეზე“.

აქტიური ტემპერატურების ჯამი ყვავილობის პერიოდში შეადგენს $\Sigma(>5^{\circ}\text{C}) \approx 85-115^{\circ}\text{C}$. საკონტროლო ჯიშთან შედარებით, „ნინფა“ 28–30 დღით ადრე მწიფდება.

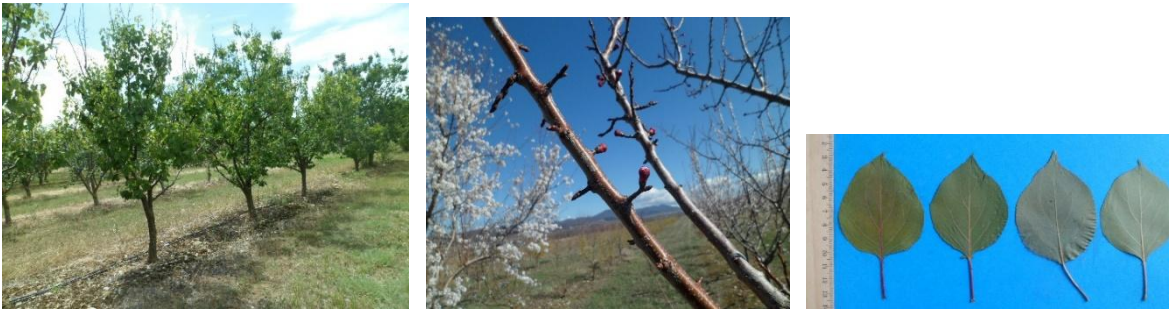
შედეგების ანალიზმა აჩვენა, რომ „ნინფა“ ვეგეტაციასა და ყვავილობას საშუალოდ 6–7 დღით ადრე იწყებს, ხოლო ნაყოფის სიმწიფის პერიოდი 28–30 დღით უსწრებს საკონტროლო ჯიშს. მსგავსი განსხვავება დასტურდება სხვა ავტორების მიერაც, რომლებმაც „ნინფა“ შეაფასეს როგორც საადრეო სიმწიფის ჯიში [Ropan et al., 2015; Milatović et al., 2016].

ჯიშის საადრეო ყვავილობა ზრდის გაზაფხულის ყინვებით დაზიანების რისკს, ხოლო საადრეო სიმწიფის პერიოდი ზრდის მისი გაყიდვის პოტენციალს.

ვეგეტატიური ზრდის და განვითარების თავისებურებები

ხის ფენოტიპური მაჩვენებლების შესწავლის შედეგად დადგინდა, რომ ჯიში „ნინფა“ ხასიათდება საშუალო ზრდის სიძლიერით. ვარჯი ზემოთ მიმართული, ნაკლებად ჩახშირებული, ზომიერი განტოტვით. ძირითადად მსხმოიარობს ერთწლიან ნაზარდებზე და სანაყოფე დეზებზე (სურ. 1). მსხმოიარობაში შედის დარგვიდან მე-3–4 წელს (საძირე MIR 29C). მოსავლიანობა სტაბილურად საშუალოა; კვლევის მიხედვით, საშუალო მოსავალი შეადგენს 18–22 კგ/ხე (ცხრილი 3).

ყლორტები ძლიერია, მოწითალო-ყავისფერი. ფოთოლი საშუალო სიდიდის, ინტენსიური მწვანე ფერის. ფირფიტის ზომა საშუალო, მომრგვალო-ოვალური ფორმის, მოკლე და განიერი წვერით. კიდის დაკბილვა – ორმაგად მრგვალად დაკბილული. ყუნწი საშუალო სიგრძისა და სისქის. ნექტარის ჯირკვლები არ გააჩნია. ყვავილი დიდი ზომისაა, გვირგვინის ფურცლები ფართე ოვალური ფორმის, თეთრი ფერის, ერთმანეთზე გადადებული.



სურათი 1. ხე, ტოტი, ფოთოლი

ჯიშის დაავადებებისადმი სავსე გამძლეობამ აჩვენა, რომ სტანდარტული აგროფონის პირობებში ჯიში შედარებით ნაკლებად ზიანდება კლასტეროსპოროზით – დაზიანების ხარისხი 1,4 ბალი. ჯიში საკმაოდ გამძლეა კლასტეროსპოროზის მიმართ.

კვლევამ გვიჩვენა, რომ გარგარის ორივე ჯიშს – „ნინფას“ და „ალიპრიას“ – გააჩნია მაღალი პროდუქტიულობა, თუმცა კონკრეტულ წლებში მოსავლიანობა მცირედ მერყეობს, რაც სავარაუდოდ კლიმატური პირობებით ან აგროტექნიკური ფაქტორებითაა განპირობებული.

როგორც ცხრილი 3-დან ჩანს, „ნინფას“ 10 წლის ხის სიმაღლემ შეადგინა 294 სმ; შტამბის განივკვეთის ფართობი – 40,24 სმ²; ვარჯის მოცულობა – 96,76 მ³.

№	ჯიში	მოსავალი (კგ)				საშ. მოსავალი (კგ/ხე)	მოსავლის ეფექტიანობა	
		2021	2022	2023	2024		(კგ/სმ²)	(კგ/მ³)
1	ნინფა	15.0±0.1 6 ^b	21.0±0.2 0 ^a	19.5±0.1 7 ^a	20.2±0.1 2 ^a	18.93±0.1 1 ^a	0.34±0.0 1 ^a	0.10±0.0 4 ^a
2	ალიპრია ლა	17.0±0.2 4 ^a	22.0 ±12 ^b	20.6±0.1 1 ^b	21.5±0.0 2 ^a	20.38±0.0 8 ^a	0.29±0.0 4 ^a	0.11±0.2 8 ^a

„ნინფას“ მოსავალი 2021 წელს იყო 15,0 კგ/ხე, ხოლო მაქსიმუმს 2024 წელს მიაღწია – 20,2 კგ/ხე. ოთხწლიანი პერიოდის საშუალო მოსავალმა შეადგინა 18,93 კგ/ხე, რაც მიუთითებს ჯიშის სტაბილურობაზე. მოსავლის ეფექტიანობა შეადგენს 0,34 კგ/სმ², ხოლო მოსავლის მაჩვენებელი ვარჯის მოცულობაზე – 0,10 კგ/მ³, რაც მიუთითებს ჯიშის კარგ ადაპტირებულობაზე მოცულობითი ზრდის მიმართ (ცხრილი 3).

„ალიპრილას“ მოსავალი 2021 წელს იყო 17,0 კგ/ხე, ხოლო 2024 წელს გაიზარდა 21,5 კგ/ხემდე. ოთხწლიანი პერიოდის საშუალო მოსავალი შეადგენს 20,38 კგ/ხე, რაც ოდნავ აღემატება „ნინფას“ მაჩვენებელს. მოსავლის ეფექტიანობა შეადგენს 0,29 კგ/სმ², ხოლო ვარჯის მოცულობაზე – 0,11 კგ/მ³.

ჯიშების მოსავლიანობის შედარებითი ანალიზიდან ჩანს, რომ „ალიპრიალა“ გამოირჩევა ოდნავ მაღალი საერთო მოსავლიანობით (20,38 კგ/ხე), თუმცა „ნინფას“ აქვს უფრო მაღალი მოსავლის ეფექტიანობა (0,34 კგ/სმ²), რაც სასურველია ინტენსიური ტიპის ბაღებში მცირე ზომის ხეებისათვის (ცხრილი 3).

მსგავსი ტენდენციები დასტურდება უცხოელი ავტორების მონაცემებით. Milatović და სხვ. (2016) აღნიშნავენ, რომ „ნინფა“ ხასიათდება საშუალო ზრდის სიძლიერით და სტაბილური მოსავლიანობით, რომელიც მერყეობს 15–23 კგ/ხე ფარგლებში, ხოლო მოსავლის ეფექტიანობა შეესაბამება ადგილობრივ კლიმატურ პირობებს. Ropan და სხვ. (2015) და Ruiz და სხვ. (2010) მიუთითებენ, რომ საშუალო მოსავლიანობა მჭიდროდ არის დაკავშირებული სასოფლო-სამეურნეო ტექნოლოგიებთან და კლიმატურ პირობებთან. Bubán (2000) აღნიშნავს, რომ მოსავლის ეფექტიანობა და ჯიშის ზრდის მახასიათებლები

მნიშვნელოვანი ფაქტორებია ინტენსიური მეზღვრობისთვის, რაც სრულად შეესაბამება ჩვენს დაკვირვებებს.

ნაყოფის პომოლოგიური აღწერა, მექანიკური და ქიმიური ანალიზი

ნაყოფების შესწავლის შედეგები გვიჩვენებს, რომ ორივე ჯიში – „ალიპრიალა“ და „ნინფა“ – გამოირჩევა კარგი აგრობიოლოგიური მაჩვენებლებით, თუმცა მათ შორის შეინიშნება რიგი მახასიათებლების სხვაობა, რაც ჯიშების განსხვავებულ ბიოლოგიურ თავისებურებებს უკავშირდება.

ჯიში „ალიპრიალა“ ხასიათდება მსხვილი ნაყოფით (76,0 გ). ნაყოფი მოგრძო ელიფსური ფორმისაა – სიგრძე 6,8 სმ, სიგანე 5,25 სმ, სისქე 4,80 სმ (სურ. 2). ფორმის ინდექსი მაღალია (6,4 %), რაც მიუთითებს წაგრძელებულ ფორმაზე. ნაყოფის გამოსავლიანობა 92,2 %-ს შეადგენს, კურკის საშუალო მასა – 3,1 გ (ცხრილი 4).



სურათი 2. ნაყოფი, კურკა

ჯიში „ნინფა“ გამოირჩევა საშუალო მასის ნაყოფით (62,0 გ). ფორმის თვალსაზრისით, ნაყოფი სიმეტრიული, ოვალური (მომრგვალო) ფორმისაა: სიგრძე 5,20 სმ, სიგანე 4,80 სმ, სისქე 4,20 სმ. ფორმის ინდექსი 5,2 % შეადგენს. ნაყოფის გამოსავლიანობა 90,0 %-ია, კურკის მასა – 2,8 გ.

ნაყოფის პომოლოგიური მაჩვენებლები

ცხრილი 4

№	ჯიში	ნაყოფის მასა (გ)	სიგრძე (სმ)	სიგანე (სმ)	სისქე (სმ)	ფორმის ინდ. (%)	კურკის მასა (გ)	გამოსავლ. (%)
1	ალიპრიალა	76.0±0.20c	6.8±0.15b	5.25±0.28c	4.80±0.08a	6.4±0.02d	3.1±0.11c	92.2±0.01d
2	ნინფა	62.0±0.20b	5.20±0.14b	4.80±0.30c	4.20±0.09a	5.2±0.02d	2.8±0.10c	90.0±0.02d

ქიმიური შემადგენლობისა და სამგემოვნებლო თვისებების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ორივე ჯიში გამოირჩევა დამაკმაყოფილებელი ქიმიური შემადგენლობითა და

ორგანოლეპტიკური მახასიათებლებით, თუმცა მათ შორის შეინიშნება გარკვეული სხვაობები.

ნაყოფის ქიმიური და ორგანოლეპტიკური მაჩვენებლები

ცხრილი 5

№	ჯიში	ხსნადი მშრალი ნივთ. TSS (%)	საერთო შაქრები (%)	საერთო მჟავიანობა (%)	გემოს შეფასება (1–5 ქულა)	ვიზუალური შეფ. (1–5 ქულა)
1	ალიპრიალა	14.2±0.10b	8.8±0.10b	1.30±0.18a	4.8	5.0
2	ნინფა	12.5±0.18c	8.0±0.13c	1.33±0.11a	4.4	4.6

ხსნადი მშრალი ნივთიერებების შემცველობის (TSS) მიხედვით, „ალიპრიალას“ მაჩვენებელია 14,2 %, რაც მის შედარებით მეტ სიტკბოზე და მაღალ სასურსათო ღირებულებაზე მიუთითებს. „ნინფას“ TSS შეადგენს 12,5 %-ს, რაც კომერციული გამოყენებისათვის მისაღებ ზღვარს სწვდება.

საერთო შაქრების რაოდენობა ასევე მაღალია „ალიპრიალაში“ (8,8 %), „ნინფაში“ კი ოდნავ დაბალია (8,0 %), თუმცა ინარჩუნებს სასურველ ბალანსს შაქარსა და მჟავიანობას შორის.

მჟავიანობის მაჩვენებელი ორივე ჯიშში თითქმის იდენტურია (1,30 % – 1,33 %), რაც მეტყველებს ჰარმონიულ გემოზე, სადაც არ დომინირებს არც სიმჟავე და არც სიტკბო.

ორგანოლეპტიკური შეფასებით, „ნინფა“ კონკურენტუნარიანია: გემო – 4,4 ქულა, ვიზუალური შეფასება – 4,6 ქულა. მისთვის დამახასიათებელია შედარებით მრგვალი ფორმა, ზომიერად ტკბილი გემო და მსუბუქი არომატი, რაც ხშირად განიხილება როგორც განსაკუთრებული კომბინაცია დესერტული მოხმარებისათვის (Scorza et al., 2007; Hartmann et al., 2011).

დისკუსია

ჩატარებული ოთხწლიანი (2021–2024) კვლევის შედეგები ადასტურებს, რომ გარგარის ინტროდუცირებული ჯიში „ნინფა“ წარმატებით ეგუება შიდა ქართლის (სოფ. ჯილაურა, მცხეთის მუნიციპალიტეტი) კლიმატურ და ნიადაგურ პირობებს და გამოირჩევა მაღალი სასოფლო-სამეურნეო ღირებულებით.

ფენოლოგიური ფაზები და ადაპტაცია. კვლევის მონაცემებით, „ნინფა“ ვეგეტაციას საშუალოდ იწყებს მარტის პირველ დეკადაში (03.03), ყვავილობა იწყება 11–13 მარტს, ხოლო ნაყოფის სრული სიმწიფე – ივნისის პირველ დეკადაში (03–06 ივნისი).

საკონტროლო ჯიშ „ალიპრიალასთან“ შედარებით, „ნინფა“ ვეგეტაციასა და ყვავილობას 6–7 დღით ადრე იწყებს, ხოლო ნაყოფი 28–30 დღით ადრე მწიფდება. ეს მონაცემები სრულად შეესაბამება Milatović და სხვ. (2016) მიერ სერბეთის პირობებში მიღებულ შედეგებს, სადაც „ნინფა“ ასევე დახასიათებულია საადრეო სიმწიფის ჯიშად. Ropan და სხვ. (2015) და Ruiz და სხვ. (2010) ასევე მიუთითებენ „ნინფას“ გამოკვეთილ საადრეოობაზე სხვა ევროპულ ჯიშებთან შედარებით, რაც სრულად ემთხვევა ჩვენი კვლევის დასკვნებს.

აღსანიშნავია, რომ ყვავილობის ხანგრძლივობა ჩვენს პირობებში (12–14 დღე) ოდნავ გრძელია, ვიდრე Fideghelli და სხვ. (2010) მიერ იტალიაში დადგენილი 10–12 დღე. ეს განსხვავება, სავარაუდოდ, განპირობებულია ადგილობრივი კლიმატური პირობებით – კერძოდ, ზომიერი და შედარებით ცივი გაზაფხულის პერიოდით, რომელიც ხელს უწყობს ყვავილობის გახანგრძლივებას. ადრეული ყვავილობა ამ ჯიშისთვის ორმხრივ მნიშვნელობას ატარებს: ერთი მხრივ, ზრდის გაზაფხულის გვიანი ყინვებით დაზიანების რისკს, მეორე მხრივ კი – უზრუნველყოფს ბაზარზე ადრეულ გამოსვლას, რაც მნიშვნელოვანი კომერციული უპირატესობაა (Burgos et al., 1991; Vachun, 2002).

ზრდა, განვითარება და მოსავლიანობა. „ნინფა“ ხასიათდება საშუალო ზრდის სიძლიერით – 10 წლის ასაკის ხის სიმაღლე შეადგენს 294 სმ-ს, ვარჯის მოცულობა – 96,76 მ³-ს. ოთხწლიანი კვლევის განმავლობაში საშუალო მოსავალმა ერთ ხეზე შეადგინა 18,93 კგ, რაც ემთხვევა Milatović და სხვ. (2016) მიერ დადგენილ 15–23 კგ/ხე დიაპაზონს. მოსავლის ეფექტიანობა (0,34 კგ/სმ²) „ნინფასთვის“ უფრო მაღალია, ვიდრე „ალიპრიალასთვის“ (0,29 კგ/სმ²), რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ინტენსიური ბაღებისათვის, სადაც სასურველია ვარჯის ოპტიმალური სივრცის გამოყენება (Bubán, 2000). ამ თვალსაზრისით, „ნინფა“ უფრო მეტად შეესაბამება თანამედროვე ინტენსიური მეხილეობის მოთხოვნებს, თუმცა „ალიპრიალა“ ინარჩუნებს უპირატესობას საერთო მოსავლიანობის ოდნავ მაღალი მაჩვენებლით (20,38 კგ/ხე).

ნაყოფის ხარისხი. „ნინფას“ ნაყოფი ხასიათდება საშუალო მასით (62,0 გ), სიმეტრიული ოვალური ფორმით და კარგი გამოსავლიანობით (90,0 %), რაც შეესაბამება Angmo და სხვ. (2023) და Polat & Caliskan (2010) მიერ მოყვანილ პომოლოგიურ მონაცემებს.

ბიოქიმიური ანალიზის მიხედვით, ხსნადი მშრალი ნივთიერებების შემცველობა „ნინფაში“ შეადგენს 12,5 %-ს, საერთო შაქრები – 8,0 %-ს, ხოლო მჟავიანობა – 1,33 %-ს. Gurrieri და სხვ. (2001) და Bianco და სხვ. (2010) მიხედვით, გარგარის ჯიშებში ხსნადი მშრალი ნივთიერებების 12–16 %-იანი შემცველობა კომერციული გამოყენებისათვის ნორმად ითვლება, რაც „ნინფას“ მიღებული მაჩვენებლები სრულად მოიცავს. შაქარსა და მჟავიანობას შორის ბალანსი (8,0 % / 1,33 %) მეტყველებს ჰარმონიულ, დესერტული ტიპის გემოზე, რომელიც განსაკუთრებით ფასდება სამომხმარებლო ბაზარზე (Scorza et al., 2007; Hartmann et al., 2011). ორგანოლექტიკური შეფასებით, „ნინფამ“ მოიპოვა 4,4

ქულა გემოში და 4,6 ქულა ვიზუალურ მახასიათებლებში, რაც ადასტურებს მის კონკურენტუნარიანობას ბაზარზე.

დაავადებებისადმი გამძლეობა. კვლევის პერიოდში „ნინფა“ კლასტეროსპოროზის (*Wilsonomyces carpophilus*) მიმართ შეფასდა 1,4 ბალით (5-ბალიანი სკალით), რაც შედარებით დაბალ მიდრეკილებაზე მიუთითებს. Licznar Małańczuk & Sosna (2005) ქვემო სილვუიის პირობებში ჩატარებული კვლევის მიხედვით, „ნინფა“ ამ დაავადების მიმართ ზომიერ გამძლეობას ამჟღავნებს, რაც ემთხვევა ჩვენს მონაცემებს. ეს მახასიათებელი მნიშვნელოვნად ამცირებს ფუნგიციდური დამუშავების სიხშირეს და, შესაბამისად, წარმოების ხარჯებს, რაც მნიშვნელოვანი ეკონომიკური უპირატესობაა ფერმერებისათვის (Programm, 1999; Paunovic & Paunovic, 1995).

საერთო შეფასება. ჯიშ „ნინფას“ კომპლექსური შეფასება – საადრეო სიმწიფის პერიოდი, სტაბილური მოსავლიანობა, კარგი ნაყოფის ხარისხი და ზომიერი გამძლეობა დაავადებების მიმართ – მოწმობს, რომ იგი წარმოადგენს პერსპექტიულ ჯიშს, რომელიც შეიძლება წარმატებით დაინერგოს ქართლის, კახეთისა და მცხეთა-მთიანეთის სამრეწველო ბაღებში. მისი ადრეული სიმწიფის პერიოდი განსაკუთრებით ხელსაყრელია ბაზრის ადრეული მომარაგებისა და მაღალი სასაქონლო ფასის მისაღებად, რაც ამაღლებს ფერმერთა შემოსავლიანობის პოტენციალს. ამასთან, ჯიშის გავრცელება ხელს შეუწყობს ადგილობრივი ჯიშური შემადგენლობის მრავალფეროვნებასა და გარგარის წარმოების გაზრდას საქართველოში, სადაც 2022 წელს მთლიანი წარმოება 2 600 ტონას შეადგენდა (GEOstat, 2023).

დასკვნა

გარგარის (*Prunus armeniaca* L.) ჯიშ „ნინფას“ ბიოლოგიური და სამეურნეო თავისებურებების ოთხწლიანი შესწავლის საფუძველზე შეიძლება გამოიტანოს შემდეგი დასკვნები:

კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ ჯიშში კარგად ეგუება რეგიონში არსებულ კლიმატურ და ნიადაგურ პირობებს. ფენოლოგიური ფაზების კალენდარული ვადები შედარებით საადრეოა. ჯიშში გამოირჩევა გარემო პირობებთან ადაპტაციის მაღალი უნარით.

ჯიშში გამოირჩევა საშუალო ზომის, კომპაქტური ვარჯითა და სტაბილურად მაღალი მოსავლიანობით. ამ მაჩვენებლების მიხედვით, იგი შეიძლება ჩაითვალოს პერსპექტიულ ჯიშად ინტენსიური ტიპის ბაღებისათვის.

ნაყოფის ფიზიკური და ქიმიური მაჩვენებლები – საშუალო ზომა, სიმეტრიული მომრგვალო ფორმა, კარგი საგემოვნო თვისებები – ზრდის ჯიშის კონკურენტუნარიანობასა და საბაზრო ღირებულებას. ჯიშში განსაკუთრებით ღირებულია ტექნოლოგიური გადამუშავებისათვის.

ჯიშის გამძლეობა კლასტეროსპოროზის მიმართ მნიშვნელოვანი უპირატესობაა, რაც მცენარეთა დაცვის ხარჯების შემცირების საშუალებას იძლევა.

ჯიშ „ნინფას“ გაშენება მიზანშეწონილია ქართლის კლიმატურ პირობებში, აგრეთვე სხვა რეგიონებში, რომლებსაც აქვთ მსგავსი აგროკლიმატური პირობები. მისი გავრცელება რეკომენდებულია როგორც საკარმიდამო, ისე სამრეწველო ნარგავებში, რაც გაამდიდრებს ადგილობრივ ჯიშურ შემადგენლობას და ხელს შეუწყობს მაღალხარისხიანი პროდუქციის მიღებას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. მეხილეობის აგროწესები. (1986). თბილისი: გამომცემლობა „განათლება“.
2. კვალიაშვილი, ვ. (რედ.) (2001). საქართველოს ხილი (კატალოგი). თბილისი.
3. ბობოქაშვილი, ზ., ძერია, კ. (2010). მეხაღებობა. თბილისი.
4. საქართველოს აგრობიომრავალფეროვნება (კატალოგი). (2015). თბილისი.
5. Angmo, T., Wani, S.H., Wani, A.A., & Mir, J.I. (2023). Pomological evaluation and GT-biplot analysis of promising open pollinated genotypes of apricot (*Prunus armeniaca* L.). *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 22(2), 25–36.
6. Bianco, L.O.R., Massantini, R., Anelli, G., & Botondi, R. (2010). Fruit physical, chemical and aromatic attributes of early, intermediate and late apricot cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 1008–1019.
7. Burgos, L., Egea, J., Guerriero, R., & Valpuesta, V. (1991). Effective pollination period in apricot (*Prunus armeniaca* L.) varieties. *Annals of Applied Biology*, 119, 533–539.
8. Bubán, T. (2000). Flower thinning of apple trees by using the carbohydrate competition model. *International Journal of Horticultural Science*, 6(4), 73–77.
9. Çuhacı, M.A., Aydın, N., & Kafkas, N.E. (2021). Fruit quality and biochemical characteristics of new early ripening apricots of Turkey. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(1), 841–850.
10. Ercisli, S. (2009). Apricot culture in Turkey. *Scientific Research and Essays*, 4, 715–719.
11. FAOSTAT. (2022). <http://faostat.fao.org/default.aspx>
12. Gurrieri, F., Audergon, J.M., Albagnac, G., Reich, M., & Causse, M. (2001). Soluble sugars and carboxylic acids in ripe apricot fruit as parameters for distinguishing different cultivars. *Euphytica*, 117, 183–189.

13. Imrak, M., Akbudak, B., & Sen, F. (2021). Volatile compounds of new promising dried apricot genotypes. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(1), 12257.
14. Licznar Małańczuk, M., & Sosna, I. (2005). Evaluation of several apricot cultivars and clones in the lower Silesia climatic conditions. Part I: Blossoming of trees, yield and fruit quality. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 13, 39–48.
15. Maghlakelidze, E., Bobokasvili, Z., Kakashvili, V. (2021). Biological and Agricultural Characterization of Apricot (*Prunus armeniaca* L.) Cultivars in the Eastern part of Georgia. *The Scientific Heritage*, 3(67), 3–10.
16. Martínez Mora, C., Dicenta, F., & Egea, J. (2009). Genetic variability among local apricots (*Prunus armeniaca* L.). *Spanish Journal of Agricultural Research*, 7(4), 855–868.
17. Meier, U. (2001). Growth Stages of Mono and Dicotyledonous Plants. BBCH Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, Bonn.
18. Milatovic, D., Nikolic, D., & Djurovic, D. (2016). Evaluation of some American apricot cultivars in the region of Belgrade. *Acta Horticulturae*, 1139, 175–180.
19. Paunovic, A.S., & Paunovic, S.A. (1995). Investigation of Apricot Germplasm (*Prunus armeniaca* L.) in situ in SFR Yugoslavia. *Acta Horticulturae*, 384, 55–60.
20. Plant Genetic Resources. (2021). Analysis of phenotypic diversity of apricot accessions from Jammu and Kashmir, India. *Plant Genetic Resources*, 19(3), 203–215.
21. Polat, A.A., & Caliskan, O. (2010). Determination of growth and fruit quality parameters of some apricot cultivars in subtropical climate conditions. *Acta Horticulturae*, 862, 320–330.
22. Pomologia, ტ. 3: Абрикос, Персик, Алыча. (1997). რედ. ვ.ა. ანდროიძე. კიევი: „Урожай“.
23. Программа и методика селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур. (1999). რედ. ე.ნ. სეძოვი, ტ.3. ოგოლცოვა. ორიოლი.
24. Ristevski, B., & Mitreski, Z. (1986). Biological and pomological characteristics of some late varieties of apricot in SR Macedonia. *Acta Horticulturae*, 192, 369–376.
25. Ruiz, D., & Egea, J. (2008). Phenotypic diversity and relationships of fruit quality traits in apricot (*Prunus armeniaca* L.) germplasm. *Euphytica*, 163, 143–158.
26. Scorza, R., Callahan, A., Dardick, C., Ravelonandro, M., Polak, J., Malinowski, T., Zagrai, I., Cambra, M., & Kamenova, I. (2007). Genetic engineering of Plum pox virus resistance: 'HoneySweet' plum – from concept to product. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 78(3), 289–290.
27. UPOV. (2007). Apricot species UPOV Code: PRUNU_ARM *Prunus armeniaca* L. TG/70/4. Geneva: International Union for the Protection of New Varieties of Plants.
28. UPOV. (2011). Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability – Apricot (*Prunus armeniaca* L.), TG/70/4.

29. Vachûn, Z. (2002). Variability of phenophase of blossoming and differences in fertile period in apricots. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, L(1), 21–32.
30. Westwood, M.N. (1993). *Temperate-zone pomology: Physiology and culture*. Timber Press.
31. Zhebentyayeva, T., Ledbetter, C., Burgos, L., & Llácer, G. (2012). Apricot. In *Fruit Breeding* (pp. 415–458). Springer.

იმუნოფენოტიკური ცვლილებები კუჭის კანცეროგენეზის დროს: CDX2, SOX2, Ki67 და p53-ის ექსპრესიის ნიმუშები კუჭის კიბოსწინარე დაზიანებებსა და ადენოკარცინომაში

ბექა დანგაძე¹; გიორგი დიდავა²; გიორგი ბურკაძე³; შოთა კეპულაძე⁴;

¹თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის PhD სტუდენტი; ექიმი; ზოგადი ქირურგი; ²თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური ანატომიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი, ³თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი, მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი; ⁴თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი; პათოლოგანატომი; თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი

კუჭის კანცეროგენეზი არის მრავალსაფეხურიანი პროცესი, რომელიც ხასიათდება პროგრესირებადი მორფოლოგიური და მოლეკულური ცვლილებებით, რომლებიც კუჭის ქრონიკული დაზიანებიდან ინვაზიურ ადენოკარცინომამდე პროგრესირებს. დაზიანების პროგრესირებასთან დაკავშირებული ბიომარკერების იდენტიფიცირებამ შეიძლება გააუმჯობესოს რისკის სტრატეგიკაცია და ადრეული დიაგნოზი.

კვლევის მიზანს შეადგენდა CDX2, SOX2, Ki67 და p53-ის იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის ნიმუშების შესწავლა კუჭის კანცეროგენეზის სპექტრში და მათი კავშირის შეფასება დაავადების პროგრესირებასთან.

კვლევის ფარგლებში ჩატარდა რეტროსპექტული-კოჰორტული კვლევა 68 ფორმალინით ფიქსირებულ პარაფინში ჩაყალიბებულ კუჭის ქსოვილოვან ნიმუშზე, მათ შორის ნორმალური კუჭის ლორწოვანი გარსის, ქრონიკული ატროფიული გასტრიტის, ენტერული სრული მეტაპლაზიის, ენტერული არასრული მეტაპლაზიის, დაბალი ხარისხის დისპლაზიის, მაღალი ხარისხის დისპლაზიის, ნაწლავის ტიპის კუჭის ადენოკარცინომის და დიფუზური ტიპის კუჭის ადენოკარცინომის ნიმუშებზე. ჩატარდა CDX2, SOX2, Ki67 და p53-ის იმუნოჰისტოქიმიური შეღებვა. ექსპრესიის ნიმუშები შეფასდა და კორელაციაში შეფასდა დაზიანების სიმძიმესთან.

კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ CDX2-ის ექსპრესია მნიშვნელოვნად გაიზარდა კუჭის ნორმალური ლორწოვანი გარსიდან ნაწლავის მეტაპლაზიასა და დისპლაზიაზე

გადასვლის დროს, რაც ასახავს ნაწლავურ პროგრესულ დიფერენციაციას. SOX2-ის ექსპრესიამ კი პირიქით აჩვენა თანდათანობითი შემცირება, რაც მიუთითებს კუჭის ეპითელიური ფენოტიპის დაკარგვაზე. Ki67-ის პროლიფერაციული აქტივობა პროგრესულად გაიზარდა არასიმსივნური დაზიანებებიდან ინვაზიურ კარცინომებამდე. p53-ის ექსპრესიის აბერანტული ექსპრესიის ნიმუშები უპირატესად დაფიქსირდა დისპლაზიურ დაზიანებებსა და ადენოკარცინომებში. არასრულმა ნაწლავის მეტაპლაზიამ აჩვენა იმუნოფენოტიპური მახასიათებლები, რომლებიც შუალედურია ნაწლავის სრულ მეტაპლაზიასა და დისპლაზიას შორის, რაც ადასტურებს მის ავთვისებიან პოტენციალს.

კუჭის კანცეროგენეზს თან ახლავს ეპითელიური დიფერენციაციის, პროლიფერაციული აქტივობის და p53 სტატუსის პროგრესული ცვლილებები. CDX2, SOX2, Ki67 და p53-ის კომბინირებული შეფასება შეიძლება მოგვაწოდოს ღირებული ინფორმაცია კუჭის წინამორბედი დაზიანებების შესაფასებლად და კუჭის ადენოკარცინომაში პროგრესირების გაზრდილი რისკის მქონე დაზიანებების იდენტიფიცირებისთვის.

საკვანძო სიტყვები: კუჭის კიბო; ნაწლავის მეტაპლაზია; დისპლაზია; CDX2; SOX2; Ki67; p53; კუჭის კანცეროგენეზი; იმუნოჰისტოქიმია.

შესავალი

კუჭის კიბო მსოფლიოში კიბოსთან დაკავშირებული ავადობისა და სიკვდილიანობის ერთ-ერთ წამყვან მიზეზად რჩება და დიაგნოსტიკისა და მკურნალობის მნიშვნელოვანი პროგრესის მიუხედავად, კვლავ მნიშვნელოვან ტვირთს წარმოადგენს ჯანდაცვის სისტემებისთვის. [1] ბოლოდროინდელი გლობალური კიბოს სტატისტიკის მიხედვით, კუჭის კიბო პასუხისმგებელია კიბოსთან დაკავშირებული სიკვდილიანობის მნიშვნელოვან ნაწილზე, განსაკუთრებით აღმოსავლეთ აზიაში, აღმოსავლეთ ევროპასა და განვითარებად ქვეყნებში.[2] მიუხედავად იმისა, რომ საკვების შენახვის, სანიტარული ნორმების და *Helicobacter pylori*-ის აღმოფხვრის პროგრამების გაუმჯობესების გამო, ზოგიერთ რეგიონში საერთო შემთხვევები შემცირდა, კუჭის კიბო საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის მნიშვნელოვან პრობლემად რჩება, რადგან ის ხშირად დიაგნოზირებულია გვიან სტადიებზე და ასოცირდება ხანგრძლივ გადარჩენადობის დაბალ დონესთან.[3]

კუჭის ავთვისებიანი სიმსივნეების უმეტესობა ადენოკარცინომებია, რომლებიც წარმოიქმნება კუჭის ეპითელიუმიდან მრავალსაფეხურიანი პროცესით, რომელიც მოიცავს პროგრესულ მორფოლოგიურ, მოლეკულურ და ფენოტიპურ ცვლილებებს.[4] კუჭის კანცეროგენეზის ყველაზე ფართოდ მიღებული მოდელია კორეას კასკადი, რომელიც აღწერს მოვლენების თანმიმდევრობას, რომელიც იწყება ქრონიკული გასტრიტით და პროგრესირებს ლორწოვანი გარსის ატროფიით, ნაწლავის მეტაპლაზიით, დისპლაზიით და საბოლოოდ ინვაზიური ადენოკარცინომით.[5] ეს

მოდელი ხაზს უსვამს კუჭის კიბოს განვითარებაში წინამორბედი დაზიანებების მნიშვნელობას და იძლევა ჩარჩოს ავთვისებიანი ტრანსფორმაციის ბიოლოგიური მექანიზმების გასაგებად. მიუხედავად ამისა, წინამორბედი დაზიანებების მქონე ყველა პაციენტს არ უვითარდება კარცინომა, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ დამატებითი მოლეკულური და უჯრედული ფაქტორები გავლენას ახდენენ დაავადების პროგრესირებაზე.

ქრონიკული ანთება ცენტრალურ როლს ასრულებს კუჭის კანცეროგენეზის დაწყებაში. *Helicobacter pylori* ინფექცია აღიარებულია, როგორც ყველაზე მნიშვნელოვანი გარემო რისკ-ფაქტორი და მსოფლიო ჯანდაცვის ორგანიზაციის მიერ კლასიფიცირებულია, როგორც I ჯგუფის კანცეროგენი.[6] მუდმივი ინფექცია იწვევს ქრონიკულ ანთებით რეაქციებს კუჭის ლორწოვან გარსში, რაც იწვევს ეპითელურ დაზიანებას, ჯირკვლების დაკარგვას და ლორწოვანი გარსის პროგრესულ რემოდელირებას. დროთა განმავლობაში, ამ პროცესმა შეიძლება გამოიწვიოს ატროფიული გასტრიტის და შემდგომი ნაწლავის მეტაპლაზიის განვითარება. [7] *H. pylori* ინფექციის გარდა, კუჭის კიბოს განვითარებაში ასევე მონაწილეობს აუტოიმუნური გასტრიტი, დიეტური ფაქტორები, მოწევა, გენეტიკური მიდრეკილება და გარემო ფაქტორების ზემოქმედება. წინამორბედ დაზიანებებს შორის, ნაწლავის მეტაპლაზია განსაკუთრებით მნიშვნელოვან ადგილს იკავებს, რადგან ის წარმოადგენს კრიტიკულ გარდამავალ ეტაპს ქრონიკულ ანთებით დაზიანებასა და ნეოპლაზიურ ტრანსფორმაციას შორის. ნაწლავის მეტაპლაზია ხასიათდება ნორმალური კუჭის ეპითელიუმის ნაწლავის ტიპის ეპითელური უჯრედებით ჩანაცვლებით და ზოგადად კლასიფიცირდება სრულ და არასრულ ქვეტიპებად. ნაწლავის სრული მეტაპლაზია წვრილი ნაწლავის ეპითელიუმს წააგავს და შეიცავს შთამნთქმელ ენტეროციტებს, ფიალისებურ უჯრედებსა და ალაგ პანეტის უჯრედებს. ამის საპირისპიროდ, ნაწლავის არასრული მეტაპლაზია ავლენს შერეულ კუჭ-ნაწლავის ფენოტიპს და არ გააჩნია წვრილი ნაწლავის სრულად დიფერენცირებული მახასიათებლები. მრავალრიცხოვანი კვლევები ვარაუდობენ, რომ ნაწლავის არასრული მეტაპლაზია დაკავშირებულია დისპლაზიისა და კარცინომის პროგრესირების უფრო დიდ რისკთან, ვიდრე ნაწლავის სრული მეტაპლაზია, რაც ხაზს უსვამს ამ ქვეტიპების გამორჩევის მნიშვნელობას რუტინულ დიაგნოსტიკურ პრაქტიკაში.[8]

დისპლაზია წარმოადგენს ნეოპლაზიური ტრანსფორმაციის უფრო მოწინავე ეტაპს და ხასიათდება კუჭის ეპითელიუმის არქიტექტურული დისორგანიზებით და ციტოლოგიური ატიპიით. ჰისტოლოგიურად, დისპლაზია კლასიფიცირდება როგორც დაბალი ხარისხის ან მაღალი ხარისხის, მორფოლოგიური ანომალიების სიმძიმის მიხედვით. მაღალი ხარისხის დისპლაზია ითვლება ინვაზიური ადენოკარცინომის პირდაპირ წინამორბედად და ხშირად ავლენს მოლეკულურ ცვლილებებს, რომლებიც მსგავსია ავთვისებიანი სიმსივნეების დროს დაფიქსირებულისა. შესაბამისად, ბიომარკერების იდენტიფიცირება, რომლებსაც შეუძლიათ განასხვავონ გაზრდილი ავთვისებიანი პოტენციალის მქონე დაზიანებები, თანამედროვე კუჭ-ნაწლავის პათოლოგიაში კვლევის მნიშვნელოვან სფეროდ იქცა.[9]

CDX2 არის ჰომეობოქსის ტრანსკრიფციის ფაქტორი, რომელიც ფუნდამენტურ როლს ასრულებს ნაწლავის ეპითელიუმის განვითარებასა და შენარჩუნებაში.[10,11] ნორმალურ პირობებში, CDX2 არ არის გამოხატული კუჭის ეპითელიუმში; თუმცა, ის აქტიურდება ნაწლავის მეტაპლაზიის დროს და ხშირად ვლინდება კუჭის ნეოპლაზმებში, რომლებიც ავლენენ ნაწლავის დიფერენციაციას. ამიტომ, CDX2-ის ექსპრესიის მომატება კუჭის ლორწოვან გარსში ინსტინენტალიზაციის ნიშან-თვისებად ითვლება.

ამის საპირისპიროდ, SOX2 არის ტრანსკრიფციის ფაქტორი, რომელიც მონაწილეობს კუჭის ეპითელიუმის დიფერენციაციისა და ღეროვანი უჯრედების ფუნქციის შენარჩუნებაში. SOX2-ის ძლიერი ექსპრესია, როგორც წესი, შეინიშნება ნორმალურ კუჭის ლორწოვან გარსში, მაშინ როდესაც შემცირებული ექსპრესია

ასოცირდება ნაწლავის მეტაპლაზიასთან, დისპლაზიასთან და კუჭის კარცინომასთან. [12] CDX2-სა და SOX2-ს შორის ორმხრივი ურთიერთობა ასახავს კუჭის ეპითელიური იდენტობის თანდათანობით ჩანაცვლებას ნაწლავის დიფერენციაციის პროგრამებით კუჭის კანცეროგენეზის პროგრესირების დროს. ამ მარკერების ერთდროულმა შეფასებამ შეიძლება მოგვაწოდოს ღირებული ინფორმაცია წინამორბედი დაზიანებების ფენოტიპური ევოლუციის შესახებ.

მიუხედავად იმისა, რომ კუჭის პათოლოგიაში ინდივიდუალური ბიომარკერები მრავალრიცხოვანმა კვლევებმა შეისწავლა, დიფერენციაციასთან დაკავშირებული მარკერების, პროლიფერაციული აქტივობის და p53 სტატუსის ყოვლისმომცველი შეფასება კუჭის კანცეროგენეზის მთელ სპექტრში შედარებით შეზღუდული რჩება. გარდა ამისა, სრულ და არასრულ ნაწლავის მეტაპლაზიას შორის ბიოლოგიური განსხვავებები და მათი კავშირი დისპლაზიურ ტრანსფორმაციასთან კვლავ მიმდინარე კვლევის საგანია. ამ პროცესების უკეთ გაგება შეიძლება გააუმჯობესოს რისკის სტრატეგიკაცია, ხელი შეუწყოს მაღალი რისკის მქონე დაზიანებების იდენტიფიცირებას და ხელი შეუწყოს უფრო ეფექტურ მეთვალყურეობის სტრატეგიებს.

მასალა და მეთოდები

ეს რეტროსპექტული დაკვირვებითი კოჰორტული კვლევა ჩატარდა თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიის დეპარტამენტში. 2019-2022 წლებში დაარქივებული ფორმალინით ფიქსირებული, პარაფინში ჩაყალიბებული (FFPE) კუჭის ქსოვილის ნიმუშები ამოღებული იქნა ინსტიტუციური პათოლოგიის მონაცემთა ბაზიდან. კვლევის კოჰორტაში შედიოდა 68 კუჭის ნიმუში, რომლებიც წარმოადგენდნენ კუჭის კანცეროგენეზის მთელ სპექტრს, მათ შორის კუჭის ნორმალურ ლორწოვან გარსს, ქრონიკულ ატროფიულ გასტრიტს, ნაწლავის სრულ მეტაპლაზიას, ნაწლავის არასრულ მეტაპლაზიას, დაბალი ხარისხის დისპლაზიას, მაღალი ხარისხის დისპლაზიას, ნაწლავის ტიპის კუჭის ადენოკარცინომას და დიფუზური ტიპის კუჭის

ადენოკარცინომას. ჰისტოპათოლოგიური დიაგნოზები დაისვა ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის (WHO) საჭმლის მომნელებელი სისტემის სიმსივნეების მოქმედი კლასიფიკაციის შესაბამისად, გამოცდილი პათოლოგების მიერ დამოუკიდებელი განხილვის შემდეგ. შემთხვევები, რომლებსაც აღენიშნებოდათ ქსოვილის ფართო აუტოლიზი, მძიმე ფიქსაციის არტეფაქტები, კაუტერიზაციასთან დაკავშირებული არტეფაქტები ან გაურკვეველი დიაგნოზი, გამოირიცხა შემდგომი ანალიზიდან.

კლინიკოპათოლოგიური ინფორმაცია მიღებული იქნა ელექტრონული სამედიცინო ჩანაწერებიდან. შეგროვებული ცვლადები მოიცავდა პაციენტის ასაკს, სქესს, *Helicobacter pylori*-ს სტატუსს, ნიმუშის ტიპს, დაზიანების ანატომიურ მდებარეობას, კუჭის წინა პათოლოგიას, ჰისტოლოგიურ ქვეტიპს, ლორენის კლასიფიკაციას, სიმსივნის ხარისხს, პათოლოგიურ სტადიას, ლიმფოვასკულარულ ინვაზიას, პერინერვულ ინვაზიას, კვანძების ჩართულობას, რეციდივის სტატუსს, პროგრესირების სტატუსს და დაკვირვების ხანგრძლივობას, თუ ეს შესაძლებელი იყო. არასიმსივნური და წინამორბედი დაზიანებებისთვის დაფიქსირდა დამატებითი ჰისტოლოგიური პარამეტრები, როგორიცაა ატროფია, ანთება, ნაწლავის მეტაპლაზიის ქვეტიპი და დისპლაზიის ხარისხი.

ჰემატოქსილინით და ეოზინით შეღებილი ყველა მონაკვეთი ხელახლა შეფასდა იმუნოჰისტოქიმიურ ანალიზამდე. ნაწლავის მეტაპლაზია კლასიფიცირებული იყო, როგორც სრული ან არასრული დადგენილი მორფოლოგიური კრიტერიუმების მიხედვით.

იმუნოჰისტოქიმიური ანალიზი ჩატარდა 4 μm სისქის FFPE ანათლებზე CDX2, SOX2, Ki67 და p53-ის საწინააღმდეგო ანტისხეულების გამოყენებით. დეპარაფინიზაციისა და რეჰიდრატაციის შემდეგ, ანტიგენის მოძიება განხორციელდა თერმულად ინდუცირებული ეპიტოპის მოძიების პროტოკოლების გამოყენებით. ენდოგენური პეროქსიდაზას აქტივობა პირველადი ანტისხეულებით ინკუბაციამდე დაიბლოკა. ვიზუალიზაცია მიღწეული იქნა პოლიმერზე დაფუძნებული დეტექციის სისტემისა და 3,3'-დიამინობენზიდინის (DAB) ქრომოგენის გამოყენებით. ანათლები შემდგომში შეღებილი იქნა ჰემატოქსილინით. ანალიზის სანდოობის უზრუნველსაყოფად, თითოეულ შეღებვის ცდაში ჩართული იყო შესაბამისი დადებითი და უარყოფითი კონტროლი.

იმუნოჰისტოქიმიური შეფასება დამოუკიდებლად ჩატარდა ორი პათოლოგის მიერ, რომლებიც არ იყვნენ ინფორმირებულნი კლინიკურ-პათოლოგიურ მონაცემებზე. CDX2 და SOX2 ექსპრესია შეფასდა, როგორც ბირთვული შეღებვა ეპითელურ და ნეოპლაზიურ უჯრედებში. ორივე მარკერი შეფასდა შეღებვის ინტენსივობისა და დადებითი უჯრედების პროცენტული მაჩვენებლის მიხედვით. შეღებვის ინტენსივობა კატეგორიზებული იყო როგორც სუსტი, საშუალო ან ძლიერი, ხოლო H-ქულა გამოითვალა შეღებვის ინტენსივობის დადებითად შეღებილი უჯრედების პროცენტულ მაჩვენებელზე გამრავლებით, საბოლოო ქულის 0-დან 300-მდე დიაპაზონში გენერირებით. Ki67 ექსპრესია შეფასდა, როგორც დადებითად შეღებილი ბირთვების

პროცენტული მაჩვენებელი მაღალი სიმძლავრის ველებში მინიმუმ 500 წარმომადგენლობით ეპითელურ ან სიმსივნურ უჯრედს შორის და გამოიხატა პროლიფერაციის ინდექსით. p53 იმუნორეაქტიულობა ინტერპრეტირებული იქნა დადგენილი კრიტერიუმების მიხედვით და კატეგორიზებული იქნა, როგორც ველური ტიპის, ზედმეტად გამოხატული ან ნულოვანი ნიმუშის ექსპრესია.

სტატისტიკური ანალიზი ჩატარდა IBM SPSS Statistics პროგრამული უზრუნველყოფის 29.0 ვერსიის გამოყენებით (IBM Corporation, არმონკი, ნიუ-იორკი, აშშ).

კვლევა ჩატარდა ჰელსინკის დეკლარაციის ეთიკური პრინციპების შესაბამისად და დამტკიცებული იყო თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის ეთიკის კომიტეტის მიერ. ყველა ნიმუში მიღებული იყო რუტინული დიაგნოსტიკური მიზნებისთვის გამოყენებული საარქივო მასალიდან.

კვლევის მთელი პერიოდის განმავლობაში დაცული იყო ანონიმურობა და კონფიდენციალურობა, ხოლო მონაცემთა ანალიზამდე ყველა პირადი იდენტიფიკატორი ამოღებული იყო.

შედეგები

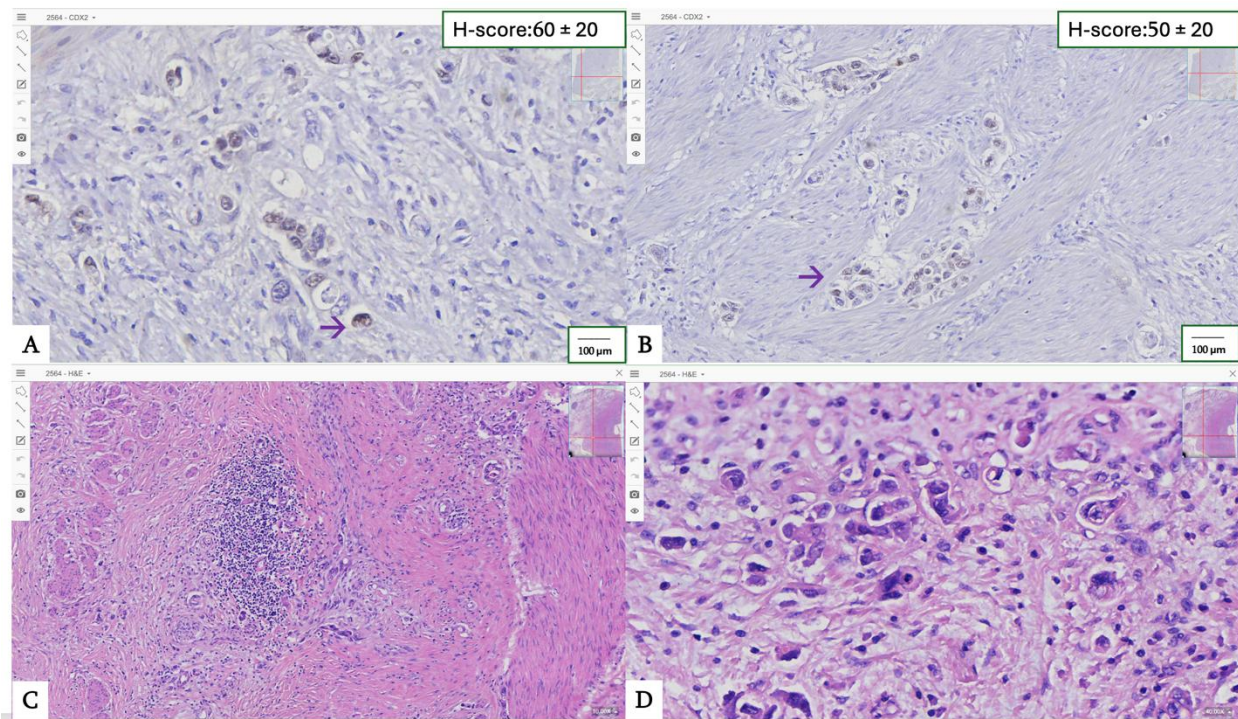
აღნიშნულ კვლევაში სულ ჩართული იყო 68 კუჭის ქსოვილოვანი ნიმუში. კოჰორტაში შედიოდა კუჭის ნორმალური ლორწოვანი გარსი ($n=5$), ქრონიკული ატროფიული გასტრიტი ($n=5$), ნაწლავის სრული მეტაპლაზია ($n=15$), ნაწლავის არასრული მეტაპლაზია ($n=15$), დაბალი ხარისხის დისპლაზია ($n=8$), მაღალი ხარისხის დისპლაზია ($n=8$), ინტესტინური ტიპის კუჭის ადენოკარცინომა ($n=6$) და დიფუზური ტიპის კუჭის ადენოკარცინომა ($n=6$).

პაციენტების ასაკი მერყეობდა 38-დან 68 წლამდე. პროგრესირებადი ჰისტოპათოლოგიური დაზიანება დაკავშირებული იყო *Helicobacter pylori* ინფექციის, დისპლაზიური ტრანსფორმაციისა და ინვაზიური ნეოპლაზიური დაზიანებების სიხშირის ზრდასთან (ცხრილი 1).

მაჩვენებელი	ნორმალური ლორწოვანი	ატროფიული გასტრიტი	სრული IM	არასრული IM	LG D	HG D	ნაწლავური ადენოკარცინომა	დიფუზური ადენოკარცინომა
შემთხვევების რაოდენობა (n)	5	5	15	15	8	8	6	6
საშუალო ასაკი (წელი)	45	55	43	38	52	48	68	44
მამაკაცი (%)	0	55	45	55	30	60	70	10
<i>H. pylori</i> პოზიტიურობა (%)	0	0	50	0	0	60	55	0
რეციდივი (%)	0	0	0	0	0	70	70	90

ცხრილი 19. კვლევაში ჩართული კუჭის ლორწოვანი გარსის ნორმალური, პრეკანცერული და სიმსივნური დაზიანებების კლინიკურ-პათოლოგიური მახასიათებლები.

CDX2 ექსპრესიის შეფასებამ აჩვენა სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი განსხვავებები კვლევის ჯგუფებს შორის (კრუსკალ-უოლისის ტესტი, $p < 0.001$). ნორმალურ კუჭის ლორწოვან გარსსა და ქრონიკულ ატროფიულ გასტრიტს აღენიშნებოდა CDX2 იმუნორეაქტიულობის მინიმალური, ხოლო ნაწლავის მეტაპლაზიურ დაზიანებებს აღენიშნებოდათ ექსპრესიის მნიშვნელოვანი ზრდა. ყველაზე მაღალი CDX2 H-ქულები დაფიქსირდა ნაწლავის არასრული მეტაპლაზიის და დაბალი ხარისხის დისპლაზიის დროს. მიუხედავად იმისა, რომ მაღალი ხარისხის დისპლაზია ინარჩუნებდა ზომიერ ექსპრესიის დონეს, ნაწილობრივი შემცირება დაფიქსირდა ინვაზიური ადენოკარცინომების დროს, განსაკუთრებით დიფუზური ტიპის სიმსივნეების დროს. პოსტ-ჰოკ ანალიზმა აჩვენა მნიშვნელოვანი განსხვავებები არასიმსივნურ დაზიანებებსა და ნაწლავის მეტაპლაზიურ დაზიანებებს შორის ($p < 0.01$), ასევე ნაწლავის მეტაპლაზიასა და დიფუზური ტიპის ადენოკარცინომას შორის ($p < 0.05$).



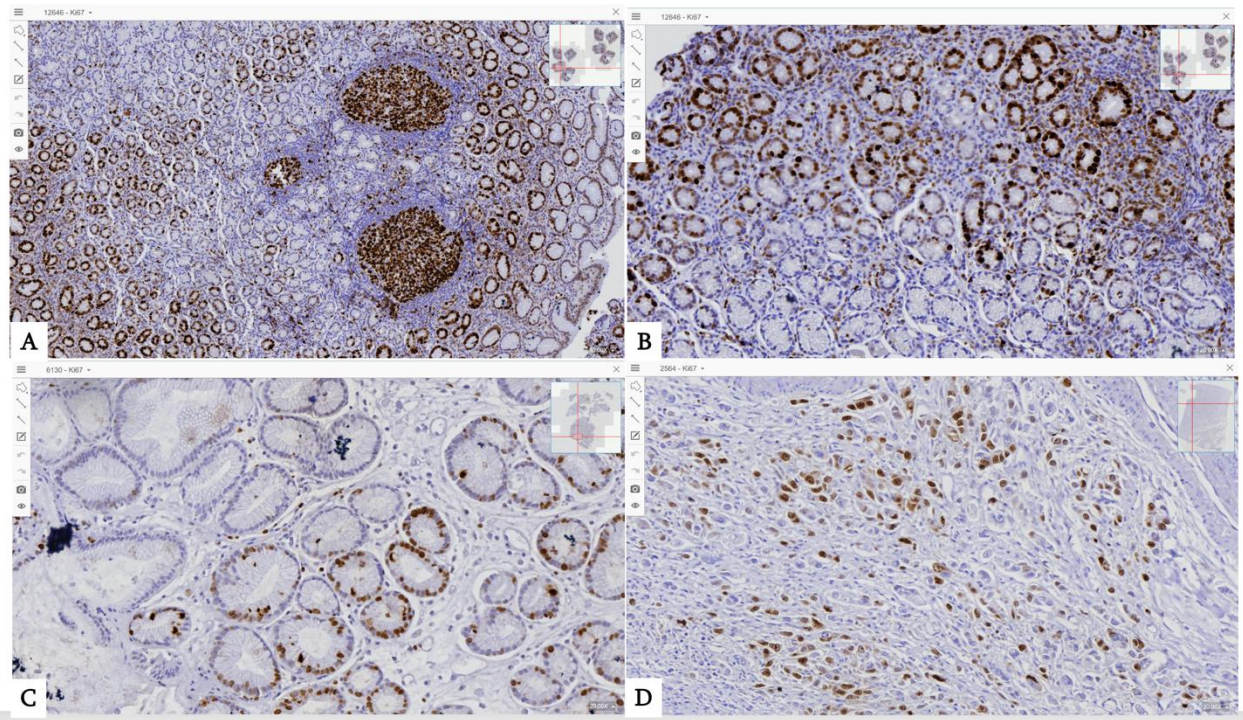
სურათი 10. დაბალდიფერენცირებული დიფუზური ტიპის კუჭის ადენოკარცინომა. (A, B) CDX2-ის იმუნოჰისტოქიმიური შედეგა ავლენს სუსტიდან ზომიერამდე ბირთვულ ექსპრესიას სიმსივნური უჯრედების ნაწილში (H-score: 60 ± 20 და 50 ± 20). (C) H&E შედეგა ასახავს დიფუზურ ინფილტრაციულ ზრდას დესმოპლაზიური სტრომის ფონზე ასევე სიმსივნის მაინფილტრირებელი ლიმფოციტების პროცენტული შემცველობა 40%. (D) მაღალი გადიდების H&E გამოსახულება, რომელიც წარმოაჩენს არაკოჰეზიურ, ატიპიურ სიმსივნურ უჯრედებს, რაც დამახასიათებელია დიფუზური ტიპის დაბალდიფერენცირებული ადენოკარცინომისთვის. მასშტაბი: 100 μ m.

SOX2 ექსპრესიამ აჩვენა ინვერსიული ტენდენცია და მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდა კუჭის კანცეროგენეზის სპექტრში (კრუსკალ-ვალის ტესტი, $p < 0.001$). SOX2-ის ძლიერი ბირთვული ექსპრესია დამახასიათებელი იყო ნორმალური კუჭის ლორწოვანი გარსისა და ქრონიკული ატროფიული გასტრიტის დროს. პროგრესირებადი შემცირება დაფიქსირდა ნაწლავის სრული მეტაპლაზიის, ნაწლავის არასრული მეტაპლაზიის და დისპლაზიური დაზიანებების დროს. ყველაზე დაბალი SOX2 H-ქულები დაფიქსირდა მაღალი ხარისხის დისპლაზიასა და ინვაზიურ ადენოკარცინომაში (ცხრილი 2). სპირმანის კორელაციის ანალიზმა აჩვენა მნიშვნელოვანი ინვერსიული კავშირი დაზიანების სიმძიმესა და SOX2 ექსპრესიას შორის ($\rho = -0.72$, $p < 0.001$), რაც მიუთითებს კუჭის შტოს თანდათანობით დაკარგვაზე ნეოპლაზიური პროგრესირების დროს.

ჯგუფი	CDX2 H-score	SOX2 H-score	Ki67 (%)
ნორმალური ლორწოვანი	5	240	2
ატროფიული გასტრიტი	0	120	1
სრული ნაწლავური მეტაპლაზია	120	110	25
არასრული ნაწლავური მეტაპლაზია	90	240	15
დაბალი ხარისხის დისპლაზია	0	240	5
მაღალი ხარისხის დისპლაზია	40	50	10
ნაწლავური ადენოკარცინომა	70	40	60
დიფუზური ადენოკარცინომა	60	30	80

ცხრილი 20. CDX2, SOX2 და Ki67 იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესიის ცვლილებები კუჭის კარცინოგენეზის სხვადასხვა ეტაპზე.

Ki67-ის გამოყენებით პროლიფერაციული აქტივობის შეფასებამ პროგრესირების თანმიმდევრობით სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი ზრდა გამოავლინა (კრუსკალ-ვალის ტესტი, $p < 0.001$). ყველაზე დაბალი პროლიფერაციული ინდექსები გამოვლინდა ნორმალური კუჭის ლორწოვანი გარსის და ქრონიკული ატროფიული გასტრიტის დროს. ნაწლავის მეტაპლაზიამ აჩვენა Ki67-ის ზომიერი მნიშვნელობები, ხოლო დისპლაზიურმა დაზიანებებმა მნიშვნელოვნად მაღალი პროლიფერაციული აქტივობა. მაღალი ხარისხის დისპლაზიამ და ინვაზიურმა ადენოკარცინომებმა აჩვენეს Ki67 მარკირების ყველაზე მაღალი ინდექსები. კორელაციის ანალიზმა დაადასტურა ძლიერი დადებითი კავშირი დაზიანების სიმძიმესა და Ki67 ექსპრესიას შორის ($\rho = 0.78$, $p < 0.001$).



სურათი 11. Ki67-ის იმუნოჰისტოქიმიური ექსპრესია კუჭის პრეკანცერულ და სიმსივნურ დაზიანებებში. (A, B) მაღალი ხარისხის დისპლაზია (HGD), ეპითელიუმის ფართო მასშტაბით გამოხატული ბირთვული Ki67-პოზიტიური უჯრედებით. (C) ნაწლავური მეტაპლაზიის ფონზე განვითარებული დაბალი ხარისხის დისპლაზია (LGD), Ki67-ის შედარებით შეზღუდული ექსპრესიით. (D) კუჭის ადენოკარცინომა, რომელიც ავლენს ჭარბ პროლიფერაციულ აქტივობას და მრავლობით Ki67-პოზიტიურ სიმსივნურ უჯრედებს.

p53-ის ექსპრესიის ანალიზმა აჩვენა აბერანტული ექსპრესიის ნიმუშების პროგრესული დაგროვება კუჭის კანცეროგენეზის დროს (χ^2 ტესტი, $p < 0.001$). ველური ტიპის შედეგა ჭარბობდა ნორმალურ კუჭის ლორწოვან გარსში, ქრონიკულ ატროფიულ გასტრიტსა და ნაწლავის სრული მეტაპლაზიის უმეტეს შემთხვევებში. ნულოვანი ნიმუშის და ზედმეტად/ჰიპერ ექსპრესირებული შედეგა სულ უფრო ხშირი გახდა არასრული ნაწლავის მეტაპლაზიისა და დისპლაზიური დაზიანებების დროს. მაღალი ხარისხის დისპლაზია პრეკურსორულ დაზიანებებს შორის აბერანტული p53 ექსპრესიის ყველაზე მაღალი გავრცელების მქონე იყო, ხოლო ინვაზიურ ადენოკარცინომებში უპირატესად ჭარბექსპრესიის ტიპის ნიმუშები იყო. აბერანტული p53 შედეგის სიხშირე მნიშვნელოვნად იზრდებოდა დაზიანების სიმძიმის მატებასთან ერთად ($p < 0.001$). სრული და არასრული ნაწლავის მეტაპლაზიის შედარებამ მნიშვნელოვანი ბიოლოგიური განსხვავებები გამოავლინა. არასრული ნაწლავის მეტაპლაზია ავლენდა მნიშვნელოვნად მაღალ CDX2 ექსპრესიას და დაბალ SOX2 ექსპრესიას, ვიდრე სრული ნაწლავის მეტაპლაზია ($p < 0.05$ ორივე შედარებისთვის). გარდა ამისა, არასრული ნაწლავის მეტაპლაზია ავლენდა უფრო მაღალ Ki67 პროლიფერაციულ ინდექსებს და

აბერანტული p53 შეღებვის ნიმუშების უფრო დიდ სიხშირეს (ცხრილი 3). ეს მონაცემები ადასტურებს იმ კონცეფციას, რომ არასრული ნაწლავის მეტაპლაზია წარმოადგენს ბიოლოგიურად ნაკლებად სტაბილურ წინამორბედ დაზიანებას უფრო დიდი ნეოპლაზიური პოტენციალით.

პარამეტრი	სრული IM	არასრული IM	p
CDX2 H-score	120	90	<0.05
SOX2 H-score	110	240	<0.05
Ki67 (%)	25	15	<0.05
p53 აბერაცია (%)	40	20	<0.05

ცხრილი 21. ნაწლავური მეტაპლაზიის ქვეტიპების შედარებითი ანალიზი;

დაბალი ხარისხის და მაღალი ხარისხის დისპლაზია ასევე მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდა მათი იმუნოფენოტიპური პროფილებით. მაღალი ხარისხის დისპლაზია ავლენდა SOX2 ექსპრესიის დაბალ დონეს, Ki67 პროლიფერაციულ აქტივობას და p53 პათოლოგიური ნიმუშების მნიშვნელოვნად მაღალ გავრცელებას დაბალი ხარისხის დისპლაზიასთან შედარებით (ყველა $p < 0.05$). მიუხედავად იმისა, რომ CDX2 ექსპრესია ორივე ჯგუფში კვლავ შესამჩნევი დარჩა, მაღალი ხარისხის დისპლაზია ავლენდა შეღებვის ინტენსივობისა და განაწილების უფრო მეტ ჰეტეროგენულობას, რაც მიუთითებს მოლეკულური არასტაბილურობის ზრდაზე ინვაზიური კარცინომისკენ პროგრესირების დროს.

ინვაზიური კარცინომების შედარებამ გამოავლინა განსხვავებული ფენოტიპური მახასიათებლები ნაწლავის ტიპისა და დიფუზური ტიპის სიმსივნეებს შორის. ნაწლავის ტიპის ადენოკარცინომებმა შეინარჩუნეს CDX2-ის ზომიერი ექსპრესია და ნაწლავის დიფერენციაციის ნაწილობრივი შენარჩუნება, მაშინ როდესაც დიფუზური ტიპის ადენოკარცინომებმა აჩვენეს როგორც CDX2-ის, ასევე SOX2-ის მნიშვნელოვანი დაკარგვა. დიფუზური ტიპის კარცინომა დამატებით ასოცირდებოდა უფრო მაღალ ჰისტოლოგიურ ხარისხთან, უფრო ღრმა ინვაზიასთან, ლიმფური კვანძების გაზრდილ ჩართულობასთან და ნაკლებად ხელსაყრელ კლინიკურ შედეგებთან. ამ განსხვავებებმა სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი მნიშვნელობა მიაღწია რამდენიმე კლინიკურ-პათოლოგიური პარამეტრისთვის ($p < 0.05$).

საერთო ჯამში, CDX2, SOX2, Ki67 და p53-ის კომბინირებულმა შეფასებამ აჩვენა ძალიან მნიშვნელოვანი ეტაპობრივი იმუნოფენოტიპური გადასვლა ნორმალური კუჭის ლორწოვანი გარსიდან ნაწლავის მეტაპლაზიისა და დისპლაზიის გავლით ინვაზიურ ადენოკარცინომამდე. ნაწლავის დიფერენციაციის ზრდა, SOX2 მარკერის პროგრესული დაკარგვა, გაძლიერებული პროლიფერაციული აქტივობა და p53 ჰიპერექსპრესია გამოვლინდა, როგორც კუჭის კანცეროგენეზის თანმხლები ძირითადი მოლეკულური

მოვლენები. ყველაზე გამოხატული ცვლილებები დაფიქსირდა არასრული ნაწლავის მეტაპლაზიისა და მაღალი ხარისხის დისპლაზიის დროს, რაც ამ დაზიანებებს წარმოაჩენს, როგორც კრიტიკულ გარდამავალ ეტაპებს მომატებული ავთვისებიანი პოტენციალით.

შედეგების ანალიზი/განსჯა

კუჭის კანცეროგენეზი მრავალსაფეხურიანი პროცესია, რომელიც ხასიათდება პროგრესული მორფოლოგიური და მოლეკულური ცვლილებებით, რომლებიც ნორმალურ კუჭის ლორწოვან გარსს ინვაზიურ ადენოკარცინომად გარდაქმნიან. ამ კვლევაში CDX2, SOX2, Ki67 და p53 ექსპრესიის ანალიზმა აჩვენა კუჭის დაზიანებების სპექტრში განსხვავებული იმუნოფენოტიპური ცვლილებები, რაც ადასტურებს მათ პოტენციურ გამოყენებას პროგრესირების ბიომარკერებად.

ერთ-ერთი ყველაზე აღსანიშნავი შედეგი იყო სპეციფიკური ტრანსკრიფციის ფაქტორების პროგრესული ცვლილება. CDX2 ექსპრესია მნიშვნელოვნად გაიზარდა ნაწლავის მეტაპლაზიის დროს და კვლავ შესამჩნევი დარჩა დისპლაზიურ დაზიანებებში, რაც ადასტურებს მის ცენტრალურ როლს ნაწლავის დიფერენციაში. ეს აღმოჩენები შეესაბამება წინა კვლევებს, რომლებიც აჩვენებს, რომ CDX2 არის ნაწლავის ეპითელიუმის განვითარების მთავარი რეგულატორი და ხშირად მატულობს კუჭის ნაწლავის მეტაპლაზიის დროს.[10,12,13] არასრული ნაწლავის მეტაპლაზიის და დისპლაზიური დაზიანებების დროს დაფიქსირებული ყველაზე მაღალი ექსპრესია ადასტურებს იმ კონცეფციას, რომ ნაწლავის დიფერენციაციის პროგრამების გააქტიურება კუჭის კანცეროგენეზის მნიშვნელოვანი ადრეული მოვლენაა.

ამის საპირისპიროდ, SOX2 ექსპრესიამ აჩვენა პროგრესული შემცირება დაზიანების ჰისტოლოგიური პროგრესირებისას. SOX2-ის ძლიერი ექსპრესია ნორმალურ კუჭის ლორწოვან გარსსა და ატროფიულ გასტრიტში, რასაც მოჰყვება მეტაპლაზიური, დისპლაზიური და ავთვისებიანი დაზიანებების თანდათანობითი შემცირება, მიუთითებს კუჭის ნორმალური ეპითელიური იდენტობის დაკარგვაზე ნეოპლაზიური ტრანსფორმაციის დროს. მსგავსი დაკვირვებები დაფიქსირდა წინა კვლევებში, სადაც SOX2-ის შემცირებული ექსპრესია დაკავშირებული იყო დედიფერენციაციასთან და არახელსაყრელ ბიოლოგიურ ქცევასთან. ამ კვლევაში დაფიქსირებული CDX2-სა და SOX2-ს შორის უკუპროპორციული დამოკიდებულება ასახავს კუჭიდან ნაწლავურ ფენოტიპებზე გადასვლას კანცეროგენეზის დროს.[11,14–16]

Ki67-ის ექსპრესიამ აჩვენა პროგრესული ზრდა არასიმსივნური დაზიანებებიდან ინვაზიურ კარცინომამდე, რაც მიუთითებს პროლიფერაციული აქტივობის ზრდაზე დაავადების პროგრესირების განმავლობაში. მიუხედავად იმისა, რომ ნორმალურმა ლორწოვანმა გარსმა და ატროფიულმა გასტრიტმა აჩვენა დაბალი პროლიფერაციული ინდექსები, დისპლაზიურმა დაზიანებებმა და ადენოკარცინომის შემთხვევებმა აჩვენეს მნიშვნელოვნად მაღალი Ki67 ექსპრესია. ეს დასკვნები შეესაბამება Ki67-ის დადგენილ

როლს, როგორც უჯრედული პროლიფერაციის მარკერის და ადასტურებს მის სარგებლიანობას გაზრდილი ბიოლოგიური აქტივობისა და ავთვისებიანი პოტენციალის მქონე დაზიანებების იდენტიფიცირებაში.[14,17,18]

p53 ექსპრესიის ნიმუშების ანალიზმა გამოავლინა აბერანტული შედეგების მზარდი სიხშირე მაღალი ხარისხის დაზიანებებში. ველური ტიპის ექსპრესია ჭარბობდა არასიმსივნურ და ადრეულ წინამორბედ დაზიანებებში, მაშინ როდესაც ნულოვან და ზედმეტად/ჰიპერ ექსპრესია სულ უფრო ხშირი გახდა დისპლაზიისა და ადენოკარცინომის დროს. ეს დასკვნები შეესაბამება კუჭის კანცეროგენეზის თანამედროვე მოდელებს, რომლებიც TP53 ცვლილებებს ინვაზიური ავთვისებიანი სიმსივნისკენ პროგრესირებისას მნიშვნელოვან მოვლენებად აღიარებენ. მაღალი ხარისხის დისპლაზიის დროს p53 ექსპრესიის პათოლოგიური პრევალენტობა კიდევ უფრო ადასტურებს მის როლს, როგორც შორსწასული ნეოპლაზიური ტრანსფორმაციის მარკერის.[19,20]

ამ კვლევის მნიშვნელოვანი დაკვირვება იყო სრული და არასრული ნაწლავის მეტაპლაზიის განსხვავება. არასრულმა ნაწლავის მეტაპლაზიამ აჩვენა იმუნოფენოტიპური მახასიათებლები, რომლებიც ზოგადად უფრო ახლოს იყო დისპლაზიურ დაზიანებებთან, მათ შორის ნაწლავის უფრო ძლიერი დიფერენციაცია და გაზრდილი ბიოლოგიური არასტაბილურობის მტკიცებულება. ეს დასკვნები ადასტურებს არსებული კვლევების შედეგებისანგარიშებს, რომლებიც ვარაუდობენ, რომ არასრული ნაწლავის მეტაპლაზია პროგრესირების უფრო დიდ რისკს შეიცავს, ვიდრე სრული ნაწლავის მეტაპლაზია და შეიძლება წარმოადგენდეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვან სამიზნეს მეთვალყურეობის პროგრამებისთვის.[8,21]

ამ კვლევას აქვს რამდენიმე შეზღუდვა. რეტროსპექტულმა დიზაინმა და ზოგიერთ დიაგნოსტიკურ კატეგორიაში შემთხვევების შედარებით შეზღუდულმა რაოდენობამ შესაძლოა გავლენა მოახდინა ანალიზების სტატისტიკურ სიმძლავრეზე. გარდა ამისა, მოლეკულური ტესტირება არ ჩატარებულა, რაც ხელს უშლიდა იმუნოჰისტოქიმიურ მონაცემებსა და სპეციფიკურ გენეტიკურ დარღვევებს შორის პირდაპირ კორელაციას. მიუხედავად ამისა, კუჭის კანცეროგენეზის მთელი სპექტრის მოცული დაზიანებების ჩართვამ შესაძლებელი გახადა პროგრესირებასთან დაკავშირებული ფენოტიპური ცვლილებების ყოვლისმომცველი შეფასება.

დასკვნა

ჩვენი კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ კუჭის კანცეროგენეზს თან ახლავს პროგრესირებადი იმუნოფენოტიპური ცვლილებები, რომლებიც მოიცავს ეპითელურ დიფერენციაციას, პროლიფერაციულ აქტივობას და მოლეკულურ სტაბილურობას. CDX2 ექსპრესია გაიზარდა ნაწლავის მეტაპლაზიისა და დისპლაზიის განვითარების დროს, რაც ასახავს ნაწლავის დიფერენციაციის გზების გააქტიურებას, მაშინ როდესაც SOX2 ექსპრესია პროგრესულად შემცირდა, რაც მიუთითებს კუჭის ნორმალური ეპითელური

ფენოტიპის დაკარგვაზე. ამავდროულად, Ki67 პროლიფერაციული აქტივობა გაიზარდა და p53 ექსპრესიის აბერანტული ნიმუშები უფრო ხშირი გახდა დაზიანების სიმძიმის ზრდასთან ერთად.

წინამორბედ დაზიანებებს შორის, კუჭის არასრულმა ნაწლავურმა მეტაპლაზიამ და მაღალი ხარისხის დისპლაზიამ აჩვენა ყველაზე გამოხატული პროგრესირებასთან დაკავშირებული ცვლილებები, რაც ადასტურებს მათ როლს, როგორც ბიოლოგიურად არასტაბილურ დაზიანებების გაზრდილი ავთვისებიანი პოტენციალით. გარდა ამისა, ინვაზიურმა ადენოკარცინომებმა აჩვენა ნორმალური დიფერენციაციის პროგრამების მნიშვნელოვანი დარღვევა, რასაც თან ახლავს პროლიფერაციული აქტივობის მომატება და p53 ანომალიების დაგროვება.

CDX2, SOX2, Ki67 და p53-ის კომბინირებული შეფასება უზრუნველყოფს პრაქტიკულ იმუნოჰისტოქიმიურ მიდგომას კუჭის კიბოსწინარე დაზიანებების შესაფასებლად, პროგრესირების გაზრდილ რისკთან დაკავშირებული დაზიანებების იდენტიფიცირებისთვის. ეს დასკვნები ხელს უწყობს კუჭის კანცეროგენეზის საფუძვლად არსებული ფენოტიპური მოვლენების უკეთ გაგებას და შესაძლოა, ხელი შეუწყოს კუჭის წინამორბედი დაზიანებების მქონე პაციენტების დიაგნოსტიკური სტრატეგიკაციისა და მეთვალყურეობის გაუმჯობესებას.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Bekaii-Saab T, El-Rayes B. Identifying and targeting cancer stem cells in the treatment of gastric cancer. *Cancer* 2017;123:1303–12. <https://doi.org/10.1002/cncr.30538>.
- [2] Yasufuku I, Tsuchiya H, Fujibayashi S, Okumura N, Sengoku Y, Fukada M, et al. Oligometastasis of Gastric Cancer: A Review. *Cancers (Basel)* 2024;16. <https://doi.org/10.3390/CANCERS16030673>.
- [3] Hu HH, Wang SQ, Zhao H, Chen ZS, Shi X, Chen XB. HER2+ advanced gastric cancer: Current state and opportunities (Review). *Int J Oncol* 2024;64. <https://doi.org/10.3892/IJO.2024.5624>.
- [4] Acs M, Piso P, Glockzin G. Peritoneal Metastatic Gastric Cancer: Local Treatment Options and Recommendations. *Current Oncology* 2024;31:1445–59. <https://doi.org/10.3390/CURRONCOL31030109>.
- [5] Prognosis and Treatment of Gastric Cancer: A 2024 Update - PMC n.d. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11083929/> (accessed June 10, 2026).
- [6] Malfertheiner P, Schulz C, Hunt RH. Helicobacter pylori Infection: A 40-Year Journey through Shifting the Paradigm to Transforming the Management 2024;42:299–308. <https://doi.org/10.1159/000538079>.

- [7] Afkhamipour M, Kaviani F, Dalali S, Piri-Gharaghie T, Doosti A. Potential Gastric Cancer Immunotherapy: Stimulating the Immune System with *Helicobacter pylori* pIRES2-DsRed-Express-ureF DNA Vaccines. *Arch Immunol Ther Exp (Warsz)* 2024;72. <https://doi.org/10.2478/AITE-2024-0004>.
- [8] Goldenring JR, Nam KT, Wang TC, Mills JC, Wright NA. Spasmolytic polypeptide-expressing metaplasia and intestinal metaplasia: time for reevaluation of metaplasias and the origins of gastric cancer. *Gastroenterology* 2010;138:2207–10, 2210.e1. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2010.04.023>.
- [9] Giroux V, Rustgi AK. Metaplasia: tissue injury adaptation and a precursor to the dysplasia-cancer sequence. *Nat Rev Cancer* 2017;17:594–604. <https://doi.org/10.1038/nrc.2017.68>.
- [10] Barros R, Pereira D, Callé C, Camilo V, Cunha AI, David L, et al. Dynamics of SOX2 and CDX2 Expression in Barrett's Mucosa. *Dis Markers* 2016;2016:1532791. <https://doi.org/10.1155/2016/1532791>.
- [11] Barros R, Pereira D, Callé C, Camilo V, Cunha AI, David L, et al. Dynamics of SOX2 and CDX2 Expression in Barrett's Mucosa. *Dis Markers* 2016;2016:1532791. <https://doi.org/10.1155/2016/1532791>.
- [12] Karamchandani DM, Lehman HL, Ohanessian SE, Massé J, Welsh PA, Odze RD, et al. Increasing diagnostic accuracy to grade dysplasia in Barrett's esophagus using an immunohistochemical panel for CDX2, p120ctn, c-Myc and Jagged1. *Diagn Pathol* 2016;11. <https://doi.org/10.1186/S13000-016-0473-7>.
- [13] Fang Y, Li W, Chen X. P63 Deficiency and CDX2 Overexpression Lead to Barrett's-Like Metaplasia in Mouse Esophageal Epithelium. *Dig Dis Sci* 2021;66:4263–73. <https://doi.org/10.1007/s10620-020-06756-8>.
- [14] Meshveliani P, Didava G, Tomadze G, Kepuladze S, Burkadze G. Immunohistochemical Analysis of SOX2, Ki67, and p53 Expression in the Progression of Barrett's Esophagus to Esophageal Adenocarcinoma. *ქართული მეცნიერები* 2025;7:437–50. <https://doi.org/10.52340/gs.2025.07.01.40>.
- [15] Wen Y, Hou Y, Huang Z, Cai J, Wang Z. SOX2 is required to maintain cancer stem cells in ovarian cancer. *Cancer Sci* 2017;108:719–31. <https://doi.org/10.1111/cas.13186>.
- [16] Weina K, Utikal J. SOX2 and cancer: current research and its implications in the clinic. *Clin Transl Med* 2014;3. <https://doi.org/10.1186/2001-1326-3-19>.

- [17] Tavdgiridze N, Tevdorashvili G, Kepuladze S, Burkadze G. Ki67, CD44, and FOXP3 as Prognostic Markers in Ovarian Immature Teratomas: Implications for Tumor Aggressiveness and Metastasis. *ქართველი მეცნიერები* 2025;7:344–58. <https://doi.org/10.52340/gs.2025.07.01.30>.
- [18] Böger C, Behrens H-M, Röcken C. Ki67--An unsuitable marker of gastric cancer prognosis unmasks intratumoral heterogeneity. *J Surg Oncol* 2016;113:46–54. <https://doi.org/10.1002/jso.24104>.
- [19] M Fischer MQLSKE. The p53-p21-DREAM-CDE/CHR pathway regulates G2/M cell cycle genes. *Nucleic Acids Res* 2016;44:164–74.
- [20] Blagih J, Buck MD, Vousden KH. p53, cancer and the immune response. *J Cell Sci* 2020;133. <https://doi.org/10.1242/JCS.237453>.
- [21] Jankowski JA, Wright NA, Meltzer SJ, Triadafilopoulos G, Geboes K, Casson AG, et al. Molecular evolution of the metaplasia-dysplasia-adenocarcinoma sequence in the esophagus. *American Journal of Pathology* 1999;154:965–73. [https://doi.org/10.1016/S0002-9440\(10\)65346-1](https://doi.org/10.1016/S0002-9440(10)65346-1).

Immunophenotypic changes during gastric carcinogenesis: Expression patterns of CDX2, SOX2, Ki67, and p53 in gastric precancerous lesions and adenocarcinoma

Beka Dangadze¹; Shota Kepuladze²; George Didava³; George Burkadze⁴

¹PhD Student at Tbilisi State Medical University; ²Associate Professor at Tbilisi State Medical University, Molecular Pathology Department, MD, Clinical Pathologist; ³Associate Professor at Tbilisi State Medical University, Pathology Department. ⁴Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department of Molecular Pathology;

Abstract

Gastric carcinogenesis is a multistep process characterized by progressive morphological and molecular changes that progress from chronic gastric injury to invasive adenocarcinoma. Identification of biomarkers associated with lesion progression may improve risk stratification and early diagnosis.

The aim of the study was to examine the immunohistochemical expression patterns of CDX2, SOX2, Ki67, and p53 across the spectrum of gastric carcinogenesis and to assess their association with disease progression.

A retrospective cohort study was conducted on 68 formalin-fixed, paraffin-embedded gastric tissue specimens, including normal gastric mucosa, chronic atrophic gastritis, enteric metaplasia complete, enteric metaplasia incomplete, low-grade dysplasia, high-grade dysplasia, intestinal-type gastric adenocarcinoma, and diffuse-type gastric adenocarcinoma. Immunohistochemical staining for CDX2, SOX2, Ki67, and p53 was performed. Expression patterns were evaluated and correlated with lesion severity. The results of the study showed that CDX2 expression significantly increased during the transition from normal gastric mucosa to intestinal metaplasia and dysplasia, reflecting progressive intestinal differentiation. SOX2 expression, on the other hand, showed a gradual decrease, indicating a loss of the gastric epithelial phenotype. Ki67 proliferative activity progressively increased from non-neoplastic lesions to invasive carcinomas. Aberrant expression patterns of p53 expression were predominantly observed in dysplastic lesions and adenocarcinomas. Incomplete intestinal metaplasia showed immunophenotypic features intermediate between complete intestinal metaplasia and dysplasia, confirming its malignant potential. Gastric carcinogenesis is accompanied by progressive changes in epithelial differentiation, proliferative activity, and p53 status. Combined assessment of CDX2, SOX2, Ki67, and p53 may provide valuable information for evaluating gastric precursor lesions and identifying lesions at increased risk of progression to gastric adenocarcinoma.

Keywords: Gastric cancer; Intestinal metaplasia; Dysplasia; CDX2; SOX2; Ki67; p53; Gastric carcinogenesis; Immunohistochemistry.

ავტორთა შესახებ ინფორმაცია

ბექა დანგაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის PhD სტუდენტი;
ექიმი; ზოგადი ქირურგი;

Beka Dangadze – PhD Student at Tbilisi State Medical University; MD; General Surgeon;
bbdangadze@gmail.com

გიორგი დიდავა - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პათოლოგიური
ანატომიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი,

George Didava – Associate Professor at Tbilisi State Medical University, Pathology Department;
E-mail: giorgi.didava10@gmail.com

Phone Number: +995593321564

გიორგი ბურკაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის პროფესორი,
მოლეკულური პათოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი;

George Burkadze - Professor at Tbilisi State Medical University, Head of the Department of
Molecular Pathology;

E-mail: burkadze@yahoo.com g.burkadze@tsmu.edu

Phone Number: 599578833

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-4537>

შოთა კეპულაძე - თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის მოლეკულური
პათოლოგიის დეპარტამენტის ასოცირებული პროფესორი; ექიმი პათოლოგანატომი;

Shota Kepuladze – Associate Professor at Tbilisi State Medical University, Molecular Pathology
Department, MD, Clinical Pathologist;

E-mail: shota.kepuladze@gmail.com Sh.kepuladze@tsmu.edu

Phone Number: +995 598297600

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5919-5581>

Blockchain and Artificial Intelligence for Wine Industry Traceability and Recommendation: Current Trends and Research Gaps

Giorgi Patsatsia

Georgian Technical University, Faculty of Informatics and Control Systems, Tbilisi, Georgia

Abstract

The wine industry faces growing demands for supply chain transparency, product authenticity verification, and consumer-oriented digital services. This paper presents a literature review of blockchain and artificial intelligence (AI) technologies and their applications in the wine industry. Drawing on existing research, the study examines the foundational principles of blockchain technology and its deployment in supply chain management, AI-based recommendation systems and their adaptation to wine-food pairing tasks, the digital transformation of the wine industry within Industry 4.0 and 5.0 frameworks, and fuzzy logic-based multi-criteria decision-making (MCDM) models for technology evaluation. The review identifies key research gaps, including the limited development of hybrid systems that integrate supply chain traceability with AI-driven recommendations in a unified ecosystem, insufficient application of fuzzy MCDM methods in blockchain platform selection for domain-specific contexts, and the underdevelopment of cross-cultural wine-food pairing models. The analysis demonstrates that the convergence of blockchain and AI technologies offers a promising foundation for the digital transformation of the wine industry, combining supply chain transparency with intelligent, personalized consumer services. Future research directions are discussed, emphasizing the need for integrated hybrid approaches that address the identified gaps.

Keywords: blockchain, artificial intelligence, wine industry, supply chain, recommendation systems, fuzzy MCDM, digital transformation, traceability

1. Introduction

The global wine industry is undergoing a significant shift driven by increasing consumer expectations regarding product transparency, authenticity, and personalized experience. In contemporary markets, consumers demand not only high - quality products, but also reliable information about product origin, production processes, and compatibility with food pairings

(Chiaraluce, Bentivoglio, Finco, Fiore, & Galati, 2024). Simultaneously, producers face persistent challenges related to counterfeit products, fragmented supply chain data, and the need for more effective digital communication with end consumers.

The emergence of blockchain technology and artificial intelligence (AI) offers new possibilities for addressing these challenges. Blockchain provides a decentralized, immutable infrastructure for supply chain data management, while AI enables the development of intelligent, personalized recommendation services (Zheng, et al. 2017, Russell 2010). When integrated into a unified digital ecosystem, these technologies can support both the operational transparency of wine producers and the experiential needs of consumers.

Georgia, recognized as the birthplace of wine with over 8,000 years of uninterrupted winemaking tradition and more than 500 native grape varieties, represents a particularly relevant context for such developments (Adamashvili, Zhizhilashvili, & Tricase, 2024). The qvevri winemaking method, a UNESCO-recognized intangible cultural heritage, further underlines the importance of authenticating and tracing Georgian wine in global markets.

Despite growing interest in blockchain and AI applications across various industries, their integrated use in the wine sector remains underexplored. Most existing studies address either supply chain traceability or recommendation systems in isolation, without combining these dimensions into a coherent hybrid architecture. Furthermore, the application of fuzzy logic-based MCDM methods to blockchain platform selection in domain-specific contexts such as the wine industry has received limited scholarly attention.

This paper presents a structured literature review covering: the foundations and supply chain applications of blockchain technology; AI-based recommendation systems, with a focus on wine-food pairing; the digital transformation of the wine industry in the context of Industry 4.0 and 5.0; fuzzy logic and MCDM approaches relevant to technology evaluation; and an analysis of existing research gaps and future directions.

2. Blockchain Technology: Foundations and Applications

2.1 Foundational Principles

Blockchain is a distributed ledger technology that enables secure, transparent, and immutable recording of transactions through a decentralized architecture (Antonopoulos A. M., 2014). The technology is built on a chain of blocks structure, where each block contains a set of transactions cryptographically linked to the preceding block, ensuring data integrity and preventing unauthorized modifications (Nakamoto, 2008; Copigneaux, 2020).

A key characteristic of blockchain is its decentralization, which distributes data storage across multiple network nodes. Unlike traditional centralized systems, blockchain eliminates the single point of failure (SPOF) and ensures continuous synchronization of the ledger among participants (Zheng, Xie, Dai, Chen, & Wang, 2017). Consensus mechanisms - most notably Proof of Work (PoW) and Proof of Stake (PoS) - govern agreement among network participants on transaction validity. PoW relies on computational resources to solve cryptographic puzzles, while PoS uses participants' stake in the network as the basis for validation (Buterin, 2013).

A critical component of blockchain ecosystems is the smart contract: self-executing code that automatically enforces predefined conditions (Wohrer, 2018; Taherdoost, 2023). Smart contracts reduce the need for intermediaries, automate processes, and increase operational efficiency (Antonopoulos A. M., 2018). Blockchain platforms are broadly classified into public, private, and consortium types. Public blockchains such as Ethereum provide open access and strong decentralization, while private and consortium blockchains offer controlled access and higher throughput for organizational applications (Kechagias, 2023; Zheng, Xie, Dai, Chen, & Wang, 2017).

2.2 Blockchain in Supply Chain Management

Supply chain management encompasses the complex, multi-stage process of production, processing, storage, transportation, and distribution of goods (Kshetri, 2018). Traditional supply chain systems relying on centralized databases are prone to information fragmentation and reduced data reliability (Sabeti, 2019; Parry, 2024). Blockchain addresses these limitations by providing a unified, transparent, and tamper-resistant data infrastructure accessible to all authorized participants (Danese, 2021).

One of the most significant applications of blockchain in supply chain management is product traceability - maintaining a complete, verifiable record of a product's movement from raw material origin through production to final delivery (Wang, 2021; Abeyratne & Monfared, 2016). Traceability is particularly valuable in contexts where quality control and authenticity verification are critical, such as high - value food and beverage products (Cimino, 2012).

Contemporary research confirms that blockchain technology is especially effective for managing supply chains of high-value food products, reducing informational asymmetry and enabling reliable communication of provenance to consumers (Chiaraluce, Bentivoglio, Finco, Fiore, & Galati, 2024). Smart contracts further extend these capabilities by automating processes such as payment authorization and quality verification, reducing manual intervention and operational costs (Christidis, 2016; Buterin, 2013).

In the wine industry, the "Farm to Table" concept - tracking a product from vineyard to consumer - is particularly well-suited to blockchain implementation (Galvez, 2018; Casino, 2019).

Blockchain enables the registration of wine batches and bottles, documentation of production processes, and recording of laboratory analysis results. QR code integration further enables consumers to access the full provenance history of a product through a simple scan (Kamilaris et al., 2019; Biswas, 2017). Studies confirm that this approach increases consumer trust and reduces the risk of counterfeit products (Kechagias, 2023; Pesme, 2023).

3. Artificial Intelligence and Recommendation Systems

3.1 AI-Based Recommendation Systems

Artificial intelligence encompasses computational methods capable of performing tasks characteristic of human intelligence, including learning, analysis, decision-making, and adaptation (Russell 2010). Among the most practically significant AI applications are recommendation systems - data-driven tools that analyze user behavior, preferences, and contextual factors to generate personalized suggestions (Aggarwal, 2016; Ricci, Rokach, & Shapira, 2021).

Recommendation systems are broadly classified into three categories. Content-based systems analyze item characteristics and past user behavior to identify similar objects. Collaborative filtering leverages collective behavioral data to identify similarities among users and generate recommendations accordingly. Hybrid systems combine multiple approaches to mitigate the limitations of individual methods and improve accuracy (Adomavicius, 2005).

Knowledge-based recommendation systems are particularly relevant in domains where user interaction data is limited but structured expert knowledge exists. These systems encode domain rules and expert logic to guide recommendations (Burke, 2000; Ricci et al., 2021). Natural language processing (NLP) further extends the capabilities of modern recommendation systems by enabling the analysis of textual user feedback and facilitating conversational interfaces (Jurafsky, 2000; Cambria & White, 2014).

3.2 AI Approaches for Wine-Food Pairing

Wine-food pairing is a complex task that combines sensory characteristics, chemical composition, and cultural traditions to identify harmonious combinations (Harrington, 2007; Spence, 2020). Traditional pairing guidance relies on principles established in sommelier practice, encompassing acidity, tannins, sweetness, alcohol content, body, and textural characteristics. For example, high-tannin wines pair well with fatty dishes, while high-acidity wines complement sour or citrus-forward foods (King & Cliff, 2005). From an informatics perspective, these sensory and physicochemical attributes can be modeled as input features for AI-based recommendation systems, where acidity, sweetness, tannins, body, fat content, spiciness, texture, and flavor

intensity are translated into decision criteria for content-based and knowledge-based recommendation models (Patsatsia, 2026).

AI-based approaches to wine-food pairing primarily draw on knowledge-based models that encode expert rules and domain knowledge. This approach is particularly effective when large-scale user behavioral data is unavailable, but well-defined logical rules govern the task (Burke, 2000). Score-based models assign compatibility ratings to wine-food pairs, enabling ranked recommendations and comparison of alternatives (Aggarwal, 2016).

A notable emerging direction is cross-cultural recommendation modeling, which accounts for diverse culinary traditions. In a globalized context, consumers frequently seek combinations that cross cultural boundaries, such as Georgian wine with Italian cuisine or vice versa (Prescott, 2013). Bidirectional recommendation systems-providing wine suggestions for a given dish and dish suggestions for a given wine-represent a further development that enhances flexibility and user experience (Gupta & Katarya, 2024).

Context-aware recommendation systems, which factor in occasion, mood, and social setting, are also gaining attention in the wine domain, where selection is influenced not only by product characteristics but also by consumption context (Adomavicius, 2005). The integration of AI in wine-food pairing thus creates opportunities for intelligent, personalized services grounded in sensory science and cultural knowledge (Jannach, Zanker, Felfernig, & Friedric, 2010).

4. Wine Industry Digital Transformation: Industry 4.0 and 5.0

Contemporary industrial development is shaped by successive technological paradigms that progressively transform production, management, and consumer relations. Industry 4.0 - the fourth industrial revolution is characterized by the integration of cyber-physical systems, the Internet of Things (IoT), big data analytics, and AI into unified smart ecosystems (Xiang, et al., 2023). Smart Factories within this paradigm operate as interconnected environments where devices and systems function as a cohesive whole (Kaur, Potdar, & Agrawal, 2023).

In viticulture and wine production, Industry 4.0 enables smart viticulture systems that use sensors, IoT devices, and data analytics to monitor soil moisture, climatic conditions, and grape quality in real time, improving yields and reducing resource consumption (Matese & Di Gennaro, 2015). Blockchain technology is a key component of Industry 4.0 supply chain management, providing data reliability, transparency, and traceability while AI enables data analysis, forecasting, and personalized services (Javaid, Haleem, Singh, & Suman, 2022).

The combined use of IoT, AI, and blockchain in the wine industry represents a promising integrated approach for real-time supply chain monitoring, quality traceability, and intelligent

consumer interaction-a direction increasingly recognized in recent literature as central to the sector's digital transformation (Adamashvili, Zhizhilashvili, & Tricase, 2024).

Industry 5.0 advances beyond the efficiency-driven focus of its predecessor to emphasize human-centered, sustainable, and socially responsible technology deployment (Nahavandi, 2019). This paradigm recognizes that technology should augment human capabilities rather than merely automate processes, and that systems should be tailored to individual needs (Xu, X, Lu, Y, Vogel-Heuser, B, & Wang, L, 2021). In the wine industry, Industry 5.0 principles are particularly meaningful: wine is not only a product but a cultural and experiential object, and consumers value not just quality but narrative, origin, and personalized engagement (Spence, 2020). The integration of blockchain and AI technologies thus supports both the operational goals of Industry 4.0 and the human-centered orientation of Industry 5.0, creating a foundation for holistic digital transformation (Leng, Ruan, Jiang, Xu, & Liu, 2020; Carayannis & Morawska-Jancelewicz, 2022).

5. Fuzzy Logic and Multi-Criteria Decision Making

Fuzzy logic, introduced by Lotfi A. Zadeh, provides a mathematical framework for modeling uncertainty, imprecision, and subjective evaluation (Zadeh, 1965). Unlike classical Boolean logic, which assigns binary truth values, fuzzy logic operates with membership degrees in the continuous interval $[0, 1]$, enabling the representation of linguistic categories such as "high security" or "low cost" in quantitative form. Membership functions define the degree to which a given value belongs to a particular fuzzy set (Zimmermann, 2011).

Triangular Fuzzy Numbers (TFNs), defined by three parameters (l, m, u) representing the lower bound, most probable value, and upper bound respectively, are among the most widely used constructs in practical fuzzy modeling. TFNs provide a compact and intuitive method for encoding expert judgment under uncertainty (Zimmermann, 2011). Related work in the Georgian scientific context has also explored advanced fuzzy-based approaches to decision analysis (Sirbiladze, Khutsishvili, & Ghvaberidze, 2014).

Multi-Criteria Decision Making (MCDM) provides a methodological framework for evaluating alternatives across multiple, often conflicting criteria. Fuzzy MCDM integrates fuzzy logic into this framework, enabling the formalization of qualitative, subjective, and uncertain assessments in a structured quantitative model (Kahraman, 2008). The key advantages of fuzzy MCDM include: the accommodation of uncertainty and subjectivity; formalization of expert knowledge; integrated evaluation across heterogeneous criteria; and flexibility in weighting criteria according to context.

In the context of blockchain platform selection, decision-making requires the simultaneous analysis of parameters including scalability, security, decentralization, interoperability, cost, ecosystem maturity, and smart contract support-many of which resist precise numerical specification (Belotti, Božić, Pujolle., & Secci, 2019). Scenario-based fuzzy MCDM analysis, in which different criteria receive different weights depending on the application context (e.g., security-oriented vs. performance-oriented scenarios), allows decisions to be adapted to real requirements. While some recent studies have applied fuzzy MCDM to blockchain platform evaluation in general enterprise contexts (Muradi, 2022), their application to domain-specific hybrid platforms-particularly in the wine industry-remains limited (Belotti, Božić, Pujolle., & Secci, 2019).

6. Research Gaps and Future Directions

Analysis of the existing literature reveals that while significant progress has been made in blockchain supply chain applications and AI-based recommendation systems individually, their integration into unified digital ecosystems remains limited and fragmented (Saberli, 2019). The main research gaps identified from the reviewed literature are summarized in

Table 2.

Table 2. Research Gaps in Blockchain-AI Integration for the Wine Industry

Research area	Current focus	Limitation	Identified gap
Blockchain in wine supply chain	Traceability and authenticity	Limited consumer-facing intelligence	Need for blockchain-AI integration
Wine-food recommendation	Sensory and preference-based pairing	Weak link with provenance data	Need for traceability-enriched recommendations
Blockchain platform selection	General technical evaluation	Limited domain-specific fuzzy MCDM	Need for wine-industry-oriented platform selection
Cross-cultural pairing	Local or general pairing principles	Limited intercultural pairing models	Need for intercultural sensory models

Blockchain-based supply chain systems are primarily oriented toward data storage and verification, with limited incorporation of intelligent, consumer-facing functionality (Tian, 2017). Conversely, recommendation systems for wine and food pairing largely operate independently of supply chain data. Although wine-food pairing can be modeled through sensory and physicochemical attributes and translated into feature-based or rule-based recommendation logic (Patsatsia, 2026), conventional recommendation approaches generally rely on item features, user preferences, or interaction data rather than verified product provenance information (Ricci, Rokach, & Shapira, 2021). The integration of traceability with intelligent recommendation in a single ecosystem thus remains a significant research gap.

Cross-cultural wine-food pairing models are insufficiently developed: most existing approaches are bounded by single cultural or geographic contexts, limiting their applicability in multicultural settings (Harrington, 2007; Spence, 2020). The development of models capable of integrating diverse culinary traditions—such as Georgian and Italian wine and cuisine—represents an underexplored direction.

Fuzzy MCDM methods are rarely applied to blockchain platform selection in domain-specific applications. Existing evaluations typically rely on fixed metrics that do not adequately capture uncertainty or contextual dependency (Belotti, Božić, Pujolle., & Secci, 2019). Methodological frameworks that combine fuzzy logic, MCDM, and domain requirements for sector-specific blockchain adoption remain scarce.

Future research should address these gaps through the development of integrated hybrid architectures that combine blockchain-based traceability, AI-driven recommendations, and structured decision-making models. Particular attention should be given to: the enrichment of recommendation systems with verified supply chain data; the development of cross-cultural sensory pairing models grounded in Georgian and Mediterranean wine traditions; the application of scenario-based fuzzy MCDM to blockchain platform selection in the wine industry context; and the validation of proposed systems with real-world user feedback and industry data.

7. Conclusion

This paper has reviewed the current state of research at the intersection of blockchain technology, artificial intelligence, and the wine industry. The analysis demonstrates that blockchain offers robust capabilities for supply chain transparency and product traceability, while AI-based recommendation systems provide a foundation for personalized, knowledge-driven consumer services. The Industry 4.0 and 5.0 frameworks underscore the importance of integrating these technologies within human-centered, sustainable digital ecosystems.

Fuzzy logic and MCDM methods provide valuable tools for navigating the complexity of technology selection under uncertainty—a challenge particularly relevant when evaluating blockchain platforms for domain-specific applications. The review identifies key research gaps that limit the practical realization of integrated blockchain-AI systems in the wine industry, including the absence of unified hybrid architectures, underdeveloped cross-cultural pairing models, and insufficient application of fuzzy MCDM to blockchain platform selection in domain-specific contexts.

Addressing these gaps represents a meaningful direction for future research, with practical implications for wine producers, technology developers, and consumers. The convergence of blockchain and AI technologies, grounded in the rich cultural heritage of wine-producing regions such as Georgia and Italy, offers a promising pathway toward more transparent, intelligent, and personalized digital services in the wine industry.

References

- Abeyratne, S., & Monfared, R. (2016). Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger. *International journal of research in engineering and technology*, 5(9), 1-10.
- Adamashvili, N., Zhizhilashvili, N., & Tricase, C. (2024). The integration of the internet of things, artificial intelligence, and blockchain technology for advancing the wine supply chain. *Computers*, 13(3), 72.
- Adomavicius, G. (2005). *Toward the next generation of recommender systems: A survey of the state-of-the-art and possible extensions*. *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, 17(6).
- Aggarwal, C. C. (2016). *Recommender Systems: The Textbook*. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-29659-3>
- Antonopoulos, A. M. (2014). *Mastering Bitcoin: unlocking digital cryptocurrencies*. O'Reilly Media, Inc.
- Antonopoulos, A. M. (2018). *Mastering ethereum: building smart contracts and dapps*. O'Reilly Media.
- Belotti, M., Božić, N., Pujolle, G., & Secci, S. (2019). A vademecum on blockchain technologies: When, which, and how. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3796-3838.

- Biswas, K. M. (2017). Blockchain based wine supply chain traceability system.
- Burke, R. (2000). Knowledge-Based Recommender Systems. Encyclopedia of library and information systems.
- Burke, R. (2002). Hybrid recommender systems. *User modeling and user-adapted interaction*, 12(4), 331-370.
- Buterin, V. (2013). Ethereum Whitepaper: A Next Generation Smart.
- Cambria, E., & White, B. (2014). Jumping NLP curves: A review of natural language processing research. *IEEE Computational intelligence magazine*, 9(2), (pp. 48-57). doi:10.1109/MCI.2014.230722
- Carayannis, E. G., & Morawska-Jancelewicz, J. (2022). The futures of Europe: Society 5.0 and Industry 5.0 as driving forces of future universities. *Journal of the Knowledge Economy*, 13(4), , 3445-3471.
- Casino, F. D. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. (pp. 55–81). Telematics and Informatics, 36,.
- Chiaraluce, G., Bentivoglio, D., Finco, A., Fiore, M., & Galati, A. (2024). Exploring the role of blockchain technology in modern high-value food supply chains: global trends and future research directions. *Agricultural and Food Economics*, 12(1), 6.
- Christidis, K. &. (2016). Blockchains and smart contracts for the internet of things. . (pp. 2292-2303). IEEE access, 4,.
- Cimino, M. G. (2012). Enabling traceability in the wine supply chain. (pp. 397-412). Springer Berlin Heidelberg.
- Copigneaux, B. V. (2020). Blockchain for supply chains and international trade.
- Danese, P. M. (2021). Designing blockchain systems to prevent counterfeiting in wine supply chains: a multiple-case study. *International Journal of Operations & Production Management*, 41(13), 1-33.
- Galvez, J. F.-G. (2018). Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. (pp. , 222–232). Trends in Analytical Chemistry. doi:10.1016/j.trac.2018.08.011
- Gupta, G., & Katarya, R. (2024). A computational approach towards food-wine recommendations. *Expert Systems with Applications*.
- Harrington, R. J. (2007). *Food and wine pairing: A sensory experience*. John Wiley & Sons.

- Jannach, D., Zanker, M., Felfernig, A., & Friedric. (2010). *Recommender systems: an introduction*. Cambridge university press.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R., & Suman, R. (2022). Artificial intelligence applications for industry 4.0: A literature-based study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 7(01), 83-111.
- Jurafsky, D. (2000). *Speech and language processing*. . Prentice-Hall.
- Kahraman, C. (2008). *Fuzzy multi-criteria decision making: Theory and applications with recent developments*. Springer. doi:10.1007/978-0-387-76813-7
- Kamilaris et al. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in food science & technology*, (pp. 640-652).
- Kaur, A., Potdar, V., & Agrawal, H. (2023). Industry 4.0 adoption in food supply chain to improve visibility and operational efficiency—a content analysis. (pp. 73922-73958). IEEE Access 11.
- Kechagias, E. P. (2023). An Ethereum-Based Distributed Application for Enhancing Food Supply Chain Traceability., (pp. 12(6), 1220). doi:10.3390/foods12061220
- King, M., & Cliff, M. (2005). Evaluation of ideal wine and cheese pairs using a deviation-from-ideal scale with food and wine experts. *Journal of food quality*, 28(3), 245-256.
- Kshetri, N. (2018). Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. (pp. 80-89). *International Journal of information management*, 39. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005
- Leng, J., Ruan, G., Jiang, P., Xu, K., & Liu, Q. (2020). Blockchain-empowered sustainable manufacturing and product lifecycle management in industry 4.0: A survey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 132. doi:10.1016/j.rser.2020.110112
- Matese, A., & Di Gennaro, S. (2015). Technology in precision viticulture: A state of the art review. *International Journal of Wine Research*, 7, 69–81. doi:10.2147/IJWR.S69405
- Muradi, S. B. (2022). *Systematic selection of blockchain platforms using fuzzy AHP-TOPSIS*. University of Malaya.
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*, 11(16). doi:doi.org/10.3390/su11164371
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.

- Parry, G. M. (2024). Bottling up trust: a review of blockchain adoption in wine supply chain traceability. *IEEE Access*. doi:10.1109/ACCESS.2024.3505428
- Patsatsia, G. (2026). The Science Behind Wine and Food Pairing. *Georgian Scientists. Vol. 8 Issue 2*. doi:https://doi.org/10.52340/gi.2026.08.02.56
- Pesme, J. O. (2023). Tracing and tracking wine bottles: Protecting consumers and producers. *44th World Congress of Vine and Wine*. doi:10.1051/bioconf/20236803028
- Prescott, J. (2013). *Taste matters: Why we like the foods we do*. Reaktion Books.
- Ricci, F., Rokach, L., & Shapira, B. (2021). *Recommender systems: Techniques, applications, and challenges*. Recommender systems handbook, 1-35.
- Russell, S. J. (2010). Artificial intelligence a modern approach. Pearson Education, Inc.
- Saberi, S. K. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. (pp. 2117-2135). *International journal of production research*, 57(7).
- Sirbiladze, G., Khutsishvili, I., & Ghvaberidze, B. (2014). Multistage decision-making fuzzy methodology for optimal investments based on experts' evaluations. *European journal of operational research*, 232(1), 169-177.
- Spence, C. (2020). Food and beverage flavour pairing: A critical review of the literature. . *Food Research International*, 133, , 109-124.
- Taherdoost, H. (2023). Smart Contracts in Blockchain Technology: A Critical Review. *Information*, 14(2), 117. doi:10.3390/info14020117
- Tian, F. (2017). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things. *International Conference on Service Systems and Service Management* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/ICSSSM.2017.7996119
- Wang, L. X. (2021). Smart contract-based agricultural food supply chain traceability. (pp. 9296-9307). *IEEE access*, 9,.
- Wohrer, M. &. (2018). Smart contracts: security patterns in the ethereum ecosystem and solidity. *2018 International Workshop on Blockchain Oriented Software Engineering (IWBOSE)* (pp. 2-8). IEEE.
- Xiang, W., Yu, K., Han, F., Fang, L., He, D., & Ha. (2023). Advanced manufacturing in industry 5.0: A survey of key enabling technologies and future trends. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, (pp. 1055-1068).

- Xu, X, Lu, Y, Vogel-Heuser, B, & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of manufacturing systems*, 61,, 530-535. doi:10.1016/j.jmsy.2021.10.006
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. (pp. 557-564). In 2017 IEEE international congress on big data (BigData congress).
- Zimmermann, H. J. (2011). *Fuzzy set theory—and its applications*. . Springer Science & Business Media.

ფსიქოსოციალური რისკების შეფასების საერთაშორისო მიდგომები ჯანდაცვაში

ნატალია ბულია

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის დოქტორანტი

რეზიუმე

სტატიაში განხილულია სამედიცინო სექტორში ფსიქოსოციალური რისკების შეფასებისა და მართვის საერთაშორისო პრაქტიკა. გაანალიზებულია ფსიქოსოციალური რისკების თეორიული საფუძვლები, მათ შორის Job Demand-Control Model და Effort-Reward Imbalance Model. ყურადღება გამახვილებულია ჯანდაცვის სფეროში გავრცელებულ ფსიქოსოციალურ საფრთხეებზე, როგორიცაა სამუშაო სტრესი, პროფესიული გადაღლა (burnout), მაღალი სამუშაო დატვირთვა და ემოციური შრომა. ნაშრომში განხილულია ფსიქოსოციალური რისკების შეფასების თანამედროვე ინსტრუმენტები, მათ შორის COPSOQ და ISTAS21, აგრეთვე ორგანიზაციული და ინდივიდუალური ინტერვენციების მნიშვნელობა. შესწავლილია ესპანეთის, საფრანგეთისა და ესტონეთის გამოცდილება და განხორციელებულია მათი შედარებითი ანალიზი. კვლევა აჩვენებს, რომ ფსიქოსოციალური რისკების ეფექტური მართვა ეფუძნება პრევენციულ, სისტემურ და თანამშრომელზე ორიენტირებულ მიდგომებს, რაც ხელს უწყობს სამედიცინო პერსონალის ჯანმრთელობის დაცვასა და სამედიცინო მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესებას.

საკვანძო სიტყვები: ფსიქოსოციალური რისკები, სამუშაო სტრესი, პროფესიული გადაღლა, ჯანდაცვის სექტორი, შრომის უსაფრთხოება, რისკების მართვა.

1. საერთაშორისო პრაქტიკის ზოგადი მიმოხილვა

ფსიქოსოციალური რისკების საკითხი თანამედროვე შრომის უსაფრთხოების სისტემაში ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მიმართულებად ჩამოყალიბდა, განსაკუთრებით მაღალი რისკის მქონე სექტორებში, მაგალითად: როგორიცაა ჯანდაცვა. საერთაშორისო

პრაქტიკაში ფსიქოსოციალური რისკები განისაზღვრება როგორც სამუშაო გარემოს, ორგანიზაციული სტრუქტურისა და სოციალური ურთიერთობების ისეთი ასპექტები, რომლებიც უარყოფითად მოქმედებს თანამშრომელთა ფსიქიკურ, ფიზიკურ და სოციალურ კეთილდღეობაზე. აღნიშნულ საკითხს განსაკუთრებულ ყურადღებას უთმობენ ისეთი საერთაშორისო ორგანიზაციები, როგორებიცაა International Labour Organization, World Health Organization და European Agency for Safety and Health at Work, რომლებიც ფსიქოსოციალურ რისკებს შრომის უსაფრთხოების სისტემის განუყოფელ ნაწილად განიხილავენ [1]. საქართველოში ჩატარებული კვლევებიც ადასტურებს, რომ სამედიცინო სექტორი წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე მაღალი პროფესიული რისკის მქონე სფეროს. ჯანდაცვის დაწესებულებებში დასაქმებულები ყოველდღიურად ექვემდებარებიან ბიოლოგიურ, ქიმიურ, ფიზიკურ და ფსიქოსოციალურ საფრთხეებს, რაც საჭიროებს რისკების სისტემურ შეფასებასა და ეფექტური პრევენციული ღონისძიებების დანერგვას. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება შრომის უსაფრთხოების მონიტორინგსა და რისკების მართვის ინტეგრირებულ სისტემებს, რომლებიც უზრუნველყოფს როგორც თანამშრომელთა კეთილდღეობას, ისე სამედიცინო მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესებას [19].

ფსიქოსოციალური რისკების კვლევა ეფუძნება მრავალთეორიულ მიდგომას. განსაკუთრებით აღსანიშნავია Job Demand-Control Model, რომლის მიხედვითაც სამუშაო სტრესი ვითარდება მაშინ, როდესაც მაღალი სამუშაო მოთხოვნები (job demands) არ არის დაბალანსებული თანამშრომლის მიერ სამუშაო პროცესზე კონტროლის (job control) შესაძლებლობით. აღნიშნულ მოდელს ავსებს Effort-Reward Imbalance Model, რომელიც ყურადღებას ამახვილებს თანამშრომლის მიერ გაწეულ ძალისხმევას, მიღებულ ანაზღაურებასა და აღიარებას შორის დისბალანსზე. ეს თეორიული მოდელები ფართოდ გამოიყენება საერთაშორისო პრაქტიკაში ფსიქოსოციალური რისკების შეფასებისა და მართვის სისტემების ფორმირებისას. გლობალური კვლევები მიუთითებს, რომ ფსიქოსოციალური რისკები განსაკუთრებით მაღალია ჯანდაცვის სექტორში, რადგან სამედიცინო პერსონალი ყოველდღიურად მუშაობს მაღალი ემოციური დატვირთვის პირობებში. მათი საქმიანობა დაკავშირებულია პაციენტებთან ინტენსიურ კომუნიკაციასთან, კრიტიკული გადაწყვეტილებების მიღებასთან და სიცოცხლესთან დაკავშირებულ პასუხისმგებლობასთან. ასეთ გარემოში განსაკუთრებით გავრცელებულია პროფესიული გადაღლა — „Burnout“, რომლის კონცეპტუალური განვითარება უკავშირდება Christina Maslach-ის კვლევებს. „Burnout“ ხასიათდება ემოციური გამოფიტვით, დეპერსონალიზაციითა და პროფესიული ეფექტიანობის შემცირებით, რაც უარყოფითად აისახება როგორც თანამშრომლის ჯანმრთელობაზე, ისე სამედიცინო მომსახურების ხარისხზე.

პანდემიის შემდგომ პერიოდში ფსიქოსოციალური რისკების მნიშვნელობა კიდევ უფრო გაიზარდა. სამუშაო დატვირთვის ზრდამ, გაურკვევლობამ და მუდმივმა ფსიქოლოგიურმა ზეწოლამ მნიშვნელოვნად გაამწვავა სამუშაო სტრესი ჯანდაცვის სექტორში. კვლევების მიხედვით, ფსიქოსოციალური რისკები წარმოიშობა სამუშაო

გარემოს არასათანადო ორგანიზებისა და მართვის შედეგად და იწვევს თანამშრომელთა ფსიქიკურ და ფიზიკურ ზიანს. სტრესი განსაკუთრებით მაშინ ვითარდება, როდესაც სამუშაო მოთხოვნები აღემატება თანამშრომლის შესაძლებლობებსა და რესურსებს [2-4]. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ჯანდაცვის სექტორის სპეციფიკას, რომელიც გამოირჩევა ე.წ. „ემოციური შრომით“ (emotional labour). აღნიშნული გულისხმობს თანამშრომლის მხრიდან ემოციების მუდმივ კონტროლსა და მართვას პროფესიული მოვალეობების შესრულების პროცესში. მსგავსი სამუშაო გარემო მნიშვნელოვნად ზრდის ქრონიკული სტრესის, პროფესიული გადაღლისა და სამუშაო უკმაყოფილების რისკს [5].

2. ფსიქოსოციალური რისკების მართვის სისტემები კლინიკურ გარემოში

ფსიქოსოციალური რისკების მართვა კლინიკურ გარემოში წარმოადგენს უწყვეტ და სისტემურ პროცესს, რომელიც მოიცავს რისკების იდენტიფიკაციას, შეფასებას, კონტროლსა და მონიტორინგს. საერთაშორისო მიდგომების მიხედვით, აღნიშნული პროცესი ორგანიზაციის მართვის სისტემაში ინტეგრირებული უნდა იყოს და არა მხოლოდ ინდივიდუალურ პრობლემებზე რეაგირების ფორმით განხორციელდეს. კლინიკებში ფართოდ გამოიყენება სტანდარტიზებული შეფასების ინსტრუმენტები, მათ შორის COPSQ (Copenhagen Psychosocial Questionnaire), რომელიც აფასებს სამუშაო დატვირთვას, ემოციურ მოთხოვნებს, სოციალური მხარდაჭერის ხარისხსა და სამუშაო გარემოს სხვა მნიშვნელოვან ფაქტორებს. COPSQ საერთაშორისო დონეზე აღიარებული კითხვარია, რომელიც გამოიყენება ჯანდაცვის სექტორში სტრესის, burnout-ისა და ფსიქოსოციალური პირობების შესაფასებლად. კვლევები მიუთითებს, რომ აღნიშნული ინსტრუმენტი ეფექტურად განსაზღვრავს სამუშაო გარემოს ფსიქოსოციალურ გამოწვევებს სამედიცინო პერსონალში.

საერთაშორისო პრაქტიკა აჩვენებს, რომ ფსიქოსოციალური რისკების მართვის ყველაზე ეფექტური გზა ორგანიზაციული ინტერვენციებია. ასეთ ინტერვენციებს მიეკუთვნება სამუშაო დატვირთვის შემცირება, სამუშაო გრაფიკის რეგულირება, მენეჯმენტის მხარდაჭერის გაძლიერება და თანამშრომელთა ჩართულობის გაზრდა. World Health Organization აღნიშნავს, რომ სამუშაო გარემოს გაუმჯობესება წარმოადგენს ფსიქიკური ჯანმრთელობის დაცვის ერთ-ერთ მთავარ მექანიზმს [6-8].

ინდივიდუალური მხარდაჭერის პროგრამები მოიცავს ფსიქოლოგიურ კონსულტაციას, სტრესის მართვის ტრენინგებსა და კეთილდღეობის პროგრამებს. მსგავსი მიდგომები ხელს უწყობს თანამშრომელთა ფსიქოლოგიური მდგრადობის ზრდას და პროფესიული გადაღლის შემცირებას. ეფექტური სისტემა ასევე მოითხოვს მუდმივ მონიტორინგს. მონიტორინგის პროცესში გამოიყენება თანამშრომელთა გამოკითხვები, „absenteeism“-ის (თანამშრომელთა არყოფნის) ანალიზი, უკუკავშირის მექანიზმები და სამუშაო გარემოს პერიოდული შეფასება. აღნიშნული მონაცემები ორგანიზაციებს საშუალებას აძლევს დროულად გამოავლინონ რისკები და შეიმუშაონ პრევენციული ღონისძიებები [9-10].

3. საერთაშორისო პრაქტიკა

3.1. ესპანეთის მოდელი

ესპანეთში ფსიქოსოციალური რისკების მართვა ინტეგრირებულია შრომის უსაფრთხოების ეროვნულ სისტემაში და ეფუძნება სავალდებულო შეფასებებს. ქვეყნის შრომის უსაფრთხოების ეროვნული ინსტიტუტი (INSST) განსაზღვრავს, რომ ფსიქოსოციალური რისკები უნდა შეფასდეს ყველა სამუშაო გარემოში და შესაბამისი პრევენციული ღონისძიებები სისტემურად დაინერგოს. ესპანეთის მოდელის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ინსტრუმენტს წარმოადგენს COPSQ-ის ადაპტირებული ვერსია — ISTAS21, რომელიც გამოიყენება სამუშაოს ემოციური, კოგნიტური და ორგანიზაციული მოთხოვნების შესაფასებლად. აღნიშნული მეთოდოლოგია ზომავს სამუშაო დატვირთვას, სამუშაოზე კონტროლის ხარისხს, ხელმძღვანელობის ეფექტიანობას, სოციალური მხარდაჭერის დონესა და სამუშაო კონფლიქტებს. ესპანეთში ფსიქოსოციალური რისკების შეფასება ეფუძნება კომბინირებულ მიდგომას, რომელიც აერთიანებს რაოდენობრივ და ხარისხობრივ მეთოდებს. პრაქტიკაში გამოიყენება კითხვარები, ფოკუს-ჯგუფები, ინტერვიუები და სამუშაო პროცესის დაკვირვება, რაც ორგანიზაციებს საშუალებას აძლევს სრულყოფილად შეაფასონ სამუშაო გარემო.

ესპანეთის მოდელის მნიშვნელოვანი თავისებურებაა ორგანიზაციულ ცვლილებებზე ორიენტირებული ინტერვენციები. პრაქტიკაში აქტიურად გამოიყენება სამუშაო დატვირთვის შემცირება, კომუნიკაციის გაუმჯობესება, მენეჯმენტის გადამზადება, მოქნილი სამუშაო გრაფიკები და თანამშრომელთა ჩართულობა გადაწყვეტილებების მიღების პროცესში [11-14].

ჯანდაცვის სექტორში ჩატარებული კვლევები მიუთითებს, რომ სამედიცინო პერსონალის მნიშვნელოვან ნაწილს აღენიშნება მაღალი ემოციური მოთხოვნები, სამუშაო გადატვირთვა და burnout-ის მაღალი დონე. კვლევების მიხედვით, 80%-ზე მეტი თანამშრომელი განიცდის სამუშაო სტრესს [15].

3.2. საფრანგეთის მოდელი

საფრანგეთში ფსიქოსოციალური რისკები ცნობილია როგორც RPS (Risques Psychosociaux) და წარმოადგენს სახელმწიფო რეგულირების ქვეშ მყოფ სფეროს. საფრანგეთის შრომის სამინისტრო ავალდებულებს ორგანიზაციებს შეაფასონ ფსიქოსოციალური რისკები და შეიმუშაონ პრევენციული გეგმები. საფრანგეთის მიდგომის მთავარი თავისებურება ისაა, რომ ფსიქოსოციალური რისკები განიხილება არა როგორც ინდივიდუალური პრობლემა, არამედ როგორც ორგანიზაციული სტრუქტურისა და მენეჯმენტის ხარისხის შედეგი. შეფასების პროცესში გამოიყენება RPS diagnostic tools, ფსიქოსოციალური აუდიტები, შრომის ინსპექციის შეფასებები და თანამშრომელთა ანონიმური გამოკითხვები.

კვლევების მიხედვით, საფრანგეთის ჯანდაცვის სექტორში ძირითად რისკ-ფაქტორებს წარმოადგენს პერსონალის დეფიციტი, ემოციური გადაღლა, დროის ზეწოლა და პაციენტების მაღალი ნაკადი. აღნიშნული ფაქტორები პირდაპირ უკავშირდება burnout-სა და სამუშაო სტრესს [16-17].

საფრანგეთში ფსიქოსოციალური რისკების მართვა ეფუძნება „collective prevention“-ის პრინციპს, რაც გულისხმობს კოლექტიურ და სისტემურ პრევენციას. პრაქტიკაში გამოიყენება სავალდებულო პრევენციის გეგმები, შრომის ინსპექციის კონტროლი, ფსიქოლოგიური დახმარების სისტემები და სამუშაო გარემოს კოლექტიური გაუმჯობესება.

3.3. ესტონეთის მოდელი

ესტონეთი იყენებს ევროკავშირის დირექტივებზე დაფუძნებულ სისტემას და ეტაპობრივად ნერგავს ფსიქოსოციალური რისკების შეფასებისა და მართვის თანამედროვე მექანიზმებს. ქვეყნის შრომის უსაფრთხოების სისტემა ვითარდება ევროკავშირის სტანდარტების შესაბამისად, სადაც ფსიქოსოციალური რისკები ერთ-ერთ პრიორიტეტულ მიმართულებად განიხილება [18]. ესტონეთის მოდელი ხშირად განიხილება როგორც „transitional model“, რადგან ქვეყანა ტრადიციული რეგულაციებიდან თანამედროვე, მონაცემებზე დაფუძნებულ სისტემაზე გადადის. პრაქტიკაში გამოიყენება სამუშაო რისკების შეფასების ვალდებულება, ფსიქოსოციალური რისკების ინტეგრაცია OSH სისტემაში და პრევენციული მიდგომები.

ესტონეთის სისტემა განსაკუთრებულ ყურადღებას უთმობს თანამშრომელთა ჩართულობას, ორგანიზაციულ კულტურას, სამუშაო გარემოს გაუმჯობესებასა და ადრეულ პრევენციას. თანამედროვე ტენდენციებში აქტიურად ვითარდება ციფრული შეფასების ინსტრუმენტები, HR analytics და სამუშაო სტრესის მონიტორინგის მექანიზმები.

4. შედარებითი ანალიზი

ესპანეთის, საფრანგეთისა და ესტონეთის გამოცდილების შედარება აჩვენებს, რომ მიუხედავად განსხვავებული მართვის მოდელებისა, სამივე ქვეყანა ფსიქოსოციალური რისკების მართვას სისტემურ და პრევენციულ მიდგომაზე აფუძნებს.

4.1. საერთო მახასიათებლები:

- ფსიქოსოციალური რისკების ოფიციალური აღიარება;
- პრევენციული მიდგომების გამოყენება;
- სამართლებრივი ჩარჩოების არსებობა;
- თანამშრომელთა აქტიური ჩართულობა.

4.2. ძირითადი განსხვავებები:

- ესპანეთი - ძლიერი კვლევითი და მეთოდოლოგიური ბაზა;
- საფრანგეთი - სახელმწიფო კონტროლისა და სოციალური პოლიტიკის მაღალი დონე;
- ესტონეთი - უწყვეტად განვითარებადი, ციფრულ ტექნოლოგიებზე ორიენტირებული მოდელი.

5. დასკვნა

ფსიქოსოციალური რისკების მართვა წარმოადგენს ჯანდაცვის სექტორში შრომის უსაფრთხოების გაუმჯობესების მნიშვნელოვან ინსტრუმენტს. საერთაშორისო გამოცდილება ცხადყოფს, რომ ეფექტური სტრატეგიები ეფუძნება პრევენციას, სისტემურ მიდგომას, ორგანიზაციულ ცვლილებებსა და თანამშრომელთა აქტიურ ჩართულობას.

შესაბამისად, ჯანდაცვის ორგანიზაციებმა უნდა დანერგონ ინტეგრირებული მართვის სისტემები, რომლებიც გააერთიანებს როგორც ორგანიზაციულ ინტერვენციებს, ისე ინდივიდუალური მხარდაჭერის მექანიზმებს. მსგავსი მიდგომა ხელს შეუწყობს თანამშრომელთა ფსიქიკური ჯანმრთელობის დაცვას, პროფესიული გადაღლის შემცირებასა და სამედიცინო მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესებას.

გარდა ამისა, თანამედროვე სამედიცინო ორგანიზაციებისთვის მნიშვნელოვანია პროფესიული რისკების მართვის კომპლექსური სისტემების დანერგვა, რომლებიც ფსიქოსოციალურ რისკებთან ერთად მოიცავს ბიოლოგიური, ქიმიური და ფიზიკური საფრთხეების შეფასებასა და კონტროლს. აღნიშნული მიდგომა ქმნის უსაფრთხო სამუშაო გარემოს, ამცირებს პროფესიული დაზიანებებისა და დაავადებების ალბათობას და ზრდის ჯანდაცვის მომსახურების ეფექტიანობას.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. European Agency for Safety and Health at Work. (n.d.). *Psychosocial risks and mental health at work*. <https://osha.europa.eu>
2. Karasek, R. A. (1979). Job demands, job decision latitude, and mental strain. *Administrative Science Quarterly*, 24(2), 285–308.
3. Siegrist, J. (1996). Adverse health effects of high-effort/low-reward conditions. *Journal of Occupational Health Psychology*, 1(1), 27–41.
4. Maslach, C., & Jackson, S. E. (1981). The measurement of experienced burnout. *Journal of Occupational Behaviour*, 2(2), 99–113.
5. International Labour Organization. (n.d.). *Psychosocial risks and stress at work*. <https://www.ilo.org>
6. World Health Organization. (n.d.). *Occupational hazards in the health sector: Psychosocial risks and mental health*. <https://www.who.int>
7. European Agency for Safety and Health at Work. (n.d.). *Mental health at work: Practical resources*. <https://osha.europa.eu>
8. Copenhagen Psychosocial Questionnaire (COPSOQ) International Network. (n.d.). *Copenhagen Psychosocial Questionnaire (COPSOQ)*. <https://www.copsoq-network.org>
9. European Psychiatry Journal. (n.d.). *Studies on COPSOQ use in the healthcare sector*.
10. World Health Organization. (n.d.). *Mental health at work*. <https://www.who.int>
11. International Labour Organization. (n.d.). *Psychosocial risks and stress at work*. <https://www.ilo.org>
12. European Agency for Safety and Health at Work. (n.d.). *Psychosocial risks and mental health*. <https://osha.europa.eu>
13. National Institute for Safety and Health at Work (INSST). (n.d.). *Psychosocial risks in the workplace*. <https://www.insst.es>
14. ISTAS21. (n.d.). *Spanish adaptation of the COPSOQ questionnaire*. <https://istas.net>
15. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions (Eurofound). (n.d.). *Working conditions and psychosocial risks*. <https://www.eurofound.europa.eu>
16. SEPRI. (n.d.). *Psychosocial risk management practices and organizational interventions*.
17. International Journal of Environmental Research and Public Health. (n.d.). *Studies on burnout and occupational stress in healthcare*. <https://www.mdpi.com/journal/ijerph>
18. Ministère du Travail. (n.d.). *Regulations on psychosocial risks*. <https://travail-emploi.gouv.fr>
19. Lanchava, O., Bulia, N., & Darakhvelidze, M. (2025). Ensuring occupational safety in the medical sector: Key problems, systemic challenges, and strategic recommendations. *Georgian Scientists*, 7(2), 614–625. <https://doi.org/10.52340/g.s.2025.07.02.56>

International Approaches to Psychosocial Risk Assessment in Healthcare

Natalia Bulia

Abstract

The article examines international practices of psychosocial risk assessment and management in the healthcare sector. It reviews the theoretical foundations of psychosocial risks, including the Job Demand-Control Model and the Effort-Reward Imbalance Model. Particular attention is paid to major psychosocial hazards affecting healthcare workers, such as occupational stress, burnout, excessive workload, and emotional labour. The study discusses contemporary psychosocial risk assessment tools, including COPSOQ and ISTAS21, as well as the importance of organizational and individual intervention strategies. The experiences of Spain, France, and Estonia are analyzed and compared to identify effective approaches to psychosocial risk management. The findings demonstrate that successful management of psychosocial risks is based on preventive, systematic, and employee-centered approaches, contributing to the protection of healthcare workers' health and the improvement of healthcare service quality.

Keywords: Psychosocial Risks, Occupational Stress, Burnout, Healthcare Sector, Occupational Safety, Risk Management.

მართლმსაჯულების ფსიქოანალიზი და გაუმჯობესების პერსპექტივები

(კორუფციული მოტივაციის ტრანსფორმაცია)

გიორგი გოროშიძე

ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი

სტატიაში ნაცადია დანაშაულებრივი ქცევის შედეგებზე იურიდიული სფეროსთვის დამახასიათებელი ინტენციის არასაკმარისობის ჩვენება, რომელიც ხელიდან უშვებს ამ შედეგების გამომწვევი მიზეზების გარკვევის შესაძლებლობას. ფსიქოლოგიის დარგს, რომელიც დაკავებულია ამ დანაშაულებრივი ქცევის მიზეზების გარკვევით, გააჩნია იმის რესურსები, რომ უფრო უკეთესად განმარტოს როგორც კანონდამრღვევი ქცევის ფორმირების გარემოებანი, ისე ამ ქცევის გამოსწორების მექანიზმები, რაც სამართლის სფეროსთვის მიუღწევადია. კორუფცია, როგორც დანაშაულებრივი ქცევის ერთ-ერთი სახეობა, სასამართლოშიც აღწევს მასში მყარი ბუნებრივი ტენდენციების არსებობის გამო. ეს ტენდენცია მდგომარეობს არჩევანის სიტუაციაში მეტი სარგებლიანობის მქონე ქცევის ალტერნატივის უპირატეს არჩევაში, რომელსაც ვერანაირი სადამსჯელო ღონისძიებები ვერაფერს დააკლებს, სანამ არ იქნება მიღწეული დანაშაულებრივი ქცევის გამომწვევი მოტივაციის ტრანსფორმაცია ნეგატიურიდან პოზიტიურამდე. კორუფცია ნეგატიური მოტივაციიდან მომდინარეობს, რომლის ტრანსფორმირებაც პოზიტიურ მოტივაციაში შეიძლება მხოლოდ ფინანსური დაჯილდოების ლეგალური მექანიზმის გამოყენებით მოხერხდეს. ასეთია მოსარჩელისგან მოსამართლისთვის „ღირსეული ჰონორარი“ ლეგალური გადაცემა მოპასუხის მიერ მოსარჩელისთვის სასამართლოს მოთხოვნით გადაცემული ფინანსური კომპენსაციების მოცულობიდან, რაც მკვეთრად შეამცირებს სასამართლოში მოპასუხის კორუფციულ მანიპულაციებს.

საკვანძო სიტყვები: ფსიქოანალიზი, მართლმსაჯულება, მოტივაცია, ტრანსფორმაცია, ღირსეული ჰონორარი.

თანამედროვე მსოფლიო დიდი გამოწვევების წინაშე დგას მართლმსაჯულების სწორი, სამართლიანი და ეფექტიანი მუშაობის უზრუნველყოფის საკითხში. მისი ხარვეზები სხვადასხვა ქვეყანაში სპეციფიკური თავისებურებებით ვლინდება, მაგრამ არსებობს ამ სპეციფიკურ თავისებურებათა ისეთი ერთობლიობა, რომელიც საერთოა მართლმსაჯულების ყველა სისტემისთვის. ეს ისეთი თავისებურებებია, რომლებიც ეყრდნობა ცოცხალი ბუნების ფუნქციობის ლოგიკას და ყველგან ერთი და იგივე სახით ავლენს თავს მისი დაფარვის მცდელობათა მიუხედავად; ამასთანავე აშკარაა, რომ მისი გაცნობიერება ვერც კი მოხდება, თუკი სპეცილურად კვლევა არ იქნება ჩატარებული.

საქმე ეხება იმ ფუნდამენტურ კანონზომიერებებს, რომლებითაც იმართება ადამიანთა ქცევები არჩევანის სიტუაციებში, რომელთა წინაშეც ყოველთვის დგება უკლებლივ ყველა ადამიანი და რომლებიც წარმოადგენენ ტიპიურ სიტუაციებს გადაწყვეტილების მიღებისა და მისი შესაბამისი მოქმედების განხორციელებისთვის. ზემოაღნიშნული აქტივობები ემსახურება ინდივიდთა სასიცოცხლო რესურსების ეფექტიან გამოყენებას, რომლებსაც, როგორც ცოცხალი ბუნების გამოვლინებებს, თავიანთი ბიოლოგიური ლოგიკა და მისი განხორციელების შესაბამისი მექანიზმები გააჩნიათ.

ისინი არის სასიცოცხლო ძალთა ეკონომიური ხარჯვის ლოგიკის (პრინციპის) მქონე მექანიზმები, რომლებიც განაპირობებენ დროში გახანგრძლივებულად ინდივიდების ფუნქციონირების სტაბილიზაციას. ეს ევოლუციის შედეგად ჩამოყალიბებული ისეთი მექანიზმებია, რომლებიც ინდივიდთა სიცოცხლის შენარჩუნების გარანტიებს ქმნიან და ამიტომ ცოცხალი არსებები ყოველთვის ამ მექანიზმების კარნახით მოქმედებენ. ზემოაღნიშნული მოქმედებების განხორციელება შესაძლებელი ხდება ისეთი ძლიერი მისწრაფებების ფორმირების შედეგად, რომლებიც მარტივად რამდენიმე სიტყვით აღიწერება - **„ნაკლები ძალისხმევის გაღებით მეტი სარგებლის მიღება“**. ცხოველები ამ წესს ინსტინქტურად მიჰყვებიან ზომიერების დაცვით, ხოლო ადამიანები მათი ტვინის მეტი განვითარებულობისა და მათი ქცევების ალტერნატივათა განუზომლად მეტი რაოდენობის გამო, ზომიერების დაცვას ხშირად ვერ ახერხებენ და დესტრუქციული პროცესებისკენ იხრებიან გაუმართლებლად მეტი სარგებლის მიღების მცდელობათა სასარგებლოდ. ამას თუ დავუმატებთ ფართოდ აღიარებული მეცნიერების **უილიამ ჯემსის და ზიგმუნდ ფროიდის** საყოველთოდ ცნობილ მოსაზრებებს იმის შესახებ, რომ ადამიანთა მრავალი სახის აქტივობას დიდწილად განსაზღვრავენ მათი ემოციები და ინსტინქტები, მაშინ სიტუაცია კიდევ უფრო პრობლემურ ხასიათს ღებულობს [12], [7]. ამიტომ ხდება საჭირო ის, რომ საზოგადოებაში გამოყენებული იყოს ადამიანთა შორის ურთიერთობების მარეგულირებელი ისეთი კანონები, რომლებიც საზოგადოებრივი წესრიგის შენარჩუნებისთვის არის აუცილებელი და რომლებსაც მთელი მსოფლიოს ქვეყნების ხელისუფლებათა მიერ ენიჭებათ მათთვის მიუღებელ დესტრუქციულ ქმედებათა შემზღუდავი ფუნქციები. ასეთი შემზღუდავი სამართლებრივი წესებისა და

ნორმების არსებობა უკიდურესად აუცილებელია ადამიანთა ეფექტიანი სოციალური კოორდინაციისა და მისი შეუფერხებელი განვითარების მისაღწევად.

ადამიანთა ზემოაღნიშნული ქმედებები ყოველთვის სწარმოებს ისეთ გარემოში, სადაც მოთხოვნილებათა დაკმაყოფილებისთვის საჭირო რესურსები ყველასთვის საკმარისი არ არის ანუ საზოგადოებაში ისინი შეზღუდული რაოდენობით არსებობს. აქედან გამომდინარე, დაინტერესებულ პირთა მიერ მათთვის საჭიროზე მეტი ოდენობით ამ შეზღუდული რესურსების მოპოვება განაპირობებს სხვა პირთათვის საკმარისი ოდენობით ამ რესურსების მოპოვების შესაძლებლობის აღკვეთას, რაც მათ შორის კოორდინაციის მოშლას იწვევს და დაპირისპირებას, კონფლიქტებს წარმოშობს. ასეთი ნეგატივით დამძიმებულ სოციუმში ადამიანთა ერთობლივი საქმიანობის პოზიტიური სინერგია მცირდება, საერთო მიზნების მიღწევა ეჭვის ქვეშ დგება და ეროვნული ენერგიის ეფექტიანად გამოყენების პრობლემურობის გამო საზოგადოების ცხოვრების დონე ეცემა. საზოგადოებისთვის ამ არასასურველი ვითარების თავიდან აცილების ყველაზე უფრო ეფექტიან საშუალებებს წარმოადგენს ზნეობრივი ატმოსფეროს და სამართლიანობის გარემოს შექმნა; ასევე კანონმდებლობის მოთხოვნათა შესრულების მექანიზმების გაუმჯობესება და კონტროლის მექანიზმების ეფექტიანობის ამაღლება სამართლიანობის ატმოსფეროს მიღწევისა და შენარჩუნების მიზნით. გადაჭარბებული სარგებლიანობის ლოგიკით მოქმედ ადამიანთა ქცევის თავისებურება ყოველთვის თავს ავლენს საზოგადოებისთვის მიუღებელ ისეთ ცნობილ აქტივობებში, როგორებიცაა: მექრთამეობა, კორუფცია, ნეპოტიზმი და სხვ.

კორუფცია კომპლექსური სოციალური მოვლენაა და თავისი განმაპირობებელი ისეთი მნიშვნელოვანი ფაქტორები გააჩნია, რომლებიც, როგორც ზემოთ უკვე ითქვა, ცოცხალი ბუნების ფუნქციონირებისთვის არის დამახასიათებელი. უპირველეს ყოვლისა, ასეთ ფაქტორთა რიგს განეკუთვნება პრინციპი, რომლის კარნახითაც მოქმედებენ ცოცხალი არსებები და რომელიც „ეკონომიურობის პრინციპის“ სახელით არის ცნობილი. ამ პრინციპის კარნახით იქმნება ადამიანთა ქცევებში მათი პირადი ინტერესების დაცვის მექანიზმები სხვათა ინტერესების გაუთვალისწინებლობის ფონზე, ხოლო როდესაც აქტუალური ხდება ერთობლივი საქმიანობის წარმოება, მაშინ საჭიროება მოითხოვს, რომ ერთობლივი საქმიანობა ცალკეულ ადამიანთა პირად ინტერესებზე არ იქნეს დაქვემდებარებული და დაცული იყოს ამის შემოოჭავი სამართლებრივი ნორმები. ე.ი. ადამიანთა ქცევები ეგოისტური მისწრაფებების ტყვეობაში უფრო იმყოფებიან, ვიდრე დაკავებულები არიან სხვა ადამიანების ინტერესებისთვის ანგარიშის გაწევით და ეს ყოველთვის არის გასათვალისწინებელი მისი ქმედებების რეალისტური შეფასებისას.

ქვეყნის განვითარებისთვის ხელის შემშლელ უმთავრეს ფაქტორს სწორედ კორუფცია წარმოადგენს მთელი თავისი მრავალფეროვნებით. კორუფცია შეუძლებელს ხდის ქვეყნის განვითარებისთვის აუცილებელი რესურსების დაგროვებას და გამოყენებას. ამიტომ კორუფციის წინააღმდეგ უკომპრომისო ბრძოლა უნდა იყოს გამართული, რათა

საზოგადოებრივი ცხოვრების მრავალ სფეროში დესტრუქციული და პათოლოგიური პროცესების შეჩერება მოხდეს. პირველ რიგში ქვეყანაში მუდმივად უნდა მუშაობდეს ამ დესტრუქციული, პათოლოგიური პროცესების ეფექტიანი პრევენციის მექანიზმები.

ხშირად ადამიანები გამორჩეული პრიორიტეტულობით ამჟღავნებენ დესტრუქციული ქმედებების განხორციელებისკენ სწრაფვას, ვინაიდან ისინი ძალიან „ეკონომიური“ და „ადვილი“ აქტივობებია. ადამიანის პიროვნული განვითარების საწყის ეტაპებზე ძირითადად სწორედ ასეთი ლოგიკით მოქმედებები აღინიშნება. ხშირად ზრდასრული ადამიანებიც არ არიან თავისუფლები ამ ტენდენციებისგან, რაც მათი დესტრუქციული ქმედებების განხორციელების ალბათობას მკვეთრად ამაღლებს. ამის გამო ადამიანთა სხვადასხვა პოპულაციებში მრავლდება დანაშაულებრივი ქმედებები, რომლებიც არაერთი შემოკავი მექანიზმის შემოღებას და ამოქმედებას მოითხოვენ. ერთ-ერთი მექანიზმი, რომელიც სოციალურ პრაქტიკაში ხშირად გამოიყენება, არის **კონტროლი**. იგი კომპეტენტური პირების და ინსტიტუციების მიერ ხორციელდება. **კონტროლი მონიტორინგის და კორექციის** სინერგიული მოქმედებით უნდა სწარმოებდეს და მუდამ წესრიგში ამყოფებდეს საზოგადოებრივი საქმიანობის ყველა სფეროს. პირველ რიგში ეს ეხება მართლმსაჯულების სისტემას, სადაც ადამიანთა სადავო საკითხების გადაწყვეტა ხდება და რომელზეც მათ ხშირად დიდი იმედები აქვთ დამყარებული სხვა საშუალებების არარსებობის გამო. ამიტომ სასამართლოს მუშაობაში ხარვეზების აღმოჩენის შემთხვევაში იგი მკვეთრად არასახარბიელო შეფასებებს იმსახურებს. ასეთი შედეგების მომრავლება საბოლოოდ ხელს არ უწყობს საზოგადოებრივი წესრიგის განმტკიცებას და შეიძლება პრობლემებსაც კი უქმნიდეს მთლიანად ქვეყანას.

მთავარი მოვლენა, რომელიც სასამართლოს მიმართ საზოგადოების უკმაყოფილების გამოწვევის ფაქტორად შეიძლება განიხილებოდეს, ეს არის საქმეების განმხილველი ზოგიერთი მოსამართლის მიერ მათთვის მინიჭებული დამოუკიდებლობის არასწორი გაგება და გამოყენება. ასეთ შემთხვევებში მოსამართლის ე.წ. „შინაგანი რწმენაც“ დიდი დაეჭვების საგანი ხდება და მის მიერ მიღებული გადაწყვეტილება არასახარბიელო შეფასებებს იწვევს. აღნიშნული ვითარების გამოსწორება მხოლოდ სამოსამართლო საქმისწარმოების წესების [2], კანონმდებლობისა და ასევე მონდომების საფუძველზე ვერ ხეხდება და ამიტომ აუცილებელია სამუშაო გარემოს ისეთი ტრანსფორმაცია, რომელიც უფრო რეალისტურს გახდიდა ზემოაღწერილი ვითარების გაუმჯობესების ამოცანის გადაწყვეტას. ასეთი ტრანსფორმაცია პირველ რიგში უნდა ეყრდნობოდეს მოსამართლის ქცევის წარმართველ ისეთ ძლიერ ფაქტორს, როგორიცაა მოტივაცია და ლეგალურად მისი სწორად ამოქმედების განმსაზღვრელი ის პირობები, რომლებიც უკეთ გამოავლენს მოსამართლის დამოუკიდებლობის ჭეშმარიტ არსს.

სასამართლოს დამოუკიდებლობა ხშირად არასწორად გაიგება, როგორც სხვადასხვა სახის თვითნებობების და კანონდამრღვევი ქმედებების თავისუფლად, დაუსჯელად განხორციელების გარანტორი. მისი ასეთი არასწორი გააზრებიდან კანონდარღვევების

„ხელშეუხებლობის“ სამწუხარო ილუზია გამომდინარეობს, რომელიც გარკვეული ხიბლის შემცველია და ადვილად ექვემდებარება გავრცელებას. ხშირად არ ხდება იმის ხაზგასმა, რომ დამოუკიდებლობა მუდამ უნდა ფუნქციონირებდეს კანონმდებლობის ფარგლებში, რათა მისი არასწორი გამოყენება არ ხდებოდეს. დამოუკიდებლობამ რომ არ წარმოშვას უკონტროლო პროცესების განვითარების სტიმულები, საჭიროა ისეთი მექანიზმის შემუშავება და გამოყენება, რომელიც ამ ტვირთისგან თავისუფალი იქნება. ასეთის როლს კი წარმატებით შეასრულებს კონტროლირებადი დამოუკიდებლობა, რომელშიც კონტროლი და დამოუკიდებლობა დადებით სინერგიაში იმყოფებიან და სრულ თანხვედრაში არიან მოქმედ კანონმდებლობასთან. მათი ასეთი „სიმბიოზი“ მოიცავს დამოუკიდებლობის სრულ პოტენციალს და მაქსიმალურად გამორიცხავს დაუსჯელობის იმედით სხვადასხვა თვითნებობების განხორციელებას, როგორებიცაა: მექრთამეობა, კორუფცია, ნეპოტიზმი და სხვა მრავალი მანკიერება. სასამართლოს დამოუკიდებლობა ენიჭება მხოლოდ ზემდგომი ინსტანციისგან დამოუკიდებლად საქმიანობის წარმოებაში კანონმდებლობის ნორმების დაცვით, ხოლო თუკი ადგილი აქვს კანონების დარღვევას, მაშინ დამოუკიდებლობა ავტომატურად უნდა წყვეტდეს თავის მოქმედებას და ექცეოდეს ან ზემდგომი ან სამართალდამცავი ორგანოების სანქციების ქვეშ. ამიტომ კონტროლირებადი დამოუკიდებლობა წარმოადგენს უფრო ადეკვატურ და ეფექტიან მექანიზმს, რომელიც საუკეთესოდ პასუხობს სასამართლოს და მოსამართლეების წინაშე არსებული პრობლემების პოზიტიურად გადაწყვეტის ამოცანებს. კანონმდებლობის მიხედვით სასამართლოს დამოუკიდებლობა სრულებით არ იძლევა კანონდარღვევების ჩადენაში ხელშეუხებლობის გარანტიებს და ამიტომ გახსნილი უნდა იყოს მაკონტროლებელი ადმინისტრაციის მიერ განხორციელებული მაკორეგირებელი ჩარევების მიმართ. სხვა შემთხვევაში, როგორც ამას პრაქტიკა აჩვენებს, კორუფცია წაღეკავდა სასამართლოს, ვინაიდან „სადაც არ არის კონტროლი, ყველგან წარმოიშობა კორუფცია“. ეს არის აქსიომა! ამიტომ შეიძლება დავასკვნათ, რომ მოსამართლის დამოუკიდებლობას განაპირობებს სასამართლოს ხელმძღვანელობის მიერ მისი მუშაობის გაკონტროლება კანონმდებლობასთან შესაბამისობის მისაღწევად.

რაც შეეხება სასამართლოს, რომელსაც დამოუკიდებლობა კანონით აქვს მინიჭებული, მასში საქმისწარმოების ადეკვატური და მიზანშეწონილი განვითარების მისაღწევად, მაკონტროლებელი ხელმძღვანელობის მხრიდან აქტიურ მაკორეგირებელ ჩარევებს საჭიროებს, რის შედეგადაც კანონმდებლობის ჩარჩოში ამ საქმიანობის მოქცევა და შენარჩუნება ხდება, რაც ჩვეულებრივ და აუცილებელ მოვლენად უნდა აღიქმებოდეს. აქედან გამომდინარე, თავისთავად ცხადად უნდა ჩაითვალოს ის, რომ სასამართლოში კანონდარღვევების (კორუფციის, მექრთამეობის და სხვ.) დაფიქსირების შემთხვევაში ან მის არსებობაზე საფუძვლიანი ეჭვის წარმოშობის შემთხვევაში დამოუკიდებლობა უნდა ითვლებოდეს ძალადაკარგულად. იგი ყოველთვის უნდა მოქმედებდეს მხოლოდ და მხოლოდ კანონის მოთხოვნათა სრულყოფილი დაცვის შემთხვევებში და ამიტომ მუდმივი გაკონტროლება ესაჭიროება მმართველი ინსტანციების მხრიდან. როდესაც

მოსამართლე არღვევს დადგენილ წესებსა და კანონებს, მისი დამოუკიდებლობა ავტომატურ გაბათილებას ექვემდებარება. ამდენად, მოსამართლის ხელშეუხებლობა მისი ნებისმიერი და მიუღებელი ქმედებების დროს უზრალოდ არის ის მითი, რომელიც შექმნილია წესებისგან და კანონებისგან გადახვევის ინტერესების მქონე პირთა მიერ და მხედველობაში მისაღები არც არის. სრული დამოუკიდებლობის მცდარი და დამაქვევებელი გაგება მოსამართლისთვის შეუფერებელია და ამიტომ იგი ადეკვატურ და მიზანშეწონილ კორექტირებას უნდა ექვემდებარებოდეს სასამართლოს ადმინისტრაციული მექანიზმების გამოყენებით.

ზოგადად, მოსამართლის დამოუკიდებლობა გამომდინარეობს კანონმდებლობაზე მისი დამოკიდებულებიდან და აბსოლუტურად დამოუკიდებელი იგი ვერასოდეს ვერ იქნება. როდესაც მოსამართლე არღვევს მოქმედ წესებს და კანონებს, იგი კარგავს თავის დამოუკიდებლობას და მისდაუნებურად ექცევა სადამსჯელო (ადმინისტრაციული ან სისხლისსამართლებრივი) სანქციების ზემოქმედების ქვეშ. ამრიგად, სასამართლოს დამოუკიდებლობა არანაირად არ განაპირობებს მოსამართლის ხელშეუხებლობას და სასამართლოს ხელმძღვანელობისგან მოითხოვს მის მიმართ ეფექტიანი სადამსჯელო ღონისძიებების გატარებას. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, მოსამართლეთა მითიური დამოუკიდებლობა არცერთი მათგანისთვის არ იძლევა მათ მიერ კანონდარღვევების ჩადენის შემთხვევებში „ინდულგენციების“ მიღების შესაძლებლობას.

სასამართლოში საპროცესო წესებით (პროცედურულად) უნდა იხილებოდეს დავის შინაარსობრივი საკითხები და არა იგივე პროცედურული საკითხები, რასაც ზოგჯერ ახორციელებენ საქმის განმხილველი მოსამართლეები. საქმის წარმოების ფორმალური მხარე არ უნდა იყოს წარმოდგენილი როგორც საქმის შინაარსობრივი ასპექტი და ისევე ფორმალურად განიხილებოდეს. აქედან ის დასკვნა გამომდინარეობს, რომ მხოლოდ ფორმალური მექანიზმებით (პროცესუალური წესებით) საქმის ფორმალური ასპექტის განხილვა ემსახურება საქმის საგნობრივი განხილვის ჩანაცვლებას პროცედურული საკითხების განხილვით, რაც განაპირობებს სადავო საკითხის რეალური შინაარსისგან თავის არიდებას, მისგან აბსტრაგირებას და მომხდარი ფაქტებისთვის გვერდის ავლას. ამ გზით მიღებულ გადაწყვეტილებას კი რეალობასთან არავითარი კავშირი აღარ აქვს და ხშირად სრული აბსურდის სახესაც ღებულობს.

ზოგიერთი მოსამართლე გამიზნულად დაკავებულია მხოლოდ სადავო საკითხის ფორმალური ასპექტების განხილვით და თავად ამ საკითხის შინაარსობრივ შესწავლას გვერდს უვლის. იგი არც კი ეკარება არაერთხელ მოთხოვნილი მტკიცებულებების მოპასუხისგან გამოთხოვის საკითხს და მოპასუხის წარმომადგენლის მიერ სხდომაზე გაჟღერებულ ზეპირსიტყვიერ განცხადებას ამ მტკიცებულებათა არარსებობის შესახებ არაკანონიერად უცხადებს ნდობას მოპასუხისგან მტკიცებულებათა არარსებობის დამადასტურებელი წერილობითი დოკუმენტის წარმოდგენის გარეშე, ხოლო მის გამოთხოვაზე მოსარჩელის შუამდგომლობებს არ აკმაყოფილებს. კანონდამრღვევი

მოპასუხე წლების მანძილზე მოსარჩელისთვის მტკიცებულებათა გადაცემის შესახებ წერილობითი მოთხოვნების არ დაკმაყოფილებით, ხოლო სასამართლოს მიერ მათ დაკმაყოფილებაზე უარის თქმით მოპასუხის დანაშაულებრივ საქმიანობას უქმნის „სასათბურე“ პირობებს, რითიც ხელს უშლის მოცემულ საქმესთან დაკავშირებით უწესრიგობის შენარჩუნებას და მართლმსაჯულების რეპუტაციის შელახვას ახდენს. საბოლოოდ ეს ყოველივე საზოგადოებას მძიმე შედეგებით უბრუნდება და ამიტომ საჭიროებს დიდ სიფხიზლეს, კანონიერ ოპერატიულ მოქმედებას და მიღწეული მართლწესრიგის შენარჩუნებისა და გაუმჯობესებისთვის მუდმივი ხელის შეწყობას. ვინაიდან სასამართლოს გააჩნია ხელისუფლების სახელით მოპასუხისგან საქმის არსებითი განხილვისთვის აუცილებელი მტკიცებულებების გამოთხოვის კანონით მინიჭებული უფლებამოსილება, ამიტომ მოსამართლემ ეს შესაძლებლობა ხელიდან არ უნდა გაუშვას, თუკი იგი მიზანმიმართულად არ ცდილობს, რომ სადავო საკითხის განხილვის პროცესი წაიყვანოს კანონისთვის გვერდის ავლით. ის მოსამართლე, რომელიც კანონით მინიჭებულ ამ შესაძლებლობას პრინციპულად არ იყენებს და მოსარჩელის შუამდგომლობებს მტკიცებულებების გამოთხოვის შესახებ ჯიუტად არ აკმაყოფილებს, ხოლო ამ მტკიცებულებათა გამოკვლევის გარეშე ისევ აგრძელებს საქმის განხილვის პროცესს, უდავოდ დაკავებული გამოდის საექვო საქმიანობით და წარმოშობს ვარაუდებს საქმის შედეგით მისი დაინტერესების შესახებ. ასეთი ქცევებით გამორჩეული მოსამართლე ადვილად უნდა ექვემდებარებოდეს მოცემული საქმის განხილვისგან მის აცილებას ან მოსამართლის თანამდებობიდან განთავისუფლებას კორუფციაში ეჭვმიტანილობის საფუძველზე.

ქვეყნის განვითარების შემაფერხებელ უმთავრეს ფაქტორს კორუფცია წარმოადგენს თავის გამოვლინებათა დიდი მრავალფეროვნებით. პირველ რიგში ის ეწინააღმდეგება ქვეყნის განვითარებისთვის აუცილებელი რესურსების დაგროვებას და გამოყენებას. ამიტომ კორუფციის წინააღმდეგ აქტიური ბრძოლა ყველა ქვეყნის განსაკუთრებული ზრუნვის საგანი გახდა. კორუფცია საზოგადოებრივი ცხოვრების მრავალ სფეროშია შეჭრილი და ყველგან დესტრუქციული, პათოლოგიური პროცესების განვითარებას ემსახურება. ამ მხრივ ყველაზე სენსიტიური სფერო სასამართლო სისტემაა, რომელიც საზოგადოებაში მართლწესრიგის შენარჩუნებისთვის თავისი დიდი მნიშვნელობის და ვალდებულების გამო ათასობით ადამიანს ემსახურება მათ წინააღმდეგ ჩადენილი დანაშაულების აღკვეთისა და სოცალური ცხოვრების მოწესრიგების მიზნით. მისი ეს მისია ძალიან მნიშვნელოვანია, ძალიან საპატიოა და მუდამ ითხოვს მხარდაჭერას ამ კეთილშობილური მიზნების მიღწევის საქმეში. საზოგადოება, თავის მხრივ, ძალიან სენსიტიურია სასამართლოს საქმიანობის მიმართ და კორუფციის შესახებ ვარაუდების და ფაქტების დაფიქსირების შემთხვევაში. ამიტომ აუცილებელია, რომ სასამართლო სისტემაში არანაირი ფორმით არ აღინიშნებოდეს კორუფცია და მასში მუდმივად მუშაობდეს ამ დესტრუქციული პროცესების ეფექტიანი პრევენციის მექანიზმები.

ადამიანები მუდამ გამორჩეული პრიორიტეტულობით ამჟღავნებენ დესტრუქციული ქმედებების განხორციელებისკენ სწრაფვას, ვინაიდან ისინი უფრო „ეკონომიური“ და „ადვილი“ აქტივობებია და სასურველი სარგებლის მიღების უკეთეს პერსპექტივებს აჩენს. ადამიანის განვითარების საწყის ეტაპებზე ძირითადად სწორედ მსგავსი ლოგიკის მეორე მოქმედებები აღინიშნება. ხშირად ზრდასრული ადამიანებიც არ არიან თავისუფლები ამ ტენდენციების გავლენისგან, რაც მათი დესტრუქციული ქმედებების განხორციელების ალბათობას მკვეთრად ამაღლებს. ამის გამო ადამიანთა სხვადასხვა პოპულაციებში მრავლდება ისეთი დანაშაულებრივი ქმედებები, რომლებიც არაერთი შემოჭრავი მექანიზმის შემოღებას და ამოქმედებას მოითხოვენ. ერთ-ერთი მექანიზმი, რომელიც სოციალური ცხოვრების პრაქტიკაში ხშირად გამოიყენება, არის **კონტროლი**. იგი კომპეტენტური პირების და ინსტიტუციების მიერ ხორციელდება. **კონტროლი მონიტორინგის და კორექციის** სინერგიული მოქმედებით უნდა სწარმოებდეს და მუდამ წესრიგში ამყოფებდეს საზოგადოებრივი საქმიანობის ყველა სფეროს. პირველ რიგში ეს ეხება მართლმსაჯულების სფეროს მისი მართლწესრიგისა და სოციალური პროცესების სწორი კორდინაციის ვალდებულებათა აქტუალობიდან გამომდინარე. ამ მხრივ სასამართლოსთვის კანონით მინიჭებული დამოუკიდებლობა, თუკი სწორად იქნება იგი გამოყენებული, მნიშვნელოვანი წვლილის შემტანია საზოგადოებრივი ცხოვრების გაუმჯობესების საქმეში. წინააღმდეგ შემთხვევაში კი ეს დამოუკიდებლობა ქვეყნის მართლმსაჯულებას დიდი ალბათობით შეიძლება გადაეცეს პრობლემად მასში კორუფციისთვის ხელშემწყობი ფაქტორების ამოქმედებისა და საზოგადოებაში სამართლიანობის უმიშვნელოვანესი იდეის დასამარების გამო, რაც მისი სწორი მიმართულებით განვითარების შეფერხების გამომწვევია.

როგორც პრობლემის განხილვიდან ჩანს, კორუფცია სასამართლოში მთელი თავისი მრავალფეროვნებით საქმის წარმოებისა და განხილვის შესახებ არსებულ არასწორ, მცდარ წარმოდგენებს ეყრდნობა, ადამიანთა მანკიერი აზროვნების წესით ხასიათდება, საექვო მოტივაციით გამოირჩევა და ამიტომ სიღრმისეულ გაანალიზებას ითხოვს. ისინი პირველ რიგში ფსიქიკის მოშაობის კანონზომიერებათა პოზიციებიდან უნდა აიხსნებოდეს. ეს იმიტომ, რომ ადამიანის ქმედებათა წყაროს (სათავეს) მისი ფსიქიკა წარმოადგენს და მის მუშაობაში აღმოცენებული ხარვეზები მუდამ განაპირობებს იმ მიუღებელ ქმედებებს, რომელთა საფუძველზეც მართვის გარკვეულ სეგმენტში კორუფციული გარემოს ჩამოყალიბება ხდება. ფსიქიკური მექანიზმების დიდი ნაწილი ფონურ რეჟიმში ფუნქციონირებს და ყოველგვარი გაცნობიერების გარეშე ემსახურება ინდივიდების წინაშე წამოჭრილი რიგი ამოცანების გადაწყვეტას. ამ მექანიზმების გაუცნობიერებლობა ადამიანთა სასიცოცხლო ძალთა ეკონომიური გამოყენების ერთ-ერთი გამოვლინებაა და ბუნებრივ მოვლენას წარმოადგენს. ამდენად, ადამიანი ხშირად იქცევა მისი გამომწვევი მექანიზმების გაცნობიერების გარეშე ანუ ცნობიერი კონტროლის გარეშე. ამ არაცნობიერ ფსიქიკურ მექანიზმებს თავიანთი ჩამოყალიბების პრეისტორია გააჩნიათ და საკმარისი სტაბილურობითაც გამოირჩევიან. სწორედ ისინი ქმნიან ღრმა

გენეტიკურ მოცემულობასთან ერთად ადამიანთა ინდივიდუალობას და ბევრწილად განსაზღვრავენ მისი ქცევების თავისებურებას. კორუფციული ქცევის მექანიზმებიც დიდი ხნის მანძილზე სპეციფიკურ გარემოშია ჩამოყალიბებული და განმეორებადობის ძლიერი ტენდენციაც გააჩნიათ. მათი შეჩერება ან კიდევ აღკვეთა მარტივ ამოცანას არ წარმოადგენს და განსაკუთრებულ მიდგომასაც მოითხოვს.

საზოგადოებრივ ცხოვრებაზე დაკვირვებიდან ჩანს, რომ კორუფციის წინააღმდეგ მხოლოდ აკრძალვის მექანიზმების შემოღება სასურველ შედეგს საერთოდ არ იძლევა განსაკუთრებულ შემთხვევებში გარდა, როდესაც ამისთვის სიკვდილით დასჯა ხდება. ამის მაგალითია **სინგაპური, ჩინეთი** და კიდევ ზოგიერთი სხვა აზიური ქვეყანა. იმის მიუხედავად, რომ სხვა ქვეყნებში ასეთი მკაცრი ზომები არ გამოიყენება, კორუფციის წინააღმდეგ ბრძოლა ყველგან ინტენსიურად მიმდინარეობს. ზოგადად კორუფცია წარმოადგენს უკანონო შემოსავლის მოპოვების წყაროს და იგი უნდა შეიცვალოს შემოსავლის კანონიერი მოპოვების წყაროთი, რათა არ გამოიწვიოს კიდევ უფრო მძიმე და გამოუსწორებელი კრიმინალური ქმედებები. ყველა კორუფციული მოქმედების წარმართველი მექანიზმი ძალიან დიდი სიმტკიცით გამოირჩევა ხანგრძლივი დროის განმავლობაში მისი ჩამოყალიბების პროცესის გამო და ასეთივე ხანგრძლივი დროის განმავლობაში უნდა ხდებოდეს მისი ზეგავლენისგან განთავისუფლება, რაც სრულიად არარეალურია და ამიტომ ყოველთვის ძალაშია ამ აქტივობების პირველი ვარიანტი.

ადამიანის ქცევის წარმართველი ისეთი მექანიზმებიდან გამომდინარე, რომლებსაც ჩამოყალიბების ხანგრძლივი ისტორია აქვთ, მისი ქცევები ვერაფრით ვერ შეიცვლება გინდა პოზოტიური იყოს და გინდა ნეგატიური. უმრავლეს შემთხვევაში ადამიანები იქცევიან თვითნებურად წარსულის კარნახით, ვინაიდან ეს მათთვის გაცილებით უფრო მეტი გარკვეულობის შემცველია და გაურბიან განსხვავებულ ქცევებს, რომლებიც მეტი გაურკვეველობის შემცველები არიან. ეს არის ის ბიოლოგიური ლოგიკა, რომელსაც ექვემდებარებიან ადამიანებიც და ცხოველებიც. ევოლუციურმა პროცესმა მოახდინა ამ მექანიზმების ჩამოყალიბება და ისინი ყოველთვის სტერეოტიპულად მოქმედებენ. აქედან გამომდინარე, ვერავინ გადააჩვევს ადამიანებს ამ მექანიზმების კარნახით მოქმედებას და ეს ყველა შემთხვევაში გასათვალისწინებელია. ნაკლები დანახარჯების გაღებით მეტი სარგებლის მიღებისკენ სწრაფვა ერთ-ერთი ფუნდამენტური მექანიზმია და ძალაშია კორუფციულ სიტუაციებშიც. რაც უფრო მეტი ხანი უხდება ადამიანს ასეთ სიტუაციებში მოქმედება, მისთვის მით უფრო შეუძლებელი ხდება განსხვავებული წესით მოქმედება. ამიტომ მისთვის სარგებლის მიღების შესაძლებლობის აღკვეთა შედეგის მომტანი ვერ იქნება, ვინაიდან იგი განსხვავებული წესით იგივე სარგებლის მიღების წესით გააგრძელებს თავის მოქმედებას, ვინაიდან მისი ფსიქიკა სხვაგვარად ვერ ფუნქციონირებს. ამ ქცევის შეჩერება შეუძლია მხოლოდ ფიზიკური იძულების გამოყენებას, რომელიც დამატებით გარემოებების არსებობას საჭიროებს სასამართლოს ჩართულობის პირობებში. სანამ აქამდე მივიდოდეს საქმე, მანკიერი ქცევის შეცვლის

პერსპექტივა მინიმალურია. ამიტომ ბუნებრივ ტენდენციებს ყოველთვის ყურადღება უნდა ექცეოდეს. არავის არაფერი არ უნდა წაერთვას ისე, რომ სანაცვლოს შეთავაზება არ ხდებოდეს, ვინაიდან იგი კორუფციაზე ფოკუსირებული თავისი ცნობიერების საფუძველზე კიდევ უფრო უარეს კორუფციულ საქმიანობას განახორციელებს. აქედან გამომდინარე, კორუფციის აღკვეთა უნდა იყოს ჩანაცვლებითი და მხოლოდ ასეთი მიდგომით შეიძლება მოხდეს მისგან განთავისუფლება.

კორუფციის გამომწვევ მიზეზებზე და ხელშემწყობ ფაქტორებზე საუბარი მხოლოდ ფსიქოლოგიური პლათფორმიდან არის შესაძლებელი. სამართალი ამ შემთხვევაში უძლურია. კორუფციის მიზეზების გაანალიზების შესაძლებლობას და მისი დაძლევის მექანიზმების მიგნების შესაძლებლობას მხოლოდ ფსიქოლოგიის დარგი იძლევა, ვინაიდან მართლმსაჯულება მის ხელთ არსებული სამართლებრივი ინსტრუმენტებით მხოლოდ კორუფციის ფაქტებზე რეაგირებით შემოიფარგლება და არ ეხება ქმედებათა მიზეზებს. ფსიქოლოგიის დარგი არკვევს კორუფციული ქცევის მიზეზებს, ხოლო სამართალი მუშაობს კორუფციული ქცევის შედეგებთან. სანამ საქმე სამართლებრივად მნიშვნელოვანი ფაქტების დადგომამდე მივა, მანამდე ძალიან ბევრი რამ ფუჭდება ადამიანის ქცევის ფსიქოლოგიურ მექანიზმებში და მას თანდათანობით უყალიბდება დამნაშავის ფსიქოტიპი.

დიდი მოაზროვნის **რენე დეკარტეს** მიხედვით: „**მცირე ცვლილება დასაწყისში იწვევს დიდ ცვლილებებს ბოლოში**“ [6]. ეს მარტივი და გენიალური სიბრძნე სხვაგვარადაც შეიძლება გადმოიცეს - მცირედი ცვლილებები მიზეზებში იწვევს დიდ ცვლილებებს შედეგებში; მცირედი შეცდომები მიზეზებში იწვევს დიდ შეცდომებს შედეგებში; კორუფცია ნეგატიური მოვლენაა და როგორც შედეგი გამომდინარეობს გამომწვევი მიზეზების მცდარობიდან! ადამიანის ქცევის განმსაზღვრელ ფსიქიკურ მექანიზმში მომხდარი მცირე პოზიტიური ცვლილება იწვევს დიდ პოზიტიურ ცვლილებებს მიღებულ შედეგებში, რაც გასათვალისწინებელია მართლმსაჯულებაში ადამიანთა კანონიერი (პოზიტიური) ქცევების მხარდაჭერის მიზნებისთვის.

როგორც უკვე აღინიშნა, კორუფცია სასამართლოში სრულიად ანომალური მოვლენაა, რაც მოითხოვს ქმედითი და საფუძვლიანი მექანიზმების ამოქმედებას მისი აცილების მიზნით. ეს მექანიზმები მხოლოდ სამართლებრივი პოზიციებიდან გამომდინარე ვერ ჩამოყალიბდება. საჭიროა მომიჯნავე დარგების (მაგალითად ფსიქოლოგიის დარგის) პოზიციათა მოშველიება, რათა დანაშაულებრივი ქცევის გამომწვევ მიზეზებთან უფრო ახლო მისვლა მოხერხდეს. როგორც ცნობილია, სამართალი პირის მიერ ჩადენილ ქმედებებზე ანუ მომხდარ ფაქტებზე აპელირებით ცდილობს დანაშაულებრივი ქცევის დესტრუქციულობის ხარისხის დადგენას, რაც არ არის საკმარისი ამ ქცევის გამომწვევი მიზეზების დადგენისთვის და სწორი გადაწყვეტილების მიღებისთვის. იურიდიული სფეროსგან განსხვავებით, ფსიქოლოგია პირველ რიგში იკვლევს დანაშაულებრივი ქცევის მიზეზებს და ამის საფუძველზე უფრო გასაგებს ხდის ამ ქცევის შედეგად

მომხდარი ფაქტების თავისებურებას, რის შედეგადაც უკვე შესაძლებელი ხდება უფრო ადეკვატური და პროპორციული სასჯელის დაწესება.

ზემოთ განვითარებული მსჯელობებიდან და კორუფციული შედეგების გამომწვევი **ფსიქიკური მიზეზების** დახასიათებიდან გამომდინარე, სასამართლოში კორუფციის შემცირების საპატიო ამოცანას შეიძლება გამოეძნოს დადებითად გადაწყვეტის შესაძლებლობა, ვინაიდან კორუფციის ფსიქოლოგიურ მიზეზებთან მუშაობა უფრო გაადვილებულია და ეფექტიანია, ვიდრე მუშაობა აღნიშნული მიზეზებით გამოწვეულ სამართლებრივ შედეგებთან. მიზეზის შესწორება უფრო რეალისტურია და ადვილია, ვიდრე მისგან გამოწვეული შედეგის გამოსწორება. ქმედების მიზეზის შეუსწორებლად ყოველთვის საქმე გვექნება იგივე ნეგატიური შედეგის დადგომასთან და ეს მარტივი ჭეშმარიტება, როგორც წესი, მუდამ დამაჯერებლად მტკიცდება მდიდარი პრაქტიკით.

ადამიანთა ქცევებში გამოვლენილი გაუცნობიერებელი და მყარი ტენდენციების გამო, სასამართლო საქმისწარმოებაში გამოსაყოფია ან შესაქმნელია ისეთი სამართლებრივი მექანიზმები, რომლებიც მაქსიმალურად მოემსახურება სამართლიანობის მიღწევას, მოსარჩელის დარღვეული უფლებებისა და სტატუსის აღდგენას. ამასთან ერთად, რაც მთავარია, მოსარჩელისთვის აუცილებლად დასაბრუნებელია მისთვის წართმეული, მითვისებული სიკეთეები, რომლებიც საბოლოოდ ფინანსებში უნდა გამოიხატებოდეს. ეს მექანიზმები შეიძლება იყოს შემდეგი:

1) თუკი სასამართლოს საქმიანობაში კანონდარღვევების ჩადენის შემთხვევაში მათი გამოსწორებისთვის არ მიიღება აუცილებელი ზომები, მაშინ მისი დამოუკიდებლობა მაკონტროლებელი ან სამართალდამცავი ორგანოს მოთხოვნით ავტომატურად წყვეტს თავის მოქმედებას ამ კანონდარღვევის სრულ გამოსწორებამდე, რაც მაქსიმალურად შეესატყვისება მოქმედ კანონმდებლობას. ასე **გაკონტროლებელი დამოუკიდებლობა** სასამართლო კანონდარღვევების პრევენციის საუკეთესო საშუალებას წარმოადგენს. როდესაც კონტროლი სულ არ ფუნქციონირებს, სასამართლოს და მოსამართლეებს ეკარგებათ ჭეშმარიტი დამოუკიდებლობა, იგი გადადის თვითნებობაში და ექცევა დამნაშავე მოპასუხის კორუფციული ზეგავლენის ქვეშ. ხოლო როდესაც კონტროლი მუშაობს კანონმდებლობასთან შესაბამისობის შესანარჩუნებლად, სწორედ მაშინ ხდება მოსამართლე დამოუკიდებელი და სრულებით თავისუფლდება მავნე მოპასუხის კორუფციული ზეწოლისგან. როდესაც წესიერად მომუშავე მოსამართლეს უფასდება გაწეული მუშაობა და მოსარჩელის მიერ ღირსეულად ჯილდოვდება დამნაშავე მოპასუხისგან დაბრუნებული ფინანსებიდან, მაშინ ეს აქტი ემსახურება სახელმწიფო ინტერესს და ყოველმხრივ მხარდაჭერას იმსახურებს.

2) როგორც მდიდარი პრაქტიკა აჩვენებს, კანონების დარღვევა, კერძოდ კორუფცია, როგორც წესი, უფრო „შემოსავლიანი“ საქმიანობაა, ვიდრე კანონების დაცვა და ამიტომ ადამიანები ხშირად პირველს ამჯობინებენ. ასეთმა არაკანონიერმა ტენდენციებმა რომ არ დააღრვიოს საზოგადოების ნორმალური ფუნქციონირება, აუცილებელია ვექტორის

შემობრუნება ისე, რომ სწორედ კანონის დაცვა გახდეს ფინანსურად უფრო მომგებიანი. ადამიანთა ნეგატიური და დესტრუქციული მოტივაციის გარდაქმნა პოზიტიურ და კონსტრუქციულ მოტივაციად რეალურია, თუკი შეიქმნება სათანადო ფინანსური გარემო. კერძოდ, სასამართლოში უნდა არსებობდეს სამართლებრივად პოზიტიური ქმედებების ფინანსური წახალისების ლეგალიზების შესაძლებლობა. ამისთვის საჭირო ფინანსებს სახელმწიფოსგან გამოყოფა არ ესაჭიროება. იგი უნდა ფორმირდებოდეს საქმის ღირებულებისა და მოპასუხის მიერ მოსარჩელისთვის მიყენებული ფინანსური ზარალის მოცულობიდან. სხვა სიტყვებით, მოპასუხეს უნდა დაეკისროს მოსარჩელის წინაშე ფინანსური ვალდებულებები მისგან ფინანსების მითვისების ფაქტის გამო;

3) დამნაშავე მოპასუხის მიერ მოსარჩელისგან არაკანონიერად და სხვადასხვა ფორმით მითვისებული საფინანსო სახსრები ქმნის იმ აუცილებელ ბაზისს, რომელიც საქმის კეთილსინდისიერი სასამართლო გადაწყვეტილების შემთხვევაში უნდა დაუბრუნდეს მოსარჩელეს, რაც, ცხადია, არასასურველი პროცედურაა დამნაშავე მოპასუხისთვის, ხოლო მისგან სასამართლოზე განხორციელებული სხვადასხვა ფორმის „ძალადობა“ არ უნდა იყოს ზემოაღნიშნული სამართლიანი ქმედების შეფერხების საფუძველი. საქმის განხილვა უნდა ხდებოდეს კანონმდებლობის მოთხოვნათა კომპლექსური გააზრებით და მათი სრულყოფილი (არა ფრაგმენტული) გამოყენებით;

4) კორუფციული ქმედებებისთვის დაწესებული სასჯელები უნდა გამკაცრდეს, რაც შექმნის პოზიტიურ და კონსტრუქციულ ქმედებებზე გადართვის ძლიერ სტიმულებს მათთვის, ვინც თავის ცხოვრებისეულ საჭიროებათა მოსაპოვებლად კორუფციის გარდა სხვა შესაძლებლობებს ვერ ხედავენ. სასჯელის გამკაცრება მათ უზიარებელ ზედმიწევნით კანონიერების დაცვის მეტი მომგებიანობის სასარგებლო აზროვნების წესის ჩამოყალიბებისკენ. მისი განმტკიცების ხელშემწყობი გარემოს შექმნა აღნიშნულ პოზიტიურ ტენდენციას განამტკიცებს და რეალობად აქცევს;

5) ხშირ შემთხვევებში, როდესაც მავანთა მიერ მითვისებული ფინანსები ძალიან დიდ მოცულობებს არ აღწევს, მათი კორუფციული შემოსავლების წყაროების აღკვეთა უნდა ხდებოდეს შემოსავლების ალტერნატიული წყაროების შეთავაზებასთან ერთად. ე.ი. უნდა მოხდეს შემოსავლის არაკანონიერი წყაროს კანონიერი წყაროთი ჩანაცვლება. ასეთი ჩანაცვლების გარეშე კორუფციის წინააღმდეგ ბრძოლას შედეგი ვერასოდეს ვერ ექნება. პირიქით, იგი უფრო მძიმე ფორმებს მიიღებს, ვინაიდან ზემოაღნიშნული კატეგორიის ადამიანებისთვის აუცილებელი შემოსავლის ეს არაკანონიერი წყაროები მათ ეგზისტენციალური საჭიროებების დაკმაყოფილებას ემსახურებიან და დიდი სიმტკიცითაც გამოირჩევიან. ფინანსების ძალიან დიდი მოცულობით მიტაცების შემთხვევებში კი, როდესაც ისინი ბევრად აღემატება ეგზისტენციალურ საჭიროებებს, ცალსახად და უკომპრომისოდ უნდა ხდებოდეს მკაცრი სასჯელების დაწესება;

6) მორალი, სამართლიანობა და კანონიერება უნდა გამოცხადდეს სასამართლოს უმაღლეს ღირებულებებად, რომლებსაც უნდა განამტკიცებდეს ზემოაღწერილი ღირსეული დაჯილდოების სისტემა საგანგებოდ შემუშავებული სკალის მიხედვით;

7) კეთილსინდისიერი მოსამართლის მიერ მიღებული კანონიერი გადაწყვეტილება დამნაშავე მოპასუხის მიერ მოსარჩელისთვის სხვადასხვა მექანიზმით წართმეული საფინანსო სახსრების დაბრუნების სასარგებლოდ, მოსარჩელისგან სათანადოდ უნდა იქნას დაფასებული, რასაც უნდა მიეცეს ოფიციალური, სამართლებრივი მხარდაჭერა. სამართლიანობის აღდგენის მიზნით მოსარჩელისთვის დაბრუნებული **ფინანსური რესურსები** (არმიღებული ხელფასები (განაცდური), ჯანმრთელობის, სოციალური, პროფესიული და მორალური ზარალების ფინანსური კომპენსაცია) **გასაანაწილებელია მოსარჩელესა და სასამართლოს შორის** მოპასუხის მიერ მითვისებული ფინანსების და ასევე მოსარჩელის დაზარალების საკომპენსაციოდ სასამართლოს მიერ მოპასუხეზე დაკისრებული ფინანსური ვალდებულებების ერთიანი მოცულობიდან.

ასეთი ლეგალური საფინანსო მექანიზმის ამოქმედებით სასამართლო ჩამოყალიბდება საზოგადოებისთვის იმედისმომცემ ინსტიტუციად, ხოლო მოსამართლეები გახდებიან საზოგადოების მიერ ძალიან დაფასებული და მისი ყოველმხრივ ღირსეული წევრები.

ზემოთ ნათქვამი მეტი დამაჯერებლობისთვის საჭიროებს დამატებით განმარტებებს. ადამიანთა მრავალფაქტორიანი ქცევების გაანალიზების შედეგად მივდივართ შემდეგ დასკვნამდე, რომ როგორც ფილოგენეზში ჩამოყალიბებული ქცევების განმსაზღვრელ მექანიზმთა, ისე ონტოგენეზის პროცესში ჩამოყალიბებული ქცევების განმსაზღვრელ მექანიზმთა უპირობო დომინანტობის გამო ადამიანების მაღალი დონის ქცევები, უპირველეს ყოვლისა, განხილული უნდა იყოს ხსენებული მექანიზმების ლოგიკის ფარგლებში, რაც აკმაყოფილებს **ბაზისური** მოვლენების უპირატესი ფუნქციობის აუცილებელ პირობას. რაც შეეხება უფრო განვითარებული ქცევების განმსაზღვრელ მექანიზმებს, ისინი **ზედნაშენი** მოვლენების ფუნქციობის დონეზე უნდა იხილებოდეს, რომელთა არსებობაც (საკმარისობის პირობების შესაბამისად) მხოლოდ მაშინ ხდება შესაძლებელი, როდესაც ბაზისური მექანიზმები არის ამოქმედებული. მოვლენათა შეფასებისთვის აუცილებელი და საკმარისი პირობების დაკმაყოფილება არის მისი სრულყოფილად შეცნობის საწინდარი. თუკი ბაზისური მოვლენები დომინანტურ როლს იწარჩუნებენ ადამიანთა აქტივობებში, მაშინ პირველ რიგში ჯერ ისინი უნდა იყოს გათვალისწინებული ამ აქტივობებში და შემდეგ უნდა ხდებოდეს ყურადღების გამახვილება უფრო მაღალი დონის (ზედნაშენ) მოვლენებზე. ეს არის ძალიან ზოგადი კანონზომიერება, რომელიც გამოიყვანება სოციალური პროცესების გაანალიზებიდან და ისეთი გამოჩენილი მეცნიერების ნააზრევადან, როგორებიც არიან: **უილიამ ჯემსი [12], ზიგმუნდ ფროიდი [7], კარლ იუნგი [14], აბრაამ მასლოუ [17], ჟან პიაჟე [19], დიმიტრი უზნაძე [25] და სხვ.** აღნიშნული მეცნიერები სხვადასხვა თეორიების და მიმდინარეობების ფუძემდებლებად კი გვევლინებიან, მაგრამ ეს კანონზომიერება მათთან მუდმივად შენარჩუნებულია. იგი აუცილებელ გათვალისწინებას საჭიროებს, თუკი არსებობს ადამიანის ქცევის შესახებ უშეცდომო დასკვნების კეთების ინტერესი.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, ადამიანები პირველ რიგში ფუნდამენტური ფაქტორების ზეგავლენით მოქმედებენ და მხოლოდ ამის შემდეგ მოქმედებენ ე.წ. „სიტუაციური“ ფაქტორების ზეგავლენით. ამ ფაქტორტა შინაარსში პირველ რიგში აღსანიშნავია მოტივაცია, რომლის გარეშეც ადამიანთა აქტივობის წარმოდგენა ძალიან გაჭირდება. ქცევის ფუნდამენტურ მექანიზმებში ჩართული მოტივაცია უფრო მეტი სიძლიერით გამოირჩევა მისი განმტკიცების უფრო ხანგრძლივი პრეისტორიის გამო და ამიტომ მასზე აპელირებით უფრო მეტი შედეგის (სარგებლის) მიღწევა არის შესაძლებელი, ვიდრე მეორე შემთხვევაში. ამიტომ, როდესაც საჭირო ხდება ადამიანის მოქმედების მოტივის დადგენა, პირველ რიგში უნდა ვიგულისხმოთ მასში ძირეული მოტივაციის მონაწილეობა. ეს ლოგიკა უდავოდ მართებულია აგრეთვე სასამართლო განხილვების შემთხვევაშიც მოსამართლის მამოძრავებელი მოტივის შესახებ სწორი წარმოდგენის ჩამოსაყალიბებლად. მიზანი კი არის მისი ამ ტიპის მოტივაციის გააქტიურება საქმის განხილვის პროცესის სამართლიანი და კანონიერი მიმართულებით განვითარების მისაღწევად. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, საქმის სამართლიანად და კანონიერად განხილვა უნდა გადაიქცეს მოსამართლის საქმიანობის წარმმართველ მოტივაციად.

სასამართლო დამოუკიდებელ სახელისუფლებო შტოს წარმოადგენს, რომლისთვისაც ლეგიტიმაციის მიმნიჭებელი წყარო მხოლოდ ხალხის მიერ არჩეული პარლამენტია, ვინაიდან მოსამართლეების არჩევა ხალხის მიერ არ ხდება. აქედან საფუძველშივე ნათელია, რომ სასამართლო სრულიად დამოუკიდებელი ვერანაირად ვერ იქნება ანუ თავისი დამოუკიდებლობის შემოქმედი (თვითშემოქმედი) ვერ გახდება. ეს კარგად გასაგები უნდა იყოს პირველ რიგში მოსამართლეებისთვის, რომლებიც ამ მხრივ დიდი ერთგვაროვნებით არ გამოირჩევიან და ზოგჯერ ადგილი აქვს დადგენილი წესიდან სამწუხარო გადახვევებს. მოსამართლე წარმოადგენს იმ სასამართლო ხელისუფლებაში მოღვაწე პირს, რომელიც თავად არ არის აბსოლუტურად დამოუკიდებელი და ამიტომ მოსამართლის დამოუკიდებლობა კიდევ უფრო შეზღუდული გამოდის. ამ გარემოების გაცნობიერება ყველა მოსამართლის უპირველეს ვალდებულებას წარმოადგენს და ამ თვალსაზრისით მათგან მოითხოვს დამოუკიდებლობაში გონივრული ზომიერების დაცვას, რისი მიღწევაც ყოველთვის ვერ ხერხდება. ვერ ხერხდება იმიტომ, რომ არც პარლამენტის დამოუკიდებლობა არის ადეკვატურად გაცნობიერებული. ისიც კი არ არის დამოუკიდებელი, ვინაიდან დამოკიდებულია ხალხის ნებაზე, არჩევანზე და პასუხისმგებელია მის წინაშე. აქედან გამომდინარე, სრულიად დამოუკიდებელი შეიძლება იყოს მხოლოდ ხალხი, ხოლო ქვეყანაში მოქმედი ყველა ინსტიტუცია მასზეა დამოკიდებული ამ დამოუკიდებლობის კლებადი ხარისხით. მოცემულ შემთხვევაში „ინსტანციებსა“ და ინსტიტუციებს შორის მიმართებები ასეთია:

ხალხი > პარლამენტი > სასამართლო > მოსამართლე.

ამრიგად, მოსამართლეს დამოუკიდებლობის ყველაზე დაბალი ხარისხი გააჩნია და ამიტომ იგი საჭიროებს მისი მუშაობის გამართულობაზე ყურადღების გამახვილებას

აღნიშნული 3 ზემდგომი ინსტანციის მხრიდან. ამ დაქვემდებარების საპირისპირო განლაგების მცდელობები, რასაც ხშირად ადგილი აქვს მოსამართლის უფლებების გადაჭარბებული შეფასების შემთხვევებში, წარმოადგენს იმ სამწუხარო გაუგებრობას, რომელსაც ადამიანთა შეცდომაში შეყვანის გარდა სხვა დანიშნულება ვერ მოეძებნება.

მოსამართლის „მითიური“ დამოუკიდებლობა სავარაუდოდ მოგონილია კორუფციის არსებობის უზრუნველსაყოფად და მისი შენარჩუნების ინტერესებიდან გამომდინარე, ვინაიდან იგი ემსახურება პირთა ბაზისური მოტივაციის დაკმაყოფილების ამოცანებს. ეს არის ძლიერი მოტივაციის ისეთი შემთხვევა, როდესაც მოსამართლეზე ზეგავლენის მოხდენა სადავო საქმის განხილვის გაუმჯობესების მიზნით სასურველ შედეგს მაინც ვერ აღწევს. მოტივაციის ტრანზორმაციის გარეშე ეს მიზანი მიღწეული ვერ იქნება. რაც შეეხება მოტივაციის ტრანზორმაციას, ამისთვის ჯერ საჭიროა, რომ სასამართლოში ამოქმედდეს მოსამართლეთა მუშაობის პერმანენტული კონტროლის „პროგრამა“ და შესაბამისი სამსახურები, რომლებიც გააკონტროლებენ იმას, რომ მოსამართლეებმა არ მოახდინონ დადგენილი წესებიდან და კანონებიდან გადახვევა, კანონმდებლობის მოთხოვნები დაიცვან სრულყოფილად და არა ფრაგმენტულად. მოსამართლეების მუშაობის პერმანენტული გაკონტროლება მოემსახურება მათი დამოუკიდებლობის უზრუნველყოფას, რათა არ მოხდეს დამნაშავე პირების მიერ არაკანონიერ ქმედებებზე მათი დაყოლიება და თავიანი დამოკიდებულების ქვეშ მოქცევა კანონმდებლობაზე მისი სრული დამოკიდებულების სანაცვლოდ. ამრიგად, მოსამართლეების მუშაობის გაკონტროლება კანონმდებლობასთან მაქსიმალური სიახლოვის მიღწევის მიზნით, მათი დამოუკიდებლობის საწინდარი და გარანტორია. ყველა სხვა შემთხვევებში ისინი დამოკიდებულები აღმოჩნდებიან დამნაშავე მოპასუხეებზე და მათ მავნე ქმედებებზე.

სასამართლოში არსებული ამ რთული ვითარებიდან ერთადერთ ქმედით გამოსავალს წარმოადგენს მოსამართლეთა შრომითი მოტივაციის ისეთი ტრანსფორმაციისთვის ხელის შეწყობა, რომ კანონმდებლობის მოთხოვნათა მაქსიმალური დაკმაყოფილების რთული ვალდებულება მათ გადაეცეთ კანონის დაცვის პოზიტიურ მოტივაციად, რომელიც სრულიად ლეგალურად ფინანსური მექანიზმებით განმტკიცებული იქნება. საჭიროა მოსამართლის მიერ კანონის სრული დაცვით საქმის განხილვის პროცესის იმ დონემდე მიყვანა, რომ დამნაშავე მოპასუხის მიერ მაქსიმალურად კომპენსირებული იყოს უფლებადარღვეული მოსარჩელისთვის მიყენებული ყველანაირი სახის ზარალი, რომელიც გამოხატული იქნება ფინანსებში (ამ ფინანსებში შედის როგორც წართმეული ხელფასები, ისე ფინანსებში კონვერტირებული ზარალები, როგორებიცაა სოციალური, პროფესიული, ჯანმრთელობის და სხვ.). ამ კომპენსირებული ფინანსების განაწილება უნდა მოხდეს მოსარჩელესა და მოსამართლეს (სასამართლოს) შორის შეთანხმების საფუძველზე. ყველაფერზე უდავოდ უნდა იქმნებოდეს ოფიციალური იურიდიული დოკუმენტაცია. ამის შედეგად მკვეთრად შეიზღუდება დამნაშავე მოპასუხის მიერ სასამართლოსთან კორუფციული ოპერირება და სასამართლო თანდათან გადაიქცევა

საზოგადოებისთვის ყველაზე პრესტიჟულ ინსტიტუციად. ასეთი კეთილშობილური შესაძლებლობის არგამოყენება გამოუსწორებლად მნიშვნელოვანი დანაკარგი იქნება მთელი საზოგადოებისთვის და ამის შედეგად ქვეყნის უფრო უკეთესი მომავლისთვის.

თუკი კანონმდებლობის მოთხოვნათა სრული დაცვით მოხდება მოსარჩელისთვის წარმეული ფინანსების მისთვის დაბრუნება და აგრეთვე მისთვის მიყენებული ყველა სახის ზარალის (სოციალური, მორალური, პროფესიული, ჯანმრთელობის და სხვ.) ფინანსური კომპენსირება, მაშინ მოსარჩელეს უნდა შეეძლოს, რომ სასამართლოს მიერ მისთვის დაბრუნებული ფინანსების ნაწილი ღირსეული ჰონორარის სახით სრულიად ლეგალურად გადასცეს მოსამართლეს სათანადო დოუმენტაციის გაფორმებით და ყოველგვარი ფარული პროცედურების გარეშე. ეს მოემსახურება ფსიქოლოგიური მექანიზმის - „მიგების“ - რეალიზებას (მიღებულ სიკეთეზე იგივე სიკეთით პასუხი), რაც მოსარჩელის მადლიერების გამოხატულება იქნება მოსამართლისგან მიღებულ კანონიერ სიკეთეზე. თავის მხრივ, მოსამართლეს უჩნდება პოზიტიური მოტივაციის დაკმაყოფილების შესაძლებლობა, რითიც იგი უფრო მეტი კმაყოფილებით ჩადგება კანონმდებლობის მოთხოვნათა დაკმაყოფილების სამსახურში დამნაშავე მოპასუხის კორუფციული ზეგავლენებისგან განთავისუფლებით. ამ აქტით მხოლოდ და მხოლოდ ამადღება მოსამართლის პრესტიჟი, სასამართლო გადაიქცევა სამართლიანობის დაცვის ადგილად, ხოლო საზოგადოებას მოეხსნება მადეზორგანიზებული სტრესები, რაც საბოლოოდ ხელს შეუწყობს ქვეყნის განვითარების ტემპების გაუმჯობესებას.

მოსამართლისთვის დამსახურებული ჰონორარის ლეგალურად გადაცემის უფლება გასაცემია ქვეყანაში მოქმედი ლეგიტიმაციის ინსტანციების მიერ: (ა/ ან პარლამენტის, ბ/ ან იუსტიციის უმაღლესი საბჭოს, გ/ ან სასამართლოს ხელმძღვანელის მიერ). თუკი მოსამართლეებზე არ იქნება დაწესებული ამ ინსტანციების მხრიდან კონტროლი მათი საქმიანობის შესაბამისობაზე კანონმდებლობასთან, მაშინ ისინი ვერც კი გახდებიან დამოუკიდებლები და აუცილებლად მოექცევიან კორუფციის მავნე ზეგავლენის ქვეშ, ვინაიდან, ზოგადად, ადამიანებს და კონკრეტულად მოსამართლეებს ახასიათებთ ადამიანური „სისუსტეები“ და ადვილად ექვემდებარებიან ზემოაღწერილ ქცევით, არაცნობიერ და ნეგატიურ ტენდენციებს. როდესაც მათ უხდებათ მუშაობა გარემოში, სადაც მათზე კონტროლი არ ხორციელდება და მიიჩნევიან სრულიად დამოუკიდებელ სუბიექტებად, მაშინ ისინი როდესაც დგებიან ორ ალტერნატივას შორის არჩევანის გაკეთების სიტუაციაში, ყოველთვის ირჩევენ მათთვის უფრო მეტი სიადვილის და სარგებლის შემცველ ალტერნატივას, რომელიც თითქმის ყოველთვის კორუფციული შინაარსის მქონე არაკანონიერი ალტერნატივაა. მაგრამ როდესაც მსგავსი არჩევანი კეთდება კონტროლირებად გარემოში, მაშინ კორუფციული ალტერნატივა იბლოკება და ადგილი ეთმობა პოზიტიური და კანონიერი ალტერნატივის არჩევას. სწორედ ასეთი ქმედების წახალისებას ემსახურება მოსამართლისთვის (სასამართლოსთვის) ლეგიტიმურად გადაცემული ჰონორარი, როგორც მოსარჩელის მადლიერების ნიშანი

მისი დარღვეული უფლებებისა და წართმეული ფინანსების აღდგენის საპასუხოდ. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, მაქსიმალურად ხელი უნდა შეეწყოს მოსამართლეების ნეგატიური, კორუფციული მოტივაციის ტრანსფორმირებას პოზიტიურ, კანონიერ მოტივაციაში ოფიციალური მოტივატორის - ჰონორარის - გამოყენების დაშვებით.

მართლმსაჯულების სისტემის მუშაობა რომ გაუმჯობესებას ითხოვს, ეს ყველასთვის ცნობილია. სწორედ ამიტომ არ წყდება საუბრები მის ნაკლოვანებებზე და აგრეთვე სასამართლოს რეფორმირების საჭიროებაზე, მაგრამ სისტემა ისევ იმავე მდგომარეობას ინარჩუნებს. ამით ვლინდება ის, რომ სამოსამართლო საქმიანობის ორგანიზებაში და მართვაში გამოტოვებულია ისეთი მნიშვნელოვანი კომპონენტი, რომელიც მიჩნეულია მეორეხარისხოვნად და, შესაბამისად, ყურადღებას ნაკლებად იმსახურებს. ამიტომ იგი სასამართლოს რეფორმირების პროგრამებში, როგორც წესი, არ ფიგურირებს და მთელი ყურადღება გადატანილია სასამართლო საქმისწარმოების პროცედურულ ასპექტებზე. წარმატებული და ეფექტიანი სამოსამართლო საქმიანობის უზრუნველყოფისთვის დიდი ხანია შექმნილია სახელმძღვანელო პრინციპები („ბანგალორის პრინციპები“ [2]), სხვადასხვა ქვეყნები ქმნიან ამ პრინციპების მოდიფიკაციებს მართლმსაჯულებაში თავ-თავიანთი სისტემების სპეციფიკის გათვალისწინებით, იქმნება სამოსამართლო მუშაობის მარეგულირებელი კანონმდებლობა და ა.შ. მიუხედავად ასეთი მოცულობის სამუშაოების შესრულებისა, საზოგადოება მაინც არ არის კმაყოფილი სასამართლოს როგორც მისი ინტერესების სამსახურში მყოფი ინსტიტუციის მუშაობით. ყოველივე ასე იმიტომ ხდება, რომ იურიდიული ინსტრუმენტები საკმარისი არ აღმოჩნდა საქმის გაუმჯობესებისთვის. ამ მხრივ მნიშვნელოვანია ადამიანის ქცევის ფსიქოლოგიური თავისებურებების უკეთ გააზრება, მათი სრულყოფილად გაცნობიერება და მხოლოდ ამით გამდიდრებული მიდგომით ყურადღების გადართვა სამოსამართლო მუშაობის ეფექტიანობის ამაღლების ამოცანების გადაჭრაზე. ამ მხრივ ყურადღებას იმსახურებს მოსამართლის მოტივაციის მექანიზმზე აპელირება და მასში პოზიტიური ასპექტის მკაფიოდ გამოკვეთა კანონმდებლობის მოთხოვნათა სრულყოფილი დაკმაყოფილების სასარგებლოდ. მოსამართლეს უნდა ექმნებოდეს ამის ძლიერი ინტერესის საფუძველი.

სამოსამართლო საქმიანობის ზემოთაღწერილი პრობლემები, გამომდინარე დამნაშავე სუბიექტების მიერ სასამართლოზე განხორციელებული კორუფციული ზეწოლიდან (ძალადობიდან), ჭეშმარიტად შესაძლებელია რომ გადაწყვეტილი იქნას მოსარჩელის მიერ მოსამართლისთვის ღირსეული ჰონორარის ლეგალური (ანუ ოფიციალური) გადაცემის დაშვებით მინიმუმ შემდეგი 2 მექანიზმის საშუალებით: 1) დაშვებული იყოს ინდივიდუალურ შემთხვევებში მოსარჩელის მოთხოვნით; 2) ჩამოყალიბდეს როგორც ყველასთვის სავალდებულო ნორმა, რომელშიც იქნება შენარჩუნებული მოსარჩელის ფიგურირება „ამოღებული ფინანსების“ პროცენტულ გადანაწილებაში მოსარჩელესა და მოსამართლეს (სასამართლოს) შორის. რაც შეეხება დამნაშავე მოპასუხეს, მას უნდა ევალებოდეს მხოლოდ მითვისებული ფინანსების დაბრუნება მოსარჩელისთვის სხვა

სახის კომპენსაციებთან ერთად, რომლებიც ერთიანად ქმნიან მოსარჩელისთვის მიყენებული ზარალის ჯამურ ოდენობას, გამოხატულს ფინანსებში.

ამრიგად, სასამართლოში კანონიერების განმკიცებაზე და კორუფციის შეზღუდვაზე ორიენტირებული იურიდიული მექანიზმების ამოქმედება უნდა ხდებოდეს ქცევის მოტივაციის მნიშვნელობის სრულყოფილი გაცნობიერებით და მისი ტრანსფორმაციის უზრუნველყოფისთვის აუცილებელი და საკმარისი პირობების შექმნით. მოპასუხის მხრიდან მოსამართლისთვის თავსმოხვეული კორუფციული მოტივაცია, რომელიც ემსახურება უფლებადარღვეული მოსარჩელის კუთვნილი რესურსების მითვისების ლეგალიზებას, შესაცვლელია მოსარჩელის კანონიერი მხარდაჭერის მოტივაციით. ეს მოტივაცია განმტკიცებული უნდა იქნას ლეგალურად მოსამართლისთვის ღირსეული **ჰონორარის** გადაცემით მოპასუხისგან მოსარჩელის სასარგებლოდ სასამართლოს მიერ კანონიერი მექანიზმების საფუძველზე მოთხოვნილი ფინანსური კომპენსაციებიდან. ამაზე ოფიციალური დოკუმენტაცია მუდმივად უნდა იქმნებოდეს, რაც მოსამართლის პრესტიჟის ამაღლებასაც და სამართლიანობის განცდის განმტკიცებასაც მოემსხურება.

შეჯამება

ზემოთ განვითარებული მსჯელობებიდან გამომდინარე, სრულიად ნათელი ხდება ის, რომ სასამართლოს და მოსამართლეების მუშაობის მოწესრიგებისთვის საკმარისი არ არის მხოლოდ იურიდიული კადრებისთვის ამ საკითხების მოგვარების მოვალეობის დაკისრება, რაც გამომდინარეობს სასამართლოს რეფორმირების არაეფექტიანობიდან. საქმე ეხება იურიდიული სფეროსთვის დამახასიათებელ ორიენტირებულობას ქცევის დანაშაულებრივ შედეგებზე, რომელიც ხელიდან უშვებს ამ შედეგების გამომწვევი მიზეზების გარკვევის შესაძლებლობას. რაც შეეხება ფსიქოლოგიას, იგი დაკავებულია ამ დანაშაულებრივი ქცევის მიზეზების გარკვევით და გააჩნია იმის რესურსები, რომ უფრო უკეთ განმარტოს როგორც კანონდამრღვევი ქცევის ფორმირების გარემოებანი, ისე ამ ქცევის გამოსწორების მექანიზმები, რაც სამართლის სფეროსთვის მიუღწევადია. ამიტომ არის ხშირად უშედეგო დანაშაულთან ბრძოლა იურიდიული მექანიზმებით, ვინაიდან სამართალი მოქმედებაში მოდის დანაშაულის ჩადენის შემდეგ და სულ არ ინტერესდება დანაშაულებრივი ქცევის გამომწვევი მექანიზმების შესწავლით და არც იმას ითვალისწინებს, რომ ამ მექანიზმებში ჩართული მოტივაციის ტრანსფორმაციით შეიძლება მიღწეული იქნას ქცევის ტრანსფორმაციაც ნეგატიურიდან პოზიტიურამდე. ეს პირველ რიგში ეხება კორუფციას, რომელიც სასამართლოშიც აღწევს მისი იმ „მყარი“ პოზიციების გამო, რომელიც ბუნებრივ კანონზომიერებებს ეფუძნება. ესენია არჩევანის სიტუაციებში მეტი-ნაკლები სარგებლიანობის მქონე ალტერნატივებიდან ინდივიდის მიერ მეტი სარგებლიანობის მქონე ალტერნატივების არჩევის კანონზომიერებანი. ამ ბუნებრივ ტენდენციებს ვერანაირი სადამსჯელო ღონისძიებებით ვერავინ ვერაფერს მოუხერხებს თუ არ იქნა განხორციელებული დანაშაულებრივი ქცევის გამომწვევი მოტივაციის ტრანსფორმაცია ნეგატიურიდან პოზიტიურამდე. კორუფცია ნეგატიური

მოტივაციიდან მომდინარეობს, რომლის ტრანსფორმირება პოზიტიურ მოტივაციაში შეიძლება მხოლოდ ფინანსური დაჯილდოების კანონიერი მექანიზმის გამოყენებით მოხერხდეს. ასეთია მოსარჩელისგან მოსამართლისთვის „ღირსეული ჰონორარის“ ლეგალური გადაცემა მოპასუხისგან მოსარჩელისთვის გამოთხოვილი და მიღებული ფინანსური კომპენსაციების მოცულობიდან, რაც მკვეთრად შეამცირებს ასპარეზს სასამართლოში მოპასუხის მხრიდან აქტიური კორუფციული მანიპულაციებისთვის. ზემოთ წარმოდგენილი მიდგომა ითხოვს მხარდაჭერას, რათა მრავალ სფეროში მზარდმა კორუფციამ არ გამოიწვიოს პრობლემების კრიტიკული სიჭარბე, რომლის შედეგების გამოსწორებაც ძნელი და რთული იქნება. აღნიშნულ მიდგომაზე უარის თქმა კი კორუფციის არაკანონიერი მხარდაჭერის ინტერესს გამოავლენს. შესაბამისად, საქმის კანონიერი და ეფექტიანი განხილვით კმაყოფილ მოსარჩელეს აუცილებლად უნდა ეძლეოდეს იმის შესაძლებლობა, რომ თავისი დიდი მადლიერება ლეგალურად გამოხატოს მოსამართლისთვის და მისი მუშაობის მაკონტროლებლისთვის ღირსეული ჰონორარის გადაცემით, რომელსაც სასამართლოში ექნება ანტიკორუფციული ეფექტი.

REFERENCES

1. Abraham, J., Suleeman, J., & Takwin, B. (2018). The Psychology of Corruption: The Role of the Counterfeit Self, Entity Self-Theory, and Outcome-Based Ethical Mindset. *Journal of Psychological and Educational Research*, 26(2), 7–32.
2. Bangalore Principles of Judicial Conduct (2018). United Nations Office on Drugs and Crime, United Nations, Vienna
3. Buscaglia, E. (1999). An analysis of the causes of corruption in the judiciary. *Law and Policy in International Business*, 30(4), 95–116.
4. Buscaglia, E. (2001). An analysis of judicial corruption and its causes: An objective governing-based approach. *International Review of Law and Economics*, 21(2), 233–249.
5. Dakolias, M., & Thachuk, K. L. (2000). Attacking corruption in the judiciary: A critical process in judicial reform. *Wisconsin International Law Journal*, 18(2), 353–453.
6. Descartes Rene (2006). A Discourse on the Method. Translated by Ian Maclean. Oxford University Press
7. Freud Sigmund (1923). Introductory lectures on psycho-analyses (J. Riviera, Trans.). London, Allend & Unwin.
8. Gloppen, S. (2011). Courts, corruption and judicial independence. In S. Rose-Ackerman & T. Søreide (Eds.), *International Handbook on the Economics of Corruption* (Vol. 2, pp. 68–95).
9. Gloppen, S. (2013). Judicial independence and corruption: Challenges in developing judiciaries. *U4 Anti-Corruption Resource Centre Brief*, 2013(4), 1–4. CMI Publication
10. Holmberg, S., & Rothstein, B. (2012). Dying of corruption: The impact of judicial and administrative integrity on global well-being. *World Development*, 40(1), 62–72.

11. **International Commission of Jurists. (2000).** *Policy framework for preventing and eliminating corruption and ensuring impartiality of the judicial system.* ICJ Executive Reports. ICJ Library
12. **James W. (1950).** *The principles of psychology* (2 vols.), New York: Holt, Rinehart & Wilson.
13. **Johannsen, L., & Pedersen, K. H. (2023).** When corruption hits the judiciary: A global perspective on access to justice and corruption. *Oñati Socio-Legal Series*, 13(4), 1259–1284.
14. **Jung, Carl (2003).** *Psychology of the Unconscious*, Dover Publications. New York.
15. **Mahdavia, R. (2024).** Beyond the borders: The rise of judicial corruption and universal jurisdiction. *University of Miami Race and Social Justice Law Review*, 14(2), Article 6. Miami Law Repository
16. **Maseko, T. (2012).** Judicial independence and the impact of corruption on human rights: A Southern African perspective. *African Human Rights Law Journal*, 12(2), 421–443.
17. **Maslow, Abraham (1970).** *Motivation and Personality*, Longman, London.
18. **Peerzada, S. A., & Khan, M. A. (2010).** A study on the working of administrative law principles to curb corruption. *Criminal Law Journal*, 116(1327), 35–42.
19. **Piaget, Jean (1972).** *The Psychology of Intelligence*. Totowa, NJ: Littlefield.
20. **Torsello, D., & Venard, B. (2016).** The Anthropology of Corruption. *Journal of Management Inquiry*, 25(1), 34–54.
21. **Transparency International. (2014).** *Topic guide on judicial corruption* (Transparency International Knowledge Hub Research Product). transparencycdn.org
22. **Transparency International. (2007).** *Global corruption report 2007: Corruption in the judicial system*. Cambridge University Press. transparency.org
23. **Voigt, S., & Gutmann, J. (2015).** On the wrong side of the law – Causes and consequences of a corrupt judiciary. *International Review of Law and Economics*, 43, 156–166.
24. **United Nations Office on Drugs and Crime. (2019).** *Corruption in the judiciary and the justice sector* (E4J University Module Series: Anti-Corruption, Module 12). UNODC. unodc.org
25. **Uznadze, Dimitri (1977).** Basic Principles of Set Theory. In *Works*, vol. 6, p. 263–326, Tbilisi (In georgian).

Psychoanalysis of Justice and Prospects for Improvement (Transformation of Corruptive Motivation)

Giorgi Goroshidze

Iv. Javakhishvili Tbilisi State University

Abstract

The article attempts to show the insufficiency of the legal sphere's attention to the consequences of criminal behavior, which misses the opportunity to clarify the causes of these consequences. The field of psychology, which is engaged in clarifying the causes of this criminal behavior, has the resources to better explain both the circumstances of the formation of law-breaking behavior and the mechanisms for correcting this behavior, which are inaccessible to the legal sphere. Corruption, as one of the types of criminal behavior, also reaches the court due to the presence of strong natural tendencies in it. This tendency consists in the preferential choice of the more beneficial alternative of behavior in a choice situation, which cannot be hindered by any punitive measures until the transformation of the motivation causing criminal behavior from negative to positive is achieved. Corruption stems from negative motivation, which can only be transformed into positive motivation through the use of a legal mechanism of financial rewards. Such a legal transfer of a “**decent fee**” from the plaintiff to the judge from the amount of financial compensation transferred by the defendant to the plaintiff at the request of the court, which will sharply reduce the defendant’s corrupt manipulations in court.

key words: psychoanalysis, justice, motivation, transformation, decent fee.

ჰარმონიკული რიგების მიმდევრობების ვიზუალური ანალიზი ფაზორული და სინუსოიდური დიაგრამების საფუძველზე

გიორგი ჩხაიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

რეზიუმე

წინამდებარე ნაშრომში წარმოდგენილია თანამედროვე ელექტროენერგეტიკული სისტემების ერთ-ერთი უმთავრესი გამოწვევის - ჰარმონიკული დამახინჯებების კომპლექსური ანალიზი და მათი კლასიფიკაცია სიმეტრიულ მდგენელთა პერპექტივაში. კვლევის ფუნდამენტურ საფუძველს წარმოადგენს მათემატიკური მოდელირება Microsoft Excel-ის პროგრამულ გარემოში, სადაც დისკრეტული ანალიზის მეთოდის გამოყენებით (1000 საკონტროლო წერტილი ერთ პერიოდზე) შესწავლილია ჰარმონიკული მდგენელების გავლენა 50-ე რიგის ჰარმონიკის ჩათვლით. ნაშრომის მეცნიერულ სიახლესა და პრაქტიკულ ღირებულებას განსაზღვრავს ჰარმონიკული მრუდებისა და ფაზორული დიაგრამების ურთიერთკავშირის სიღრმისეული ანალიზი, რაც საშუალებას იძლევა დინამიკაში დავაკვირდეთ ფაზორულ ბრუნვასა და შესაძლო ასიმეტრიებს.

ჩატარებული კვლევით დასტურდება, რომ ჰარმონიკული შემადგენლობის გავლენა სისტემაზე ექვემდებარება მკაცრ ციკლურ კანონზომიერებას, რომელიც პირდაპირ კავშირშია მათ რიგითობასთან. ნაშრომში დეტალურადაა განხილული დადებითი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობების ფორმირების პრინციპები მათემატიკური ალგორითმების ($3k + 1$; $3K - 1$; $3k$) საფუძველზე. ნაშრომში წარმოდგენილი ვიზუალიზაცია და სისტემატიზებული მონაცემები ქმნის საიმედო მეთოდოლოგიურ ბაზას ელექტროენერგიის ხარისხის მონიტორინგის, ინტელექტუალური დიაგნოსტიკისა და ეფექტური ფილტრაციის სისტემების დაპროექტებისთვის, რაც კრიტიკულად მნიშვნელოვანია ელექტრო ენერგეტიკული სისტემის მდგრადი და საიმედო ფუნქციონირებისათვის.

საძიებო სიტყვები: ჰარმონიკული მდგენელები, სიმეტრიული მდგენელები, ფაზორული დიაგრამები, ელექტროენერგიის ხარისხი, არაწრფივი დატვირთვა, მათემატიკური მოდელირება.

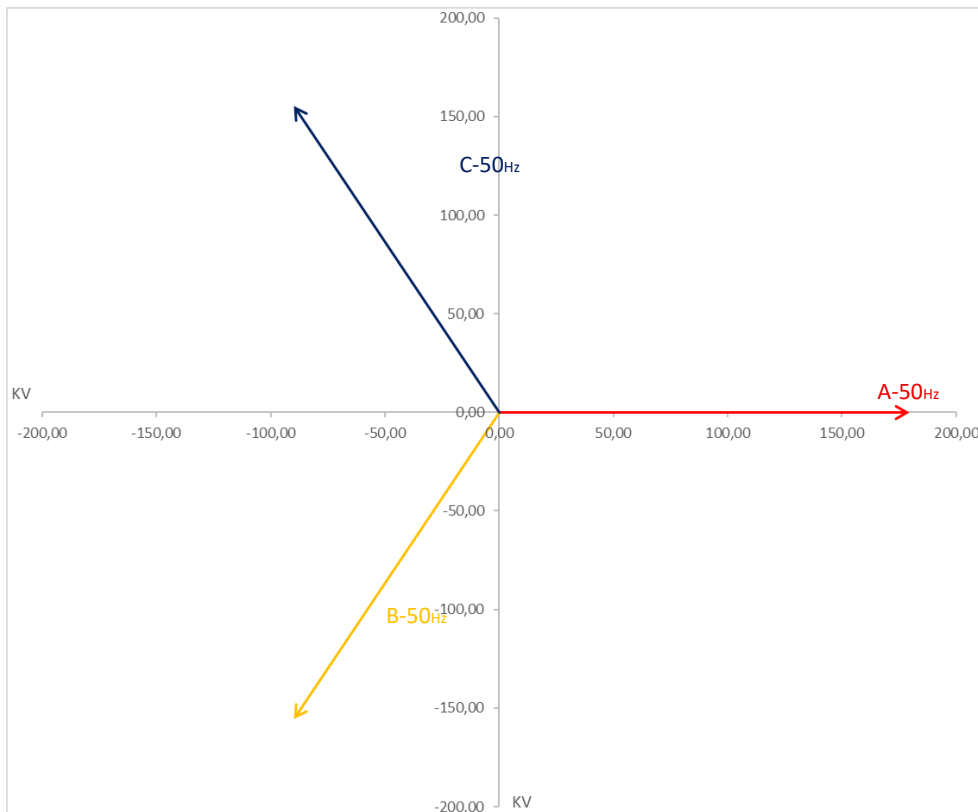
შესავალი

თანამედროვე ელექტროენერგეტიკულ სისტემებში ენერგიის ხარისხთან დაკავშირებული პრობლემები ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ტექნიკურ გამოწვევად რჩება, განსაკუთრებით განახლებადი ენერგიის წყაროების ფართომასშტაბიანი ინტეგრაციის პირობებში [1]; [2] . ასეთ პრობლემებს მიეკუთვნება სინუსოიდური მრუდის დამახინჯება, სამფაზა სისტემის ასიმეტრიულობა, ძაბვის სწრაფი ფლუქტუაციები და სხვა მსგავსი მოვლენები, რომლებიც გავლენას ახდენს როგორც ქსელის მუშაობის სტაბილურობაზე, ისე მომხმარებლისთვის მიწოდებული ელექტროენერგიის ხარისხზე. აღნიშნული ეფექტები განსაკუთრებით მწვავედ ვლინდება ტოპოლოგიურად სუსტი და მოწყვლადი ელექტრული ქსელების პირობებში, სადაც გადაცემის ხაზების მოდელირების დეტალიზაციასა და მათ სიხშირულ მახასიათებლებს გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება [6] . სწორედ ამიტომ, ენერგიის ხარისხის პრობლემების კვლევა, შეფასება და მათი გავლენის ანალიზი თანამედროვე ელექტრული სისტემების საიმედო და უსაფრთხო ფუნქციონირებისათვის კრიტიკულად მნიშვნელოვანია [5] .

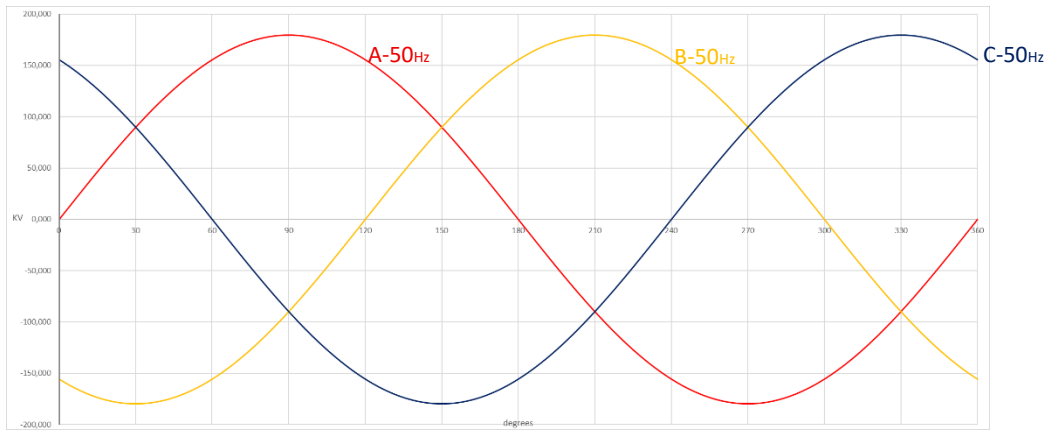
ელექტროენერგეტიკული სისტემა წარმოდგენილია ცვლადი დენის სამფაზა სისტემის გარეშე, რომელიც თავისი მოქნილობისა და ეფექტურობის წყალობით, ელექტროენერგიის წარმოების, გადაცემისა და მოხმარების უალტერნატივო სტანდარტად იქცა [3] . იდეალურ პირობებში, სამფაზა სისტემა წარმოადგენს სრულყოფილ მათემატიკურ და ფიზიკურ სიმეტრიას. მისი ფუნდამენტური პრინციპი სამი ცვლადი სინუსოიდალური ძაბვის ერთობლიობას ეფუძვნება, რომელთაც იდენტური ამპლიტუდა და სიხშირე გააჩნიათ, ხოლო დროში ერთმანეთის მიმართ არიან წანაცვლებული 120° -იანი კუთხით. ეს გეომეტრიული სიზუსტე უზრუნველყოფს სისტემის ბალანსირებულ მდგომარეობას, სადაც ნებისმიერ დროის მომენტში სამივე ფაზის მყისიერი მნიშვნელობების ფაზორული ჯამი ნულის ტოლია. ფიზიკური თვალსაზრისით, ასეთი სისტემა საშუალებას იძლევა შეიქმნას მუდმივი სიდიდის მქონე მბრუნავი მაგნიტური ველი, რაც ელექტრული მანქანების მუშაობის საფუძველია.

ზემოაღნიშნული იდეალური მდგომარეობის თვალსაჩინოებისთვის, ნახაზ.1-სა და 2-ზე წარმოდგენილია 220 კვ. ძაბვის სისტემის ბალანსირებული ფაზორული და სინუსოიდალური დიაგრამები. ფაზორულ დიაგრამაზე მკაფიოდ ჩანს ფაზური ძაბვების თანაბარი სიდიდეები და მათ შორის არსებული 120° -იანი კუთხე, რაც სისტემის აბსოლუტურ სიმეტრიაზე მიუთითებს. შესაბამისად, დროით დიაგრამაზე ასახული სინუსოიდები ქმნიან ჰარმონიულ ერთობლიობას, სადაც ყოველი ფაზა იდენტური ამპლიტუდითა და ფორმით მეორდება, რაც წარმოადგენს ეტალონურ მაჩვენებელს ელექტროენერგიის ხარისხის შეფასების პროცესში თუმცა, რეალურ რეჟიმებში ჰარმონიკული ნაკადების გავრცელება და ხაზების პარამეტრების სიხშირული დამოკიდებულება მნიშვნელოვნად ცვლის ამ სურათს, რაც მოითხოვს ქსელის ელემენტების მაღალი სიზუსტით მოდელირებას [4] ; [6] .

ნაშრომში წარმოდგენილი კვლევის ვიზუალური მხარისა და გრაფიკული მასალის აღქმის გასამარტივებლად, გამოყენებულია ფაზების სტანდარტული ფერადი მარკირება. როგორც ნახაზ 1-ზე, ისე ნახაზ 2-ზე, A ფაზა აღნიშნულია წითელი ფერის ფაზორითა და შესაბამისი სინუსოიდით, B ფაზა გამოსახულია ყვითელი ფერით, ხოლო C ფაზა - ლურჯით. აღნიშნული ფერითი იდენტიფიკაცია უცვლელად იქნება შენარჩუნებული კვლევის ბოლომდე ყველა დიაგრამასა თუ გრაფიკზე, რაც საშუალებას გვაძლევს თვალსაჩინოდ მივადევნოთ თვალის თითოეული ფაზის მნიშვნელობებსა და მათ ცვლილებებს სხვადასხვა რეჟიმში.



ნახაზი 1 - იდეალური სამფაზა სისტემის სიმეტრიული ფაზორული დიაგრამა.



ნახაზი 2 - იდეალური სამფაზა სისტემის სიმეტრიული სინუსოიდალური დიაგრამა.

მიუხედავად იმისა, რომ თეორიულად სამფაზა სისტემა სრულყოფილ სიმეტრიას ეფუძნება, პრაქტიკულ ექსპლუატაციაში იდეალური ბალანსის შენარჩუნება პრაქტიკულად შეუძლებელია. რეალურ ელექტრულ ქსელებში მუდმივად ვხვდებით სხვადასხვა ტიპის ასიმეტრიებს, რაც გამოწვეულია როგორც დატვირთვის არათანაბარი განაწილებით ფაზებს შორის, ისე თავად ქსელის პარამეტრების არაიდენტურობით. ელექტროენერგიის ხარისხი, რომელიც თანამედროვე ენერგეტიკის ერთ-ერთი უმთავრესი გამოწვევაა, პირდაპირ არის დამოკიდებული იმაზე, თუ რამდენად ახლოსაა რეალური ძაბვისა და დენის მრუდები მათ ეტალონურ, სინუსოიდალურ ფორმასთან. ნებისმიერი გადახრა იწვევს დამატებით დანაკარგებს, აპარატურის ზედმეტ გახურებას და სისტემის მუშაობის საიმედოობის შემცირებას.

სინუსოიდის დამახინჯების წყაროები მრავალფეროვანია, თუმცა მათ შორის უმთავრესი ე.წ. არაწრფივი დატვირთვებია. თუ ადრეულ პერიოდში ელექტრული ქსელი ძირითადად წრფივი ელემენტებისგან (რეზისტორები, ინდუქციური ძრავები) შედგებოდა, დღეს დომინანტური როლი ნახევარგამტარულმა ტექნოლოგიებმა დაიკავა. ძალოვანი ელექტრონიკის განვითარებამ, მათ შორის სიხშირულმა გარდაქმნელებმა, უწყვეტი კვების წყაროებმა, მზის ინვერტორებმა და იმპულსურმა კვების ბლოკებმა, მნიშვნელოვნად შეცვალა დენის მოხმარების ხასიათი. ეს მოწყობილობები დენს ქსელიდან მოიხმარენ არა უწყვეტად, არამედ წყვეტილი, იმპულსური სახით, რაც იწვევს ძაბვის ვარდნას და ფორმის დამახინჯებას, რაც საბოლოო ჯამში ჰარმონიკული მდგენელების წარმოქმნის მიზეზი ხდება.

ჰარმონიკული დამახინჯებები წარმოადგენს რთულ პერიოდულ პროცესს, სადაც ფუნდამენტურ 50 ჰერცის სიხშირეს ემატება მისი ჯერადი სიხშირეები. ეს პროცესი სისტემაში იწვევს „ელექტრომაგნიტურ ხმაურს“, რომელიც აზიანებს მგრძნობიარე ელექტრონულ მოწყობილობებს, იწვევს საიზოლაციო მასალების ნაადრევ დეგრადაციას და ტრანსფორმატორების გულარას დამატებით მაგნიტურ დანაკარგებს. განსაკუთრებით საყურადღებოა ის ფაქტი, რომ ეს დამახინჯებები არ არის მხოლოდ ლოკალური პრობლემა, ისინი ვრცელდებიან მთელ ქსელში და გავლენას ახდენენ სხვა

მომხმარებლებზეც. სწორედ ამიტომ, ჰარმონიკული შემადგენლობის სიღრმისეული ანალიზი და მათი გამომწვევი მიზეზების კვლევა კრიტიკულად მნიშვნელოვანია ენერგოსისტემის მდგრადი და ეფექტური ფუნქციონირებისათვის, რაც საფუძვლად ედება მათ შემდგომ კლასიფიკაციას.

ელექტროენერგიის ხარისხის ანალიზის ფუნდამენტური მათემატიკური საფუძველია ფურიეს გარდაქმნის პრინციპი, რომლის თანახმადაც ნებისმიერი რთული პერიოდული სიგნალი, რაც არ უნდა დამახინჯებული იყოს მისი ფორმა, შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს როგორც უმარტივესი სინუსოიდალური მდგენელების უსასრულო ჯამი. თითოეულ ამ მდგენელს გააჩნია საკუთარი ამპლიტუდა, სიხშირე და ფაზური წანაცვლება. ელექტროტექნიკაში ეს ნიშნავს, რომ ქსელში არსებული ნებისმიერი დამახინჯებული ძაბვის ან დენის ტალღა შეგვიძლია დავშალოთ ძირითად (ფუნდამენტურ) 50 ჰერცის სიხშირედ და მის ჯერად სიხშირეებად.

ჰარმონიკული დამახინჯებების კვლევისას ფურიეს ანალიზი საშუალებას გვაძლევს, დავინახოთ სიგნალის „უხილავი“ შინაარსი. მაგალითად, თუ ქსელში გვაქვს მე-3 ან მე-5 რიგის ჰარმონიკა, ეს ნიშნავს, რომ ძირითად ტალღაზე ზედდებულია 150 ჰერცისა (3×50) ან 250 ჰერცის (5×50) სიხშირის მქონე რხევები. რაც უფრო მეტია ასეთი მდგენელების რაოდენობა და მათი ამპლიტუდა, მით უფრო შორდება რეალური მრუდი იდეალურ სინუსოიდას. სწორედ ამ მათემატიკურ მოდელზე დაყრდნობით ხდება შესაძლებელი ფილტრაციის სისტემების დაპროექტება და სისტემის მუშაობაზე ნეგატიური გავლენის მქონე კონკრეტული რიგების იდენტიფიცირება.

წინამდებარე ნაშრომის მთავარ მიზანს წარმოადგენს ჰარმონიკული მდგენელების დეტალური კვლევა და მათი ფიზიკური თვისებების ანალიზი 50-ე რიგის ჩათვლით. ასეთი ფართო დიაპაზონის არჩევა განპირობებულია თანამედროვე ენერგოაუდიტის სტანდარტებით, რადგან მაღალი რიგის ჰარმონიკებს, მიუხედავად მათი შედარებით მცირე ამპლიტუდისა, შეუძლიათ გამოიწვიონ სპეციფიკური პრობლემები, როგორიცაა „ზედაპირული ეფექტი“ გამტარებში და რეზონანსული მოვლენები მაღალსიხშირულ დიაპაზონში. ჩვენს მიერ ჩატარებული ანალიზი მიზნად ისახავს თითოეული რიგის ჰარმონიკის ინდივიდუალური თვისებების შესწავლას, მათ გრაფიკულ ასახვას და საბოლოო კლასიფიკაციას, რაც საფუძვლად დაედება ელექტროენერგიის ხარისხის მართვის უფრო ეფექტურ სტრატეგიებს.

კვლევის მეთოდოლოგია და მათემატიკური მოდელირება

კვლევის პროცესში, ჰარმონიკული დამახინჯების ბუნებისა და მისი გავლენის იდენტიფიკაციის მიზნით, განხორციელდა სამფაზიანი ელექტრული სისტემის მათემატიკური მოდელირება პროგრამულ გარემოში (Microsoft Excel). კვლევის

ვალიდურობისთვის საწყის ეტაპზე აიგო იდეალური სიმეტრიული სისტემა, სადაც სამივე ფაზის ძაბვის მრუდები იდენტურია, ხოლო მათ შორის ფაზური წანაცვლება ზუსტად 120° -ს შეადგენს (ნახაზი_1;2).

გამოთვლების მაღალი სიზუსტისა და მრუდების მაქსიმალური გარჩევადობის უზრუნველსაყოფად, მოდელირებისას გამოყენებულ იქნა დისკრეტული ანალიზის მეთოდი. კერძოდ, ერთი სრული პერიოდის (360°) განმავლობაში აღებულ იქნა 1000 საკონტროლო წერტილი, რაც ნიშნავს, რომ გამოთვლები ხორციელდებოდა ყოველი 0.36° -იანი ბიჯით. თითოეული წერტილისთვის, ტრიგონომეტრიული ფუნქციების (Sin და Cos) გამოყენებით, განისაზღვრა შესაბამისი X და Y კოორდინატები დეკარტის კოორდინატთა სისტემაში. მოდელის კოორდინატთა სათავედ მიჩნეულია სისტემის ნეიტრალური წერტილი.

ამ მეთოდოლოგიით მიღებული მონაცემთა მასივი ორმაგ ფუნქციას ასრულებს:

1. **ფაზორული დიაგრამისთვის:** თითოეული ფაზისთვის ყოველ ანგარიშში მიღებული კოორდინატები წარმოადგენენ ფაზორის ბოლო წერტილებს, რაც საშუალებას გვაძლევს დინამიკაში დავაკვირდეთ ფაზორულ ბრუნვასა და შესაძლო ასიმეტრიას.
2. **სინუსოიდალური დიაგრამისთვის:** მიღებული კოორდინატები განსაზღვრავენ ძაბვის მყისიერ მნიშვნელობებს დროის ფუნქციაში, რაც საფუძვლად უდევს რეალური, ჰარმონიკებით დამახინჯებული მრუდების გრაფიკულ აგებას.

აღნიშნული მიდგომა საშუალებას იძლევა, დეტალურად იქნას შესწავლილი მაღალი რიგის ჰარმონიკების (50-ე რიგის ჩათვლით) ზეგავლენა ფაზურ ძაბვებზე, ვინაიდან მაღალი სიმჭიდროვის წერტილოვანი მოდელი გამორიცხავს მნიშვნელოვანი დეტალების დაკარგვას ვიზუალიზაციის პროცესში.

კვლევის შემდეგ ეტაპზე განიხილება იდეალური 50 ჰერციანი სისტემის ურთიერთქმედება მეორე რიგის (100 ჰერცი) სიმეტრიულ ჰარმონიკულ მდგენელთან. ამ პროცესის მოდელირებისთვის გამოყენებულია ფაზორული სუპერპოზიციის პრინციპი, რაც საშუალებას გვაძლევს დავინახოთ ძაბვის მრუდის ფორმირების დინამიკა.

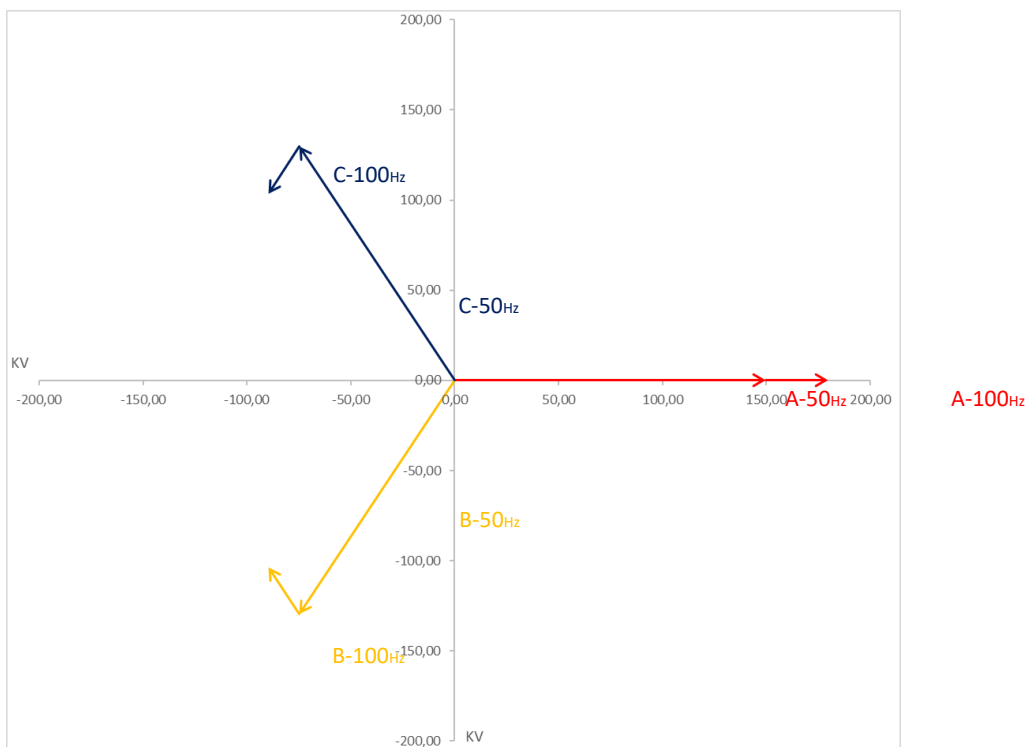
მათემატიკური მოდელის მიხედვით, ჯამური ფაზორის კოორდინატების გაანგარიშება ხდება შემდეგი ლოგიკით:

1. **ბაზისური ფაზორი:** A ფაზის ფუნდამენტური 50 ჰერციანი ფაზორი განსაზღვრავს ძირითად ტრაექტორიას.
2. **ჰარმონიკული მოდულაცია:** ძირითადი ფაზორის ბოლო წერტილი წარმოადგენს მეორე რიგის ჰარმონიკული ფაზორის ათვლის წერტილს (სათავეს).

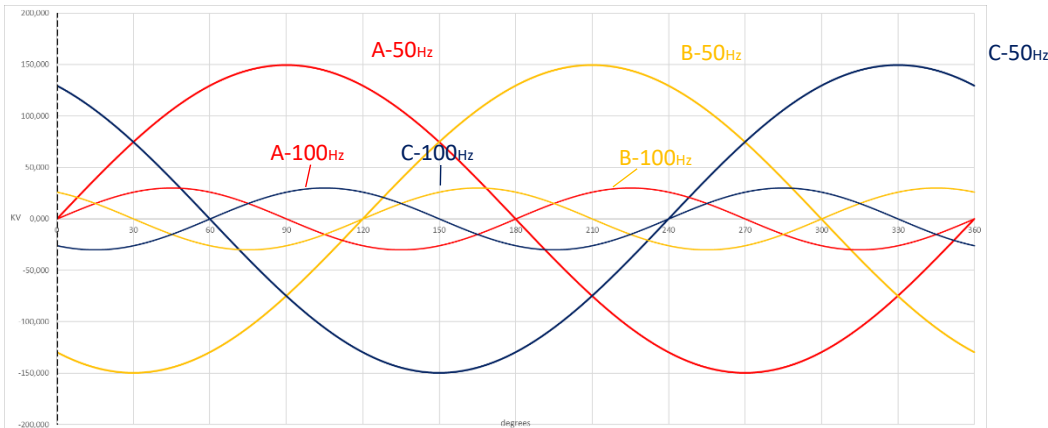
3. **ფარდობითი ბრუნვა:** ვინაიდან ჰარმონიკის სიხშირე ორჯერ აღემატება ფუნდამენტურს, მეორე რიგის ჰარმონიკული ფაზორი ბრუნავს ორჯერ მეტი კუთხური სიჩქარით ძირითადი ფაზორის დაბოლოების ირგვლივ.

შედეგად, ჯამური ძაბვის ფაზორის ბოლო წერტილი აღარ აღწერს იდეალურ წრეწირს. ის მოძრაობს რთული ტრაექტორიით, რომელიც წარმოადგენს ფუნდამენტური ფაზორის ბრუნვისა და მასზე დაშენებული მეორე რიგის ჰარმონიკის სიხშირის ვიბრაციის კომბინაციას. 100 ჰერციანი მდგენელი პერიოდულად ზრდის და ამცირებს ჯამური ფაზორის მყისიერ ამპლიტუდას, რაც სინუსოიდალურ დიაგრამაზე აისახება მრუდის ასიმეტრიული დამახინჯებით.

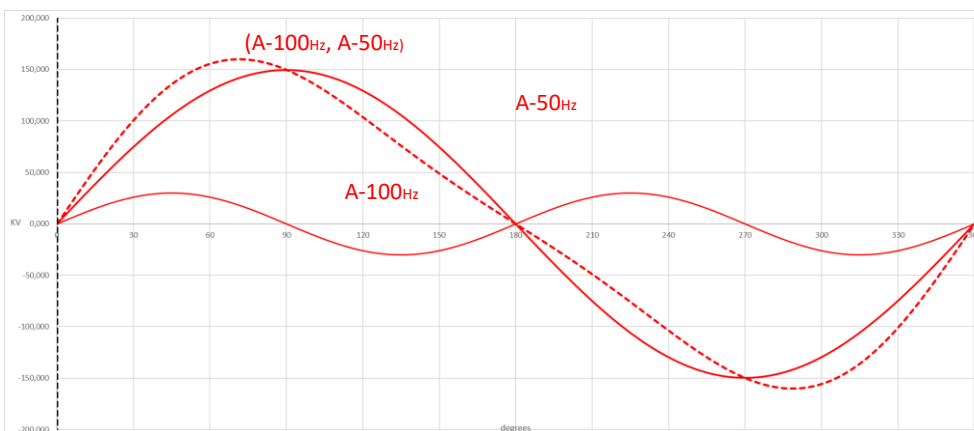
ნახაზ 3_ ზე არსებულ 100 ჰერციან ფაზორებზე დაკვირვებით ვხედავთ, რომ მათი ფაზათა თანმიმდევრობა განსხვავდება ფუნდამენტური 50 ჰერციანი მდგენელისგან: მეორე რიგის ჰარმონიკული მდგენელის A ფაზის ფაზორი ფიქსირდება 0°_ზე, B ფაზის ფაზორი A ფაზის მიმართ დაძრულია 240°_ით ნაცვლად 120°_ ისა, ხოლო C ფაზა - 120°_ით 240°_ ის ნაცვლად. აღნიშნული მოვლენა მიუთითებს იმაზე, რომ მეორე რიგის ჰარმონიკული მდგენელის ფაზათა თანმიმდევრობა საპირისპიროა ფუნდამენტურის მიმართ, რაც უფრო მკაფიოაა გამოსახული ნახაზ 4_ზე, სადაც წარმოდგენილია იდენტური მნიშვნელობებით აგებული სინუსოიდალური დიაგრამის დროზე დამოკიდებულება.



ნახაზი 3 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და 2 რიგის 100 ჰერციანი ჰარმონიკული მდგენელების ფაზორული დიაგრამა



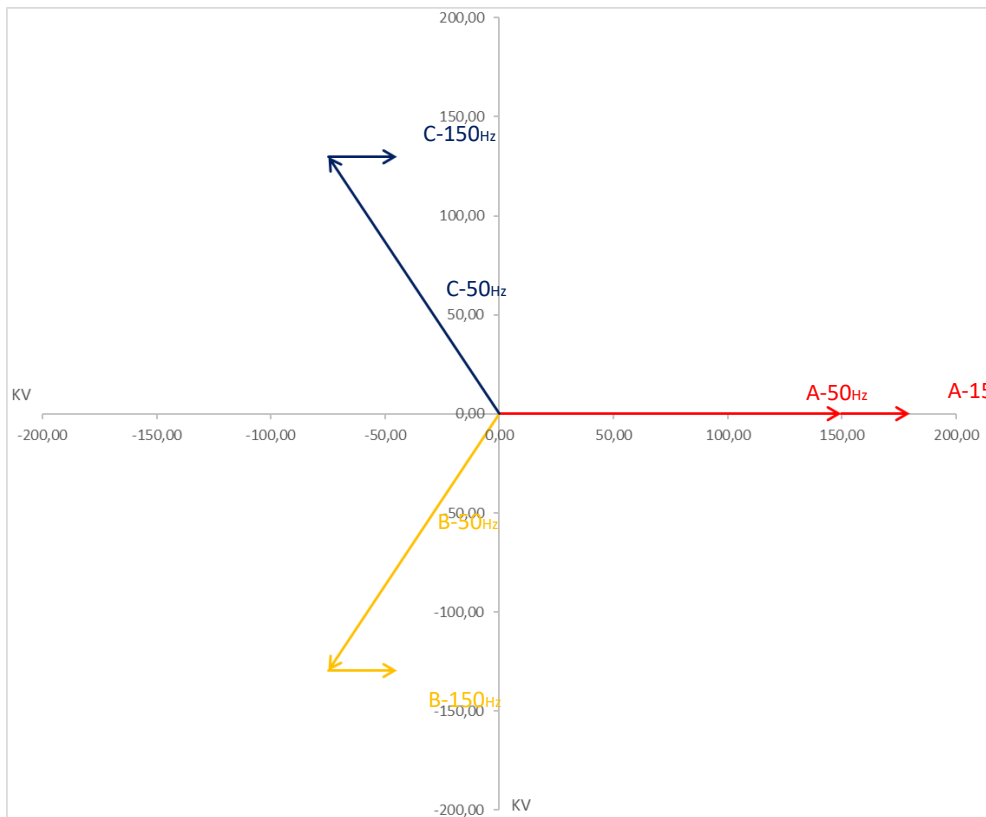
ნახაზი 4 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და 2 რიგის 100 ჰერციანი ჰარმონიკული მდგენელების სინუსოიდალური დიაგრამა



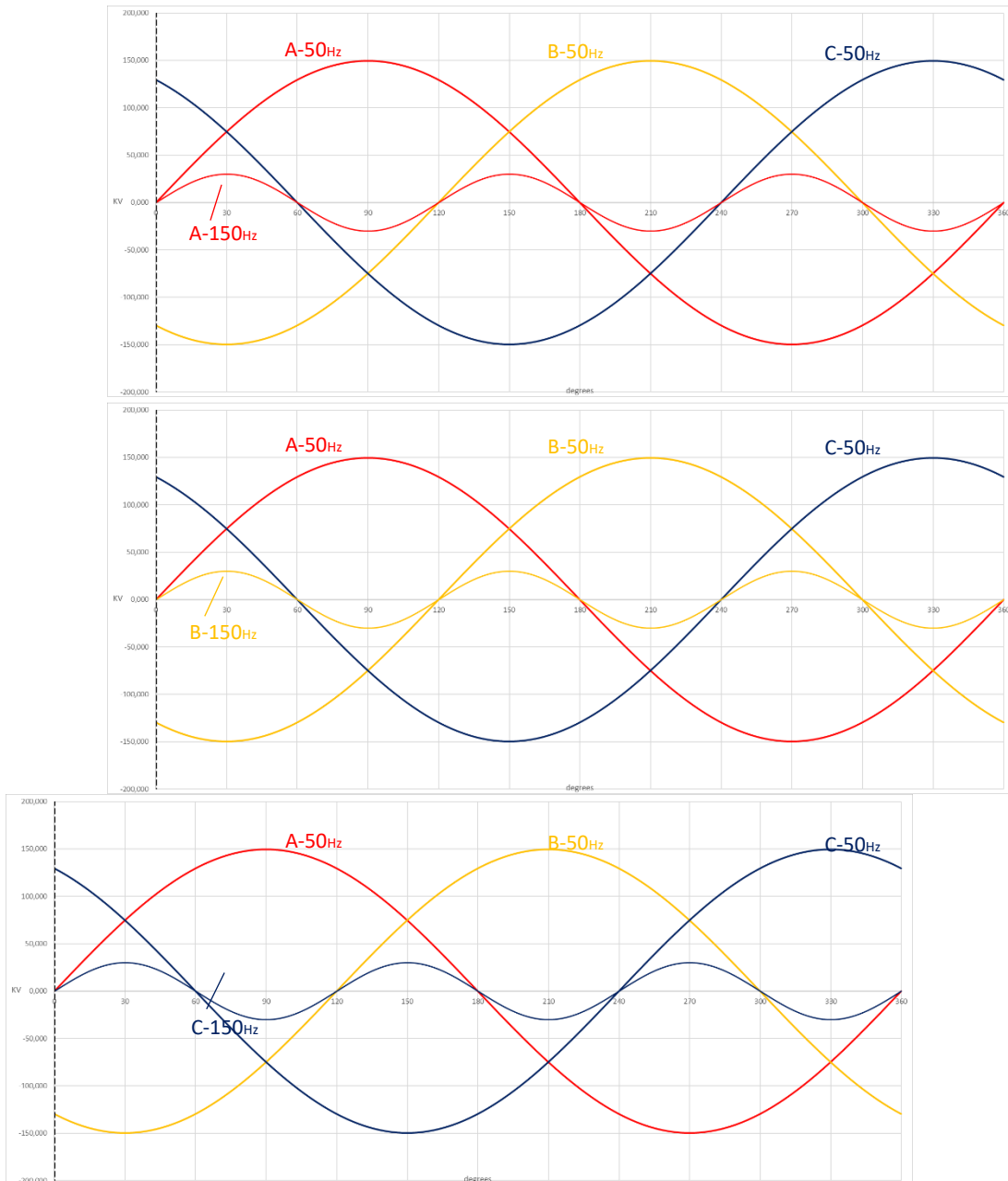
ნახაზი 5 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი, 2 რიგის 100 ჰერციანი ჰარმონიკული მდგენელისა და მათი სუპერპოზიციით მიღებული კომბინირებული სინუსოიდალური დიაგრამა.

კვლევის პროცესში გამოიკვეთა კიდევ ერთი ფუნდამენტური კანონზომიერება: მიუხედავად დაფიქსირებული უკუმიმდევრობისა, 100 ჰერციანი ჰარმონიკული მდგენელები, ისევე როგორც 50 ჰერციანი ფუნდამენტური სინუსოიდები, დროის ნებისმიერ მომენტში ერთმანეთს აბალანსებენ. მოდელირებამ აჩვენა, რომ მრუდების ფორმის დეფორმაციისა და ფაზებს შორის მყისიერი კუთხური რხევების მიუხედავად, სამივე ფაზის ჯამური მყისიერი მნიშვნელობების ალგებრული ჯამი ნებისმიერ წერტილში ნულის ტოლია.

კვლევის შემდეგ ეტაპზე განხილულია ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და მე-3 რიგის 150 ჰერციანი ჰარმონიკული მდგენელების ურთიერთქმედება. ნახაზ 6-ზე წარმოდგენილია აღნიშნული სიხშირეების ფაზორული დიაგრამა, სადაც თვალსაჩინოდ ჩანს მესამე რიგის ჰარმონიკის სპეციფიკური ბუნება: სამივე ფაზისთვის აღნიშნული მდგენელი ერთმანეთის იდენტურია როგორც ფაზორის სიგრძით (ამპლიტუდით), ისე ფაზური კუთხით. ამ მონაცემებზე დაყრდნობით შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ სამივე ფაზის მესამე რიგის ჰარმონიკული მდგენელები დროის ნებისმიერ წერტილში ერთმანეთის ტოლი მნიშვნელობებით ხასიათდებიან. ეს ნიშნავს, რომ მათ შორის ფაზური წანაცვლება ნულის ტოლია, რაც მათემატიკურად ნულოვანი მიმდევრობის სისტემას წარმოადგენს.



ნახაზი 6 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და 3 რიგის 150 ჰერციანი ჰარმონიკული მდგენელების ფაზორული დიაგრამა



ნახაზი 7 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და 3 რიგის 150 ჰერციანი ჰარმონიკული მდგენელების სინუსოიდალური დიაგრამები

აღნიშნული კანონზომიერება კიდევ უფრო მკაფიოდ არის ასახული ნახაზ 7-ზე, სადაც წარმოდგენილია A, B და C ფაზების ფუნდამენტური და მესამე რიგის ჰარმონიკული მდგენელების სინუსოიდალური დიაგრამები. გრაფიკულ გამოსახულებაზე ნათლად ჩანს თითოეული ფაზის მესამე ჰარმონიკის მყისიერი მნიშვნელობების სრული იდენტურობა დროის ნებისმიერ მომენტში. ეს ნიშნავს, რომ განსხვავებით ფუნდამენტური მდგენელებისგან, რომლებიც დროში ფაზურად წანაცვლებულნი არიან, მესამე რიგის ჰარმონიკები სამივე ფაზაში სინქრონულად აღწევენ მაქსიმუმს და მინიმუმს.

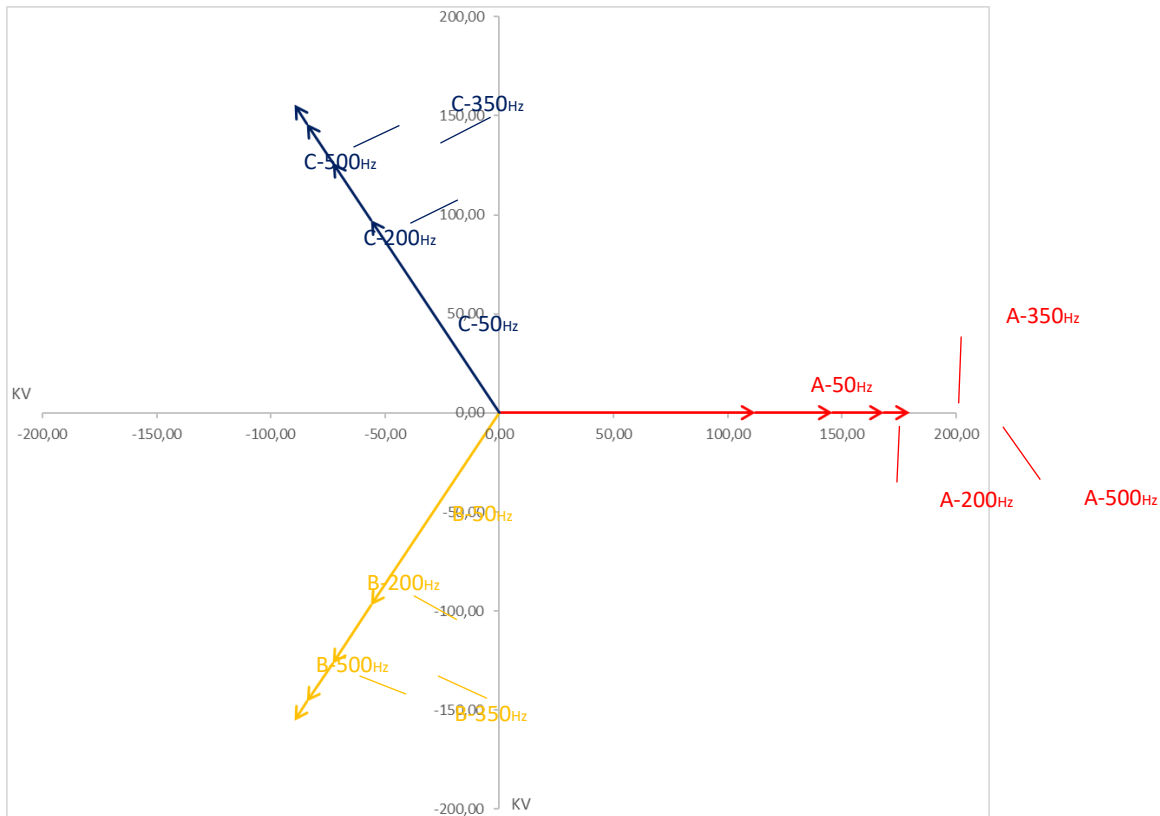
მათემატიკური მოდელირების ეს შედეგი ადასტურებს, რომ მესამე რიგის ჰარმონიკა წარმოადგენს ნულოვანი მიმდევრობის სისტემას. ამ მოვლენას გადამწყვეტი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს ელექტროენერგეტიკაში, ვინაიდან ასეთ რეჟიმში ჰარმონიკული მდგენელები არა ურთიერთგაბათილების, არამედ ალგებრული დაჯამების პრინციპით მოქმედებენ, რაც იწვევს ნეიტრალურ სადენში ჯამური დენის მკვეთრ ზრდას.

ჩატარებული კვლევის შედეგად მიღებული გრაფიკული გამოსახულებები სრულიად იდენტურია ფურიეს მეთოდით შესრულებული თეორიული გაანგარიშებებისა. მოდელირებისა და ანალიტიკური გათვლების ასეთი ზუსტი თანხვედრა ადასტურებს, რომ შერჩეული მეთოდოლოგიით მიღებული შედეგები და მათ საფუძველზე ჩამოყალიბებული დასკვნები სრულიად საფუძვლიანი, ვალიდური და რენტაბელურია. აღნიშნული მიდგომა იძლევა საშუალებას, მაღალი საიმედოობით იქნას პროგნოზირებული რთული ჰარმონიკული შემადგენლობის მქონე ელექტრული სისტემების ქცევა რეალურ საექსპლუატაციო პირობებში.

მესამე რიგის ჰარმონიკის ანალიზის შემდეგ, კვლევა ანალოგიური მეთოდოლოგიით გაგრძელდა მაღალი რიგის მდგენელებისთვის 50-ე ჰარმონიკის ჩათვლით. გამოთვლებმა აჩვენა, რომ ჰარმონიკული მდგენელების ზეგავლენა სისტემაზე არ არის ქაოსური და ექვემდებარება მკაცრ ციკლურ კანონზომიერებას, რომელიც პირდაპირ კავშირშია მათ რიგითობასთან. კერძოდ, გამოიკვეთა ფაზური მიმდევრობების მონაცვლეობის ციკლი, სადაც ყოველი მომდევნო ჰარმონიკა იმეორებს დადებითი, უკუ ან ნულოვანი მიმდევრობის თვისებებს.

ჰარმონიკული მდგენელების დეტალური ანალიზისას, პირველ რიგში, ყურადღებას იქცევს **დადებითი (პირდაპირი) მიმდევრობის** ჯგუფი ($n = 1, 4, 7, 10, \dots$). აღნიშნული კანონზომიერებით დასტურდება, რომ $n = 3k+1$ (სადაც k ნატურალური რიცხვია) რიგის ჰარმონიკები წარმოადგენენ დადებით (პირდაპირ) მიმდევრობას. ჩატარებულმა მოდელირებამ აჩვენა, რომ ამ ჯგუფში შემავალი ყველა ჰარმონიკისთვის ფაზური წანაცვლება ნარჩუნდება ფუნდამენტური მდგენელის ანალოგიურად: A ფაზის მიმართ B ფაზა დაძრულია 120° -ით, ხოლო C ფაზა - 240° -ით.

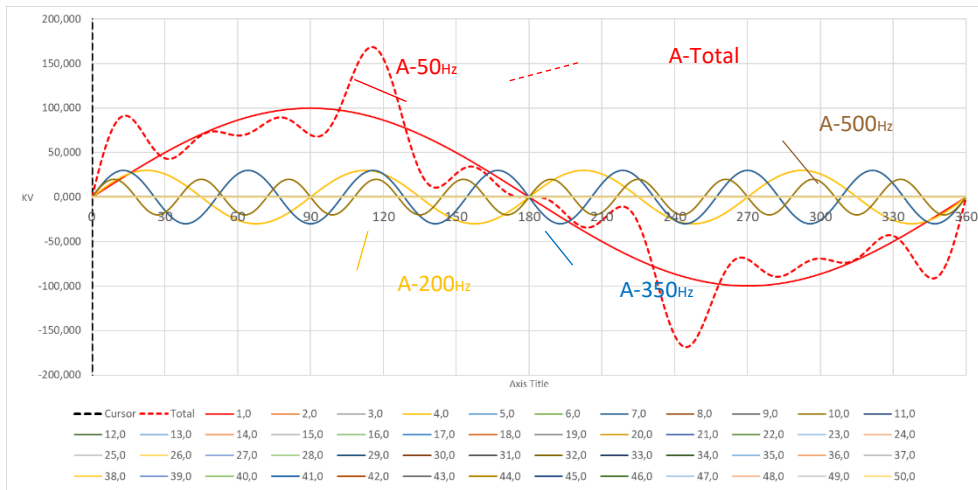
როგორც წარმოდგენილ ნახაზ 8-ზე ვხედავთ, მიუხედავად სიხშირეების ზრდისა, ამ რიგის ჰარმონიკების ფაზორული გამოსახულებები ფაზური კუთხით ერთმანეთის იდენტურია. ეს ნიშნავს, რომ ისინი ქმნიან ძირითადი ველის მიმართულებით მბრუნავ მაგნიტურ ნაკადებს. აღნიშნული ჰარმონიკების ფაზორული ერთგვაროვნება თვალსაჩინოდ ადასტურებს, რომ $n=3k+1$ ფორმულის მქონე ნებისმიერი მდგენელი სისტემაში მოქმედებს როგორც დადებითი მიმდევრობის მატარებელი, რაც სინუსოიდალურ დიაგრამაზე აისახება მრუდის სიმეტრიული, თუმცა მაინც დამახინჯებული ფორმით.



ნახაზი 8 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და (4;7;10) რიგის ჰარმონიკული მდგენელების ფაზორული დიაგრამა

მიუხედავად იმისა, რომ თითოეული განხილული ჰარმონიკა ინდივიდუალურად დადებითი მზრუნავი მაგნიტური ველით ხასიათდება, ოთხივე სიხშირის (ფუნდამენტური, მე-4, მე-7 და მე-10 რიგის) ერთობლიობა სისტემისათვის მნიშვნელოვან უარყოფით გავლენას აგენერირებს. მათი ფაზორული ჯამი რადიკალურად ცვლის სინუსოიდალური დიაგრამის საწყის ფორმას, რაც იწვევს ძაბვის მრუდის მკვეთრ დეფორმაციას.

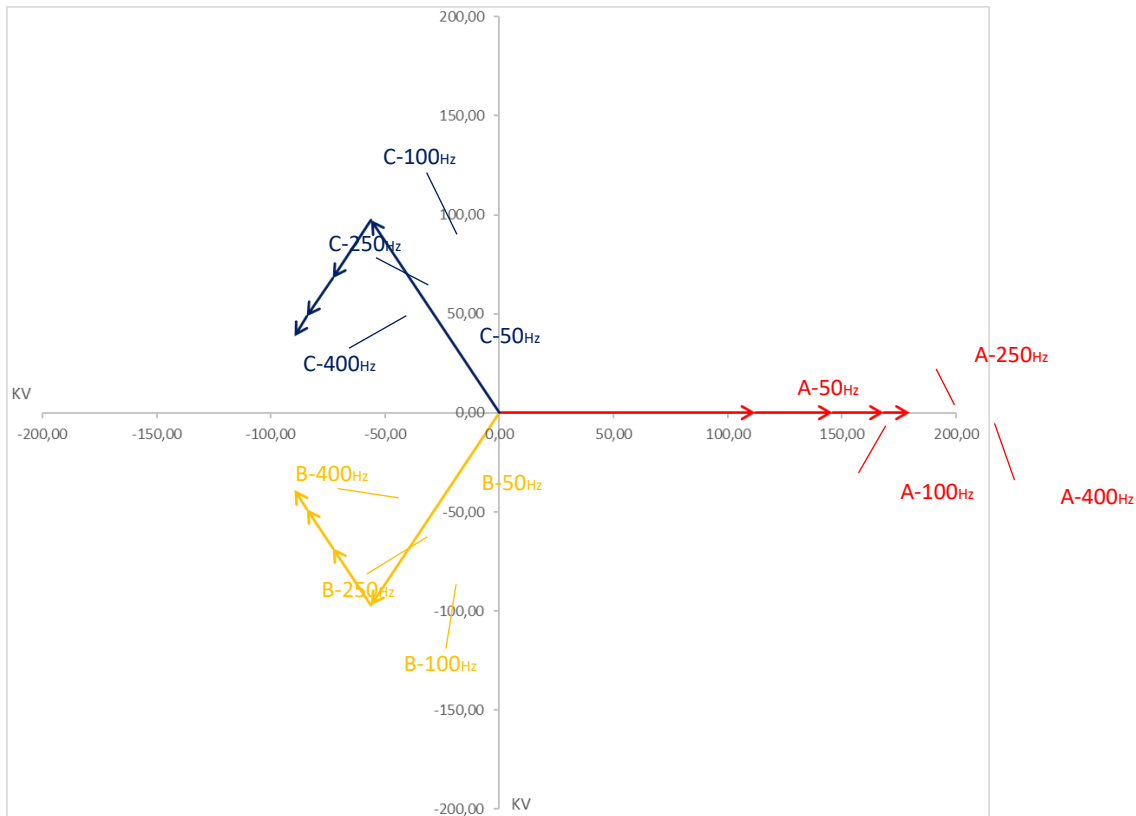
ნახაზ 9-ზე ნათლად არის წარმოდგენილი ფუნდამენტური და $n=3k+1$ კანონზომიერების მქონე ჰარმონიკული მდგენელების (4-ე, 7-ე და 10-ე რიგის) ურთიერთქმედება. გრაფიკზე წითელი წყვეტილი მრუდით გამოსახულია მათი ჯამური მნიშვნელობა, რაც თვალსაჩინოს ხდის, თუ როგორ აკუმულირდება სხვადასხვა სიხშირის მაღალი რიგის ჰარმონიკები და როგორ გარდაქმნიან ისინი იდეალურ სინუსოიდას რთული ფორმის პერიოდულ სიგნალად. აღნიშნული ვიზუალიზაცია ადასტურებს, რომ მაშინაც კი, როდესაც ჰარმონიკები ფაზურად თანხვედრილია (დადებითი მიმდევრობა), მათი ჯამური ზემოქმედება მაინც კრიტიკულად აუარესებს ელექტროენერგიის ხარისხობრივ მაჩვენებლებს.



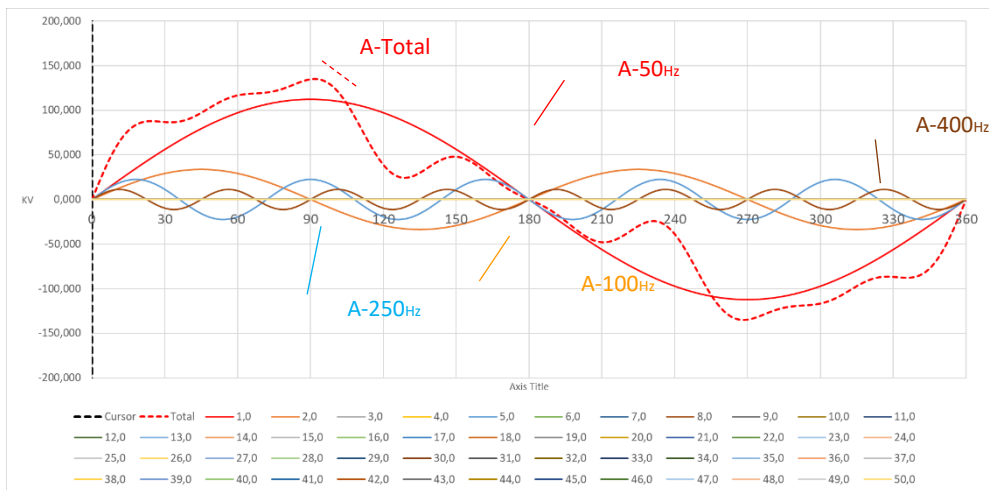
ნახაზი 9 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და (4;7;10) რიგის ჰარმონიკული მდგენელების სინუსოიდალური დიაგრამა

ანალოგიური პრინციპით განხორციელდა კვლევა უკუმიმდევრობის ჯგუფის ჰარმონიკებზე ($n = 2, 5, 8, \dots$). მათემატიკური მოდელირებით დასტურდება, რომ $n = 3k-1$ (სადაც k ნატურალური რიცხვია) რიგის ჰარმონიკები ყოველთვის წარმოადგენენ უკუმიმდევრობის სისტემას. ამ ჯგუფში შემავალი მდგენელებისთვის დამახასიათებელია ფაზების სპეციფიკური განლაგება: B და C ფაზების ფაზორები „ადგილებს უცვლიან“ ერთმანეთს, რაც ნიშნავს, რომ B ფაზა დაძრულია 240° -ით, ხოლო C ფაზა - 120° -ით.

ნახაზ 10-ზე წარმოდგენილია მე-2, მე-5 და მე-8 რიგის ჰარმონიკების ფაზორული დიაგრამები, სადაც ნათლად ჩანს მათი იდენტური ბუნება. მიუხედავად იმისა, რომ თითოეული მათგანი განსხვავებული სიხშირით ხასიათდება, მათი ფაზური ურთიერთგანლაგება უცვლელია და საპირისპიროა ფუნდამენტური მდგენელისა. ენერგოსისტემის თვალსაზრისით, $3k-1$ ფორმულის მქონე ჰარმონიკების ერთობლიობა ქმნის საპირისპიროდ მბრუნავ მაგნიტურ ველს, რაც იწვევს ელექტრული მანქანების დამუხრუჭებას, ვიბრაციას და მნიშვნელოვან ენერგეტიკულ დანაკარგებს. მათი სუპერპოზიციის შედეგად მიღებული ჯამური მრუდი კი, რომელიც ნახაზ 11-ზეა გამოსახული, კიდევ უფრო ამწვავებს ძაბვის სინუსოიდის ასიმეტრიულ დამახინჯებას.



ნახაზი 10 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და (2;5;8) რიგის ჰარმონიკული მდგენელების ვექტორული დიაგრამა

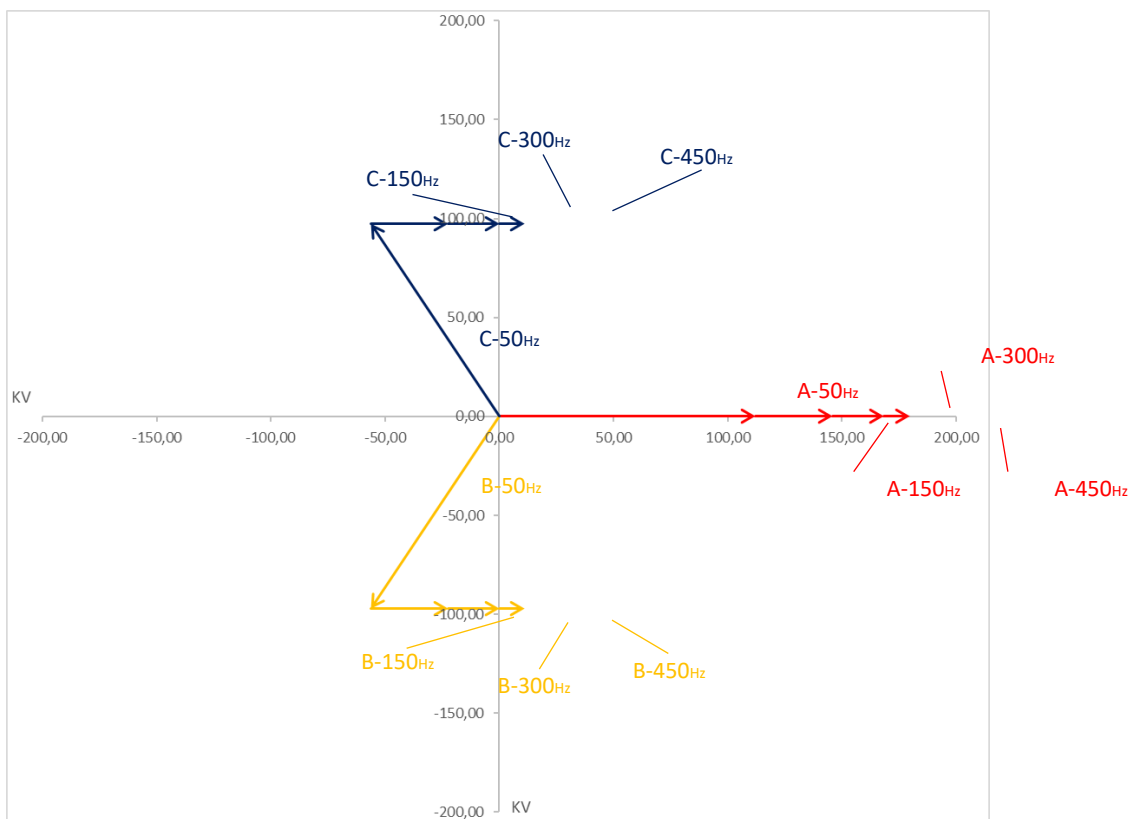


ნახაზი 11 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და (2;5;8) რიგის ჰარმონიკული მდგენელების სინუსოიდალური დიაგრამა

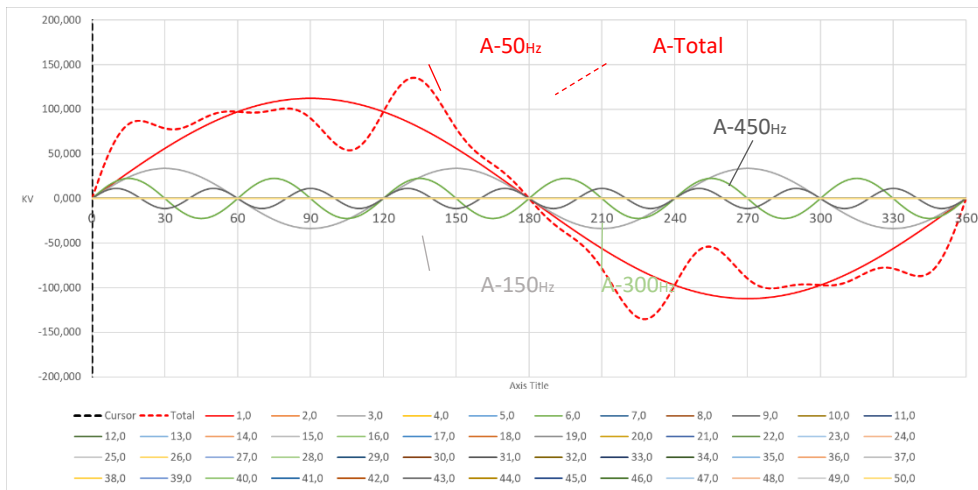
და ბოლოს, რაც შეეხება ნულოვან მიმდევრობებს, აქ კვლევა გადადის ყველაზე სპეციფიკურ ჯგუფზე ($n = 3, 6, 9, \dots$). მათემატიკური ანალიზით დასტურდება, რომ $n = 3k$ (სადაც k ნატურალური რიცხვია) რიგის ჰარმონიკები წარმოადგენენ ნულოვანი

მიმდევრობის სისტემას. ამ ჯგუფის მთავარი მახასიათებელი ისაა, რომ სამივე ფაზის ფაზორი ერთმანეთს ემთხვევა, მათ შორის ფაზური წანაცვლება 0° -ის ტოლია, რაც იმას ნიშნავს, რომ ისინი დროის ნებისმიერ მომენტში ერთი მიმართულებით მოქმედებენ.

ნახაზ 12-ზე წარმოდგენილია მე-3, მე-6 და მე-9 რიგის ჰარმონიკების ფაზორული დიაგრამები, სადაც ნათლად ჩანს მათი სრული ფაზური თანხვედრა. განსხვავებით წინა ჯგუფებისგან, 3k ფორმულის მქონე ჰარმონიკები არ ქმნიან მბრუნავ მაგნიტურ ველს. ნაცვლად ამისა, მათი მყისიერი მნიშვნელობები ალგებრულად იკრიბება ნეიტრალურ სადენში.



ნახაზი 12 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და (3;6;9) რიგის ჰარმონიკული მდგენელების ფაზორული დიაგრამა



ნახაზი 13 - ფუნდამენტური 50 ჰერციანი და (3;6;9) რიგის ჰარმონიკული მდგენელების სინუსოიდალური დიაგრამა

ჩატარებულმა კომპლექსურმა კვლევამ და მიღებული მონაცემების სტატისტიკურმა დამუშავებამ სრულად დაადასტურა ჰარმონიკული რიგების გავრცელების ჭეშმარიტი კანონზომიერება სიმეტრიული მდგენელების სისტემაში. 50-ე რიგის ჩათვლით განხორციელებული დეტალური ანალიზის შედეგები სისტემატიზებულია და მოყვანილია №1 ცხრილში.

აღნიშნულ ცხრილში მკაფიოდ არის წარმოდგენილი თითოეული რიგის ჰარმონიკის შესაბამისი მათემატიკური გამოსახულება და მდგენელის დასახელება (პირდაპირი, უკუ ან ნულოვანი მიმდევრობა). მონაცემთა ამგვარი სტრუქტურირება მკვეთრად ამარტივებს კონკრეტული რიგის ჰარმონიკის მიხედვით შესაბამისი მიმდევრობის სწრაფ იდენტიფიცირებას.

წინამდებარე კლასიფიკაცია წარმოადგენს პრაქტიკულ ინსტრუმენტს ინჟინერ-მკვლევარებისთვის, რათა ოპერატიულად დაისვას სისტემის „დიაგნოზი“, შეფასდეს თითოეული მდგენელის გავლენა ქსელის მუშაობაზე და დროულად იქნას მიღებული საჭირო ზომები ელექტროენერგიის ხარისხის ოპტიმიზაციისა და დანადგარების უსაფრთხო ექსპლუატაციისთვის.

მდგენე ლის დასახე ლება	მათემატიკ ური გამოსახუ ლება	ჰარმონიკის რიგები n																
პირდაპ ირი მიმდევ რობა	n=3k+1	1	4	7	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49
უკუ მიმდევ რობა	n=3k-1	2	5	8	11	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50
ნულოვ ანი მიმდევ რობა	n=3k	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	...

ცხრილი 22 - ჰარმონიკული მდგენელების რიგების კანონზომიერება პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობებისთვის

დასკვნა

ჩატარებული კვლევა ეფუძნება სიმეტრიული მდგენელების ცნობილ თეორიულ პრინციპს, რომლის მიხედვითაც ჰარმონიკული რიგები სამფაზა სისტემაში პირდაპირი, უკუ და ნულოვანი მიმდევრობების მიხედვით ჯგუფდება. ნაშრომის მიზანი არ არის აღნიშნული კანონზომიერების როგორც ახალი თეორიული შედეგის წარმოდგენა; მისი მთავარი ღირებულებაა ამ კანონზომიერების ვიზუალური, მოდელური და საინჟინრო ინტერპრეტაცია ჰარმონიკული მრუდებისა და ფაზორული დიაგრამების ურთიერთკავშირის საფუძველზე.

კვლევის ფარგლებში Microsoft Excel-ის გარემოში განხორციელებული დისკრეტული მოდელირება საშუალებას იძლევა ერთსა და იმავე ჰარმონიკულ მდგენელზე დაკვირვება მოხდეს როგორც დროით არეში, ისე ფაზორულ სიბრტყეში. ამ მიდგომით უფრო თვალსაჩინოდ ჩანს, თუ როგორ იცვლება ფაზათა ურთიერთგანლაგება სხვადასხვა რიგის ჰარმონიკისთვის და როგორ აისახება ეს ძაბვის ან დენის მრუდის ფორმაზე. შესაბამისად, ნაშრომი ცნობილ თეორიულ კანონზომიერებას გარდაქმნის პრაქტიკულად აღსაქმელ ვიზუალურ მოდელად.

მიღებულმა შედეგებმა დაადასტურა, რომ $n=3k+1$ რიგის ჰარმონიკები შეესაბამება პირდაპირ მიმდევრობას, $n=3k-1$ რიგის ჰარმონიკები - უკუ მიმდევრობას, ხოლო $n=3k$ რიგის ჰარმონიკები - ნულოვან მიმდევრობას. თუმცა ნაშრომის ძირითადი აქცენტი გაკეთებულია არა მხოლოდ ამ დაჯგუფებაზე, არამედ იმაზე, თუ როგორ ვლინდება თითოეული ჯგუფის ფიზიკური ეფექტი ფაზორულ დიაგრამებსა და სინუსოიდალურ მრუდებში. ასეთი მიდგომა ამარტივებს ჰარმონიკული დამახინჯებების ბუნების გაგებას და ქმნის სასარგებლო საფუძველს როგორც სასწავლო პროცესისთვის, ისე ელექტროენერგიის ხარისხის ანალიზისთვის.

მიღებული მოდელი შეიძლება განხილულ იქნეს როგორც დამხმარე ანალიტიკური ინსტრუმენტი ელექტროენერგიის ხარისხის კვლევაში. იგი განსაკუთრებით სასარგებლოა იმ შემთხვევებში, როდესაც საჭიროა ჰარმონიკული რიგების არა მხოლოდ რიცხვითი შეფასება, არამედ მათი ფაზური ქცევისა და სისტემაზე შესაძლო ზემოქმედების ახსნა. ამგვარი მიდგომა ხელს უწყობს ჰარმონიკული პროცესების უკეთ ინტერპრეტაციას, პრობლემური მდგენელების იდენტიფიცირებას და შესაბამისი ტექნიკური ღონისძიებების დაგეგმვას.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] Elizarashvili, T., Arziani, G., & Kvatadze, B. (2022). Renewable energy hybrid mini-grid concept for rural electrification in Georgia. In Proceedings of the CIGRE Paris Session 2022 (Paper No. C6-11119_2022).
- [2] Elizarashvili, T., & Arziani, G. (2022). FACTS with energy storage for renewable integration in the Georgian power system. In Proceedings of the CIGRE Paris Session 2022 (Paper No. B4-11120_2022). CIGRE.
- [3] K. Bakič, SEERC CIGRE History: Early Electrification and Empowerment of Region where Current Electricity was Born. Ljubljana, Slovenia: Slovenian Association of Electric Power Engineers CIGRE&CIREN, 2020.
- [4] Arziani, G., Kvatadze, B., Baramidze, L. (2023). Analyzing the Behavior of PI Section and T Section High Voltage Line Models in Harmonic Load Flow. Georgian Scientists, 5(4), 177–187. <https://doi.org/10.52340/gS.2023.05.04.16>
- [5] G. Arziani and T. Elizarashvili, "FACTS for effective DER integration into the

Georgia distribution grids,” Turk J Electr Power Energy Syst., 2025; 5(2), 105-113.

Published online May 5, 2025. <https://doi.org/10.5152/tepes.2025.24036>

[6]. G. Arziani and G. Chkhaidze, “The Impact of the Level of Detail in the Distributed

Parameter Model of a Transmission Line on Its Frequency Characteristics”, GS, vol.

7, no. 2, pp. 493–502, Jun. 2025. <https://doi.org/10.52340/gs.2025.07.02.44>

Complex Analysis and Structural Classification of Harmonic Composition Based on the Interconnection of Harmonic Curves and Vector Diagrams

Giorgi Chkhaidze

Abstract

This paper presents a comprehensive analysis and classification of harmonic distortions—one of the primary challenges in modern power systems—from the perspective of symmetrical components. The fundamental basis of the research is mathematical modeling developed within the Microsoft Excel software environment, where the impact of harmonic components up to the 50th order is investigated using the discrete analysis method (1000 control points per period). The scientific novelty and practical value of the study are defined by an in-depth analysis of the correlation between harmonic curves and phasor diagrams, which enables the dynamic observation of phasor rotation and potential asymmetries.

The conducted research confirms that the impact of harmonic content on the system follows a strict cyclical pattern directly related to their order. The paper provides a detailed discussion on the principles of forming positive, negative, and zero sequences based on mathematical algorithms ($3k + 1$; $3k - 1$; $3k$). The visualization and systematized data presented in this work establish a reliable methodological framework for power quality monitoring, intelligent diagnostics, and the design of effective filtration systems, which are critically essential for the sustainable and reliable operation of the electrical power system.

Keywords: Harmonic components, Symmetrical components, Phasor diagrams, Power quality, Non-linear load, Mathematical modeling.

მეცხრე კლასის ბავშვთა ფიზიკური განვითარების მაჩვენებლების განხილვა

თეიმურაზ ლომსიანიძე¹, რენიკო საკანდელიძე²

¹მედიცინის დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ქუთაისი, საქართველო; ²ბიოლოგიის დოქტორი, პროფესორი. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ქუთაისი, საქართველო

რეზიუმე

ადამიანის ფიზიკური განვითარების მაჩვენებლების ცვლილება გვიჩვენებს ორგანიზმის დინამიურ განვითარებას. კვლევისათვის აღებულია სხეულის სიგრძე, მასა, თავისა და გულმკერდის გარშემოწერილობა. დაკვირვების მიზანია ცვლილებების ანალიზი, რომელიც მოხდა პრაქტიკულად ჯანმრთელ მოსწავლეებში ბოლო ორი წლის განმავლობაში. დაკვირვებას კვლავ ვაწარმოებდით ქუთაისის სამ სკოლაში, უკვე მეცხრე კლასის მოსწავლეებში, იგივე ბავშვებში. ამ დროისათვის გაანალიზებულმა ფიზიკური განვითარების საშუალო მაჩვენებელმა გვიჩვენა:

1 14 და 15 წლის ბავშვთა შორის ფიზიკური განვითარების საშუალოზე მაღალი მაჩვენებლები დაფიქსირდა 39,5% შემთხვევაში(ბიჭები), 36,8% შემთხვევაში(გოგონები). დანარჩენებში კი იყო საშუალო მონაცემები. ან უმნიშვნელოდ ჩამორჩებოდა მათ 7,8% შემთხვევაში(ბიჭები), 9,3% შემთხვევაში(გოგონები)..

2 დინამიკაში შესაბამისი მატება განიცადა ყველა საშუალო მაჩვენებელმა, მოსწავლეთა ამ ჯგუფში, ფიზიკურ განვითარებაში შეფერხება არ აღინიშნება.

საკვანძო სიტყვები: ფიზიკური განვითარება; დინამიკაში; ასაკობრივი კატეგორია; ცვლილებების ანალიზი; პრაქტიკულად ჯანმრთელი

ადამიანის ორგანიზმი მუდმივად იმყოფება გარე სამყაროს ზემოქმედების ქვეშ, რომლის დროსაც განიცდის ცვლილებას ნორმის ფარგლებში. ფიზიკური განვითარების მახასიათებლების ცვლილება, სხვა მრავალ მაჩვენებლებთან ერთად გვიჩვენებს ადამიანის ორგანიზმის დინამიურ განვითარებას. პრაქტიკულად ჯანმრთელ ადამიანთა

ფიზიკური განვითარების მაჩვენებლების აღწერა განსაზღვრავს მონაცემების სისწორეს და სანდოობას. ჩვენ შემთხვევაში აღებულია სიმაღლე(სხეულის სიგრძე), მასა, თავისა და გულმკერდის გარშემოწერილობა.[1,2,3,4,5,6,7,11,12]

მოცემული ნაშრომის მიზანია იმ ცვლილებების ანალიზი, რომელიც მოხდა ორი წლის განმავლობაში. მონაცემების ანალიზი ბოლოს ჩატარებული იყო 2024 წელს. კვლევას დაექვემდებარენ პრაქტიკულად ჯანმრთელი ბავშვები. დაკვირვებას კვლავ ვაწარმოებდით ქუთაისის იმავე სამ სკოლაში, როგორც თავიდან, უკვე მეცხრე კლასის მოსწავლეებში. გამოკვლეული იყო იგივე ბავშვები, რომელთა რაოდენობამ 90-ია: 46 გოგო და 44 ბიჭი. მიღებული საშუალო შედეგები დაჯგუფებული იქნა ცხრილის სახით თითოეული ასაკობრივი კატეგორიისათვის. შედარება მოხდა სხვადასხვა ლიტერატურულ და ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის მონაცემებთან.[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12]

ჩვენს მიერ მიღებული საშუალო შედეგები

ასაკი	სხეულის სიგრძე -სმ		სხეულის მასა-კგ		გულმკერდის გარშემოწერილობა- სმ		თავის გარშემოწერილო ბა- სმ	
	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი
14წელი	162,1	167,7	53,4	61,5	85,7	82,7	52,8	53,5
15წელი	163,1	169,5	56,3	67,8	87,0	83,4	53,1	54,9

ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის საშუალო მონაცემები

ასაკი	სხეულის სიგრძე -სმ		სხეულის მასა-კგ		გულმკერდის გარშემოწერილობა- სმ		თავის გარშემოწერილო ბა- სმ	
	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი
14წელი	161,1	167,8	52,4	60,5	84,9	81,2	52,3	53,4
15წელი	162,1	169,3	54,3	65,7	87,1	81,1	53,2	55,2

სხვადასხვა ლიტერატურული საშუალო მონაცემები

ასაკი	სხეულის სიგრძე -სმ		სხეულის მასა-კგ		გულმკერდის გარშემოწერილობა- სმ		თავის გარშემოწერილობა- სმ	
	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი
14წელი	161,0	167,5	53,4	60,3	85,9	81,4	52,1	53,3
15წელი	162,2	169,1	55,3	64,7	86,2	81,5	53,1	55,0

გამოკვლეულ ბავშვთა ფიზიკური განვითარების საშუალო მაჩვენებლების მატება 2 წლის განმავლობაში ჩვენს მიერ მიღებული შედეგებით

სხეულის სიგრძე-სმ		სხეულის მასა-კგ		გულმკერდის გარშემოწერილობა-სმ		თავის გარშემოწერილობა- სმ	
გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი	გოგო	ბიჭი
9,1	14,1	10,3	11,6	5,0	4,2	1,7	1,8

ამ ეტაპზე ანალიზის შემდეგ მივიღეთ:

1. 14 და 15 წლის ბავშვთა შორის ფიზიკური განვითარების საშუალოზე მაღალი მაჩვენებლები დაფიქსირდა 39,5% შემთხვევაში(ბიჭები), 36,8% შემთხვევაში(გოგონები). დანარჩენებში კი იყო საშუალო მონაცემები. უმნიშვნელოდ ჩამორჩებოდა საშუალოს-7,8% შემთხვევაში(ბიჭები), 9,3% შემთხვევაში(გოგონები).
2. ბოლო ორი წლის განმავლობაში შესაბამისი მატება განიცადა ფიზიკური განვითარების ყველა საშუალო მაჩვენებელმა. შეიძლება დავასკვნათ: მოსწავლეთა ამ ჯგუფში, დინამიკაში შეფერხება არ აღინიშნება.
3. დაკვირვება გრძელდება რათა დავდოთ უფრო სრულყოფილი შედეგები.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. ზარანდია მ.ი. ბავშვის განვითარების კანონზომიერებანი თბ.მეცნიერება 1985წ.- 211გვ.
2. კაციტაძე გ.ზ. აფხაზეთიდან დროებით ადგილნაცვალ ოჯახებში დაბადებულ ახალშობილთა და ადრეული ასაკის ბავშვთა ფიზიკური განვითარების მაჩვენებელი საკანდიდატო დისერტაციის ავტორეფერატი თბილისი 2001 წ.- 27 გვ.
3. ლომსიანიძე თ. . (2022). დაწყებითი კლასების ასაკის ბავშვთა ფიზიკური განვითარების მაჩვენებლებისა და ცხოვრებისეული ანამნეზის კავშირის განხილვა დინამიკაში. ქართველი მეცნიერები, 4(4), 1–7. <https://doi.org/10.52340/gs.2022.04.04.01>
4. თეიმურაზ ლომსიანიძე. (2022). დაწყებითი კლასების ასაკის ბავშვთა ფიზიკური განვითარების მაჩვენებლების განხილვა დინამიკაში. ექსპერიმენტული და კლინიკური მედიცინა, (4), 174–177. <https://doi.org/10.52340/jecm.2022.06.27>
5. შუკაკიძე ა.ქ. რუსთავის სკოლამდელი ასაკის ბავშვთა ფიზიკური განვითარების მაჩვენებლები საკანდიდატო დისერტაციის ავტორეფერატი. თბილისი 1992წ.- 23 გვ.
6. Alfredo R. Tinajero and Anaïs Loizillon -The Review of Care, Education and Child Development Indicators in Early Childhood -Desk review prepared for UNESCO on existing indices and indicators-2012
7. Butenko H. ,Goncharova N.,Salenko V., Tolchieva H.,-Physical condition of primary school children in school year dynamics-Journal of Physical Education and Sport 2017(2):543 - 549
8. Баранов А. А. Состояние здоровья современных детей и подростков и роль медико-социальных факторов в его формировании Вестн. РАМН. – 2009. – №5. – С. 6–11.
9. Беляков В.А. Физическое развитие детей школьного возраста, проживающих в Кирове, за 10-летний период Вісник ЛНУ імені Тараса Шевченка. – 2012. – №8 (243). – С. 11.
10. Дегтярев И.П. Физическое развитие. Киев 2005 – ст.23-48
11. Лаптев А. Управление физическим развитием. – Москва. 2003 - 180ст
12. . Щуров В.А., Могеладзе Н.О., Горбачёва Л.Ю. Децелерация роста тела детей как форма адаптации к изменившимся социально-экономическим условиям жизни Фундаментальные исследования. – 2011. – № 9

Physical Development Indicators discussion among the Ninth Grade Children

Teimuraz Lomsianidze¹; Reniko Sakandelidze²

¹Doctor of Medicine, Associate Professor, Akaki Tsereteli State University, Kutaisi, Georgia

²Doctor of Biology, Professor; Akaki Tsereteli State University, Kutaisi, Georgia

Summary

The change in the indicators of human physical development shows the dynamic development of the organism. The body length, mass, head and chest circumference were taken for the study. The purpose of the observation is to analyze the changes that have occurred in practically healthy students over the past two years. We conducted the observation again in three schools in Kutaisi, already among the ninth grade students, the same children. The average indicators of physical development analyzed at this time showed us:

1. Among 14 and 15-year-old children, above-average indicators of physical development were observed in 39.5% of cases (boys), 36.8% of cases (girls). The rest had average data. Or they were slightly behind them in 7.8% of cases (boys), 9.3% of cases (girls)..
2. All average indicators experienced a corresponding increase in dynamics, in this group of students, there is no delay in physical development.

p-AMPK და TGF- β 1 სასიგნალო გზების როლი სამმაგი ინკრეტინული აგონისტებით მიოკარდიუმის ფიბროზის რეგრესში

ტატო ზუმბაძე^{1*}, მაია ოკუჯავა², მანანა ღონღაძე³

¹სამედიცინო ფარმაცოლოგიის დეპარტამენტის მოწვეული მასწავლებელი, თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო. ტელ: +995 593 278 044. ელფოსტა: t.zumbadze@tsmu.edu <https://orcid.org/0009-0003-5706-1541> (მთავარი მკვლევარი); ²მედიცინის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი. სამედიცინო ფარმაცოლოგიის დეპარტამენტის ხელმძღვანელი, თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო. ტელ: +995 599 169 395. ელფოსტა: m.okujava@tsmu.edu <https://orcid.org/0009-0005-4083-0812>; ³მედიცინის აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი. სამედიცინო ფარმაცოლოგიის დეპარტამენტი, თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო. ტელ: +995 599 041 513. ელფოსტა: m.ghonghadze@tsmu.edu <https://orcid.org/0000-0002-6224-6458>

რეზიუმე

შესავალი და აქტუალობა: გულის უკმარისობა შენარჩუნებული განდევნის ფრაქციით (HFpEF) თანამედროვე კლინიკური მედიცინის ერთ-ერთი ყველაზე რთული და მზარდი გამოწვევაა. დაავადების ფუნდამენტურ პათოფიზიოლოგიურ საფუძველს მიოკარდიუმის პროგრესირებადი ინტერსტიციული ფიბროზი, უჯრედგარე მატრიქსის დეფორმაცია და პარკუჭების კედლის გახისტება წარმოადგენს. ვინაიდან HFpEF მჭიდროდ არის დაკავშირებული სისტემურ კარდიომეტაბოლურ დარღვევებთან (ვისცერული სიმსუქნე, ინსულინრეზისტენტობა, მეტაბოლური დისფუნქციით გამოწვეული სტეატოჰეპატიტი — MASH), ტრადიციული ნეიროჰუმორული კარდიოტროპული მკურნალობა მის წინააღმდეგ არაეფექტურია. წინამდებარე მიმოხილვის მიზანია ახალი თაობის სამმაგი ინკრეტინული აგონისტის (GLP-1/GIP/GCGR რეცეპტორების მულტი-აგონისტი — რეტატრუტიდი) მოქმედების მოლეკულური მექანიზმების დეტალური გაანალიზება, კერძოდ, უჯრედული დამცავი ფერმენტის — p-AMPK-ის გააქტიურებისა და პროფიბროზული TGF- β 1 კასკადის დათრგუნვის ჭრილში.

მეთოდები: განხორციელდა ბოლო წლებში PubMed, Nature, Circulation და The Lancet ბაზებში გამოქვეყნებული 10 წამყვანი საერთაშორისო კლინიკურამდელი, მოლეკულური და ფარმაცოლოგიური კვლევის სისტემური ანალიზი, შედარებითი ექსპოზიცია და მონაცემთა მიზნობრივი სინთეზი.

შედეგები და დასკვნა: ლიტერატურული მონაცემების კომპლექსური ანალიზი ადასტურებს, რომ სამმაგი რეცეპტორული აგონიზმი მკვეთრად აძლიერებს უჯრედშიდა cAMP/PKA სასიგნალო გზებს, რაც უზრუნველყოფს მეტაბოლური სენსორის — AMPK-ის ეფექტურ ფოსფორილირებას თრეონინ-172 ნაშთზე (p-AMPK). გააქტიურებული p-AMPK პირდაპირ თრგუნავს პროფიბროზული TGF- β 1/Smad3 სასიგნალო გზის კომპონენტებს, ბლოკავს ცილების ბირთვულ ტრანსლოკაციას და სრულად აჩერებს კოლაგენის ჭარბ სინთეზს. ნაშრომი ბიოლოგიურად ასაბუთებს სამმაგი აგონისტების უნიკალურ პოტენციალს არა მხოლოდ ფიბროზის პრევენციის, არამედ უკვე ფორმირებული სტრუქტურული ცვლილებების თერაპიული რეგრესის თვალსაზრისით.

საკვანძო სიტყვები: რეტატრუტიდი, HFpEF, p-AMPK, TGF- β 1, მიოკარდიუმის ფიბროზი, სამმაგი აგონისტი.

1. შესავალი და საკვლევი პრობლემის აქტუალობა

გულის უკმარისობა შენარჩუნებული განდევნის ფრაქციით (HFpEF) წარმოადგენს გლობალური ჯანდაცვის მზარდ კლინიკურ პანდემიას, რომლის ხვედრითი წილი გულის უკმარისობის საერთო სტრუქტურაში უკვე 50%-ს აჭარბებს [1]. კლასიკური სისტოლური უკმარისობისგან (HFrEF) განსხვავებით, სადაც წამყვანია მიოკარდიუმის კუმშვადობის დეფექტი, HFpEF ხასიათდება პარკუჭების გახისტებით, მიოკარდიუმის დიასტოლური რელაქსაციის მძიმე დარღვევით და შევსების წნევის პათოლოგიური მატებით [2]. კლინიკური დილემა მდგომარეობს იმაში, რომ ტრადიციული ნეიროჰუმორული კარდიოტროპული მკურნალობა (აფ-ინჰიბიტორები, ანგიოტენზინის რეცეპტორების ბლოკერები და ბეტა-ადრენოგლოკერები) არაეფექტურია HFpEF პოპულაციაში სიკვდილიანობის შემცირებისა თუ სტრუქტურული რემოდელირების უკუქცევის თვალსაზრისით, რაც მიუთითებს სრულიად განსხვავებული პათოფიზიოლოგიური მექანიზმების არსებობაზე [3].

თანამედროვე პათოფიზიოლოგიური პარადიგმით, HFpEF აღარ განიხილება, როგორც იზოლირებული კარდიოლოგიური პათოლოგია. შემთხვევათა აბსოლუტურ უმრავლესობაში ის წარმოადგენს სისტემურ კარდიომეტაბოლურ დაავადებას, სადაც წამყვან როლს თამაშობს ვისცერული სიმსუქნე, ინსულინრეზისტენტობა, ათეროგენული დისლიპიდემია და მეტაბოლური დისფუნქციით გამოწვეული სტეატოჰეპატიტი [4]. ჩამოყალიბებული გულ-ღვიძლის ღერძი ნათლად მიუთითებს,

რომ ღვიძლის ლიპოტოქსიკურობა და ცხიმოვანი ქსოვილის ქრონიკული ჰიპერტროფია მუდმივად გამოყოფს სისტემურ მიმოქცევაში პროანთებად ციტოკინებს, როგორიცაა სიმსივნის ნეკროზის ფაქტორი-ალფა (TNF- α) და ინტერლეიკინი-6 (IL-6) [5]. ეს მედიატორები სისხლის ნაკადის მეშვეობით აღწევენ მიოკარდიუმის მიკროცირკულაციურ კალაპოტს, იწვევენ ენდოთელიოციტების ქრონიკულ სტრესს და ასტიმულირებენ ინტერსტიციული მოფიბრობლასტების აქტივაციას. შედეგად, იწყება ექსტრაცელულარული მატრიქსის მასიური, დეორგანიზებული გადაგვარება — პროგრესირებადი ინტერსტიციული ფიბროზი, რაც გულის კედლის ფიზიკური გახისტიებისა და ფენოტიპური ცვლილებების მთავარი მიზეზია [6].

აქედან გამომდინარე, ახალი თერაპიული სამიზნეების ძიება მიმართულია ისეთი მულტიმოდური მოლეკულებისკენ, რომელთაც შესწევთ ძალა ერთდროულად მართონ როგორც სისტემური ნივთიერებათა ცვლა და ლიპიდური ჰომეოსტაზი, ისე მიოკარდიუმის შიდა მოლეკულური და უჯრედული არქიტექტურა. ამ კონტექსტში, უდიდეს სამეცნიერო ინტერესს იწვევს ახალი თაობის ინოვაციური სამმაგი რეცეპტორული აგონისტი — რეტატრუტიდი, რომლის მოქმედების უჯრედული კასკადების გაშიფვრა წინამდებარე მიმოხილვის მთავარ მიზანს წარმოადგენს [2].

2. რეტატრუტიდის ფარმაკოლოგიური სამიზნეები და სასიგნალო გზები

2.1. მულტი-ინკრეტინული სინერგიზმი და რეტატრუტიდის მოლეკულური პროფილი

რეტატრუტიდი (LY3437943) არის ინოვაციური სინთეზური პეპტიდი, რომელიც ხასიათდება სამმაგი რეცეპტორული აგონიზმით [2]. სტრუქტურულად ის წარმოადგენს მოდიფიცირებულ გლუკაგონის ჯაჭვს, რომელიც შეიცავს ცხიმოვანი მჟავის გვერდით აცილურ რადიკალს. ეს სტრუქტურული მოდიფიკაცია უზრუნველყოფს პლაზმის ალბუმინთან მყარ, შექცევად შეკავშირებას და იცავს მოლეკულას დიპეპტიდილ პეპტიდაზა-4 (DPP-4) ფერმენტული დეგრადაციისგან, რაც მნიშვნელოვნად ახანგრძლივებს პრეპარატის ნახევარგამოყოფის პერიოდს და იძლევა კვირაში ერთხელ გამოყენების საშუალებას [7].

პრეპარატი ერთდროულად და მაღალი სინერგიზმით ასტიმულირებს სამ ფუნდამენტურ მეტაბოლურ რეცეპტორს [2]:

- **GLP-1 (Glucagon-like peptide-1) რეცეპტორი:** აძლიერებს გლუკოზადამოკიდებულ ინსულინის სეკრეციას პანკრეასის ბეტა-უჯრედებიდან, თრგუნავს პოსტპრანდიალურ გლუკაგონის გამოყოფას, ანელებს კუჭის დაცლას და მოქმედებს ჰიპოთალამუსის ცენტრებზე, რაც იწვევს მადის ძლიერ სუპრესიას.

- **GIP (Glucose-dependent insulintropic polypeptide) რეცეპტორი:** ახდენს თეთრი ცხიმოვანი ქსოვილის მეტაბოლური აქტივობის მოდულაციას, ზრდის ლიპიდების ბუფერულ ტევადობას, აუმჯობესებს პერიფერიულ ინსულინმგრძნობელობას და მნიშვნელოვნად ამცირებს სისტემური ანთების ინტენსივობას.

- **გლუკაგონის რეცეპტორი (GCGR):** მოცემული კომპონენტი წარმოადგენს რეტატრუტიდის უმთავრეს კარდიომეტაბოლურ უპირატესობას. GCGR-ის გააქტიურება მკვეთრად ზრდის ორგანიზმის საერთო ენერგოხარჯვას ბაზალური მეტაბოლიზმის სტიმულაციის გზით და პირდაპირ პოტენცირებს ჰეპატოციტების მიტოქონდრიულ ლიპიდურ β -ჟანგვას. ეს იწვევს ღვიძლში დაგროვილი ტრიგლიცერიდების სწრაფ უტილიზაციას, სტეატოზისა და ანთების რევერსიას, რაც საბოლოო ჯამში წყვეტს გულ-ღვიძლის ღერძის მეშვეობით პროანთებადი ციტოკინების გენერაციას [7].

2.2. უჯრედული მეტაბოლური სენსორის — AMPK-ის ფოსფორილირების მექანიზმები

მიოკარდიუმის უჯრედების (კარდიომიოციტებისა და ინტერსტიციული ფიბრობლასტების) დონეზე, რეტატრუტიდის მიერ სამივე ტიპის რეცეპტორის სტიმულაცია, რომლებიც მიეკუთვნებიან GPCR (G-პროტეინთან შეუღლებულ რეცეპტორთა) ოჯახს, იწვევს მემბრანული ფერმენტის — ადენილატიკლაზას გააქტიურებას G_s სუბერთეულის მეშვეობით [8]. ადენილატიკლაზა ახდენს უჯრედშიდა ადენოზინტრიფოსფატის (ATP) კონვერტაციას ციკლურ ადენოზინმონოფოსფატად (cAMP). cAMP-ის კონცენტრაციის მკვეთრი მატება ციტოპლაზმაში იწვევს მეორადი კინაზის — პროტეინკინაზა A-ს (PKA) ალოსტერიულ აქტივაციას რეგულატორული სუბერთეულების მოცილების გზით [8].

აქტიური PKA ახდენს უჯრედშიდა ზემდგომი მასტერ-კინაზის — LKB1-ის (Liver Kinase B1) სპეციფიკურ ფოსფორილირებას [8]. გააქტიურებული LKB1 ციტოპლაზმურ სივრცეში უკავშირდება მეტაბოლური სენსორის — AMPK-ის (AMP-activated protein kinase) კატალიზურ α -სუბერთეულს და ახდენს მის მაღალეფექტურ ფოსფორილირებას **თრეონინ-172 ნაშთზე (Thr172)** [8, 9]. ფოსფორილირების ამ მოლეკულური კასკადის შედეგად ფერმენტი გადადის თავის ფუნქციურად აქტიურ მდგომარეობაში — მიიღება **p-AMPK** [9].

პარალელურად, გლუკაგონის რეცეპტორის სტიმულაციით გამოწვეული მიტოქონდრიული ენერგეტიკული გადაწყობა დროებით ცვლის უჯრედშიდა AMP/ATP ფარდობას. თავისუფალი AMP-ის მოლეკულები პირდაპირ უკავშირდებიან AMPK-ის მარეგულირებელ γ -სუბერთეულს [9]. ეს კავშირი იწვევს კონფორმაციულ ცვლილებას, რაც იცავს გააქტიურებულ p-AMPK-ს სპეციფიკური ფოსფატაზების მიერ დეფოსფორილირებისგან (დაშლისგან). შედეგად, უზრუნველყოფილია დამცავი

ფერმენტის აქტიური მდგომარეობის ხანგრძლივი, მყარი შენარჩუნება ქრონიკული მეტაბოლური სტრესის პირობებშიც კი [8, 9].

2.3. პროფიბროზული TGF- β 1/Smad3 კასკადის ბლოკადა p-AMPK-ის მიერ

ქრონიკული კარდიომეტაბოლური ანთების პირობებში, მიოკარდიუმის ინტერსტიციულ სივრცეში მკვეთრად აქტიურდება TGF- β 1 (Transforming Growth Factor beta 1) — ქსოვილოვანი ფიბროზისა და რემოდელირების მთავარი მოლეკულური არქიტექტორი [6]. ენდოთელური სტრესის საპასუხოდ გამოყოფილი TGF- β 1 უკავშირდება ფიბრობლასტების ზედაპირზე არსებულ ტრანსმემბრანულ სერინ/თრეონინ კინაზურ რეცეპტორებს (TGF- β -R1/2) [10]. რეცეპტორული კომპლექსის აწყობა იწვევს ციტოპლაზმური მესენჯერული ცილების — Smad2 და Smad3 ფოსფორილირებას. გააქტიურებული Smad2/3 ციტოპლაზმაში უკავშირდება სპეციფიკურ მედიატორულ ცილა Smad4-ს [6, 10]. მიღებული ჰეტეროოლიგომერული კონგლომერატი ახდენს ტრანსლოკაციას უჯრედის ბირთვში (Nucleus), სადაც უკავშირდება პროფიბროზული გენების პრომოტორულ უბნებს და იწყებს I და III ტიპის კოლაგენის, ფიბრონექტინისა და მატრიქსული ცილების მასიურ, პათოლოგიურ ექსპრესიას [6].

რეტატრუტიდის მიერ ინდუცირებული p-AMPK ამ დესტრუქციულ პროფიბროზული კასკადს ბლოკავს სამ კრიტიკულ, დამოუკიდებელ დონეზე [9, 10]:

1. **Smad3 ცილის პირდაპირი ინჰიბირება:** გააქტიურებული p-AMPK თავად მოქმედებს როგორც კინაზა, მიდის Smad3 მოლეკულასთან და ახდენს მის ფოსფორილირებას სპეციფიკურ C-ტერმინალურ დომენში. ეს ფოსფორილირება იწვევს მოლეკულის სივრცით დეფორმაციას, რის გამოც Smad3 ვეღარ ახერხებს Smad4 ცილასთან დაკავშირებას და ფუნქციური კომპლექსის ფორმირება შეჩერებულია [10].

2. **ბირთვული ტრანსლოკაციის ბლოკადა:** ვინაიდან Smad2/3-Smad4 ცილოვანი კონგლომერატის აწყობა სრულად ბლოკირებულია p-AMPK-ის მიერ, თავისუფალი მესენჯერები ვეღარ ახერხებენ ციტოპლაზმური სივრციდან ბირთვის მემბრანის ფორების გავლას. შესაბამისად, ბირთვში არსებული გენეტიკური აპარატი სრულად წყვეტს კოლაგენის პროდუქციის სიგნალის მიღებას [6, 10].

3. **mTORC1 სასიგნალო გზის სუპრესია:** p-AMPK ძლიერად თრგუნავს mTORC1 (mammalian target of rapamycin complex 1) კომპლექსს TSC2 ცილის ფოსფორილირების გზით. mTORC1-ის ჩახშობა მომენტალურად აქვეითებს მიოფიბრობლასტების საერთო ცილოვან-სინთეზურ აქტივობას და თრგუნავს კარდიომიოციტების პათოლოგიურ ჰიპერტროფიას [9].

ამ სამმაგი მოლეკულური ბლოკადის შედეგად, ექსტრაცელულარულ მატრიქსში წყდება ახალი კოლაგენური ბოჭკოების ჩალაგება. პარალელურად, მიოკარდიუმის ენდოგენური ფერმენტები — მატრიქსული მეტალოპროტეინაზები (MMP-1, MMP-9) თავისუფლდებიან მათი ქრონიკული ინჰიბიტორების ზეწოლისგან და იწყებენ უკვე არსებული, ძველი კოლაგენური ნაწიბურების ნელ-ნელა დაშლას, ფრაგმენტაციასა და გაწოვას [6]. ეს უზრუნველყოფს ქსოვილის სტრუქტურულ რეგრესს, მიოკარდიუმის დიასტოლური ელასტიურობის აღდგენასა და HFpEF ფენოტიპის უკუქცევას.

3. დასკვნა და პერსპექტივები

თანამედროვე საერთაშორისო ლიტერატურული და კლინიკურამდელი მონაცემების კომპლექსური ანალიზი ნათლად გვიჩვენებს, რომ ახალი თაობის სამმაგი რეცეპტორული აგონისტები ხსნიან სრულიად ახალ ერას კარდიომეტაბოლურ მედიცინაში. ტრადიციული ერთკომპონენტიანი პრეპარატებისგან განსხვავებით, რეტატრუტიდში გლუკაგონის რეცეპტორის (GCGR) ინტეგრირება უზრუნველყოფს გულ-ღვიძლის პათოფიზიოლოგიური ღერძის ეფექტურ გათიშვას ღვიძლის ლიპოტოქსიკურობისა და ცხიმოვანი ანთების მოხსნის გზით.

მოლეკულურ დონეზე, პრეპარატის უმთავრესი თერაპიული ღირებულება მდგომარეობს იმაში, რომ უჯრედშიდა cAMP/PKA კასკადის გააქტიურებით ის იწვევს მიოკარდიუმის ქსოვილოვანი დამცავი სენსორის — AMPK-ის მყარ, ხანგრძლივ ფოსფორილირებას თრეონინ-172 ნაშთზე (p-AMPK). მიღებული p-AMPK მოქმედებს როგორც ფუნდამენტური ფარმაკოლოგიური ფარი პროფიბროზული TGF- β 1/Smad3 სასიგნალო გზის წინააღმდეგ, რაც ბლოკავს პათოლოგიური კოლაგენის სინთეზს უჯრედის ბირთვის გენეტიკურ დონეზე. მოცემული მექანიზმების ვალიდურობა ადასტურებს, რომ რეტატრუტიდს გააჩნია უნიკალური პოტენციალი არა მხოლოდ შეაჩეროს კარდიომეტაბოლური დაზიანებები, არამედ გამოიწვიოს უკვე ფორმირებული ინტერსტიციული ფიბროზისა და ჰიპერტროფიის ქსოვილოვანი რეგრესი, რაც სამომავლო ექსპერიმენტული კვლევების წარმოების უმთავრეს პერსპექტიულ მიმართულებას წარმოადგენს.

4. ბიბლიოგრაფია / References

1. Schiattarella, G. G., et al. (2019). *Nitrosative-acetyllative stress drives heart failure with preserved ejection fraction*. *Nature*, 568(7752), 351–356.
2. Knop, F. K., et al. (2024). *The emerging role of triple incretin receptor agonists in cardiometabolic diseases*. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 12(3), 195–207.
3. Tong, D., et al. (2021). *Dietary and Pharmacological Models of HFpEF: A Scientific Statement From the American Heart Association*. *Circulation: Heart Failure*, 14(8), e000088.
4. Muller, T. D., et al. (2022). *The evolution of co-agonists for the treatment of metabolic diseases*. *Nature Reviews Drug Discovery*, 21(3), 201–224.
5. Zinman, B., et al. (2023). *Cardiometabolic pathways and the heart-liver axis in heart failure*. *European Heart Journal*, 44(18), 1621–1633.
6. Zhang, Y., et al. (2025). *TGF- β 1/Smad3 signaling pathway in cardiac remodeling: Molecular mechanisms and pharmacological interventions*. *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, 188, 45–59.
7. Coskun, T., et al. (2022). *LY3437943, a novel triple glucagon, GIP, and GLP-1 receptor agonist for efficacious treatment of obesity and T2D*. *Cell Metabolism*, 34(9), 1234–1247.
8. Janiak, P., et al. (2023). *AMPK activation as a therapeutic strategy for myocardial fibrosis in metabolic syndrome*. *Cardiovascular Research*, 119(4), 912–925.
9. Hardie, D. G., et al. (2022). *AMPK: An energy-sensing kinase with key roles in cardiovascular physiology*. *Circulation Research*, 130(7), 1011–1028.
10. Dobaczewski, M., et al. (2021). *The role of TGF- β signaling in myocardial infarction and cardiac fibrosis*. *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, 151, 56–67.

Therapeutic Regression of Myocardial Fibrosis by Retatrutide via p-AMPK/TGF- β 1 Signaling Pathways

Abstract

Introduction and Relevance: Heart failure with preserved ejection fraction (HFpEF) represents one of the most complex and burgeoning clinical challenges in modern medicine. Progressive myocardial interstitial fibrosis, extracellular matrix disorganization, and ventricular wall stiffening constitute the primary pathophysiological foundation of the disease. Since HFpEF is tightly linked to systemic cardiometabolic disorders (visceral obesity, insulin resistance, metabolic dysfunction-associated steatohepatitis — MASH), traditional neurohumoral cardiotropic therapy remains entirely ineffective against it. The purpose of this review is to evaluate the precise molecular mechanisms of action of a novel triple incretin receptor agonist (a multi-agonist of GLP-1/GIP/GCGR receptors — Retatrutide), specifically through the prism of activating the intracellular protective enzyme — p-AMPK and suppressing the profibrotic TGF- β 1 cascade.

Methods: A systematic analysis, comparative evaluation, and data synthesis of 10 high-impact international preclinical, molecular, and pharmacological studies published recently in PubMed, Nature, Circulation, and The Lancet databases was conducted.

Results and Conclusion: Comprehensive analysis of literature data confirms that triple receptor agonism robustly potentiates intracellular cAMP/PKA signaling, ensuring effective phosphorylation of the cellular metabolic sensor — AMPK at the threonine-172 residue (p-AMPK). Activated p-AMPK directly suppresses components of the profibrotic TGF- β 1/Smad3 signaling pathway, blocking the nuclear translocation of messenger proteins and fully halting excessive collagen synthesis. This paper biologically substantiates the unique potential of triple agonists not only for the prevention of fibrosis but also for the therapeutic reversal (regression) of already established structural scar configurations.

English Keywords: Retatrutide, HFpEF, p-AMPK, TGF- β 1, myocardial fibrosis, triple agonist.

Cancer Care Inequalities in Low- and Middle-Income Countries: Oncology, Palliative Care, and Public Health Perspectives

Tamriko Bulia¹, Lela Inaishvili¹, Diana Zhamerashvili², Vera Markhulia³, Ioseb Abesadze³ Tina Beruchashvili¹

¹School of Health Sciences the University of Georgia; ²Aversi Clinic; ³Tbilisi State Medical University;

Abstract

Cancer care inequalities remain a major global public health challenge, particularly in low- and middle-income countries (LMICs), where increasing cancer incidence and mortality intersect with limited healthcare resources, delayed diagnosis, workforce shortages, restricted access to treatment, and insufficient palliative care services. Despite advances in oncology, substantial disparities persist in cancer prevention, screening, diagnostics, treatment availability, and survivorship outcomes between high-income and resource-limited settings. Public health systems in LMICs often face challenges related to financing, infrastructure, geographic inequities, and shortages of trained oncology and palliative care professionals. Furthermore, sociocultural, gender-related, and economic barriers contribute to delayed care-seeking and poor outcomes. This narrative review examines major inequalities in global cancer care, with a particular focus on oncology and palliative care delivery in LMICs. The review discusses disparities in cancer epidemiology, access to diagnostics and treatment, workforce capacity, financial toxicity, palliative care integration, and health policy challenges. Potential strategies for reducing inequalities, including multidisciplinary care models, universal health coverage, early palliative care integration, workforce development, and international collaboration, are also explored. Addressing cancer care inequalities requires coordinated public health, clinical, and policy interventions aimed at improving equitable access to comprehensive cancer care worldwide.

Keywords: *cancer care inequalities, oncology, palliative care, public health, LMICs, global oncology, health disparities*

Introduction

Cancer represents one of the leading causes of morbidity and mortality worldwide and is increasingly recognized as a major global public health challenge. According to the International Agency for Research on Cancer (IARC), approximately 20 million new cancer cases and 9.7 million cancer-related deaths occurred globally in 2022 (Bray et al., 2024). Although advances in cancer prevention, diagnostics, targeted therapies, immunotherapy, and supportive care have improved survival in many high-income countries, substantial disparities remain between countries with differing socioeconomic resources.

Low- and middle-income countries (LMICs) carry a disproportionate burden of cancer mortality despite often having lower incidence rates compared with high-income countries (Sung et al., 2021). Limited healthcare infrastructure, insufficient access to early detection programs, delayed diagnosis, inadequate treatment availability, financial barriers, and shortages of trained healthcare professionals contribute to poor outcomes in resource-limited settings (Knaul et al., 2018). In many LMICs, patients present with advanced-stage disease due to restricted access to screening and diagnostic services, resulting in lower survival rates and increased symptom burden.

In addition to inequalities in oncology treatment access, palliative care disparities remain a critical public health issue. The World Health Organization (WHO) estimates that millions of patients worldwide experience serious health-related suffering without access to adequate palliative care services or opioid analgesics (Connor & Sepulveda Bermedo, 2014). Palliative care services in many LMICs remain underdeveloped due to limited funding, insufficient workforce capacity, regulatory barriers, and a lack of integration into national cancer control strategies.

Cancer care inequalities are influenced not only by economic limitations but also by geographic, gender-related, sociocultural, and political factors. Rural populations frequently experience poorer access to oncology services compared with urban populations, while women and socially vulnerable groups may face additional barriers to timely diagnosis and treatment (Ginsburg et al., 2023). Public health approaches aimed at strengthening health systems, expanding universal health coverage, improving workforce training, and integrating multidisciplinary cancer care are increasingly recognized as essential components of equitable oncology care.

This narrative review explores major inequalities in oncology and palliative care in LMICs from clinical and public health perspectives. The review discusses disparities in cancer epidemiology, diagnostics, treatment access, workforce capacity, palliative care integration, financial toxicity, and policy challenges, and highlights potential strategies to improve global cancer care equity.

Global Cancer Burden and Epidemiological Disparities

The global cancer burden continues to rise due to population aging, urbanization, lifestyle changes, tobacco use, obesity, environmental exposures, and infectious risk factors (Bray et al.,

2024). While high-income countries often report higher cancer incidence rates due to longer life expectancy and broader screening coverage, mortality rates remain disproportionately high in LMICs because of delayed diagnosis and limited treatment access.

According to GLOBOCAN 2022 estimates, breast, lung, colorectal, prostate, and stomach cancers remain among the most common malignancies globally (Bray et al., 2024). However, substantial geographic differences exist in both incidence and mortality patterns. For example, cervical cancer remains highly prevalent in many LMICs due to inadequate human papillomavirus (HPV) vaccination and screening programs, while tobacco-related cancers continue to pose significant challenges in Eastern Europe and parts of Asia.

Late-stage presentation is one of the most important contributors to poor cancer outcomes in LMICs. Delayed diagnosis frequently results from limited awareness, sociocultural stigma, lack of screening infrastructure, insufficient pathology services, and restricted access to imaging technologies (Knaul et al., 2018). Consequently, many patients are diagnosed at advanced stages when curative treatment is no longer feasible.

Furthermore, mortality surveillance systems may underestimate the true cancer burden in resource-limited settings. Incomplete death registration systems, diagnostic uncertainty, and inaccurate death certification contribute to underreporting of cancer mortality and increased classification of deaths under ill-defined or unknown causes (Brooks & Reed, 2017). These challenges complicate public health planning and resource allocation.

Barriers to Cancer Diagnosis and Treatment

Delayed Diagnosis and Screening Inequalities

Early detection plays a critical role in improving cancer outcomes. However, many LMICs lack organized national screening programs for common cancers such as breast, cervical, and colorectal cancer. Even where screening programs exist, participation rates may remain low because of financial barriers, geographic inequalities, low health literacy, and limited public awareness.

Patients living in rural and underserved areas often experience substantial delays in accessing diagnostic services. Pathology and imaging services may be centralized in urban centers, requiring patients to travel long distances for evaluation and treatment. Such delays can contribute to disease progression and poorer survival outcomes.

In addition, sociocultural stigma and fear associated with cancer diagnoses may discourage individuals from seeking timely medical care. Women in some regions may face additional barriers stemming from gender inequality, caregiving responsibilities, or limited decision-making autonomy (Ginsburg et al., 2023).

Treatment Access and Resource Limitations

Cancer treatment inequalities are particularly evident in access to surgery, radiotherapy, systemic therapy, and targeted therapies. Many LMICs face shortages of oncology centers, radiotherapy facilities, chemotherapy agents, and trained oncology professionals (Sullivan et al., 2015).

Radiotherapy availability remains especially limited in many low-resource settings. The Lancet Oncology Commission reported substantial deficits in radiotherapy infrastructure across LMICs, with some countries lacking even a single radiotherapy machine (Atun et al., 2015). Consequently, many patients are unable to receive potentially curative or symptom-relieving treatment.

Access to modern systemic therapies, including targeted therapies and immunotherapy, is often restricted by high costs and reimbursement limitations. Even essential chemotherapy drugs may be intermittently unavailable due to supply chain disruptions and financial constraints.

Workforce Shortages and Health System Challenges

Human resource limitations are among the most significant barriers to equitable cancer care in LMICs. Many countries experience severe shortages of medical oncologists, radiation oncologists, oncology nurses, palliative care specialists, pathologists, and psycho-oncology professionals.

Healthcare workforce shortages contribute to increased workload, delays in treatment initiation, reduced continuity of care, and burnout among healthcare providers. In many settings, oncology care is concentrated in major urban centers, further exacerbating geographic disparities.

Multidisciplinary care models are increasingly recognized as essential for improving cancer outcomes and patient-centered care. Multidisciplinary teams typically include oncologists, surgeons, radiation oncologists, palliative care physicians, psychologists, nurses, social workers, and rehabilitation specialists. However, implementation of multidisciplinary oncology care remains inconsistent in many LMICs due to workforce limitations and insufficient institutional support.

Health system fragmentation also contributes to inequalities in cancer care delivery. Poor coordination among primary care, oncology services, and palliative care providers can lead to delayed referrals, inadequate symptom management, and fragmented patient experiences.

Palliative Care Inequalities

Palliative care is recognized by the WHO as an essential component of comprehensive cancer care. Nevertheless, major disparities persist in access to palliative care services globally, particularly in LMICs (Connor & Sepulveda Bermedo, 2014).

Patients with advanced cancer in resource-limited settings frequently experience untreated pain and psychological distress due to inadequate access to opioid analgesics and specialist palliative

care services. Regulatory restrictions, stigma surrounding opioid use, insufficient training, and limited government funding contribute to poor access to symptom management.

Integration of palliative care into oncology services has been associated with improved quality of life, better symptom control, enhanced communication, and reduced healthcare utilization (Temel et al., 2010). Early integration of palliative care is increasingly recommended by international oncology organizations, including the European Society for Medical Oncology (ESMO) and the American Society of Clinical Oncology (ASCO).

However, the implementation of integrated palliative oncology models remains challenging in many LMICs due to workforce shortages, limited infrastructure, and inadequate reimbursement systems. Public health approaches aimed at strengthening palliative care policies, opioid availability, and workforce training are essential for reducing cancer-related suffering.

Financial Toxicity and Socioeconomic Inequalities

Financial toxicity refers to the economic burden experienced by patients and families as a consequence of cancer treatment costs. Cancer-related financial hardship can significantly affect treatment adherence, quality of life, and psychological well-being.

In many LMICs, out-of-pocket healthcare expenditures remain high, and patients may experience catastrophic financial consequences related to diagnostics, treatment, transportation, and supportive care costs (Knaul et al., 2018). Financial barriers may force patients to delay or discontinue treatment.

Socioeconomic inequalities are closely linked to disparities in cancer outcomes. Lower-income populations often experience higher exposure to cancer risk factors, lower screening participation, delayed diagnosis, and reduced access to high-quality treatment.

Gender inequalities may further influence cancer outcomes. Women in resource-limited settings may experience reduced access to preventive services, delayed diagnosis, and limited healthcare decision-making power (Ginsburg et al., 2023).

Public Health and Policy Approaches to Reducing Inequalities

Reducing cancer care inequalities requires coordinated clinical, public health, and policy interventions. National cancer control programs play a central role in strengthening cancer prevention, early detection, treatment access, survivorship care, and palliative care integration.

Universal health coverage initiatives may improve equitable access to oncology services by reducing financial barriers and expanding reimbursement mechanisms. Investment in workforce development, oncology infrastructure, radiotherapy capacity, and pathology services is also essential.

Implementation of multidisciplinary care models may enhance coordination between oncology and palliative care services while improving patient-centered care delivery. Public health strategies aimed at improving health literacy, expanding cancer screening programs, and addressing geographic disparities are critical components of cancer control.

International collaboration and global oncology initiatives may help support capacity building in resource-limited settings through training programs, research partnerships, and knowledge exchange.

Future Directions

Future efforts to reduce global cancer care inequalities should focus on strengthening health systems, improving cancer surveillance, expanding access to early diagnosis, and integrating palliative care into routine oncology practice.

Telemedicine and digital health technologies may improve access to specialist oncology consultations in underserved regions. Artificial intelligence-based diagnostic tools and implementation science approaches may also contribute to more efficient cancer care delivery.

Further research is needed to better understand regional disparities in cancer outcomes, evaluate health system interventions, and identify sustainable strategies for improving equitable access to comprehensive cancer care.

Conclusion

Cancer care inequalities remain a major global public health challenge, particularly in LMICs, where healthcare systems frequently face substantial resource limitations. Disparities in cancer prevention, diagnosis, treatment access, workforce capacity, and palliative care contribute to poor patient outcomes and increased mortality.

Addressing these inequalities requires integrated oncology and public health approaches that strengthen healthcare systems, improve access to multidisciplinary care, expand palliative care services, and reduce financial and geographic barriers to treatment. International collaboration, evidence-based policy development, and investment in workforce and infrastructure are essential for achieving equitable global cancer care.

References

- Atun, R., Jaffray, D. A., Barton, M. B., Bray, F., Baumann, M., Vikram, B., Hanna, T. P., Knaul, F. M., Lievens, Y., Lui, T. Y., Milosevic, M., O'Sullivan, B., Rodin, D. L., Rosenblatt, E., Van Dyk, J., Yap, M. L., & Zubizarreta, E. (2015). Expanding global access to radiotherapy. *The Lancet Oncology*, 16(10), 1153–1186. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(15\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(15)00222-3)
- Bray, F., Laversanne, M., Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Soerjomataram, I., & Jemal, A. (2024). Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 74(3), 229–263. <https://doi.org/10.3322/caac.21834>
- Brooks, E. G., & Reed, K. D. (2017). Principles and pitfalls: A guide to death certification. *Clinical Medicine & Research*, 15(3–4), 74–82. <https://doi.org/10.3121/cmr.2017.1377>
- Connor, S. R., & Sepulveda Bermedo, M. C. (2014). Global atlas of palliative care at the end of life. Worldwide Palliative Care Alliance and World Health Organization.
- Ginsburg, O., Yip, C. H., Brooks, A., Cabanes, A., Caleffi, M., Dunstan, Y., Gorman, D., Gralow, J., Hansen, C., McCormack, V., McLaughlin de Ramirez, M., Ndlovu, N., Nyokong, T., Pace, L. E., Porter, P., Smith, R. A., Thomas, D. B., & Unger-Saldaña, K. (2023). Breast cancer early detection: A phased approach to implementation. *Cancer*, 129(Suppl. 1), 10–20. <https://doi.org/10.1002/cncr.34565>
- Knaul, F. M., Farmer, P. E., Krakauer, E. L., De Lima, L., Bhadelia, A., Jiang Kwete, X., Arreola-Ornelas, H., Gómez-Dantés, O., Rodriguez, N. M., Alleyne, G. A. O., Connor, S. R., Hunter, D. J., Lohman, D., Radbruch, L., Del Rocío Sáenz Madrigal, M., Atun, R., Foley, K. M., Frenk, J., & Jamison, D. T. (2018). Alleviating the access abyss in palliative care and pain relief—An imperative of universal health coverage. *The Lancet*, 391(10128), 1391–1454. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32513-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32513-8)
- Sullivan, R., Alatise, O. I., Anderson, B. O., Audisio, R., Autier, P., Aggarwal, A., Balch, C., Brennan, M. F., Dare, A., D'Cruz, A., Eggermont, A. M., Fleming, K. A., Gueye, S. M., Hagander, L., Herrera, C. A., Jarnheimer, A., Ji, J. F., Kingham, T. P., Kumar, H. S., ... Purushotham, A. (2015). Global cancer surgery: Delivering safe, affordable, and timely cancer surgery. *The Lancet Oncology*, 16(11), 1193–1224. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(15\)00223-5](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(15)00223-5)
- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 71(3), 209–249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>

პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური სერვისების კოლაბორაცია დაავადებათა პრევენციისთვის

ლატარია ლიკა

ექიმი სტომატოლოგი, საქართველოს უნივერსიტეტი

რეზიუმე

პირის ღრუს ჯანმრთელობა ზოგადი ჯანმრთელობის განუყოფელი კომპონენტია, თუმცა სტომატოლოგიური დაავადებები დღემდე საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის მნიშვნელოვან გამოწვევად რჩება. პირის ღრუს დაავადებების მაღალი გავრცელება და მათი კავშირი სხვადასხვა სისტემურ პათოლოგიასთან, ხაზს უსვამს ინტეგრირებული ჯანდაცვის მოდელების მნიშვნელობას. აღნიშნულ კონტექსტში, პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური მომსახურების კოლაბორაციული მოდელების შეფასება განსაკუთრებულ აქტუალობას იძენს, რადგან მათი ეფექტიანი თანამშრომლობა ხელს უწყობს დაავადებების პრევენციას, ადრეულ დიაგნოსტიკასა და ჯანმრთელობის შედეგების გაუმჯობესებას.

წინამდებარე ლიტერატურული მიმოხილვის მიზანია, პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური მომსახურების თანამშრომლობის ეფექტიანობის შეფასება და იმ ძირითადი ბარიერების იდენტიფიცირება, რომლებიც ხელს უშლის მათ ინტეგრაციის პროცესს. ნაშრომში განხილულია ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის რეკომენდაციები და თანამედროვე საერთაშორისო კვლევები, რომლებიც ადასტურებს პირის ღრუსა და ზოგადი ჯანმრთელობის მჭიდრო ურთიერთკავშირს.

საკვანძო სიტყვები: პირველადი ჯანდაცვა, პირის ღრუს ჯანმრთელობა, სტომატოლოგიური მომსახურება, პრევენცია, ინტერპროფესიული თანამშრომლობა.

შესავალი

პირის ღრუს ჯანმრთელობა ადამიანის ზოგადი ჯანმრთელობისა და კეთილდღეობის განუყოფელი ნაწილია. ჯანმრთელობის მსოფლიო ორგანიზაციის მიხედვით პირის ღრუს ჯანმრთელობა ადამიანის ცხოვრების ხარისხის გაუმჯობესების განუყოფელი

კომპონენტი. ასევე, ჯანმრთელობის მსოფლიო ორგანიზაციის მიხედვით, პირის ღრუს არაგადამდები დაავადებები 3.5 მილიარდ ადამიანს აღენიშნება, რაც თავის მხრივ, მოსახლეობის საკმაოდ დიდ რიცხვზე მიუთითებს და შესაბამისად, პირის ღრუს არაგადამდები დაავადებები ერთერთ ყველაზე გავრცელებულ დაავადებებად ითვლება. „ადამიანზე ორიენტირებული ინტეგრირებული ჯანდაცვის სერვისები“ (Integrated People-Centered Health Services) ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის მიხედვით, წარმოადგენს ზოგადი ჯანმრთელობის ხელშეწყობის უნივერსალურ საფუძველს. პირველადი ჯანდაცვის სერვისები მსოფლიოს უმეტეს ქვეყანაში ხელმისაწვდომია, თუმცა მიუხედავად ამისა, პაციენტისთვის მათი კომპლექსური მიწოდება მაინც პრობლემურ საკითხად რჩება.

არსებული სამეცნიერო მტკიცებულებები მიუთითებს, რომ პირის ღრუს დაავადებები წარმოადგენს, არა მხოლოდ ლოკალურ, არამედ სისტემურ ჯანმრთელობის პრობლემას. მათი გავლენა ხშირად სცილდება პირის ღრუს ფარგლებს და ასოცირებულია სხვადასხვა ორგანოთა სისტემის, მათ შორის გულ-სისხლძარღვთა და საჭმლის მომნელებელი სისტემების ფუნქციურ დარღვევებთან. გარდა ამისა, პირის ღრუს დაავადებები უარყოფითად მოქმედებს ინდივიდის სოციალურ აქტივობაზე, კომუნიკაციაზე და ცხოვრების ხარისხზე. არანამკურნალები სტომატოლოგიური დაავადებები იწვევს სხვადასხვა ტიპის ანთებით რეაქციებს და ცხოვრების ხარისხის გაუარესებას. შედეგად კი ქრონიკული დაავადებების განვითარების რისკი იზრდება, რაც თავის მხრივ შემდგომში დაკავშირებულია ჯანდაცვის სისტემის ეკონომიკური ტვირთის ზრდასთან. (Primary Care Collaborative, 2021).

ბოლო წლებში, მნიშვნელოვნად გაიზარდა მტკიცებულებები, რომლებიც გვაჩვენებს, რომ პირველადი ჯანდაცვის და სტომატოლოგიურ სფეროში მომუშავე პროფესიონალების ერთობლივი მუშაობა მნიშვნელოვანია ადამიანის ზოგადი ჯანმრთელობის შენარჩუნებისთვის (Bradley, C., 2023).

ფრაგმენტული სამედიცინო მომსახურების მიღება, წარმოადგენს თანამედროვე ჯანდაცვის სისტემების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან გამოწვევას, როდესაც სხვადასხვა დარგის სპეციალისტები კონკრეტული დაავადებების მკურნალობით შემოიფარგლებიან. აღსანიშნავია, რომ პირველადი ჯანდაცვის წარმომადგენლები, ოჯახის ექიმები, არიან სწორედ ის პირველი რგოლი რომელთანაც უმეტესად პაციენტებს პირველად აქვთ შეხება და სწორედ, მათ აკისრიათ მნიშვნელოვანი პასუხისმგებლობა ადამიანის ზოგადი ჯანმრთელობის ხელშეწყობაზე. მიუხედავად ამისა, პირის ღრუს ჯანმრთელობის ხელშეწყობა მათი მხრიდან ნაკლებადაა დანერგილი პრაქტიკაში.

აღსანიშნავია, რომ პირის ღრუს არაგადამდები დაავადებებიდან, კარიესი ერთერთ ყველაზე ფართოდ გავრცელებულ სტომატოლოგიურ დაავადებად ითვლება, რომელიც პროგრესირებადია და მკურნალობის დაგვიანების შემთხვევაში იწვევს სხვადასხვა

გართულებებს, რომელმაც პაციენტი შეიძლება მიიყვანოს კბილების დანაკარგამდე. მიუხედავად ამისა, ის ერთ-ერთ იმ დაავადებათა შორისაა, რომელთა პრევენციაც სავსებით რეალურია. ამ დაავადების პრევენციით კი მინიმუმამდე დავიყვანთ სხვადასხვა ტიპის გართულებების განვითარების რისკს, როგორებიცაა მაგალითად კბილების დაკარგვა, რაც თავის მხრივ იწვევს ოკლუზიურ ცვლილებებს, ღეჭვითი ფუნქციის და ესთეტიკური მონაცემების გაუარესებას და სხვადასხვა ტიპის ქრონიკული დაავადებების პროვოცირებას, შედეგად კი საზოგადოებრივი ჯანდაცვის ტვირთის მნიშვნელოვნად გაზრდას.

საქართველოს დაავადებათა კონტროლისა და საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის ეროვნული ცენტრის მონაცემების მიხედვით, კარიესი წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ ქრონიკულ დაავადებას მსოფლიოში და მაღალი შემოსავლების მქონე ქვეყნებშიც კი მოზარდთა 60-90%-ს აღენიშნებათ. პირის ღრუს დაავადებები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს, როგორც ინდივიდის ჯანმრთელობასა და ცხოვრების ხარისხზე, ასევე მის შრომისუნარიანობასა და სოციალურ აქტივობაზე. შესაბამისად, არადამაკმაყოფილებელი პირის ღრუს ჯანმრთელობა მნიშვნელოვან სოციალურ-ეკონომიკურ ტვირთს წარმოადგენს, არა მხოლოდ ცალკეული პირებისთვის, არამედ მთლიანად საზოგადოებისთვის. (World Health Organization.2022)

Richard G. Watt-ისა და თანაავტორების მიხედვით, Healthy People 2030 წარმოადგენს ამერიკის შეერთებული შტატების ეროვნულ საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის პროგრამას, რომლის საფუძველიც 1979 წელს ჩაეყარა, როდესაც აშშ-ის მთავარმა ქირურგმა, ჯულიუს რიჩმონდმა (Julius Richmond), გამოაქვეყნა ანგარიში „Healthy People: The Surgeon General’s Report on Health Promotion and Disease Prevention“. პროგრამის ძირითადი მიზანია დაავადებების პრევენცია, მოსახლეობის ჯანმრთელობის გაუმჯობესება და კეთილდღეობის ხელშეწყობა, რაც ხორციელდება ყოველ ათწლეულში განახლებული ეროვნული ჯანმრთელობის მიზნების განსაზღვრის გზით. Healthy People 2030 განსაკუთრებულ ყურადღებას ამახვილებს საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის სერვისების ინტეგრაციაზე, მათ შორის პირის ღრუს ჯანმრთელობის მომსახურების ჩართვაზე პირველადი ჯანდაცვის სისტემაში (Watt et al., 2023).

ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის (WHO) 2022–2030 წლების სტრატეგიული დოკუმენტების მიხედვით, პირის ღრუს ჯანმრთელობის სერვისებისა და პირველადი ჯანდაცვის ინტეგრაცია წარმოადგენს სტომატოლოგიური დაავადებების ტვირთის შემცირების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან სტრატეგიას. აღნიშნული ინიციატივის ფარგლებში დასახულია მიზანი, რომ 2030 წლისთვის ქვეყნების სულ მცირე 80%-ში სტომატოლოგიური მომსახურება ინტეგრირებული იყოს პირველადი ჯანდაცვის სისტემაში (WHO, 2022). ამავე მიმართულებას იზიარებენ Primary Care Collaborative და WHO-ის „Global Oral Health Action Plan 2023–2030“, რომლებიც ხაზს უსვამენ ოჯახის ექიმებსა და სტომატოლოგებს შორის ინტერდისციპლინური თანამშრომლობის

მნიშვნელობას დაავადებების პრევენციის, ადრეული დიაგნოსტიკისა და მოსახლეობის ჯანმრთელობის გაუმჯობესების პროცესში.

Romano, M. J -ს (2023) მიხედვით, თანამედროვე ჯანდაცვა უნდა ეფუძნებოდეს მტკიცებულებებზე დაფუძნებული მედიცინის პრინციპებს. ავტორი მაგალითად განიხილავს ფტორის ლაქების გამოყენებას, რომელიც 2014 წლიდან აშშ-ის პრევენციული სერვისების სამუშაო ჯგუფის (USPSTF) მიერ რეკომენდებულ პრევენციულ ღონისძიებას წარმოადგენს. მიუხედავად ამისა, აღნიშნული ინტერვენცია პირველადი ჯანდაცვის კლინიკების მხოლოდ მცირე ნაწილში გამოიყენება. ეს ფაქტი ცხადყოფს, რომ მეცნიერულად დასაბუთებული და ეფექტური პრევენციული ღონისძიებების პრაქტიკაში დანერგვა კვლავ მნიშვნელოვან გამოწვევად რჩება. შესაბამისად, პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური სერვისების ეფექტიანი თანამშრომლობის გზაზე არსებული ბარიერების იდენტიფიცირება და აღმოფხვრა განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს.

Di Fu-სა და Xingyue Shu-ს (2025) კვლევის მიხედვით, პაროდონტიტისა და სისტემურ დაავადებებს შორის მჭიდრო ორმხრივი კავშირი არსებობს. კერძოდ, პაროდონტიტის მქონე პაციენტებში გართულებულია გლიკემიური კონტროლის მიღწევა, ხოლო პაროდონტიტის ანთებითი პროცესები ასოცირებულია ინსულტის განვითარების მომატებულ რისკთან. მრავალი ეპიდემიოლოგიური და კლინიკური კვლევის მიხედვით, პაროდონტიტი მნიშვნელოვან ასოციაციას ავლენს კარდიოვასკულურ დაავადებებთან, რაც ხაზს უსვამს სამედიცინო და სტომატოლოგიური სერვისების ინტეგრირებული თანამშრომლობის აუცილებლობას დაავადებების პრევენციის, ადრეული დიაგნოსტიკისა და ეფექტური მართვის უზრუნველსაყოფად. ავტორები, ასევე განიხილავენ პაროდონტიტისა და სიმსუქნეს შორის არსებულ ურთიერთკავშირს, რაც კიდევ ერთხელ ადასტურებს პირის ღრუს ჯანმრთელობისა და ზოგადი ჯანმრთელობის განუყოფელ კავშირს (Sanz et al., 2020).

პირველადი ჯანდაცვა წარმოადგენს ჯანდაცვის სისტემის ფუნდამენტურ დონეს, რომელიც უზრუნველყოფს დაავადებების პრევენციას, ჯანმრთელობის ხელშეწყობასა და მოსახლეობის საჭიროებებზე ორიენტირებულ მომსახურებას. შესაბამისად, პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური სერვისების ინტეგრაცია და თანამშრომლობა მნიშვნელოვან წინაპირობას ქმნის პირის ღრუს დაავადებების ადრეული გამოვლენის, ეფექტიანი პრევენციისა და დროული მართვისთვის.

Bradley Christian და Ajesh George ის მიხედვით (2023) პირველადი ჯანდაცვა განისაზღვრება როგორც მთელი საზოგადოების მასშტაბით ჯანმრთელობისადმი მიდგომა, რომლის მიზანია ჯანმრთელობისა და კეთილდღეობის დონისა და მათი თანაბარი განაწილების მაქსიმიზაცია.

სტომატოლოგიური სერვისებისა და პირველადი ჯანდაცვის სისტემის ინტეგრირებული თანამშრომლობის ეფექტიანობის შეფასება მნიშვნელოვან წინაპირობას წარმოადგენს მათი მდგრადი განვითარებისა და ხარისხიანი ფუნქციონირების უზრუნველსაყოფად. აღნიშნული თანამშრომლობის შეფასება შესაძლებელია სხვადასხვა ინდიკატორის გამოყენებით, მათ შორის სამედიცინო პერსონალისა და ჯანდაცვის მუშაკების გადამზადების ხარისხის, ჩატარებული სკრინინგების რაოდენობის, პაციენტთა რეფერირების მაჩვენებლების, მკურნალობის დროულობისა და პირის ღრუს დაავადებების გავრცელების დინამიკის მიხედვით. არსებული კვლევები მიუთითებს, რომ პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური მომსახურებების ეფექტიანი ინტეგრაცია, პრევენციულ ღონისძიებებთან ერთად, ხელს უწყობს მოსახლეობის ცნობიერების ამაღლებას პირის ღრუს ჯანმრთელობის საკითხებზე, აუმჯობესებს პირის ღრუს ჰიგიენურ ქცევებს და, საბოლოოდ, ამცირებს სტომატოლოგიური დაავადებების გავრცელებას. შესაბამისად, ინტერდისციპლინური თანამშრომლობა განიხილება პირის ღრუს ჯანმრთელობის გაუმჯობესებისა და საზოგადოებრივი ჯანმრთელობის გაძლიერების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან სტრატეგიად (Watt et al., 2019).

2025 წელს ნიგერიაში განხორციელდა კვლევა, რომელსაც მხარს უჭერდა მსოფლიო ჯანდაცვის ორგანიზაცია (WHO). კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ექთნებისა და პირველადი ჯანდაცვის სფეროს წარმომადგენლებისთვის პირის ღრუს დაავადებების პრევენციის მიმართულებით ჩატარებული გადამზადების პროგრამის ეფექტიანობის შეფასება. კერძოდ, შესწავლილ იქნა, თუ რამდენად შეძლეს მონაწილეებმა მიღებული ცოდნისა და უნარების პრაქტიკაში ინტეგრირება, რა ბარიერები და ხელშემწყობი ფაქტორები არსებობდა პროგრამის განხორციელების პროცესში და როგორ აფასებდნენ პაციენტები მიწოდებულ მომსახურებას (Oladayo et al., 2025).

კვლევაში მონაწილეობდა 34 პირი, მათ შორის ექთნები და ჯანდაცვის სფეროს სხვა წარმომადგენლები. დამატებით გამოიკითხნენ პაციენტებიც, რათა შეფასებულიყო მათი გამოცდილება და კმაყოფილების დონე. მონაცემების შეგროვება განხორციელდა სტრუქტურირებული გამოკითხვების, პაციენტთა უკუკავშირის ფორმებისა და სასწავლო პროგრამის შეფასების ინსტრუმენტების გამოყენებით.

კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ მონაწილეებს მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდათ ცოდნა და პრაქტიკული უნარები პირის ღრუს დაავადებების პრევენციისა და მართვის მიმართულებით. მათ შეძლეს მიღებული ცოდნის ეფექტურად გამოყენება ყოველდღიურ პროფესიულ საქმიანობაში. ამასთანავე, გამოვლინდა გარკვეული ხელშემშლელი ფაქტორები, რომელთა შორის განსაკუთრებით აღსანიშნავია მატერიალური და ადამიანური რესურსების სიმწირე.

კვლევის ავტორები ასკვნიან, რომ პირველადი ჯანდაცვის სფეროს წარმომადგენლების გადამზადება პირის ღრუს ჯანმრთელობის საკითხებში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს

სტომატოლოგიური დაავადებების ადრეულ პრევენციასა და მართვაში. მსგავსი საგანმანათლებლო პროგრამები ხელს უწყობს შორსწასული სტომატოლოგიური პათოლოგიების შემცირებას და ქმნის მყარ საფუძველს მოსახლეობის ზოგადი ჯანმრთელობის გაუმჯობესებისთვის (Frontiers in Oral Health, (2025).

ინტეგრირებული მოდელის შეფასებისას, მნიშვნელოვანი კრიტერიუმია სტომატოლოგიურ მომსახურებებზე ხელმისაწვდომობა და პაციენტების ცხოვრების ხარისხის გაუმჯობესება, რაც გამოიხატება ტკივილის დროული კუპირებით, სადექი აპარატის ფუნქციის აღდგენით, ფსიქო-სოციალური კეთილდღეობით.

პირველადი ჯანდაცვა, სწორედ, რომ უზრუნველყოფს ადამიანის ზოგად ჯანმრთელობას მთელი სიცოცხლის მანძილზე, თუმცა, კვლევები ცხადყოფს, რომ მიუხედავად ამისა, ოჯახის ექიმები ნაკლებად ამისამართებენ პაციენტებს სტომატოლოგებთან. პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური მომსახურების ურთიერთკავშირის შესწავლა, მნიშვნელოვან შესაძლებლობას იძლევა, იმ ბარიერებისა და ფაქტორების იდენტიფიცირებისთვის, რომლებიც აფერხებს ოჯახის ექიმების მიერ, პაციენტების სტომატოლოგთან დროულ გადამისამართებას. აღნიშნული საკითხის კვლევა, განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია პირის ღრუს დაავადებების ადრეული გამოვლენისა და პრევენციის გაუმჯობესების მიზნით.

Romano-ს (2023) სტატიის „Why Are Family Doctors Still Not Addressing Oral Health?“ მიხედვით, ყოველწლიურად დაახლოებით 112 მილიონი ადამიანი მიმართავს ოჯახის ექიმს, თუმცა, არ სარგებლობს სტომატოლოგიური მომსახურებით. ავტორის შეფასებით, აღნიშნული მდგომარეობის ერთ-ერთ ძირითად მიზეზს წარმოადგენს ოჯახის ექიმების არასაკმარისი ცოდნა პირის ღრუს ჯანმრთელობის საკითხებში, ასევე სამედიცინო განათლებისა და რეზიდენტურის პროგრამებში სტომატოლოგიური განათლებისთვის დათმობილი შეზღუდული სასწავლო დრო.

ამავე სტატიაში განხილული კვლევების შედეგები მიუთითებს, რომ პაროდონტიტის ეფექტიანი მკურნალობა სხვადასხვა პოპულაციაში ასოცირდება ქრონიკული დაავადებების გართულებების სიხშირის შემცირებასთან. კერძოდ, ზოგიერთი კვლევის მიხედვით, პაროდონტული მკურნალობის შედეგად ქრონიკული დაავადებების გართულებების რისკი დაახლოებით 40%-ით შემცირდა, რაც კიდევ ერთხელ ადასტურებს პირის ღრუს ჯანმრთელობის მნიშვნელოვან გავლენას ზოგად ჯანმრთელობაზე და ხაზს უსვამს, პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური სერვისების ინტეგრირებული თანამშრომლობის აუცილებლობას.

Douglas და თანაავტორების (2007) სტატიის მიხედვით, სტომატოლოგებისა და პირველადი ჯანდაცვის ეფექტური ინტეგრაციის წინაპირობაა ოჯახის ექიმების, როგორც დიპლომამდელი, ისე დიპლომისშემდგომი განათლების სისტემაში სტომატოლოგიური საგნების სწავლების ჩართვა. ეს საკითხი დღესაც აქტუალურია,

რადგან თანამედროვე სასწავლო პროგრამებში, რომელსაც ბაკალავრიატის მედიცინის სტუდენტები სწავლობენ, არ არის შეტანილი პირის ღრუს დავადებები, მათი ეტიოლოგია და სიმპტომები. საბაზისო სტომატოლოგიის ცოდნა კი ოჯახის ექიმებს დაეხმარებათ პრევენციული ღონისძიებების ჩატარებაში.

Cardenas და თანაავტორებმა (2023) აღწერეს Teaming and Integrating for Smiles and Health (TISH) პროგრამა, რომლის მიზანი იყო პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური მომსახურების ინტეგრაციის შეფასება და პრაქტიკული მოდელის შემუშავება, რომელიც ხელს შეუწყობდა სხვადასხვა ჯანდაცვის პროფესიონალს შორის ეფექტიან კოლაბორაციას. პროგრამა ეფუძნებოდა ინტერპროფესიულ თანამშრომლობას და მიზნად ისახავდა, პირის ღრუსა და ზოგადი ჯანმრთელობის სერვისების კოორდინირებული მიწოდების ხელშეწყობას.

პროგრამის ფარგლებში სამიზნე ჯგუფებად შეირჩნენ გინგივიტისა და ჰიპერტენზიის მქონე ან რისკის ქვეშ მყოფი პაციენტები. აღნიშნული მდგომარეობების შერჩევა განპირობებული იყო იმით, რომ ორივე დაავადების სკრინინგი შედარებით მარტივად ხორციელდება და ისინი ფართოდ გავრცელებულ ჯანმრთელობის პრობლემებს წარმოადგენს. ავტორები აღნიშნავენ, რომ გინგივიტი მკურნალობის გარეშე შესაძლოა პროგრესირდეს პაროდონტიტამდე, რომელიც დაკავშირებულია სხვადასხვა სისტემური დაავადების განვითარების გაზრდილ რისკთან. ამასთანავე, ჰიპერტენზიის სკრინინგი სტომატოლოგიურ პრაქტიკაში განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან სტომატოლოგიური ჩარევების წინ მაღალი არტერიული წნევის გამოვლენის შემთხვევაში შესაძლებელია პაციენტის დროული გადამისამართება ოჯახის ექიმთან ან სხვა, შესაბამის სპეციალისტთან.

Cardenas და თანაავტორებმა (2023) შეიმუშავეს ინტეგრაციის კონცეპტუალური მოდელი, რომელიც მოიცავდა რამდენიმე მნიშვნელოვან კომპონენტს: კლინიკის ხელმძღვანელობის მხარდაჭერას, ინტერპროფესიული ტრენინგების ორგანიზებას, სტანდარტიზებული სკრინინგის სისტემების დანერგვას, ელექტრონული სამედიცინო ჩანაწერების ინტეგრაციასა და პაციენტთა გადამისამართების ეფექტიანი მექანიზმების განვითარებას.

კვლევაში მონაწილეობდნენ 18 წელზე უფროსი ასაკის პაციენტები, რომლებიც გეგმიური სამედიცინო ან სტომატოლოგიური ვიზიტით მიმართავდნენ კლინიკებს. მონაცემთა შეგროვების მიზნით გამოყენებული იყო კითხვარები როგორც ჯანდაცვის პროფესიონალებისთვის, ასევე პაციენტებისთვის. დამატებით აღირიცხებოდა ჩატარებული სამედიცინო და სტომატოლოგიური სკრინინგების რაოდენობა, გამოვლენილი ჰიპერტენზიისა და გინგივიტის შემთხვევები და შესაბამის სპეციალისტებთან განხორციელებული გადამისამართებები.

კვლევის შედეგებმა აჩვენა, რომ პროგრამაში ჩართულმა გუნდებმა მნიშვნელოვნად გაიღრმავეს ცოდნა პირის ღრუს ჯანმრთელობისა და ზოგადი ჯანმრთელობის ურთიერთკავშირის შესახებ. ავტორთა შეფასებით, TISH პროგრამა წარმოადგენდა პირველ წარმატებულ მცდელობას, რომლის ფარგლებშიც შეიქმნა სასწავლო-კოლაბორაციული მოდელი სტომატოლოგებსა და პირველადი ჯანდაცვის პროფესიონალებს შორის თანამშრომლობის გასაძლიერებლად. მიუხედავად მიღწეული პროგრესისა, კვლევამ გამოავლინა გარკვეული გამოწვევებიც, მათ შორის ელექტრონული სამედიცინო ჩანაწერების სისტემების არასაკმარისი ინტეგრაცია და ფინანსური ბარიერები. აღნიშნული პრობლემების დასაძლევად, ავტორებმა რეკომენდაციის სახით წარმოადგინეს ინტერპროფესიული განათლებისა და ტრენინგების გაფართოება, ელექტრონული სამედიცინო ჩანაწერების სისტემების გაუმჯობესება და სკრინინგისა და გადამისამართების პროცესების სტანდარტიზაცია.

პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური მომსახურების ინტეგრაციის პროცესში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ფინანსური ბარიერების შეფასებას. სტომატოლოგიური მომსახურება ხშირად დაკავშირებულია მნიშვნელოვან ფინანსურ დანახარჯებთან, რაც მოსახლეობისათვის, განსაკუთრებით კი მოწყვლადი და დაბალი შემოსავლის მქონე ჯგუფებისთვის, წარმოადგენს სერვისებზე ხელმისაწვდომობის ერთ-ერთ მთავარ შემაფერხებელ ფაქტორს. სტომატოლოგიური მასალების, ტექნოლოგიებისა და მკურნალობის მაღალი ღირებულება ზრდის როგორც პაციენტების, ისე ჯანდაცვის სისტემის ფინანსურ დატვირთვას (Listl, et al, 2015).

ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის მონაცემებით, სტომატოლოგიური დაავადებების მკურნალობა განვითარებულ ქვეყნებში, ჯანმრთელობის დაცვის ყველაზე ძვირადღირებულ ინტერვენციებს შორის მეოთხე ადგილს იკავებს. ამასთანავე, დაბალი და საშუალო შემოსავლის მქონე მრავალ ქვეყანაში ბავშვთა კარიესის მკურნალობაზე გაწეული ხარჯები, ხშირად აღემატება ბავშვთა ჯანმრთელობის სხვა მიმართულებებზე გამოყოფილ ფინანსურ რესურსებს. აღნიშნული გარემოებები, ხაზს უსვამს პირის ღრუს დაავადებების პრევენციის, ადრეული გამოვლენისა და პირველადი ჯანდაცვის სისტემაში ინტეგრირებული სტომატოლოგიური მომსახურების განვითარების აუცილებლობას, რაც გრძელვადიან პერსპექტივაში მნიშვნელოვნად შეამცირებს, როგორც დაავადებათა ტვირთს, ისე მათთან დაკავშირებულ ეკონომიკურ დანახარჯებს.

დასკვნა

ლიტერატურის მიმოხილვამ აჩვენა, რომ პრევენციული ღონისძიებები მნიშვნელოვნად ამცირებს სხვადასხვა დაავადებების განვითარებას, თუმცა მიუხედავად ამისა, არსებობს სხვადასხვა ბარიერები, როგორებიცაა, ოჯახის ექიმების არასაკმარისი განათლება პირის ღრუს დაავადებების შესახებ (Romano J, Silk H. 2023), ინტერპროფესიული კომუნიკაციის

ნაკლებობა, ელექტრონული სამედიცინო ჟურნალების ინტეგრაცია, ფინანსური შეზღუდვები (Cardenas K. et al. 2023), რომლებიც ხელს უშლის პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური სერვისების ეფექტურ კოლაბორაციას. ამ ბარიერების და პრობლემების იდენტიფიცირება მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს პირველადი ჯანდაცვის მუშაობის პროცესს და ასევე, შესაძლებლობას მისცემს სტომატოლოგებს ადრეულ ეტაპებზე გამოავლინონ სხვადასხვა ქრონიკული ხასიათის მქონე ზოგადი დაავადებები.

პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური მომსახურების ინტეგრაცია წარმოადგენს პერსპექტიულ და მტკიცებულებებზე დაფუძნებულ მიდგომას, რომელსაც მნიშვნელოვანი წვლილის შეტანა შეუძლია, როგორც პირის ღრუს დაავადებების, ისე არაგადამდები ქრონიკული დაავადებების პრევენციისა და მართვის პროცესში. აღსანიშნავია, რომ საქართველოში პირველადი ჯანდაცვისა და სტომატოლოგიური მომსახურების ინტეგრაციის საკითხებზე ჩატარებული კვლევები მწირია. აღნიშნული გარემოება, მიუთითებს ამ მიმართულებით დამატებითი სამეცნიერო კვლევების აუცილებლობაზე, რათა შეფასდეს არსებული პრაქტიკა, გამოვლინდეს ინტეგრაციის პროცესის ხელშემშლელი და ხელშემწყობი ფაქტორები და შემუშავდეს მტკიცებულებებზე დაფუძნებული რეკომენდაციები.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Bradley, C. (2023). Strategies to integrate oral health into primary care: A systematic review. *BMC Oral Health*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37407034/>
2. Cardenas, V., Braun, P. A., Hummel, J., Glassman, P., Phillips, K., & Ramos-Gomez, F. (2023). Teaming and Integrating for Smiles and Health (TISH): A learning collaborative to advance oral health integration in primary care and dental settings. *Journal of Clinical and Translational Science*, 7(1), e245. <https://doi.org/10.1017/cts.2023.676>
3. Cardenas, K., Weilnau, T., & Aguilar, C. (2023). Partnering for integrated care: A learning collaborative for primary care and oral health teams. *Annals of Family Medicine*, 21(Suppl. 2), S22–S27. https://www.annfam.org/content/21/Suppl_2/S22
4. Douglass, A. B., Gonsalves, W., Maier, R., Silk, H., Stevens, N., Tysinger, J., & Wrightson, A. S. (2007). Smiles for Life: A national oral health curriculum for family medicine: A model for curriculum development by STFM groups. *Family Medicine*, 39(2), 88–90.
5. Frontiers in Oral Health. (2025). Training primary healthcare workers in oral health promotion and disease prevention: Experiences from Nigeria. Frontiers Media SA.
6. Fu, D., & Shu, X. (2025). Bidirectional relationships between periodontitis and systemic diseases: Implications for integrated healthcare. *Frontiers in Oral Health*, 6, Article 1546248.

7. Fu, D., & Shu, X. (2020). Connection between oral health and chronic diseases.
8. Healthy People 2030. (n.d.). Healthy People 2030 framework. U.S. Department of Health and Human Services. <https://odphp.health.gov/healthypeople/about/healthy-people-2030-framework>
9. Listl, S., Galloway, J., Mossey, P. A., & Marcenes, W. (2015). Global economic impact of dental diseases. *Journal of Dental Research*, 94(10), 1355–1361. <https://doi.org/10.1177/0022034515602879>
10. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). *Integrating oral and general health through health literacy practices: Proceedings of a workshop*. National Academies Press. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK544956/>
11. Oladayo, A. M., Lawal, F. B., Sofola, O. O., Uti, O. G., Oyapero, A., Aborisade, A., Olujitan, M., Fagbule, O. F., Williams, A. T., Dedeke, A., Idiga, E., Abdul-Kabir Adegoke, Y.-I., Adeniji Oluwagbenga, I., Mele, A. B., Baffa, A. S., Adetula, I., Musa, K. S., Stewart, B., Daep, C. A., Hines, D., Beard, J., Lawal, T. A., & Butali, A. (2025). Integrating oral health into primary healthcare: Lessons from Project OHE-NCHeW (Oral Health Education for Nurses and Community Health Workers) in Nigeria. *Frontiers in Oral Health*, 6, Article 1597243. <https://doi.org/10.3389/froh.2025.1597243>
12. Primary Care Collaborative. (2024). *Innovations in oral health and primary care integration: Alignment with the shared principles of primary care*. [https://thepcc.org/wp-content/uploads/2024/11/PCC Oral Health Primary Care Integration.pdf](https://thepcc.org/wp-content/uploads/2024/11/PCC%20Oral%20Health%20Primary%20Care%20Integration.pdf)
13. Romano, M. J. (2023). Integration of oral health and primary care: Bridging the evidence-to-practice gap. *Journal of Primary Care & Community Health*, 14, 1–8.
14. Sanz, M., Marco Del Castillo, A., Jepsen, S., Gonzalez-Juanatey, J. R., D’Aiuto, F., Bouchard, P., Chapple, I., Dietrich, T., Gotsman, I., Graziani, F., Herrera, D., Loos, B. G., Nibali, L., Sculean, A., Tonetti, M. S., & Van Winkelhoff, A. J. (2020). Periodontitis and cardiovascular diseases: Consensus report. *Journal of Clinical Periodontology*, 47(3), 268–288. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13289>
15. Watt, R. G., Daly, B., Allison, P., Macpherson, L. M. D., Venturelli, R., Listl, S., Weyant, R. J., Mathur, M. R., Guarnizo-Herreño, C. C., Celeste, R. K., Peres, M. A., Kearns, C., Benzian, H., & Glick, M. (2023). Ending the neglect of global oral health: Time for radical action. *The Lancet*, 401(10383), 1229–1231.
16. World Health Organization. (2022). *Global oral health status report: Towards universal health coverage for oral health by 2030*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240061484>
17. World Health Organization. (2023). *Draft global oral health action plan (2023–2030)*. World Health Organization. <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/ncds/mnd/oral-health/eb152-draft-global-oral-health-action-plan-2023-2030-en.pdf>

18. World Health Organization. (2023). *Global oral health action plan 2023–2030*. World Health Organization.
19. National Center for Disease Control and Public Health of Georgia. (n.d.). პირის ღრუს დაავადებები. <https://test.ncdc.ge/pages/user/LetterContent.aspx?ID=5d698323-54c5-4527-923c-f41120002e28>
20. Rural Health Information Hub. (n.d.). Oral health-primary care integration and collaboration model. <https://www.ruralhealthinfo.org/toolkits/oral-health/2/primary-care-integration-model>

Collaboration Between Primary Healthcare and Dental Services for Disease Prevention

Lika Lataria

Abstract

Oral health is an integral component of overall health; however, oral diseases continue to represent a significant public health challenge worldwide. The high prevalence of oral diseases and their association with various systemic conditions emphasize the importance of integrated healthcare models. In this context, evaluating collaborative models between primary healthcare and dental services has become increasingly important, as effective interdisciplinary collaboration contributes to disease prevention, early diagnosis, and improved health outcomes.

The aim of this literature review is to evaluate the effectiveness of collaboration between primary healthcare and dental services and to identify the main barriers that hinder their integration. The review discusses the recommendations of the World Health Organization (WHO) and recent international studies that demonstrate the close relationship between oral health and general health. The findings indicate that integrated care models strengthen interprofessional collaboration, improve access to preventive services, facilitate the early detection of oral diseases, and enhance the quality of healthcare delivery. At the same time, several barriers remain, including insufficient education of primary healthcare professionals in oral health, limited interdisciplinary communication, financial constraints, and inadequate integration of electronic health record systems. Addressing these barriers is essential for improving collaboration between primary healthcare and dental professionals and for reducing the burden of oral diseases through effective prevention and timely intervention.

Keywords: Primary health care; Oral health; Dental services; Disease prevention; Interprofessional collaboration.

Acute Acquired Comitant Esotropia and Digital Device Overuse in Children: a Three-Case Report

Manana Kikolashvili^{1,2}; Nino Nikuradze¹; Gigi Gorgadze¹

¹Tbilisi State Medical University, Tbilisi, Georgia

²Zhvania Pediatric Academic Clinic of Tbilisi State Medical University, Tbilisi, Georgia

Abstract

Acute acquired comitant esotropia (AACE) is an uncommon strabismus involving sudden-onset inward eye deviation and diplopia. Recent trends suggest a rising incidence among youth, potentially linked to excessive digital device use.

This study reviews three children (ages 8–12) who developed AACE and diplopia following prolonged daily screen time (≥ 4 hours). Clinical evaluations revealed full ocular motility and no neurological deficits, with deviations ranging from 24 to 50 prism diopters.

Management transitioned from conservative monitoring to surgery once deviations stabilized. Interventions included bilateral medial rectus recession or unilateral recession-resection.

Postoperatively, all patients achieved orthotropia, resolved diplopia, and restored normal stereopsis. While a temporal association exists between heavy digital use and AACE, causality remains unproven. However, surgical intervention remains highly effective for restoring binocular function. Further research is necessary to clarify the mechanisms behind this "digital-age" presentation of strabismus.

Key Words: Acute Acquired Comitant Esotropia (AACE); Digital Device Overuse; Pediatrics; Diplopia; Strabismus Surgery.

INTRODUCTION

Acute acquired comitant esotropia (AACE) is an uncommon form of esotropia that typically presents in older children with sudden-onset esodeviation and diplopia. It is not primarily associated with accommodative effort and is characterized by comitant deviation with preserved ocular motility. The prevalence of AACE has increased worldwide in recent years [1]. It accounts

for approximately 0.3% of strabismus cases in children, and spontaneous recovery is considered rare [2].

Historically, Burian and Miller classified AACE into three types based on clinical features and presumed etiology [3]. Type I (Swan type) is associated with disruption of fusion, often due to monocular occlusion or vision loss. Type II (Burian–Franceschetti type) is typically linked to physical or psychological stress and presents with large-angle esotropia, minimal refractive error, and little or no accommodative component. Type III (Bielschowsky type) is commonly associated with moderate myopia [3]. However, more recent studies have shown that a significant proportion of cases reported in the past decade do not conform to these traditional classifications [1].

Buch and Vinding further expanded the classification by analyzing 48 pediatric cases and identifying seven etiological subtypes of AACE, including hyperopic, decompensated monofixation syndrome or esophoria, idiopathic, intracranial, secondary, cyclic, and occlusion-related forms [4].

In recent years, the incidence of AACE has shown an increasing trend, particularly among children and adolescents [5]. This rise coincides with the widespread adoption of mobile technologies and digital devices. Smartphones, in particular, have become one of the most rapidly integrated technologies worldwide, requiring sustained near visual attention [6].

The increasing use of smartphones has also been associated with various health concerns, including behavioral dependence and excessive screen exposure. With the growing prevalence of digital device use, the number of reported AACE cases appears to be rising [6,7]. In 2016, Lee et al. described 12 patients with AACE associated with excessive smartphone use, with improvement of esotropia observed in 9 cases following restriction of device usage [6]. These findings suggest a possible association between prolonged near work and the development of AACE.

Nevertheless, despite increasing clinical observations and growing interest in this condition, the etiology, classification, and optimal management of AACE remain incompletely understood and continue to be a subject of debate [8,9].

CASE

We present a case series of three pediatric patients who were referred to our clinic with acute-onset comitant esotropia. Detailed medical histories were obtained in all cases, including the time of onset, potential precipitating factors, and associated symptoms such as diplopia.

All patients underwent comprehensive ophthalmological examination. The angle of deviation was measured using the prism cover/uncover test and was further evaluated with a synoptophore

and the Hirschberg test. Ocular motility was assessed in all directions of gaze to exclude extraocular muscle paresis or the presence of nystagmus. Best-corrected visual acuity and binocular function, including fusion potential, were also evaluated in all patients.

Cycloplegic refraction was performed 30 minutes after the administration of 1% cyclopentolate eye drops. Two drops were instilled in each eye at a 5-minute interval prior to measurement.

All patients additionally underwent neurological evaluation to exclude underlying neurological pathology.

We present three pediatric patients (aged 8, 10, and 12 years) with acute-onset comitant esotropia and diplopia. All cases were temporally associated with prolonged daily use of digital devices.

Case 1

An 8-year-old boy presented with sudden-onset strabismus and diplopia (Fig. 1 A). According to the mother, the child had been using electronic devices for more than 4–5 hours daily.



Figure 1

An 8-year old boy with acute acquired comitant esotropia before (A) and after (B) surgery

Ocular motility was full in all directions. Best-corrected visual acuity (BCVA) was 20/20 in both eyes. The angle of deviation measured 35 prism diopters (PD) by Krimsky test, approximately 15° by Hirschberg test, and +18° on synoptophore.

Cycloplegic refraction revealed:

- OD: +0.50 sph –0.25 cyl ×180
- OS: –0.25 sph –0.25 cyl ×170

Fundus examination was unremarkable. Neurological and pediatric evaluations revealed no abnormalities. The patient underwent vision therapy during the initial management period.

After 6 months of conservative treatment, bilateral medial rectus recession was performed. Postoperatively, ocular alignment was orthotropic, diplopia resolved completely, and stereopsis was fully restored (fig. 2 B)

Case 2

A 10-year-old boy presented with acute-onset esotropia and diplopia (Fig. 2 A), reportedly developing after prolonged use of electronic devices for at least 8 hours per day.



Figure 2

A 10-year old boy with acute acquired comitant esotropia before (A) and after (B) surgery

Visual acuity was 20/20 in both eyes. Ocular motility was full. The angle of deviation was 24 PD by Krimsky test, approximately 20° by Hirschberg test, and +25° on synoptophore.

Cycloplegic refraction demonstrated mild accommodative spasm:

- OD: -0.25 sph +0.50 cyl ×89
- OS: -0.50 sph -0.25 cyl ×90

Binocular vision was assessed using Worth 4-dot test, synoptophore, and Titmus stereotest. Fundus examination and neurological evaluation were normal. The patient underwent vision therapy.

After 6 months, surgical treatment was performed with unilateral medial rectus recession combined with lateral rectus resection in the right eye. Diplopia resolved on the first postoperative day. The patient achieved orthotropia with restoration of binocular single vision at both near and distance. Stereopsis was normal, and results remained stable at 6-month follow-up (Fig. 2 B)

Case 3

A 12-year-old boy presented with acute-onset esotropia and diplopia (Fig. 3 A). The patient had a history of prolonged electronic device use exceeding 7 hours daily.



Figure 3 A 12-year old boy with acute acquired comitant esotropia before (A) and after (B) surgery

Ocular motility was full in all directions. Visual acuity was 20/20 in the right eye, with diplopia reported. The angle of deviation measured 50 PD by Krimsky test, approximately 25° by Hirschberg test, and +25° on synoptophore.

Cycloplegic refraction revealed:

- OD: +1.25 sph +0.25 cyl ×89
- OS: +1.25 sph +0.50 cyl ×90

Binocular function was evaluated using Worth 4-dot test, synoptophore, and Titmus test. Fundus and neurological examinations were unremarkable.

After 6 months of observation, bilateral medial rectus recession was performed. Postoperatively, ocular alignment was symmetrical, diplopia resolved, and stereopsis was restored (Fig. 3 B).

The main clinical characteristics and outcomes are summarized in Table 1.

<i>Parameter</i>	<i>Case 1</i>	<i>Case 2</i>	<i>Case 3</i>
Age (years)	8	10	12
Sex	Male	Male	Male
Daily smartphone use	4–5 hours	≥8 hours	≥7 hours
Onset	Acute	Acute	Acute
Diplopia	Present	Present	Present
Visual acuity (BCVA)	20/20 OU	20/20 OU	20/20 OU
Ocular motility	Full	Full	Full
Angle of deviation (PD)	35 PD	24 PD	50 PD
Hirschberg (approx.)	~15°	~20°	~25°
Synoptophore	+18°	+25°	+25°
Refraction (OD)	+0.50 –0.25 ×180	–0.25 +0.50 ×89	+1.25 +0.25 ×89
Refraction (OS)	–0.25 –0.25 ×170	–0.50 –0.25 ×90	+1.25 +0.50 ×90
Neurological evaluation	Normal	Normal	Normal
Fundus examination	Normal	Normal	Normal
Conservative treatment	Vision therapy	Vision therapy	Observation
Surgical procedure	Bilateral MR recession	MR recession + LR resection (RE)	Bilateral MR recession
Time to surgery	6 months	6 months	6 months
Postoperative alignment	Orthotropia	Orthotropia	Orthotropia
Diplopia (post-op)	Resolved	Resolved	Resolved
Stereopsis	Restored	Normal	Restored

Table 1.
Clinical Characteristics and Outcomes of Patients with AACE

DISCUSSION

Acute acquired comitant esotropia (AACE) represents a distinct subtype of esotropia characterized by sudden-onset comitant esodeviation accompanied by diplopia, with full ocular motility and no evidence of extraocular muscle paresis. It is more commonly observed in older children and adolescents, although its exact pathophysiology remains incompletely understood [2-4,8].

In recent years, increasing attention has been given to the possible association between AACE and prolonged near work, particularly excessive smartphone use [1,5,6,8]. Sustained viewing of near objects may increase convergence demand and disrupt the balance between accommodation and vergence mechanisms. It has been suggested that prolonged near fixation may lead to increased tonic activity of the medial rectus muscles, potentially contributing to the development of esodeviation. Additionally, accommodative dysfunction or fatigue may further exacerbate this imbalance [6,8].

In the present case series, all three patients had a history of prolonged daily use of electronic devices prior to the onset of symptoms, suggesting a temporal association between excessive near work and the development of AACE. However, given the small number of cases and the observational nature of this study, a causal relationship cannot be established.

Another important consideration in patients presenting with AACE is the exclusion of underlying neurological pathology. Although most cases are benign, AACE may rarely be associated with intracranial disease [2,7,9]. Therefore, thorough ophthalmological and neurological evaluation is essential. Neuroimaging, particularly magnetic resonance imaging (MRI), is often recommended to rule out central causes; however, the optimal indications and timing for imaging remain controversial, as no single clinical feature reliably predicts intracranial pathology [7,9].

The management of AACE remains individualized. While some patients may benefit from conservative measures such as reduction of near work, refractive correction, or orthoptic therapy, stable deviations often require surgical intervention [2,7,8]. In our series, all patients underwent surgery after a period of observation, achieving excellent motor and sensory outcomes, including orthotropia, resolution of diplopia, and restoration of binocular function.

This study has several limitations. The small sample size, absence of a control group, and reliance on patient-reported screen time limit the ability to draw definitive conclusions. Furthermore, the observational design precludes establishing a causal relationship between smartphone use and AACE. Future studies with larger cohorts and controlled designs are needed to better elucidate the underlying mechanisms and risk factors.

CONCLUSION

Excessive smartphone use may be temporally associated with the development of acute acquired comitant esotropia (AACE), although a causal relationship cannot be established based on the present findings. The increasing incidence of AACE in recent years underscores the need for further studies to better understand its underlying mechanisms and risk factors.

Surgical management of AACE provides excellent motor and sensory outcomes, with restoration of ocular alignment, resolution of diplopia, and recovery of binocular function. In cases with stable deviation, surgical intervention should be considered after an appropriate period of observation.

NOTES ON PATIENT CONSENT

The study adhered to the principles of the Declaration of Helsinki. Written informed consent for publication of clinical data and images was obtained from the parents/legal guardians of all patients included in this case series. All identifying personal information was omitted to ensure patient anonymity and confidentiality.

REFERENCES

1. Kim JM, Shin J, Lee YH, Lee YH. Clinical features and change in incidence of acute acquired comitant esotropia: a 15-year single-centre study in South Korea. *Eye (Lond)*. 2024 Jun;38(8):1529-1534. doi: 10.1038/s41433-024-02945-1. Epub 2024 Feb 1. PMID: 38302534; PMCID: PMC11126407.
2. Lekskul A, Chotkajornkiat N, Wuthisiri W, Tangtammaruk P. Acute Acquired Comitant Esotropia: Etiology, Clinical Course, and Management. *Clin Ophthalmol*. 2021 Apr 15;15:1567-1572. doi: 10.2147/OPTH.S307951. PMID: 33883873; PMCID: PMC8055253.
3. BURIAN HM, MILLER JE. Comitant convergent strabismus with acute onset. *Am J Ophthalmol*. 1958 Apr;45(4 Pt 2):55-64. doi: 10.1016/0002-9394(58)90223-x. PMID: 13520873.
4. Buch H, Vinding T. Acute acquired comitant esotropia of childhood: a classification based on 48 children. *Acta Ophthalmol*. 2015 Sep;93(6):568-74. doi: 10.1111/aos.12730. Epub 2015 May 20. PMID: 25989866.
5. Okita Y, Kimura A, Masuda A, Mochizuki Y, Kondo M, Yamadera K, Gomi F. Yearly changes in cases of acute acquired comitant esotropia during a 12-year period. *Graefes Arch Clin Exp*

- Ophthalmol. 2023 Sep;261(9):2661-2668. doi: 10.1007/s00417-023-06047-8. Epub 2023 Apr 17. PMID: 37067584; PMCID: PMC10107582.
6. Lee HS, Park SW, Heo H. Acute acquired comitant esotropia related to excessive Smartphone use. BMC Ophthalmol. 2016 Apr 9;16:37. doi: 10.1186/s12886-016-0213-5. PMID: 27061181; PMCID: PMC4826517.
 7. Wen W, Farzavandi SK, Sato M, Quah BL, Ko ST, Surendran TS, Wang AG, Hwang JM, Sitorus RS, Dai S, Zhang W, Zhao K, Yam JC, Martin F, Zhao C. Clinical practices on acute acquired comitant esotropia: A consensus statement proposed by the Council of Asia-Pacific Strabismus and Pediatric Ophthalmology Society. Asia Pac J Ophthalmol (Phila). 2025 Jan-Feb;14(1):100134. doi: 10.1016/j.apjo.2025.100134. Epub 2025 Jan 11. PMID: 39805428.
 8. Nishikawa N, Sato M. Acute acquired comitant esotropia: Current understanding of its etiological classification and treatment strategies. Taiwan J Ophthalmol. 2024 Jan 11;15(1):79-87. doi: 10.4103/tjo.TJO-D-23-00084. PMID: 40213304; PMCID: PMC11981569.
 9. Montriwet M. Possibility of Neurological Diseases Associated with Acute Acquired Comitant Esotropia. Korean J Ophthalmol. 2023 Apr;37(2):120-127. doi: 10.3341/kjo.2022.0112. Epub 2023 Feb 9. PMID: 36758536; PMCID: PMC10151165.

მწვავე შეძენილი შეუღლებული ეზოტროპია და ციფრული მოწყობილობების ჭარბი მოხმარება ბავშვებში: სამი კლინიკური შემთხვევის აღწერა

მანანა კიკოლაშვილი^{1,2}, ნინო ნიკურაძე¹, გიგი გორგაძე¹

¹ თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი, თბილისი, საქართველო

² თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტის გივი ჟვანიას სახელობის პედიატრიული აკადემიური კლინიკა, თბილისი, საქართველო

მწვავე შეძენილი შეუღლებული ეზოტროპია სიელმის იშვიათი ფორმაა, რომელიც ხასიათდება თვალის უეცარი გადახრით და დიპლოპიით (მხედველობის გაორებით). ბოლო წლებში აღინიშნება ამ მდგომარეობის სიხშირის ზრდა ბავშვებსა და მოზარდებში, რაც სავარაუდოდ, დაკავშირებულია ციფრული მოწყობილობების ხანგრძლივ და ინტენსიურ გამოყენებასთან.

წინამდებარე ნაშრომში წარმოდგენილია 8–12 წლის ასაკის სამი პაციენტის კლინიკური შემთხვევა, რომელთაც მწვავე შეძენილი შეუღლებული ეზოტროპია და დიპლოპია განუვითარდათ ელექტრონული მოწყობილობების გადაჭარბებული გამოყენების შემდეგ (≥ 4 საათი). კლინიკურმა გამოკვლევამ ყველა შემთხვევაში გამოავლინა თვალის შეუზღუდავი მოძრაობა და ნევროლოგიური პათოლოგიის არარსებობა, ხოლო გადახრის კუთხე მერყეობდა 30 დან 55 პრიზმულ დიოპტრიამდე.

პაციენტებს თავდაპირველად უტარდებოდათ დინამიკური დაკვირვება, ხოლო გადახრის მაჩვენებლების სტაბილიზაციის შემდეგ ჩატარდა ქირურგიული მკურნალობა. ოპერაციული ჩარევა მოიცავდა მედიალური სწორი კუნთების ორმხრივ რეცესიას ან ცალმხრივ რეცესია-რეზექციას.

ოპერაციის შემდგომ ყველა პაციენტთან მიღწეულ იქნა ორთოფორია, სრულად აღმოიფხვრა დიპლოპია და აღდგა სტერეოსკოპიული მხედველობა. მიუხედავად იმისა, რომ ციფრული მოწყობილობების ჭარბ გამოყენებასა და მწვავე შეძენილი შეუღლებული ეზოტროპიის განვითარებას შორის შეინიშნება დროებითი კავშირი, მათი მიზეზ-შედეგობრივი ურთიერთობა ჯერ კიდევ საჭიროებს დამატებით შესწავლას. ამასთან, ქირურგიული მკურნალობა ეფექტურ მეთოდად რჩება თვალის სწორი მდებარეობისა და ბინოკულარული ფუნქციის აღსადგენად.

საკვანძო სიტყვები: მწვავე შეძენილი შეუღლებული ეზოტროპია, ციფრული მოწყობილობები, დიპლოპია, პედიატრიული ოფთალმოლოგია, სიელმის ქირურგია, სტერეომხედველობა.

მსხვილფეხა რქოსანი საქონლის დაავადებათა ზოგადი პროფილაქტიკური ვეტერინარულ-ჰიგიენური ღონისძიებების მნიშვნელობა თანამედროვე ეკოლოგიური გამოწვევების რეალობაში

კობა მიქაძე¹, მაია კერესელიძე², ნინო მილაშვილი³, რუსუდან ურიდია⁴, მარიკა
ბოკუჩავა⁵, მარინე მაწკეპლაძე⁶

¹შპს ევროპის უნივერსიტეტი, ასოცირებული პროფესორი, mikadze.koba@eu.edu.ge;

²შპს ევროპის უნივერსიტეტი, პროფესორი, maia.kereselidze@eu.edu.ge, (+995) 591 195 115;

³სსიპ სამცხე-ჯავახეთის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, პროფესორი, n.milashvili@gmail.com

⁴შპს ევროპის უნივერსიტეტი, ასოცირებული პროფესორი, rusudan.uridia@eu.edu.ge orcid ID:
0009-0002-0685-2813;

⁵შპს ევროპის უნივერსიტეტი, ასისტენტ-პროფესორი, marika.bokuchava@eu.edu.ge;

⁶შპს ევროპის უნივერსიტეტი, ასოცირებული პროფესორი, matskepladze.marine@eu.edu.ge.

რეზიუმე

მსხვილფეხა რქოსანი საქონლის ჯანმრთელობის შენარჩუნების, პროდუქტიულობის გაზრდისა და ზოონოზური დაავადებების პრევენციის უმნიშვნელოვანეს საფუძველს წარმოადგენს პროფილაქტიკური ვეტერინარულ-ჰიგიენური ღონისძიებების კომპლექსური განხორციელება, რაც თანამედროვე ეკოლოგიური გამოწვევების პირობებში განსაკუთრებით მნიშვნელოვან იქნება და სრულად ეხმიანება “One Health”-ის კონცეფციის პრინციპებს.

სავეტერინარო ჰიგიენა შეიმუშავებს ორგანიზმზე გარემოს მავნე ფაქტორების ზემოქმედების შესუსტებისა და მათგან დაცვის ღონისძიებებს. ასეთი ღონისძიებების პრაქტიკაში გატარება განაპირობებს ცხოველების გარემომცველი არეს ოპტიმიზაციას. ვეტერინარულ-ჰიგიენური კვლევები, წესები და ნორმატიული რეგლამენტები, კერძოდ მოვლა-შენახვის, კვების, ექსპლუატაციის მართებული პრინციპების და სხვა ასპექტების დაცვა-გამოყენება უზრუნველყოფს ცხოველების ჯანმრთელობის გაუმჯობესებას, სიკვდილიანობის შემცირებას, პროდუქტიულობის ამაღლებას, ზოგად კეთილდღეობას და ამასთანავე გარემომცველი არეს - ჰაერის, ნიადაგის, წყლის ეკოლოგიურ უსაფრთხოებას.

საკვანძო სიტყვები: ვეტერინარია, ჰიგიენა, სანიტარია, ეკოლოგია, მსხვილფეხა რქოსანი, დაავადებები, პრევენცია, ცხოველთა კეთილდღეობა.

გარემოს ეკოლოგიური სიტუაციის გაუმჯობესების აუცილებლობა თანამედროვე რეალობის უმთავრესი გამოწვევაა. მეცნიერულად დასაბუთებულია, რომ ორგანიზმის ცხოველმყოფელობასა და განვითარებაზე დიდ გავლენას ახდენს გარემომცველი არე, მისი ბუნებრივ-კლიმატური, მოვლა-შენახვის, კვებისა და სხვა ფაქტორები. აუცილებელია, ცხოველის ორგანიზმი უზრუნველყოფილი იყოს კვებისა და შენახვის ისეთი პირობებით, რომლებიც შეესატყვისებიან მის მემკვიდრულ თავისებურებებს. მეცხოველეობის ეფექტიანობის მისაღწევად საჭიროა გარემო არეს ოპტიმიზაცია. ამ პროცესში გარდა მემკვიდრული - ჯიშობრივი მომენტებისა უნდა გავითვალისწინოთ ორგანიზმის ფიზიოლოგიური მდგომარეობა სიცოცხლის სხვადასხვა მომენტისათვის [1].

არსებული კონკრეტულ ბუნებრივ - ეკონომიკური პირობებისა და საქონლის ბიოლოგიური თავისებურების მართებული კონკრეტული გააზრება განაპირობებს რძისა და ხორცის წარმოების ტექნოლოგიური მეთოდების სწორად შერჩევა-გადაწყვეტას. ამგვარი კომპლექსური მიდგომა საშუალებას გვაძლევს შევუქმნათ ორგანიზმს ხელსაყრელი პირობები სასურველი - მიზნობრივი ნიშან-თვისებების ჩამოსაყალიბებლად და გამოსავლენად. მხოლოდ ამგვარი მიდგომებით ექნება ფერმერს შესაძლებლობა სრულად და მაქსიმალურად გამოიყენოს საქონლის პროდუქტიული პოტენციალი - მიაღწიოს ბიზნეს-გეგმით დასახულ შედეგებს [3].

ცხოველების და გარემომცველი არეს ურთიერთქმედებების გარკვევა, მათი კვების, მოვლა-შენახვის და ექსპლუატაციის ჰიგიენურ-ეკოლოგიური წესების, ასევე სადგომების ჰიგიენური პარამეტრების, საზაფხულო შენახვის, ჯანსაღი მოზარდეულის გამოზრდის ტექნოლოგიის დამუშავება და გაუმჯობესება ზოონოზების გავრცელების პრევენციის ცხოველების ჯანმრთელობისა და პროდუქტიულობის გაუმჯობესების საწინდარია. ამასთანავე თანამედროვე მსოფლიოსა და ევროპის კონტინენტისათვის დღითი-დღე იზრდება ისეთი პრობლემების აქტუალობა როგორც: მაღალპროდუქტიული ნახირის კეთილდღეობის უზრუნველყოფა, ფერმებისა და მიმდებარე გარემოს უსაფრთხოების ეკოლოგიური მოთხოვნების მონიტორინგი და ოპტიმიზაცია. აღნიშნული და სხვა პრევენციული საკითხების დამუშავება-დანერგვის გარეშე წარმოუდგენელია ადამიანის სურსათის უსაფრთხოების პრობლემის გადაჭრა ევროპული ბაზრის მოთხოვნების თანხვედრით.

საქართველოს ფერმერულ მეურნეობებში დასაქმებულ მუშაკებს გაცნობიერებული უნდა ჰქონდეთ ცხოველების მოვლა-შენახვის, კვების, ექსპლუატაციის რაციონალური წესები და მეთოდები; ფლობდნენ მიკროკლიმატისა და სხვა პირობების ოპტიმიზაციის, ისეთი ზოგადი არასპეციფიკური სანიტარიულ-ჰიგიენური პროფილაქტიკური ღონისძიებების შესრულების უნარ-ჩვევებს, რომლებიც განაპირობებენ ორგანიზმის ჯანმრთელობის სტატუსის გაუმჯობესებასა და პროდუქტიულობის ამაღლებას [2].

მეცხოველეობის ეფექტიანობის აუცილებელ პირობას წარმოადგენს გარემო არეს ოპტიმიზაცია, ისეთი პირობების შექმნა, რომლებიც როგორც ავლნიშნეთ სრულად

შეესატყვისებიან ცხოველის მემკვიდრულ თავისებურებებსა და მოთხოვნებს. ოპტიმიზაცია-კეთილდღეობის უზრუნველყოფის პროცესში მემკვიდრულთან ერთად გასათვალისწინებელია ორგანიზმის ფიზიოლოგიური მდგომარეობა. ამგვარი კომპლექსური მიდგომა საშუალებას გვაძლევს შევუქმნათ ორგანიზმს საჭირო პირობები სასურველი-მაქსიმალური პროდუქტიული და სხვა ნიშან-თვისებების გამოსავლენად.

ზემოთ აღნიშნული რეალობის კვალობაზე მსხვილფეხა რქოსანი საქონლის დაავადებათა ზოგადი პროფილაქტიკური ვეტერინარულ-ჰიგიენური ღონისძიებების დამუშავება უნდა ხდებოდეს შემდეგი ძირითადი მაპროფილებელი მიმართულებებით */კვლევების ძირითადი ამოცანები*:

- საქართველოს მერძეული ფერმერული მეურნეობებისათვის ფერმების ზოგადი ჰიგიენური უსაფრთხოების გასაუმჯობესებელი ღონისძიებების დამუშავება და გატარება. მაღალპროდუქტიული ნახირის კეთილდღეობის უზრუნველყოფა: სპეციალური ნაგებობების: საკარანტინო, იზოლატორის, სამშობიარო სადგომების, სახბორე-პროფილაქტორიუმების და სხვა ტექნოლოგიური ობიექტების მოწყობა. ამასთანავე რაციონული, დაბალანსებული კვებისა და მოვლა-შენახვის წესებისა და მოთხოვნების დაცვა.
- ჰიგიენურ-სანიტარიული და ეკოლოგიური ღონისძიებების დამუშავება და გატარება ჯანსაღი, ეკოლოგიურად უსაფრთხო მაღალხარისხიანი რძის მისაღებად, კეთილდღეობის უზრუნველყოფის ღონისძიებები ისეთი გავრცელებული პათოლოგიის პრევენციისათვის, როგორიცაა მასტიტი და სხვა დაავადებები.
- ჰიგიენური და ეკოლოგიური ღონისძიებების დამუშავება და გატარება ჯანმრთელი მოზარდეულის (სარემონტო მოზარდის) მიღება-გამოზრდისათვის; - თანამედროვე ინტენსიური გამოზრდის ტექნოლოგიების შერჩევა - ზონალურ-კლიმატური კონკრეტიკის გათვალისწინებით ნახირის დისპანსერიზაციის ორგანიზაცია (მთავარი სასიცოცხლო ფუნქციების კვლევები, ფიზიოლოგიური, ქცევითი და რეზისტენტული სტატუსის მონიტორინგი) ცხოველთა გადამდები და არაგადამდები პათოლოგიების ეფექტური პრევენციის მისაღწევად.
- პრაქტიკოსი ვეტერინარებისა და მეცხოველე-ფერმერების კვალიფიკაციის ამაღლება ეკოლოგიური - ბუნებისდაცვითი საქმიანობის ძირითად კანონებისა და მოთხოვნების გაცნობიერების და ყოველდღიურ საქმიანობაში გამოყენების მიზნით [2].

კვლევის შედეგები

აღნიშნული ამოცანების მეცნიერულად დამუშავებით და მიღებული შედეგების პრაქტიკაში დანერგვით შესაძლებელი გახდება ვეტერინარმა და მეცხოველე სპეციალისტებმა უშუალოდ შეძლონ რაციონალური უნარ-ჩვევების, ჰიგიენური-ზოგადი პროფილაქტიკური ტექნოლოგიური ასპექტების გამოყენება, რომლებიც

განაპირობებენ ჯანმრთელი - პროდუქტიული ნაყოფის მიღებისა და გამოზრდის, რძის წარმოების და სხვა ტექნოლოგიური პროცესების მაღალი -ჰიგიენურ- სანიტარული დონის უზრუნველყოფას.

პრაქტიკოსი ვეტერინარები და მეცხოველე-ფერმერები ეკოლოგიური კუთხით გააცნობიერებენ ბუნებისდაცვითი საქმიანობის ძირითად კანონებსა და მოთხოვნებს; დაეუფლებიან მეცხოველეობის ფერმებში უსაფრთხო მუშაობისათვის საჭირო უნარ-ჩვევებს - ეკოლოგიური საფრთხის დადგენის-მონიტორინგის მეთოდებს; ასევე გარემოს დაცვისა და ბუნებრივი რესურსებით სარგებლობის, ბიომრავალფეროვნების პრინციპების დაცვის უზრუნველყოფის ღონისძიებებს. საბოლოო ჯამში მიღწეული იქნება, ერთის მხრივ უსაფრთხო ეკოლოგიური პროდუქციის წარმოება და მეორეს მხრივ, მეცხოველეობის წარმოების ნარჩენებისგან გარემოს ეკოლოგიური დაბინძურების პრევენცია, რაც ერთ-ერთი უპირველსი ეკოლოგიური გამოწვევაა თანამედროვე მსოფლიოში.

ჩვენში არსებული ბუნებრივ-კლიმატური პირობებისა და მოშენებული საქონლის ბიოლოგიური თავისებურებების მართებული ანალიზი განაპირობებს რძისა და ხორცის წარმოების ამა თუ იმ ტექნოლოგიის სწორად შერჩევას, რეალიზებადი ბიზნეს გეგმების შემუშავებას და განხორციელებას.

სწორად ორგანიზებული მომთაბარეობის პირობებში მნიშვნელოვანი შედეგების მიღწევაა შესაძლებელი. მაგალითად წარმოებული რძის თვითღირებულება მცირდება 50%-მდე, უმჯობესდება ორგანიზმის ფიზიოლოგიური სტატუსი: რეგულირდება პულსი, სუნთქვის სიხშირე, სისხლში მატულობს ჰემოგლობინისა და ერითროციტების რაოდენობა 10-20 %-ით, 11,5 %-ით მცირდება არაგადამდები დაავადებები. თანამედროვე პროგრესული ტექნოლოგიების გამოყენებით, ტრადიციულთან შედარებით, მერძეული პროდუქტიულობა იზრდება 15,5 %-ით, სადღეღამისო წონამატი - 45,5 %-ით, თვითღირებულება 47,5%-ით ნაკლებია. ეს მაჩვენებლები ჩვენი მრავალწლიანი მეცნიერული კვლევების შედეგებზეა დამყარებული და მსოფლიოს სხვადასხვა ქვეყნების ვეტერინარ მეცნიერების მონაცემებთან თანხვედრაშია.

განსაკუთრებით უნდა აღინიშნოს ცხოველთა გადამდები დაავადებების წარმოშობისა და გავრცელების ანალიზი, რის მიხედვითაც ინფექციური კერების 90 % - ზე მეტი მოდის ისეთ ფერმებზე, სადაც დაბალია სანიტარული კულტურა, დარღვეულია მოვლა-შენახვის ჰიგიენურ - სანიტარული რეგლამენტები. ჩვენში არსებულ ფერმებში ინფექციების ქრონიკული მიმდინარეობით გამოირჩეოდა ის ფერმები, სადაც იგნორირებული იყო სანიტარული კეთილსაიმედოობის დაცვა, არ ხდებოდა ნაკელის ეფექტური გაუვნებლობა (ნაკელსაცავების გაუმართაობის გამო), არ იყო პირობები სარემონტო მოზარდის იზოლირებული გამოზრდისთვის, სამოვარზე გადარეკის და მომთაბარეობის პროცესში დარღვეული იყო ჰიგიენურ-სანიტარული რეგლამენტური მოთხოვნები.

ყოველივე აღნიშნული დარღვევების აღმოფხვრისა და პროგრესული ტექნოლოგიების დანერგვის შედეგად, როდესაც ჩვენი ქვეყანა მრეწველობის

მასშტაბებით უახლოვდებოდა განვითარებული ქვეყნების დონეს, კერძოდ გასული საუკუნის მიწურულის ხუთწლიან პერიოდში ტუბერკულოზისა და ბრუცელოზისაგან ფერმების გაჯანსაღებით საქართველოს მხოლოდ ერთი რეგიონის მეურნეობებში შესაძლებელი გახდა მეცხოველეობის პროდუქტების წარმოების და რეალიზაციის დანაკარგების შემცირება. ამადღა წარმოებული პროდუქციის ეკოლოგიურ-ჰიგიენური მაჩვენებლებიცა და გაიზარდა ფერმების ეკონომიკური ეფექტურობაც.

მერძვეობის ფერმებში ფურების შენახვა ტრადიციულად ხდება ძირითადად ორი ხერხით: დაბმულად და დაუბმელად. თითოეული მათგანი ხასიათდება როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი თავისებურებებით. ბევრ ცივილიზებულ ქვეყანაში გავრცელებულია ცხოველების დაუბმელი შენახვა, რომელიც უახლოვდება ცხოველების მოშენებისა და შენახვის ბუნებრივ პირობებს: თავისუფალი მოძრაობა, მოციონი აქტიობა და ა.შ. ასევე ეს ხერხი ესადაგება ცხოველების უფლებების დაცვის სადღეისოდ აქტუალურ მოთხოვნებს, რაც ასახულია ევროპულ და სხვა ცივილიზირებულ ქვეყნების საერთაშორისო კონვენციებში. აქ ისიც უნდა ითქვას, რომ დაუბმელი შენახვა საჭიროებს უფრო მკვიდრად ნაგებ კაპიტალურ შენობებს, მყარი იატაკით, საკვები და საწყურებელი დანადგარებით, რეგულირებადი მიკროკლიმატით, მექანიზაციის მაღალი დონით, გარე შენახვის ეზოებითა და მოედნებით.

პროგრესული დაუბმელი შენახვის ტექნოლოგია ითვალისწინებს შესაძლებლობებს ჯგუფებში ცხოველების სათანადოდ შერჩევას სხვადასხვა კრიტერიუმების გათვალისწინებით-თითქმის ანალოგიის პრინციპით , ქცევითი თავისებურებების, რანგობრივი სტრესების მინიმიზაციას, ინტენსიურ მონიტორინგს ჯანმრთელობის მხრივ, განსაკუთრებით ცურის მდგომარეობის კონტროლს მასტიტების ადრეული გამოვლენის მიზნით. ამით ხდება როგორც სასაქონლო რძის გეგმიური მონაცემების დაცვა, ასევე მოზარდეულის ჯანმრთელობის უზრუნველყოფა-დაავადებული ხსენითა და რძით კვების პრევენციით. ამ მიმართულებით გათვალისწინებული უნდა იყოს მერძეული ფერმების ეკონომიკური და ეკოლოგიური მაჩვენებლების პოზიტიურ შედეგებზე გასვლა. დასახული ამოცანა მიზნად ისახავს შესწავლილი იქნეს ფურების დაუბმელი შენახვის ზემოქმედება ორგანიზმის რეზისტენტობაზე, პროდუქტიულობასა და აღწარმოებაზე. შერჩეული იქნას დაუბმელი შენახვის ტექნოლოგიური პარამეტრები კონკრეტული მეცხოველეობის ფერმისათვის.

დასკვნა:

1. საქართველოს უმთავრესი რეგიონებისათვის თანამედროვე ვეტერინარული და ეკოლოგიური გამოწვევების სინამდვილეში სულ უფრო აქტუალური ხდება მსხვილფეხა რქოსანი საქონლის დაავადებათა ზოგადი პროფილაქტიკური ვეტერინარულ-ჰიგიენური ღონისძიებების მნიშვნელობა. მათი მეცნიერული დამუშავება-დანერგვა ერთ-ერთი მთავარი წინაპირობაა მაღალპროდუქტიული ნახირის კეთილდღეობის უზრუნველყოფისა.

2. ფერმებში ცხოველების კეთილდღეობის მისაღწევად აუცილებელია ჰიგიენურ-სანიტარული და ეკოლოგიური ღონისძიებების განხორციელება-მეცხოველეობის ობიექტების ფუნქციონირება „დახურული რეჟიმით“, სპეციალური ნაგებობების მოწყობა: სანიტარული გამტარი (შესვლა-გასვლის საკონტროლოდ), საკარანტინო, იზოლატორი-ავადმყოფებისათვის, სამშობიარო სადგომები, სახბორე-პროფილაქტორიუმები და სხვა ტექნოლოგიური სათავსოები. ამასთანავე დაბალანსებული კვების რეჟიმების დაცვა და ცხოველების შენახვის რაციონალური სისტემების შერჩევა.
3. ცხოველთა კეთილდღეობის უზრუნველყოფისთვის საჭიროა:
 - ჰიგიენურ-სანიტარული ღონისძიებების დამუშავება და გატარება ჯანსაღი, ეკოლოგიურად უსაფრთხო მაღალხარისხიანი რძის მისაღებად, დისპანსერიზაცია - ისეთი გავრცელებული პათოლოგიის პრევენცია, როგორიცაა მასტიტი და სხვა დაავადებები;
 - ჯანმრთელი მოზარდეულის მიღება-გამოზრდისათვის საჭირო თანამედროვე ინტენსიური გამოზრდის ტექნოლოგიების შერჩევა ზონალურ-კლიმატური კონკრეტიკის გათვლისწინებით;
 - პრაქტიკოსი ვეტერინარებისა და მეცხოველე-ფერმერების კვალიფიკაციის ამაღლება ეკოლოგიური - ბუნებისდაცვითი საქმიანობის ძირითადი კანონებისა და მოთხოვნების გაცნობიერების და ყოველდღიურ საქმიანობაში გამოყენების მიზნი.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. Renault V., Humblet M.F., Pham P.N., Saegerman C. (2021). Biosecurity at Cattle Farms: Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats Pathogens, 10 (10): 1315.
2. Milirzer N. et.al. (2023). Charaterising Biosecurity Initiatives Globally to Support the Development of a Progressive Management Pathway for Terrestrial Animals. Animals, 13 (16): 2672
3. Gauly M., Ammer S. (2020) Review: Challenges for Dairy Cow Production Systems Arising from Climate Changes, Animal, 14 (S1): S196-S203.

The importance of general preventive veterinary and hygienic measures for cattle diseases in the reality of modern ecological challenges

Koba Mikadze - European University Ltd, Associate Professor mikadze.koba@eu.edu.ge;

Maia Kereselidze - European University Ltd, Professor maia.kereselidze@eu.edu.ge (+995) 591 195 115;

Nino Milashvili – Samtskhe – Javakheti State University LEPL, Professor n.milashvili@gmail.com;

Rusudan Uridia - European University Ltd, Associate Professor rusudan.uridia@eu.edu.ge

Orcid<https://orcid.org/0009-0002-0685-2813>;

Marika Bokuchava - European University Ltd, Assistant Professor marika.bokuchava@eu.edu.ge;

Marine Matskepladze - European University Ltd, Associate Professor, matskepladze.marine@eu.edu.ge.

Summary

The most important basis for maintaining the health of cattle, increasing productivity, and preventing zoonotic diseases is the comprehensive implementation of preventive veterinary and hygienic measures, which is especially important in the context of modern ecological challenges and fully reflects the principles of the “One Health” concept.

Veterinary hygiene develops measures to reduce the impact of harmful environmental factors on the body and protect against them. The implementation of such measures in practice leads to the optimization of the environment of animals. Veterinary-hygienic studies, rules and normative regulations, in particular the observance and use of correct principles of care, feeding, operation and other aspects, ensure the improvement of animal health, reduction of falls, increase in productivity, general well-being and, at the same time, the ecological safety of the environment - air, soil, water.

Keywords: veterinary medicine, hygiene, sanitation, ecology, cattle, diseases, prevention, animal welfare.