

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გურამი მირინაშვილი

საქართველოს მდინარეების ენერგეტიკული მახასიათებლების
პროგნოზირების ტექნიკურ-ეკონომიკური ანალიზი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ეფერ ატი

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკის ფაკულტეტი
ელექტროენერგეტიკის და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი ა. კობტაშვილი

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2026 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII,
სხდომათა დარბაზი.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,
პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი ეხება საქართველოს ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალისა და ჰიდროლოგიური ფაქტორების კომპლექსურ კვლევას, წყლის რესურსების პროგნოზირებისათვის ოპტიმიზებული მათემატიკური მოდელის შემუშავებას, აღნიშნული პროცესების ავტომატიზაციასა და მისგან მიღებული ეკონომიკური სარგებლის შეფასებას.

თანამედროვე ეტაპზე საქართველოში არ არსებობს ჰიდროლოგიური მახასიათებლების პროგნოზირების ისეთი უნიფიცირებული მათემატიკური მიდგომა, რომელიც მოკლევადიან და საშუალოვადიან პერიოდებში ენერგოსისტემის საპროგნოზო ბალანსის მაღალი სიზუსტით შედგენის შესაძლებლობას მოგვცემს. შესაბამისად, ნაშრომში განხილული საკითხები გვთავაზობს სრულიად ახლებურ, ქვეყნის სპეციფიკაზე მორგებულ მიდგომას ქართულ ჰიდროენერგეტიკაში. აღსანიშნავია, რომ გასული საუკუნის 90-იან წლებში შექმნილი კრიზისის გამო, ქვეყანაში განადგურდა მდინარეთა ჩამონადენისა და თოვლის საფარის გამზომი მრავალი მეტეოროლოგიური და ჰიდროლოგიური სადგური. შედეგად, დღეისათვის მწვავედ დგას სრულფასოვანი, უწყვეტი და მაღალი სიზუსტის მქონე ისტორიული სტატისტიკური მონაცემების დეფიციტი, რაც ართულებს პროგნოზირების ავტომატიზაციას. ნაშრომში შემოთავაზებული მეთოდოლოგია წარმოადგენს ეფექტურ გადაწყვეტას ამ გამოწვევის დასაძლევად და ორიენტირებულია ენერგოსისტემის ოპტიმალურ მართვაზე.

სადისერტაციო ნაშრომის 10 თავი შინაარსობრივად სამ ძირითად ეტაპად ერთიანდება: პირველი (I-IV თავები) ეთმობა ქვეყნის ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალისა და ჰიდროლოგიური პროგნოზირების ანალიზს; მეორე (V-IX თავები) – სტატისტიკურ დამუშავებასა და მათემატიკური მოდელების შემუშავებას; ხოლო მესამე (X თავი) – მიღებული შედეგების ეკონომიკურ შეფასებასა და ენერგოსისტემის ოპტიმიზაციის ფინანსურ სარგებელს

არსებული პროგნოზირების მეთოდები და მათი ნაკლოვანებები. ჰიდროლოგიური პროგნოზების მომზადების მიზნით, სს „საქართველოს

სახელმწიფო ელექტროსისტემა“ აქტიურად თანამშრომლობს როგორც ადგილობრივ უწყებებთან (სსიპ გარემოს ეროვნული სააგენტო), ისე საერთაშორისო დონის აღიარებულ ორგანიზაციებთან და კომპანიებთან (მაგ. EDF, Stucky, NVE და სხვ.). თუმცა, პრაქტიკა აჩვენებს, რომ მოქმედი საპროგნოზო მოდელები ხშირად ხასიათდება მაღალი ცდომილებით. მაგალითად, სააგენტოს მიერ მოწოდებული მონაცემების ვარიაცია რეალურ ხარჯებთან მიმართებით ხშირად 15-20%-ს აღწევს.

საქართველოს მსგავსი ქვეყნისთვის, სადაც ელექტროენერჯის ჯამური წლიური მოხმარების 75-85%-ს, ხოლო გაზაფხული-ზაფხულის სეზონზე (წყალუხვობის პერიოდში) შიდა მოხმარების 100-150%-ს სწორედ ჰიდროელექტროსადგურების გენერაცია ფარავს, მსგავსი ცდომილება სისტემის ოპერირებაში სერიოზულ ტექნიკურ და ეკონომიკურ სირთულეებს (ენერჯის დეფიციტი ან წყლის უქმად დაღვრა) წარმოქმნის. ნაშრომში შემოთავაზებული მიდგომა ეფუძნება თანამედროვე საერთაშორისო პრაქტიკას – რაც გულისხმობს მონაცემთა დამუშავებას პროგრესული მათემატიკური და სტატისტიკური აპარატით – და ამავდროულად ითვალისწინებს ქართულ რეალობას, კერძოდ, პირველადი საზომი მოწყობილობებისა და მონაცემების დეფიციტს. კვლევის შედეგად მიღებულია მოდელი, რომელიც სრულად პასუხობს ადგილობრივი ენერგოსისტემის მოთხოვნებს და უზრუნველყოფს მისი მართვის ეფექტურობის ამაღლებას.

კვლევის მიზანი და ამოცანები. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს საქართველოს ელექტროენერგეტიკული სისტემის სპეციფიკაზე მორგებული ჰიდროლოგიური მახასიათებლების პროგნოზირების ინტეგრირებული მათემატიკური მოდელის შემუშავება. აღნიშნული მოდელი აერთიანებს რამდენიმე პროგრესულ მათემატიკურ მიდგომასა და ფილტრაციის ალგორითმს, რაც უზრუნველყოფს საპროგნოზო ცდომილების მკვეთრ შემცირებას, მონაცემთა ჰეტეროგენულობის (არაერთგვაროვნების) ეფექტურ მართვას და ენერგოსისტემის საოპერაციო დაგეგმვის საიმედოობის ამაღლებას.

დასახული მიზნის მისაღწევად ნაშრომში გადაჭრილია შემდეგი ძირითადი ამოცანები:

- საქართველოს წამყვანი ჰიდროლოგიური აუზების (კერძოდ, მდინარეების ენგურისა და რიონის) ისტორიული სტატისტიკური მონაცემების, ჩამონადენისა და მეტეოროლოგიური ფაქტორების კომპლექსური ანალიზი;
- პირველადი მონაცემების დეფიციტისა და საზომი ხელსაწყოების ხმაურის (ცდომილებების) კომპენსირებისათვის კალმანის ფილტრის (Kalman Filter) ადაპტაცია და რეგრესიული ანალიზის მეთოდების ინტეგრაცია;
- ნიმუშის შესაბამისობის (Pattern Matching) ალგორითმების შემუშავება მოკლევადიანი და საშუალოვადიანი ჰიდროლოგიური პროგნოზების ოპტიმიზაციისთვის;
- საპროგნოზო მოდელის სიზუსტის შეფასება საერთაშორისოდ აღიარებული მეტრიკების (KGE და NSE ინდექსების) გამოყენებით და მისი პრაქტიკული ეკონომიკური ეფექტურობის დასაბუთება.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს საქართველოს წამყვანი ჰიდროენერგეტიკული მნიშვნელობის მქონე მდინარეების (კერძოდ, ენგურისა და რიონის აუზების) ჩამონადენი და მათი ჰიდროლოგიური მახასიათებლები. კვლევაში საპროგნოზო შედეგების იდენტიფიცირებისა და ვერიფიკაციისათვის გამოყენებულია საერთაშორისო პრაქტიკაში აღიარებული თანამედროვე საინჟინრო-მათემატიკური კომპლექსები, კერძოდ MORDOR-SD (Électricité de France - EDF) და ფართოდ გავრცელებული საპროგნოზო სისტემები.

აღნიშნულ პროგრამულ უზრუნველყოფაში შეფასდა ჰიდროლოგიური მახასიათებლების პროგნოზირების შესაძლებლობები, ალგორითმების სპეციფიკა და მიღებული შედეგების ცდომილებები. აღნიშნული საერთაშორისო მოდელების მუშაობის ეფექტურობა და საპროგნოზო სიზუსტე შედარდა და შეჯერდა ნაშრომში ჩვენს მიერ შემუშავებულ, საქართველოს რეალობაზე ადაპტირებულ ინტეგრირებულ მათემატიკურ მოდელთან და Tethys-ის პროგრამულ პლატფორმასთან.

კვლევის მეცნიერული სიახლე. ნაშრომის ძირითად მეცნიერულ სიახლეს წარმოადგენს საქართველოს ელექტროენერგეტიკული სისტემის ოპერატორის (სსე) დონეზე მდინარეთა აუზებში წყლის შემოდინების, თოვლის საფარის დინამიკისა და თანმდევი ჰიდრომეტეოროლოგიური მახასიათებლების კომპლექსური,

მათემატიკურად მოდელირებული ანალიზის მეთოდოლოგიის შემუშავება და დანერგვა. წინამდებარე კვლევა წარმოადგენს ფუნდამენტურ საფეხურს ეროვნული ჰიდროენერგეტიკული რესურსების რაციონალური და ოპტიმალური საოპერაციო მართვისათვის.

კვლევის ფარგლებში სამეცნიერო სიახლეს განეკუთვნება:

- **ავტორისული მათემატიკური აპარატის შემუშავება:** ჰიდროლოგიური პროგნოზირებისათვის შექმნილია ორიგინალური კომბინირებული ალგორითმი, რომელიც ეფუძნება კალმანის ფილტრისა (Kalman Filter) და ნიმუშის შესაბამისობის (Pattern Matching) მათემატიკური აპარატის ადაპტაციას. აღნიშნული მიდგომა უზრუნველყოფს მაღალ სიზუსტეს პირველადი საზომი სადგურების დეფიციტისა და მონაცემთა წყვეტილობის პირობებში, რაც კვლევის ერთ-ერთ მთავარ გამოწვევას წარმოადგენდა.
- **Tethys-ის პლატფორმის ინტელექტუალური მოდიფიკაცია:** საერთაშორისო საპროგნოზო სისტემის (Tethys) ბაზაზე შემუშავდა და რეალიზდა სპეციალიზებული პროგრამული მოდული. სიახლე მდგომარეობს იმაში, რომ სტანდარტულ პლატფორმაში ინტეგრირებულ იქნა ავტორის მიერ შექმნილი ლოკალური ალგორითმები, რამაც სისტემას მისცა საქართველოს მაღალმთიანი რელიეფისთვის დამახასიათებელი სპეციფიკური ჰიდროლოგიური ციკლების აღქმის შესაძლებლობა.
- **ჰიბრიდული საპროგნოზო მეთოდოლოგია:** შემუშავდა დამოუკიდებელი, MS Excel-ის ბაზაზე აგებული ალგორითმული მოდელები, რომლებიც ფუნქციონირებენ როგორც პარალელურ, გადამზღვევ რეჟიმში, ისე ექსპერტულ-ანალიტიკური მართვის ინსტრუმენტად, რაც ზრდის სისტემის საერთო საიმედოობას.
- **მოდელის ვალიდაცია და ვერიფიკაცია:** მათემატიკური აპარატის სიზუსტე და საპროგნოზო ეფექტიანობა მეცნიერულად დასაბუთდა და გადამოწმდა ნემ-სატკლიფის ეფექტიანობის კოეფიციენტისა (NSE) და კლინგ-გუფტას ეფექტიანობის (KGE) მეტრიკების გამოყენებით. მიღებული მაღალი მაჩვენებლები ადასტურებს შემუშავებული მოდელის ადეკვატურობას რეალურ საოპერაციო გარემოში.

კვლევის შედეგების პრაქტიკული ღირებულება და გამოყენების სფერო. სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში მიღებული სამეცნიერო-ტექნიკური შედეგები, შემუშავებული საინჟინრო-მათემატიკური მოდელები და სპეციალიზებული პროგრამული უზრუნველყოფა უპირველეს ყოვლისა მიმართულია ელექტროენერგეტიკული სექტორის ეფექტიანობის გაზრდაზე. კვლევის შედეგების პრაქტიკული რეალიზაცია გულისხმობს:

- **ჰიდროენერგეტიკა და სისტემის ოპერირება:** მოდელების გამოყენებით შესაძლებელია კონკრეტულ მდინარეთა აუზებში წყლის საპროგნოზო შემოდინების მოცულობისა და დინამიკის წინასწარი განსაზღვრა. ეს საშუალებას აძლევს ჰიდროელექტროსადგურების ოპერატორებს და სისტემის დისპეტჩერებს, მოახდინონ წყლის რესურსების ოპტიმალური განაწილება, აამაღლონ სისტემური დაგეგმვის ხარისხი და მინიმუმამდე დაიყვანონ წყლის უქმად დაღვრის ალბათობა.
- **სხვა სფეროები:** შემუშავებული ჰიდროლოგიური პროგნოზირების მეთოდოლოგია ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნას მომიჯნავე დარგებში, მათ შორის წყალმომარაგების, მელიორაციის, სოფლის მეურნეობისა და ეკოლოგიური უსაფრთხოების მიზნებისთვის.

კვლევის შედეგების აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები, თეორიული მიდგომები და პრაქტიკული შედეგები ეტაპობრივად იქნა წარდგენილი და განხილული შემდეგ სამეცნიერო ფორუმებზე:

- საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის, ელექტროენერგეტიკისა და ელექტრომექანიკის დეპარტამენტის I, II და III კოლოკვიუმებზე;
- დეპარტამენტის გაფართოებულ სხდომაზე გამართულ სადისერტაციო ნაშრომის წინასწარ დაცვაზე;
- 5 საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე.

პუბლიკაციები. სადისერტაციო ნაშრომის ირგვლივ ჩატარებული კვლევის ძირითადი შინაარსი, მათემატიკური მოდელები და მიღებული შედეგები ასახულია რეცენზირებად სამეცნიერო ჟურნალებსა და კონფერენციის შრომებში

გამოქვეყნებულ 5 სამეცნიერო სტატიაში (მათ შორის საერთაშორისო თანაავტორობით).

სადისერტაციო ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, ათი თავის, დასკვნებისა და გამოყენებული ლიტერატურის სიისგან. ნაშრომის ძირითადი ტექსტი მოიცავს 152 გვერდს. ნაშრომში ინტეგრირებულია 25 ცხრილი, 39 ნახაზი და 28 სურათი. გამოყენებული სამეცნიერო ლიტერატურის სია მოიცავს 64 დასახელებას.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი სტრუქტურა და შინაარსი მიზანმიმართულად მიჰყვება დასახული ამოცანების გადაჭრის ლოგიკურ ჯაჭვს. მასში კომპლექსურად არის შესწავლილი საქართველოს ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალი, ჩამონადენის მათემატიკური პროგნოზირების თანამედროვე მეთოდოლოგიები, ასევე მიღებული საპროგნოზო შედეგების ტექნიკური და ფინანსურ-ეკონომიკური ანალიზი.

კვლევის ფარგლებში საექსპერიმენტო ბაზას, მოდელების იდენტიფიკაციასა და მიღებული ალგორითმების პრაქტიკულ გამოცდას საფუძვლად დაედო საქართველოს წამყვანი მდინარეების (ენგურისა და რიონის აუზები) რეალური ჰიდროლოგიური მონაცემები. ემპირიული კვლევები, მოდელირებული პროგრამული კომპლექსის ტესტირება და საპროგნოზო შედეგების ვერიფიკაცია უშუალოდ განხორციელდა სს „საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემის“ (სსე) დისპეტჩერიზაციის დეპარტამენტის ბაზაზე, რაც ხაზს უსვამს ნაშრომის მაღალ პრაქტიკულ საიმედოობას.

თავი 1. საქართველოს ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალის შეფასება

მეთოდოლოგიური მიდგომა და სამეტაპიანი ოპტიმიზაცია. ნაშრომში წარმოდგენილია საქართველოს ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალის მრავალკრიტერიუმული სივრცითი (GIS) ანალიზი. კვლევა ფოკუსირებულია მოდინებაზე მომუშავე პოტენციურ სადგურებზე, რომლებიც არ საჭიროებენ მაღალ კაშხლებსა და დიდ წყალსაცავებს, არ მდებარეობენ დაცულ ტერიტორიებზე და მათი საინვესტიციო ღირებულება არ აღემატება 0.35 აშშ დოლარს წლიურად გამომუშავებულ კილოვატსაათზე (საბაზისო კრიტერიუმი).

კვლევა წარმართა სამ ფუნდამენტურ ეტაპად:

1. ციფრული სიმაღლის მოდელისა და ჩამონადენის ახალი ეროვნული ბადის ინტეგრირებით, მდინარეთა ქსელის 50-მეტრიანი სეგმენტაციით, განისაზღვრა მაქსიმალური თეორიული პოტენციალი;

2. ტექნიკურ-ეკონომიკური ფილტრაციის ფარგლებში შეფასდა ინფრასტრუქტურული ლოგისტიკა (მანძილი გადამცემ ქსელამდე და ცენტრალურ გზებამდე) და საინვესტიციო ხარჯების ფუნქცია;
3. ამოღებულ იქნა უკვე ათვისებული ჰიდრორესურსები და დაცული ტერიტორიების გეოგრაფიული არეალები.

თავი 2. ჰიდროლოგიის პროგნოზირების არსი

ჰიდროლოგიური ჩამონადენისა და ენერგომოხმარების დინამიკის შედარებითი ანალიზი აჩვენებს, რომ ჰიდროლოგიური პროგნოზირების კომპლექსურობა, ელექტროენერჯის მოხმარების პროგნოზირებასთან შედარებით, განპირობებულია მისი მკვეთრი არასტაციონარულობით (დროში ცვლადი სტატისტიკური მახასიათებლებით) და გარემო ფაქტორებზე მაღალი დამოკიდებულებით. კლიმატური ცვლილებები და აუზის ტრანსფორმაცია იწვევს ჩამონადენის მრავალწლიური ტრენდების არახაზოვან ცვლილებას, რაც ართულებს წარსული ისტორიული კანონზომიერებების გამოყენებას მომავლის პროგნოზირებისთვის. სსე-ს საოპერაციო მონაცემების ანალიზმა აჩვენა, რომ მაშინ, როდესაც მსხვილი პირდაპირი მომხმარებლების დღიური მოთხოვნის ცვალებადობა (ინერციულობის გამო) არ აღემატება 5%-10%-ს, მოდინებაზე მომუშავე ჰესების გეგმა-ფაქტობრივი დღიური ცდომილება 50%-80%-ს აღწევს, ხოლო გაზაფხულის წყალმოვარდნებისას საპროგნოზო მაჩვენებელს რამდენჯერმე აჭარბებს.

საექსპორტო პოტენციალი და საბაზრო შეზღუდვები. საქართველოს ენერგოსისტემისთვის დამახასიათებელია მკვეთრი სეზონურობა, რაც გამოიხატება გაზაფხული-ზაფხულის პერიოდში (აპრილი-ივლისი) ჭარბი გენერაციის არსებობით. რეგიონული საექსპორტო ბაზრების ანალიზი აჩვენებს, რომ რუსეთისა და აზერბაიჯანის ენერგოდომინანტურობის, ხოლო სომხეთის მიმართულებით არსებული ტექნიკური შეზღუდვების (ეგზ „ალავერდის“ საოპერაციო ზღვარი 140–150 მგვტ) გამო, ძირითად სტრატეგიულ მიმართულებას თურქეთის ენერგობაზარი (EPIA\$) წარმოადგენს. აღნიშნულ ბაზარზე ოპერირება და საექსპორტო

სიმძლავრეების დაჯავშნა მოითხოვს გენერაციის ზუსტ პროგნოზირებას 30 დღით ადრე, რაც პირდაპირ განსაზღვრავს სადგურების ფინანსურ შედეგებს.

თავი 3. მდინარეთა ჩამონადენის ფორმირების ბუნებრივი ფაქტორების

მიმოხილვა

მიუხედავად იმისა, რომ საქართველოს ჰიდროგრაფიული ქსელი 26 000-ზე მეტ მდინარეს მოიცავს, მათი უმეტესობა (99.4%) მცირე კატეგორიას მიეკუთვნება და წყალმცირობის გამო ენერგეტიკულად ნაკლებად რენტაბელურია. შესაბამისად, ქვეყნის ჯამური ჰიდროპოტენციალის 70%-ზე მეტი კონცენტრირებულია 5 ძირითად აუზში: რიონი (22%), მტკვარი (16%), ენგური (15%), კოდორი (9%) და ბზიფი (8%). ნაშრომში დეტალურად არის შესწავლილი რიონისა და ენგურის აუზები, ხოლო ტრანსსასაზღვრო მდინარე, მტკვარი განხილულია მხოლოდ ენერგეტიკული ოპტიმიზაციის კრილში.

თავი 4. საქართველოს ძირითადი მდინარეების მიმოხილვა

მდინარე რიონის აუზი: ხასიათდება მაღალი წყალუხვობითა და განვითარებული ჰიდროენერგეტიკული კასკადით (ლაჯანურჰესი, შაორჰესი, ტყიბულჰესი, გუმათჰესები, რიონჰესი, ვარციხეჰესები). 1998 წლის შემდგომ ნამახვანის საგუშაგოზე დაკვირვებების შეწყვეტის გამო, ისტორიული ჰიდროლოგიური მონაცემები აღდგენილ იქნა რიონჰესისა და გუმათჰესის გენერაციის რეტროსპექტული ანალიზის საფუძველზე. მოდელის ვალიდაციამ მაღალი სიზუსტე აჩვენა — წყლის ხარჯის საპროგნოზო ცდომილება არ აღემატება 5%-ს.

მდინარე მტკვრის აუზი: მასზე მოდის ქვეყნის ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალის 16%, რადგან რესურსის ძირითადი ნაწილი თურქეთის ტერიტორიაზე აქტიურად რეგულირდება, ხოლო საქართველოს საზღვრებში კალაპოტის დახრილობა მკვეთრად მცირდება. არსებული სადგურების ოპერირების მიუხედავად, თურქეთის მხრიდან ტრანსსასაზღვრო ჰიდროლოგიური ჩარევების გამო, აუზის შემდგომი კასკადური განვითარების

ეკონომიკური მიზანშეწონილობა დაბალია, რის გამოც იგი ოპერატიულ საპროგნოზო პრიორიტეტად არ დასახულა.

მდინარე ენგურის აუზი: წარმოადგენს საქართველოს ენერგოსისტემის ბირთვს — მასზე მოდის ჰესების გამომუშავებული ენერჯის 50–55% და წყლის შენახვის ტევადობის 64%. აუზის თეორიული პოტენციალი შეადგენს 21 ტვტ.სთ-ს, საიდანაც ეკონომიკურად მიზანშეწონილია 10–11 ტვტ.სთ (ამჟამად ათვისებულია 5.5 ტვტ.სთ). პერსპექტივაში დაგეგმილია 1602 მგვტ ჯამური სიმძლავრის პროექტები, მათ შორის ხუდონჰესი (702 მგვტ) და ნენსკრაჰესი (280 მგვტ).

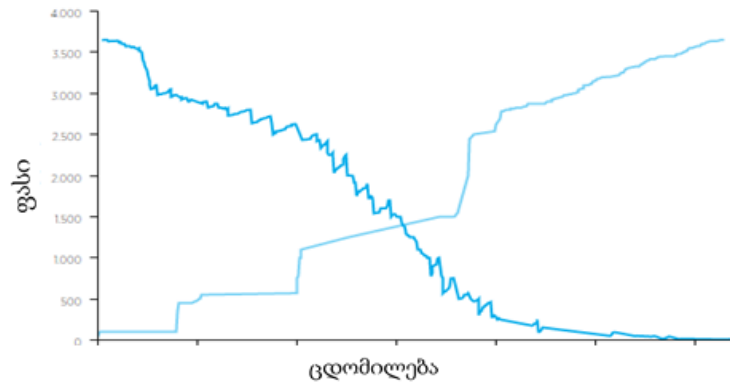
თავი 5. ჰიდროლოგიის პროგნოზირების სიზუსტის ანალიზი

ჰიდროლოგიური პროგნოზირების ეფექტიანობის შეფასებისას უმნიშვნელოვანეს ფაქტორს საპროგნოზო მოდელის სიზუსტისა და მისი უზრუნველყოფისათვის საჭირო ფინანსური დანახარჯების ოპტიმალური ბალანსის დადგენა წარმოადგენს. მაქსიმალურად მაღალი სიზუსტის მიღწევა პირდაპირკავშირშია მრავალკომპონენტური ჰიდრომეტეოროლოგიური პარამეტრების (ნალექები, აორთქლება, ტემპერატურა, ნიადაგის ტენიანობა, მყინვარების დინამიკა და სხვ.) უწყვეტ მონიტორინგთან. ეს პროცესი მოითხოვს აუზში გამზომი მოწყობილობების (ჰიდროპოსტების) ქსელის მნიშვნელოვან გაფართოებას (მაგალითად, ენგურის აუზის სრულფასოვანი მოდელირებისთვის საჭიროა 30–50 საზომი წერტილი), რაც დაკავშირებულია დიდ კაპიტალურ და საოპერაციო ხარჯებთან.

ნაშრომში დასაბუთებულია, რომ კვლევის დაწყებამდე მკაფიოდ უნდა განისაზღვროს დასახული მიზნის ეკონომიკური მიზანშეწონილობა, რათა თავიდან იქნეს აცილებული არაგონივრული ფინანსური დანახარჯები.

ნახაზზე 1 წარმოდგენილი გრაფიკული მოდელი ასახავს კანონზომიერებას ფინანსურ დანახარჯებსა და საპროგნოზო ცდომილების მაჩვენებელს შორის. მოცემული ანალიზის ფარგლებში, ძირითად ამოცანას ილუსტრირებული მრუდების გადაკვეთის კოორდინატის (წერტილი X) დადგენა წარმოადგენს. აღნიშნული წერტილი გამოხატავს ეკონომიკურად ეფექტურ და ოპტიმალურ ბალანსს: იგი განსაზღვრავს გამოყოფილი ფინანსური რესურსის იმ ზღვრულ

მოცულობას, რომელიც უზრუნველყოფს ცდომილების მინიმუმამდე დაყვანას და გვიჩვენებს კონკრეტული მოდელისთვის მისაღები რისკის მაქსიმალურ, გონივრულ საზღვარს.



ნახაზი 1. ფინანსურ დანახარჯსა და საპროგნოზო ცდომილებას შორის დამოკიდებულება

თავი 6. სტატისტიკური მონაცემების ანალიზი

ნაშრომის ამ ნაწილში წარმოდგენილია ენგურის აუზის წყლის ხარჯის პროგნოზირების ტექნიკური და მეთოდოლოგიური რეალიზაცია, რაც განხორციელდა საერთაშორისო პარტნიორებთან (EBRD, STUCKY) თანამშრომლობითა და გარემოს ეროვნული სააგენტოს მონაცემთა ბაზაზე დაყრდნობით. საპროგნოზო ციკლის ოპტიმიზაციისა და სტატისტიკური ანალიზისთვის კომპლექსურად იქნა გამოყენებული და ადაპტირებული მათემატიკური მოდელები: მრავალჯერადი რეგრესია, მრუდწირული ანალიზი, კალმანის ფილტრი და ნიმუშების შეხამების (Pattern Matching) ალგორითმები.

მათემატიკური მოდელების ადაპტაცია და საინჟინრო შედეგები. სადგურებიდან მიღებულ საწყის მონაცემებში არსებული შემთხვევითი ხმაურის, სენსორული ცდომილებებისა და ანომალიური პიკების აღმოსაფხვრელად მოდელში გამოყენებულ იქნა კალმანის ფილტრი (Kalman Filter). ალგორითმმა უზრუნველყო დროითი რიგების ფილტრაცია და გამოტოვებული მნიშვნელობების რეკონსტრუქცია, რამაც საგრძნობლად აამაღლა მათემატიკური მოდელების სანდოობა. საპროგნოზო მონაცემების გრძელვადიანი კორექტირებისთვის

გამოყენებულმა ნიმუშის შესაბამისობის ალგორითმმა, კომპლექსური მეტეოროლოგიური პარამეტრების (ნალექი, ტემპერატურა, თოვლის დნობა) გათვალისწინებით, წარმატებით მოახდინა ისტორიული ანალოგების იდენტიფიცირება. საშუალოვადიანი დაგეგმარებისთვის კი რეგრესიული ანალიზის მეშვეობით, ბოლო 10 წლის ფაქტობრივ მონაცემებზე დაყრდნობით, გამოიყო სეზონური ტენდენციები, რამაც საფუძველი შექმნა წყალსაცავების ოპტიმალური მართვისთვის.

საპროგნოზო გაურკვევლობის ანალიზი და ეფექტურობის შეფასება. ნაშრომში დასაბუთებულია პროგრამულ პლატფორმა Tethys-ში რეალიზებული ალბათური მიდგომის უპირატესობა სს „საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემაში“ (სსე) დღემდე მოქმედ დეტერმინისტულ მეთოდოლოგიასთან შედარებით. 2012–2021 წლების სტატისტიკაზე დაყრდნობით, კვანტილური ინტერვალების გამოყენებით ჩატარებულმა ალბათურმა მოდელირებამ აჩვენა, რომ ნაცვლად ერთი ფიქსირებული, ხშირად არარეალისტური რიცხვისა, სისტემა იძლევა შესაძლო ჰიდროლოგიურ სცენართა ფართო სპექტრს (მაგ. ივლისის თვის ჭრილში საპროგნოზო დიაპაზონი განისაზღვრა 260–430 მ³/წმ-ით, 50%-იანი ალბათობით), რაც მინიმუმამდე დაჰყავს საოპერაციო რისკები.

მოდელის ხარისხის, კერძოდ სანდოობისა და გარჩევადობის ვერიფიკაცია განხორციელდა (Q-Q) დიაგრამებისა და სპეციფიკური მათემატიკური პარამეტრების მეშვეობით, სადაც Tethys-ის პლატფორმამ აჩვენა მაღალი გარჩევადობის ტრაექტორია თარიღის პირობით.

პროგნოზის კომპლექსური შეფასებისთვის გამოყენებულ იქნა უწყვეტი რანჟირების ალბათობის სიდიდე (CRPS - Continuous Ranked Probability Score), რომელიც გამოითვლება ფორმულით:

$$CRPS = \int_{-\infty}^{\infty} [F_t(x) - H(x - x_t)]^2 dx$$

სადაც $F_t(x)$ არის წყლის შემოდინების საპროგნოზო მნიშვნელობის კუმულაციური განაწილების ფუნქცია დროის t მომენტისთვის, ხოლო $H(x - x_t)$

წარმოადგენს საფეხურებრივ ფუნქციას რეალურად დაკვირვებული x_t ჰიდროლოგიური სიდიდისთვის. CRPS მაჩვენებლის მინიმალური (ნულთან მიახლოებული) მნიშვნელობები მოდელის მაღალ საპროგნოზო სიზუსტეზე მიუთითებს.

CRPS მეტრიკის ფუნდამენტურ უპირატესობას წარმოადგენს ის, რომ იგი იძლევა ალბათური და ტრადიციული დეტერმინისტული მოდელების ურთიერთშედარების საშუალებას. მოდელისთვის CRPS პირდაპირ უტოლდება საშუალო აბსოლუტურ ცდომილებას (MAE):

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |\hat{x}_t - x_t|$$

სადაც x_t არის რეალურად დაკვირვებული წყლის რესურსის მნიშვნელობა დროის t მომენტში, ხოლო \hat{x}_t – მისი შესაბამისი დეტერმინისტული პროგნოზი.

აღნიშნული მათემატიკური აპარატი საშუალებას იძლევა რაოდენობრივად განისაზღვროს Tethys-ის პლატფორმაში რეალიზებული ალბათური მიდგომების პრაქტიკული და ეკონომიკური უპირატესობა ტრადიციულ, სსე-ში დღემდე მოქმედ დეტერმინისტულ მეთოდებთან შედარებით, რაც საბოლოო ჯამში უზრუნველყოფს ენერგოსისტემის მაღალ სტატისტიკურ სანდოობასა და ოპტიმალურ დისპეტჩერიზაციას.

თავი 7. ჰიდროლოგიური პროგნოზირების მოდელების შემოწმება

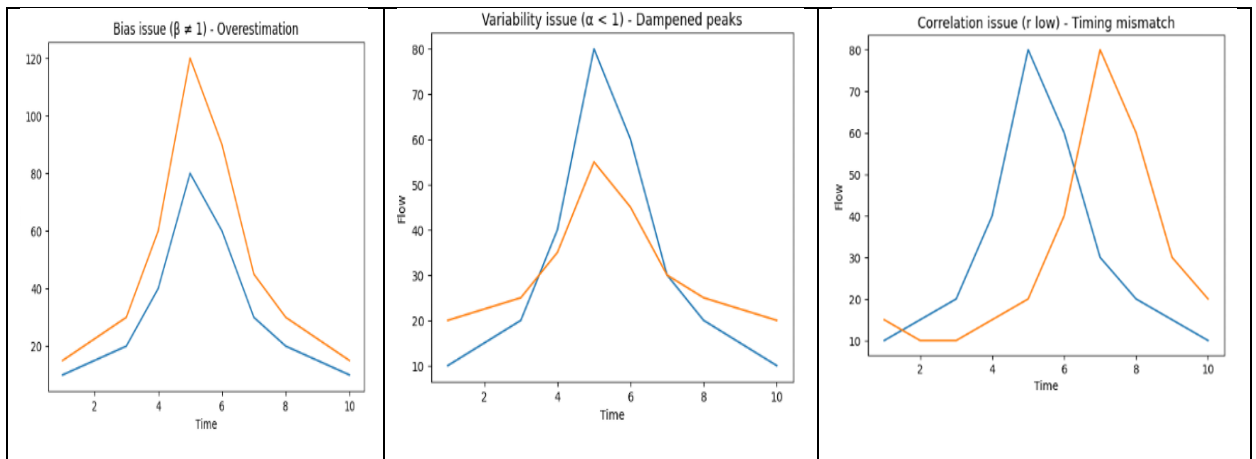
საპროგნოზო მოდელების კომპლექსური შეფასებისა და ფიზიკურად შედეგების ინტერპრეტაციისთვის ნაშრომში გამოყენებულია კლინგ-გუფტას ეფექტურობის კრიტერიუმი, რომელიც ერთიან მათემატიკურ ჩარჩოში აერთიანებს ჰიდროლოგიური სიგნალის სამ ფუნდამენტურ მახასიათებელს: დროით სტრუქტურას (ფორმას), ცვალებადობას (ამპლიტუდას) და მასშტაბს (წყლის ბალანსს). KGE კრიტერიუმის მათემატიკური ფორმულირება გამოიხატება შემდეგი სახით:

$$KGE = 1 - \sqrt{[(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2]}$$

სადაც:

- r — პირსონის კორელაციის კოეფიციენტი, რომელიც ასახავს მოდელის უნარს, სწორად აღადგინოს პროცესის დროითი დინამიკა (პიკური მოვლენების თანხვედრა და მინიმუმების პოზიციონირება);
- $\alpha = \sigma_{sim} / \sigma_{obs}$ — მოდელირებული და დაკვირვებული მონაცემების სტანდარტული გადახრების თანაფარდობა, რომელიც განსაზღვრავს მონაცემთა გაფანტვას საშუალოს გარშემო და ასახავს პროცესის ამპლიტუდას (პიკების სიმაღლესა და ჩავარდნების სიღრმეს);
- $\beta = \mu_{sim} / \mu_{obs}$ — მოდელირებული და დაკვირვებული სერიების საშუალო მნიშვნელობების შეფარდება, რომელიც ზომავს სისტემატურ გადახრას და პირდაპირ უკავშირდება წლის წყლის ბალანსის შეფასებას.

KGE კრიტერიუმის მნიშვნელობათა ინტერპრეტაცია ხორციელდება შემდეგი საზღვრების მიხედვით: $KGE = 1$ მიუთითებს იდეალურ საპროგნოზო შესაბამისობაზე; $KGE > 0.5$ მაჩვენებელი მიიჩნევა სრულიად დამაკმაყოფილებელ საინჟინრო შედეგად; ხოლო $KGE < 0$ ნიშნავს, რომ მოდელი იძლევა იმაზე უარეს პროგნოზს, ვიდრე დაკვირვებათა მარტივი მრავალწლიანი საშუალო მნიშვნელობის გამოყენება.



ნახაზი 2. მოდელირების ტიპური შეცდომების გრაფიკული ილუსტრაცია KGE კომპონენტების მიხედვით: ა) ბაიესის შეცდომა (beta-პრობლემა); ბ) ცვალებადობის შეცდომა (alpha-პრობლემა); გ) დროითი აცდენა (r-პრობლემა).

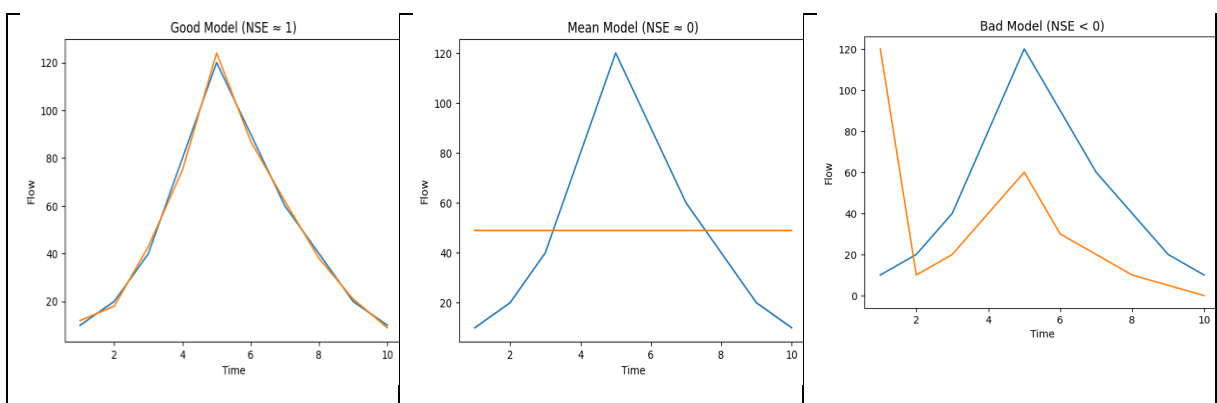
ნახაზი 2 ნათლად აჩვენებს, თუ როგორ გამოიყენება KGE დიაგნოსტიკურ ინსტრუმენტად: beta-პრობლემისას (ნახ. 2.ა) მოდელი სწორად იმეორებს ფორმას, მაგრამ აქვს სისტემატური გადახრა; alpha-პრობლემისას (ნახ. 2.ბ) ვერ ხდება

ექსტრემუმების რეპროდუცირება; ხოლო r-პრობლემისას (ნახ. 2.გ) ფიქსირდება ფაზური დროითი აცდენა, რაც მკვეთრად ამცირებს მოდელის ოპერატიულ ღირებულებას.

Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) კრიტერიუმი და მისი შეზღუდვები. ჰიდროლოგიურ პრაქტიკაში ფართოდ გავრცელებულ შეფასების კლასიკურ მეტრიკას წარმოადგენს ნეშ-სატკლიფის ეფექტურობის კოეფიციენტი (NSE), რომელიც განსაზღვრავს, თუ რამდენად კარგად აღწერს მოდელირებული დროითი რიგი ფაქტობრივ დაკვირვებებს:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

სადაც Q_{obs} არის დაკვირვებული ხარჯი, Q_{sim} — მოდელირებული ხარჯი, ხოლო \bar{Q}_{obs} — დაკვირვებული მნიშვნელობების საშუალო არითმეტიკული. კოეფიციენტი აფასებს მოდელის კვადრატულ შეცდომას ბუნებრივ ვარიაციასთან შედარებით. NSE კრიტერიუმის დიაპაზონი ვარირებს მინუს უსასრულობიდან 1-მდე: NSE = 1 შეესაბამება იდეალურ მოდელს; NSE = 0 ნიშნავს, რომ მოდელის საპროგნოზო ძალა სტატისტიკურად გათანაბრებულია მუდმივი საშუალო მნიშვნელობის გამოყენებასთან; ხოლო NSE < 0 მიუთითებს მოდელის სრულ არაადეკვატურობაზე.



ნახაზი 3. საპროგნოზო მოდელების ვერიფიკაცია NSE კრიტერიუმის მიხედვით: ა) მაღალი ხარისხის მოდელი (NSE მიისწრაფვის 1-სკენ); ბ) საშუალო მოდელი (NSE = 0); გ) არაადამაკმაყოფილებელი მოდელი (NSE < 0).

მიუხედავად უნივერსალურობისა, ნაშრომში იდენტიფიცირებულია NSE-ის ფუნდამენტური შეზღუდვები. კვადრატული შეცდომის გამოყენების გამო, აღნიშნული მეტრიკა ხასიათდება ჰიპერსენსიტიურობით პიკური (მაქსიმალური) ხარჯების მიმართ და ხშირად უგულებელყოფს დაბალი მოდინების პერიოდებს. გარდა ამისა, NSE-ს არ გააჩნია შეცდომის სტრუქტურული კომპონენტებად დიფერენცირების უნარი.

KGE და NSE კრიტერიუმების შედარებითი ანალიზი და დასკვნა. კვლევის ფარგლებში ჩატარებულმა შედარებითმა ანალიზმა აჩვენა, რომ მაშინ, როდესაც NSE აფასებს მხოლოდ ჯამურ აბსოლუტურ შეცდომას, **Tethys**-ის საპროგნოზო პლატფორმაში ინტეგრირებული KGE უზრუნველყოფს შეცდომის ანატომიურ დაშლას სამ დამოუკიდებელ ფიზიკურ კომპონენტად (r , α , β).

ეს გარემოება საშუალებას იძლევა, თავიდან იქნას აცილებული ისეთი შემთხვევები, როდესაც მოდელი იღებს მაღალ NSE შეფასებას მხოლოდ პიკების ფიქტიური თანხვედრის გამო, რეალურად კი გააჩნია წყლის ბალანსის უხეში სისტემური შეცდომა (Bias). ამგვარად, ორმხრივი ვერიფიკაციის (NSE და KGE პარალელური გამოყენების) მეთოდოლოგია წარმოადგენს საქართველოს ენერგოსისტემისთვის შემუშავებული ჰიდროლოგიური საპროგნოზო მოდელების მაღალი საიმედოობისა და ოპერატიულობის გარანტს.

თავი 8. ჰიდროლოგიური მახასიათებლების საშუალოვადიანი პროგნოზირება და დაგეგმვა

წლიური რეგულირების ჰიდროელექტროსადგურების შევსება-დამუშავების გრაფიკების წარმოების მეთოდოლოგია. საქართველოს ელექტროენერგეტიკული სისტემის საიმედოობის, სეზონური ბალანსის უზრუნველყოფისა და სისტემური დეფიციტის მინიმიზაციისთვის უდიდესი მნიშვნელობა ენიჭება წლიური რეგულირების ჰიდროელექტროსადგურებს (ენგურჰესი, ჟინვალჰესი, ხრამჰესი-1, შაორჰესი და ძვერულაჰესი). აღნიშნული სადგურების წყალსაცავებში გაზაფხულის წყალუხვობის პერიოდში რესურსის ოპტიმალური აკუმულირება და მისი რაციონალური ათვისება მშრალ (ზამთრის) სეზონზე ეფუძნება შევსება-დამუშავების ოპტიმალურ გრაფიკებს.

აღნიშნულ საშუალოვადიან საპროგნოზო მატრიცებს ყოველწლიურად, მიმდინარე წლის აპრილიდან მომდევნო წლის აპრილამდე პერიოდისთვის, ანგარიშობს სს „საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემის“ (სსე) დისპეტჩერიზაციის დირექცია. მოდელირების ბაზის წარმოადგენს წყალსაცავში წყლის შემოდინების საშუალო თვიური ხარჯის საპროგნოზო მაჩვენებელი, რომელიც ტრადიციული მიდგომით ეფუძნება ბოლო 5 წლის ფაქტობრივი ჰიდროლოგიური მონაცემების საშუალო არითმეტიკულ მნიშვნელობას.

„შეთანხმებულია“
შპს „ენგურჰესის“ დირექტორის საბჭოს
თავმჯდომარე: *გ. მირიანაშვილი*

„ემატვივ“
დირექტორის საბჭოს
წევრი: *გ. ამუნაშვილი*

გრაფიკი
ენგურჰესის წყალსაცავის შევსება-დამუშავების 2023 წლის აპრილიდან
2024 წლის აპრილამდე

სსე ვერსია

(მაქს. მარაგი 631,9 მლნ.კვტსი)
(მაქს. დონე 510,0 მეტრი)
(მინიმ. დონე 412,0 მეტრი)

	2023												2024				სულ
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV				
დაგეგმილი დონე თვის I რიცხვში (მ)	445.00	431.00	468.00	495.00	503.00	479.40	450.00	420.00	420.00	420.00	420.00	420.00	420.00				
წყლის მოსალოდნელი ხამ. ხარჯი თვეში (მ ³ /წმ)	165	300	320	280	170	120	80	45	35	30	35	60					
წყლის მოსალოდნელი შეზინადენი თვეში (მლნმ ³)	427.7	803.5	829.4	750.0	455.3	311.0	214.3	116.6	93.7	80.4	87.7	160.7	0.0				
მარაგი თვის პირველი რიცხვში (მლნ.კვტსი)	121.7	68.0	265.1	478.4	557.6	341.5	147.3	21.9	21.9	21.9	21.9	21.9	21.9				
შესინადენის საანგარიშო ხედვრ. ხარჯი (მ ³ .კვტსი)	1.273	1.231	1.120	1.071	1.092	1.173	1.287	1.350	1.350	1.350	1.350	1.350					
შესინადენი თვეში (მლნ.კვტსი)	336	653	741	700	417	265	166	86	69	60	65	119	0	3678			
მესამედი გამოთვლები თვეში (მლნ.კვტსი)	400	455	518	621	633	459	292	86	69	60	65	119	0	3778			
წყლის უქმად დაღვრა თვეში (მლნ.კვტსი)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
წყლის უქმად დაღვრა (მ ³ /წმ)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			

ელექტროენერგეტიკული სისტემის დაზღვევის
დეპარტამენტის უფროსი: *ა. კობახიძე*

ენერგეტიკული დეპარტამენტის და
ანალიტიკის სამსახურის უფროსი: *გ. მირიანაშვილი*

ნახაზი 4. შპს „ენგურჰესის“ წყალსაცავის შევსება-დამუშავების საპროგნოზო დინამიკის მოდელირება (სსე-ს საბაზისო მატრიცა).

წყალსაცავის მართვის მათემატიკური მოდელი ოპერირებს შემდეგი ძირითადი ბალანსური და კონვერტაციული განტოლებებით:

1. წყლის მოსალოდნელი თვიური შემოდინების (ან უქმად დაღვრილი წყლის) მოცულობის განსაზღვრა (W, მლნ. მ³):

$$W = Q \times 24 \times 3600 \times T \times 10^{-6}$$

სადაც Q არის წყლის საშუალო თვიური ხარჯი ან უქმად დაღვრის მაჩვენებელი (მ³/წმ), ხოლო T — საანგარიშო თვის კალენდარული დღეების რაოდენობა.

2. შემოდინებული წყლის ენერგეტიკული ექვივალენტის (E_{in}, მლნ. კვტ.სთ) გაანგარიშება:

$$E_{in} = \frac{W}{q_{hvd}}$$

სადაც q_{hvd} წარმოადგენს ელექტროენერგიის საანგარიშო ხვედრით ხარჯს ($\text{მ}^3/\text{კვტ.სთ}$), რომელიც ფუნქციონალურად დამოკიდებულია წყალსაცავში არსებულ ფაქტობრივ ბიეფებს შორის ნიშნულზე (დონეზე) და გენერირდება შესაბამისი გრადუირებული მატრიციდან.

3. ელექტროენერგიის შესაძლო (დაგეგმილი) თვიური გამომუშავების განსაზღვრა (E_{gen} , მლნ. კვტ.სთ) ბალანსური მეთოდით:

$$E_{gen} = E_{start} + E_{in} - E_{end} - E_{spill}$$

სადაც E_{start} არის ენერგეტიკული მარაგი თვის პირველ რიცხვში, E_{end} — დაგეგმილი მარაგი მომდევნო თვის პირველ რიცხვში, ხოლო E_{spill} — წყლის უქმად დაღვრის ენერგეტიკული ექვივალენტი.

წყალსაცავების ჰიდროდინამიკური შეზღუდვები და აგრეგატების სიმძლავრის მატრიცული ოპტიმიზაცია წყალსაცავების შევსება-დამუშავების ტრაექტორიის დაგეგმვისას უმნიშვნელოვანესია ტექნიკური და უსაფრთხოების შეზღუდვების გათვალისწინება. მოდელი ითვალისწინებს ისეთ ფაქტორებს, როგორცაა კაშხლის ამორტიზაციის ხარისხი, კალთების მდგრადობა და გეგმური რემონტები. კერძოდ, მეწყრული პროცესების პრევენციისთვის მკაცრად კონტროლდება წყლის დონის დღიური ვარდნისა და მატების დასაშვები ჰიდროდინამიკური სიჩქარეები.

შემუშავებული საინჟინრო მოდელი დროის ნებისმიერ ინტერვალში უზრუნველყოფს სამი ძირითადი პარამეტრის ოპტიმიზაციას: ა) გენერაციის მოცულობის განსაზღვრას წყლის ფიქსირებულ ნიშნულზე შენარჩუნებისას; ბ) მინიმალურ საექსპლუატაციო დონემდე დაცლის დროის გაანგარიშებას მიმდინარე შემოდინების პირობებში; გ) წყალსაცავის დაცლის ოპტიმალური სიჩქარის დადგენას სამიზნე გამომუშავების მისაღწევად.

ნახაზი 5 ასახავს გრადირებულ მატრიცას, რომელიც ადასტურებს, რომ სადგურების მაქსიმალური გენერაციის უნარი პირდაპირპროპორციულ კავშირშია წყლის ნეტო-დაწნევასთან. დონის კლებასთან ერთად, აგრეგატების მაქსიმალური

ხელმისაწვდომი სიმძლავრე ტექნიკურად იზღუდება, რაც აუცილებლად გასათვალისწინებელია საშუალოვადიანი ბალანსების შედგენისას.

დონე (მ)	მომუშავე აგრეგატების რაოდენობა	დასაშვები სიმძლავრე (მგვტ)	ჟინვალჰესი		ხრამჰესი 1	
			წყლის დონე მ	მაქს. ტვირთები მგვტ	წყლის დონე მ	მაქს. ტვირთები მგვტ
410	1	180	765	60	1497,6	10
411	1	190	770	61	1498	15
412	2	380	773	62	1498,5	30
413	2	410	776	63	1499	40
414	2	420	778	64	1499,5	50
415	3	640	781	65	1500	60
416	3	650	783	66	1500,5	70
417	4	730	785	67	1501	80
418	4	740	787	68	1501,5	90
419	4	750	790	69		
420	5	800	792	70		
430	5	840	795	71		
440	5	880	798	72		
450	5	950	800	73		
460	5	1050	801	74		
470	5	1100	802	75		
480	5	1150	803	76		
490	5	1200	804	77		
500	5	1300	805	78		
510	5	1300	806	79		
			807	80		
			808	81		
			809	82		
			810	83		

ნახაზი 5. წლიური რეგულირების ჰიდროსადგურების (ენგურჰესი, ჟინვალჰესი, ხრამჰესი-1) მაქსიმალური ხელმისაწვდომი სიმძლავრის ფუნქციონალური დამოკიდებულება წყალსაცავის გეოდეზიურ დონესთან.

ჰიდროლოგიური პროგნოზირების როლი გადამცემი სისტემის ოპერატორის ფუნქციებში. მაღალი სიზუსტის საშუალოვადიანი ჰიდროლოგიური პროგნოზები და წყალსაცავების ოპტიმიზირებული მოდელები გადამცემი სისტემის ოპერატორისთვის (სსე) წარმოადგენს ფუნდამენტურ ინსტრუმენტს შემდეგი სტრატეგიული ამოცანების გადასაჭრელად:

- **სისტემური ადეკვატურობის შეფასება:** ელექტროენერჯისა და სიმძლავრის სეზონური სიჭარბის ან დეფიციტის ზუსტი იდენტიფიცირება;
- **ქსელის ოპტიმიზაცია და ნაკადგანაწილება:** ენერგოსისტემის ძირითად კვანძებში ნაკადების განაწილების მოდელირება და ტექნოლოგიური დანაკარგების გაანგარიშება;
- **საგარეო ვაჭრობის დაგეგმვა:** მეზობელ ენერგოსისტემებთან (განსაკუთრებით თურქეთის რესპუბლიკის მიმართულებით) საიმპორტო და საექსპორტო მოცულობების წინასწარი განსაზღვრა და ეკონომიკური ოპტიმიზაცია;

- კრიზისების მართვა: აუცილებლობის შემთხვევაში, გენერაციის სიჭარბის სამართლიანი, გამჭვირვალე და არადისკრიმინაციული მართვის (დისპეტჩერიზაციის) უზრუნველყოფა.

თავი 9. ჰიდროლოგიური მახასიათებლების მოკლევადიანი პროგნოზირება მცირე და სეზონური ჰესების გამომუშავების მოკლევადიანი მოდელირება.

ელექტროენერგეტიკული სისტემის ოპერატიული მართვისა და „დღით ადრე“ ბაზრის ეფექტური ბალანსირებისთვის კრიტიკულ საჭიროებას წარმოადგენს მცირე და სეზონური ჰიდროელექტროსადგურების ჯამური გენერაციის მოკლევადიანი პროგნოზირება. ამ ამოცანის გადასაჭრელად შემუშავდა ორიგინალური მრავალფაქტორიანი მათემატიკური მოდელი, რომელიც ეფუძნება მიმდინარე ჰიდროლოგიური სტატისტიკისა და ლოკალური მეტეოროლოგიური პარამეტრების (ჰაერის ტემპერატურა და ნალექები) დინამიკურ კორელაციას.

მოკლევადიანი საპროგნოზო შემოდინების განსაზღვრა ხორციელდება შემდეგი საბაზისო ალგორითმით:

$$Q_{forecast} = Q_{fact} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_{forecast} - T_{fact}) + \beta \cdot (P_{forecast} - P_{fact})]$$

სადაც:

- $Q_{forecast}$ არის მომდევნო დღის საპროგნოზო შემოდინება (მ³/წმ);
- Q_{fact} — მიმდინარე დღის ფაქტობრივი შემოდინება (მ³/წმ);
- $T_{forecast}$ და T_{fact} — შესაბამისად, მომდევნო დღის საპროგნოზო და მიმდინარე დღის ფაქტობრივი ტემპერატურები (°C);
- $P_{forecast}$ და P_{fact} — შესაბამისად, მომდევნო დღის საპროგნოზო და მიმდინარე დღის ფაქტობრივი ატმოსფერული ნალექების მოცულობები (მმ);
- α და β — ტემპერატურული ცვლილებისა და ნალექების გავლენის წონითი კოეფიციენტებია, რომელთა საბაზისო მნიშვნელობები მშრალი (უნალექო) პერიოდისთვის, საწყისი ფორმულის პროპორციულად, ტოლია $\alpha = 0.01$ და $\beta = 0.03$.

გარდამავალ (გაზაფხულის თოვლდის დნობისა და წყალმოვარდნების) სეზონებზე აღნიშნული კოეფიციენტები ექვემდებარება დინამიკურ ოპტიმიზაციას.

მოდელის სატესტო შემოწმებამ აჩვენა, რომ სტანდარტულ პირობებში საშუალო პროცენტული ცდომილება არ აღემატება 5%-იან კრიტიკულ ზღვარს. თუმცა, საპროგნოზო ჰორიზონტის გაფართოებასთან ერთად (მაგალითად, უქმე დღეების ხანგრძლივი დაგეგმვისას), საწყისი მეტეოროლოგიური პროგნოზების მაღალი ცვალებადობის გამო, ცალკეულ დღეებში აცდენა 12%-დან 18%-მდე იზრდება.

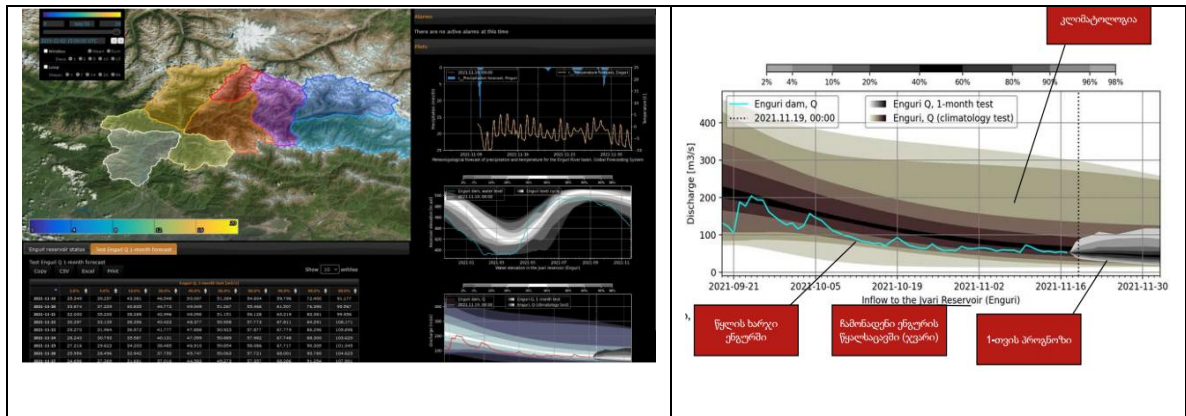
სეზონურს+მცირე				
დღეები	გეგმა	ფაქტი	აბს.	%
1	6,0	5,5	0,50	9%
2	7,0	5,9	1,14	20%
3	6,4	5,8	0,61	10%
4	5,9	5,1	0,77	15%
5	5,8	4,9	0,87	18%
6	5,3	5,6	-0,25	5%
7	5,7	5,2	0,51	10%
8	5,2	5,9	-0,73	12%
9	5,8	6,0	-0,15	3%
10	5,8	5,7	0,08	1%
11	5,8	5,2	0,62	12%
12	5,8	4,9	0,93	19%
13	5,6	5,2	0,40	8%
14	5,5	5,6	-0,11	2%
15	5,5	5,4	0,06	1%
16	5,5	5,3	0,18	3%
17	5,5	5,0	0,49	10%
18	5,4	5,3	0,13	3%
19	6,5	6,0	0,49	8%
20	9,0	10,3	-1,31	13%
21	11,1	11,0	0,10	1%
22	10,8	11,1	-0,27	2%
23	11,2	12,2	-0,96	8%
24	11,5	11,4	0,15	1%
25	11,2	9,4	1,76	19%
26	11,0	8,9	2,10	24%
27	9,2	10,0	-0,84	8%
28	10,4	11,1	-0,72	6%
ჯამი	235	199	0,23	9%

ნახაზი 6. მცირე და სეზონური ჰესების კონსოლიდირებული საპროგნოზო მატრიცის გენერირება „დღით ადრე“ პრინციპით და ცდომილების დინამიკა.

მდინარე ენგურის აუზის ტელემეტრიული მოდერნიზაცია და Tethys-ის პლატფორმა. ენგურის მაღალმთიან აუზში ტრადიციული საზომი ინფრასტრუქტურის (ხაიშის სადგური) ამორტიზებულობამ და მონაცემთა დაბალმა დისკრეტულობამ (დღეში ერთი ანათვალი) გამოიწვია სისტემური გადახრები და 30-50%-იანი საპროგნოზო ცდომილება. ამ საოპერაციო რისკების აღმოსაფხვრელად, საერთაშორისო პარტნიორობის ფარგლებში (EBRD, STUCKY) განხორციელდა აუზის ტელემეტრიული მოდერნიზაცია.

მიღებული პირველადი ინფორმაციის კონსოლიდაცია და კომპლექსური ჰიდროლოგიური მოდელირება ხორციელდება ხელოვნური ინტელექტის ბაზაზე შექმნილ მათემატიკურ პლატფორმა „Tethys“-ში. ტრადიციული დეტერმინისტული მიდგომებისგან განსხვავებით, აღნიშნული ციფრული სისტემა ეფუძნება:

- მეტეოროლოგიური პროგნოზების ანსამბლურ (ალბათურ) ერთობლიობას;
- მონაცემთა ავტომატური ასიმილაციისა და პირველადი ფილტრაციის ალგორითმებს;
- შიდა საპროგნოზო მდგომარეობების უწყვეტ დინამიკურ კორექტირებას (კალმანის ფილტრაცია და შედეგების შემდგომი დამუშავება).



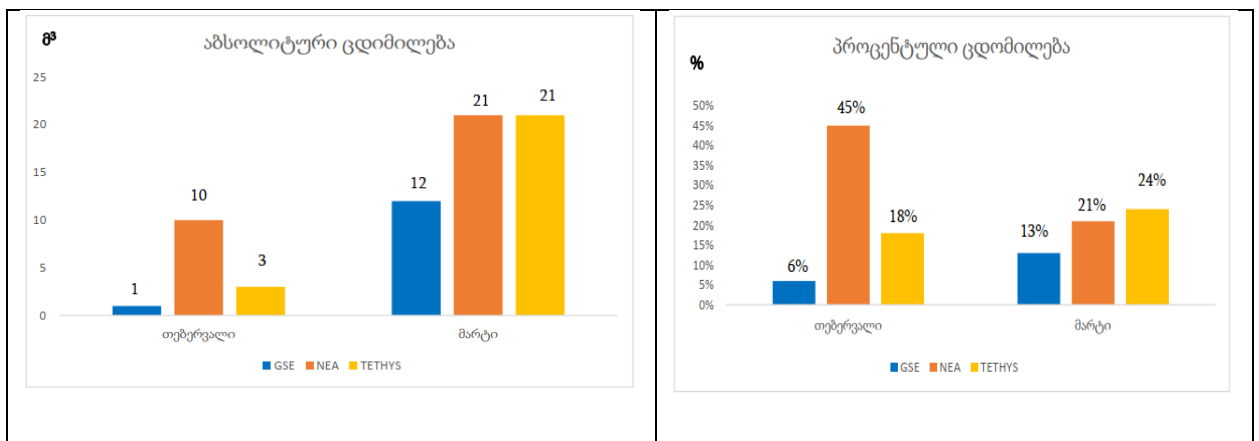
ნახაზი 7. მდინარე ენგურის აუზის მრავალსეგმენტიანი ციფრული მოდელირება და ალბათური საპროგნოზო დიაპაზონების (Upper/Lower Confidence Bound) ფორმირება Tethys-ის პლატფორმაში.

პროგრამული კომპლექსი ახდენს მდინარის აუზის დიფერენცირებას ცალკეულ ქვეაუზებად და შენაკადებად, რაც იძლევა კლიმატის ცვლილებისა და სტატისტიკური ჩამონადენის ინდივიდუალური მოდელირების საშუალებას მომდევნო ერთი თვის ჰორიზონტზე.

საპროგნოზო მოდელების ვერიფიკაცია და შედეგების შედარებითი ანალიზი. ნაშრომში ჩატარდა სამი ძირითადი მიდგომის — გარემოს ეროვნული სააგენტოს ტრადიციული მეთოდის, Tethys-ის ავტომატიზებული პლატფორმისა და სსე-ს ბაზაზე ჩვენ მიერ შემუშავებული მათემატიკური ალგორითმის — შედარებითი ვერიფიკაცია და ცდომილებათა ანალიზი.

შედეგების ანალიზმა სამეცნიერო და პრაქტიკულ დონეზე დაადასტურა შემოთავაზებული ალგორითმების მაღალი ადეკვატურობა და ეფექტურობა. კერძოდ, ტრადიციულმა უწყებრივმა დეტერმინისტულმა მეთოდოლოგიებმა საანგარიშო პერიოდში 20%-ს გადაჭარბებული საშუალო პროცენტული ცდომილება აჩვენა, რაც სისტემის ოპერირებაში მაღალ რისკებს წარმოქმნის. ამის

საპირისპიროდ, ნაშრომის ფარგლებში სს „საქართველოს სახელმწიფო ელექტროსისტემაში“ (სსე) რეალიზებულმა და კალმანის ფილტრაციითა თუ ალბათური ანსამბლებით ოპტიმიზებულმა პლატფორმა **Tethys**-მა უზრუნველყო პროგნოზის მაღალი სტაბილურობა, რის შედეგადაც საშუალო პროცენტული ცდომილება 6%-ის ფარგლებში შენარჩუნდა. მიღებული შედეგები ნათლად ადასტურებს აღნიშნული ციფრული პლატფორმის დანერგვის უპირატესობას ეროვნული ენერგოსისტემის ეფექტური დისპეტჩერიზაციის პროცესში.

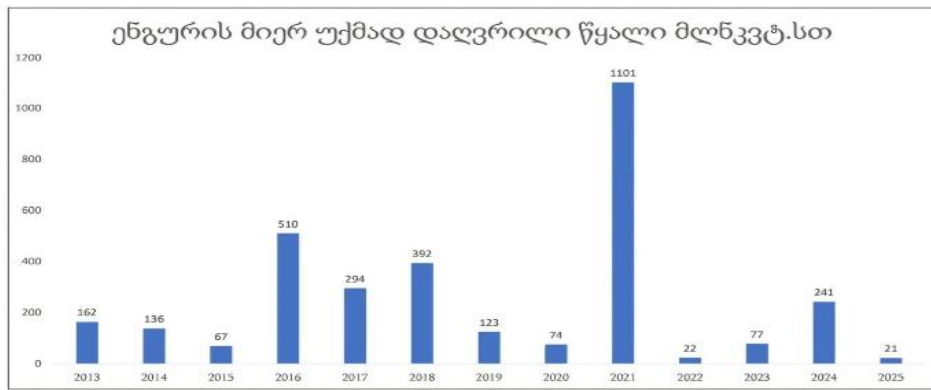


ნახაზი 8. სხვადასხვა საპროგნოზო მეთოდოლოგიის ეფექტურობის შედარებითი ანალიზი თებერვლის თვის აბსოლუტური და პროცენტული ცდომილებების მიხედვით.

თავი 10. ჰიდროლოგიური პროგნოზირების ოპტიმიზაციის ტექნიკურ-ეკონომიკური და ფინანსური ანალიზი

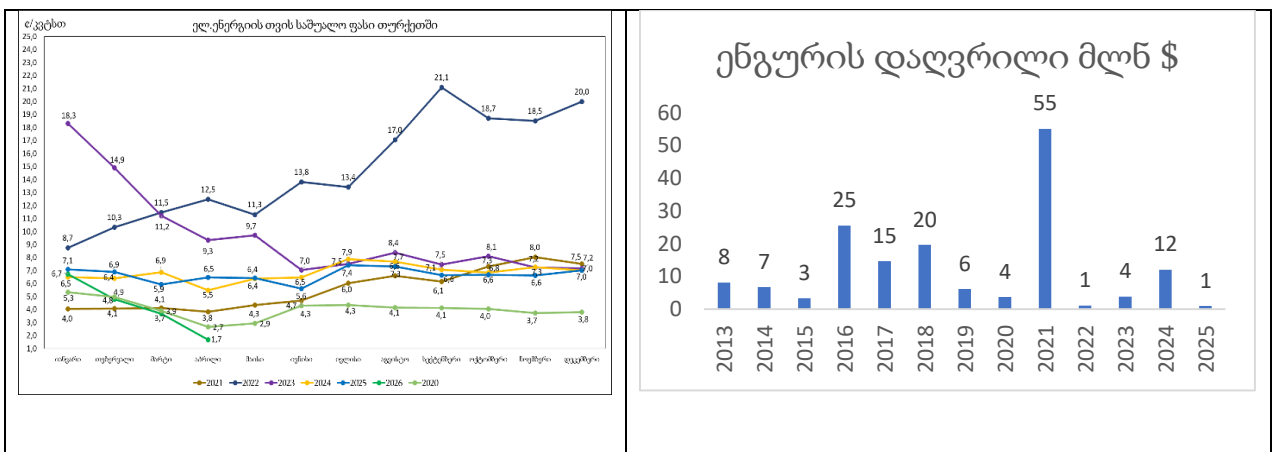
ენგურჰესის არაპროდუქტიული წყლის დაღვრის ფინანსური შეფასება. ნაშრომში ჩატარდა შპს „ენგურჰესის“ წყალსაცავიდან 2013-2025 წლებში უქმად დაღვრილი წყლის კომპლექსური ანალიზი და მისი ენერგეტიკული ექვივალენტის (მლნ. კვტ.სთ) გაანგარიშება.

რეგიონული საექსპორტო ფასების დინამიკა და ფინანსური დანაკარგების აგრეგირება. ეკონომიკური ეფექტის დასადგენად კვლევაში გამოყენებულია თურქეთის რესპუბლიკის ენერგეტიკული ბაზრის (EPIAŞ) მონაცემები, რომელიც ხასიათდება მაღალი ლიკვიდურობით, გამჭვირვალობით და წარმოადგენს საქართველოს ელექტროენერჯის ექსპორტის ძირითად მიმართულებას.



ნახაზი 9. ენგურჰესის წყალსაცავიდან უქმად დაღვრილი წყლის ენერგეტიკული ექვივალენტი (მლნ. კვტ.სთ)

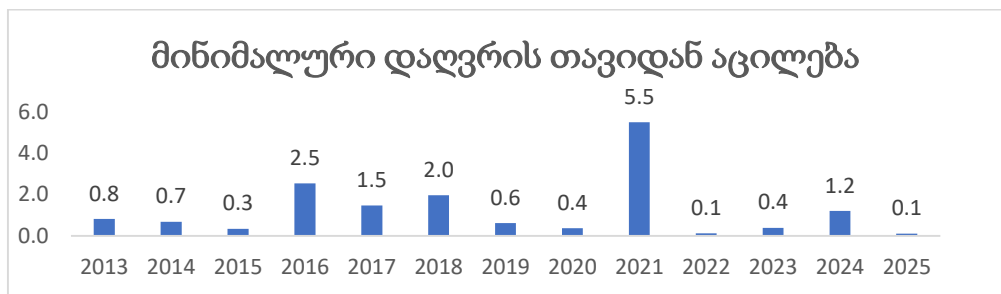
მათემატიკური მოდელირებისა და ფინანსური კონსერვატიზმის პრინციპის საფუძველზე, რეგიონულ საექსპორტო ფასად მიჩნეულია მრავალწლიანი საშუალო მაჩვენებელი — 0.05 აშშ დოლარი/კვტ.სთ. ანალიზმა აჩვენა, რომ 2021 წლის პანდემიურ პერიოდში, ენერგომატარებლებზე დაბალი შიდა მოთხოვნის პირობებში, დანაკარგები დაფიქსირდა არა მხოლოდ ენგურჰესზე, არამედ ქვეყნის სხვა სისტემურ ჰესებზეც (ჯამურად დამატებით 80 მლნ. კვტ.სთ). შესაბამისად, მხოლოდ 2021 წელს ენერგოსისტემიდან უქმად დაღვრილი რესურსის ჯამურმა ფინანსურმა ღირებულებამ კრიტიკულ ნიშნულს — 41 მლნ. აშშ დოლარს მიაღწია.



ნახაზი 10. ფინანსური დანაკარგების შეფასების კომპონენტები: ა) თურქეთის ელექტროენერჯის ბაზრის (EPIAS) საშუალო თვიური ფასების მერყეობა (\$/მგვტ.სთ); ბ) ენგურჰესის უქმად დაღვრილი ენერჯის პოტენციური საბაზრო ღირებულება წლების მიხედვით.

საინვესტიციო ეფექტურობა და პროექტის უკუგების ანალიზი.
 „ტეტისის“ (Tethys) ციფრული პლატფორმისა და ლოკალური ტელემეტრიული საზომი ქსელის სრული მოწყობის ჯამური საინვესტიციო კაპიტალდაბანდება შეფასებულია 2.5 მლნ. აშშ დოლარად. საინვესტიციო რისკების გათვალისწინებით, მოდელში დაშვებულ იქნა ყველაზე პესიმისტური სცენარი, რომლის მიხედვითაც პროგნოზირების სისტემის დანერგვით მიიღწევა უქმად დაღვრილი წყლის მხოლოდ 10%-ის აკუმულირება და შენახვა.

როგორც ეკონომიკური მოდელირება (ნახაზი 11) ადასტურებს, კრიტიკულად პესიმისტური (წყლის მინიმალური დაზოგვის) 10%-იანი შენარჩუნების პირობებშიც კი, მხოლოდ ენგურჰესის მიერ გამომუშავებული დამატებითი ფულადი ნაკადებით საწყისი 2.5 მილიონიანი საინვესტიციო დანახარჯების სრული ამოღება და უკუგება ხორციელდება სულ რაღაც 1-3 წლის საექსპლუატაციო პერიოდში.



ნახაზი 11. ინვესტიციის უკუგების (ROI) ანალიზი წყალსაცავში საპროგნოზო რესურსის მხოლოდ 10%-იანი ოპტიმალური შენარჩუნების პირობებში.

ფინანსური მოგების გარდა, სისტემის დანერგვა უზრუნველყოფს არამატერიალურ სტრატეგიულ სარგებელს:

- **ოპერატიული მართვა:** მყისიერი რეაგირება წყლის ხარჯის მკვეთრ ცვლილებაზე ღვარცოფული მოვლენების დროს;
- **სტრატეგიული დაგეგმვა:** თოვლის საფარის მოცულობის ზუსტი იდენტიფიცირება საშუალოვადიანი ბალანსების წარმოებისთვის;
- **კლიმატური მონიტორინგი:** მყინვარების დინამიკაზე დაკვირვება გრძელვადიანი ეკოლოგიური და ენერგეტიკული ტენდენციების პროგნოზირებისთვის.

დასკვნა

სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილია საქართველოს ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალისა და ჰიდროლოგიური პროცესების პროგნოზირების კომპლექსური ანალიზი, რომელიც მოიცავს როგორც თეორიულ, ასევე პრაქტიკულ ასპექტებს. ნაშრომის საწყის ეტაპზე განხილულია ქვეყნის ჰიდროენერგეტიკული რესურსები, მათ შორის თეორიულად მაქსიმალური, ტექნიკურად ათვისებადი და ეკონომიკურად მიზანშეწონილი პოტენციალები, რაც ქმნის საფუძველს შემდგომი კვლევებისთვის.

მნიშვნელოვანი ადგილი ეთმობა ჰიდროლოგიური პროგნოზირების მეთოდოლოგიას, სადაც დეტალურად არის გაანალიზებული დროის სერიების დამუშავების თანამედროვე მიდგომები და სტატისტიკური მეთოდები. განსაკუთრებული ყურადღება გამახვილებულია მათემატიკურ მოდელირებაზე, რომელიც ეფუძნება ჰიდროლოგიურ პარამეტრებსა და მათ შორის არსებულ ფუნქციურ დამოკიდებულებებს. წარმოდგენილი მიდგომები ითვალისწინებს როგორც ისტორიული მონაცემების ანალიზს, ასევე ჰიდრომეტეოროლოგიური ფაქტორების გავლენას, რაც უზრუნველყოფს პროგნოზირების სიზუსტის ზრდას. ნაშრომში შემუშავებულია ჰიდროლოგიური პროგნოზირების საკუთარი მათემატიკური მოდელი, რომლის საფუძველსაც წარმოადგენს სტატისტიკური ანალიზი, დროის სერიების დამუშავება და პარამეტრებს შორის კორელაციური და რეგრესიული კავშირების განსაზღვრა. აღნიშნული მოდელი საშუალებას იძლევა შეფასდეს მდინარის დებიტის ცვლილების დინამიკა, შემცირდეს შემთხვევითი ცდომილებები და გაიზარდოს პროგნოზის სანდოობა. ჩატარებული გამოთვლები და მოდელირების შედეგები ადასტურებს, რომ გამოყენებული მათემატიკური მიდგომა უზრუნველყოფს მცირე ცდომილებას და მაღალი ხარისხის ადაპტაციას რეალურ მონაცემებთან, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ჰიდროენერგეტიკული სისტემების დაგეგმვისა და ოპტიმიზაციის პროცესში.

გარდა ტექნიკური და მათემატიკური ანალიზისა, ნაშრომში განხილულია პროგნოზირების ეკონომიკური ეფექტიც. მაღალი სიზუსტის პროგნოზირება პირდაპირ აისახება ჰიდროენერგეტიკული ობიექტების ეფექტიან ოპერირებაზე,

რაც იწვევს რესურსების ოპტიმალურ გამოყენებას, რისკების შემცირებას და ფინანსური შედეგების გაუმჯობესებას როგორც კონკრეტული ენერგობიექტის, ასევე ქვეყნის დონეზე.

სადისერტაციო ნაშრომის საფუძველზე შესაძლებელია ჩამოყალიბდეს შემდეგი ძირითადი დასკვნები:

1. შემუშავებული მათემატიკური მოდელი და პროგნოზირების მიდგომა სრულად გამართლებულია და უზრუნველყოფს უფრო მაღალ სიზუსტეს საქართველოში არსებული სხვა ანალოგიურ მეთოდებთან შედარებით, რაც დასტურდება ჩატარებული ჰიდროლოგიური გამოთვლებისა და მოდელირების შედეგებით.
2. მიღებული შედეგები ცხადყოფს, რომ ჰიდროლოგიური პროგნოზირების პროცესში მათემატიკური მეთოდების, განსაკუთრებით დროის სერიების ანალიზისა და სტატისტიკური მოდელირების ინტეგრირებული გამოყენება მნიშვნელოვნად ამცირებს გაურკვევლობას და ზრდის პროგნოზის სანდობას.
3. მიზანშეწონილია აღნიშნული ალგორითმის შემდგომი განვითარება, მათ შორის მისი სრულყოფა და ავტომატიზაცია, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს ადამიანურ და დროით რესურსებს, გაზრდის ოპერატიულობას და უზრუნველყოფს რეალურ დროში პროგნოზირების შესაძლებლობას.
4. მაღალი სიზუსტის ჰიდროლოგიური პროგნოზირება წარმოადგენს მნიშვნელოვან წინაპირობას ჰიდროენერგეტიკული სექტორის ეფექტიანი მართვისათვის, რაც საბოლოოდ აისახება როგორც ტექნიკურ, ისე ეკონომიკურ მაჩვენებლებზე.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული ნაშრომები

1. მირინაშვილი გ. მდინარეების წყლის შემოდინების პროგნოზირება ხელოვნური ინტელექტის საშუალებით. სტუ-ის შრომები, 2025, N3(537), გვ. 244-254.
2. Mirinashvili G., Karseladze A., Kokhtashvili A. The Effect of Namakhvani HPP on Rioni Cascade HPPs. GTU Works, 2025, N3(537), pp. 255-259.
3. Kokhtashvili A., Mirinashvili G., Amuzashvili G. Estimation of Georgian Power System Flexibility and Adequacy. Proceedings of the CIGRE SEERC Conference 2023, Istanbul (Turkey), pp. 568-586.
4. მირინაშვილი გ., კობტაშვილი ა. მდინარე ენგურის ენერგეტიკული მახასიათებლების პროგნოზირების ტექნიკურ-ეკონომიკური ანალიზი. „ენერჯია“, 2023, N2(106), გვ. 5-11.
5. მირინაშვილი გ. ჰიდროლოგიის პროგნოზირების ანალიზი მდინარე რიონზე. „ენერჯია“, 2022, N3-4(103-104), გვ. 61-65.

Abstract

Hydropower plants have a decisive impact on Georgia's energy balance. Approximately 75–85% of the country's electricity demand is satisfied by hydropower generation; however, due to the seasonal variability of hydrological regimes, the energy system faces the problem of uneven generation. In the spring–summer period, river water abundance leads to increased hydropower production, whereas in autumn–winter water resources decrease. At the same time, electricity consumption follows the opposite pattern — increasing in winter and decreasing in spring and early summer.

This seasonal imbalance requires optimal reservoir management so that water accumulated during high-flow periods can be used in deficit seasons. Efficient reservoir management is directly linked to the quality of hydrological forecasting, as the prior estimation of water resources determines both generation capacity and the operational stability of the energy system. Accurate forecasting enables more rational use of reservoir storage and energy accumulation for deficit periods. In periods of surplus generation, electricity export is possible, whereas during deficit periods the country is forced to import both electricity and primary energy carriers. Therefore, the accuracy of hydrological forecasting is of crucial importance, as correct estimation of river discharge and reservoir inflows directly determines the efficiency of energy system operation.

Within the scope of the doctoral dissertation, special attention was given to mathematical models and statistical analysis of hydrological forecasting. Time series analysis methods, regression analysis, pattern matching algorithms, and the Kalman Filter were applied, enabling the identification of regularities in historical data and improving forecasting accuracy. Regression analysis was used to determine relationships between time periods and river inflows, while pattern matching techniques were applied to identify historical periods most similar to current hydro-meteorological conditions. The Kalman Filter was used for data filtering and reduction of random noise. This approach allowed the elimination of unrealistic observations, as well as errors caused by damaged hydrometeorological and hydrological sensors, resulting in more stable and realistic time series.

Based on these mathematical approaches, a hydrological forecasting model was developed, enabling the analysis of river inflows, processing of time series, and calculation of forecasted values. In addition, an independent hydrological forecasting software system, Tethys, was developed, which incorporates elements of artificial intelligence and weather forecast variables for river runoff prediction. The system performs integrated analysis of historical and real-time hydrometeorological data and determines expected hydrological regimes, significantly improving forecasting accuracy.

To evaluate the accuracy and reliability of forecasting results, internationally recognized performance metrics were used, including Kling-Gupta Efficiency (KGE) and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). These methods are widely applied in hydrological model evaluation and allow quantitative assessment of agreement between observed and simulated data. The use of these indices enabled systematic comparison of predicted and observed values and quantitative evaluation of model performance.

The aim of the doctoral research is to assess Georgia's total hydropower potential, identify economically viable resources considering existing hydropower plants and protected areas, and analyze forecasting capabilities of the country's main river energy characteristics, thereby determining the required renewable energy capacity for Georgia's energy independence. The study places particular emphasis on the practical application of mathematical models and their adaptation to real hydrological data, significantly improving forecasting accuracy and reliability. The final objective is the optimization of the energy system, prediction of deficit and surplus periods, efficient planning of import and export volumes, and the assessment of the economic value of non-spilled water from reservoirs as a result of optimized hydrological forecasting at the national level. This

issue is particularly important for Georgia's energy system, as efficient utilization of non-spilled water is directly related to additional electricity generation, increased export potential, and improved energy resource management.

Furthermore, the use of the developed model ensures faster operational decision-making and reduces uncertainty in reservoir management processes, thereby increasing system stability. It also enables better seasonal allocation of water resources and reduction of energy deficits.