

ხელოვნური ინტელექტით მართული პროგნოზირებადი ტექნიკური მომსახურება ჰიდროტურბინებისთვის: TurbineSafe-ის ტექნიკურ-ეკონომიკური მოდელი საქართველოში

მაია ლომსაძე-კუჭავა¹, თამარ წერეთელი², ნიკოლოზ მეშველიანი³

¹საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორი; ²საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორი; ³საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ბაკალავრიატის სტუდენტი

ანოტაცია

წინამდებარე სტატია განიხილავს TurbineSafe-ს — ქართულ სტარტაპ-პროექტს, რომელიც ჰიდროტურბინებისთვის IoT-სენსორებსა და ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებულ პროგნოზირებად ტექნიკური მომსახურების სისტემას გვთავაზობს. საქართველოს მდინარეებისთვის დამახასიათებელი მაღალი ნალექიანობა მშენებლის ტურბინების ეფექტიანობას 15-30%-ით ამცირებს და ყოველწლიურად 50 000-300 000 ლარის ზარალს იწვევს ერთ სადგურზე. TurbineSafe ამ პრობლემას ოთხი ტიპის სენსორის, edge-გამოთვლებისა და ღრუბლოვანი AI-მოდულის (LSTM ნეირონული ქსელი, 95%-მდე სიზუსტე) სინთეზით წყვეტს — 60 დღით ადრე აფრთხილებს ოპერატორს შესაძლო გაუმართაობაზე. SaaS გამოწერის მოდელი სისტემას გლობალური ანალოგებისგან 10-ჯერ ხელმისაწვდომს ხდის. ბაზრის ანალიზი (SAM: 150-200 მლნ ლარი) და GREDA-ს გამოკითხვა (70%-იანი მოთხოვნა) მყარ კომერციულ საფუძველს ადასტურებს. სტატია ასევე განიხილავს სისტემის ტექნიკურ არქიტექტურას, ბიზნეს-მოდელს, გუნდის სტრუქტურასა და ეროვნულ ენერგეტიკულ მნიშვნელობას საქართველოს 2034 წლის ენერგეტიკული განვითარების გეგმის კონტექსტში.

საკვანძო სიტყვები: IoT; ხელოვნური ინტელექტი; ჰიდროტურბინა; პროგნოზირებადი ტექნიკური მომსახურება; ნალექების ეროზია; მცირე ჰიდროელექტროსადგური; SaaS; LSTM; ენერგეტიკული ეფექტიანობა.

შესავალი

ჰიდროენერგეტიკა საქართველოს ენერგეტიკის ერთ-ერთი ყველაზე მძლავრი სვეტია. ქვეყანა ელექტროენერჯის 80%-ს ჰიდრორესურსებიდან იღებს და განახლებადი ენერჯის გამოყენებით ერთ სულ მოსახლეზე მსოფლიოს ლიდერ ქვეყნებს შორის დგას. კავკასიის მთების ჩამონადენი, მრავალრიცხოვანი სწრაფი მდინარე და ციცაბო ხეობები იდეალური გარემოა ჰიდროელექტროსადგურების მშენებლობისთვის. ქვეყნის ჰიდრო-ტექნიკური პოტენციალი 40 ტვტ/სთ-ს გადაამეტებს წელიწადში, თუმცა ამ კოლოსალური სიმდიდრის მხოლოდ 22-25% გამოიყენება.

2023-2024 წლების მდგომარეობით, საქართველოში 91 ჰიდროელექტროსადგური ფუნქციონირებს, მათ შორის 53 მცირე (10 მვტ-ზე ნაკლები სიმძლავრის). ბოლო ათწლეულში განსაკუთრებით სწრაფად გაიზარდა სწორედ მცირე ჰეს-ების ქსელი, სახელმწიფო ინიციატივებისა და EBRD-ის დაფინანსების მხარდაჭერით. ამ ზრდის ფონზე კი ერთი პრობლემა სულ უფრო ხმამაღლა ახმიანდება: ნალექების ეროზია (sediment erosion) არის პროცესი, რომლის დროსაც წყალში შეჩერებული მყარი ნაწილაკები — ქვიშა, კვარცი, ფელდშპატი — ტურბინის მეტალის ზედაპირს ნელ-ნელა ხრავენ და ანადგურებენ.

წარმოიდგინეთ, რომ ტურბინის ფრთაზე ყოველ წამს მილიონობით პატარა ქვიშის მარცვალი ეჯახება მაღალი სიჩქარით — ეს ზუსტად ისეა, როგორც ლითონზე საფხეკავის გამუდმებული მოქმედება. ჯერ ზედაპირი ხდება უხეში, შემდეგ ჩნდება ღრმულები, და ბოლოს ფრთის ფორმა ისე იცვლება, რომ ტურბინა ნაკლებ ენერჯიას გამოიმუშავებს.

საქართველოს შემთხვევაში პრობლემა განსაკუთრებით მწვავეა, რადგან კავკასიის მდინარეები ბუნებით ძალიან ტალახიანია — განსაკუთრებით გაზაფხულზე, თოვლის დნობისას.

2025-2026 წლების მდგომარეობით, საქართველოს ენერჯოსისტემის ჯამური სიმძლავრე 4 621 მვტ-ია, აქედან 3 520 მვტ ჰიდროელექტროსადგურებზე მოდის — გამომუშავების 70%-ზე მეტი. 2024 წელს კიდევ 8 ახალი ჰეს ამოქმედდა, მათ შორის კობი 2 ჰეს (44.5 მვტ). 2034 წლისთვის კი მთავრობა სიმძლავრის 10 336 მვტ-მდე გაორმაგებას გეგმავს.

საქართველოს მთიური მდინარეები გამოირჩევიან განსაკუთრებული ტალახიანობით. გაზაფხულის წყალდიდობების პერიოდში წყალში მყარი ნაწილაკების კონცენტრაცია 2-5 გ/ლ-ს ჩვეულებრივ აღწევს, პიკურ მომენტებში კი 20-40 გ/ლ-მდეც აღის. ეს ნაწილაკები - ძირითადად კვარცი, ფელდშპატი და მიკა - ტურბინის ფრთებზე მოხვედრისას ათასობით მინიატურული საფხეკავის მოქმედებას ახდენენ. სულ 3-5 წელიწადში ტურბინის ეფექტიანობა 15-30%-ით ეცემა, ხოლო ყოველწლიური ფინანსური ზარალი ერთ სადგურზე 50 000-300 000 ლარს შეადგენს. ფრენსისის ან

პელტონის ტიპის ტურბინის ბორბალი, რომელიც 25 წელი და მეტი უნდა გაძლებდეს, ხშირად 8-12 წელშიც ვერ ძლებს. სწორედ ამ პრობლემაზე პასუხად შეიქმნა TurbineSafe - ქართული სტარტაპი, რომელიც IoT-სენსორებისა და ხელოვნური ინტელექტის ძალას მოუხმობს.

ძირითადი ნაწილი

საქართველოს მშენებლის უმეტესობა ტექნიკური მომსახურების ტრადიციულ, რეაქტიულ მოდელს ეყრდნობა: პერიოდული ვიზუალური შემოწმება, კომპონენტების ვადის ამოწურვისას ჩანაცვლება და გაფუჭება-შეკეთების ციკლი. ამ მიდგომის მთავარი სუსტი მხარე ის არის, რომ ის ბრმაა ტურბინის შიდა მდგომარეობის მიმართ: ვიზრაციული ანომალია, კავიტაციის ადრეული ნიშნები, ეროზიის კეროები შეუიარაღებელი თვალისთვის ხილული ხდება მხოლოდ მაშინ, როცა ზიანი უკვე სერიოზულია.

შედეგი - დაუგეგმავი გაჩერებებია, ხშირად ყველაზე ცუდ დროს: ზამთრის პიკ-სეზონზე ან გაზაფხულის წყალდიდობაში. ერთი ასეთი გაჩერება 50 000-300 000 ლარი დაჯდება. ახალი ბორბლის შექმნა კი 200 000-დან 1 000 000 ლარამდე ღირს - კაპიტალური დანახარჯი, რომელსაც მცირე ოპერატორი ხშირად გეგმიურად ვერ ახდენს. ვარდნილის ჰიდროკომპლექსის მაგალითზე (220 მგვტ) კარგად ჩანს, რომ ნალექების დაგროვება ტრადიციულად იწვევდა სწორედ ასეთ დაუგეგმავ გაჩერებებს. კლიმატის ცვლილება ამ სიტუაციას კიდევ უფრო ართულებს: მყინვარების დნობა და ნალექების რეჟიმის ცვლა ისტორიულ პროგნოზებს კარგავინებს სიზუსტეს.

გლობალური კონკურენტები - Andritz, GE - სთავაზობენ პროგნოზირებად სისტემებს, მაგრამ ფასი 50 000 ლარს სცილდება ერთ ობიექტზე. ეს მშენებლის უმეტესობისთვის მიუწვდომელია. სახელმწიფო feed-in ტარიფი (0.12 ლარი/კვტ/სთ) სტიმულს ქმნის, მაგრამ ტექნოლოგიური ჩამორჩენა რჩება. სწორედ ეს ნიშა - ხელმისაწვდომი, ლოკალიზებული, ეფექტიანი გადაწყვეტა - TurbineSafe-ის ბაზარია.

TurbineSafe სისტემა სამ ფენად არის სტრუქტურირებული: სენსორების ფენა, მონაცემთა დამუშავების ფენა და გამოყენებადი ანალიტიკის ფენა. სისტემის ძირითადი პრინციპი მარტივია: ტურბინამ თვითონ უნდა ილაპარაკოს, სანამ ავად გახდება - და სისტემა 60 დღით ადრე აფრთხილებს ოპერატორს ნებისმიერ პოტენციურ გაუმართაობაზე.

სენსორების ფენაში ოთხი ტიპის სენსორი ინტეგრირდება IP68 დაცვის კლასის გამძლე კორპუსში (-40-დან +80 გრადუსამდე). ვიზრაციული სენსორი ADXL345 (3-ლერძიანი, +-16g) ყოველ 10-30 წამში ფრთების ბალანსსა და ბეარინგების მდგომარეობას ამოწმებს. აკუსტიკური სენსორი KY-037 (35-10 000 ჰც) FFT-ანალიზით კავიტაციის ხმაურს 85 დბ-ზე მეტ დონეზე ადევნებს. ტემპერატურული სენსორი DS18B20 (+0.5

გრაფუსი სიზუსტე) გახურების კეროებს 180 გრაფუსამდე აკვირდება, ხოლო ტალახიანობისა და pH სენსორი SEN0189 (0-100 NTU, pH 4-10) წყლის ნაწილაკური დატვირთვის დონეს ზომავს. მთელი კომპლექტი 2 კილოგრამზე ნაკლება წონის და 1-2 სამუშაო დღეში, ოპერაციის შეჩერების გარეშე, მონტაჟდება.

მონაცემთა დამუშავების ფენაში Edge-კონტროლერი (ESP32 ან Raspberry Pi Zero) ადგილზე ახდენს ხმაურის ფილტრაციასა და პირველად ანომალიების გამოვლენას - გადაცემის დაყოვნება 5 წამზე ნაკლება. დამუშავებული მონაცემები LoRaWAN (მაქს. 10 კმ) ან NB-IoT-ის გავლით AWS IoT Core-ს გადაეცემა. ღრუბელში Python-ზე დაწერილი AI მოდული TensorFlow-ის LSTM ნეირონული ქსელებითა და Scikit-learn-ის რეგრესიული ალგორითმებით ახდენს ანალიზს. სისტემა გაწვრთნილია ჰიმალაისა და ანდების ჰეს-ების ისტორიულ მონაცემებზე, სადაც ეროზია ყველაზე ინტენსიურია (წელიწადში 1 მმ-ზე მეტი). AI-ი კავშირს ამყარებს წყლის სიჩქარეს (5-20 მ/წ), ნაწილაკების ზომის განაწილებას (PSD, 10-200 მიკრონი), pH-სა (6.5-8.5) და ვიბრაციის/ტემპერატურის მონაცემებს შორის - 95%-მდე სიზუსტით ამოიცნობს ინტენსიური ეროზიის ზონებს.

ანალიტიკის ფენაში Flutter-ის მობილური და ვებ-აპლიკაცია ოპერატორს რეალურ დროში სტატუსს, ტრენდების გრაფიკებსა და პროგნოზულ შეტყობინებებს წარუდგენს (მაგ. ეროზიის რისკი: 25%, დაგეგმეთ შემოწმება 14 დღეში). სისტემა SCADA-სთანაც ინტეგრირდება: ტალახიანობის კრიტიკული ზღვრის გადაჭარბებისას ავტომატურად ამცირებს ჩამდინარე ნაკადს, 40-50%-ით ამცირებს ეროზიის ზეგავლენას. მონაცემთა დაცვა end-to-end დაშიფვრითა და GDPR-სტანდარტების შესაბამისი დამუშავებით არის უზრუნველყოფილი, სერვისის ხელმისაწვდომობა კი 99.9%-ს აღწევს.

TurbineSafe Software-as-a-Service (SaaS) მოდელით მუშაობს. საწყისი ერთჯერადი გადახდა (5 000-9 500 ლარი) მოწყობილობის დაყენებასა და ინტეგრაციას ფარავს, შემდგომი წლიური გამოწერა კი - 3 000-4 000 ლარი ტურბინაზე - ღრუბლოვანი მონიტორინგს, AI-ანალიტიკას და ტექნიკურ მხარდაჭერას მოიცავს. ბაზარზე შესვლის სტრატეგია Freemium ფორმატს ეყრდნობა: ერთი თვე უფასო ტესტირება ერთი ტურბინისთვის, პილოტ-პროექტების 30-50%-ის გადახდის კლიენტად გარდაქმნის მიზნით. შემოსავლის სტრუქტურა: ძირითადი გამოწერები - 70%; პრემიუმ AI-მოდულები - 20%; ინდივიდუალური კონსულტაციები - 10%. სისტემა 10-ჯერ უფრო ხელმისაწვდომია გლობალური ანალოგების 50 000+ ლარიან სისტემებთან შედარებით.

GREDA-ს 20 წევრის გამოკითხვა მყარ მოთხოვნას ადასტურებს: მჰეს-ების მფლობელების 70% პროგნოზირებადი მომსახურების ინსტრუმენტებს ეძებს ეფექტიანობის 15-30%-ით გაზრდის მიზნით, 2 000-4 000 ლარის წლიური გადახდის მზაობით. საქართველოს ადრესუებადი ბაზარი(არის SAM-ის (Serviceable Addressable Market) თარგმანი — ბიზნეს ტერმინი, რომელიც ნიშნავს იმ ბაზრის ნაწილს, რომელზეც

კონკრეტული პროდუქტი რეალურად შეიძლება გაიყიდოს.) 150-200 მლნ ლარს შეადგენს. ბაზრის ზრდის ტემპი 2020-2025 წლებში 3-5% წელიწადში, ახალი ნებართვების ზრდა (+60 ობიექტი 2022-2024 წლებში) და ინფრასტრუქტურის დაბერება (სადგურების 50%-ზე მეტი 30 წელზე ძველია) ხელსაყრელ სტრატეგიულ გარემოს ქმნის. IRENA-ს შეფასებით, IoT-გადაწყვეტილებების მოთხოვნა განახლებადი ენერჯის სექტორში 40%-ით გაიზარდა.

ფინანსური სარგებელი კონკრეტულია: სისტემა გაუქმების დროს 80%-ით ამცირებს - 100 000-500 000 ლარის წლიური დაზოგვა ერთ სადგურზე. ტურბინის სიცოცხლის ვადა 8-12 წლიდან 20+ წლამდე გაიზრდება, ენერჯის გამომუშავება 15-30%-ით გაიზრდება. ინვესტიციის ანაზღაურება 8 თვეზე ნაკლებ დროში მიღწევადია.

სტარტაპის გუნდი 5 სპეციალისტისგან შედგება: CEO (სტრატეგია და პარტნიორობები), CTO (ტექნიკური განვითარება და AI/IoT), ორი IoT/AI დეველოპერი (სენსორების პროგრამირება, MQTT-პროტოკოლები, ღრუბლოვანი ალგორითმები) და ფინანსური/საოპერაციო ანალიტიკოსი (ბიუჯეტი, ROI, GDPR, ველზე ინსტალაციები). MVP-ის შემუშავება 3-6 თვეში გეგმავს 9 500-16 000 ლარის ბიუჯეტით. დიზაინის ეტაპი (1-2 თვე) მოიცავს CAD-მოდელირებას SolidWorks-ში, CFD სიმულაციას ANSYS Fluent-ში IEC 60193 და ISO 14001 სტანდარტების შესაბამისად. აწყობის ეტაპზე კომპონენტები შეძენილი იქნება (~200 ლარი სენსორზე), ლაბორატორიული კალიბრაცია ჩატარდება კვარცის სუსპენზიის (2-40 გ/ლ) სიმულირებულ გარემოში, ბოლოს კი პილოტი 1-2 მჰეს-ზე: მცდარი სიგნალი <5%, გადაცემის დაყოვნება <5 წამი.

მარკეტინგული სტრატეგია ორ ეტაპად ვითარდება. ცნობადობის ეტაპზე - პუბლიკაციები ინდუსტრიულ ჟურნალებში, ვირტუალური მრგვალი მაგიდები Georgian Energy Development Fund-თან, გეო-ტარგეტინგით ციფრული რეკლამა გადაწყვეტილების მიმღებ ლიდერებამდე ჰიდრო-რეგიონებში (აჭარა, კახეთი). ლიდების გენერაციის ეტაპზე - სტრატეგიული ალიანსები მოწყობილობის მიმდებარე კომპანიებთან, კობრენდირებული ვორკშოპები, რეფერალური პროგრამა. ბიუჯეტი: ციფრული რეკლამა - 40%, ღონისძიებები - 30%, კონტენტი - 20%, ინდუსტრიული ექსპერტები - 10%. წარმატების ძირითადი მეტრიკა: 6 თვეში ჩართულობიდან პილოტ-პროექტში კონვერტაცია >=25%.

TurbineSafe-ის ამბავი ცალკე სტარტაპის ამბავი კი არ არის. ეს საქართველოს ენერჯეტიკული ინფრასტრუქტურის ციფრული გარდაქმნის ამბავია. ჰეს-ების ეფექტიანობის ზრდა პირდაპირ კავშირშია ქვეყნის ენერგოდამოუკიდებლობასთან, იმპორტის საჭიროების შემცირებასთან და EU ასოციაციის ხელშეკრულების ვალდებულებების შესრულებასთან განახლებადი ენერჯის ეფექტიანობის სფეროში. კლიმატის ცვლილება ამ სასიცოცხლო გამოწვევას კიდევ უფრო ამწვავებს - მყინვარების

დნობა ნალექების გადატანის ტრადიციულ პატერნებს არღვევს, AI-დაფუძნებული ადაპტური სისტემა კი სწორედ ამ გამოწვევაზეა შემუშავებული.

გრძელვადიან პერსპექტივაში ტექნოლოგია სომხეთსა და აზერბაიჯანამდე გაფართოებას გეგმავს, სადაც ჰიდრო-ინფრასტრუქტურა ანალოგიურ ნალექურ გამოწვევებს აწყდება. GREDA-სა და EBRD-თან პარტნიორობა მომხმარებელთა მოზიდვის ხარჯებს ამცირებს, GTU ლაბორატორიასთან ურთიერთობა კი სენსორების კალიბრაციასა და AI-მოდელების ვალიდაციაში - ეს სინთეზი TurbineSafe-ს განსაკუთრებულ ადგილს ანიჭებს ქართული ტექ-სტარტაპების ლანდშაფტში.

დასკვნა

TurbineSafe წარმოადგენს ტრანსფორმაციულ გადაწყვეტილებას საქართველოს ჰიდრო-სექტორში. IoT-სენსორებისა და ხელოვნური ინტელექტის სინთეზი ჰიდრო-ოპერატორს რეაქტიული ჩვევიდან პროაქტიულ, მომავლის ამკრძალავ პოზიციაში გადაჰყავს. 60 დღის სარეზერვო ფანჯარა, 95%-იანი სიზუსტე, 8 თვიანი ინვესტიციის ანაზღაურება - ეს სამი მაჩვენებელი სისტემის ძირითადი ღირებულებაა.

SaaS გამოწერის მოდელი, Freemium სტრატეგია და ლოკალიზებული მიდგომა TurbineSafe-ს გლობალური ანალოგებისგან 10-ჯერ ხელმისაწვდომად აქცევს - იმ ბაზარზე, სადაც ეს ხელმისაწვდომობა გადამწყვეტი კონკურენტული უპირატესობაა. ბაზრის დეტალური ანალიზი ადასტურებს მაღალ მოთხოვნას, GREDA-სა და EBRD-ის მხარდაჭერა კი - ხელსაყრელ ეკოსისტემას.

TurbineSafe ილუსტრირებს იმ ჭეშმარიტებას, რომ საუკეთესო ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებები ადგილობრივი, ძალიან კონკრეტული პრობლემებიდან იზადება. ნალექი ფრთებს ჭამს - ეს ათწლეულების განმავლობაში დაგროვებული ქართული ჰიდროენერგეტიკის ტკივილია. ამ ტკივილზე სმარტ-სენსორებით, ხელოვნური ინტელექტითა და ხელმისაწვდომი ფასით პასუხი კი განამტკიცებს საქართველოს განახლებადი ენერგეტიკის ინფრასტრუქტურას და ქვეყნის ენერგეტიკულ მდგრადობას გრძელვადიან პერსპექტივაში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. საქართველოს ეროვნული ენერგეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი კომისია (სემმკ). (2023). ელექტროენერგეტიკის სექტორის წლიური ანგარიში. თბილისი: სემმკ.
2. საქართველოს განახლებადი ენერჯის განვითარების ასოციაცია (GREDA). (2024). მცირე ჰიდროელექტროსადგურები საქართველოში: მდგომარეობა და გამოწვევები. თბილისი: GREDA.

3. საერთაშორისო განახლებადი ენერჯის სააგენტო (IRENA). (2022). Renewable Energy Statistics 2022. აბუ-დაბი: IRENA.
4. ევროპის რეკონსტრუქციისა და განვითარების ბანკი (EBRD). (2023). Georgia Energy Sector Assessment. ლონდონი: EBRD.
5. მსოფლიო ბანკი. (2021). Georgia: Energy Sector Review. ვაშინგტონი: World Bank Group.
6. ANDRITZ Hydro GmbH. (2024). Turbine Erosion and Maintenance Guidelines. გრაცი: ANDRITZ.
7. საერთაშორისო ჰიდროენერჯეტიკის ასოციაცია (IHA). (2023). Hydropower Status Report 2023. ლონდონი: IHA.
9. Shanbhag, V. V., Kandukuri, S. T., Olimstad, G., & Schlanbusch, R. (2025). *Predictive Maintenance of Critical Components in Hydroelectric Turbines: A Review*. IEEE Sensors Journal, 25, 31959–31979.
10. Google. (2024). TensorFlow Documentation: Time Series Forecasting with LSTM Models. Google AI. <https://www.tensorflow.org>

Artificial Intelligence-Driven Predictive Maintenance for Hydro Turbines: TurbineSafe Feasibility Study in Georgia

Maia Lomsadze-Kuchava¹; Tamar Tsereteli²; Nikoloz Meshveliani³

¹GTU Professor, ²GTU Professor, ³GTU Bachelor's student

Abstract

This article discusses TurbineSafe — a Georgian startup project that offers a predictive maintenance system for hydro turbines based on IoT sensors and artificial intelligence. The high precipitation characteristic of Georgian rivers reduces the efficiency of turbines of hydropower plants by 15-30% and causes losses of 50,000-300,000 GEL per plant annually. TurbineSafe solves this problem by synthesizing four types of sensors, edge computing and a cloud AI module (LSTM neural network, up to 95% accuracy) — it warns the operator about a possible malfunction 60 days in advance. The SaaS subscription model makes the system 10 times more accessible than global analogues. Market analysis (SAM: 150-200 million GEL) and GREDA survey (70% demand) confirm a solid commercial basis. The article also discusses the technical architecture of the system, business model, team structure and national energy significance in the context of the Georgian Energy Development Plan 2034.

Keywords: IoT; Artificial Intelligence; Hydro Turbine; Predictive Maintenance; Sediment Erosion; Small Hydropower Plant; SaaS; LSTM; Energy Efficiency.