

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი კაპანაძე

წყლის ზედაპირზე განთავსებული მზის მცურავი პანელების  
გარემოზე ზემოქმედების კვლევა

სადოქტორო პროგრამა: წყლის რესურსების ინჟინერია

შიფრი: 0712

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ეფერ ატი

თბილისი

2026. წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჰიდროტექნიკის და სამოქალაქო ინჟინერის 104 დეპარტამენტი

**ხელმძღვანელი:** პროფესორი, ალექსანდრე ბაგრატიონ-დავითაშვილი

**რეცენზენტები:**

დიაკონიძე რობერტი-პროფესორი სტუ; (რეცენზენტი) სამშენებლო ფაკულტეტი;

გიგინეიშვილი გიორგი-პროფესორი სტუ-(მოწვეული, რეცენზენტი

ენერგეტიკის ფაკულტეტი)

საჯარო დაცვა შედგება საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის

სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის

სხდომაზე, 2026 წლის 26 თებერვალი 15 საათი, პირველი სასწავლო

კორპუსი, 508 აუდიტორია (ბიბლიოთეკა).

მისამართი: 0160, თბილისი, მ.კოსტავას 68

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

მისამართი: 0160, თბილისი, მ.კოსტავას 77

ხოლო ავტორეფერატისა – ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი:

პროფესორი



დემურ ტაბატაძე

## ნაშრომის საერთო დახასიათება

ნაშრომი ეძღვნება მოტივტივე მზის ფოტოელექტრული პანელების გამოყენებას მდინარე ყვირილასა და ენგურჰესის ჯვრის წყალსაცავში ელექტროენერჯის მისაღებად. შემოთავაზებულია ფოტოელექტრული პანელების კონსტრუქცია და მათი სამაგრი სისტემები.

### ნაშრომის აქტუალურობა.

ვინაიდან ენერგომომხარების პირველადი საწვავი მცირდება, რადგან ნახშირის ყველაზე დაბალი წილი 27%-ით უკავია ბოლო 15 წლის განმავლობაში. თუმცა ბუნებრივი აირი 24%-მდე გაიზარდა და ნახშირის მოხმარების წილი უახლოეს მომავალში ჩაანაცვლებს. ჰიდრო და ბირთვული ენერჯის წილი რჩება შესაბამისად 7% და 4%-ზე, მაშინ როცა სხვა განახლებადი ენერჯები მხოლოდ 4% შეადგენს, მზის ფოტოელექტრული ელექტროსადგურების განვითარება აქტუალურ ამოცანას შეადგენს, ხოლო მათი განლაგების ოპტიმალური ადგილის დადგენა მნიშვნელოვნად გაზრდის მათ ეფექტურობას.

მცურავი მზის პანელების გარემოზე ზემოქმედება, მტკნარი წყლის სისტემებზე და მათი ტექნო-ეკოლოგიური სინერჯია აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს.

### მ ე ც ნ ი ე რ უ ლ ი ს ი ა ხ ლ უ

GIS-ის და დისტანციური ზონდირების მეთოდების გამოყენებით შეიქმნა მდინარე რიონის ენგურჰესის ჯვრის წყალსაცავის მზის რადიაციის რუკა, როგორც სივრცითი მონაცემთა ბაზა.

ინტერპოლაციის, რადიაციული მოდელირებისა და სივრცითი ანალიზის მეთოდების მოდიფიცირებით შეიქმნა მდინარე რიონის და ენგურჰესის ჯვრის წყალსაცავის მზის რადიაციის რუკა.

შეფასდა მდინარე რიონის და ენგურჭესის ჯვრის წყალსაცავის მზის გამოსხივების პოტენციალი.

პირველად საქართველოში შეიქმნა მზის ელექტროსადგურის მოდელი მდინარე ყვირილაზე და ენგურჭესის ჯვრის წყალსაცავზე, რომელიც აღჭურვილია მოტივტივე ფოტოელექტრული პანელებით.

შემოთავაზებულია მოტივტივე მზის ელექტროსადგურის ფოტოელექტრული პანელების კონსტრუქცია და დამაგრების სისტემა მდინარე ყვირილასათვის და ენგურჭესის ჯვრის წყალსაცავზე.

შესწავლილია მცურავი მზის პანელების გარემოზე ზემოქმედება, მტკნარი წყლის სისტემებზე და მათი ტექნო-ეკოლოგიური სინერგია.

გამოყენებულია ზედაპირიდან და ნიადაგიდან წყლის აორთქლების შეფასების ერთ-ერთი ყველაზე მარტივი, ტემპერატურაზე დაფუძნებული ტექნიკა

### **პრაქტიკული მნიშვნელობა**

კვლევის შედეგები, შემდგომში ხელს შეუწყობს ინფორმაციის მიწოდებას განახლებადი ენერჯის განვითარების შესაძლებლობის შესახებ. GIS ინსტრუმენტები და ტექნიკა შეამოწმებს ოპტიმალურ ადგილებს საკვლევ ტერიტორიაზე, ასევე მონაცემთა დამუშავებას, ანალიზს და ინტეგრაციას სხვადასხვა წყაროდან მონაცემთა ნაკრების შეგროვების შემდეგ, შემდეგ ჩვენ განვსაზღვრეთ და განვაავითარეთ კრიტერიუმების მოდელი მრავალ გადაწყვეტილების მიღების გამოყენებით.

შესწავლილია მცურავი მზის პანელების როლი კაშხლებზე, მდინარეებსა და ტბებზე მდგრადი წყლის რესურსების მართვისთვის

### **კვლევის მიზანი**

კვლევის მიზანი იყო მდინარე ყვირილასა და ენგურჭესის ჯვრის წყალსაცავზე ფოტოელექტრული პანელების განთავსების მოდელირება,

ელექტროენერჯის მიღების მიზნით. ასევე მათი დადებითი და უარყოფითი ზემოქმედება გარემოზე

### **კვლევის ობიექტი**

კვლევის ობიექტად არჩეული იყო მდინარე ყვირილა და ენგურჰესის ჯვრის წყალსაცავი

### **კვლევის მეთოდები**

კვლევაში გამოყენებული იყო შემდეგი მეთოდები:  
მზის რადიაციის რუქების შექმნა GIS-ის გამოყენებით;  
მზის რადიაციის რუკებისათვის სივრცითი მონაცემთა ბაზის გამოყენება;  
მზის რადიაციის სივრცითი რუქების შედგენა ინტერპოლაციის მეთოდების გამოყენებით.

მზის უბნის შეფასება ინტერპოლაციის, რადიაციული მოდელირებისა და სივრცითი ანალიზის მეთოდების მოდიფიცირებით მზის გამოსხივების პოტენციალის შესაფასებლად.

გამოყენებულია სივრცითი და ატრიბუტული მონაცემთა ბაზა კლიმატის ცვლილების ასპექტში.

მოდიფიცირდა ზედაპირიდან და ნიადაგიდან წყლის აორთქლების შეფასების ერთ-ერთი ყველაზე მარტივი, ტემპერატურაზე დაფუძნებული ტექნიკა

**შედეგების გამოყენების სფერო.** ჩვენს მიერ გამოყენებული მეთოდოლოგია შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს კაშხლებზე, მდინარეებსა და ტბებზე მდგრადი წყლის რესურსების მართვისთვის

**სამუშაოს სტრუქტურა და მოცულობა.**  
სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავალს, სამი

თავის, საერთო დასკვნების და გამოყენებულ ლტერატურის (46 დასახელება).  
ნაშრომი გამოცემულია 178 ნაბეჭდ გვერდზე, მათ შორის 13 ცხრილი და 32 ნახაზია.

### **ნაშრომის შინაარსი**

მოსახლეობის მზარდი რაოდენობის გამო მსოფლიო გლობალურ კრიზისს განიცდის. 2040 წლისთვის მოსალოდნელია მოსახლეობის ზრდა 1,7 მილიარდი ადამიანით. ეს გაზრდის ენერგეტიკულ მოთხოვნას დაახლოებით 25%-ით, რაც ძირითადად განპირობებული იქნება განვითარებადი ქვეყნებით.

დღესდღეისობით, მსოფლიოს ემუქრება მზარდი ენერჯის მოთხოვნა, რომელიც უნდა დაკმაყოფილდეს ჩვენი ენერგომომარაგებით. ჩვენმა წარსულმა და აწმყომ წიაღისეულ საწვავზე დამოკიდებულებამ მიგვიყვანა ეჭვქვეშ ჩვენი უნარი, განვაგრძოთ მდგრადი ზრდა. მე-20 საუკუნეში ჩვენი ენერჯის დაახლოებით 80% მოდის წიაღისეულ საწვავზე. თუ ჩვენი მუდმივი დამოკიდებულება წიაღისეულ საწვავზე გაგრძელდება ჩვეულ რეჟიმში, ეს გამოიწვევს სათბურის გაზების მატებას, ენერგოუსაფრთხოების და ჰაერის ხარისხის დაქვეითებას. დაბინძურება ადგილობრივ და რეგიონულ დონეზე, რაც იწვევს ჯანმრთელობის პრობლემებს და ენერჯის უნივერსალური ხელმისაწვდომობის ნაკლებობას.

ენერჯია ამ ეპოქაში საზოგადოების მდგრადი განვითარებისა და კეთილდღეობის მნიშვნელოვანი ელემენტია. ფაქტობრივად, ენერჯის წყაროები იყოფა ორ ძირითად ჯგუფად. არაგანახლებადი რესურსები, რომლებსაც ვიყენებთ და არ შეგვიძლია ხელახლა შევექმნათ და განახლებადი რესურსები, რომელთა შევსებაც მარტივად შეიძლება. გარდა ამისა, განახლებადი ენერჯის წყაროები მოიცავს: მზის ენერჯიას, რომელიც შეიძლება გადაიქცეს ელექტროენერჯიად და სითბოდ, ქარის ენერჯიას,

გეოთერმული ენერჯია დედამიწის სითბოდან, ბიომასა მცენარეებიდან და ჰიდროენერჯია კაშხლის ჰიდროტურბინებიდან.

განახლებადი ენერჯის სისტემების განლაგება გლობალურ ენერჯეტიკულ სისტემაში მნიშვნელოვანი და მომგებიანი ინსტრუმენტია მსოფლიო პროგრესის სტრატეგიაში. განახლებადი ენერჯის წყაროები ფართოდ არის გავრცელებული მთელ მსოფლიოში და ყველა ქვეყანას შეუძლია მნიშვნელოვანი წილი შეიტანოს ამ პროცესში. ამ მწვანე წყაროების ინტეგრაცია ეკონომიკურ განვითარებასთან შორეულ და ნაკლებად განვითარებულ რაიონებში ხელს უწყობს ფინანსურ გაუმჯობესებას სოფლის რეგიონებიდან მიგრაციის შემსუბუქების და სოციალური პრობლემების გაუმჯობესების წყალობით. ამ მხრივ, გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ეკონომიკურ საკითხებთან და გარემოზე ზემოქმედებასთან დაკავშირებული თანამედროვე გამოწვევებისა და ტექნოლოგიების ახალი მიღწევების გათვალისწინებას.

ენერჯეტიკის სექტორი გადამწყვეტ როლს ასრულებს მთელ ეკონომიკაში და როგორც ცნობილია, მასზე დამოკიდებულია სტაბილურობა ან სიცოცხლისუნარიანობა. იგი გავლენას ახდენს ისეთ საკითხებზე, როგორცაა სამუშაო ადგილების შექმნა, გარემოსდაცვითი მოსაზრებები და ენერგოეფექტურობა. კლიმატის ცვლილებისა და ადამიანის კეთილდღეობაზე და გარემოზე მისი მძიმე ზემოქმედების გამო შიშის გამო, პოლიტიკის შემქმნელები და სამართალდამცავები იძულებულნი არიან გადაინაცვლონ წიაღისეული საწვავიდან განახლებად ენერჯეტიკულ სისტემებზე. ვინაიდან ენერჯეტიკის სექტორის წვლილი მთლიან შიდა პროდუქტში (მშპ) საშუალოდ 6%-ია, მთავრობებმა მაქსიმალურად უნდა გამოიყენონ განახლებადი ენერჯის გამოყენების სარგებელი თავიანთი ეროვნული ეკონომიკისთვის. მსოფლიო ენერჯეტიკული სცენარების მიხედვით, რომლებიც ფოკუსირებულია მომავალ ენერჯიაზე, პროგნოზირებულია, რომ გლობალური ენერჯომოხმარება გაიზრდება ყოველწლიურად 1.2%-ით 2010 წლიდან 2050

წლამდე. ენერჯის ეს მოხმარება ხელს უწყობს განვითარებადი ქვეყნების ეკონომიკურ ზრდას. ამავდროულად, ენერგეტიკული ტექნოლოგიების წინსვლა შეამცირებს ენერჯის მოხმარებას მშპ-ის ერთეულზე, დაწყებული 2,7 ტონა/10,000 აშშ დოლარიდან 1,4 ტონამდე/10,000 აშშ დოლარამდე, რაც ასახავს საოცარ განვითარებას ენერჯის განლაგების ეფექტურობაში.

ენერგეტიკის საერთაშორისო სააგენტო მიუთითებს, რომ გლობალური ენერგეტიკული მოთხოვნა იზრდება ერთი მესამედით 2011 წლიდან 2035 წლამდე. მოთხოვნა იზრდება ყველა სახის ენერჯიაზე, ხოლო წიაღისეული საწვავის წვლილი მსოფლიოს ენერგეტიკულ გამომუშავებაში მცირდება 82%-დან - 76%-მდე 2035 წელს. განახლებადი და ბირთვული ენერჯის რესურსები უზრუნველყოფენ პირველადი ენერჯის მოთხოვნის ზრდის დაახლოებით 40%-ს. განახლებადი ენერჯის რესურსები უზრუნველყოფენ ელექტროენერჯის გამომუშავების წმინდა ზრდის თითქმის ნახევარს. მზის ენერჯიამ შეიძლება უზრუნველყოს მსოფლიო ენერჯის საბოლოო მოთხოვნის მესამედი 2060 წლის შემდეგ.

მნიშვნელოვანია იმის თქმა, რომ მზის ენერჯის განვითარების ერთ-ერთ ბარიერს წარმოადგენს მისი შეზღუდვები და ცვალებადობა, რომელიც გეოგრაფიულად შეიძლება განსხვავებული იყოს ერთი ადგილიდან მეორესთან ედარებით. თუმცა, ბოლო წლებში, მრავალჯერადი კრიტერიუმების გადაწყვეტილების მიღების მზარდმა გამოყენებამ ხელი შეუწყო გადაწყვეტილების მიღებას, რომელიც დაკავშირებულია მზის ენერჯის ფოტოელექტრული სისტემებისთვის ადგილის არჩევასთან დაკავშირებით. იმის გამო, რომ მზის ენერჯია არის ბუნებრივი რესურსი არათანმიმდევრული ან შეზღუდული ხელმისაწვდომობით, სტრატეგიული მდებარეობის არჩევამ შეიძლება გადამწყვეტი როლი შეასრულოს შეგროვებული ენერჯისა და გამომუშავებული ენერჯის მაქსიმიზაციისთვის.

განახლებადი ენერჯის სისტემების განლაგება გლობალურ ენერგეტიკულ სისტემაში მნიშვნელოვანი და მომგებიანი ინსტრუმენტია

მსოფლიო პროგრესის სტრატეგიაში. განახლებადი ენერჯის წყაროები ფართოდ არის გავრცელებული მთელ მსოფლიოში და ყველა ქვეყანას შეუძლია მნიშვნელოვანი წილი შეიტანოს ამ პროცესში. ამ მწვანე წყაროების ინტეგრაცია ეკონომიკურ განვითარებასთან შორეულ და ნაკლებად განვითარებულ რაიონებში ხელს უწყობს ფინანსურ გაუმჯობესებას სოფლის რეგიონებიდან მიგრაციის შემსუბუქების და სოციალური პრობლემების გაუმჯობესების წყალობით. ამ მხრივ, გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ეკონომიკურ საკითხებთან და გარემოზე ზემოქმედებასთან დაკავშირებული თანამედროვე გამოწვევებისა და ტექნოლოგიების ახალი მიღწევების გათვალისწინებას.

კაცობრიობის ცივილიზაცია, ინდუსტრიული რევოლუცია და მოსახლეობის ზრდა არის ძირითადი მიზეზები, რაც იწვევს ენერჯის ჩვეულებრივი წყაროების ამოწურვას მსოფლიო ენერჯის მოთხოვნილების გაზრდის გზით.

უახლესი გამოქვეყნებული ანგარიშის მიხედვით გლობალური პირველადი ენერჯის მოთხოვნილებას ექნება შენელებული ზრდა მომავალში, როგორც მოსალოდნელია 2035 წლის შემდეგ, განახლებადი ენერჯის წყაროების უფრო ძლიერი შეღწევის გამო. ასევე მოსალოდნელია, რომ ელექტროენერჯის მოხმარება გაორმაგდება 2050 წლამდე, რაც გამოწვეულია ელექტროტრანსპორტზე გადასვლაზე, ხოლო მთლიანი ენერჯის წარმოების 50% განახლებად ენერჯიაზე მოვა. მოხსენებაში ნათქვამია, რომ გაზი არის ერთადერთი წიაღისეული საწვავი, რომელიც აჩვენებს მთლიანი ენერჯის მოთხოვნის მზარდ ტენდენციას, რომელიც მოსალოდნელია 2035 წლის შემდეგ. თუმცა, გრძელვადიან პერსპექტივაში, გაზზე მოთხოვნა 2015 წლიდან 2050 წლამდე 41%-დან 33%-მდე შემცირდება.

გეოგრაფიული საინფორმაციო სისტემა (GIS) არის მძლავრი ინსტრუმენტი მონაცემთა, რუკებისა და სივრცითი ინფორმაციის

აღრიცხვის, ანალიზისა და რედაქტირებისთვის. ბოლო წლებში, GIS-ზე აგებული მრავალ-კრიტერიუმისანი გადაწყვეტილების მიღების მიდგომა სულ უფრო პოპულარული გახდა, როგორც სხვადასხვა ადგილების შერჩევის ინსტრუმენტი, განსაკუთრებით ენერგეტიკული დაგეგმვისთვის. GIS-ისა და მრავალ-კრიტერიუმისანი გადაწყვეტილების მიღების მიდგომის ინტეგრაცია იძლევა სასარგებლო ინსტრუმენტს მზის ენერჯის სისტემებისთვის ადგილის შერჩევის პრობლემების გადასაჭრელად.

ასევე, ნაშრომში გამოიყენება დისტანციური ზონდირების მეთოდი, რომელიც წარმოადგენს დედამიწის ზედაპირის ინფორმაციის შესახებ მოპოვების მიდგომას, მასთან რეალურად კონტაქტის გარეშე. ეს ხდება ასახული ან გამოსხივებული ენერჯის ზონდირებისა და ჩაწერის გზით და ამ ინფორმაციის დამუშავებით, ანალიზით და გამოყენებით

### **მზის ელექტროსადგური მდინარე ყვირილაზე**

მდინარე ყვირილა ჭიათურის მუნიციპალიტეტის მთავარი მდინარეა და ჭიათურის ზეგანს თითქმის ორ ნაწილად ჰყოფს.

ჭიათურის მუნიციპალიტეტში მდინარე ყვირილა მუნიციპალიტეტის ფარგლებში დაახლოებით 24 კმ-ზე მოედინება. მზის პანელებისთვის საინტერესო მდინარის ნაწილი სიგრძით 900 მეტრს აღწევს. ეს მონაკვეთი განსაკუთრებულია, რადგან ქალაქში მდინარე ხელოვნური კალაპოტით არის გარშემორტყმული. საჭიროა სპეციალური ბეტონის კონსტრუქცია, რათა პანელები ოპტიმალურად მოთავსდეს მზის შუქზე.

ხელოვნურ კალაპოტში აშენებულ კონსტრუქციას ნებისმიერი ფორმა და მიმართულება შეგვიძლია მივცეთ და წყალი მას არ დააზარალებს. თუ რაღაც დეტალებზე ვისაუბრებთ, პირიქით, წყლის ზედაპირზე მოთავსებას თავისი დადებითი მხარე აქვს.

მუნიციპალიტეტში მდინარის 95% მაინც ბუნებრივ კალაპოტშია და მხოლოდ ქალაქის ტერიტორიაზეა შესამღებელი მზის პანელების განთავსება. კვლევაც ამ კუთხით ჩატარდა.

## კვლევის მეთოდოლოგია

იმისათვის, რომ მზის სადგური ავამუშაოთ გვჭირდება გარკვეული მასალის მოძიება, დამუშავება და გათვალისწინება. საკვლევად გამოყენებულია ძველი და ახალი აეროფოტოგადაღებები, ახალი რელიეფის ციფრული სასიმალო მოდელი DEM, პიქსელში 30 მეტრი რეზოლუციის, რომელიც დამუშავდა GIS ტექნოლოგიებით: ArcGIS, QGIS, Google Earth.

## მოდელირების შედეგები

ციფრულ სასიმალო რელიეფზე გაკეთებულმა მოდელირებამ გვაჩვენა, რომ მთლიანად მუნიციპალიტეტის ტერიტორიაზე:

ავვისტოს თვეში 1 დღის განმავლობაში მოსული რადიაცია არის:

მაქსიმალური - 6020.78, მინიმალური - 977.16

მთლიანად აგვისტოში:

მაქსიმალური - 168592.73, მინიმალური - 30089.39

წლის განმავლობაში:

მაქსიმალური - 1617594.5, მინიმალური - 301422.68

მზის რადიაციის რასტრი საზომ ერთეულად იყენებს ვატ-საათს ყოველ კვადრატულ მეტრზე, კილოვატ-საათზე გადასაყვანად გვჭირდება ფორმულა.

"მზის\_რადიაცია\_Whm<sup>2</sup>" / 1000

მიღებული შედეგები შეიცვალა შემდეგნაირად [კაპანაძე 2023 I, კაპანაძე 2023 II]

ავვისტოს თვეში 1 დღის განმავლობაში:

მაქსიმალური - 6.02, მინიმალური - 0.97

მთლიანად აგვისტოში:

მაქსიმალური - 168.593, მინიმალური - 30.08

წლის განმავლობაში:

მაქსიმალური - 1617.59, მინიმალური - 301.423

ეს ასახულია 1.4 ნახაზზე.

სამწუხაროდ რელიეფისა და აეროფოტოგადაღების ცდომილების გამო შეუძლებელია ზუსტად ითქვას, კონკრეტულად კალაპოტში რა მნიშვნელობები ფიქსირდება. სხვადასხვა რეზოლუციის და წარმომავლობის რასტრებს ერთმანეთს ვერ დავაკავშირებთ, მხოლოდ განზოგადებაა შესაძლებელი.

ექსპოზიცია (ჰორიზონტის მიმართულება) ძირითადი ნაწილი სამხრეთისაა, მცირე რაოდენობით ფიქსირდება სამხრეთ-აღმოსავლეთი. რელიეფის პარამეტრებიდან შესაძლებელია დახრილობის ამოღება, თუმცადა მდინარის კალაპოტზე კონსტრუქცია ავტომატურად ნიშნავს, რომ ადგილზე უნდა განისაზღვროს პანელების განთავსებისას.

აეროფოტოგრაფიის დახმარებით კონსტრუქციაზე განთავსებული 5216 პანელი დახაზულია ვექტორული ფორმატით.

### **ზომები და მანძილები**

სიგრძე 2.279 მ, სიგანე 1.134 მ, სისქე 0.035 მ, მათ შორის მანძილი 0.02მ.

განლაგებისას გათვალისწინებული იყო თითოეული ხე, ასევე ხიდებიდან მანძილი მინიმუმ 4 მეტრი და მეტი, რადგან მათი ჩრდილი იწვევს ენერჯის დაკარგვას.

### **მზის ნათება**

ენერგოდანაკლისის გასათვალისწინებლად Google Earth - ს შეუძლია დაგვეხმაროს უკეთ აღქმაში ისტორიული აეროკოსმოსური სურათებით, როგორცაა Landsat სატელიტი. მარტის თვეში ხეების ჩრდილი მდინარის მეორე ნაპირს არ აღწევს, მაგრამ პროექტისთვის გათვლილ სივრცეს ზღუდავს გასწვრივ 400 მეტრზე.



### შედარება Global Solar Atlas - თან

ატლასი მარტივი გამოსაყენებელია, მაგრამ მას აქვს თავისი წინაპირობები. შედარებისთვის შესაძლებელი იყო მხოლოდ 1 კონკრეტული წერტილის აღება და არა მასობრივი ფართობის, სადგურის ტიპი "Ground mounted", სიმძლავრე 1000 კვტ. გეოგრაფიული კოორდინატები  $42.290394^{\circ}, 043.28606^{\circ}$ . ატლასი მარტივი გამოსაყენებელია, თუმცადა აქვს თავისი წინაპირობები. შედარებისთვის შესაძლებელი გახდა მხოლოდ 1 კონკრეტული წერტილის აღება და არა მასობრივი არეალის, სადგურის ტიპი „მიწაზე მონტაჟით“, სიმძლავრე 1000კვპ. გეოგრაფიული კოორდინატები  $42.290394^{\circ}, 043.28606^{\circ}$  კვპ (კილოვატ პიკი) საზომი ერთეულია ფოტოელექტრული სისტემის სიმძლავრის. აზიმუტი  $180^{\circ}$ , დახრილობა  $35^{\circ}$ .

საშუალო გამომუშავება 1.310 გიგავატი საათი ყოველ წელს, გლობალური დასხივება კი  $1594.9$  კვ.სთ/მ<sup>2</sup>.

მდინარე ყვირილას შეუძლია დამატებითი სარგებლის მოტანა, თუ პროექტი იქნება კარგად შეჯერებული და წვრილმანი დეტალები

გათვალისწინებული.

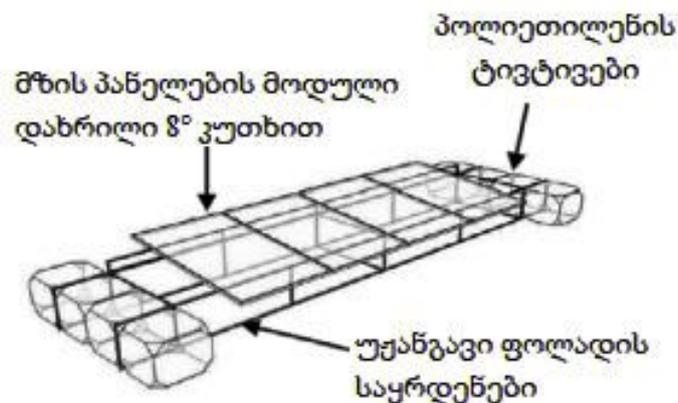
### **მზის ელექტროსადგურის პანელების კონსტრუქცია მდ. ყვირილაზე**

ზოგადად მოტივტივე ფოტოელექტრული სისტემა ჩვეულებრივ შედგება: ფოტოელექტრული მოდულებისაგან მზის ენერჯის შესაგროვებლად, ტივტივებისაგან, რომლებიც უზრუნველყოფენ ტენიანობას, სტრუქტურას, სამაგრ სისტემას, რომელიც ხელს უშლის პანალების თავისუფალ მოძრაობას და ელექტრულ კომპონენტებს და არჩევითი ეფექტურობის სისტემები.

#### **მოტივტივე პანელი**

მოტივტივე პანელი უზრუნველყოფს გამძლეობას, რათა შეინარჩუნოს სტრუქტურა. ის, როგორც წესი, მზადდება ულტრაიისფერი სხივების მიმართ მდგრადი, არასახიათო, ადვილად მოსავლელი პლასტმასისგან, მაღალი ჭიმვის სიმტკიცით, როგორცაა მაღალი სიმკვრივის პოლიეთილენი. თუმცა, შეიძლება გამოიყენოს ზოგიერთი უფრო მკვრივი მასალა, როგორცაა ბეტონი, გალვანზირებული ფოლადი, მაღალი გამძლეობის ფოლადი ან ალუმინი.

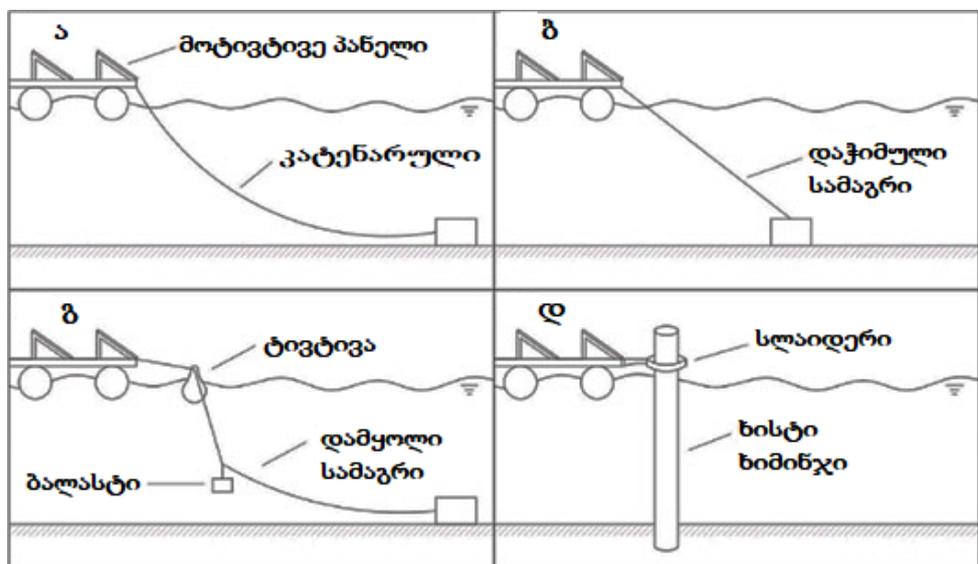
ჩვენს მიერ შერჩეული სამონტაჟო სტრუქტურა მოიცავს სექციებს, ბილიკებს პანელების რიგებს შორის და გვერდების გასწვრივ, რათა ხელი შეუწყოს პანელების გაწმენდას და შენარჩუნებას.



მზის ელექტროსადგურის პანელების კონსტრუქცია მდ. ყვირილაზე  
**სამაგრი სისტემა**

დასამაგრებელი სისტემა იცავს მზის პანელებს, ზღუდავს მათ თავისუფალ მოძრაობას, რათა თავიდან აიცილოს ზიანი ან საფრთხე თავისთვის ან სხვა მცურავი სხეულებისთვის. სინთეტიკური ბოჭკოვანი თოკი, ელასტიური რეზინის თოკები ან მათი კომბინაციები გამოიყენება მტკნარი წყლის პროექტებში [DNV GLAS].

დასამაგრებელი სისტემების ზოგადი კლასიფიკაცია არის კატენარული, შესაბამისი, დაჭიმული და ხისტი სამაგრები. კატენარული დასამაგრებელი სისტემა შედგება ჯაჭვებისგან, რომლებიც იყენებენ თავიანთ წონას, რათა უზრუნველყონ სიჩქარე შემოსაზღვრული ცურვისთვის. შესაბამისი სამაგრები არის კატენარული სამაგრები, რომლებიც იყენებენ მოცურავეებსა და წონებს დასამაგრებელი ხაზების განლაგების დასარეგულირებლად. დაჭიმული დასამაგრებელი სისტემა იყენებს ჭარბ ხაზს, რათა შეინარჩუნოს სამაგრი ხაზები დაძაბულობაში. ეს მასივი ზღუდავს ვერტიკალურ მოძრაობას, რაც შეიძლება პრობლემური იყოს წყლის დონის მნიშვნელოვანი ცვალებადობისთვის, მოტივტივე ფოტოელექტრული სტრუქტურების შეზღუდულობის გამო.



სამაგრის განლაგების მაგალითები (ა) კატენარული, (ბ) დაჭიმული სამაგრი, (გ) დამყოლი სამაგრი და (დ) ხისტი სამაგრი.

გამოსავალი შეიძლება იყოს ელასტიური დასამაგრებელი ხაზების გამოყენება, როგორცაა Seaflex®, რომელსაც შეუძლია შეცვალოს მათი

სიგრძე და დამაბულობა. ხისტი სამაგრი სისტემა შედგება დამაგრებული ხისტი სტრუქტურული ნაწილისგან, რომელიც იძლევა აწევის მოძრაობებს, მაგრამ ზღუდავს აწევას და რხევას. იგი ოპტიმალურია სადგურის შესანახი თვალსაზრისით, ეკონომიკურად გამართლებულია მხოლოდ არაღრმა წყლებისთვის.

ჩვენ შევარჩიეთ ხისტი სამაგრი, რადგანაც მდინარის დინების სიჩქარე ამ უბანზე შედარებით დიდია.

შესაძლოა დამუშავებულ მოდელში შედეგები აჭარბებს მოლოდინს და რეალობას, მაგრამ მცირე სადგურის არსებობა შეიძლება იმედის მომცემი და სხვებისთვის მისაბამი მაგალითი აღმოჩნდეს. დანარჩენი კი ფინანსური მხარეა, თუ გავითვალისწინებთ, რომ 5216 პანელი 300 ვატი სიმძლავრით = 1564.8 კილოვატს, უკუგების პერიოდი შესაძლოა იყოს 5 წელზე მეტი.

აღსანიშნავია, რომ წყლის ზედაპირზე მოტივტივე პანელები მსოფლიო მასშტაბებით პოპულარული ხდება წყალსაცავებზე, არხებზე და ზღვებში.

### **მზის ელექტროსადგური ენგურჭესის ჯვრის წყალსაცავში ჯვრის წყალსაცავი**

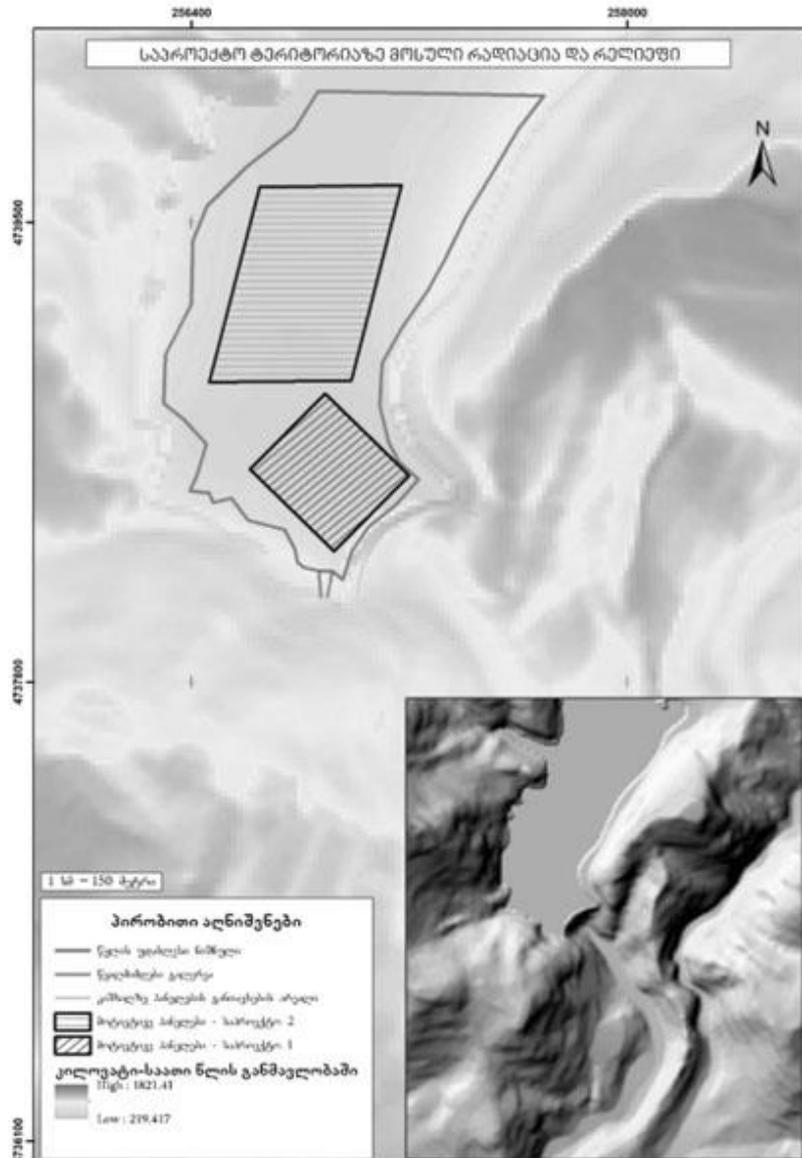
ენგურჭესის წყალსაცავი ანუ ჯვრის წყალსაცავი წარმოადგენს უნიკალურ ხელოვნურ მთის წყალსატევს, შექმნილს ენერჯისათვის. ეს წყალსატევი დერივაციული გვირაბის საშუალებით უერთდება ვარდნილჭესი I-ის წყალსაცავს, ანუ გალის წყალსაცავს და ერთად წარმოადგენენ ენგურის წყალსაცავების კასკადს.

### **მზის პანელების დაპროექტება ენგურჭესის ჯვრის წყალსაცავზე**

გარდა იმისა, რომ ენგურჭესი საქართველოს ენერგეტიკის ხერხემალია, შეგვიძლია ვისაუბროთ მისთვის კიდევ ერთ დადებით მხარეზე. რამდენად შეუძლია წყალსაცავს, კაშხალს და მიმდებარე არეალს მზის ენერჯის ათვისება. რა თქმა უნდა ეს არ იქნება იმ

რაოდენობის, რომ კონკურენცია გაუწიოს წყალს. ამისათვის რადიაციის მოდელირება მარტივი და მოხერხებული პრაქტიკაა.

კაშხალს, მიმდებარე შენობებს, სამომავლოდ ტურისტულ ატრაქციებს რა თქმა უნდა ელ-ენერგია ესაჭიროება. საინტერესო იქნებოდა თუ მზის სადგური მთლიანად თუ არა, ნაწილობრივ მაინც დააკმაყოფილებდა ადგილობრივ მოთხოვნას ელ-ენერგიაზე.



საპროექტო ტერიტორიაზე მოსული რადიაცია და რელიეფი

GIS ტექნოლოგიებში გვაქვს ორი ტიპის რელიეფი, DTM (Digital Terrain Model), სადაც მხოლოდ მიწის ზედაპირია და DSM (digital surface model), სადაც მონაცემებში შედის ინფორმაცია ყველა დეტალის

ჩათვლით რაც მის ზედაპირზე განთავსებული. აქედან არჩევანის გაკეთება ამ ეტაპზე არაა საჭირო. პიქსელში 30 მეტრიან რელიეფზე გამოსახულ მოდელს, დღის, თვის და წლის ზოგადი ანგარიშები შეუძლია წარმოადგინოს.

საქმე იმაშია, რომ მზის პანელების განთავსება, წყალსაცავზე და მის ტერიტორიაზე არც თუ ისე მარტივია, სახლის სახურავთან შედარებით. დიდ როლს თამაშობს ადგილმდებარეობა, ბუნებრივი პირობები, ჰორიზონტის მიმართულება (ექსპოზიცია), მზის ნათების ხანგრძლივობა და სხვა.

საჯარო რეესტრის ეროვნულ სააგენტოს უძრავი ქონების კადასტრის მიხედვით, კაშხლიდან დაშორებით განთავსებულია „მპს ენგურჰესი“-ს სხვადასხვა შენობები. გათვალისწინებული იქნა მათი მდგომარეობა, სახურავის შესაბამისობა და პოტენციალი მზის სადგურისთვის.

### **ენგურჰესის აუზის ზედაპირზე სავარაუდო პანელების განლაგების პროექტი.**

#### **მზის პიკური საათები**

ეს არის გაზომვის საშუალება, რა რაოდენობის მზის სინათლეს იღებს კონკრეტული ადგილმდებარეობა. ეს კონკრეტული წარმოადგენს ერთი საათის განმავლობაში მზის სინათლის ინტენსიობას(მზის რადიაცია) საშუალოდ 1000 ვატი 1 კვადრატულზე .

ფორმულა:

მზის პიკის 1 საათი = მზის რადიაციის 1 საათი  $1000 \text{ ვტ/მ}^2 = 1000 \text{ ვტ/მ}^2$  და რადგანაც 1000 ვატი იდენტურია 1 კილოვატისა

მზის პიკის 1 საათი = მზის რადიაციის 1 საათი  $1 \text{ კვტ/მ}^2 = 1 \text{ კვტ.სთ/მ}^2$



**მზის ელექტროსადგური ჯვრის წყალსაცავზე და ენგურის  
კაშხალზე**

მზის პანელები ჩვეულებრივ გათვლილია შემავალ სიმძლავრეზე 1000 ვტ/მ<sup>2</sup>. ამიტომ პიკური მზის საათის განმავლობაში 1 კილოვატი სიმძლავრის სადგურიდან მოსალოდნელია 1 კილოვატ-საათი ენერჯის მიღება, ამავდროულად ვითვალისწინებთ სისტემურ დანაკარგებს და სხვა გარემოებებს, ისეთი როგორცაა გარემოს ტემპერატურა. პანელებისთვის აუცილებელია გაგრილება, ამ საქმეს წყალსაცავში წყალი ითავსებს, სხვა დანარჩენებს კი შესაბამისი აღჭურვა ჭირდებათ, რაც იწვევს ინსტალაციის საფასურის მომატებას.

## მოდელირების შედეგები

### პანელების ზომები და განთავსება.

2.279 მეტრი x 1.134მ x 0.035მ და დაშორება 0.02მ

### მიმდებარე ტერიტორია

ენგურჰესის თაღოვანი კაშხლის მიმდებარედ, საპარკინგე არეალზე, ასევე აქვე განთავსებულ შენობაზე ყველაზე დიდი რაოდენობით მოდის რადიაცია.

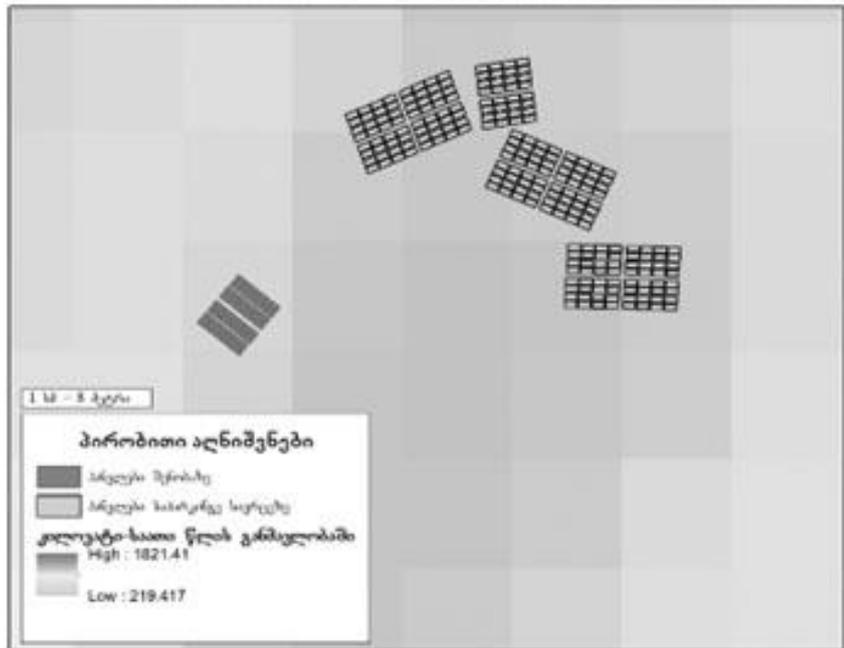
პარკინგეზე განთავსდა 224 პანელი, ხოლო შენობაზე 32.

ამ ტერიტორიაზე აწყოილი კონსტრუქცია ხელს არ შეუშლის ძველებურად სივრცის ათვისებას და პოტენციური ყველაზე მეტი გააჩნია, რადიაციის მიღების მხრივ, ამასთანავე ექსპოზიცია სამხრეთის/სამხრეთ-დასავლეთის და კონკრეტულად დასავლეთის მხარეებია.

კაშხლის გვერდით შენობის სახურავზე 52 ცალი პანელი განთავსდა, ასევე საინტერესო იქნებოდა წყალსაცავზე მნახველებისათვის სპეციალურად მოწყობილ გადმოსახედ ბეტონის კონსტრუქციაზე პანელებით გადახურვა. საშუალოდ 80 ცალი განთავსდება.

კაშხლის ტანზე მარცხენა მხარე წყალმიმღებებთან არასახარბიელოა, შუა და მარჯვენა მხარეზე კი შესაძლებელია პანელების განთავსება. რაოდენობა აღწევს 411- ს.

ყველაზე რთული მომენტია წყალსაცავში მოცურავე პანელი, ვინაიდან მდინარეს ჩამოაქვს სხვადასხვა ობიექტები, განსაკუთრებულად ხის მასალა და აგროვებს კაშხალთან, როგორც მარჯვენა, ისე მარცხენა მხარეს. ხოლო სადგურის სიმძლავრე დამოკიდებულია წყლის დონეზე. მისი განთავსება წყალში ყველაზე ცუდ ვარიანტში, წყალმიმღებების დონეზეა შესაძლებელი, რადგანაც ჰიდროელექტროსადგური უკვე წყვეტს მუშაობას წყალმცრობის გამო. დაკვირვებისთვის გამოყენებული იქნა სხვადასხვა წლის აეროფოტოგადაღება.



მზის ელექტრო სადგური საპარკინგე სივრცეზე და შენობაზე

ამისათვის შეიქმნა ცალკე ბუფერული პოლიგონი პროგრამულად, რომელიც იმეორებს წყალნაკლულობის ფორმას ყველა მხარეს. პირველი ნაწილი სადგურისა განთავსდა 86204 პანელით, ხოლო მეორეს მხოლოდ ვიზუალური ფორმულირება მიეცა, ვინაიდან წყალსაცავის რელიეფი აქ კითხვის ნიშნებს აჩენს, ბათიმეტრია არ გვაქვს და მდინარის

წყალმოვარდნისგან მისი დაცვა რამდენად შესაძლებელი იქნება გაურკვეველია.

ქვედა ბიეფის მიმდებარედ არსებული შენობები კი გამოსადეგია 426 პანელისთვის. აუცილებელია გაანგარიშდეს და დაზუსტდეს მათი ახლანდელი ფიზიკური მდგომარეობა, სახურავის გადახურვის ტიპი და დახრილობა. შემდგომში კი შესაძლებელია სადგურების შესწორება და შესაბამისი რაოდენობის განთავსება.



#### მზის პანელეები შენობებზე

წარმოდგენილი ნაშრომი მოდელირებაა, ზუსტ და საიმედო შედეგს ვერ დადებს. იმის გათვალისწინებით, რომ მზის ნათების ხანგრძლივობა ამ ტერიტორიაზე დაბალია (წელიწადში 1900 დან - 2000 - მდე), მთლიანად არა, მაგრამ ნაწილობრივ შეიძლება ამ ტერიტორიის ათვისება, როგორც კაშხალი, ასევე მიმდებარე არეალი.

თუ ვიანგარიშებთ 300 ვატისანი პანელეებით შემდგარ სადგურს, გვექნებოდა სიმძლავრეები კილოვატ-საათებში:

საპარკინგე სივრცეზე 73.2 , შენობაზე 9.6

შენობის - მნახველების სივრცე 15.6 და 24

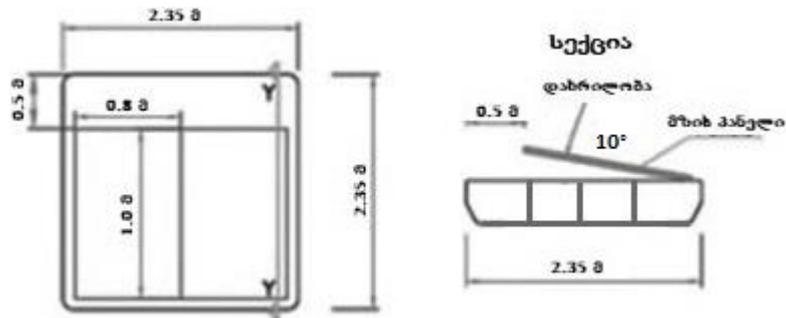
კაშხლის ქვედა ბიევის შენობები 127.8

ენგურის კაშხალზე 123.3 და პირველი მოტივტივე საპროექტო წყალსაცავზე კი 25861.2 მეგავატი [კაპანაძე 2023 II, კაპანაძე 2023 III].

მზის სადგურის სიდიდიდან გამომდინარე ქსელში ჩასართავად უახლოესი ქვესადგური ჯვრის დასახლებაშია 5 კმ - ში.

### მოტივტივე მზის ელექტროსადგურის პანელების კონსტრუქცია ჯვრის წყალსატევზე

ჩვენს მიერ ჯვრის წყალსატევისათვის შერჩეული პანელების სამონტაჟო კონსტრუქცია მოიცავს სექციებს, ბილიკებს პანელების რიგებს შორის და გვერდების გასწვრივ, რათა ხელი შეუწყოს პანელების გაწმენდას და შენარჩუნებას.

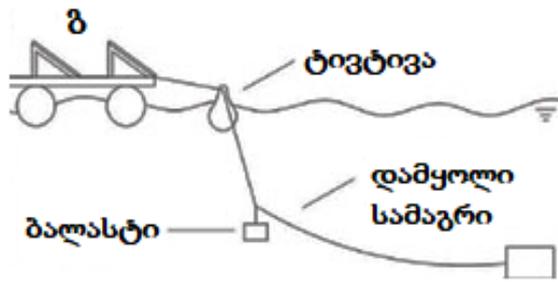


ჯვრის წყალსატევისათვის შერჩეული სამონტაჟო პანელების კონსტრუქცია



ჯვრის წყალსატევისათვის შერჩეული სამონტაჟო პანელების კონსტრუქციის 3D მოდელი

ჩვენ შევარჩიეთ პანელების დამყოლი სამაგრი, რადგანაც წყალსატევში დინების სიჩქარე მცირეა მდინარესთან შედარებით.



პანელების დამყოლი სამაგრი.

თვითონ მზის პანელების განლაგება წყალსატევში შეკრული სახით.



მზის პანელების განლაგება წყალსატევში

მოტივტივე პანელები წყალსაცავში კარგი იდეაა, მაგრამ ბოლო პერიოდში წყალმცრობის მიზეზით ჰიდროელექტრო-სადგური პრობლემატურად მუშაობს, ნაკლები წყალი, ნაკლები სივრცეა. მსოფლიო გამოცდილება გვიჩვენებს, რომ მაშინ როდესაც წყალსაცავს თავის შევსების პირობები და დრო აქვს, რა გარანტიაა რომ მთის მდინარე ენგური წყალდიდობა /წყალმოვარდნის პერიოდში ჩამოტანილი მასალით საფრთხეს არ შეუქმნის მზის სადგურს. ხუდონჰესის არსებობის შემთხვევაში კი ეს საშიშროება გამოირიცხებოდა.

**სივრცითი და ატრიბუტული მონაცემთა ბაზა კლიმატის ცვლილების ასპექტში**

კლიმატის ცვლილების ასპექტში ადგილობრივ დონეზე კვლევისთვის დამუშავდა სივრცითი და ატრიბუტული მონაცემთა ბაზა

სადაც წარმოდგენილია მეტეოროლოგიური სადგურები ტემპერატურული და ნალექების ინფორმაციით. დამუშავების პერიოდი საკმაოდ დიდია.

### **ტრანსპირაციის ფორმულა**

ვინაიდან საქართველო ძირითადად მთიანი რელიეფია და კლიმატის პირობები რეგიონებში მნიშვნელოვნად განსხვავდება, ტრანსპირაციის შეფასება ნაწილობრივ დამოკიდებულია ადგილობრივ დონეზე და არსებულ მონაცემებზე. ასეთ რთულ ტოპოგრაფიაში და განსხვავებულ ტემპერატურულ რეჟიმში ოპტიმალურია Hargreaves-Samani ფორმულა.

### **დაკვირვებები ენგურჰესის კაშხალზე**

ძირითადი გამოკვლევები:

- საშუალო წლიური ტემპერატურები
- წლიური ნალექების ჯამი
- რეგრესიის ფორმულები

კვლევის შედეგად დადგენილია მცურავი მზის პანელების გარემოზე ზემოქმედება, მტკნარი წყლის სისტემებზე და მათი ტექნო-ეკოლოგიური სინერგია. ასევე, ზედაპირიდან და ნიადაგიდან წყლის აორთქლების შეფასების ერთ-ერთი ყველაზე მარტივი, ტემპერატურაზე დაფუძნებული ტექნიკა

### **დასკვნები**

1. GIS-ის და დისტანციური ზონდირების მეთოდების გამოყენებით შეიქმნა მდინარე რიონის და ენგურჰესის ჯვრის წყალსაცავის მზის რადიაციის რუკა როგორც სივრცითი მონაცემთა ბაზა.
2. შეფასდა მდინარე რიონის და ენგურჰესის ჯვრის წყალსაცავის მზის გამოსხივების პოტენციალი.

3. პირველად საქართველოში შეიქმნა მზის ელექტროსადგურის მოდელი მდინარე ყვირილაზე და ენგურჰესის ჯვრის წყალსაცავზე, რომელიც აღჭურვილია მოტივტივე ფოტოელექტრული პანელებით.
4. გამოიყო კონკრეტული ადგილები სადაც ოპტიმალურია მზის სადგურების განთავსება.
5. დადგენილია ძალიან მაღალი კორელაცია ( $R^2 = 0.89$ ) ტრანსპირაციასა და ტემპერატურას შორის.
6. რეგრესიის დახრის კოეფიციენტი შემცირდა 5.7%-ით 1965-დან 1985-მდე. ხოლო, 1985-2025 პერიოდში საშუალო ტემპერატურა გაიზარდა 2.83°C-ით (+25.4%).
7. შემოდგომაზე ტრანსპირაცია თითქმის გაორმაგდა (+97.6%).
8. გაზაფხულზე დაფიქსირდა ტემპერატურის ზრდა ტრანსპირაციის შემცირებით.
9. წრფივი მოდელი არასაკმარისია - აუცილებელია სეზონურად დიფერენცირებული მიდგომა.
10. შესწავლილია მცურავი მზის პანელების გარემოზე ზემოქმედება, მტკნარი წყლის სისტემებზე და მათი ტექნო-ეკოლოგიური სინერგია.
11. გამოყენებულია ზედაპირიდან და ნიადაგიდან წყლის აორთქლების შეფასების ერთ-ერთი ყველაზე მარტივი, ტემპერატურაზე დაფუძნებული ტექნიკა

დისერტაციის მასალა იყო მოხსენებული საერთაშორისო კონფერენციაზე, რომელიც მიძღვნილი იყო მსოფლიო წყლის დღეს, 2023 წლის 22 მარტს.

დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია შემდეგ ნაშრომებში:

1. Kapanadze G., Z. Tsinadze, A. Bagration-Davitashvili. Design solar power plant at the river Khvirila. Georgian Engineering News. #1, Vol. 97. 2023. pp. 92-97

2. Kapanadze G., Z. Tsinadze, A. Bagration-Davitashvili. Design of solar panels on Enguri Dam and Jvari Reservoir Georgian Engineering News. #1, Vol. 97. 2023. pp. 97-103.
3. კაპანაძე გ. მოტივტივე მზის სადგურები - მსოფლიო გამოცდილება საქართველოსთვის. შრომათა კრებული, მიძღვნილი მსოფლიო წყლის დღეს. 2023. ბეჭდვაში.
4. Kapanadze.G, Floating Solar Stations - World Experience for Georgia. SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL, "BUILDING" #1(72).

### **Resume**

The global growth of world population, improved industrialization and increase in living standards of people have increased the demand for energy in the last few decades. Therefore, the deployment of renewable energy systems in the global energy system is an important and beneficial tool in the strategy of world progress.

The work is devoted to the use of solar photovoltaic panels for obtaining electricity in the Kvirila River and Enguri Hydropower Plant's Jvari Reservoir. The construction of photovoltaic panels and their fastening systems are proposed.

Using GIS and remote sensing methods, a solar radiation map of the Rion River and Engurhesi Cross Reservoir was created as a spatial database.

By modifying the methods of interpolation, radiation modeling and spatial analysis, a solar radiation map of the Rion River and Engurhesi Cross Reservoir was created.

The solar radiation potential of Rion River and Engurhesi Cross Reservoir was evaluated.

The environmental impact of floating solar panels on freshwater systems and their techno-ecological synergy has been studied.

Has been used one of the simplest, temperature-based techniques for estimating water evaporation from surfaces and soils