International Partnerships Austria

ĊENN

ჰიდროლოგიური რესურსის განაწილების შეფასება ჭინვალის წყალსაცავის წყალშემკრები აუზისთვის

მდინარე იორი



თბილისი | 2026

პუბლიკაციის ავტორი: ნიკა წითელაშვილი

დოკუმენტი მომზადდა CENN-ის მიერ, პროექტ - „მწვანე კავკასია“ - ფარგლებში, ავსტრიის განვითარების სააგენტოს (ADA) ფინანსური მხარდაჭერით. დოკუმენტის შინაარსზე პასუხისმგებელია პროექტის განმახორციელებელი და შესაძლებელია, არ ემთხვეოდეს ADA-ს მოსაზრებებსა და შეხედულებებს.

სარჩევი

წინასიტყვაობა 3

მიზანი 4

პროექტის კლიმატური რისკების სკრინინგი 7

მეთოდოლოგია 10

შერჩეული მდინარე 11

მრავალწლიური საშუალო ნალექისა და ტემპერატურის მაჩვენებლები შერჩეულ აუზში 14

მოდელირებული ჰიდროლოგიური რეჟიმი 28

მდინარის საბაზისო მახასიათებლები 28

კაშხალი და წყალსაცავი 33

სასოფლო-სამეურნეო სავარგულების წყლის მოთხოვნა 35

კლიმატური სცენარები და დაშვებები 48

კლიმატის ცვლილების გავლენა შერჩეული აუზის მრავალწლიურ საშუალო ხარჯზე 50

დასკვნა 53

წინასიტყვაობა

ჰიდროლოგიური შეფასება აჩვენებს, რომ მდინარე იორის წყალრეგულირების სისტემა ხასიათდება ძლიერი კლიმატური ცვალებადობით, ტემპერატურის ზრდით და წყალსაცავებისა და სარწყავი ინფრასტრუქტურის მეშვეობით წყლის ინტენსიური რეგულირებით. ისტორიული ანალიზი ადასტურებს, რომ გრძელვადიან პერიოდში ნალექის საერთო რაოდენობა შედარებით სტაბილურია, თუმცა 1981 წლიდან რეგიონში მკვეთრი დათბობის ტენდენცია ფიქსირდება.

ჰიდროლოგიური მოდელირება ადასტურებს აღდგენილ და დაკვირვებულ ხარჯებს შორის დამაკმაყოფილებელ ურთიერთთანხვედრას, რაც, მონაცემთა შეზღუდული რაოდენობის მიუხედავად, გამოყენებული მეთოდოლოგიის სანდოობაზე მიუთითებს. ამასთანავე, აღსანიშნავია, რომ მცენარეული საფარი გაზომვად როლს თამაშობს აუზის ჩამონადენის რეგულირებაში ევაპოტრანსპირაციის პროცესების მეშვეობით, რაც ადასტურებს მიწის საფრის მართვის მნიშვნელობას სამომავლო წყლის რესურსების დაგეგმვის პროცესში.

დამატებით აღსანიშნავია, რომ კლიმატური პროგნოზები მიუთითებს, რომ ტემპერატურის ზრდა გაზრდის ევაპოტრანსპირაციას და შეცვლის სეზონური ჩამონადენის განაწილებას. შედეგად, მოსალოდნელია ზაფხულის პერიოდში წყლის ხელმისაწვდომობის შემცირება და სარწყავ წყალზე მოთხოვნის ზრდა. მიუხედავად იმისა, რომ ნალექის პროგნოზები გაურკვეველია კლიმატური მოდელების უხეში სივრცითი რეზოლუციის გამო, მხოლოდ ტემპერატურის ზრდაც საკმარისია ჰიდროლოგიური სტრესის გასაძლიერებლად.

აუზი შედარებით სტაბილურ წყლის ხელმისაწვდომობას ინარჩუნებს, თუმცა წყალსაცავი უკვე ფუნქციონირებს წყლის რესურსის სათანადო რეგულირების ზღვრის სიახლოვეს. მიუხედავად იმისა, რომ პალდოს წყალმიმღების არსებობა (დამატებითი წყალმიმღები და შედარებით მეტი წყლის რესურსი) ამცირებს არსებულ წყლის დეფიციტს, სისტემის ფუნქციონირება კვლავ ძალიან მგრძნობიარეა მშრალი წლების პირობების მიმართ. შესაბამისად, საშუალოზე დაბალი ნალექიანობის პერიოდებმა შესაძლოა მნიშვნელოვანი ოპერაციული გამოწვევები წარმოშვას.

მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ სამომავლო რისკი ძირითადად წარმოიშობა წყლის რესურსის რყევის მაღალი ამპლიტუდით, ასევე მოთხოვნის ზრდით და არა წყლის აბსოლუტური დეფიციტით. აქედან გამომდინარე, შემარბილებელი მართვის მიდგომები დაკავშირებული ინფრასტრუქტურის მოდერნიზაციასთან და სისტემური დანაკარგების შემცირებასთან წარმოადგენს ყველაზე ეფექტურ გზებს მომავალი კლიმატური პირობების მიმართ მდგრადობის გასაუმჯობესებლად.

მიზანი

კვლევის ძირითადი მიზანია მდინარე იორი-სიონის წყალსაცავის აუზში არსებული და სამომავლო წყლის რესურსის შეფასება და იმის ანალიზი, თუ როგორ შეიძლება კლიმატურმა ცვლილებამ, წყლის მოთხოვნის ზრდამ, ასევე ტყის საფრის მდგომარეობის, ნიადაგის ეროზიისა და წყალსაცავის ინერტული მასალით შევსების შესახებ არსებული შეზღუდული მონაცემების გათვალისწინებამ გავლენა მოახდინოს წყლის განაწილებასა და მთლიანად სისტემის მდგრადობაზე.

ვინაიდან წყალსაცავის ოპერირების ჩანაწერები, ბათიმეტრიული ინფორმაცია, დადასტურებული წყლის დონე-მოცულობის მრუდები და უწყვეტი გრძელვადიანი ხარჯის დაკვირვებები შეზღუდულად არის ხელმისაწვდომი, შეფასება დაგეგმილია, როგორც სკრინინგის დონის ჰიდროლოგიური და წყლის განაწილების ანალიზი. შესაბამისად, კვლევა ფოკუსირებულია აუზის მასშტაბზე წყლის ხელმისაწვდომობის აღდგენაზე, სისტემის ძირითადი მგრძნობიარე კომპონენტების იდენტიფიცირებაზე და სამომავლო დეტალური წყალსაცავის ოპერირების ანალიზისთვის ტექნიკურად დასაბუთებული საფუძვლის მომზადებაზე.

კვლევის მიზანია, ხელმისაწვდომი მონაცემების ანალიზის საფუძველზე შეიქმნას საბაზისო ინფორმაცია გარემოს დაცვისა და ბუნებრივი რესურსების მართვის სფეროში ისეთი გადაწყვეტილებების მისაღებად, რომლებიც გავლენას ახდენენ განსაკუთრებულად მაღალი საზოგადოებრივი და სახელმწიფო სტრატეგიული ინტერესის მქონე საკითხებზე სოციალურ-ეკონომიკური, ინფრასტრუქტურული, ურბანული თუ უსაფრთხოების მიმართულებით, როგორიცაა: დედაქალაქის წყალმომარაგების რაოდენობრივი და ხარისხობრივი პარამეტრების შენარჩუნება და საკვანძო საირიგაციო სისტემების წყლით უზრუნველყოფა.

- ხელმისაწვდომი ჰიდრომეტეოროლოგიური, ტოპოგრაფიული, მიწის საფრის, სარწყავი და კლიმატური პროგნოზების მონაცემების შეგროვება და მიმოხილვა, რომლებიც რელევანტურია მდინარე იორის აუზისთვის.
- მიწისპირა დაკვირვებების, დაკალიბრებული სატელიტური ნალექის მონაცემებისა და წყლის ბალანსის რეკონსტრუქციის გამოყენებით, აუზის საბაზისო კლიმატური და ჰიდროლოგიური პირობების განსაზღვრა.
- შერჩეული კლიმატური სცენარების პირობებში ტემპერატურისა და ნალექის პროგნოზირებული ცვლილებების შეფასება და ჩამონადენის ხელმისაწვდომობაზე მათი სავარაუდო გავლენის ანალიზი.
- არსებული წყლის რესურსებისა და ძირითადი სექტორული მოთხოვნების ბალანსის შეფასება, მათ შორის: სასმელი წყლით უზრუნველყოფა, სარწყავი წყლის მოთხოვნა, ეკოლოგიური ხარჯის მოთხოვნები და ჰიდროენერგიასთან დაკავშირებული რეგულირება.

- ტყის საფრისა და მცენარეული მდგომარეობის გავლენის შეფასება ჩამონადენის ფორმირებაზე, ინფილტრაციაზე, ევაპოტრანსპირაციაზე და ჰიდროლოგიურ სტაბილურობაზე წლიურ ჭრილში.
- შეზღუდული მონაცემების პირობებში ნიადაგის ეროზიისა და ინერტული მასალის წყალსაცავში მოხვედრის სავარაუდო გავლენების იდენტიფიცირება სიონის წყალსაცავზე, სარწყავ ინფრასტრუქტურასა და გრძელვადიან სასარგებლო მოცულობის სანდოობაზე; ასევე იმ პრიორიტეტული წყალშემკრები ზონების გამოკვეთა, სადაც აღდგენითი ან დაცვის ღონისძიებები ყველაზე რელევანტური შეიძლება იყოს.
- წყლის მართვის, ინფრასტრუქტურის ეფექტიანობის გაუმჯობესების, მონიტორინგის გაძლიერებისა და წყალშემკრები აუზის დაცვის პრაქტიკული რეკომენდაციების შემუშავება, ასევე აუზის მართვაში ჩართული პასუხისმგებელი ინსტიტუციებისთვის პრიორიტეტული ქმედებების განსაზღვრა.

შეფასების შედეგები მიზნად ისახავს ინფორმირებული გადაწყვეტილებების მხარდაჭერას კლიმატმედეგი წყლის განაწილებისა და სიონის წყალსაცავის აუზის მართვისთვის. ამავდროულად, კვლევა გამოყოფს იმ ძირითად მონაცემთა ხარვეზებს, რომლებიც უნდა აღმოიფხვრას სამომავლო დეტალური წყალსაცავის ოპერირებისა და ინერტული მასალით შევსების კვლევებისთვის.

ამასთანავე, უნდა აღინიშნოს, რომ კვლევა აქცენტირებულად გამოყოფს წყალშემკრები აუზის ტყის დაცვით და წყალმარეგულირებელ მნიშვნელობას და ახორციელებს მის შეფასებას სტრატეგიული წყლის რესურსების გრძელვადიანი უზრუნველყოფის კონტექსტში. წყალსაცავის წყალშემკრები აუზის მდგრადობა პირდაპირ უკავშირდება თბილისის ზღვის და სამგორის სარწყავი სისტემის საჭირო რაოდენობის წყლით უზრუნველყოფას, ეკოლოგიური ხარჯის შენარჩუნებას და წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის გრძელვადიან დაცვას.

ამ თვალსაზრისით, კვლევა ტყის საფარს განიხილავს არა მხოლოდ როგორც მიწის საფრის ერთ-ერთ კომპონენტს, არამედ როგორც ბუნებრივ დამცავ ინფრასტრუქტურას, რომელიც ასრულებს ნიადაგდაცვით, წყალმარეგულირებელ და ეროზიის შემამცირებელ ფუნქციებს. აქვე ხაზი უნდა გაესვას იმ ფაქტს, რომ არსებული შეფასება არ ანაცვლებს დეტალურ კვლევას, ჰიდროლოგიურ მონიტორინგს ან სააუზო მართვისთვის საჭირო გაზომვებს (მათ შორის წყლის ასაკის განსაზღვრას იზოტოპური კვლევის და გაზომვების საფუძველზე) ანდა სხვა საჭირო დეტალურ კვლევებს, თუმცა შექმნის ტექნიკურად დასაბუთებულ საწყის საფუძველს იმისთვის, რომ შესასწავლ აუზში განისაზღვროს ტყის ნიადაგდაცვითი და წყალმარეგულირებელი ფუნქცია და მისი გავლენა წყალსაცავის ზოგად მდგომარეობაზე.

ძირითადი მიგნებები

წარმოდგენილი კვლევა, ხელმისაწვდომი მონაცემების ანალიზის საფუძველზე, ქმნის საბაზისო ინფორმაციას გარემოს დაცვისა და ბუნებრივი რესურსების მართვის სფეროში ისეთი გადაწყვეტილებების მისაღებად, რომლებიც გავლენას ახდენენ განსაკუთრებულად მაღალი საზოგადოებრივი და სახელმწიფო ინტერესის მქონე საკითხებზე _ სოციალურ-ეკონომიკური, ინფრასტრუქტურული, ურბანული თუ უსაფრთხოების მიმართულებით, როგორიცაა: დედაქალაქის წყალმომარაგების რაოდენობრივი და ხარისხობრივი პარამეტრების შენარჩუნება და საკვანძო საირიგაციო სისტემების წყლით უზრუნველყოფა.

ამ მიზნით კვლევა აქცენტირებულად გამოყოფს ივრის წყალშემკრები აუზის ტყეების დაცვით და წყალმარეგულირებელ მნიშვნელობას და ახორციელებს მის შეფასებას სტრატეგიული წყლის რესურსების გრძელვადიანი უზრუნველყოფის კონტექსტში. წყალსაცავის წყალშემკრები აუზის მდგრადობა პირდაპირ უკავშირდება თბილისის ზღვის და სამგორის სარწყავი სისტემის საჭირო რაოდენობის წყლით მომარაგებას, ეკოლოგიური ხარჯის შენარჩუნებას და წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის გრძელვადიან დაცვას. შესაბამისად, მდინარე ივრის აუზის ზემო წელის ტყეები უნდა განვიხილოთ, როგორც მისი წყალმარეგულირებელი და ნიადაგდაცვითი ბუნებრივი ინფრასტრუქტურა.

ჰიდროლოგიური ანგარიშის და მოდელირების შედეგები გამოთვლილია ფოთლის ფართობის ინდექსის და ზოგადად მიწის საფრის ზოგადი გავლენის გათვალისწინებით. შესაბამისად, იგი კარგად ასახავს ევაპოტრანსპირაციის გავლენას ჩამონადენის განაწილებასა და მდინარის ჰიდროლოგიურ რეჟიმზე.

შედეგად გამოჩნდა, რომ მდინარის მრავალწლიურ საშუალო ხარჯზე დიდი გავლენა აქვს მცენარეულობის სიმჭიდროვეს. აღნიშნული იწვევს ევაპოტრანსპირაციის მაჩვენებლის შემცირებას, შედეგად წყლის ბალანსში მცირდება დანაკარგი და იზრდება ზედაპირული ჩამონადენი. უფრო კონკრეტულად, მოდელირება აჩვენებს, რომ იზრდება პიკური ხარჯების ამპლიტუდა, რაც მიუთითებს იმას, რომ მრავალწლიური საშუალო ზედაპირული ჩამონადენის ზრდა ყოველთვის არ ნიშნავს დადებით მოვლენას. პირიქით, აღნიშნულ შემთხვევაში მნიშვნელოვნად იზრდება მაქსიმალური ხარჯები და მცირდება საბაზისო ჩამონადენი, განსაკუთრებით კი წლის ყველაზე მშრალ პერიოდებში.

ზემოთ აღნიშნული შედეგები შეესაბამება თეორიულ მოლოდინებს და ფართო ემპირიულ მტკიცებულებებს, რომლებიც აჩვენებს, რომ მცენარეულობა წარმოადგენს წყალშემკრებში წყლის გენერირებასა და დროში გადანაწილებაზე პასუხისმგებელ დომინანტურ ცვლადს.

მიღებული შედეგები ხაზს უსვამს მცენარეულობის დინამიკის გათვალისწინების მნიშვნელობას გრძელვადიანი ჰიდროლოგიური მოდელირებისა და წყლის რესურსების ხელმისაწვდომობის შეფასებისას. ამასთანავე, შედეგები აჩვენებს ნიადაგის ეროზიის რისკის ზრდას ხე-ტყის ჭარბი და არასწორი მოპოვების შემთხვევაში, რაც ასევე ზრდის წყალსაცავის მოლამვის რისკს და კიდევ უფრო ამცირებს სასარგებლო მოცულობას.

შესაბამისად, ტყის დაცვა ამ აუზში არ არის მხოლოდ სატყეო ან ბიომრავალფეროვნების საკითხი. იგი პირდაპირ კავშირშია სასმელი წყლის უსაფრთხოებასთან, წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის შენარჩუნებასა და კლიმატმედეგი წყლის განაწილების უზრუნველყოფასთან.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, მნიშვნელოვანია, რომ ტყის ინვენტარიზაციის და ზონირების პროცესში მდინარე იორის წყალშემკრები აუზის ტყით დაფარული ტერიტორიები, განსაკუთრებით კი ზემო წელში, უნდა განვიხილოთ, როგორც უპირატესი დაცვითი ღირებულების ტყეები და მიენიჭოს განსაკუთრებული დაცვითი კატეგორია და დაწესდეს შესაბამისი რეჟიმი, რაც ტყეების მართვის ძირითად მიზნად აღნიშნული ფუნქციის შენარჩუნებას და გაუმჯობესებას განსაზღვრავს.

პროექტის კლიმატური რისკების სკრინინგი

პროექტის არეალი მოიცავს საქართველოს, მდინარე იორის წყალშემკრებ აუზს, რომელიც მდებარეობს თბილისიდან ჩრდილოეთით და ჩრდილო-აღმოსავლეთით. აღნიშნული მდინარე სტრატეგიულად მნიშვნელოვანი წყლის რესურსია სარწყავი მეურნეობის, ჰიდროენერგეტიკული რეგულირებისა და ქვედა დინების წყალმომარაგებისთვის. კვლევის მიზანია სიონის წყალსაცავის ზედა დინების წყალშემკრები აუზის შეფასება, ასევე მის ქვედა დინებაში მდებარე სამეურნეო არეალის განხილვა, რომელიც რეგულირებული წყალმიწოდების და წყალგამანაწილებელი ინფრასტრუქტურის გავლენის ქვეშ იმყოფება.

სიონის წყალსაცავი წარმოადგენს მდინარე იორზე განთავსებულ მრავალმიზნობრივ, ხანგრძლივად ექსპლუატირებულ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობას, რომელიც უზ-

რუნველყოფს სამგორის სარწყავი სისტემების ფუნქციონირებასა და ჰიდროენერგიის გენერაციას. მისი კლიმატური მგრძნობიარობა იზრდება იმის გამო, რომ სისტემა უკვე ფუნქციონირებს მნიშვნელოვანი ოპერაციული წნეხის პირობებში. მიმდინარე შეფასებაში კლიმატური რისკი განისაზღვრება, როგორც ის ალბათობა, რომ ჰიდრომეტეოროლოგიური პირობების ცვლილებამ, ინფრასტრუქტურულ შეზღუდვებთან და წყალშემკრები აუზის დეგრადაციასთან ერთად, შეამცირა იორი-სიონის სისტემის უნარი, დააკმაყოფილოს პრიორიტეტული წყლის გამოყენებები და შეინარჩუნოს წყალსაცავში წყლის ოპტიმალური რაოდენობა.

ამ კონტექსტში ყველაზე მნიშვნელოვანი ზემოქმედების ფაქტორებია: ჰაერის ტემპერატურის ზრდა, სეზონური ჩამონადენის გადანაწილების ცვლილება, მშრალ წლებში შემოდინების მკვეთრი შემცირება, სარწყავ წყალზე მოთხოვნის მნიშვნელოვანი ზრდა და ეროზიისადმი მიდრეკილი ტერიტორიებიდან ინერტული მასალის გაზრდილი შედინება წყალსაცავში. თუმცა, მონაცემთა სკრინინგი აჩვენებს, რომ ჰიდროლოგიური მახასიათებლების გამოსათვლელად საჭირო ინფორმაციის მნიშვნელოვანი ნაწილი (საათობრივი ან ყოველდღიური/ასეთის არსებობის შემთხვევაში) ან „ხმაურიანია“, ან ძალიან შეზღუდულად არის ხელმისაწვდომი.

აუზის მახასიათებლების, ხელმისაწვდომი კლიმატური ინფორმაციისა და სიონის სისტემის არსებული მდგომარეობის გათვალისწინებით, პროექტის არეალისთვის ყველაზე რელევანტურად მიიჩნევა შემდეგი რისკები. პირველ რიგში, მოსალოდნელია ჩამონადენის დროითი განაწილების სეზონური ცვლილება, რადგან უფრო თბილი ზამთარი და გაზაფხულზე მაღალი ტემპერატურები გავლენას ახდენს ზემო დინებაში თოვლის დაგროვებისა და დნობის პროცესებზე. მეორე, ზაფხულის წყლის დეფიციტი, სავარაუდოდ, გაძლიერდება, რადგან მაღალი ტემპერატურა ზრდის როგორც სასოფლო-სამეურნეო კულტურების წყლის მოთხოვნას, ისე აუზის ევაპოტრანსპირაციას სწორედ იმ პერიოდში, როდესაც სარწყავ წყალზე მოთხოვნა მაქსიმალურია. მესამე, მოსალოდნელია ჰიდროლოგიური ცვალებადობისა და მშრალი წლებისადმი რყევადობის ზრდა, რაც შეამცირებს წყალსაცავზე დაფუძნებული წყალმომარაგების სანდოობას იმ პირობებში, როდესაც დაგროვების შესაძლებლობა უკვე შეზღუდულია ინერტული მასალით წყალსაცავის აქტიური მოლამვის და მასში წყლის მასის შემცირების პარალელურად. მეოთხე, ეროზიისა და ინერტული მასალის მობილიზაციის რისკი შეიძლება გაიზარდოს უფრო ინტენსიური ნალექის ეპიზოდების დროს, განსაკუთრებით მშრალი პერიოდების შემდეგ. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია დეგრადირებული ფერდობების, მცირე ხევების, დამუშავებული სასოფლო-სამეურნეო მიწებისა და დარღვეული კალაპისპირა ზონებისთვის. მეხუთე, წარმოიქმნება წყლის განაწილების რისკი, რომელიც დაკავში-

რებულია კლიმატური სტრესის ურთიერთქმედებასთან სისტემის შეზღუდულ კონტროლირებადობასთან (წყალსაცავის შემცირებული მოცულობის გამო), არასაკმარის მონიტორინგის ინფრასტრუქტურასთან და წყალშემკრები აუზის დეგრადირებულ მდგომარეობასთან.

სიონის წყალსაცავის შემთხვევაში კლიმატური რისკი განუყოფელია ინერტული მასალით შევსების რისკისგან. მსოფლიო ბანკის წყალშემკრები[2] აუზის შეფასებაში ინტენსიური ინერტული მასალით შევსების პროცესი იდენტიფიცირებულია, როგორც სიონის აუზის ერთ-ერთი მთავარი გამოწვევა, რომელიც გავლენას ახდენს როგორც სარწყავი წყლის ხარისხსა და გამოყენებადობაზე, ისე კაშხლის მოცულობის სიცოცხლისუნარიანობაზე. იმავე ანგარიშში აღნიშნულია, რომ წყალსაცავმა უკვე დაკარგა საწყისი მოცულობის მნიშვნელოვანი ნაწილი ინერტული მასალით შევსების გამო. შესაბამისად, მომავალი კლიმატური ზემოქმედებები უნდა განიმარტოს არა მხოლოდ როგორც შემოდინების ცვლილება, არამედ როგორც წყალსაცავის ეფექტური უნარის ცვლილება — დააბალანსოს მშრალი პერიოდები და დაარეგულიროს სეზონური მოთხოვნა.

ვინაიდან ისტორიული მონიტორინგის მონაცემები არასრულია, წყალსაცავის ოპერირების პროტოკოლები სრულად არ არის ხელმისაწვდომი, ხოლო განახლებული ბათიმეტრიული და სედიმენტაციის მონიტორინგის მონაცემები შეზღუდულია, მიმდინარე ანგარიში უნდა განვიხილოთ, როგორც სკრინინგის დონის რისკის შეფასება და არა სრულად კალიბრირებული წყალსაცავის ოპერირების რისკის მოდელი. დამატებით, კლიმატური პროგნოზები, რომლებიც გამოყენებულია სკრინინგისთვის, ხელმისაწვდომია უხეში სივრცითი რეზოლუციით და სრულად ვერ ასახავს ივრის აუზში ნალექისა და ტემპერატურის ლოკალურ ტოპოგრაფიულ კონტროლს.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, ამ შეფასების მიზანია, გამოავლინოს ის ძირითადი გზები, რომელთა მეშვეობითაც კლიმატის ცვლილებამ შეიძლება გავლენა მოახდინოს იორი-სიონის სისტემაზე და შექმნას დასაბუთებული საფუძველი ჰიდროლოგიური, სარწყავი, ტყის საფრისა და ინერტული მასალის წყალსაცავზე გავლენის შემდგომი ანალიზისთვის.

საერთო ჯამში, სკრინინგი მიუთითებს, რომ იორი-სიონის სისტემა ექვემდებარება მაღალ, თუმცა მართვად კლიმატურ რისკს. ძირითადი საფრთხე წარმოიშობა არა მხოლოდ წყლის რესურსის რაოდენობრივი ცვლილებით, არამედ დათბობის, სე-

[2] WATERSHED MANAGEMENT AND LANDSCAPE RESTORATION OPPORTUNITIES ASSESSMENT FOR SIONI RESERVOIR WATERSHED SYSTEM IN GEORGIA

ზონური წყლის მოთხოვნის ზრდის, ინერტული მასალით შევსებისა და წყალშემკრები აუზის დეგრადაციის ურთიერთქმედებისგან იმ სისტემაში, რომელსაც უკვე შეზღუდული ოპერაციული მოქნილობა გააჩნია.

მეთოდოლოგია

როგორც ზემოთ აღინიშნა, კვლევა მიზნად ისახავს სკრინინგის დონის ჰიდროლოგიური და წყლის რესურსის განაწილების მიდგომის შემუშავებას მდინარე იორი-სიონის წყალსაცავის სისტემისთვის ოპერაციული და მონიტორინგის მონაცემების შეზღუდული ხელმისაწვდომობის პირობებში. სრულად კალიბრირებული წყალსაცავის ოპერირების მოდელის შექმნა ამ ეტაპზე შეუძლებელია, რადგან ხელმისაწვდომი არ არის განახლებული ბათიმეტრია, წყლის დონე-მოცულობის დამოკიდებულების მრუდები, დეტალური გაშვების პროტოკოლები, სექტორული წყალაღების ჩანაწერები და ბოლო პერიოდის უწყვეტი შემოდინება-გადინების რიგები (საათობრივი ან ყოველდღიური).

შესაბამისად, შეფასება აერთიანებს დაკვირვებულ ჰიდრომეტეოროლოგიურ მონაცემებს, დაკალიბრებულ სატელიტურ ნალექს, გამარტივებული წყლის ბალანსის რეკონსტრუქციას, კლიმატის ცვლილების სკრინინგს და წყალშემკრები აუზისა და ინერტული მასალის კვლევებიდან მიღებულ დამხმარე ინფორმაციას.

ხელმისაწვდომი ნალექისა და ტემპერატურის მონაცემები შეგროვდა მიწისპირა დაკვირვების სადგურებიდან და შეივსო geoCHIRPS-ის დაკალიბრებული სატელიტური მონაცემების ნაკრებით, რათა გაუმჯობესებულიყო აუზის მასშტაბზე ნალექის სივრცითი ცვალებადობის წარმოდგენა. ამის შემდეგ აუზში წყლის ხელმისაწვდომობა აღდგა გამარტივებული წყლის ბალანსის მეთოდით, რომელიც ეფუძნება ნალექს, ტემპერატურას, ევაპოტრანსპირაციასა და ჩამონადენის შეფასებას.

აღნიშნული მიდგომა მიზნად ისახავს ხელმისაწვდომი წყლის რესურსების წლიური მასშტაბისა და ამპლიტუდის შეფასებას და არა წყალსაცავის ყოველდღიური ოპერირების სიმულაციას.

სამომავლო კლიმატური მგრძნობიარობა შეფასებულია World Bank Group Climate Change Knowledge Portal-ის პროგნოზებისა და CMIP6 მონაცემების გამოყენებით. ნალექის პროგნოზები უფრო ფრთხილად არის ინტერპრეტირებული, რადგან კლიმატური მოდელების სივრცითი რეზოლუცია სრულად ვერ ასახავს ივრის აუზში ნალექის განაწილებაზე ტოპოგრაფიის ძლიერი გავლენის გამოისობით.

შერჩეული მდინარე

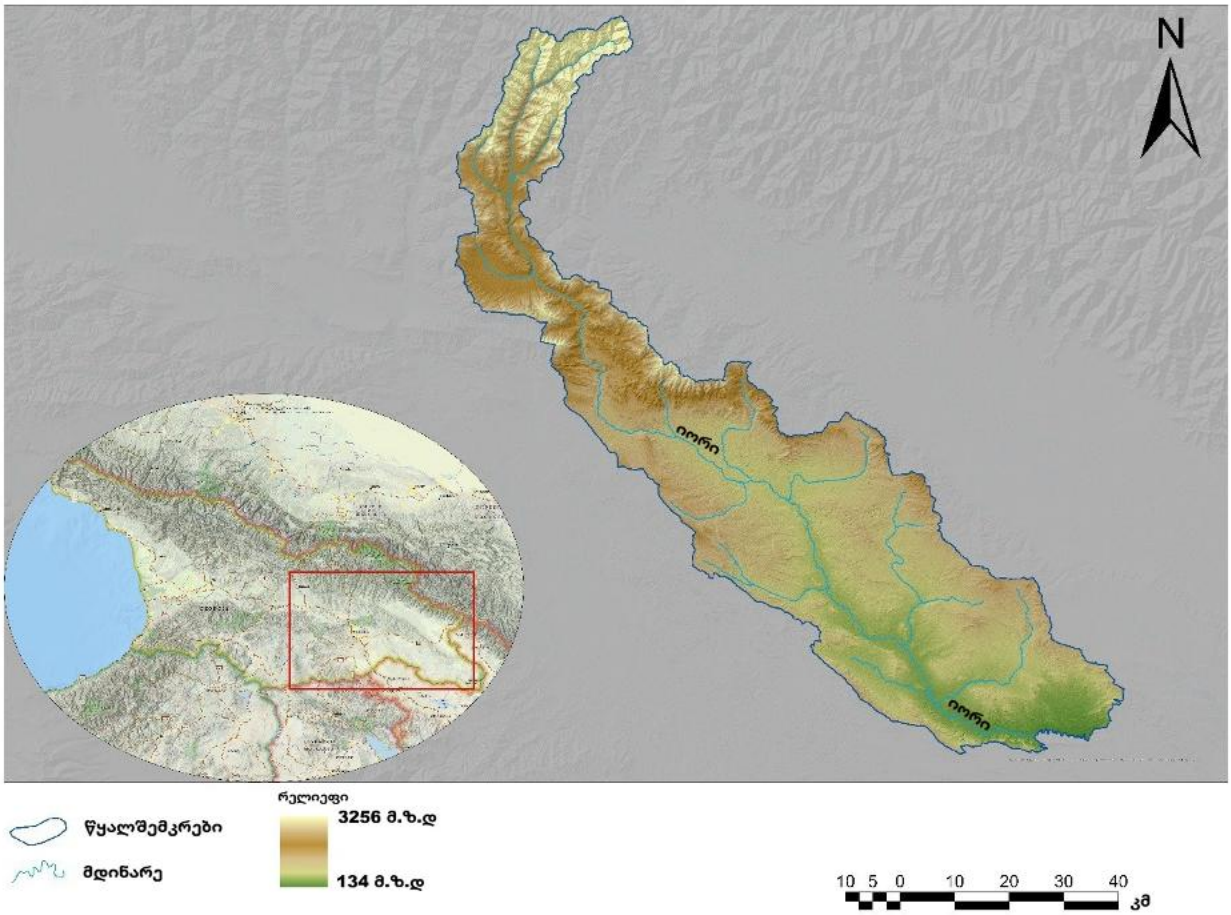
მდინარე იორი, აღმოსავლეთ საქართველოს ერთ-ერთი უდიდესი მდინარე, სათავეს იღებს საწოლგორას სამხრეთ ფერდობზე მდებარე წყაროებიდან, ზღვის დონიდან 2.619 მ სიმაღლეზე და საბოლოოდ ჩაედინება სიონის წყალსაცავში, ხოლო შემდგომ — აზერბაიჯანის ტერიტორიაზე მდებარე მინგეჩაურის წყალსაცავში. მისი საერთო სიგრძე 233 კმ-ია, ხოლო წყალშემკრები აუზის ფართობი დაახლოებით 4.131 კმ²-ს შეადგენს.

აუზის ეს ნაწილი მოიცავს მჭიდრო ჰიდროგრაფიულ ქსელს, რომელიც შედგება მრავალი მცირე და საშუალო შენაკადისგან. მდინარე იორის აუზს ასიმეტრიული ფორმა აქვს და მოიცავს დიდი კავკასიონის ქედს, მის სამხრეთ განშტოებებს და მათ შორის არსებულ V ფორმის ღრმა ხეობებს. წყალგამყოფის სიმაღლეები მცირდება 3.000-3.300 მ.ზ.დ-დან დიდი კავკასიონის ქედის ფარგლებში 100-150 მ.ზ.დ-მდე აზერბაიჯანის საზღვრის სიახლოვეს. ყველაზე დაბალი ნაწილი — კახეთის სტეპები — ფართო ვაკეს ქმნის და ხასიათდება ნახევრადმშრალი და მშრალი ლანდშაფტებით.

მდინარის ზემო წელის გეოლოგიაში დომინირებს პალეოზოური, იურული და ცარცული ქვიშაქვები, რომლებიც ეოცენურ თიხებთან ერთად ქმნის მთისწინეთის სტრუქტურას. ქვედა დინების ხეობა ძირითადად შედგება ძველი და თანამედროვე ალუვიური დანალექებისგან. მდინარის გასწვრივ მდებარე ვაკეებზე ჭარბობს ყავისფერი ნიადაგები. მცენარეულობა იცვლება სიმაღლის მიხედვით: 2.500 მ-ზე ზემოთ გვხვდება ალპური თანასაზოგადოებები, მათ ქვემოთ — სუბალპური სარტყელი, მთისწინეთში — შერეული ფოთლოვანი ტყეები, ხოლო ქვედა დინების ვაკეებზე — ფართო სასოფლო-სამეურნეო ტერიტორიები.

მდინარის ხეობის მორფოლოგია მნიშვნელოვნად იცვლება დინების მიმართულებით. მდინარე იორი იკვებება თოვლის ნადნობი, წვიმის და მიწისქვეშა წყლებით. მისი ჰიდროლოგიური რეჟიმი, სამხრეთ კავკასიის სხვა მდინარეების მსგავსად, ხასიათდება გამოკვეთილი გაზაფხულის წყალუხვობით, რომელიც სეზონურ თოვლის დნობას უკავშირდება, ხოლო ზაფხულსა და ზამთარში შედარებით დაბალი ხარჯები ფიქსირდება. გაზაფხულზე წლიური ჩამონადენის დაახლოებით 47-58% მოდის, რაც მას ყველაზე წყალუხვ პერიოდად აქცევს. ზაფხულის წილი 22-27%-ს შეადგენს და აღემატება როგორც შემოდგომის, ისე ზამთრის ჩამონადენს. ზოგიერთ წლებში ძლიერმა ნალექმა შეიძლება გააძლიეროს ან დაემთხვეს თოვლის დნობით გამოწვეულ წყალმოვარდნას, რის შედეგადაც შესაძლებელია წყლის დონის კატასტროფული მატება. მინიმალური ხარჯები, როგორც წესი, ზამთარში ფიქსირდება.

სურათი 1. მდინარე იორის აუზი



რეგიონული კლიმატი შედარებით მშრალია, განსაკუთრებით მდინარის ხეობის ქვედა დინებაში ცივი ზამთრებითა და თბილი ზაფხულით. მდინარის დინების მდებარეობის მიხედვით — ზედა თუ ქვედა დინება — ყველაზე მშრალი პერიოდი მოდის შემოდგომასა და ზამთარზე, როდესაც ნალექის წლიური რაოდენობა დაახლოებით 200 მმ-ს შეადგენს. ყველაზე ნოტიო პერიოდი მოიცავს გაზაფხულსა და ზაფხულის დასაწყისს, როდესაც ნალექი აუზის მასშტაბით 300-დან 500 მმ-მდე მერყეობს, ტოპოგრაფიისა და მდებარეობის მიხედვით.

ნალექის განაწილება დიდწილად განისაზღვრება გეომორფოლოგიით, რის შედეგადაც წყალშემკრებ აუზში ყალიბდება მკაფიო სივრცით-დროითი ნალექის რეჟიმი. სეზონური ნალექის დინამიკა წლის განმავლობაში აშკარა ცვალებადობას ავლენს. ყველაზე მაღალი ნალექი ფიქსირდება მაისში — 105 მმ, რაც გვიანი გაზაფხულის ნალექების პიკს წარმოადგენს. ყველაზე დაბალი მნიშვნელობები ფიქსირდება იანვარში — 27 მმ, რაც მშრალი ზამთრის სეზონის დაწყებას ასახავს. ნალექი მკვეთრად იზრდება მარტიდან მაისამდე, რაც უფრო ნოტიო პირობებზე გადასვლას მიუთითებს. მეორე პიკი შეინიშნება ივნისში — 90 მმ, რაც ადრეულ ზა-

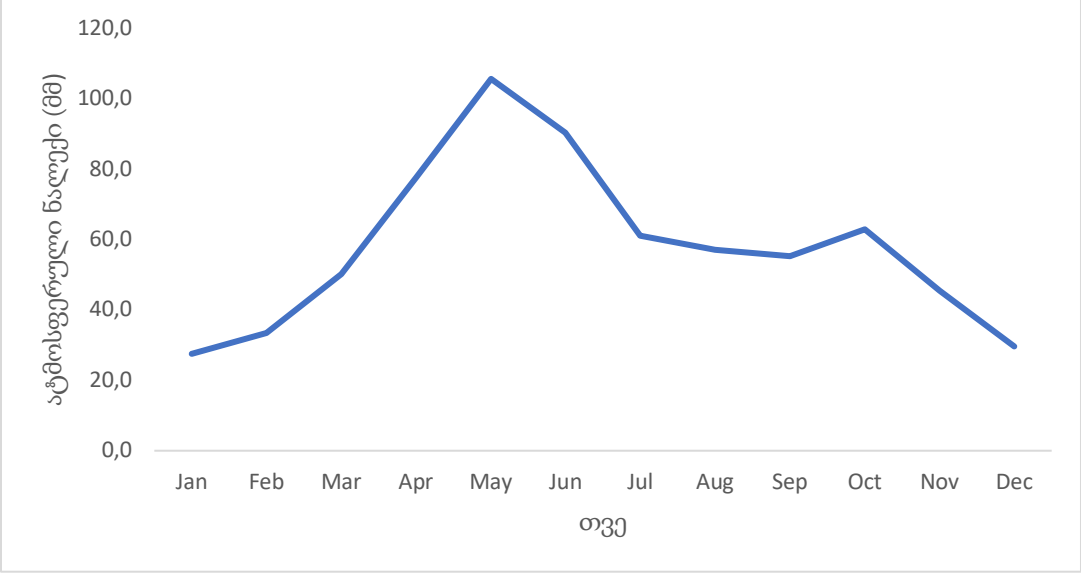
ფხულშიც ნალექიანი პირობების გაგრძელებაზე მიუთითებს. ივნისიდან აგვისტომდე ნალექი თანდათან მცირდება, შემდეგ კი ოქტომბერში მცირე ზრდა შეინიშნება, რაც სავარაუდოდ მეორეული ნოტიო პერიოდის დაწყებას ან მშრალი სეზონის დასრულებას უკავშირდება. დეკემბერი, იანვარი და თებერვალი ყველაზე მშრალი თვეებია.

ცხრილი 1. მდინარე იორის ძირითადი ინფორმაცია

პარამეტრი	მნიშვნელობა
წყალშემკრები აუზის ფართობი (კმ²)	4.131
საერთო სიგრძე (კმ)	233
დაქანება	0.54
საშუალო სიმაღლე (მ)	793.92

შედეგად, მდინარის ხარჯის რეჟიმს ახასიათებს ძლიერი სეზონური ცვალებადობა, რომელიც განპირობებულია როგორც ნალექის განაწილებით, ისე მიწისქვეშა წყლების მონაწილეობით. აღნიშნულ სეზონურობას მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს წყლის რესურსების მართვასა და აუზის ეკოლოგიური მდგრადობის შენარჩუნებაზე.

სურათი 2. ნალექის ყოველთვიური გადანაწილება მდინარის წყალშემკრებში[3]

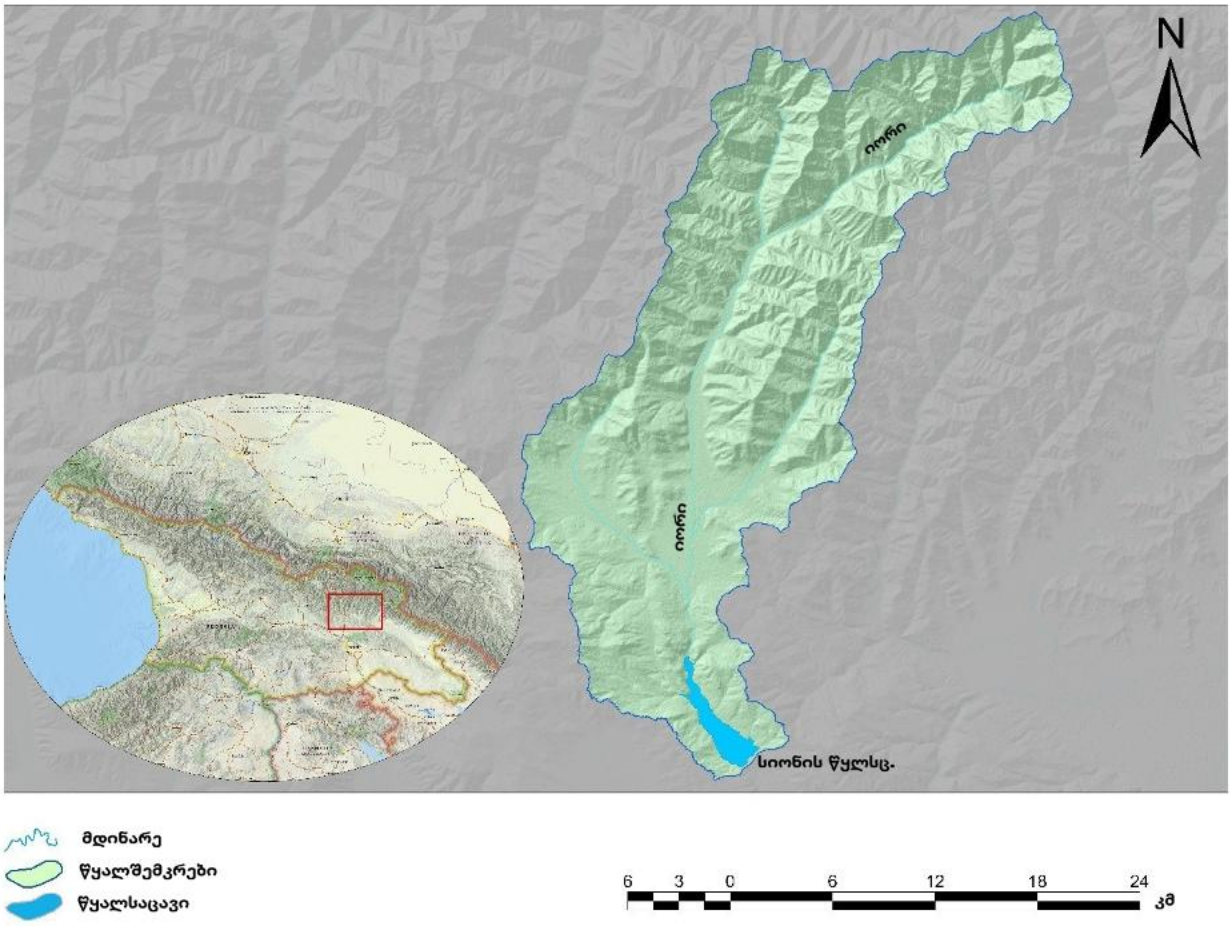


[3] geoCHIRPS

მრავალწლიური საშუალო ნალექისა და ტემპერატურის მაჩვენებლები შერჩეულ აუზში

მდინარე იორი-სიონის წყალსაცავის სისტემის ჰიდრომეტეოროლოგიური მახასიათებლების განსაზღვრა ეფუძნება ხელმისაწვდომი სადგურების დაკვირვებების, დაკალიბრებული სატელიტური ნალექის მონაცემებისა და დამხმარე რეგიონული კლიმატური ინფორმაციის კომბინირებულ ანალიზს. რადგან აუზში საზომი სადგურების სივრცითი დაფარვა შეზღუდულია და ყველა სადგური არ უზრუნველყოფს უწყვეტ გრძელვადიან რიგებს, აუზის მასშტაბის ინტერპრეტაცია ძირითადად ეყრდნობა geoCHIRPS-ის ნალექის მონაცემთა ნაკრებს, ხოლო ხელმისაწვდომი ტემპერატურის სადგურები გამოიყენება გრძელვადიანი დათბობის ტენდენციებისა და სეზონური კლიმატური ცვალებადობის შესაფასებლად. ეს მიდგომა უზრუნველყოფს უფრო თანმიმდევრულ ანალიზს იმ კლიმატური ფაქტორების შესახებ, რომლებიც აკონტროლებს ჩამონადენის გენერაციასა და წყლის მოთხოვნას აუზის მასშტაბით.

ანალიზი ასევე ეყრდნობა კლიმატის ცვლილების სამთავრობათაშორისო პანელის (IPCC) უახლეს პროგნოზებს, რომლებშიც 1994-2014 წლების პერიოდი გამოყენებულია, როგორც საცნობარო პერიოდი. აღნიშნული პროგნოზები იძლევა წყალშემკრებ აუზში ნალექის ჯამური ცვლილებების შეფასების შესაძლებლობას. მოდელირებულ პროგნოზებთან ერთად, ადგილობრივი ნალექის სადგურების დაკვირვებების რიგები წარმოადგენს დამატებით მტკიცებულებას მდინარის აუზში უკვე მიმდინარე კლიმატურ ცვლილებებთან დაკავშირებით.



სურათი 3. სიონის წყალსაცავის მდებარეობა შერჩეულ აუზში

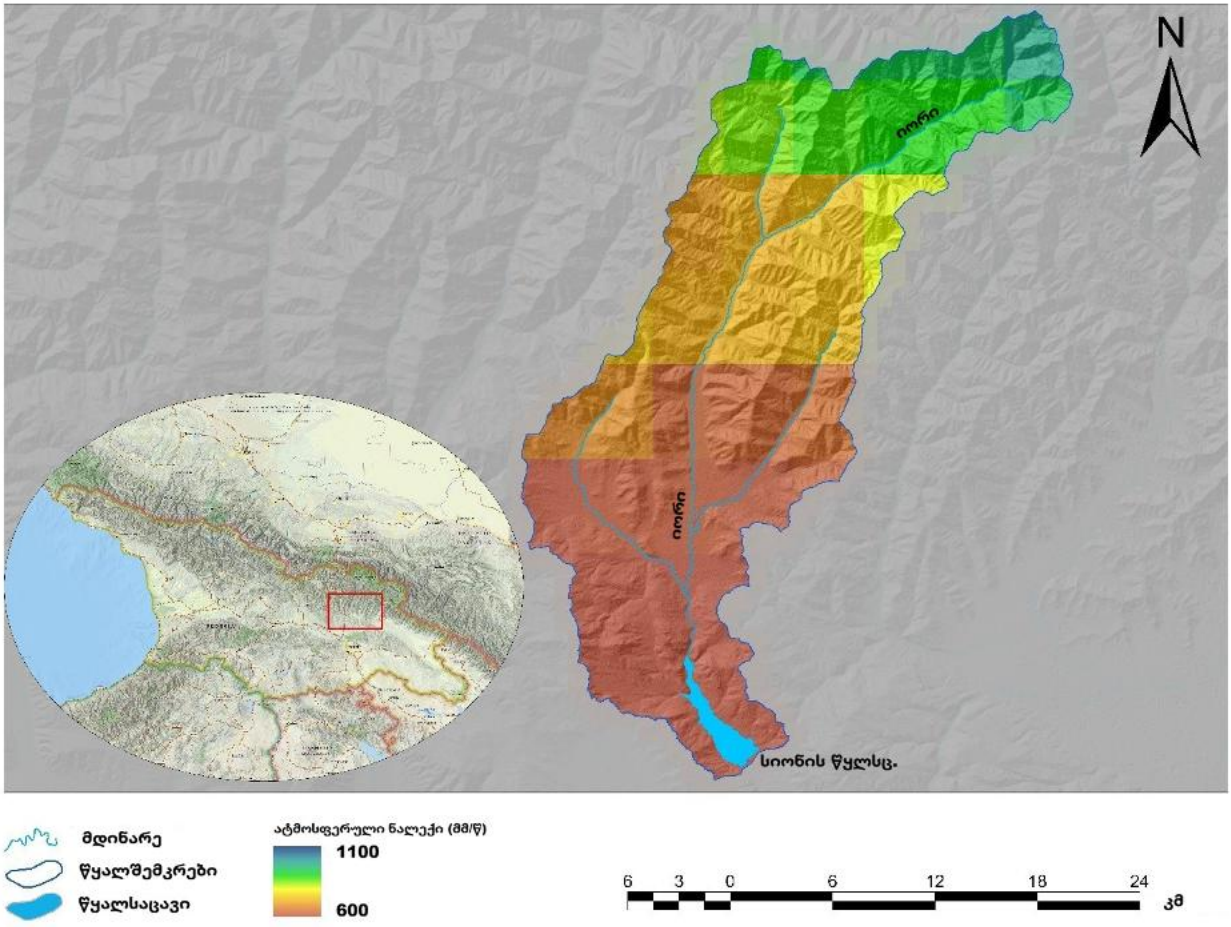
მეთოდოლოგიური პროცესის პირველი ეტაპი მოიცავდა აუზის ზუსტი სივრცითი საზღვრების დადგენას, რათა ყველა კლიმატური მონაცემთა ნაკრები სწორად ყოფილიყო შეთანხმებული ჰიდროლოგიურ საზღვრებთან. ვინაიდან გლობალური კლიმატური პროგნოზები ყოველთვის ვერ ასახავს ლოკალურ ფაქტორებს, სცენარების შერჩევის პროცესში თანმიმდევრულობის გადასამოწმებლად და სივრცითი სიზუსტის გასაუმჯობესებლად გამოყენებულ იქნა როგორც სატელიტური ნალექის პროდუქტები, ასევე მიწისპირა სადგურების დაკვირვებები.

ცხრილი 2. შერჩეული წყალშემკრების ძირითადი ინფორმაცია

პარამეტრი	მნიშვნელობა
წყალშემკრები აუზის ფართობი (კმ²)	568
საერთო სიგრძე (კმ)	54
დაქანება	0.62
საშუალო სიმაღლე (მ)	1616

დაკვირვებული მონაცემების, სატელიტური ინფორმაციისა და გლობალური კლიმატური პროგნოზების ერთობლივი გამოყენება უზრუნველყოფს კლიმატური ცვალებადობისა და გრძელვადიანი ტენდენციების უფრო ზუსტ შეფასებას, რომლებიც გავლენას ახდენს მდინარის აუზის ჰიდროლოგიურ რეჟიმზე.

ანალიზში გამოყენებულია 1981-დან 2021 წლამდე არსებული წლიური ნალექის მონაცემები შემდეგი ლოკაციებისთვის: ფასანაური, თიანეთი და თბილისი. მონაცემები გაანალიზებულია საკვლევი პერიოდის განმავლობაში ნალექის ტენდენციების, ცვალებადობისა და ნალექის რეჟიმში არსებული მნიშვნელოვანი ცვლილებების გამოსავლენად.



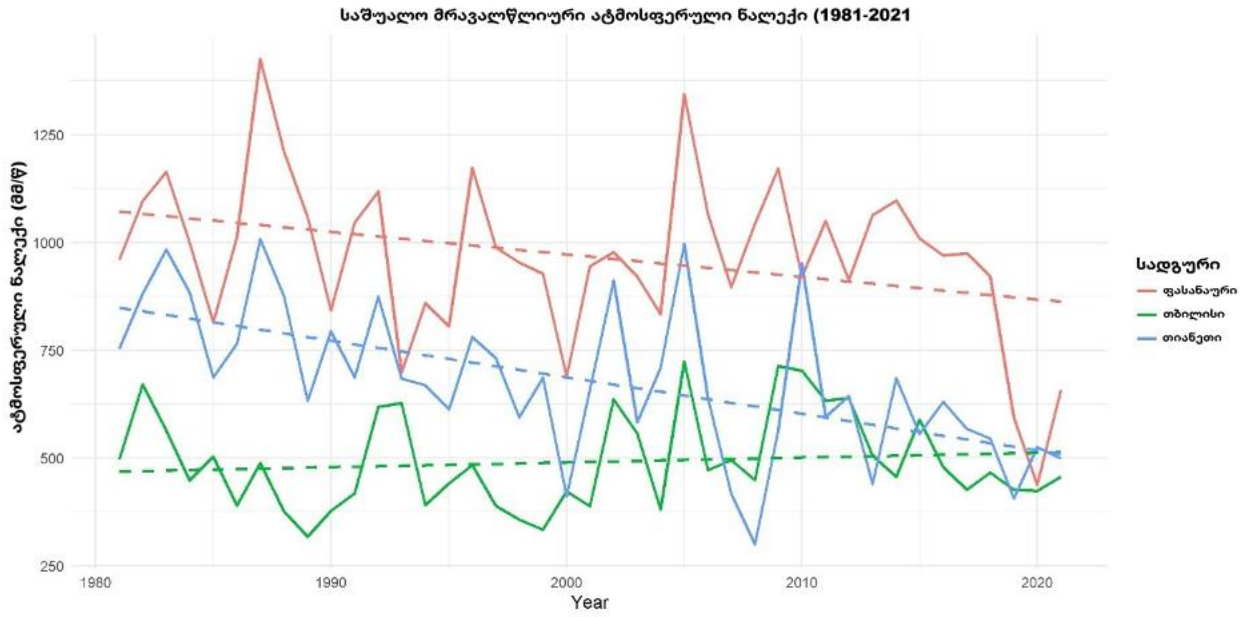
სურათი 4. მრავალწლიური საშუალო ნალექის განაწილება აუზში (1981-2021)

1981-2021 წლებში ფასანაურის, თიანეთისა და თბილისის წლიური ნალექის მონაცემები აჩვენებს მკვეთრ სივრცით ამპლიტუდას და მნიშვნელოვან წლიდან წლამდე ცვალებადობას. ფასანაურში თანმიმდევრულად ფიქსირდება ყველაზე მაღალი

ჯამები, თიანეთი გამოირჩევა შუალედური მნიშვნელობებით, ხოლო თბილისი მთელი დაკვირვების პერიოდის განმავლობაში შედარებით მშრალია. ეს ასახავს ოროგრაფიული გავლენის მნიშვნელობას როგორც ზემო წელში, მთიან ზონაში და ნალექის თანდათანობით კლებას დაბლობების მიმართულებით.

1980-იანი წლები ხასიათდება გაზრდილი ცვალებადობით, განსაკუთრებით ფასანაურში, სადაც 1987 წელს დაფიქსირდა ექსტრემალური პიკი, რომელიც 1400 მმ-ს აჭარბებდა. 1990-იან წლებში შეინიშნება ზომიერი სტაბილიზაცია, თუმცა რამდენიმე მშრალი წელი ფიქსირდება 1993-1995 წლების პერიოდში. 2001-2010 წლების ათწლეული გამოირჩევა ნალექიანობის ხელახალი ზრდით, რაც განსაკუთრებით კარგად ჩანს 2005 წლის აუზის მასშტაბის მაქსიმუმით და 2009-2010 წლებში ყველა სადგურზე გაზრდილი ნალექის ჯამებით.

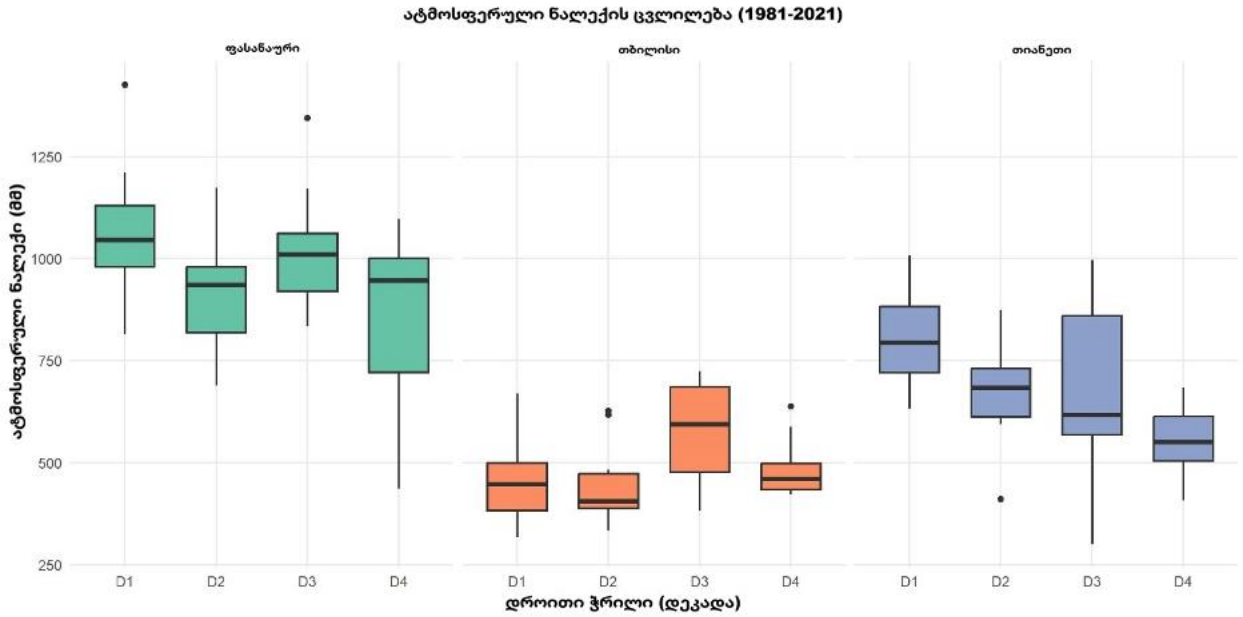
სურათი 5. ნალექის ცვლილება დროში ნალექის სადგურების მონაცემების მიხედვით



2011 წლის შემდეგ ცვალებადობა კვლავ შენარჩუნებულია, თუმცა ექსტრემალური პიკები შედარებით ნაკლებად ფიქსირდება. აღსანიშნავია, რომ 2019-2020 წლებში ფასანაურსა და თიანეთში დაფიქსირდა მკვეთრად მშრალი პირობები წინა ათწლეულებთან შედარებით, მაშინ, როდესაც თბილისი შედარებით სტაბილური, თუმცა დაბალი ნალექიანობის მქონე სადგურად რჩება.

საერთო ჯამში, მთელ პერიოდზე მკაფიო, ერთმნიშვნელოვანი გრძელვადიანი მონოტონური ტენდენცია არ იკვეთება. დომინანტურ სიგნალს წარმოადგენს ძლიერი წლიდან წლამდე და ათწლეულური ცვალებადობა, როდესაც ყველა სადგურზე ერთდროულად ვლინდება ნოტიო და მშრალი პერიოდების მონაცვლეობა, რაც თან ერთვის მდგრად ტოპოგრაფიულ ნალექის გრადიენტს.

სურათი 6. ნალექის გადანაწილება ადგილის მიხედვით



საერთო ჯამში, უმეტეს სადგურებზე წლიური ნალექი მცირედ კლებად ტენდენციას აჩვენებს; თუმცა „წელი-ნალექი" ხაზოვანი დამოკიდებულება უმეტეს შემთხვევაში სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი არ არის. შესაბამისად, შეიძლება ითქვას, რომ კლიმატის ცვლილებამ უფრო მეტად იმოქმედა სეზონურ ნალექის განაწილებაზე მაშინ, როდესაც წლიური საშუალო მნიშვნელობა ძირითადად სტაბილურად რჩება.

ცხრილი 3. მრავალწლიური საშუალო ნალექის გადანაწილება სადგურების მიხედვით (1981-2021)[4]

სადგური	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
თიანეთი	27.8	34.2	43.9	77.4	101.0	88.6	60.8	63.0	52.0	60.2	43.3	30.3	682.5
ფასანაური	48.3	46.6	66.7	100.8	132.7	124.2	101.5	90.4	67.1	74.5	63.3	49.7	965.8
თბილისი	14.6	21.9	31.0	55.9	76.5	72.8	45.7	36.8	31.6	42.5	33.1	20.5	482.9

ფასანაური აჩვენებს სტატისტიკურად მნიშვნელოვან კლებად ტენდენციას (დახრა = -5,23 მმ/წ⁻¹, p = 0,0337). მიუხედავად იმისა, რომ დეტერმინაციის კოეფიციენტი შედარებით დაბალია (R^2 = 0,110), მიუთითებს, რომ წლიდან წლამდე ცვალებადობის მხოლოდ დაახლოებით 11% აიხსნება დროით, უარყოფითი დახრა მაინც მია-

[4] გარემოს ეროვნული სააგენტო

ნიშნებს წლიური ნალექის ნელ, გრძელვადიან კლებაზე. ოთხი ათწლეულის განმავლობაში ეს შეესაბამება დაახლოებით 200 მმ-ზე მეტ კუმულაციურ შემცირებას, რაც ჰიდროლოგიურად მნიშვნელოვანია სადგურის მაღალი საბაზისო ნალექის ჯამების გათვალისწინებით.

თბილისი აჩვენებს მცირედ დადებით დახრას (+1,11 მმ/წ⁻¹), თუმცა ტენდენცია სტატისტიკურად მნიშვნელოვანი არ არის ($p = 0,449$), ხოლო ახსნილი ვარიაცია უმნიშვნელოა ($R^2 = 0,0148$). ეს მიუთითებს, რომ თბილისში ნალექის ცვალებადობა ძირითადად განისაზღვრება წლიდან წლამდე რყევებით და არა სისტემური გრძელვადიანი ცვლილებით.

ამის საპირისპიროდ, **თიანეთი** აჩვენებს მკვეთრ და მაღალი სანდოობის კლებად ტენდენციას (-8,49 მმ/წ⁻¹, $p < 0,001$) შედარებით ძლიერი ახსნის უნარით ($R^2 = 0.346$). ნალექის ცვალებადობის დაახლოებით 35% დაკავშირებულია დროით ტენდენციასთან, რაც მიუთითებს კვლევის პერიოდში არსებით და მდგრად კლებაზე.

ცხრილი 4. წლებისა და ნალექის ხაზოვანი დამოკიდებულება შერჩეულ სადგურებზე (1981-2021)

სადგური	P-მნიშვნელობა	დახრა	R^2
თიანეთი	0.0000661	-8.49	0.346
ფასანაური	0.0337	-5.23	0.110
თბილისი	0.449	1.11	0.0148

დამატებით სატელიტური მონაცემების საფუძველზე შერჩეული ქვე-აუზებისთვის განისაზღვრა თვიური და წლიური ნალექის მაჩვენებლები.

ცხრილი 5-ში წარმოდგენილია შერჩეული ქვე-აუზის წლიური ნალექის ჯამები მმ-ში, 1981-დან 2021 წლამდე 41-წლიანი პერიოდისთვის. ამ პერიოდში მუდმივად ზრდადი ან კლებადი გრძელვადიანი ტენდენცია არ იკვეთება. თუმცა, სადგურებს შორის საშუალო ნალექის მკაფიო განსხვავებები ხაზს უსვამს რეგიონული ტოპოგრაფიის, სიმაღლისა და კლიმატური ქვეზონების გავლენას.

საერთო ჯამში, მონაცემები აჩვენებს ნალექის მკაფიო გრადიენტს: მთიან და მაღალმთიან სადგურებზე, როგორიცაა ფასანაური, ნალექი უფრო მაღალია, ვიდრე დაბლობში, მაგალითად, თბილისში.

ცხრილი 5. ატმოსფერული ნალექის გადანაწილება წყალშემკრებ აუზში (geoCHIRPS 1981-2021)

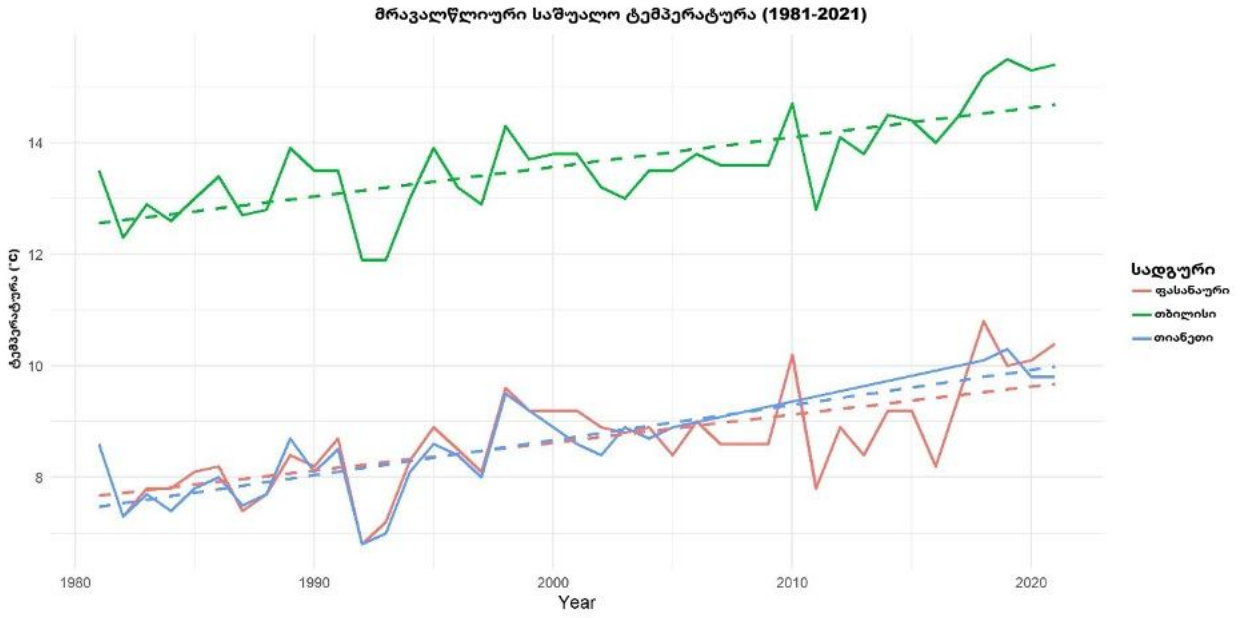
წელი	მმ	წელი	მმ
1981	835.8	2002	919.6
1982	915.7	2003	710.8
1983	998.3	2004	706.0
1984	820.4	2005	1043.5
1985	778.3	2006	768.6
1986	768.6	2007	667.0
1987	986.7	2008	634.6
1988	927.2	2009	864.3
1989	734.3	2010	854.8
1990	794.2	2011	875.5
1991	742.0	2012	791.7
1992	888.9	2013	703.3
1993	706.9	2014	783.9
1994	769.7	2015	784.1
1995	673.1	2016	773.9
1996	761.8	2017	675.0
1997	831.6	2018	692.8
1998	660.9	2019	575.3
1999	737.1	2020	566.0
2000	571.1	2021	627.2
2001	670.2	საშ.	770.5

ზემოთ წარმოდგენილი კალიბრებული სატელიტური მონაცემების საფუძველზე, ივრის აუზში მრავალწლიური საშუალო ნალექი შეადგენს დაახლოებით 770 მმ/წელს.

დროში ტემპერატურის ცვლილების გასაანალიზებლად ასევე გამოყენებულია სამი ტემპერატურული სადგურის მონაცემი, რომლებიც მდებარეობს ფასანაურში, თიანეთსა და თბილისში. გრძელვადიანი ტემპერატურის ცვალებადობის უკეთ გასაგებად მონაცემთა ნაკრები სტატისტიკურად შემოწმდა R-ში.

სამივე სადგურისათვის p-მნიშვნელობები მნიშვნელოვნად დაბალია გავრცელებულ სტატისტიკურ ზღვართან შედარებით, მაგალითად 0,05 ან 0,01-თან, რაც საშუალებას იძლევა, უცვლელობის ჰიპოთეზა მაღალი სანდოობით უარვყოთ. აღნიშნული დაბალი p-მნიშვნელობები მიუთითებს სტატისტიკურად მნიშვნელოვან ტემპერატურულ ტენდენციებზე ფასანაურში, თიანეთსა და თბილისში 1981 წლიდან. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ამ სადგურებზე დაფიქსირებული ტემპერატურის ცვლილებები ძალიან ნაკლებად არის შემთხვევითი ცვალებადობის შედეგი და უფრო მეტად რეალურ გრძელვადიან დათბობის ტენდენციას ასახავს.

სურათი 7. წლის საშუალო ნალექის ცვლილება დროში შერჩეული სადგურების მიხედვით



კვლევის პერიოდში თიანეთში, ფასანაურსა და თბილისში დაფიქსირებულ ტემპერატურის ცვალებადობაზე გავლენას ახდენს რამდენიმე ფაქტორი, მათ შორის: სიმაღლე, გეოგრაფიული მდებარეობა და ლოკალური კლიმატური თავისებურებები. მიუხედავად იმისა, რომ სამივე სადგურისთვის გამოვლინდა მნიშვნელოვანი გრძელვადიანი ტემპერატურული ტენდენციები, დამატებითი სადგურებისა და განმარტებითი ცვლადების ჩართვა უზრუნველყოფდა ტემპერატურის ცვალებადობის განმაპირობებელი ფაქტორების უფრო ღრმა ანალიზს.

ცხრილი 6. მრავალწლიური საშუალო ტემპერატურული მაჩვენებლებით შერჩეული სადგურებისთვის

სადგური	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
თიანეთი	-2.6	-1.8	2.3	8.3	12.8	16.8	19.6	19.2	14.9	9.5	3.7	-1.2	8.5
ფასანაური	-2.5	-1.2	3.0	8.7	12.9	16.7	19.4	19.0	15.0	10.0	3.8	-1.1	8.7
თბილისი	2.7	3.6	7.6	12.9	17.7	22.2	25.2	25.0	20.4	14.3	8.0	3.9	13.6

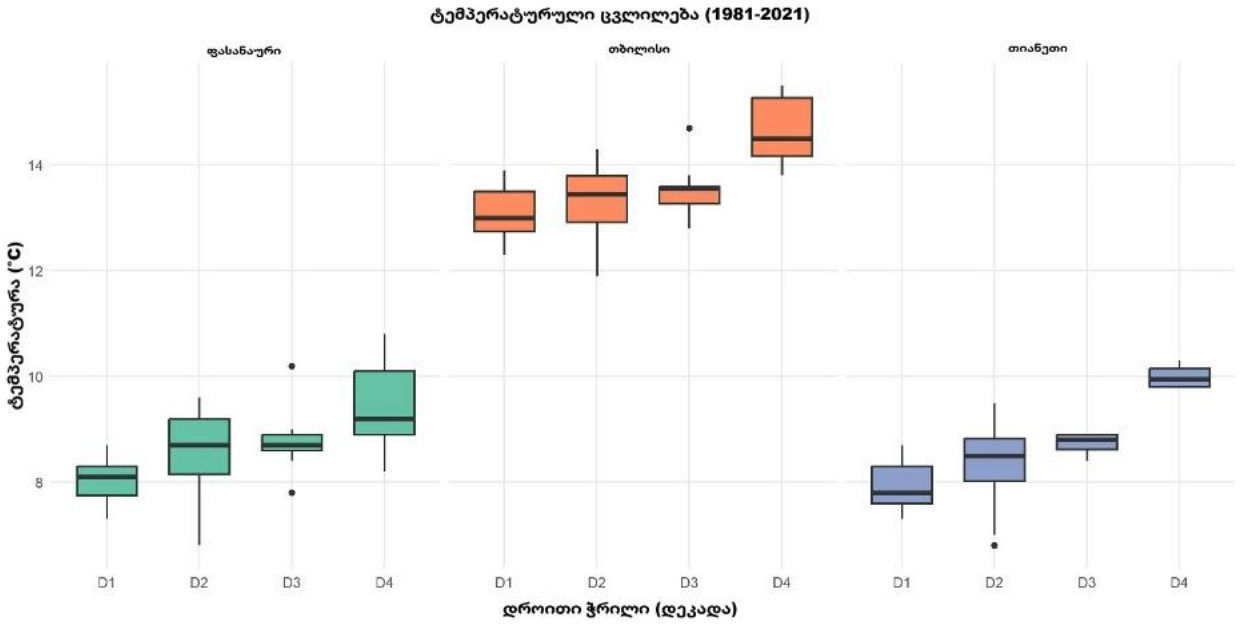
1981-2021 წლების ტემპერატურის მონაცემები ფასანაურის, თბილისისა და თიანეთისთვის აჩვენებს მნიშვნელოვან აღმავალ ტენდენციას, რაც რეგიონში დათბობის მკაფიო სიგნალზე მიუთითებს. მაგალითად, თბილისში საშუალო წლიური ტემპერატურა გაიზარდა დაახლოებით 13,1°C-დან 1980-იანი წლების დასაწყისში 14,1°C-ზე მეტამდე 2021 წლისთვის. სტატისტიკურმა ანალიზმა სამივე სადგურისთვის აჩვენა ძალიან დაბალი p-მნიშვნელობები, რაც ადასტურებს, რომ დაკვირვებული დათბობა ძალიან ნაკლებად არის შემთხვევითი ცვალებადობის შედეგი. ამ ტენდენციების თანმიმდევრულობა რამდენიმე ლოკაციაზე მიუთითებს რეგიონულ და არა მხოლოდ ლოკალურ კლიმატურ ცვლილებაზე.

აღნიშნული შედეგები თანხვედრაშია გლობალური დათბობის ტენდენციებთან და გულისხმობს პოტენციურ ლოკალურ ზემოქმედებებს, მათ შორის: ნალექის რეჟიმების ცვლილებას, ექსტრემალური ამინდის მოვლენების სიხშირის ზრდას, მცენარეთა ვეგეტაციის პერიოდის ცვლილებებს და წყლის რესურსების მართვისთვის დამატებით გამოწვევებს.

ცხრილი 7. წელსა და ტემპერატურას შორის ხაზოვანი დამოკიდებულება შერჩეულ სადგურებზე

სადგური	დახრა	P-მნიშვნელობა	R^2
თიანეთი	0.0628	0.0000019	0.651
ფასანაური	0.0501	0.0000000422	0.454
თბილისი	0.0628	0.0000000422	0.541

სურათი 8. ტემპერატურის დეკადური ცვლილება შერჩეული ლოკაციებისთვის



ზემოთ ახსნილი შედეგების საფუძველზე, ფასანაურის, თბილისის და თიანეთის გრძელვადიანი ტემპერატურის მონაცემები წარმოადგენს ძლიერ მტკიცებულებას რეგიონში მნიშვნელოვანი დათბობის ტენდენციების შესახებ. აღნიშნული ტემპერატურის მონაცემები შემდგომ გამოყენებული იქნება აუზში ევაპოტრანსპირაციის განსასაზღვრად.

შერჩეული აუზის კლიმატის ცვლილების ნიმუშები

კლიმატის ცვლილების სცენარში (CC[5]) საცნობარო პერიოდთან (1995-2014 წლებთან) შედარებით, შერჩეული მომავალი პერიოდისთვის, 2021-2099 წლებისთვის, მრავალწლიური ნალექი მერყეობს და ცვლილება დამოკიდებულია ემისიების სცენარზე. ამასთან, ზოგიერთ თვეში ნალექი იზრდება, განსაკუთრებით ზამთრის თვეებში.

ცხრილი 8. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში ნალექის პროგნოზირებული ცვლილება, მმ, 2021-2059 წლებისთვის

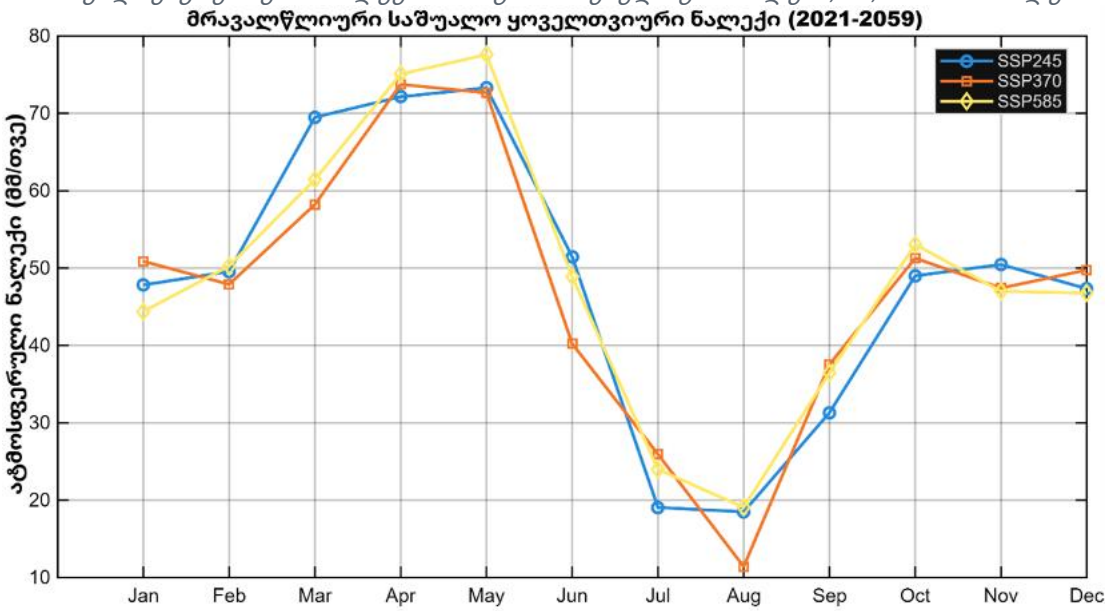
სცენარი	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წელი
SSP5-8.5	3.8	5.8	12.8	4.9	2.4	-7.3	-14.1	-14.9	-9.0	4.2	3.2	0.7	-7.5
SSP3-7.0	4.4	4.4	6.4	2.6	-3.6	-4.9	-19.5	-17.8	-7.4	-1.3	4.9	1.6	-30.3
SSP2-4.5	4.7	3.3	10.3	4.6	4.6	-3.7	-12.2	-16.0	-7.6	4.9	4.9	1.3	-1.1

ცხრილი 9. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში ნალექის პროგნოზირებული განაწილება, მმ, 2021-2059 წლებისთვის

სცენარი	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წელი
SSP5-8.5	44.4	50.3	61.5	75.1	77.6	48.9	24.0	19.1	36.5	53.1	47.0	46.8	584.1
SSP3-7.0	50.9	47.9	58.2	73.7	72.7	40.2	25.9	11.4	37.6	51.3	47.4	49.8	567.0
SSP2-4.5	47.8	49.6	69.5	72.1	73.3	51.5	19.1	18.5	31.3	49.0	50.5	47.3	579.5

[5] CMIP6

სურათი 9. წყალშემკრებ აუზში ნალექის პროგნოზირებული განაწილება, მმ, 2021-2059 წლებისთვის



CMIP6-ის კლიმატის ცვლილების პროგნოზების მიხედვით, საცნობარო პერიოდისთვის მრავალწლიური საშუალო ნალექი შეფასებულია დაახლოებით 567-584 მმ/წელში. ეს მნიშვნელობა მნიშვნელოვნად დაბალია როგორც მიმდინარე სატელიტური დაკვირვებებით მიღებულ შედეგზე, ისე ივრის აუზისთვის მიწისპირა სადგურებისა და დაკალიბრებული სატელიტური მონაცემების საფუძველზე მიღებულ მნიშვნელობაზე, რომელიც დაახლოებით 770 მმ/წელს შეადგენს.

შესაბამისად, ვვარაუდობთ, რომ ეს განსხვავება, სავარაუდოდ, გამოწვეულია კლიმატური პროგნოზების ბადის სივრცითი რეზოლუციით (დაახლოებით 0,5°) და კლიმატის ცვლილების ტრენდით, რის გამოც აუზში ნალექის განაწილება შესაძლოა არაზუსტად იყოს წარმოდგენილი. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია რთული ტოპოგრაფიის მქონე წყალშემკრებ აუზებში, როგორიცაა ივრის აუზი.

ზოგადად, ნალექის განაწილება მეტად გაურკვეველია, განსაკუთრებით ტემპერატურასთან შედარებით, რადგან იგი დამოკიდებულია რამდენიმე კომპლექსურ ცვლადზე, მათ შორის: ტოპოგრაფიაზე, ღრუბლების სიმაღლეზე, ტემპერატურასა და ტენიანობაზე. ამიტომ მომავალი ნალექის პროგნოზებისთვის გამოყენებული იქნება როგორც დაკალიბრებული სატელიტური მონაცემთა ბაზა — geoCHIRPS, ასევე CMIP6-ის მონაცემები, რაც წლიური ნალექის აკუმულაციის უფრო რეალისტურ შეფასებას უზრუნველყოფს.

ცხრილი 10. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში ნალექის პროგნოზირებული ანომალია, %, 2021–2059 წლებისთვის

სცენარი	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წელი
SSP5-8.5	11.9	13.3	17.3	6.8	4.0	-5.9	-17.1	-18.9	-13.4	2.2	9.4	8.4	18.1
SSP3-7.0	12.5	12.5	10.7	6.1	-2.4	-5.9	-17.7	-20.2	-11.4	-4.0	6.7	6.0	-7.2
SSP2-4.5	11.9	8.8	13.0	4.6	4.0	-1.9	-11.4	-18.5	-13.0	2.3	6.9	8.0	14.7

როგორც ზემოთ აღინიშნა, უწყვეტი და უხარვეზო ისტორიული მონაცემები მხოლოდ სამმა ტემპერატურულმა სადგურმა უზრუნველყო. თუმცა, ტემპერატურა, როგორც წესი, უფრო მარტივად პროგნოზირებადია წყალშემკრებ აუზზე ან უფრო ფართო არეალზე, რადგან იგი ძირითადად დამოკიდებულია სიმაღლესა და მზის რადიაციაზე, ნაკლებად მგრძნობიარეა სხვა გეოგრაფიული ფაქტორების მიმართ და ნალექთან შედარებით ნაკლებად ექვემდებარება გაზომვის გაურკვევლობას. შესაბამისად, ტემპერატურა კლიმატური პროგნოზებისთვის შედარებით საიმედო პარამეტრად მიიჩნევა.

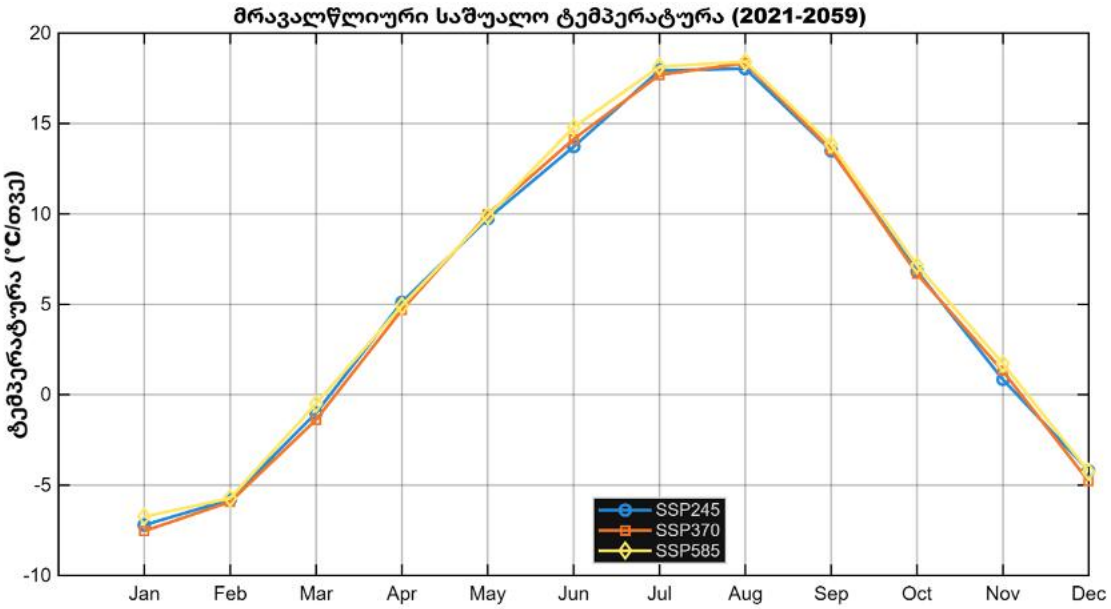
ცხრილი 11. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში საშუალო წლიური ტემპერატურის პროგნოზირებული განაწილება, °C, 2021-2059 წლებისთვის

სცენარი	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წელი
SSP5-8.5	-6.7	-5.7	-0.5	4.9	9.9	14.8	18.1	18.4	13.8	7.2	1.7	-4.3	6.0
SSP3-7.0	-7.5	-5.9	-1.4	4.7	10.0	14.1	17.7	18.3	13.5	6.7	1.3	-4.8	5.6
SSP2-4.5	-7.2	-5.8	-1.0	5.1	9.7	13.7	17.9	18.0	13.5	6.8	0.8	-4.2	5.6

ცხრილი 12. ივრის წყალშემკრებ აუზში ტემპერატურის პროგნოზირებული ანომალია, °C, 2021–2059 წლებისთვის

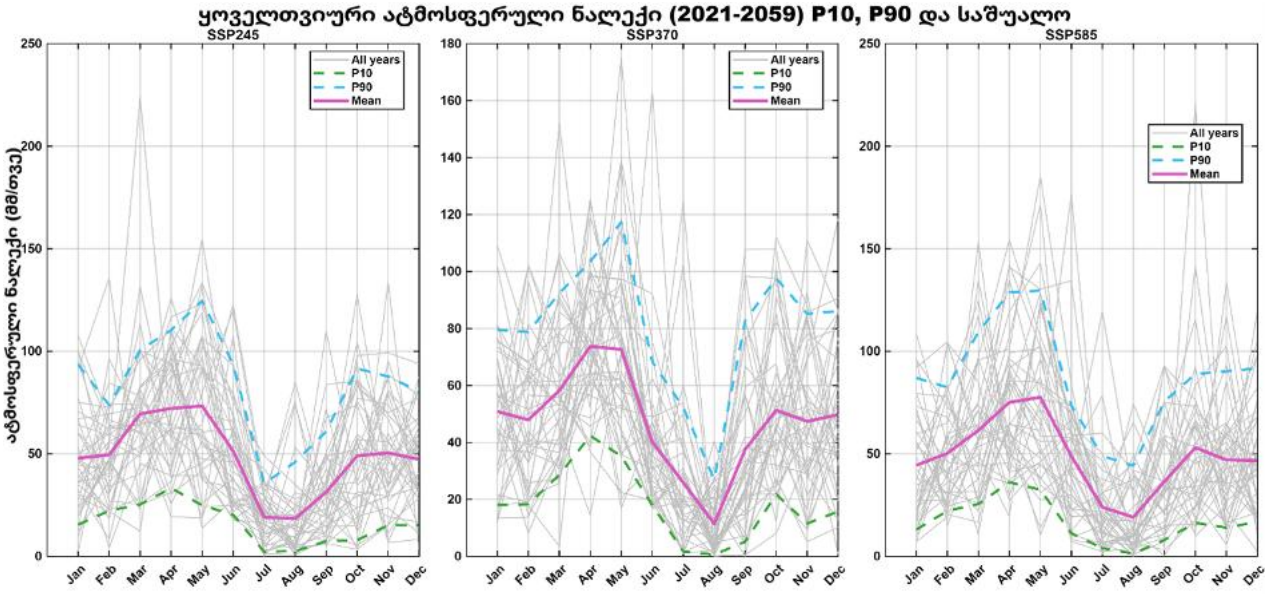
სცენარი	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წელი
SSP5-8.5	2.1	2.0	2.0	1.8	2.1	2.6	3.1	3.5	3.2	2.5	2.0	2.0	2.4
SSP3-7.0	2.0	2.0	1.4	1.5	1.9	2.1	2.6	3.1	2.4	2.0	1.5	1.5	2.0
SSP2-4.5	1.3	1.3	1.5	1.3	1.6	2.0	2.5	2.8	2.5	1.8	1.3	1.5	1.8

სურათი 10. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში საშუალო წლიური ტემპერატურის პროგნოზირებული განაწილება, °C, 2021-2059 წლებისთვის

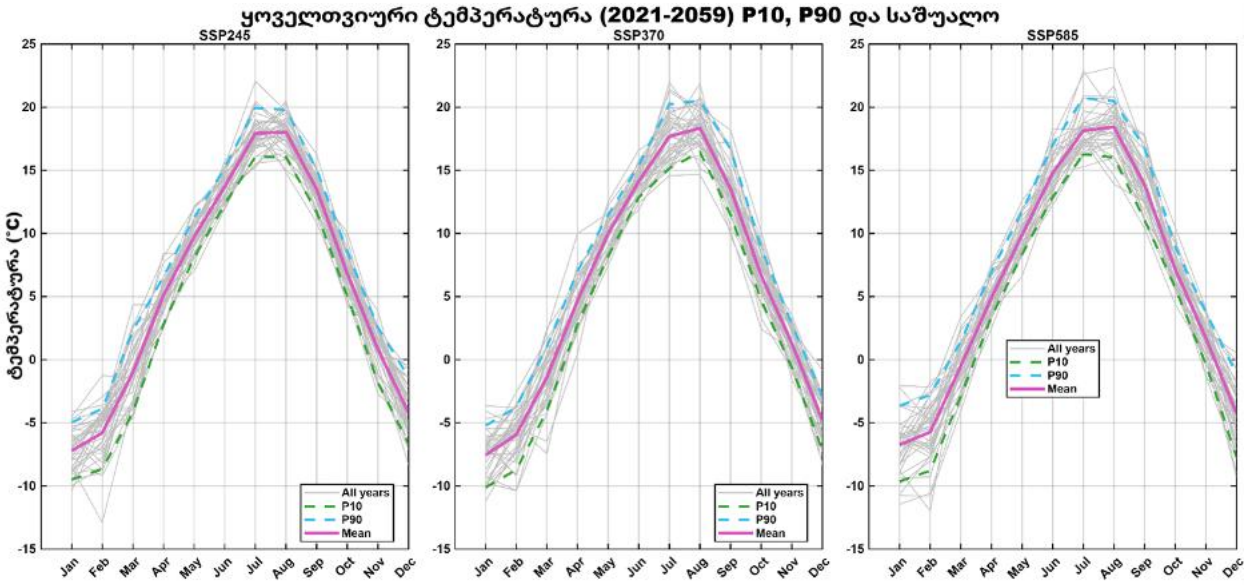


ზემოთ წარმოდგენილი ტემპერატურის მონაცემები ასახავს მოსალოდნელ ზრდას მაღალი ემისიების სცენარებში და თანხვედრაშია მიწისპირა სადგურების მონაცემებთან, რომლებიც უკვე მიუთითებს ტემპერატურის თანდათან ზრდაზე. ყველა SSP სცენარი თანმიმდევრულად აჩვენებს უფრო მაღალ ტემპერატურებს ყველა თვეში, რაც ხაზს უსვამს დათბობის მნიშვნელობას სათბურის გაზების მაღალი ემისიების პირობებში.

სურათი 11. წყალშემკრებ აუზში თვიური ნალექის განაწილება და ცვალებადობა, 2021-2059

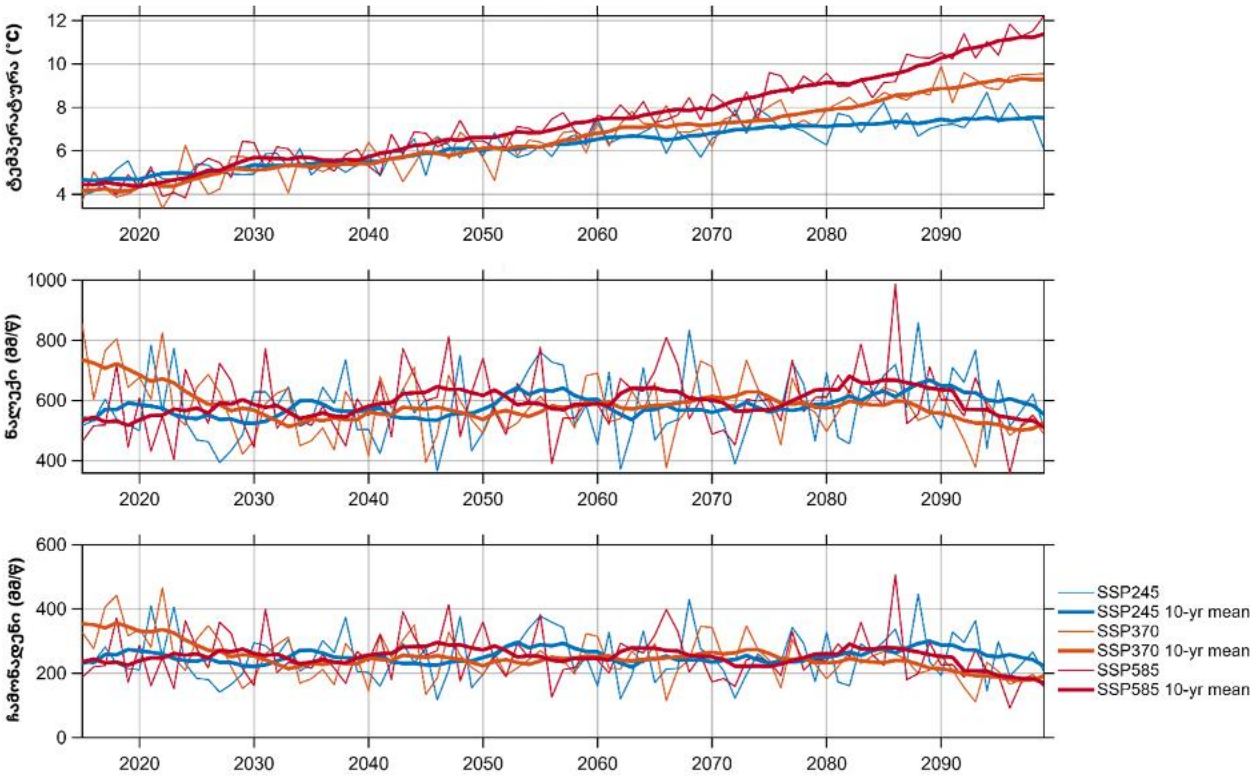


სურათი 12. წყალშემკრებ აუზში თვიური ტემპერატურის განაწილება და ცვალებადობა, 2021-2059



დამატებით, უფრო დეტალური ანალიზისთვის, შერჩეული ლოკაციისთვის მონაცემები ამოღებულია CMIP6 მონაცემთა ნაკრებიდან 2015-2100 წლების პერიოდისთვის. აღნიშნული მონაცემები შემდგომ გამოყენებული იქნება იორი-სიონის წყალშემკრები სისტემისთვის წყლის რესურსის გრძელვადიანი ცვლილებების დასადგენად.

სურათი 13. წყალშემკრებ აუზში საშუალო წლიური ტემპერატურის, ნალექის და ჩამონადენის განაწილება, 2015-2099



მოდელირებული ჰიდროლოგიური რეჟიმი

მდინარის ბაზისური მახასიათებლები

ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ ბოლო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში მდინარე იორის ხარჯის რეჟიმი სრულყოფილად არც ერთ საჯაროდ ხელმისაწვდომ ჰიდროლოგიურ სადგურს არ დაუფარავს, განსაკუთრებით სსრკ-ის დაშლის შემდეგ. არსებული ჰიდროლოგიური საგუშაგოების მონაცემები ხშირად „ხმაურიანია“, რაც ამცირებს შეფასების სანდოობას. შესაბამისად, მდინარის ჰიდროლოგიური მახასიათებლების დამატებით განსასაზღვრად გამოყენებულია ნალექის მონაცემები — როგორც მიწისპირა სადგურების, ისე სატელიტური შეფასებების საფუძველზე, რათა აღვადგინოთ ბოლო 3-4 ათწლეულის ჩამონადენი.

ამ მიზნით გაანალიზდა ზემოთ აღწერილი მეტეოროლოგიური მონაცემები და გამოყენებულ იქნა პოტენციური ევაპოტრანსპირაციის (PET), ფაქტობრივი ევაპოტრანსპირაციის (ETp) და ჩამონადენის (R) გამოთვლის განტოლებები. დამატებით,

ტყის საფრის გავლენის შესაფასებლად ჩამონადენის ფორმირებაზე გამოყენებულია ფოთლის ფართობის ინდექსი (Leaf Area Index, LAI), რომელიც ინტეგრირდა ფორმულაში მდინარის ხარჯის შესაძლო ცვლილებების გამოსავლენად.

$$PET = 325 + 21T + 09T^2$$

სადაც **T** არის ტემპერატურა ცელსიუსში.

$$ETp = \frac{P}{(1 + (\frac{P}{PET})^2)^{0.5}}$$

სადაც **P** არის ნალექი მმ-ში.

$$R = P - ETp - \Delta S$$

სადაც **R** არის ჩამონადენი, ხოლო **ΔS** წარმოადგენს მარაგის/შენახვის ცვლილებას.

ქვემოთ წარმოდგენილია გამოთვლილი წყლის რესურსის ხელმისაწვდომობა მ³/წმ-ში.

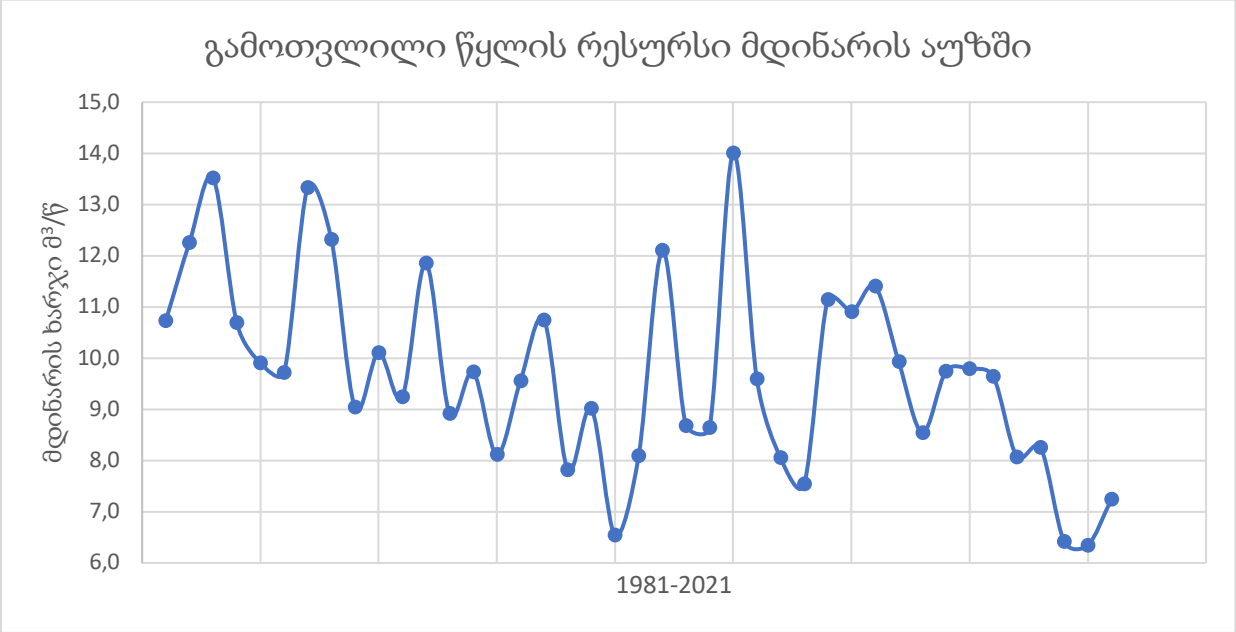
ცხრილი 13. წყლის რესურსი ქვეაუზში, მ³/წმ, ნალექისა და ევაპოტრანსპირაციის განსაზღვრისთვის გამოყენებული განტოლების საფუძველზე[6]

წელი	Q მ3/წ	წელი	Q მ3/წ
1981	10.7	2002	12.1
1982	12.3	2003	8.7
1983	13.5	2004	8.6
1984	10.7	2005	14.0
1985	9.9	2006	9.6
1986	9.7	2007	8.1
1987	13.3	2008	7.5
1988	12.3	2009	11.1
1989	9.0	2010	10.9
1990	10.1	2011	11.4
1991	9.2	2012	9.9
1992	11.9	2013	8.5
1993	8.9	2014	9.7
1994	9.7	2015	9.8

[6] geoCHIRPS

წელი	Q მ3/წ	წელი	Q მ3/წ
1995	8.1	2016	9.6
1996	9.6	2017	8.1
1997	10.7	2018	8.3
1998	7.8	2019	6.4
1999	9.0	2020	6.3
2000	6.5	2021	7.2
2001	8.1	საშ.	9.7

მოცემული ინფორმაციისა და ნალექი/ტემპერატურის მონაცემების ანალიზისა და მოდელირების საფუძველზე (როგორც მიწისპირა სადგურებიდან, ისე სატელიტური შეფასებებიდან) შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მდინარე იორის აუზის მრავალწლიური საშუალო ხარჯი შეადგენს დაახლოებით **9,7 მ³/წმ-ს**. თუმცა აღსანიშნავია, რომ ბოლო ათწლეულში წყლის რესურსის სტაბილური კლება აშკარად შეინიშნება.



სურათი 13*. მდინარის ჯამური წყლის რესურსი, მ³/წმ*

შედარების მიზნით ასევე გაანალიზდა მდინარე იორის აუზის ისტორიული მონაცემები. აღნიშნული მონაცემები აჩვენებს, რომ ლელოვანის ჰიდროლოგიური სადგურის კვეთში გაზომილი მდინარის ხარჯი მერყეობს დაახლოებით **6 მ³/წმ-დან 18**

მ³/წმ-მდე, ხოლო მრავალწლიური საშუალო წყლის ხარჯი შეადგენს დაახლოებით **11 მ³/წმ-ს** 1964-1986 წლების პერიოდისთვის. ეს მნიშვნელობა ძალიან ახლოსაა მოდელირებულ შედეგთან, რის საფუძველზეც შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ შერჩეული ლოკაციისთვის მოდელირების პარამეტრები მისაღები სიზუსტის ფარგლებშია.

ცხრილი 14. წყლის რესურსის განაწილება მდინარე იორის აუზში ლელოვანის ჰიდროლოგიური სადგურის მიხედვით

წელი	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
1964	3.76	3.93	8.21	13.19	19.78	24.70	14.38	10.73	15.14	10.51	8.32	8.47	11.76
1965	5.71	4.18	11.21	18.80	17.08	21.89	17.72	8.09	6.44	5.42	3.38	3.03	10.25
1966	3.56	3.08	3.32	11.24	20.07	11.15	6.24	4.05	4.53	3.43	2.98	2.31	6.33
1967	1.94	1.85	3.50	14.05	13.11	12.28	10.37	8.29	17.83	10.11	12.54	10.97	9.74
1968	5.58	6.36	20.49	26.99	24.81	24.10	14.63	13.69	9.07	7.81	7.75	5.35	13.89
1969	4.51	4.82	9.62	20.25	25.16	10.71	8.54	7.06	5.73	7.03	5.45	5.56	9.54
1970	3.83	5.96	9.19	13.88	12.63	13.83	7.46	12.45	7.39	9.26	4.99	5.53	8.87
1971	4.64	4.24	8.76	15.81	25.99	23.01	10.68	9.25	9.20	7.09	6.78	7.25	11.06
1972	6.16	6.12	7.45	15.70	18.51	18.23	10.29	7.09	10.13	10.55	8.33	6.19	10.39
1973	5.20	5.73	8.48	23.79	19.22	26.67	31.22	11.19	7.92	7.13	10.18	7.29	13.67
1974	5.60	5.68	14.73	19.64	38.69	19.41	15.99	10.81	15.16	5.25	4.28	3.92	13.26
1975	3.60	3.98	10.51	30.18	24.94	13.70	6.76	4.82	4.86	10.10	7.29	5.67	10.54
1976	5.34	5.22	9.42	31.05	65.40	28.71	16.67	12.88	11.06	13.35	11.86	10.99	18.49
1977	7.83	9.40	13.97	27.17	21.07	30.15	20.28	8.57	7.79	10.96	5.46	4.95	13.97
1978	4.10	5.65	19.65	35.08	45.08	27.45	15.74	14.49	7.92	6.98	6.35	5.66	16.18
1979	6.17	6.72	7.81	15.34	14.40	20.03	14.30	9.39	6.33	5.71	7.12	5.05	9.86

წელი	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
1980	4.49	4.56	8.35	29.92	25.67	15.02	4.64	4.18	3.28	4.35	3.65	3.34	9.29
1981	3.01	3.00	4.69	7.34	20.48	18.66	15.36	11.57	5.67	4.80	4.22	3.41	8.52
1982	3.09	2.97	3.80	11.71	21.27	19.84	18.19	15.98	9.15	6.06	5.53	3.98	10.13
1983	3.72	3.75	5.50	10.99	15.06	17.71	9.30	9.31	18.83	11.11	13.86	11.06	10.85
1984	7.96	5.39	12.09	35.08	35.09		19.67	19.13	10.51	5.66	4.77	3.32	14.42
1985	3.25	3.85	9.58	21.47	21.16	13.29	11.03	9.21	10.14	8.02	8.12	6.59	10.48
1986	3.22	3.32	7.81	17.28	19.85	16.83	9.63	6.26	4.78	4.54	6.42	4.13	8.67

მდინარე იორის ჰიდროლოგიური მახასიათებლების აღნიშნული შეფასება აერთიანებს ისტორიული ჰიდროლოგიური საგუშაგოების ჩანაწერებს და ნალექისა და ტემპერატურის საფუძველზე შესრულებულ წყლის ბალანსის გამოთვლებს (მოდელირებას), რათა ბოლო ათწლეულებში არსებული მნიშვნელოვანი მონაცემთა ხარვეზები შეივსოს. ხელმისაწვდომი ხარჯის მონაცემების ანალიზი მიუთითებს, რომ მდინარის მრავალწლიური საშუალო ხარჯი დაახლოებით **9,7 მ³/წმ-ს** შეადგენს, რაც თანხვედრაშია როგორც პირდაპირი დაკვირვებების, ისე მეტეოროლოგიური მონაცემებიდან აღდგენილი ჩამონადენის შეფასებებთან.

წყალდიდობის სიხშირის ანალიზი დამატებით ადასტურებს, რომ ექსტრემალური ჰიდროლოგიური მოვლენები კვლავ მნიშვნელოვანი ფაქტორია, თუმცა აღნიშნული ნაწილი მოცემული კვლევის ფარგლებს სცდება.

როგორც ზემოთ ითქვა, ასევე აქაც აღსანიშნავია, რომ გრძელვადიანი ჰიდროლოგიური დაკვირვებების შეზღუდულობისა და სსრკ-ის პერიოდის მონიტორინგის ქსელის დაშლის შემდეგ მონაცემთა სანდოობის შემცირების გათვალისწინებით, აუზის დაყოფისა და წყლის ბალანსის შეფასების გამოყენებული მეთოდოლოგია წარმოადგენს აუცილებელ ალტერნატივას მდინარის ხარჯის დინამიკის დასახასიათებლად კლიმატის ცვლილების პირობებში.

კაშხალი და წყალსაცავი

ივრის აუზში სიონის წყალსაცავი წარმოადგენს მთავარ მარეგულირებელ ნაგებობას, რომელიც აკონტროლებს სეზონურ წყლის ხელმისაწვდომობასა და ქვედა დინებაში ხარჯის განაწილებას. წყალსაცავი მდინარე იორზე განთავსებული ხანგრძლივ დროზე გათვლილი მრავალმიზნობრივი ნაგებობაა, რომელიც ექსპლუატაციაში შევიდა 1963 წელს და რომლის ნომინალური მოცულობა დაახლოებით **325 მლნ მ³-ს** შეადგენს, რაც საშუალო ეკვივალენტური ხარჯით დაახლოებით **10,3 მ³/წმ-ს** უტოლდება. მისი ძირითადი ფუნქციებია სარწყავი წყლით უზრუნველყოფა და ჰიდროენერგიის გენერაცია.

სიონის წყალსაცავის ოპერირება მჭიდროდ არის დაკავშირებული სარწყავი წყლის მოთხოვნასთან. საჯაროდ ხელმისაწვდომი მონაცემების მიხედვით, სარწყავი სეზონის განმავლობაში წყალსაცავიდან გაშვებები ძირითადად დამოკიდებულია მომსახურების არეალებში არსებულ წყლის მოთხოვნაზე, ხოლო სარწყავი სეზონის გარეთ ოპერირება განისაზღვრება წყალსაცავში დაგროვებული წყლის მოცულობით. იმავე წყაროში აღნიშნულია, რომ ბოლო წლებში წყალსაცავი ხშირად სრულ საპროექტო მოცულობამდე ვერ ივსება, რაც მიუთითებს, რომ სისტემის ფუნქციონირება ძალზე მგრძნობიარე ხდება ჰიდროლოგიური ცვალებადობისა და წყლის გაზრდილი, სეზონური ამპლიტუდის მიმართ.

სიონის სანდოობაზე მოქმედი ერთ-ერთი მთავარი ფაქტორია მოლამვა, ანუ წყალსაცავის ინერტული მასალით შევსება. იმავე ანგარიშის მიხედვით, 2016 წლისთვის ხელმისაწვდომი უკანასკნელი ბათიმეტრიული კვლევის საფუძველზე, სიონის წყალსაცავმა ინერტული მასალით შევსების გამო უკვე დაკარგა მოცულობის დაახლოებით **75%**. წყალსაცავის ზემოთ ინერტული მასალის დაგროვებამ მდინარის კალაპოტი **3-5 მ-ით** აწია, ხოლო 2015 წლიდან წლიურმა წყალდიდობებმა და წყალმოვარდნებმა გამოიწვია წყლის კალაპოტიდან გადმოსვლა, მდინარისპირა ტერიტორიების დაზიანება და გაზარდა საფრთხეები ინფრასტრუქტურისთვის, დასახლებებისა და გარემოსთვის. ეს ნიშნავს, რომ სიონის წყალსაცავში წყლის ხელმისაწვდომობა შეზღუდულია არა მხოლოდ შემოდინების ცვალებადობით, არამედ სასარგებლო მოცულობის პროგრესული შემცირებითა და მასთან დაკავშირებული არასტაბილურობით.

სიონის წყალსაცავით რეგულირებული ჩამონადენი პალდოს წყალგამანაწილებელი ნაგებობის მეშვეობით ნაწილდება ზემო და ქვემო სამგორის სარწყავ სისტე-

მებს შორის. პალდოს ქვემოთ გამავალი წყალი ასევე კვებავს ხაშმის სარწყავ სისტემას, რომლის გამტარუნარიანობა არ აღემატება **1 მ³/წმ-ს**[7] და რომელიც ემსახურება დაახლოებით **200 ჰა** სასოფლო-სამეურნეო მიწას სოფელ ხაშმში. უფრო ქვედა დინებაში ქვემო სამგორის სარწყავი სისტემა წყალს იღებს მარცხენა და მარჯვენა მთავარ არხებში, რომელთა გამტარუნარიანობა შესაბამისად **21,0 მ³/წმ** და **9,0 მ³/წმ**-ია. ეს სისტემა ემსახურება დაახლოებით **21.259 ჰა** სასოფლო-სამეურნეო მიწას საგარეჯოს, გურჯაანისა და სიღნაღის მუნიციპალიტეტებში. დამატებით, ზემო სამგორის მთავარ არხს აქვს **12 მ³/წმ** საპროექტო გამტარუნარიანობა და ამარაგებს ქვედა დინების ჰიდროენერგეტიკულ ობიექტებსა და თბილისის ზღვის სისტემას. აღნიშნული მონაცემები ადასტურებს, რომ სიონის წყალსაცავი არ ფუნქციონირებს, როგორც იზოლირებული წყალსაცავი, არამედ წარმოადგენს მაღალ დონეზე დაკავშირებული სარწყავი და ენერგეტიკული ქსელის ნაწილს.

საქართველოს მელიორაციის ხელმისაწვდომი ინფორმაცია დამატებით აჩვენებს სისტემაში მართვადი წყლის გადაადგილების მასშტაბს. 2021 წლის ოქტომბრისთვის სიონის წყალსაცავიდან სიონის ჰესისთვის მიწოდებული იყო დაახლოებით **129.94 მლნ მ³** წყალი, რაც საშუალო ეკვივალენტური ხარჯით დაახლოებით **4,95 მ³/წმ-ს** შეადგენს. იმავე პერიოდში ზემო სამგორის მთავარმა არხმა ქვედა დინების ჰიდროელექტროსადგურებსა და თბილისის ზღვას მიაწოდა **53,24 მლნ მ³** წყალი, რაც დაახლოებით **2,03 მ³/წმ-ს** შეესაბამება.

ხაშმის არხის მეშვეობით კონტრაქტირებულ მომხმარებლებს, მათ შორის თევზსაშენს, მიეწოდა დაახლოებით **6.10 მლნ მ³** წყალი. როდესაც ეს მოცულობა 153-დღიან სარწყავ სეზონზე გადაიყვანება, იგი საშუალოდ დაახლოებით **0,46 მ³/წმ-ს** შეადგენს. ქვემო სამგორის სისტემაში მომსახურების ცენტრმა მდინარიდან აიღო **122.6 მლნ მ³** წყალი, რაც სარწყავი სეზონისთვის საშუალოდ დაახლოებით **9,27 მ³/წმ-ს** შეესაბამება. აქედან მომხმარებლებს მიეწოდა **69.9 მლნ მ³**, ანუ დაახლოებით **5,29 მ³/წმ**, ხოლო **52.7 მლნ მ³**, ანუ დაახლოებით **3.99 მ³/წმ**, დაუბრუნდა მდინარე იორს სარწყავი სისტემის წყალსაშვის და არხის მეშვეობით. ეს მონაცემები მიუთითებს, რომ სისტემა მართავს დიდ რეგულირებულ მოცულობებს და ოპერაციული ეფექტიანობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს წყლის ფაქტობრივ გამოყენებაზე, განსაკუთრებით სარწყავი პერიოდის განმავლობაში.

ანგარიში ასევე ხაზს უსვამს, რომ მთავარი სარწყავი ინფრასტრუქტურის დიდი ნაწილი ცუდ ტექნიკურ მდგომარეობაშია და საჭიროებს მნიშვნელოვან რეაბილიტაციას. არსებულ პირობებში წყლის რეგულირება ხშირად შემოიფარგლება მიწოდების ჩართვა-გამორთვითა და არხებში დაახლოებით საჭირო დონის შენარჩუნებით,

[7] საქართველოს მელიორაცია

ხოლო წყლის საზომი აღჭურვილობის ნაკლებობა ზუსტ ოპერაციულ კონტროლს ხელს უშლის. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მოცემული კვლევისთვის, რადგან ნიშნავს, რომ სიონის სისტემაში გამოვლენილი დეფიციტი შეიძლება ასახავდეს არა მხოლოდ ჰიდროლოგიურ წყლის ნაკლებობას, არამედ ინფრასტრუქტურულ არაეფექტიანობას და მართვის შეზღუდულ სიზუსტესაც.

მიმდინარე შეფასების მიზნებისთვის წყალსაცავის ზუსტი ოპერირების წესები, განახლებული დონე-მოცულობის დამოკიდებულებები და უწყვეტი შემოდინება-გადინების მონიტორინგის მონაცემები ხელმისაწვდომი არ იყო. შესაბამისად, სიონის წყალსაცავის როლი შეფასებულია სკრინინგის დონეზე, ხელმისაწვდომი ოპერაციული მტკიცებულებების, დოკუმენტირებული სისტემური გამტარუნარიანობებისა და აღდგენილი აუზის წყლის ხელმისაწვდომობის საფუძველზე. ამ ინტერპრეტაციით, წყალსაცავი კვლავ წარმოადგენს სეზონური მიწოდების კრიტიკულ ბუფერს, თუმცა მისი ეფექტური მარეგულირებელი ფუნქცია უკვე მნიშვნელოვნად არის შეზღუდული ინერტული მასალის, სეზონური არასრული შევსებითა და ქვედა დინების სარწყავი ქსელის ტექნიკური შეზღუდვებით.

სასოფლო სამეურნეო სავარგულების წყლის მოთხოვნა

სარწყავი მოთხოვნა წყლის რესურსზე განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მდინარე იორის წყლის რესურსის შეფასებისას. შესაბამისად, სარწყავი წყლის მოთხოვნის დასადგენად გამოყენებულია ROPWAT მიდგომა Smith-ის მიხედვით [1992], რომელიც დეტალურადაა განმარტებული Döll and Siebert-ის ნაშრომში, 2002. ამ მიდგომით, სავეგეტაციო პერიოდის განმავლობაში — მაისიდან სექტემბრამდე — ერთეულ სარწყავ ფართობზე წმინდა სარწყავი მოთხოვნა გამოითვლება, როგორც სასოფლო-სამეურნეო კულტურისთვის სპეციფიკური პოტენციური ევაპოტრანსპირაციისა და ეფექტური ნალექის სხვაობა.

$$I_{net} = E_{pot_c} - P_{eff} = k_c E_{pot} - P_{eff} \; if \; E_{pot_c} > P_{eff}$$

$$I_{net} = 0 \qquad if \quad E_{pot_c} < P_{eff}$$

სადაც:

I_{net} = **სარწყავი მოთხოვნა ერთეულ ფართობზე** გამოისახება მმ/დღე;

E_{pot_c} = **კულტურისთვის სპეციფიკური პოტენციური ევაპოტრანსპირაცია** გამოისახება მმ/დღე;

P_{eff} = **ეფექტური ნალექი** გამოისახება მმ/დღე;

E_{pot} = **პოტენციური ევაპოტრანსპირაცია** გამოისახება მმ/დღე;

k_c = **სასოფლო-სამეურნეო კულტურის კოეფიციენტი** არის უგანზომილებო პარამეტრი, რომელიც მოცემულ შემთხვევაში მიღებულია **1,2**-ის ტოლად.

თუმცა P_{eff} ეფექტური ნალექის განსაზღვრა საკმაოდ რთულია, როგორც აღნიშნულია Smith-ის ნაშრომში, 1992. შესაბამისად, მოცემულ კვლევაშიც გამოყენებულია იგივე მიდგომა, რომელიც გამოყენებულია Döll and Siebert-ის მიერ, 2002.

სადაც

$$P_{eff} = \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.7} \; if \; P < 8.3 \; mm/d$$

ან

$$P_{eff} = 4.17 + 0.1P \; if \; P \geq 8.3 \; mm/d$$

ისტორიული მონაცემების საფუძველზე გაანგარიშებული სარწყავი წყლის მოთხოვნა წარმოდგენილია ქვემოთ მოცემულ ცხრილში.

Table 15. Net irrigation requirements for area

წელი	Q მ3/წ	Q მლნ3	წელი	Q მ3/წ	Q მლნ3	წელი	Q მ3/წ	Q მლნ3
1981	4.5	59.4	1995	6.7	88.0	2009	2.3	30.5
1982	3.2	42.8	1996	6.9	91.0	2010	6.3	83.8
1983	3.4	44.8	1997	5.9	77.6	2011	4.8	63.4
1984	7.2	94.9	1998	7.2	95.6	2012	4.0	52.3
1985	5.7	75.5	1999	6.9	91.6	2013	4.8	63.5
1986	7.0	93.0	2000	7.3	96.2	2014	7.9	103.8
1987	6.8	89.5	2001	6.6	87.5	2015	6.7	88.6
1988	7.1	94.1	2002	4.9	65.1	2016	6.3	83.3
1989	7.7	101.1	2003	5.7	74.8	2017	7.2	95.3
1990	7.6	100.7	2004	6.3	82.7	2018	6.9	91.4
1991	7.5	99.3	2005	3.9	51.3	2019	6.2	82.3
1992	4.7	61.7	2006	7.1	93.6	2020	7.8	103.7
1993	3.5	46.0	2007	7.0	92.0	2021	7.7	101.9
1994	7.7	101.5	2008	5.9	78.5	საშ.	6.11	80.82

დამატებით, საქართველოს სტატისტიკის ეროვნული სამსახურის მონაცემებით, სისტემური დანაკარგები დაახლოებით **67%**-ს შეადგენს, რაც წლიურად დაახლოებით **57.8 მლნ მ³** დამატებით წყლის დანაკარგს შეესაბამება. მთლიანობაში ეს დაახლოებით **10,2 მ³/წმ-ს**, ანუ **135.72 მლნ მ³-ს** უდრის.

ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ სარწყავი წყლის მოთხოვნა დამოკიდებულია როგორც ტემპერატურულ ცვალებადობაზე, ისე ინფრასტრუქტურის ტექნიკურ მდგომარეობაზე. ხელმისაწვდომი მონაცემებით შეუძლებელია მიმდინარე სარწყავი წყლის მოთხოვნის ზუსტად განსაზღვრა. ამასთან, მნიშვნელოვანია, რომ კვლევაში გამოყენებული განტოლებებით მოდელირებული სარწყავი მოთხოვნები ახლოსაა საქართველოს მელიორაციის მონაცემთა ბაზებში დაფიქსირებულ მნიშვნელობებთან.

ფოთლის ფართობის ინდექსი (LAI)

მცენარეული საფარი, განსაკუთრებით კი ტყის სტრუქტურა, ფუნდამენტურ როლს ასრულებს წყალშემკრები აუზის ჰიდროლოგიის რეგულირებაში, რადგან გავლენას ახდენს ნალექის შეკავებაზე, ევაპოტრანსპირაციაზე, ინფილტრაციის უნარზე და ნიადაგის ტენიანობის დინამიკაზე. აუზში ტყის საფრის ჰიდროლოგიური გავლენის რაოდენობრივად შესაფასებლად ფოთლის ფართობის ინდექსის (Leaf Area Index, LAI) გამოყენება ფიზიკურად დასაბუთებულ და სივრცითად გამოხატულ მიდგომას წარმოადგენს.

ფოთლის ფართობის ინდექსი განისაზღვრება, როგორც მწვანე ფოთლების ერთმხრივი ფართობი მიწის ზედაპირის ერთეულ ფართობზე ($მ^2/მ^2$). იგი წარმოადგენს მცენარეულობის სიმჭიდროვისა და ვარჯის განვითარების მთავარ ბიოფიზიკურ ინდიკატორს. უფრო მაღალი LAI მნიშვნელობები, როგორც წესი, დაკავშირებულია ნალექის ვარჯის მიერ უფრო მაღალ შეკავებასთან, ტრანსპირაციის გაძლიერებასთან და ნიადაგის სტრუქტურის გაუმჯობესებასთან, რაც განპირობებულია ფესვთა სისტემის გამამაგრებელი მოქმედებითა და ორგანული ნივთიერებების დაგროვებით. აღნიშნული პროცესები ერთობლივად ამცირებს ეფექტურ ნალექს, რომელიც აღწევს ნიადაგის ზედაპირს და ცვლის ჩამონადენის ფორმირების მექანიზმებს.

ჰიდროლოგიური თვალსაზრისით, მაღალი LAI-ის მქონე ტყიანი ტერიტორიები, როგორც წესი:

- ზრდის ვარჯის მიერ ნალექის შეკავებით გამოწვეულ დანაკარგებს;
- აძლიერებს ევაპოტრანსპირაციას (ET);
- ხელს უწყობს ინფილტრაციას ნიადაგის ფორიანობის გაუმჯობესების გზით;
- ამცირებს ზედაპირული ჩამონადენის პიკურ მნიშვნელობებს ნალექიანი მოვლენების დროს;
- აყოვნებს ჰიდროგრაფის რეაქციას და ამცირებს ხარჯის პიკებს.

ჩამონადენის შეფასებაში ტყის გავლენის ჩასართავად LAI შეიძლება ინტეგრირდეს წყლის ბალანსის ფორმულირებებში ევაპოტრანსპირაციის ან ჩამონადენის

კოეფიციენტების კორექტირების გზით. მაგალითად, პოტენციური ევაპოტრანსპირაცია (PET) შეიძლება დაკორექტირდეს მცენარეულობის ფაქტორის გამოყენებით, რომელიც ასახავს ვარჯზე დამოკიდებულ ტრანსპირაციის ეფექტიანობასა და ნალექის შეკავების უნარს.

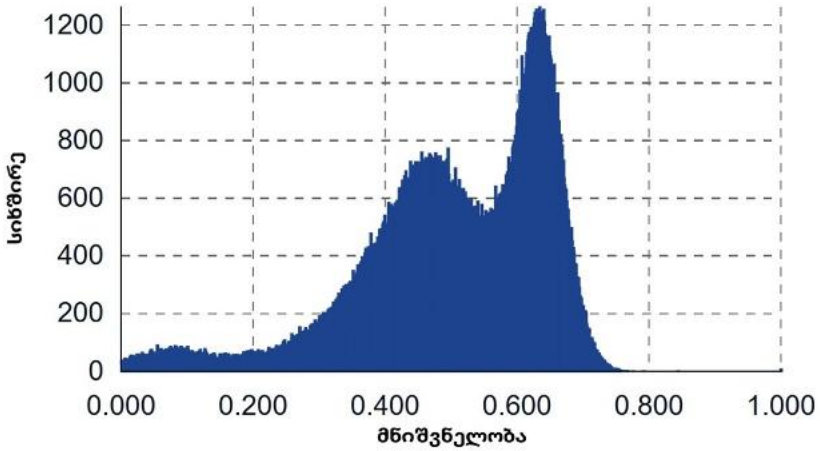
$$ET_{actual} = PET \times f(LAI)$$

სადაც $f(LAI)$ წარმოადგენს ფოთლის ფართობის ინდექსს (LAI), რომელიც ასახავს ტრანსპირაციის ეფექტურობას და შეწოვის რაოდენობას.

ალტერნატიულად, ემპირიული ჩამონადენის მოდელებში ჩამონადენის კოეფიციენტი (C) შეიძლება განისაზღვროს LAI-ის ფუნქციად;

$$Q = P \times C(LAI)$$

სადაც LAI-ის ზრდა ამცირებს ეფექტურ ჩამონადენის კოეფიციენტს ნიადაგის არასრული გაჯერების პირობებში. ამასთან, აუცილებელია სიფრთხილე, რათა მოდელის სტრუქტურა შესაბამისობაში იყოს დომინანტურ ჩამონადენის მექანიზმებთან. იქნება ეს ზედაპირული ჩამონადენი, რომელიც წარმოიქმნება ინფილტრაციის უნარის გადაჭარბებისას, თუ გაჯერებით გამოწვეული ჩამონადენი. მაღალი LAI-ის მქონე ტყემ შესაძლოა გაზარდოს ინფილტრაცია, თუმცა ხანგრძლივი მშრალი პერიოდების დროს შეამციროს ნიადაგში წყლის მარაგის ხელმისაწვდომობა.



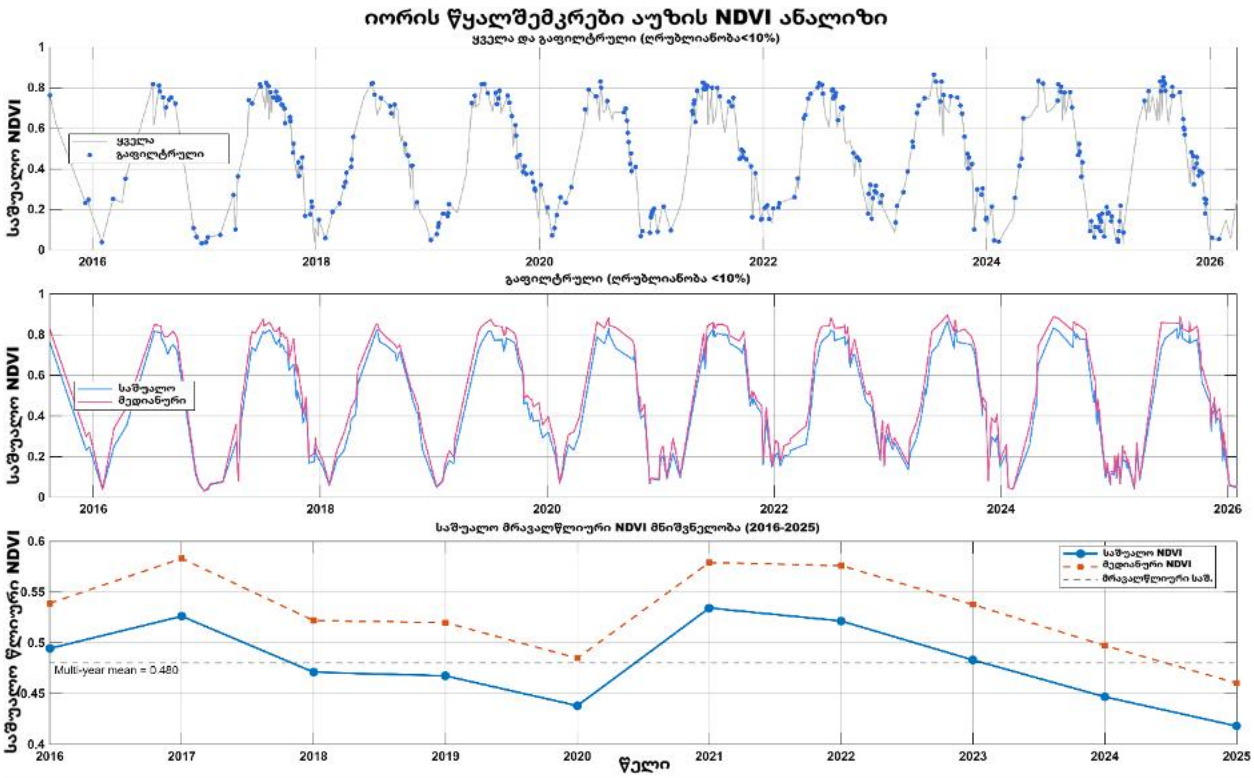
სურათი 14. NDVI-ის მნიშვნელობა ივრის აუზში შერჩეული თვისთვის და მისი სივრცითი განაწილება

დისტანციური ზონდირების პროდუქტები, მაგალითად, NDVI-ზე დაფუძნებული მიახლოებები, იძლევა აუზის მასშტაბით მცენარეულობის სიმჭიდროვის სივრცითი განაწილების შეფასების შესაძლებლობას. ეს გვეხმარება, ქვეაუზების დონეზე განვასხვავოთ ტყიანი მაღალმთიანი ტერიტორიები, სასოფლო-სამეურნეო მიწები

და დეგრადირებული არეალები. მაღალმთიან ზონაში, სადაც ტყის საფარი კონცენტრირებულია, LAI-ის ინტეგრირება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საბაზისო ჩამონადენის რეგულირებისა და პიკური ჩამონადენის შემცირების სიმულაციისთვის.

Sentinel-2-ის NDVI დროითი რიგის ანალიზი ივრის აუზისთვის მიუთითებს მკაფიო და შიდა თვალსაზრისით თანმიმდევრულ სეზონური მცენარეულობის ციკლზე. ივრის აუზში NDVI/LAI-ის ნიმუშების უკეთ გასაგებად Sentinel-ის მონაცემთა ნაკრებიდან გამოირიცხა ისეთი სურათები, რომლებშიც ღრუბლიანობა 10%-ზე მეტს შეადგენდა და განისაზღვრა აუზის საშუალო სეზონური NDVI განაწილება.

შედეგად, აუზის საშუალო NDVI დაბალია ზამთარსა და ადრეულ გაზაფხულზე, სწრაფად იზრდება აპრილში, მაქსიმალურ მნიშვნელობებს აღწევს ივნის-აგვისტოში და შემდეგ თანდათან მცირდება შემოდგომის განმავლობაში. მრავალწლიური თვიური საშუალო NDVI დაახლოებით **0,15-0,16**-ს შეადგენს იანვარ-მარტში, აპრილში იზრდება დაახლოებით **0,35**-მდე, მაისში — დაახლოებით **0,67**-მდე, ხოლო ივნის-აგვისტოში პიკს აღწევს დაახლოებით **0,77-0,80**-ის ფარგლებში. სექტემბერში NDVI კვლავ შედარებით მაღალია — დაახლოებით **0,73**, ხოლო შემდეგ მცირდება ოქტომბერში დაახლოებით **0,55**-მდე, ნოემბერში — **0,37**-მდე და დეკემბერში — **0,21**-მდე. სრული წლებისთვის, 2016-2025 პერიოდში, აუზის წლიური საშუალო NDVI მერყეობს დაახლოებით **0,42-დან 0,53-მდე**, ხოლო მრავალწლიური საშუალო დაახლოებით **0,48**-ს უახლოვდება.

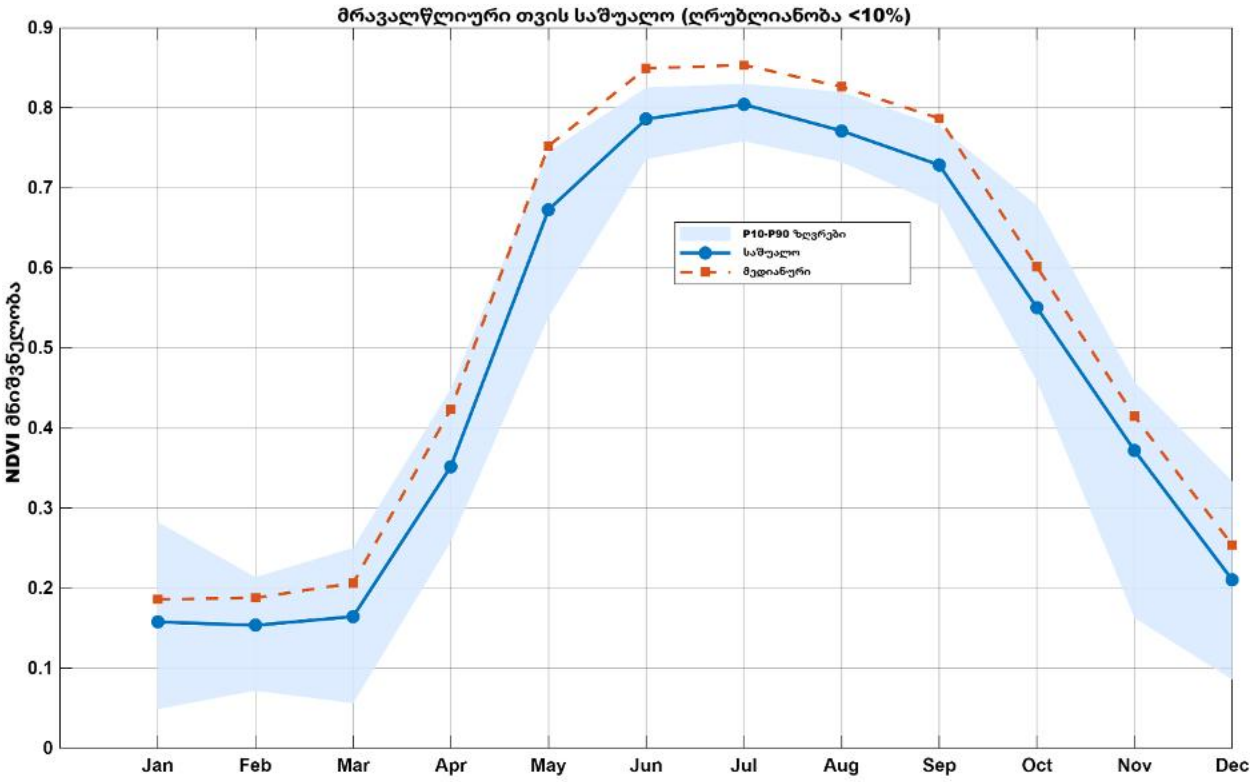


სურათი 15. აუზის NDVI მნიშვნელობების განაწილება

თუმცა წლიურ მასშტაბზე რელევანტური მცენარეულობის მაჩვენებელი არ არის სეზონური მაქსიმუმი, არამედ წლიური საშუალო ვარჯის მდგომარეობა, რომელიც აკონტროლებს კუმულაციურ ევაპოტრანსპირაციას, ნალექის შეკავებასა და ნიადაგის წყლის გამოყენებას სრული ჰიდროლოგიური ციკლის განმავლობაში. ივრის აუზში ღრუბლიანობის ფილტრაციის შემდეგ მიღებული წლიური საშუალო NDVI დაახლოებით **0,48**-ს შეადგენს მაშინ, როდესაც პიკური სეზონის მნიშვნელობები ხშირად **0,75**-ს აჭარბებს. შესაბამისად, ზაფხულის სურათებიდან მიღებული NDVI მნიშვნელობები ასახავს თითქმის მაქსიმალურ ვარჯის განვითარებას და შესაძლოა მნიშვნელოვნად გადააჭარბოს მცენარეულობის გავლენას, თუ ისინი პირდაპირ იქნება გამოყენებული წლიური ჩამონადენის გამოთვლებში.

ჰიდროლოგიური თვალსაზრისით, ეს სეზონური მცენარეულობის ციკლი მიუთითებს, რომ მცენარეულობის გავლენა წლის განმავლობაში იცვლება. გვიან გაზაფხულსა და ზაფხულში, როდესაც NDVI/LAI და ვარჯის სიმჭიდროვე ყველაზე მაღალია, ევაპოტრანსპირაციის მოთხოვნა, ნალექის შეკავება და ნიადაგის ტენიანობის ათვისებაც იზრდება. ასეთ პირობებში მცენარეულობამ შეიძლება შეამციროს ეფექტური ჩამონადენის ფორმირება და ხელი შეუწყოს ზაფხულის საბაზისო ხარჯის შემცირებას, განსაკუთრებით მშრალ წლებში ან თვეებში და აუზის უფრო არი-

დულ ნაწილებში. ამის საპირისპიროდ, ზამთარსა და ადრეულ გაზაფხულზე მცენარეულობის დაბალი აქტივობა ამცირებს ტრანსპირაციის მოთხოვნას და ნალექისა და თოვლის დნობის უფრო დიდ ნაწილს აძლევს საშუალებას, მონაწილეობა მიიღოს ნიადაგის შევსებასა და ჩამონადენის ფორმირებაში. შესაბამისად, მცენარეულობის გავლენა მდინარის ხარჯზე დროში მუდმივი არ არის და უნდა განიმარტოს, როგორც მკვეთრად სეზონური პროცესი.

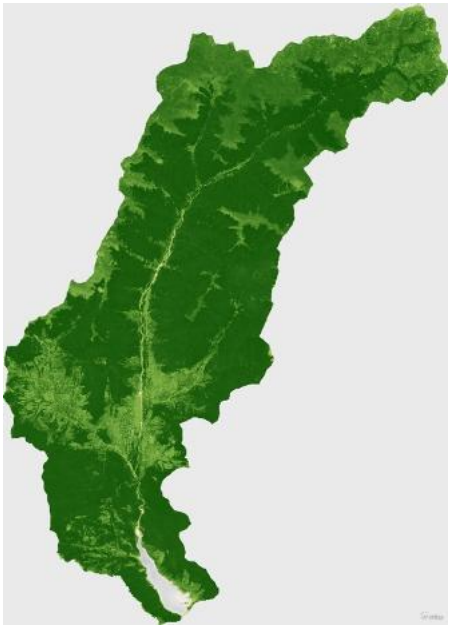


სურათი 16. აუზის დონეზე თვიური NDVI-ის განაწილება, 2016-2025

რეგულირებულ აუზებში, როგორიცაა იორი-სიონის სისტემა, მცენარეულობის ეფექტები ურთიერთქმედებს წყალსაცავის ოპერირებასთან, სარწყავ წყალაღებებთან და კლიმატურ ცვლილებასთან. აუზის მასშტაბის წყლის რესურსების გამოთვლებმა, რომლებიც სეზონურ მცენარეულობის დინამიკას არ ითვალისწინებს, შესაძლოა გადააჭარბოს წყლის ბალანსს ან არასწორად წარმოადგინოს ჩამონადენის ფორმირების დროითი განაწილება, განსაკუთრებით დათბობის პირობებში, როდესაც ატმოსფერული წყლის მოთხოვნა იზრდება. სწორედ ამიტომ, LAI-ის ან NDVI-ზე დაფუძნებული მცენარეულობის ინფორმაციის ჩართვა აუმჯობესებს ჰიდროლოგიურ შეფასებას, რადგან მიწის საფრის მდგომარეობას აკავშირებს ევაპოტრანსპირაციასთან და ჩამონადენის გადანაწილებასთან.

ამასთან, წლიური ჩამონადენის შეფასებისას გამოყენებული უნდა იყოს წლიური მცენარეულობის მაჩვენებელი, ხოლო პიკური სეზონის NDVI მნიშვნელობები უფრო შესაფერისია მაქსიმალური ვარჯის მდგომარეობის ან გვიანი ზაფხულის ლანდშაფტური მდგომარეობის აღსაწერად. მცენარეულობის გავლენის უფრო დეტალური შეფასება მოითხოვს უფრო მაღალი დროითი რეზოლუციის ჰიდროლოგიურ მოდელირებას, ყოველდღიური ნალექისა და ტემპერატურის მონაცემებთან, თვიურ მცენარეულობის მონაცემებთან და დაგროვებისა და ოპერაციული კონტროლების დეტალურ წარმოდგენასთან ერთად.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, შედეგები მიუთითებს, რომ მცენარეული საფარი მნიშვნელოვანი რეგულატორია იორი-სიონის აუზის ჰიდროლოგიური პროცესებისთვის, რადგან გავლენას ახდენს ნალექის შეკავებაზე, ევაპოტრანსპირაციაზე, ინფილტრაციაზე და ჩამონადენის ფორმირებაზე. ამ კონტექსტში LAI წარმოადგენს ვარჯის სტრუქტურისა და მისი ჰიდროლოგიური გავლენის ფიზიკურად დასაბუთებულ მაჩვენებელს, ხოლო NDVI-ზე დაფუძნებული დროითი რიგები ამ გავლენის აუზის მასშტაბით შეფასების საშუალებას იძლევა. თუმცა, არსებული სივრცითი რეზოლუციისა და მონაცემთა შეზღუდულობის გამო, NDVI/LAI დამოუკიდებლად ვერ განსაზღვრავს მდინარის ჰიდროლოგიურ ცვალებადობასა და სეზონურობას. შესაბამისად, წლიური ჩამონადენის შეფასება უნდა ეყრდნობოდეს წლიურ მცენარეულობის მაჩვენებელს, რომელიც უფრო შესაფერისია ევაპოტრანსპირაციისა და ჩამონადენის რეაქციის წლიური ცვალებადობის ინტერპრეტაციისთვის. (Martínez and Gilabert, 2009; Yan et al., 2022; Zhang et al., 2003).



სურათი 17. NDVI NDVI ინდექსი შერჩეულ აუზში (მუქი მწვანე მიუთითებს ხშირ ტყეზე)

ამ პირობებში მცენარეულობამ შეიძლება შეამციროს ეფექტური ჩამონადენის ფორმირება და ხელი შეუწყოს ზაფხულის საბაზისო ხარჯის შემცირებას, განსაკუთრებით მშრალ და წყლის დეფიციტისადმი მგრძნობიარე წლებში. შესაბამისად, NDVI/LAI-ის ჩართვა აუმჯობესებს აუზის მასშტაბის ჰიდროლოგიურ შეფასებას, თუმცა მისი გამოყენება უნდა იყოს დროითი მასშტაბის თვალსაზრისით თანმიმდევრული წყლის ბალანსის მოდელის მასშტაბთან. მცენარეულობის გავლენის უფრო განვითარებული რაოდენობრივი შეფასება მოითხოვს მაღალი რეზოლუციის ჰიდროლოგიურ მოდელირებას ყოველდღიური კლიმატური მონაცემებით, თვიური მცენარეულობის დინამიკით და დაგროვებისა და ოპერაციული კონტროლების გაუმჯობესებული წარმოდგენით. (Wang et al., 2005; Yan et al., 2022).

ტყის საფრის გავლენა ჩამონადენზე

მცენარეული საფარი წარმოადგენს წყალშემკრები აუზის ჰიდროლოგიური პროცესების ერთ-ერთ ძირითად მარეგულირებელ ფაქტორს, რადგან იგი გავლენას ახდენს ევაპოტრანსპირაციაზე, ნალექის შეკავებაზე, ნიადაგის ტენიანობის დინამიკასა და ჩამონადენის ფორმირებაზე. მცენარეულობის სიმჭიდროვე ზემოთ წარმოდგენილია ნორმალიზებული სხვაობის მცენარეულობის ინდექსის (NDVI-ის) გამოყენებით, რომელიც Sentinel-2-ის სატელიტური დაკვირვებებიდან არის მიღებული და გამოიყენება, როგორც ვარჯის სტრუქტურისა და ფოთლის ფართობის ინდექსის (LAI-ის) მიახლოებითი მაჩვენებელი.

ივრის აუზისთვის NDVI-ის მნიშვნელობებში შეტანილმა ცვლილებებმა მოდელირებულ წლიურ მდინარის ხარჯში სისტემური ზრდა გამოიწვია. აღნიშნული რეაქცია თანხვედრაშია დამკვიდრებულ ჰიდროლოგიურ თეორიასთან და ექსპერიმენტულ მტკიცებულებებთან, რომლებიც მცენარეულობის სიმჭიდროვეს აუზის წყლის ბალანსთან აკავშირებს.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, NDVI მჭიდროდ არის დაკავშირებული LAI-თან და ვარჯის ბიომასასთან, რომლებიც უშუალოდ მოქმედებს ევაპოტრანსპირაციის პროცესებზე. ხშირი მცენარეულობა, უფრო მაღალი NDVI მნიშვნელობებით, ზრდის წყლის დანაკარგებს ორი ძირითადი მექანიზმით: ვარჯის მიერ ნალექის შეკავებით და მცენარეთა ტრანსპირაციით. ტყის ვარჯი ნალექს აკავებს მანამ, სანამ იგი მიწის ზედაპირს მიაღწევს, ხოლო შეკავებული წყლის ნაწილი პირდაპირ ატმოსფეროში ორთქლდება. პარალელურად, ღრმა ფესვთა სისტემა და დიდი ფოთლოვანი ზედაპირი აძლიერებს ტრანსპირაციას და ზრდის ჯამურ ევაპოტრანსპირაციას. შედეგად, მოსული ნალექის უფრო დიდი ნაწილი ბრუნდება ატმოსფეროში და ნაკლები ნაწილი მონაწილეობს მდინარის ჩამონადენის ფორმირებაში.

წლიურ მასშტაბზე წყალშემკრები აუზის წყლის ბალანსი შეიძლება გამოისახოს, როგორც ნალექის, ევაპოტრანსპირაციის, ჩამონადენისა და მარაგის ცვლილების ურთიერთკავშირი:

$$P = ET + Q + \Delta S$$

სადაც P= ნალექს, ET= ევაპოტრანსპირაციას, Q= ჩამონადენია (მდინარის ხარჯი), ΔS= ცვლილება ბალანსში.

გრძელვადიან პერიოდში მარაგის ცვლილება შედარებით მცირეა, ხოლო ჩამონადენი ძირითადად ევაპოტრანსპირაციული დანაკარგებით კონტროლდება. შესაბამისად, მცენარეულობის სიმჭიდროვის შემცირება ამცირებს ევაპოტრანსპირაციის მოთხოვნას და ნალექის უფრო დიდ ნაწილს ტოვებს ჩამონადენის ფორმირებისთვის.

მოდიფიცირებულ სცენარებში NDVI-ის მნიშვნელობები შემცირდა საწყის აუზურ საშუალო მნიშვნელობასთან — **0,48** — შედარებით და მიღებულ იქნა უფრო დაბალი ეფექტური LAI — **0,38**. აღნიშნულმა შეამცირა ვარჯის მიერ ნალექის შეკავების მოცულობა და ტრანსპირაციული ნაკადები. ევაპოტრანსპირაციის შემცირების შედეგად წყლის ბალანსის ნარჩენი ნაწილი გაიზარდა ჩამონადენის მიმართულებით, რაც ხსნის წლიური მდინარის ხარჯის ზრდას.

ეს რეაქცია ფართოდ არის დოკუმენტირებული ჰიდროლოგიურ ლიტერატურაში. წყალშემკრებ აუზებზე ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ტყის საფრის შემცირება, როგორც წესი, ზრდის წლიურ ჩამონადენს, ხშირად **10-40%**-ით, კლიმატისა და მცენარეულობის ტიპის მიხედვით. მსგავსად, Zhang et al. (2001)-მა აჩვენა, რომ მცენარეულობის ცვლილება ცვლის საშუალო წლიურ ევაპოტრანსპირაციას და იწვევს წყალშემკრები აუზის ჩამონადენის გაზომვად ცვლილებებს. Brown et al. (2005)-ისა და Farley et al. (2005)-ის კვლევებმაც დაადასტურა, რომ მცენარეულობის სიმჭიდროვის შემცირება ზრდის მდინარის ხარჯს მაშინ, როდესაც გატყიანება ამცირებს წყლის ჩამონადენს გაძლიერებული ევაპოტრანსპირაციის გამო.

ივრის აუზი შედარებით უფრო მშრალი მახასიათებლებით და წყლის დეფიციტისადმი უფრო მაღალი მგრძნობიარობით გამოირჩევა, რაც დაკავშირებულია როგორც რელიეფურ პირობებთან, ისე წყალშემკრები აუზის ზომით. ასეთ პირობებში ევაპოტრანსპირაცია წლიური წყლის ბალანსის უფრო დიდ ნაწილს შეადგენს. შესაბამისად, მცენარეულობის წყლის მოხმარების მცირე შემცირებამაც კი შეიძლება გამოიწვიოს ჩამონადენის შედარებით მნიშვნელოვანი ზრდა. თუმცა ეს ასევე შეიძლება დაკავშირებული იყოს ინერტული მასალის და ნიადაგის ეროზიის ზრდასთან.

მნიშვნელოვანია, ერთმანეთისგან გავმიჯნოთ წლიური ჩამონადენი და ცალკეული ჰიდროლოგიური მოვლენები. მცენარეულობის შემცირება შეიძლება ზრდიდეს ჯამურ წლიურ ხარჯს, თუმცა ამავე დროს იწვევდეს ინფილტრაციის სტაბილურობის შემცირებას, ზედაპირული ჩამონადენის პიკების ზრდას და ჰიდროლოგიური ცვალებადობის გაძლიერებას. ტყიანი წყალშემკრები აუზები, როგორც წესი, ამცირებს პიკურ ხარჯებს და ხელს უწყობს წყლის ნელ, ეტაპობრივ გამოთავისუფლებას ნიადაგის მარაგისა და საბაზისო ხარჯის მეშვეობით. ამიტომ, დაბალი NDVI-ის პირობებში წლიური ხარჯის ზრდა არ ნიშნავს ჰიდროლოგიური სტაბილურობის ან ეკოსისტემის მდგრადობის გაუმჯობესებას. პირიქით, გაზრდილმა ზედაპირულმა ჩამონადენმა შეიძლება გაზარდოს ხშირი და მაღალი ინტენსივობის წყალმოვარდნების რისკი და შეამციროს საბაზისო ხარჯი, რაც წყლის დეფიციტის პერიოდებში უფრო ხანგრძლივ გვალვიან პირობებს გამოიწვევს.

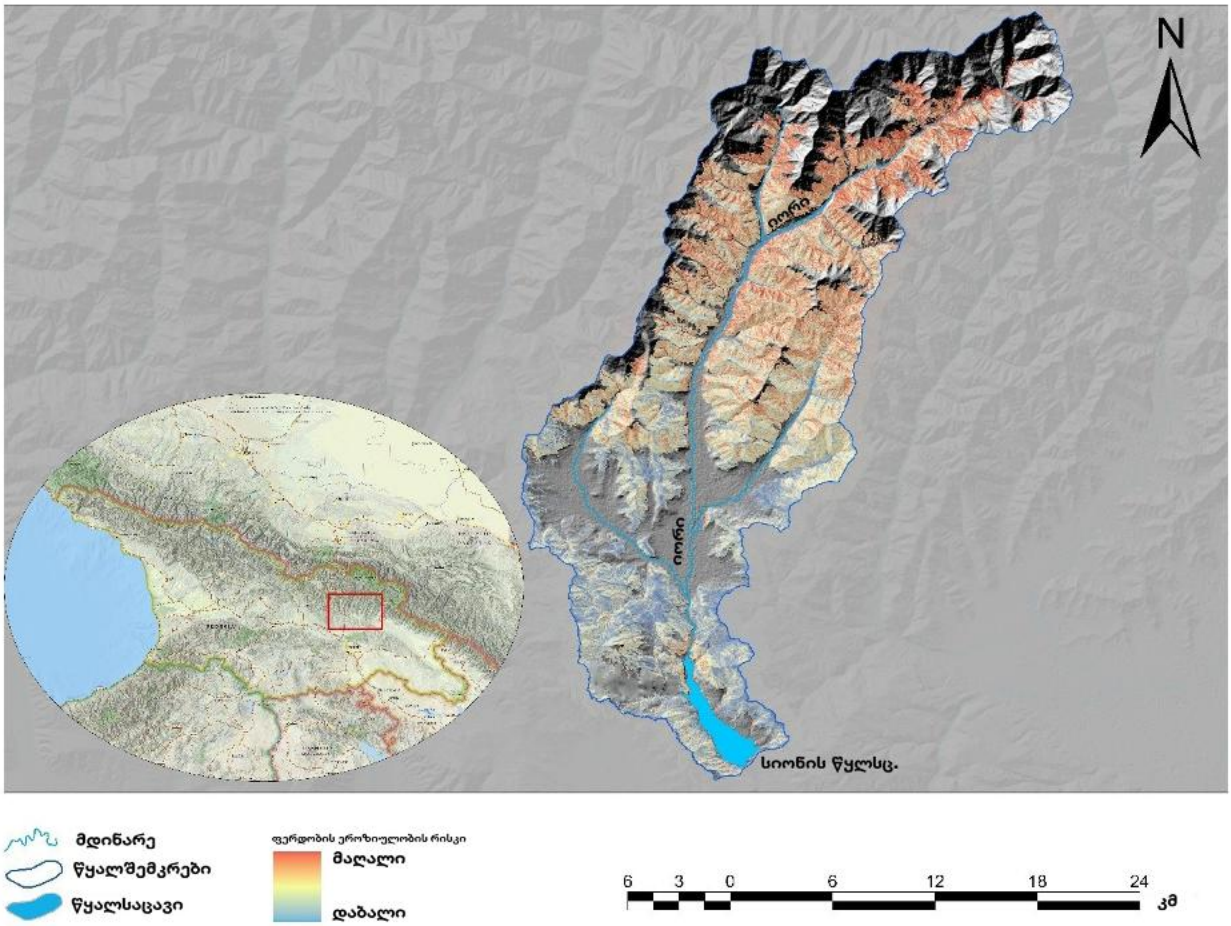
მოდიფიცირებული NDVI სცენარის მიხედვით (წყლის მაჩვენებლის ~20% შემცირების), ივრის აუზში მრავალწლიური საშუალო ხარჯი გაიზარდა **1,2 მ³/წმ-ით**, ანუ დაახლოებით **12,2%**-ით. ივრის აუზის შედარებით ძლიერი რეაქცია შეესაბამება უფრო ევაპოტრანსპირაციით კონტროლირებულ, წყლის დეფიციტისადმი მგრძნობიარე რეჟიმს, სადაც ვარჯის სიმჭიდროვის შემცირება ამცირებს ნალექის შეკავებისა და ტრანსპირაციის დანაკარგებს და, შესაბამისად, ზრდის ნალექის იმ ნაწილს, რომელიც ჩამონადენის ფორმირებაში მონაწილეობს. თუმცა, შიდა წლიური ჰიდროლოგიური მახასიათებლებისა და ცვლილებების დასადგენად საჭიროა უფრო მაღალი სივრცითი რეზოლუციის მონაცემები და მიწისპირა მონიტორინგის სისტემა დღიური დროითი ბიჯით.

ცხრილი 16. ვარჯის შემცირების გავლენა წყლის ბალანსზე შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში

წელი	Q მ3/წ	წელი	Q მ3/წ
1981	12.0	2002	13.4
1982	13.5	2003	9.9
1983	14.8	2004	9.9
1984	11.9	2005	15.4
1985	11.1	2006	10.9
1986	10.9	2007	9.2
1987	14.6	2008	8.7
1988	13.6	2009	12.5
1989	10.3	2010	12.2
1990	11.3	2011	12.7

წელი	Q მ3/წ	წელი	Q მ3/წ
1991	10.5	2012	11.2
1992	13.0	2013	9.8
1993	10.1	2014	11.0
1994	10.9	2015	11.1
1995	9.3	2016	10.9
1996	10.8	2017	9.3
1997	12.0	2018	9.5
1998	9.0	2019	7.6
1999	10.3	2020	7.5
2000	7.7	2021	8.5
2001	9.3	საშ.	10.9

შესაბამისად, NDVI-ზე დაფუძნებულმა მოდელირებამ წარმატებით ასახა მიწის საფრის ზოგადი გავლენა ევაპოტრანსპირაციასა და ჩამონადენის გადანაწილება-ზე. მცენარეულობის დინამიკის ჩართვა ჰიდროლოგიურ მოდელირებაში ზრდის მოდელის რეალისტურობას, განსაკუთრებით მიწის საფრის ცვლილების ან კლიმა-ტით გამოწვეული ცვლილებების პირობებში.



სურათი 17. ნიადაგის ეროზიის რისკი ტყის საფრის სრული ჭრის შემთხვევაში

NDVI/LAI-ის შემცირების შემდეგ წლიური მდინარის ხარჯის ზრდა განპირობებულია მცენარეულობის სიმჭიდროვის შემცირებით გამოწვეული ევაპოტრანსპირაციისა და ნალექის შეკავების დანაკარგების შემცირებით. აღნიშნული შედეგი თანხვედრაშია თეორიულ მოლოდინებთან და ფართო ემპირიულ მტკიცებულებებთან, რომლებიც მიუთითებს, რომ მცენარეულობა წყალშემკრები აუზის წყლის გამოსავლის ერთ-ერთი მთავარი მარეგულირებელია.

მიღებული შედეგები ხაზს უსვამს მცენარეულობის დინამიკის გათვალისწინების მნიშვნელობას მთიანი და ნახევრადარიდული მდინარის აუზების გრძელვადიანი ჰიდროლოგიური ცვალებადობისა და წყლის რესურსების ხელმისაწვდომობის შეფასებისას. ამასთან, შედეგები მიუთითებს ქაოტურ და არარეგულირებულ ტყის ჭრასთან დაკავშირებულ ნიადაგის ეროზიის რისკზე, რამაც შეიძლება გაზარდოს წყალსაცავის მოლამვის ისედაც მაღალი დონე და კიდევ უფრო შეამციროს სასარგებლო მოცულობა.

ამ კონტექსტში აუზის ტყის საფარი უნდა განვიხილოთ, როგორც წყალმარეგულირებელი და ნიადაგდაცვითი ბუნებრივი ინფრასტრუქტურა, რომლის წყლის რესურსზე გავლენის კვლევამ მნიშვნელოვანი გავლენა აჩვენა; კერძოდ:

- ჯამურად გაიზარდა ზედაპირული ჩამონადენი და პიკური ხარჯები.
- მაღალი ტემპერატურული ამპლიტუდისა და ტყის საფრის კიდევ უფრო დეგრადაციის შედეგად აქტიურდება ნიადაგის ეროზია და იზრდება წყალსაცავში ინერტული მასალის აკუმულაციის რისკი.

შესაბამისად, ტყის დაცვა ამ აუზში არ არის მხოლოდ სატყეო ან ბიომრავალფეროვნების საკითხი; იგი პირდაპირ უკავშირდება წყლის უსაფრთხოებას, წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის შენარჩუნებას და კლიმატმედეგი წყლის განაწილების უზრუნველყოფას. ასევე, აუცილებელია გაფართოვდეს მონიტორიგნის ქსელი და შემუშავდეს შესაბამისი პროტოკოლები, რათა წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის კიდევ უფრო მკვეთრი შემცირება თავიდან იქნას აცილებული.

კლიმატური სცენარები და დაშვებები

კლიმატის ცვლილების შეფასებისთვის, როგორც ზემოთ აღინიშნა, გამოყენებულია CMIP6-ის მონაცემები World Bank Group-ის კლიმატის ცვლილების მონაცემებთან ერთად. აღნიშნული მონაცემები ფართოდ გამოიყენება კლიმატური რისკებისა და წყლის რესურსების კვლევებში და, შესაბამისად, მიიჩნევა ერთ-ერთ სანდო წყაროდ. კლიმატის ცვლილების პროგნოზები ეფუძნება სათბურის გაზების ემისიების სამომავლო სცენარებს და გამოიყენება იმის შესაფასებლად, თუ როგორ შეიძლება შეიცვალოს დროში. უახლესი პროგნოზების საფუძველზე, სადაც საცნობარო პერიოდად გამოყენებულია **1995-2014 წლები**, შესაძლებელია წყალშემკრებ აუზში ნალექისა და ტემპერატურის ცვლილებების რაოდენობრივი შეფასება.

შერჩეული კლიმატის ცვლილების სცენარის პირობებში, საცნობარო პერიოდთან — **1995-2014 წლებთან** შედარებით, მრავალწლიური ნალექი მომავალი პერიოდისთვის, **2021-2099 წლებისთვის**, გარკვეულ ცვლილებას აჩვენებს. ასევე, აღსანიშნავია, რომ აუზის რთული ტოპოგრაფიის გამო კლიმატურმა მოდელებმა შესაძლოა ზუსტად ვერ ასახოს ნალექის განაწილება. თუმცა მონაცემთა ანალიზი აჩვენებს, რომ CMIP6-ის ნალექისა და ტემპერატურის შედეგები ზოგადად თანხვედრაშია მიწისპირა სადგურებიდან მიღებულ ისტორიულ მონაცემებთან.

შესაბამისად, შერჩეულ აუზში წყლის რესურსების სამომავლო ცვლილებების შესაფასებლად ჰიდროლოგიურ ანალიზში გამოყენებულია ტემპერატურით განპირობე-

ბული ცვლილების ფაქტორები. აღნიშნული ფაქტორები არაპირდაპირ ითვალისწინებს ნალექის სეზონურ ცვლილებებსაც, მათ შორის ზოგიერთ თვეში ნალექის ზრდას, რაც წარმოდგენილია ცხრილში.

ცხრილი 17. კლიმატის ცვლილების მაჩვენებლების შედარება ისტორიულ მონაცემებთან ივრის აუზისთვის

სცენარი	ნალექი, მმ/წელი	T, °C	ET, მმ/წელი	ჩამონადენი, მმ/წელი	Q, მ³/წმ
ისტორიული პერიოდი, 1981-2021	769.0	5.4	229.8	536.5	9.7
SSP5-8.5, 2021-2099	592.0	7.3	220.7	371.4	6.7
SSP3-7.0, 2021-2099	579.4	6.6	212.8	366.6	6.6
SSP2-4.5, 2021-2099	581.1	6.2	210.2	370.9	6.7

როგორც ზემოთ აღინიშნა, კლიმატის ცვლილების მოდელის შედეგები მიუთითებს მრავალწლიური ნალექის მნიშვნელოვან შემცირებაზე ყველა შერჩეული ემისიის სცენარის პირობებში. თუმცა ამ შედეგების ინტერპრეტაცია საჭიროებს კლიმატური მოდელების სივრცითი რეზოლუციის გათვალისწინებას. CMIP6-ის კლიმატური პროგნოზები მიღებულია გლობალური კლიმატური მოდელებიდან, რომელთა სივრცითი რეზოლუცია დაახლოებით **0,5°**-ს შეადგენს. თითოეული ბადის უჯრედი წარმოადგენს საკმაოდ დიდ გეოგრაფიულ არეალს, რომელიც მნიშვნელოვნად აღემატება ივრის წყალშემკრები აუზის სივრცით მასშტაბს.

აღნიშნული აუზებისთვის დამახასიათებელი რთული მთიანი ტოპოგრაფიისა და ძლიერი სიმაღლითი გრადიენტების გამო, ნალექი გამოირჩევა მაღალი სივრცითი ცვალებადობით, რომლის სრულად ასახვა ამ მასშტაბის მოდელებით შეუძლებელია. შედეგად, მოდელის ბადის უჯრებიდან მიღებული ნალექის მნიშვნელობები, სავარაუდოდ, ასახავს ფართო არეალის საშუალო პირობებს და არა კონკრეტულად აუზისთვის დამახასიათებელ ნალექის რეჟიმს. ეს კი შეიძლება იწვევდეს ნალექის არასრულ ან არაზუსტ შეფასებას შედარებით მცირე წყალშემკრებ აუზებზე გამოყენებისას. თუმცა, განსხვავება არ არის იმდენად მაღალი, რომ მოდელის კლიმატური ცვლილების გავლენა მთლიანად უარვყოთ; შესაბამისად, შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ იგი გარკვეულწილად შეესაბამება მიმდინარე კლიმატურ ტენდენციებს.

ამის საპირისპიროდ, ჰაერის ტემპერატურა რეგიონულ მასშტაბზე გაცილებით ნაკლებ სივრცით ცვალებადობას ავლენს და კლიმატური მოდელებით უფრო თანმიმდევრულად არის წარმოდგენილი თუნდაც შედარებით უხეში რეზოლუციის პირო-

ბებში. CMIP6-ის პროგნოზებიდან მიღებული ტემპერატურული ტენდენციები თანხვედრაშია დაკვირვებული ისტორიული დათბობის სიგნალთან და, შესაბამისად, წარმოადგენს უფრო სანდო საფუძველს კლიმატის ცვლილებაზე ჰიდროლოგიური რეაქციის შესაფასებლად. ტემპერატურის ზრდა ჰიდროლოგიაზე ძირითადად მოქმედებს ევაპოტრანსპირაციის მოთხოვნის ზრდით, თოვლის დნობის დროის ცვლილებით და ჩამონადენის სეზონური გადანაწილებით.

საერთო ჯამში, ანალიზი მიუთითებს, რომ დათბობა სავარაუდოდ გაზრდის ევაპოტრანსპირაციას და შეცვლის აუზის წყლის ბალანსს, რაც სამომავლო კლიმატური სცენარების პირობებში ჩამონადენის ზომიერ ცვლილებებს გამოიწვევს.

კლიმატის ცვლილების გავლენა შერჩეული აუზის მრავალწლიურ საშუალო ხარჯზე

კლიმატის ცვლილება, სავარაუდოდ, შეცვლის მდინარე იორის საშუალო ხარჯის რეჟიმს, პირველ რიგში ტემპერატურის ცვლილების მეშვეობით, ხოლო ნალექის გავლენა შედარებით მეორეხარისხოვანი და უფრო გაურკვეველია. მიწისპირა ტემპერატურული სადგურებისა და World Bank Group-ის კლიმატური პროგნოზების SSP სცენარების საფუძველზე ჩატარებული ანალიზი მიუთითებს აუზში დათბობის თანმიმდევრულ ტენდენციაზე მაშინ, როდესაც წლიური ნალექის გრძელვადიანი ცვლილებები კვლავ გაურკვეველი და სივრცობრივად არაერთგვაროვანია აუზის რთული ტოპოგრაფიის გამო.

ტემპერატურით განპირობებული გავლენები

ჰაერის ტემპერატურის პროგნოზირებული ზრდა მნიშვნელოვნად იმოქმედებს იმ ჰიდროლოგიურ პროცესებზე, რომლებიც მდინარის საშუალო ხარჯს განსაზღვრავს. მაღალი ტემპერატურა გამოიწვევს:

- პოტენციური ევაპოტრანსპირაციის ზრდას, რაც შეამცირებს ეფექტურ ჩამონადენს;
- მდინარის ზემო წელში თოვლის დნობის პერიოდის გადანაცვლებას;
- სეზონური ჩამონადენის გადანაწილების ცვლილებას, რომლის დროსაც შედარებით მაღალი ხარჯები უფრო ადრე, გაზაფხულზე დაფიქსირდება, ხოლო გვიან ზაფხულსა და შემოდგომაზე ხარჯები შემცირდება;
- წყლის რესურსების დამატებით შემცირებას, რაც დაკავშირებული შეიძლება იყოს თბილისის და რუსთავის წყალმომარაგებისა, ასევე სარწყავი საჭიროებების დასაკმაყოფილებლად საჭირო წყლის რაოდენობის გაზრდასთან.

აღნიშნული პროცესები, სავარაუდოდ, გამოიწვევს წყლის მოთხოვნის ზრდას და მდინარის ხარჯების შემცირებას, მიუხედავად იმისა, რომ წლიური ნალექის საერთო ცვლილება შეზღუდული ან გაურკვეველია.

ატმოსფერულ ნალექთან დაკავშირებული გაურკვევლობა

მიუხედავად იმისა, რომ კლიმატური მოდელის შედეგი მიუთითებს მრავალწლიური ნალექის კლებაზე შუა საუკუნის პერიოდისთვის (2021-2059 წლებში) მიწისპირა სადგურებისა და დაკალიბრებული სატელიტური მონაცემებიდან მიღებული ისტორიული დაკვირვებები არ აჩვენებს სტატისტიკურად მნიშვნელოვან გრძელვადიან ტენდენციას ნალექის ჯამურ რაოდენობაში. ეს შეუსაბამობა მიუთითებს, რომ აუზისთვის ნალექის პროგნოზები შესაძლოა მნიშვნელოვნად იყოს დამოკიდებული ადგილის ტოპოგრაფიაზე და მიკრო კლიმატზე. შესაბამისად, ნალექით განპირობებული საშუალო ხარჯის მნიშვნელოვანი კლება ნაკლებად სანდო სცენარად უნდა ჩაითვალოს, ვიდრე ტემპერატურით განპირობებული ზემოქმედებები.

მოსალოდნელი ცვლილებები საშუალო ხარჯში

დათბობის, ევაპოტრანსპირაციის ზრდისა და ჩამონადენის სეზონური გადანაწილების ერთობლივი გავლენის გათვალისწინებით, კლიმატის ცვლილების პირობებში მოსალოდნელია:

- წლიური საშუალო ხარჯის შემცირების ალბათობა აუზის მასშტაბით;
- ზაფხულისა და ადრეული შემოდგომის საშუალო ხარჯების შემცირება, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც წყლის მოთხოვნა ყველაზე მაღალია და თუ ამავე დროს LAI ინდექსის გაუარესებაც დაფიქსირდება;
- ხარჯის შიდა წლიური ცვლილება, უფრო მკვეთრი კონტრასტებით ნოტიო და მშრალ სეზონებს შორის, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, თუ ტყის საფარი დაზიანდება. ეს საბოლოოდ გაზრდის წყალმოვარდნის რისკს და შეამცირებს მდინარის საბაზისო ხარჯს;
- სარწყავი მოთხოვნის ზრდა ზაფხულის ტემპერატურის მატებისა და გახანგრძლივებული გვალვების გამო.
- მოსალოდნელია წყალმომარაგებაზე მოთხოვნის ზრდაც; თუმცა ამ ეტაპზე მყარი სამომავლო მოთხოვნის სცენარები ხელმისაწვდომი არ არის. საქართველოს სტატისტიკის ეროვნული სამსახურის მონაცემებით, წყალმომარაგებისა და სარწყავი სისტემების დანაკარგები დაახლოებით **68%**-ს შეადგენს. შესაბამისად, მიუხედავად იმისა, რომ წყლის საერთო მოთხოვნა შეიძლება გაიზარდოს, სისტემური დანაკარგების შემცირებისა და ინფრასტრუქტურის გაუმჯობესების გზით არსებობს მნიშვნელოვანი შემარბილებელი პოტენციალი.

ცხრილი 18. მდინარე იორის ხარჯის განაწილება და წყლის რესურსის ხელმისაწვდომობა (მრავალწლიური საშუალო, მოდელირების საფუძველზე)

მდინარე იორი (სიონის წყალსაცავი)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
საშუალო ხარჯი	5.3	5.5	6.8	15.0	17.4	15.3	11.6	9.5	8.3	7.9	7.6	6.2	9.7
ირიგაცია					6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2			6.2
ჰიდროგენერაცია[8]	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
დანაკარგი	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
წყალმომარაგება	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
გარემოსდაცვითი ხარჯი	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
წყლის დეფიციტი	-1.8	-1.6	-0.3	7.9	4.1	2.0	-1.7	-3.8	-5.0	-5.4	0.5	-0.9	-0.5

ცხრილი 19. მდინარე იორის წყლის რესურსის განაწილება საჯაროდ ხელმისაწვდომი მონაცემების საფუძველზე

კომპონენტი	მნიშვნელობა, მლნ მ³	შენიშვნა
აღდგენილი საშუალო წლიური შემოდინება	305.9	მოდელირებული საშუალო ხარჯის (9.7 მ³/წმ) საფუძველზე
სასარგებლო მოცულობა	81.3	მოცულობის დაახლოებით 75%-იანი კლების გათვალიწინებით.
სიონი ჰესის წყალმოხმარება	129.94	დაფიქსირებული მოცულობა (ოპერატიული)
ზემო სამგორის არხის წყალმომარაგება	53.24	თბილისის ზღვისთვის
ხაშმის არხის წყალმომარაგება	6.10	სარწყავი/კონტრაქტირებული მომხმარებლები
ქვემო სამგორის არხის წყალმომარაგება	122.60	მდინარიდან აღებული საერთო მოცულობა[9]
ქვემო სამგორის სისტემის გავლით მდინარეში დაბრუნებული ხარჯი	52.70	დაბრუნებული მდინარე იორში (გარემოსდაცვითი ხარჯი)

[8] ჰიდროელექტრო სადგური წარმოადგენს შუამავალ ობიექტს ამიტომ მისი მოხმარება მიწოდების ჯაჭვში არ იწვევს წყლის დეფიციტს.
[9] საქართველოს მელიორაცია

უნდა აღინიშნოს, რომ ცხრილ 18-ში წარმოდგენილი დეფიციტის მნიშვნელობები მიღებულია იმ დაშვების საფუძველზე, რომ ივრის არსებული სარწყავი და წყალმომარაგების მოთხოვნები სრულად კმაყოფილდება მხოლოდ სიონის წყალსაცავიდან გაშვებული წყლით. პრაქტიკაში ქვედა დინებაში წყლის საჭირო რაოდენობა დამატებით ივსება პალდოს წყალმიმღებიდან. აღნიშნული დამატებითი შემოდინება ნაწილობრივ აკომპენსირებს გამოთვლილ დეფიციტს და, შესაბამისად, ამცირებს რეალურად გამოვლენილი წყლის ნაკლებობის მასშტაბს ჩვეულებრივ ჰიდროლოგიურ პირობებში.

სიონის წყალსაცავისა და პალდოს წყალმიმღების ერთობლივი ფუნქციონირება საშუალო ჰიდროლოგიურ წლებში არსებული მოთხოვნების ძირითადად დაკმაყოფილებას უზრუნველყოფს. თუმცა ანალიზი მიუთითებს, რომ სისტემა ოპერაციული შესაძლებლობების ზღვართან ახლოს მუშაობს. იმ წლებში, რომლებიც ხასიათდება საშუალოზე დაბალი ნალექით ან შემცირებული შემოდინებით, წყალსაცავით შექმნილი ბუფერი შესაძლოა არასაკმარისი აღმოჩნდეს და სისტემაში წარმოიშვას წყლის მკვეთრი დეფიციტი, რაც გაამწვავებს წყლის რესურსის მართვასთან დაკავშირებულ დამატებით გამოწვევებს.

დასკვნა

შეფასება აჩვენებს, რომ იორი-სიონის სისტემა უკვე ფუნქციონირებს მნიშვნელოვანი ზეწოლის პირობებში. ძლიერი დათბობის ტენდენცია, წყლის რესურსის წლიდან წლამდე ცვალებადობა, სარწყავ წყალზე მნიშვნელოვანი მოთხოვნა, ინფრასტრუქტურის გაუარესებული მდგომარეობა და სიონის წყალსაცავის ძლიერი მოლამვა ნიშნავს, რომ სამომავლო რისკი უფრო მეტად განპირობებულია არა წყლის აბსოლუტური დეფიციტით, არამედ ოპერაციული მოქნილობის შემცირებითა და სისტემის დაბალი ეფექტიანობით. მდინარის ხარჯის რეკონსტრუქცია და კალიბრაცია მიუთითებს ბოლო პერიოდში აუზში წყლის ხელმისაწვდომობის კლებად ტენდენციაზე, ხოლო სარწყავი მოთხოვნის ანალიზი აჩვენებს, რომ საშუალო სარწყავი მოთხოვნა დაახლოებით **6,11 მ³/წმ-ს** შეადგენს და ამას ემატება მნიშვნელოვანი სისტემური დანაკარგები. ამავე დროს, არსებული ინფორმაციით, სიონის წყალსაცავს ინერტული მასალით შევსების გამო დაკარგული აქვს მოცულობის დაახლოებით **75%**. ასეთ პირობებში აუზის მართვის პრიორიტეტი უნდა იყოს გაზომვების გაუმჯობესება, წყლის განაწილების პროტოკოლების შემუშავება, წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის დაცვა და სარწყავი სისტემის ეფექტიანობის ზრდა.

პირველ რიგში, აუცილებელია სიონის წყალსაცავისა და მის ქვედა დინებაში არსებული სარწყავი ქსელის მინიმალური ოპერაციული მონიტორინგის სისტემის ჩამოყალიბება. ამჟამად წყალსაცავის ოპერირების წესები, განახლებული სასარგებლო მოცულობის მრუდები, ბოლო პერიოდის უწყვეტი შემოდინება-გადინების მონაცემები და დეტალური წყალაღების ჩანაწერები არასრულია ან არ არის ხელმისაწვდომი. სწორედ ეს არის მთავარი მიზეზი, რის გამოც მიმდინარე კვლევა სკრინინგის დონის შეფასებად რჩება. სამომავლო გადაწყვეტილებების მისაღებად სისტემას მინიმუმ უნდა ჰქონდეს: წყალსაცავის წყლის დონის უწყვეტი ჩანაწერები, პერიოდულად განახლებული ბათიმეტრიული კვლევები, მონიტორინგით დადასტურებული შემოდინებისა და გაშვების მონაცემები, არხებიდან წყალაღების გაზომვები, დაბრუნებული ხარჯის გაზომვები და სეზონური ოპერირების წესების თანმიმდევრული დოკუმენტირება. ამ მონაცემების გარეშე თუნდაც კარგად შემუშავებული ჰიდროლოგიური ანალიზები დარჩება გაურკვეველი, ხოლო წყლის განაწილების გადაწყვეტილებები კვლავ მიახლოებებზე იქნება დაფუძნებული. ჰიდრომეტეოროლოგიური და მდინარის წყლის ხარჯის მონიტორინგი უნდა წარმართოს გარემოს ეროვნულმა სააგენტომ, ხოლო წყალაღების კვეთში აღებული და დაბრუნებული ხარჯების გაზომვაზე პასუხისმგებელი უნდა იყოს საქართველოს მელიორაცია.

დამატებით მოდელირებამ აჩვენა, რომ სარწყავი წყლის მოთხოვნა უკვე მაღალია და ინფრასტრუქტურული დანაკარგები მნიშვნელოვანი მასშტაბისაა. ქვემო სამგორის სისტემის მაგალითი მიუთითებს, რომ მდინარიდან აღებული მთლიანი მოცულობის მხოლოდ ნაწილი აღწევს საბოლოო მომხმარებლებამდე, ხოლო მნიშვნელოვანი ნაწილი იკარგება. ეს ნიშნავს, რომ არსებული შეზღუდვა მხოლოდ წყლის ხელმისაწვდომობას არ უკავშირდება; მნიშვნელოვანი ფაქტორია მიწოდების არაეფექტიანობა და სუსტი ოპერაციული კონტროლიც.

მშრალ წლებში და წყალსაცავში დაბალი სასარგებლო მოცულობის პირობებში სისტემა უნდა იმართოს მკაფიო, პრიორიტეტებზე დაფუძნებული წყლის განაწილების წესით. აუზი მგრძნობიარეა ჰიდროლოგიური ცვალებადობის, დათბობით გამოწვეული ევაპოტრანსპირაციის ზრდისა და ინერტული მასალის ჩამონადენით გამოწვეული სასარგებლო მოცულობის შემცირების მიმართ. ასეთ პირობებში წყალსაცავიდან გაშვებები უნდა დაექვემდებაროს გამჭვირვალე პრიორიტეტულ რიგს: პირველ რიგში — სასმელი წყალი და აუცილებელი საზოგადოებრივი წყალმომარაგება; მეორე — ეკოლოგიური ხარჯი; მესამე — სარწყავი წყალი; მეოთხე — ენერგეტიკული წარმოება. თუმცა, ივრის სისტემაში ჰიდროენერგეტიკას შედარებით მეორეხარისხოვანი როლი აქვს და წყლის განაწილებაზე გადამწყვეტ გავლენას არ ახდენს. აღნიშნული პრიორიტეტული წესი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია იმ

წლებში, როდესაც აღდგენილი შემოდინება საშუალოზე დაბალია ან ეფექტური სასარგებლო მოცულობა მნიშვნელოვნად არის შეზღუდული. გვალვის პირობებში წყლის განაწილების ფორმალური პროტოკოლი შეამცირებს შემთხვევით და არათანმიმდევრულ გადაწყვეტილებებს და ხელს შეუწყობს ოპერაციული მართვის კლიმატურ ადაპტაციასთან შესაბამისობას.

ინერტული მასალის აკუმულაცია წარმოადგენს ერთ-ერთ მთავარ პრობლემას და სიონის წყალსაცავის სანდოობის ცენტრალურ რისკს. ინერტული მასალით შევსება ამცირებს ეფექტურ სასარგებლო მოცულობას, ასუსტებს წყალსაცავის ბუფერულ ფუნქციას, ზრდის ზედა დინებაში წყალდიდობის რისკს და გავლენას ახდენს როგორც სარწყავი წყლის ხარისხსა და გამოყენებადობაზე, ისე ქვედა დინების ინფრასტრუქტურის ფუნქციონირებაზე. შესაბამისად, სედიმენტაციის მართვა უნდა მოიცავდეს წყალსაცავის განახლებულ ბათიმეტრიულ კვლევას, წყლის მიმღები ნაგებობების სიახლოვეს ინერტული მასალის დაგროვების პერიოდულ შეფასებას. გამომდინარე იქიდან, რომ მოცულობის დაახლოებით **75%** დაკარგულია, ამას მნიშვნელოვანი პრაქტიკული შედეგები აქვს, ამიტომ აუცილებელია დაიგეგმოს წყალსაცავის გაწმენდის ან საჭიროების შემთხვევაში რეაბილიტაციის სამუშაოები. თუ შესაძლებელია, სასურველია ინერტული მასალისგან სეზონური გარეცხვებით წყალსაცავში მოცულობის გაზრდა.

კვლევის შედეგები მიუთითებს, რომ იორი-სიონის წყალშემკრებ აუზში **ტყის საფარი უნდა განიხილებოდეს, როგორც წყალმარეგულირებელი და ნიადაგდაცვითი ბუნებრივი ინფრასტრუქტურა**, განსაკუთრებით სიონის წყალსაცავის ძლიერი ეროზიით და ქვედა დინების სარწყავი მოთხოვნის გათვალისწინებით. NDVI/LAI ანალიზმა აჩვენა, რომ მცენარეულობის შემცირების სცენარში, ყოველი 0,1 პუნქტით მრავალწლიური საშუალო ხარჯი იზრდება დაახლოებით 1,2 მ³/წმ-ით, ანუ 12,2%-ით. თუმცა ეს ზრდა არ უნდა შეფასდეს, როგორც დადებითი შედეგი, რადგან ტყის დეგრადაციამ შეიძლება გააძლიეროს ზედაპირული ჩამონადენი, პიკური ხარჯები, ფერდობების ეროზია და წყალსაცავში მყარი ნატანის მოხვედრა. რადგანაც ჩამონადენის ზრდა დაკავშირებულია ზოგადად ზედაპირის Runoff Curve Number (CN) პარამეტრის ცვლილებასთან, CN ფართოდ გამოიყენება ნალექის მოვლენაზე პირდაპირი ზედაპირული ჩამონადენის შესაფასებლად და დამოკიდებულია მიწის საფარზე, ნიადაგის ჰიდროლოგიურ ჯგუფზე, ნიადაგის ტენიანობის წინასწარ მდგომარეობასა და ზედაპირის დეგრადაციის ხარისხზე. დაბალი CN მნიშვნელობა მიუთითებს უკეთეს ინფილტრაციაზე, უფრო მაღალ ნიადაგურ შეკავებაზე და შედარებით დაბალ პირდაპირ ჩამონადენზე, რაც ჩვეულებრივ დამახასიათებელია კარგად შენარჩუნებული ტყიანი ტერიტორიებისთვის. მაღალი CN მნიშვნელობა კი მიუთითებს შემცირებულ ინფილტრაციაზე და გაზრდილ ზედაპირულ ჩამონადენზე, რაც

შეიძლება დაკავშირებული იყოს ტყის დეგრადაციასთან, ნიადაგის სტრუქტურის ცვლილებასთან, გზებთან, გაშიშვლებულ ფერდობებთან და სხვა ისეთი ღია სივრცეების გაზრდასთან, რომელსაც მაღალი CN მნიშვნელობა აქვს.

ასევე, ანგარიში აჩვენებს, რომ ტემპერატურის ზრდა მკაფიო და მნიშვნელოვანი სიგნალია მაშინ, როდესაც ნალექის ცვლილება გაცილებით უფრო გაურკვეველია. ასევე ჩანს, რომ ძირითადი რისკი კონცენტრირებულია გვიან გაზაფხულსა და ზაფხულში, როდესაც ევაპოტრანსპირაცია და სარწყავი მოთხოვნა მაღალია და სისტემის მგრძნობიარობაც მაქსიმალურია. ამიტომ, შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ნალექის ჯამური მაჩვენებლის შემცირების და გაზრდილი ტემპერატურის პირობებში გაზრდილი ჩამონადენი გამოწვეულია გვერდითი ფაქტორებით. ეს ნიშნავს, რომ წყალსაცავის ოპერირება, სარწყავი წყლის მიწოდების გრაფიკი და წყლის განაწილების დაგეგმვა უნდა ეფუძნებოდეს სეზონურ პროგნოზებს და არა მხოლოდ წლიურ საშუალო მნიშვნელობებს. სამომავლო სამუშაოებში მიზანშეწონილია შეიქმნას სეზონური კლიმატური რისკის მონიტორინგის სისტემა, რომელიც ერთმანეთთან დააკავშირებს ტემპერატურულ ანომალიებს, გაზაფხულის ჩამონადენის პირობებს, წყალსაცავის შევსების სტატუსს და მოსალოდნელ სარწყავ მოთხოვნას, რაც თავის მხრივ უნდა მოიცავდეს სარწყავი ფართობების და კულტურების შესახებ ზუსტ მნიშვნელობებს.

გამოყენებული ლიტერატურა

Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology, 55*(1–4), 3–23. https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2

Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology, 310*(1–4), 28–61. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010

Copernicus Climate Change Service. (n.d.). *CMIP6 climate projections* [Data set]. Climate Data Store. Retrieved July 21, 2026, from https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6

Copernicus Data Space Ecosystem. (n.d.). *Sentinel-2 multispectral satellite data* [Data set]. Retrieved July 21, 2026, from https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2

Döll, P., & Siebert, S. (2002). Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research, 38* (4), 8-1–8-10. https://doi.org/10.1029/2001WR000355

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development, 9*, 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis* (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Tsitelashvili, N. (2024). *geoCHIRPS* (Version 1). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.10889291

Tsitelashvili, N., Biggs, T., Mu, Y., & Trapaidze, V. (2024). Regional precipitation regimes and evaluation of national precipitation datasets against satellite-based precipitation estimates, Republic of Georgia. *Journal of Hydrometeorology, 25* (4), 591–600. https://doi.org/10.1175/JHM-D-23-0116.1

Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., & Granier, A. (2005). On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment, 94* (2), 244–255. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.006

World Bank Group. *Climate Change Knowledge Portal*. https://climateknowledgeportal.worldbank.org/

Georgian Amelioration LLC. *Administrative data on the Sioni Reservoir and the Upper Samgori, Lower Samgori, and Khashmi irrigation systems*.

National Environmental Agency of Georgia. *Meteorological and hydrological station observations, 1981–2021*.

World Bank. (2022). *Watershed management and landscape restoration opportunities assessment for Sioni Reservoir watershed system in Georgia*. World Bank. https://hdl.handle.net/10986/38298

Georgian Water and Power. *Official letter No. OG26-1210393*.

National Statistics Office of Georgia. (2025). *Natural resources of Georgia and environmental protection 2024*. https://geostat.ge/media/75351/GAREMO_ENG_2024.pdf



ჰიდროლოგიური რესურსის განაწილების
შეფასება ჭინვალის წყალსაცავის
წყალშემკრები აუზისთვის

მდინარე იორი