

## ალტერნატიული ენერჯის ახალი ეპოქა, გლობალური მიღწევები და მათი მნიშვნელობა საქართველოსთვის

ნინო გიორგიშვილი<sup>1</sup>; ანდრია კაიკაციშვილი<sup>2</sup>; ზურაბ კუტიბაშვილი<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ენერგეტიკისა და ელექტროინჟინერიის ასოცირებული პროფესორი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი; [giorgishvilinino02@gtu.ge](mailto:giorgishvilinino02@gtu.ge); <sup>2</sup>ენერგეტიკისა და ელექტროინჟინერიის ბაკალავრის IV კურსის სტუდენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი; [andriakaikatsishvili326@gmail.com](mailto:andriakaikatsishvili326@gmail.com); <sup>3</sup>ბიზნეს ადმინისტრირების მაგისტრი, რაუფ აბლიაზოვის აღმოსავლეთ ევროპის უნივერსიტეტი; [zurabkutibashvili7@gmail.com](mailto:zurabkutibashvili7@gmail.com)

### ანოტაცია

სტატია მიმოიხილავს არატრადიციული განახლებადი ენერჯის რამდენიმე პერსპექტიულ მიმართულებას, მათ შორის ტალღურ, ოსმოსურ და კოსმოსურ მზის ენერჯიას. ნაშრომში გაანალიზებულია მათი ტექნოლოგიური საფუძვლები, მოქმედების პრინციპები და განვითარების მიმდინარე მდგომარეობა. განსაკუთრებული აქცენტი გაკეთებულია ეკონომიკურ სიცოცხლისუნარიანობასა და ენერჯის დონეგასწორებული ღირებულების (LCOE) შედარებით შეფასებაზე. ჩატარებული კვლევა ცხადყოფს, რომ მიუხედავად მაღალი კაპიტალური დანახარჯებისა, აღნიშნულ ტექნოლოგიებს შეუძლიათ მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანონ ენერგეტიკული სისტემების დივერსიფიკაციასა და გრძელვადიან მდგრადობაში. ნაშრომის ბოლოს განხილულია ამ ტექნოლოგიების შესახებ ცოდნის მნიშვნელობა საქართველოს ენერგეტიკული განვითარების პერსპექტივისთვის. კვლევის საფუძველს წარმოადგენს საერთაშორისო სამეცნიერო წყაროების, ტექნიკური ანგარიშებისა და მოქმედი პროექტების ანალიზი.

**საკვანძო სიტყვები:** ალტერნატიული ენერჯია, ტალღური ენერჯია, ოსმოსური ენერჯია, კოსმოსური მზის ენერჯია, SBSP, LCOE.

### შესავალი

დღეს ენერგეტიკა მსოფლიო ეკონომიკის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი და სტრატეგიული სექტორია, რომლის განვითარება მჭიდროდ უკავშირდება ეკონომიკურ ზრდას, გარემოს დაცვასა და მდგრად განვითარებას. ენერჯის წარმოება და მოხმარება განსაზღვრავს ქვეყნების ინდუსტრიულ შესაძლებლობებს, ტექნოლოგიურ პროგრესსა და

მოსახლეობის ცხოვრების ხარისხს. ამასთან, ენერგორესურსების არათანაბარი განაწილება გავლენას ახდენს საერთაშორისო ურთიერთობებსა და ენერგოდამოუკიდებლობაზე, რაც ხშირად გეოპოლიტიკური გამოწვევების მიზეზი ხდება. ტრადიციული რესურსების — ნავთობის, ბუნებრივი აირისა და ქვანახშირის — ინტენსიური გამოყენება იწვევს გარემოს დაბინძურებასა და კლიმატის ცვლილებას, რაც კიდევ უფრო ზრდის განახლებადი და ეკოლოგიურად სუფთა ენერჯის წყაროების განვითარების მნიშვნელობას.

მიუხედავად იმისა, რომ მზის, ქარისა და ჰიდროენერჯია უკვე ფართოდ არის დანერგილი თანამედროვე ენერგეტიკაში, სტატია ყურადღებას ამახვილებს შედარებით ნაკლებად გავრცელებულ, თუმცა ინოვაციურ და პერსპექტიულ ტექნოლოგიებზე. მათი განვითარება ხელს უწყობს ენერგეტიკული მრავალფეროვნების ზრდას, ენერგომომარაგების საიმედოობასა და ენერგოდამოუკიდებლობის გაძლიერებას, ასევე ამცირებს გარემოზე უარყოფით ზემოქმედებას.

ნაშრომში განხილულია ტალღური ენერჯია, ოსმოსური („ლურჯი“) ენერჯია და განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა კოსმოსურ მზის ენერჯიას, რომელიც ენერჯის მიღებას დედამიწის ატმოსფეროს გარეთ და მის დედამიწაზე გადაცემას გულისხმობს.

კვლევის მიზანია განხილული ტექნოლოგიების ტექნიკური, ეკონომიკური და ეკოლოგიური მახასიათებლების კომპლექსური შეფასება, მათი ენერგოეფექტიანობისა და განვითარების პერსპექტივების ანალიზი, აგრეთვე მათი პოტენციური როლის განსაზღვრა მომავალი ენერგეტიკული სისტემების ფორმირების პროცესში. ამასთან, ნაშრომში კრიტიკულად არის შეფასებული აღნიშნული ტექნოლოგიების გამოყენების შესაძლებლობები საქართველოს ენერგეტიკულ სექტორში, ქვეყნის რესურსული, ეკონომიკური და ტექნოლოგიური თავისებურებების გათვალისწინებით.

## **ძირითადი ნაწილი**

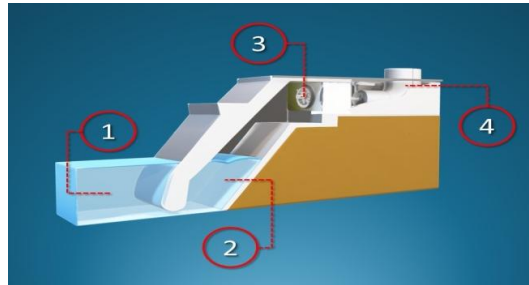
სტატიაში დეტალურად განვიხილავთ წარმოდგენილი ტექნოლოგიების მუშაობის პრინციპებს და ტექნოლოგიური თავისებურებებს. შემდგომ გაანალიზდება არსებული კომპანიები და პროექტები, რომლებიც აღნიშნულ ტექნოლოგიებს პრაქტიკაში იყენებენ. ამ მონაცემებზე დაყრდნობით შეფასდება თითოეული ტექნოლოგიის ენერჯის დონეგასწორებული ღირებულება (LCOE), რის შემდეგაც განხორციელდება მათი შედარებითი ანალიზი. კვლევის დასკვნით ნაწილში განხილული იქნება ამ ტექნოლოგიების პოტენციური მნიშვნელობა და განვითარების პერსპექტივები საქართველოს ენერგეტიკული სექტორისთვის.

### **ტალღური ენერჯია**

ტალღური ენერჯია წარმოადგენს ოკეანისა და ზღვის ტალღებში აკუმულირებული კინეტიკური და პოტენციური ენერჯის ელექტროენერჯიად გარდაქმნის ტექნოლოგიას. მისი ფუნქციონირება ეფუძნება წყლის მასების უწყვეტ მოძრაობას, რომლის მეშვეობითაც

სხვადასხვა ენერგოკონვერტორი მექანიკურ ენერგიას გამოიმუშავებს, ეს ენერგია გენერატორების საშუალებით ელექტროენერგიად გარდაიქმნება. თანამედროვე ტალღური ენერგეტიკის სისტემებში გამოიყენება რამდენიმე განსხვავებული ტიპის მოწყობილობა, რომლებიც ერთმანეთისგან კონსტრუქციით, მოქმედების პრინციპითა და გამოყენების გარემოთი განსხვავდებიან.

ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულ გადაწყვეტას წარმოადგენს მერყევი წყლის სვეტის სისტემა OWC რომელიც ძირითადად სანაპირო ზონებში მონტაჟდება.



სურ. 1 – OWC სისტემის ჭრილი

აღნიშნულ სისტემაში ელექტროენერგიის გენერაციის პროცესი იწყება ზღვის ტალღების მოძრაობით (1), რომლის ენერგიაც გადაეცემა სპეციალურ კამერას (2). კამერაში წყლის დონის ცვლილების შედეგად ხდება ჰაერის შეკუმშვა, რის გამოც წარმოქმნილი დაწნული ჰაერის ნაკადი ამოძრავებს ტურბინას (3). ტურბინის ბრუნვით მიღებული მექანიკური ენერგია გარდაიქმნება ელექტრულ ენერგიად გენერატორში (4), რაც საბოლოოდ უზრუნველყოფს ელექტროენერგიის წარმოებას.

მიუხედავად ტექნოლოგიური მრავალფეროვნებისა, ტალღური ენერგიის განვითარებას თან ახლავს მნიშვნელოვანი საინჟინრო გამოწვევები. ყველაზე მნიშვნელოვანი მათგანია მოწყობილობების გამძლეობა, რადგან ისინი მუდმივად ექვემდებარება ძლიერ შტორმებსა და ექსტრემალურ ტალღებს.

ტალღური ენერგია „ოკეანის ენერჯის“ მიმართულებებს შორის ერთ-ერთი ყველაზე განვითარებულია, თუმცა კვლავ პრეკომერციულ ეტაპზე რჩება. არსებული პროექტები, მათ შორის Mutriku-ს სადგური, ხასიათდება ხანგრძლივი ექსპლუატაციით, მაგრამ დაბალი სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტითა და მაღალი ღირებულებით, რაც გამოწვეულია რთული საზღვაო პირობებით და ძვირადღირებული მონტაჟ-ოპერირებით.

Mutriku-ს ტალღური ელექტროსადგური ამოქმედდა 2011 წელს და წარმოადგენს ევროპაში პირველ სადგურს, რომელიც გამოიმუშავებულ ენერგიას ქსელში აწვდის. იგი აღჭურვილია 16 პნევმატური ტურბინით, საერთო დადგმული სიმძლავრით 296 კილოვატი და იყენებს „მერყევი წყლის სვეტის“ ტექნოლოგიას. ტალღების მოქმედებით კამერაში ჰაერის ნაკადის წარმოქმნა ამოძრავებს ტურბინებს, რაც უზრუნველყოფს ელექტროენერგიის

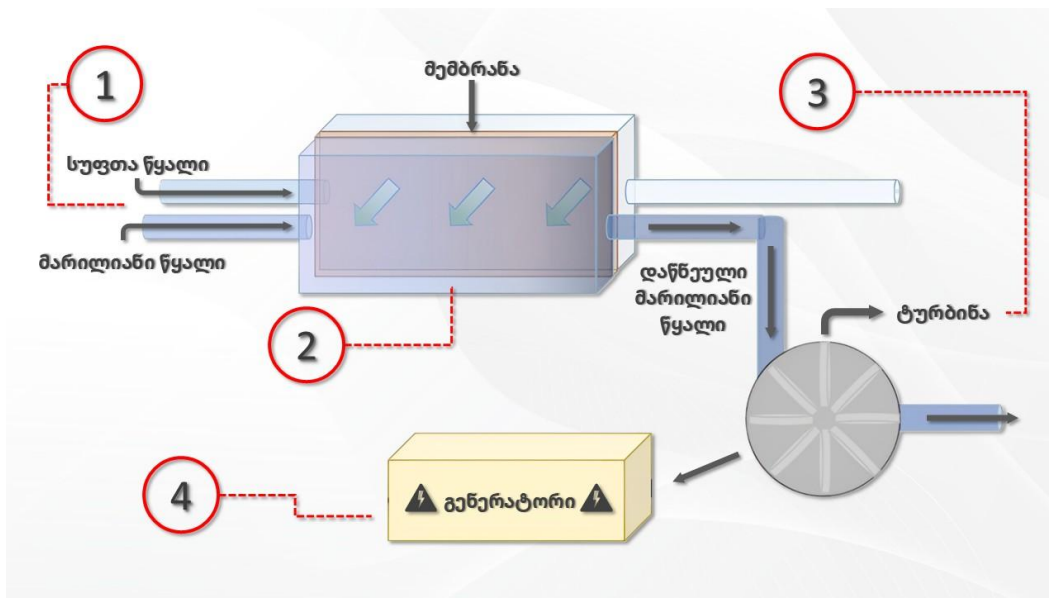
გენერაციას. სადგურის წლიური გამომუშავება დაახლოებით 0.3 გიგავატსაათს შეადგენს, რაც შეესაბამება დაახლოებით 11.6%-იან სიმძლავრის გამოყენების კოეფიციენტს.

### ოსმოსური ენერჯია

ოსმოსური ანუ „ლურჯი“ ენერჯია (მარილიანობის გრადიენტზე დაფუძნებული ენერჯია) იყენებს იმ გიბსის თავისუფალ ენერჯიას, რომელიც გამოიყოფა მტკნარი და ზღვის წყლის შერევისას. ამ ენერჯიის გარდაქმნა ელექტროენერჯიად ხდება სპეციალური ტექნოლოგიების მეშვეობით, რომლებიც განსხვავებული ფიზიკური პრინციპებით მუშაობენ, თუმცა ორივე ეფუძნება მარილიანობის სხვაობას.

ოსმოსური ენერჯიის სადგურის მუშაობის გასაგებად, პირველ რიგში საჭიროა ოსმოსის გაგება. ოსმოსი არის წყლის მოძრაობა ნახევრად გამტარ მემბრანაში დაბალი მარილიანობის მქონე გარემოდან მაღალი მარილიანობის მქონე გარემოსკენ. მაგალითად, თუ მტკნარი და მარილიანი წყალი გამოყოფილია სპეციალური მემბრანით, რომელიც ატარებს წყალს, მაგრამ აკავებს მარილის უმეტესობას, წყალი ბუნებრივად გადავა უფრო მარილიანი მხარისკენ.

ერთ-ერთი ძირითადი მიდგომაა წნევით შეზღუდული ოსმოსი (Pressure-Retarded Osmosis – PRO). (იხილეთ სურ. 2)



სურ. 2 – PRO სისტემის მუშაობის პრინციპი

PRO სისტემაში ელექტროენერჯიის გენერაცია იწყება სუფთა და მარილიანი წყლის (1) მემბრანულ ჭურჭელში (2) შეყვანით, სადაც ოსმოსური პროცესების შედეგად მარილიან მხარეს წნევა იზრდება. წარმოქმნილი დაწნული წყლის ნაკადი მიემართება ტურბინისკენ (3) და ატრიალებს მას, რის შედეგადაც მექანიკური ენერჯია გენერატორში (4) გარდაიქმნება ელექტროენერჯიად.

**Statkraft**-ის ოსმოსური ენერჯის პროტოტიპი არის მსოფლიოში პირველი ოსმოსურ ენერჯიაზე დაფუძნებული ელექტროსადგური. იგი მდებარეობს ნორვეგიაში, ჰურუმის მუნიციპალიტეტის ტოფტეში, Södra Cell Tofte-ის ცელულოზის ქარხნის ტერიტორიაზე და ოპერირებს კომპანია Statkraft-ის მიერ.

სადგური იყენებს ოსმოსურ გრადიენტს, რომელიც წარმოიქმნება მტკნარი და მარილიანი წყლის შეხებისას, როცა ისინი გამოყოფილია ნახევრად გამტარი მემბრანით. მარილიანი წყალი „იზიდავს“ მტკნარ წყალს მემბრანის გავლით, რის შედეგადაც იზრდება წნევა მარილიანი წყლის მხარეს. ეს გაზრდილი წნევა გამოიყენება ჩვეულებრივი ჰიდროტურბინისა და გენერატორის საშუალებით ელექტროენერჯის მისაღებად.

ეს სადგური წარმოადგენს პროტოტიპს, რომელიც შეიქმნა Sintef-თან თანამშრომლობით და სატესტო ენერჯის წარმოება დაიწყო 2009 წლის 24 ნოემბერს. სადგური ოფიციალურად გახსნა ნორვეგიის გვირგვინოსანმა პრინცესამ, მეტე-მარიტმა. პროექტის დაგეგმვა დაიწყო 2008 წლის ზაფხულში და მისი მუშაობისთვის გამოიყენებოდა წამში დაახლოებით 10 ლიტრი მტკნარი და 20 ლიტრი მარილიანი წყალი. გამომუშავებული სიმძლავრე იყო დაახლოებით 2–4 კილოვატი, თუმცა უკეთესი მემბრანების გამოყენების შემთხვევაში მოსალოდნელი იყო სიმძლავრის გაზრდა დაახლოებით 10 კილოვატამდე.

### კოსმოსური მზის ენერჯია

თანამედროვე სამყაროში ენერჯის მოთხოვნა სწრაფად იზრდება, ხოლო ეკოლოგიური პრობლემები სულ უფრო აქტუალური ხდება. სწორედ ამ ფონზე მზის ენერჯია განიხილება როგორც ერთ-ერთი ყველაზე პერსპექტიული და სუფთა ენერჯის წყარო. თუმცა, მიუხედავად მისი დიდი პოტენციალისა, მიწაზე განთავსებულ მზის ელექტროსადგურებს მნიშვნელოვანი შეზღუდვები აქვთ, რაც ენერჯის წარმოებას არასტაბილურს და ნაკლებად ეფექტურს ხდის.

ერთ-ერთი მთავარი პრობლემა არის ღრუბლიანობა და ამინდის პირობები. ღრუბლები მნიშვნელოვნად ამცირებს მზის სხივების ინტენსივობას, რის შედეგადაც პანელები ვერ იღებენ მაქსიმალურ ენერჯიას. გარდა ამისა, მზის ენერჯის მიღება დამოკიდებულია დღის და ღამის ციკლზე — ღამით ენერჯის წარმოება პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამას ემატება ის ფაქტიც, რომ მზის სხივები დედამიწის ატმოსფეროში გავლისას ნაწილობრივ იფანტება და იკარგება, რაც კიდევ უფრო ამცირებს მიღებული ენერჯის რაოდენობას.

სწორედ ამ შეზღუდვებმა წარმოშვა იდეა **კოსმოსური ენერჯის (SBSP)** შესახებ. კოსმოსში, დედამიწის ატმოსფეროს მიღმა, მზის სხივები ბევრად უფრო ინტენსიურია და პრაქტიკულად არ განიცდის გაფანტვას. გარდა ამისა, ორბიტაზე განთავსებულ მზის პანელებს შეუძლიათ უწყვეტად მიიღონ მზის ენერჯია, რადგან იქ არ არსებობს ღრუბლები და დღე-ღამის ციკლის გავლენა მნიშვნელოვნად ნაკლებია (განსაკუთრებით გეოსტაციონარულ ორბიტაზე).

კოსმოსური ენერჯის კონცეფცია მიზნად ისახავს ამ პრობლემების გადაჭრას — ენერჯის უწყვეტ, სტაბილურ და უფრო ეფექტურ წარმოებას. მიღებული ენერჯია შემდეგ გადმოიცემა დედამიწაზე (მაგალითად, მიკროტალღების ან ლაზერის საშუალებით), რაც საშუალებას იძლევა მივიღოთ სუფთა ენერჯია თითქმის შეუზღუდავი რაოდენობით.

კოსმოსური ენერჯია (SBSP) შეიძლება აღვიქვათ, როგორც ერთიანი ენერჯეტიკული ჯაჭვი:

ორბიტაზე ენერჯის შეგროვება → ელექტრულ ენერჯიად გარდაქმნა → სხივის გენერაცია → გავრცელება → მიღება → ქსელში მიწოდება.

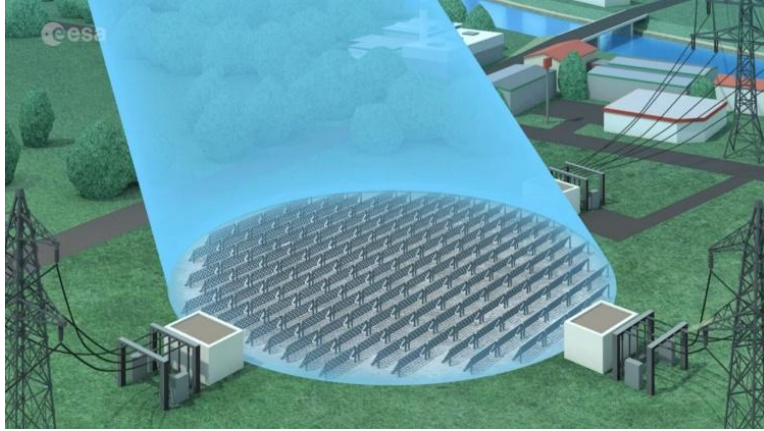
ორბიტაზე განთავსებული მზის პანელები იღებენ მზის თითქმის მუდმივ გამოსხივებას, რომლის მნიშვნელობა დაახლოებით  $1367 \text{ W/m}^2$ -ს შეადგენს. გამომუშავებული ენერჯის რაოდენობა დამოკიდებულია პანელების ფართობზე და ეფექტიანობაზე.

მზის პანელების მიერ მიღებული ენერჯია თავდაპირველად არის არაცვლადი დენი (DC), რომელიც შემდეგ გადის გარდაქმნისა და მართვის სისტემებში. ამ ეტაპზე გამოიყენება მაღალი ეფექტიანობის ელექტრონიკა, სადაც DC-დან DC-ზე გარდაქმნის ეფექტიანობა დაახლოებით 90%-ს აღწევს, ხოლო DC-დან მიკროტალღურ სიგნალად გარდაქმნა დაახლოებით 70%-ის ფარგლებშია. თანამედროვე კონცეფციებში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება „PV-RF“ მოდულებს, სადაც ენერჯის წარმოება და გადაცემა ერთ სისტემაშია გაერთიანებული, რაც ამცირებს ენერჯის დანაკარგებს და ამარტივებს მთლიან სტრუქტურას.

ენერჯის დედამიწაზე გადაცემა შეიძლება განხორციელდეს ორი ძირითადი გზით: მიკროტალღური ან ლაზერული სხივით. მიკროტალღური გადაცემა უფრო სტაბილური და ტექნოლოგიურად განვითარებულია, თუმცა მისი ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევა არის სხივის გაფანტვა. სხივის კონცენტრაციისთვის საჭიროა ძალიან დიდი ანტენა. რადგან გეოსტაციონარული ორბიტა დაახლოებით 36,000 კილომეტრით არის დაშორებული დედამიწიდან, ეფექტური გადაცემისთვის საჭიროა კილომეტრიანი ზომის გადამცემი და მიმღები სისტემები. მიკროტალღური სისტემები ჩვეულებრივ მუშაობენ 2.45 GHz ან 5.8 GHz სიხშირეზე, ხოლო ატმოსფერული დანაკარგები შედარებით მცირეა — დაახლოებით 2%. სხივის ზუსტი მიმართულება კონტროლდება სპეციალური სისტემით, რომელიც მიწიდან გაგზავნილი სიგნალის დახმარებით უზრუნველყოფს ენერჯის სწორად მიწოდებას.

დედამიწაზე მიღებული ენერჯია იჭრება სპეციალური მიმღები სისტემის „rectenna“-ს მიერ (იხილეთ სურ. 3), რომელიც მიკროტალღურ ენერჯიას გარდაქმნის არაცვლად დენად. ასეთი სისტემების ეფექტიანობა დაახლოებით 78%-ს აღწევს, ხოლო გარკვეულ პირობებში შესაძლებელია 80%-ზე მეტიც. ენერჯის მიწოდება ხდება უსაფრთხოების გათვალისწინებით, ამიტომ მიწაზე ენერჯის სიმკვრივე კონტროლდება და ჩვეულებრივ მერყეობს 10-დან 230

W/m<sup>2</sup>-მდე, რაც საჭიროებს საკმაოდ დიდ ფართობებს — ათეულებიდან ასზე მეტი კვადრატული კილომეტრის ჩათვლით.



სურ. 3 - ენერჯის მიღება კოსმოსიდან „rectenna“-ს მიერ

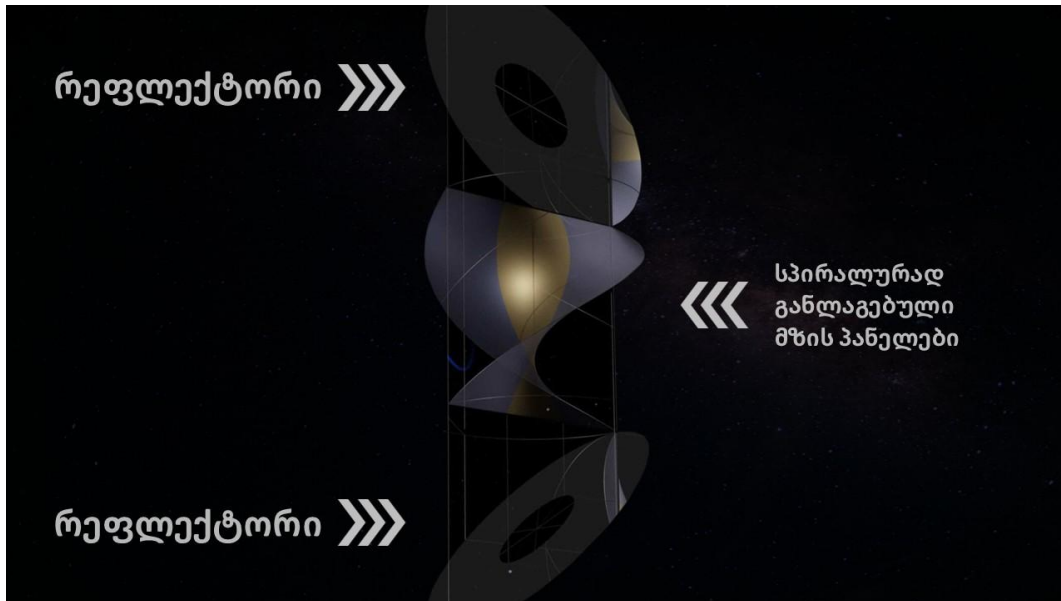
საბოლოოდ, მიღებული ელექტროენერჯია გადადის ელექტრულ ქსელში და შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც სტაბილური და თითქმის უწყვეტი ენერჯის წყარო. SBSP-ის მთავარი იდეა მდგომარეობს იმაში, რომ ეს არის გიგანტური „კოსმოსური ელექტროსადგური“, რომელიც მუშაობს პრაქტიკულად 24 საათის განმავლობაში და აგზავნის ენერჯიას დედამიწაზე უსადენოდ. თუმცა, ამ სისტემის რეალიზაცია მოითხოვს უზარმაზარ ინფრასტრუქტურას, მაღალი სიზუსტის ინჟინერიას და ტექნოლოგიურ წინსვლას, რაც მას ერთ-ერთ ყველაზე რთულ, მაგრამ ასევე ყველაზე პერსპექტიულ ენერჯეტიკულ მიმართულებად აქცევს.

**SPACE SOLAR** არის ბრიტანული კომპანია, რომლის მიზანს წარმოადგენს კოსმოსური ელექტროსადგურის „Cassiopeia“-ს შექმნა და მისი ორბიტაზე მონტაჟი 2027 წლის დასაწყისიდან.

„Cassiopeia“ წარმოადგენს მასშტაბურ მონოლითურ კოსმოსურ სტრუქტურას, რომელიც მოიცავს დაახლოებით 60,000 მზის პანელს, სპირალურად განლაგებული ცენტრალური ზონის გარშემო. ასეთი კონფიგურაცია უზრუნველყოფს მზის სხივების ეფექტურ მიღებას სხვადასხვა კუთხიდან, რაც ზრდის ენერჯის უწყვეტი გენერაციის შესაძლებლობას. სტრუქტურის ზედა და ქვედა ნაწილებში განთავსებულია რეფლექტორები, რომლებიც მზის გამოსხივებას მიმართავენ ცენტრალური პანელებისკენ და ამით აუმჯობესებენ სისტემის საერთო ეფექტიანობას. (იხილეთ სურ. 4).

სადგურის საერთო დიამეტრი დაახლოებით 1700 მეტრს შეადგენს, რაც მას უკიდურესად მასშტაბურ საინჟინრო ობიექტად აქცევს. შედარებისთვის, მისი განივი ზომა ორჯერ აღემატება დედამიწაზე არსებულ ერთ-ერთ ყველაზე მაღალ შენობას — Burj Khalifa-ს სიმაღლეს.

FRAZER NASH-ის მიერ ჩატარებული ანალიზის მიხედვით, აღნიშნული სადგურის თეორიული ენერგოპოტენციალი დაახლოებით 2 გიგავატს შეადგენს, რაც დაახლოებით ეკვივალენტურია ერთ მაღალი სიმძლავრის ატომური ელექტროსადგურის გამომუშავებასთან.



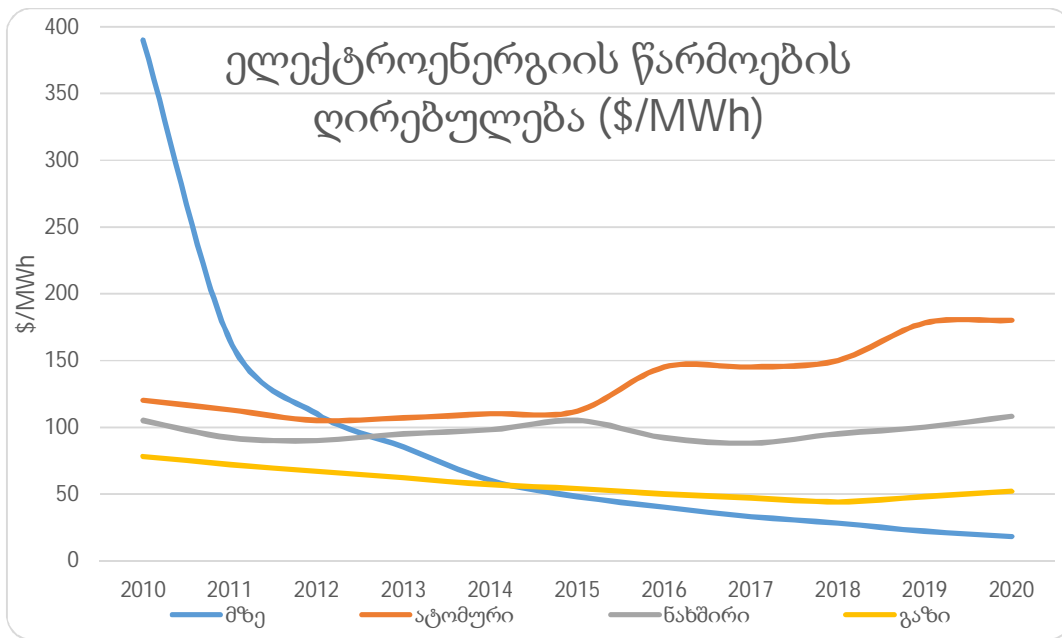
სურ. 4 – „კასიოპეიას“ კონცეპტური ვიზუალი

#### ეკონომიკური ანალიზი

განახლებად ენერჯისთან დაკავშირებული ხარჯები ბოლო ათწლეულის განმავლობაში მნიშვნელოვნად შემცირდა. ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ფაქტორად მიიჩნევა 2008 წელს მიღებული „feed-in tariff“ პოლიტიკა.

„Feed-in tariff“ პირველად გერმანიაში დაინერგა, შემდეგ გავრცელდა ევროპაში და მოგვიანებით — გლობალურად. მისი არსი მდგომარეობს იმაში, რომ სახელმწიფო განახლებადი ენერჯის წყაროებიდან გამომუშავებულ ელექტროენერჯიას საბაზრო ფასზე უფრო მაღალი ტარიფით იძენს. მაგალითად, თუ ბაზარზე 1 კილოვატსაათი ელექტროენერჯია ღირს 10 თეთრი, სახელმწიფო განახლებადი წყაროებიდან წარმოებულ იმავე 1 კილოვატსაათს შესაძლოა 20 თეთრად იბარებდეს. ამგვარი მექანიზმი ქმნის ძლიერ ეკონომიკურ სტიმულს ინვესტორებისა და კომპანიებისთვის, რათა განავითარონ განახლებადი ენერჯის ინფრასტრუქტურა.

შედეგად იზრდება ინვესტიციების მოცულობა, ტექნოლოგიები სწრაფად ვითარდება და წარმოების ხარჯები ეტაპობრივად იკლებს. წარმოდგენილ დიაგრამაში (დიაგრამა 1) ნათლად ჩანს, თუ როგორ დაეცა განახლებადი ენერჯის გამომუშავების ფასი მზის ენერჯეტიკის მაგალითზე.



**დიაგრამა 1 - ენერჯის წარმოების ღირებულების გრაფიკი**

კოსმოსური მზის ენერჯის ღირებულების შემცირების ერთ-ერთი მთავარი განმსაზღვრელი ფაქტორი არის კოსმოსში ტვირთის გაშვების ღირებულება.

2011 წლამდე კოსმოსური მისიების მნიშვნელოვანი ნაწილი ხორციელდებოდა Space Shuttle Program-ის ფარგლებში. ამ პერიოდში ძირითადად გამოიყენებოდა ერთჯერადი ან შეზღუდული გამოყენების რაკეტები, რის გამოც ორბიტაზე ტვირთის გაშვების ფასი ძალიან მაღალი იყო — დაახლოებით ათეულ ათასობით დოლარი თითო კილოგრამზე.

მდგომარეობა მნიშვნელოვნად შეიცვალა 2026 წლის 12 მაისს, როდესაც კომპანია SpaceX-მა გამოუშვა რაკეტა, რომელსაც შეეძლო დედამიწაზე უსაფრთხოდ დაბრუნება და შესაძლებელი გახდა მისი მრავალჯერად გამოყენება. შედეგად, თანამედროვე კომერციულ გაშვებებზე ფასი უკვე დაახლოებით რამდენიმე ათას დოლარამდე (და არა ათეულ ათასამდე) შემცირდა თითო კილოგრამზე, ხოლო მომავალ თაობის სისტემებისთვის კიდევ უფრო დაბალი ხარჯებია პროგნოზირებული.

ამ ტექნოლოგიურმა პროგრესმა მნიშვნელოვნად გაზარდა კოსმოსური მისიის ეკონომიკური ეფექტიანობა და შექმნა საფუძველი ისეთი მასშტაბური პროექტებისთვის, როგორცაა ორბიტული მზის ენერჯის სადგურები. შეიძლება ითქვას, რომ კოსმოსური ენერჯეტიკის ეკონომიკური პერსპექტივა პირდაპირ არის დაკავშირებული გაშვების ტექნოლოგიების განვითარებასა და მათი ღირებულების შემცირებასთან.

LCOE მაჩვენებლის გამოყენებით შესაძლებელია სხვადასხვა ენერჯეტიკული ტექნოლოგიის ეკონომიკური ეფექტიანობის შედარება და თითოეულის საშუალო ღირებულების შეფასება, რომელიც გამოიხატება \$/kWh ფორმატში (იხილეთ დიაგრამა 2).

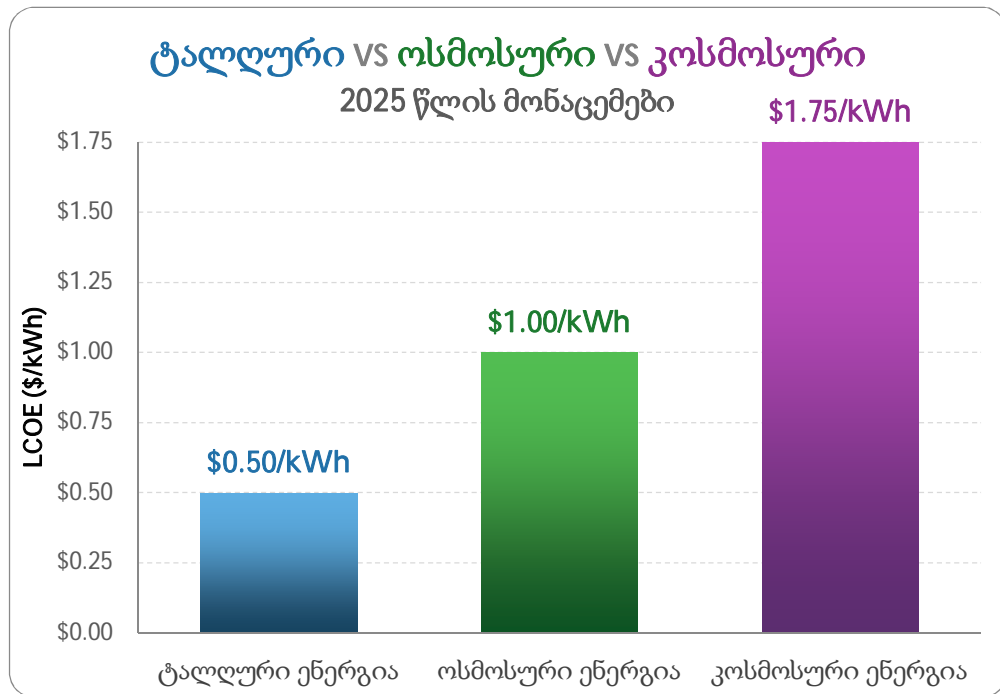
IRENA-ს, Statkraft-ისა და FRAZER NASH-ის ანალიტიკურ ანგარიშებზე დაყრდნობით შესაძლებელია შემდეგი ზოგადი შეფასება:

კოსმოსური მზის ენერჯია ამ ეტაპზე ყველაზე მაღალი LCOE-თი ხასიათდება, რადგან მოითხოვს როგორც ორბიტაზე გაშვების, ასევე რთული ინფრასტრუქტურის შექმნის მაღალ კაპიტალურ ხარჯებს. არსებული პროგნოზების მიხედვით, მისი ღირებულება შეიძლება მერყეობდეს დაახლოებით **\$1–\$1.75/kWh** დიაპაზონში, თუმცა ეს მნიშვნელობა დიდად დამოკიდებულია გაშვების ფასების შემდგომ შემცირებაზე და ტექნოლოგიურ მასშტაბირებაზე.

ოსმოსური ენერჯია შედარებით დაბალი ოპერაციული ხარჯებით გამოირჩევა, რადგან იყენებს ბუნებრივ მარილიანობის გრადიენტს. თუმცა მისი ტექნოლოგიური შეზღუდვების გამო LCOE ჯერ კიდევ მაღალია და შეფასებით მერყეობს დაახლოებით **\$0.75–\$1/kWh** ფარგლებში, რაც ძირითადად განპირობებულია მემბრანების ღირებულებითა და დაბალი ეფექტიანობით.

ტალღური ენერჯია დღეს უფრო მომწიფებულ სტადიაშია, მაგრამ მაინც შედარებით ძვირია ოფშორული ინფრასტრუქტურის გამო. მისი LCOE ხშირად შეფასებულია დაახლოებით **\$0.25–\$0.50/kWh** დიაპაზონში, რაც დამოკიდებულია მდებარეობასა და მოწყობილობის ტიპზე.

საერთო სურათი აჩვენებს, რომ მიუხედავად განსხვავებული ტექნოლოგიური სიმწიფისა, ყველა აღნიშნული მიმართულება ჯერ კიდევ უფრო ძვირია, ვიდრე ტრადიციული ენერჯეტიკა, თუმცა მათი ღირებულება მუდმივად კლებად ტენდენციას აჩვენებს ტექნოლოგიური განვითარების პარალელურად.



დიაგრამა 2 - ენერჯიების LCOE-ს შედარება

## პერსპექტივა საქართველოში

საქართველოს ენერგეტიკული მომავლის განხილვისას აუცილებელია რეალობისა და პერსპექტივის ერთმანეთისგან მკაფიოდ გამიჯვნა. ერთი მხრივ, ქვეყანა ფლობს მნიშვნელოვან განახლებად რესურსებს, განსაკუთრებით ჰიდროენერჯის მიმართულებით, თუმცა ამ პოტენციალის მხოლოდ შედარებით მცირე ნაწილია ათვისებული. IRENA-ს 2025 წლის შეფასებით, საქართველოს ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალი დაახლოებით 15 გიგავატს აღწევს, ხოლო ათვისებული მოცულობა ამ მაჩვენებლის მეოთხედზე ნაკლებია; IEA-ს მიხედვით კი წლიური ჰიდროპოტენციალი 50–60 კვტ-სთ-ის ფარგლებში ფასდება და გამოყენებულია მხოლოდ დაახლოებით მეხუთედი. სწორედ ამიტომ ჩნდება ლოგიკური კითხვა: თუ ქვეყანას ჯერ კიდევ სრულად არ ათვისებია თავისი ძირითადი და შედარებით იაფი რესურსი, რამდენად გონივრულია ყურადღების გადატანა ტალღურ, ოსმოსურ ან კოსმოსურ ენერჯიაზე?

ამ კითხვაზე პასუხი ერთმნიშვნელოვანი არ არის. მოკლევადიან და პრაქტიკულ ჭრილში უნდა ითქვას, რომ საქართველოსთვის ყველაზე მნიშვნელოვანი ამ ეტაპზე კვლავაც არის უკვე ხელმისაწვდომი და ეკონომიკურად უფრო გამართული რესურსების განვითარება — კერძოდ, ჰიდროენერჯის, მზისა და ქარის უფრო სრულფასოვანი **ინტეგრაცია**, ასევე ქსელის **მოდერნიზაცია**, ენერგოეფექტიანობის ზრდა და **იმპორტდამოკიდებულების შემცირება**. საქართველოს ელექტროენერჯის 2024 წლის ბალანსი აჩვენებს, რომ ჰიდროსადგურებმა 11 344.4 მლნ კვტ-სთ გამოიმუშავეს, თბოსადგურებმა 2 812.2 მლნ კვტ-სთ, ხოლო ქარის ელექტროსადგურმა მხოლოდ 77.6 მლნ კვტ-სთ; ამავე დროს 2024 წელს იმპორტმაც შეადგინა 576.293 მლნ კვტ-სთ. ეს მიუთითებს, რომ ქვეყნის ენერგოსისტემა ჯერ კიდევ მნიშვნელოვნად ეყრდნობა ჰიდრორესურსებს, ხოლო სეზონურობისა და ბალანსირების პრობლემების დროს კვლავ საჭირო ხდება თბოგენერაცია და იმპორტი.

აქედან გამომდინარე, კრიტიკული თვალთ დანახული სურათი ასეთია: საქართველოსთვის ნაკლებად გავრცელებული ალტერნატიული ენერჯიები დღეს არ წარმოადგენს „პირველი რიგის ამოცანას“. ქვეყანა ჯერ კიდევ იმ ეტაპზეა, როდესაც საბაზისო სტრუქტურული პრობლემებია მოსაგვარებელი. IRENA-ს 2025 წლის შეფასებაც პირდაპირ მიუთითებს, რომ საქართველოსთვის მთავარი გამოწვევაა ენერგეტიკული მიქსის დივერსიფიკაცია ჰიდროენერჯისა და ფოსილური იმპორტის ფარგლებს გარეთ. ამიტომ, თუ საკითხს მკაცრად ეკონომიკური და სახელმწიფო პრიორიტეტების ლოგიკით შევაფასებთ, პირველ ეტაპზე ტალღური, ოსმოსური ან კოსმოსური ენერჯიის ფართომასშტაბიანი განვითარება ქვეყნისთვის პრაქტიკულად არააქტუალური ჩანს.

თუმცა ამავე დროს მცდარი იქნებოდა იმის თქმა, რომ ასეთი ტექნოლოგიები საქართველოსთვის უმნიშვნელოა. მათი მნიშვნელობა სხვა სიბრტყეში იკვეთება — არა როგორც დაუყოვნებლივი მასობრივი ენერგეტიკული გადაწყვეტა, არამედ როგორც სტრატეგიული, სამეცნიერო და ტექნოლოგიური მიმართულება. სწორედ ამ კუთხით ხდება მათი ღირებულება მნიშვნელოვანი. მაგალითად, ტალღური ენერჯია საქართველოსთვის

დღეს შეზღუდული ინტერესის სფეროა, რადგან ქვეყანას შავი ზღვის სანაპირო აქვს, მაგრამ ზღვის ტალღური ენერჯის ეკონომიკურად ფართო ათვისებისთვის საჭირო ტექნოლოგიური ბაზა, საინჟინრო ინფრასტრუქტურა და საინვესტიციო მასშტაბი ჯერ არ არსებობს. ოსმოსური ენერჯის შემთხვევაშიც, მიუხედავად იმისა, რომ შავი ზღვა და მდინარეთა სისტემა თეორიულ ინტერესს ქმნის, პრაქტიკული გამოყენება საჭიროებს მაღალი დონის მემბრანულ ტექნოლოგიებსა და დიდ კაპიტალდაბანდებას, რაც დღევანდელ ქართულ ენერგეტიკულ რეალობაში მწელად გამართლდება.

ყველაზე საინტერესო შემთხვევა სწორედ კოსმოსური ენერჯიაა. საქართველოსთვის იგი აშკარად არ არის უახლოესი ათწლეულის პრაქტიკული ენერგეტიკული პასუხი. ამის მიზეზი მარტივია: ქვეყანა ჯერ არ ფლობს იმ ფინანსურ, ტექნოლოგიურ და სამრეწველო შესაძლებლობებს, რომელიც ასეთი მასშტაბის პროექტს მოემსახურებოდა. ამავე დროს, სწორედ ასეთი ტექნოლოგიაა მნიშვნელოვანი ინტელექტუალური და საგანმანათლებლო თვალსაზრისით, რადგან იგი აჩვენებს, საით შეიძლება წავიდეს მსოფლიო ენერგეტიკა მომავალში.

ამ საკითხში ყველაზე დაბალანსებული შეფასება იქნება შემდეგი: საქართველოსთვის ნაკლებად გავრცელებული ალტერნატიული ენერჯიები დღეს არ უნდა განიხილებოდეს, როგორც ძირითადი ენერგეტიკული საყრდენი. ქვეყნის ამოცანა ახლა უფრო მეტად არის საკუთარი უკვე ცნობილი რესურსების ეფექტიანი გამოყენება, განსაკუთრებით ჰიდროენერჯის, მზის, ქარისა და ენერგოეფექტიანობის მიმართულებით. **მაგრამ ამასთანავე, აღნიშნული ინოვაციური წყაროების იგნორირებაც არ იქნება გონივრული.** მათი შესწავლა მნიშვნელოვანია იმისათვის, რომ საქართველო არ დარჩეს მხოლოდ ძველი ენერგეტიკული მოდელის ფარგლებში და დროულად შეძლოს მომავალი ტექნოლოგიური ტრანსფორმაციების დანახვა. ამ სტატიაში არსებულ წყაროებს თუ დავუჯერებთ, მივალთ დასკვნამდე, რომ განახლებადი ენერჯიების ფასი მომავალში იმ დონეზე დაიკლებს, რომ საქართველოსთვის მთავარი დაბრკოლება არა ამ ტექნოლოგიის სიძვირე, არამედ ამ ტექნოლოგიის არცოდნა იქნება.

ამრიგად, კრიტიკული ანალიზის საფუძველზე შეიძლება ითქვას, რომ ტალღური, ოსმოსური და განსაკუთრებით კოსმოსური ენერჯია საქართველოსთვის დღეს უფრო მეტად წარმოადგენს სტრატეგიული ხედვის, სამეცნიერო ინტერესისა და გრძელვადიანი ტექნოლოგიური მზადყოფნის თემას, ვიდრე უშუალო ეკონომიკურ აუცილებლობას.

## დასკვნა

წინამდებარე ნაშრომში განხორციელებულმა კვლევამ აჩვენა, რომ ტალღური, ოსმოსური და კოსმოსური მზის ენერჯია (SBSP) არ არის მხოლოდ შორეული თეორიული კონცეფციები, არამედ წარმოადგენს გლობალური ენერგეტიკული ტრანზიციის ახალ, აქტიურ ფაზას. ეს ტექნოლოგიები გვთავაზობენ უნიკალურ საინჟინრო გადაწყვეტილებებს ტრადიციული განახლებადი წყაროების მთავარი ნაკლოვანებების — არასტაბილურობისა და ამინდზე დამოკიდებულების — დასაძლევად. განსაკუთრებით აღსანიშნავია კოსმოსური

ენერგეტიკის უპრეცედენტო პოტენციალი, რომელიც დედამიწის ატმოსფეროს მიღმა ენერჯის უწყვეტი, შეუზღუდავი გენერაციის შესაძლებლობას ქმნის.

ეკონომიკური ანალიზის შედეგად იკვეთება მკაფიო კანონზომიერება: მართალია, დღეს ინოვაციური სისტემების ენერჯის დონეგასწორებული ღირებულება (LCOE) კვლავ მაღალია, თუმცა ისტორიული გამოცდილება და თანამედროვე ინდუსტრიული მიღწევები კაპიტალური დანახარჯების სწრაფი კლების შეუქცევად ტენდენციაზე მიუთითებს. კოსმოსში ტვირთის გაშვების ხარჯების რადიკალური ვარდნა და მასალათმცოდნეობაში მიღწეული პროგრესი იძლევა მყარ საფუძველს იმისა, რომ აღნიშნული ტექნოლოგიები სულ მალე კომერციულად სრულად კონკურენტუნარიანი გახდება.

რაც შეეხება საქართველოს, როგორც წინა თავებში უკვე გამოიკვეთა, ქვეყნის უახლოესი ინფრასტრუქტურული ამოცანები არსებული სისტემების ოპტიმიზაციას უკავშირდება. თუმცა, წინამდებარე კვლევის მთავარი მიზანი სწორედ იმის ჩვენებაა, რომ ეროვნული ენერგეტიკული ხედვა არ უნდა შემოიფარგლოს მხოლოდ დღევანდელი ტექნიკური საჭიროებებით. გლობალური ენერგეტიკა უპრეცედენტო სისწრაფით იცვლება და ის ტექნოლოგიები, რომლებიც დღეს პრეკომერციულ ეტაპზეა, ხვალ ინდუსტრიულ სტანდარტად იქცევა. სტრატეგიული დაგეგმარება და რთული ენერგეტიკული პროექტების მართვის თანამედროვე პრინციპების ათვისება სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანია, რათა ქვეყანამ შეძლოს გლობალურ ტენდენციებთან ფეხის აწყობა და საერთაშორისო ენერგეტიკულ რუკაზე სათანადო ადგილის დამკვიდრება.

### გამოყენებული ლიტერატურა

1. **რეცენზირებული სტატია (Journal of Ocean Engineering and Technology) — OWC**  
ტექნოლოგია 16 კამერით, Wells-ის ტურბინებით, წინასწარ დაპროექტებული ჯამური სიმძლავრით 296 კვტ; EVE-მ სადგური ამოქმედა 2011 წელს.  
<https://tethys.pnnl.gov/project-sites/mutriku-wave-power-plant>
2. **JOET-ის სტატია — Mutriku-ს LCOE დაახლოებით 500 €/მგვტ.სთ-ია, რაც ბევრად**  
აღმატება თავდაპირველ მოლოდინებს.  
<https://www.joet.org/journal/view.php?viewtype=pubreader&number=3182>
3. **„An Overview of the OWC Technologies: Issues and Challenges“ (2022) — აკადემიური**  
წყარო OWC ტექნოლოგიისა და მისი გამოწვევების შესახებ.  
<https://setpublisher.com/index.php/jbas/article/view/2433>
4. **Yip & Elimelech (2012) — მტკნარი მდინარის წყლის ზღვაში ჩართვისას გაფანტული**  
გიბსის შერევის თავისუფალი ენერჯია შეიძლება გამოყენებულ იქნას ენერჯის წარმოებისთვის.  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es300060m>
5. **Statkraft-ის ოფიციალური განცხადება (პირველადი წყარო) — პრინცესა მეტე-მარიტმა**  
გახსნა მსოფლიოში პირველი ოსმოსური ელექტროსადგურის პროტოტიპი ტოფტეში.

<https://www.statkraft.com/newsroom/news-and-stories/2009/the-worlds-first-osmotic-power-plant-opened/>

6. **Power Magazine** (ფაქტობრივი გამოიმუშავება) — 2009 წელს Statkraft-მა ამოქმედა ტოვტეში მსოფლიოს ერთ-ერთი პირველი ოსმოსური სადგური, რომელიც 2–4 კვტ-ს გამოიმუშავებდა და PRO პროცესზე მუშაობდა.  
<https://www.powermag.com/statkraft-shelves-osmotic-power-project/>
7. **Space.com** — დედამიწის მზის სადგურებისგან განსხვავებით, კოსმოსური მზის სადგური უწყვეტ, 24/7 მიწოდებას უზრუნველყოფს და ენერჯიას ~13-ჯერ უფრო ეფექტურად აწარმოებს, რადგან მზის ხედვას ატმოსფერული აირები არ აბნელებენ.  
<https://www.space.com/space-based-solar-power-technology-demonstration>
8. „Towards net zero: A technological review on the potential of SBSP and wireless power transmission“ (**Heliyon/ScienceDirect, 2024**)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024060274>
9. **ScienceDirect მიმოხილვა** — ატმოსფერული „ფანჯრის“ გამო დანაკარგების მინიმუმისთვის პრაქტიკული სიხშირის დიაპაზონი 1–10 GHz-ია, ამიტომ SBSP კვლევების უმეტესობა 2.45 GHz და 5.8 GHz სიხშირეებზე ფოკუსირდება.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024060274>
10. „**Space Solar Power Programs and Microwave WPT Technology**“ — 5.8 GHz-ზე rectenna-ები 80%-ზე მეტი ეფექტიანობით გაიზომა; 5.8 GHz-ზე DC-RF გარდამქმნელები დღესაც 80%-ზე მეტ ეფექტიანობას აღწევენ.  
<https://www.researchgate.net/publication/3427162>
11. **Space Frontier Foundation** — 2022 წელს დაარსებული Space Solar (თანა-CEO-ები Sam Adlen და Martin Soltau, CTO David Homfray) დიდ ბრიტანეთშია დაფუძნებული და კმნის CASSIOPeiA-ს  
<https://www.spacefrontier.org/sbsp-company-reports/space-solar->
12. **PV magazine** — ESA-მ 2022 წელს Frazer-Nash-ს და Roland Berger-ს დაუკვეთა დამოუკიდებელი კვლევები; Frazer-Nash-ის კვლევამ დაასკვნა, რომ GEO-ში Cassiopeia ~3.4 გვტ-ს გამოიმუშავებდა სატელიტზე, ~2.9 გვტ გადაიცემოდა, ხოლო ინვერტორის შემდეგ ქსელში მიეწოდებოდა 2 გვტ ცვლადი დენი.  
<https://www.pv-magazine.com/2022/10/26/space-based-solar-power-for-terrestrial-energy-needs/>
13. Feed-in Tariff (FiT) და განახლებადი ენერჯის ხარჯების კლება (**IRENA - Renewable Power Generation Costs**):  
<https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
14. **NASA-ს ტექნიკური ანგარიში გაშვების ფასების კლების შესახებ: "The Recent Large Reduction in Space Launch Cost"** <https://ntrs.nasa.gov/citations/20200001093>
15. საქართველოს ელექტროენერჯის 2024 წლის ბალანსი  
<https://esco.ge/ka/energy-balance>

# A New Era of Alternative Global Achievements and Their Significance for Georgia

Nino Giorgishvili<sup>1</sup>; Andria Kaikatsishvili<sup>2</sup>; Zurab Kutibashvili<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor of Energy and Electrical Engineering, Georgian Technical University; [giorgishvilinino02@gtu.ge](mailto:giorgishvilinino02@gtu.ge); <sup>2</sup>Bachelor's student of Energy and Electrical Engineering, Georgian Technical University; [andriakaikatsishvili326@gmail.com](mailto:andriakaikatsishvili326@gmail.com); <sup>3</sup>Master of Business Administration, Rauf Ablyazov East European University; [zurabkutibashvili7@gmail.com](mailto:zurabkutibashvili7@gmail.com)

## Abstract

The article reviews several promising directions of non-traditional renewable energy, including wave, osmotic, and space-based solar energy. The paper analyzes their technological foundations, operating principles, and current state of development. Special emphasis is placed on economic viability and a comparative assessment based on the Levelized Cost of Energy (LCOE). The conducted research shows that despite high capital costs, these technologies can make a significant contribution to the diversification and long-term sustainability of energy systems. The paper concludes by discussing the importance of knowledge about these technologies for Georgia's energy development prospects. The study is based on the analysis of international scientific sources, technical reports, and existing projects.

**Keywords:** alternative energy, wave energy, osmotic energy, space-based solar energy, SBSP, LCOE.