International Partnerships Austria

ĊENN

ჰიდროლოგიური რესურსის განაწილების შეფასება ჭინვალის წყალსაცავის წყალშემკრები აუზისთვის

მდინარე არაგვი



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 8

მეთოდოლოგია 10

შერჩეული მდინარე 11

მრავალწლიური საშუალო ნალექისა და ტემპერატურის მაჩვენებლები 14

შერჩეული აუზის კლიმატის ცვლილების ნიმუშები 23

მოდელირებული ჰიდროლოგიური რეჟიმი 29

მდინარის საბაზისო მახასიათებლები 29

კაშხალი და წყალსაცავი 32

სარწყავი წყლის მოთხოვნა 33

კლიმატური სცენარები და დაშვებები 45

კლიმატის ცვლილების გავლენა შერჩეული აუზების საშუალო ხარჯზე 48

დასკვნა 51

წინასიტყვაობა

ჟინვალის წყალსაცავი-მდინარე არაგვის ჰიდროლოგიური სისტემა წარმოადგენს მკაცრად რეგულირებად მრავალმიზნობრივ ჰიდროლოგიურ კვანძს, რომლის ბუნებრივი წყლის ჩამონადენი მჭიდროდ არის დაკავშირებული წყალსაცავის სრულყოფილ ფუნქციონირებასთან, რაც მოიცავს ჰიდროენერგიის წარმოებას, მუნიციპალურ წყალმომარაგებას, სარწყავი წყლის მიწოდებას და ეკოლოგიური ხარჯების მართვას. არაგვის წყალშემკრები აუზის ფართობი ჟინვალის მონაკვეთისთვის შეადგენს დაახლოებით 1,898 კმ²-ს; საშუალო წლიური ხარჯი შეადგენს 43,8 მ³/წმ-ს (მრავალწლიური საშუალო), ხოლო საშუალო წლიური ჩამონადენი დაახლოებით 1,380 მლნ მ³-ს უდრის. სისტემა ერთდროულად ასრულებს რამდენიმე სტრატეგიულ ფუნქციას, მათ შორის: სასმელი და საყოფაცხოვრებო წყლით თბილისისა და მიმდებარე ტერიტორიების უზრუნველყოფას, სარწყავი მეურნეობის მხარდაჭერას, ქვედა დინებაში სანიტარიულ-ეკოლოგიური ხარჯით კალაპოტის უზრუნველყოფას და პიკური ჰიდროენერგიის გენერაციას.

ჰიდროლოგიური და ოპერაციული თვალსაზრისით, ანგარიშში იდენტიფიცირებული ძირითადი გამოწვევა არა მხოლოდ წყლის ხელმისაწვდომობაა, არამედ ეფექტური დაგროვებისა და რეგულირებული ხარჯების განაწილების გრძელვადიანი მდგრადობა. მიუხედავად იმისა, რომ წყალსაცავი დაპროექტებულია 520 მლნ მ³ საერთო მოცულობით და 370 მლნ მ³ სასარგებლო მოცულობით, 2013 წელს ჩატარებულმა კვლევებმა[2] აჩვენა, რომ ინერტული მასალით წყალსაცავის შევსების გამო სასარგებლო მოცულობა შემცირდა დაახლოებით 320 მლნ მ³-მდე; დამატებით, წყალსაცავის ოპერატორის მიერ მოწოდებული უახლესი ინფორმაციით, 2024 წლის აგვისტოში წყალსაცავში წყლის სასარგებლო მოცულობა დაახლოებით 310 მლნ მ³ იყო. სხვადასხვა საჯაროდ ხელმისაწვდომ ანგარიშებში, რომელიც შეეხება მდინარე არაგვს და ჟინვალის წყალსაცავს, ასევე აღნიშნულია, რომ წყალსაცავში დაგროვილია დაახლოებით 126 მლნ მ³ ინერტული მასალა და წლიური აორთქლების დანაკარგი შეფასებულია 6,3 მლნ მ³-ად. თუმცა საჯაროდ ხელმისაწვდომი მდინარის მყარი ჩამონადენის მონიტორინგისა და ბათიმეტრიის განახლებული მონაცემები არ არსებობს.

არაგვის ქვედა დინების რეჟიმი ასევე მნიშვნელოვანწილად დამოკიდებულია წყალსაცავიდან და ბოდორნას ბუფერული აუზიდან განხორციელებულ მართვად გაშვებებზე. ბუფერული აუზი ემსახურება წყალსაცავიდან გამოშვებული წყლის ხელახალ რეგულირებას და წყლის განაწილებას სხვადასხვა მომხმარებლებს შო-

[2] ჟინვალის (ბოდორნას მოდენიზების) გზშ

რის. წყალსაცავის ოპერატორის მიერ მოწოდებული მონაცემების მიხედვით, ქვედა დინებაში მუდმივად შენარჩუნებულია უწყვეტი ნაკადი 27,3 მ³/წმ ოდენობით, მათ შორის: 10,0 მ³/წმ სანიტარიულ-ეკოლოგიური მიზნებისთვის, 14,2 მ³/წმ წყალმომარაგებისთვის და 3,1 მ³/წმ სასოფლო-სამეურნეო მიწების სარწყავად. წყალსაცავის ოპერირების ეს მიდგომა აჩვენებს, რომ ქვედა დინების ჰიდროლოგიური პირობები უფრო მეტად განისაზღვრება ინფრასტრუქტურითა და გაშვების წესებით, ვიდრე ბუნებრივი რეჟიმით.

ჰიდროლოგიური მოდელირება გვაჩვენებს აღდგენილ და დაკვირვებულ ხარჯებს შორის დამაკმაყოფილებელ შესაბამისობას, რაც, მონაცემთა შეზღუდული რაოდენობის მიუხედავად, გამოყენებული მეთოდოლოგიის სანდოობაზე მიუთითებს. ზოგადად, მცენარეული საფარი გაზომვად როლს თამაშობს აუზის ჩამონადენის რეგულირებაში ევაპოტრანსპირაციის პროცესების მეშვეობით, რაც მიუთითებს მიწის საფრის მართვის მნიშვნელობაზე წყლის რესურსების მართვის დაგეგმვაში. გამომდინარე იქიდან, რომ კლიმატური ცვლილების შედეგად ნავარაუდევია ტემპერატურის ზრდა, იგი აუცილებლად გაზრდის ევაპოტრანსპირაციას და შეცვლის სეზონური ჩამონადენის განაწილებას, რაც გამოიწვევს წყალმცირე სეზონებზე წყლის კიდევ უფრო შემცირებას და სარწყავი წყლის მოთხოვნის ზრდას. მიუხედავად იმისა, რომ ნალექების მოსალოდნელი რაოდენობრივი ცვლილება ნათლად არ იკვეთება მოდელების უხეში სივრცითი რეზოლუციის გამო, მხოლოდ ტემპერატურის აშკარა ზრდაც საკმარისია ჰიდროლოგიური დეფიციტის გასაზრდელად.

შეჯამებისათვის შეიძლება ითქვას, რომ მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ წყლის რესურსის განაწილების და ხელმისაწვდომობის სამომავლო რისკი ძირითადად განპირობებულია შიდაწლიური გადანაწილების ცვლილებით და მოთხოვნის გაზრდით და არა წყლის აბსოლუტური დეფიციტით. შესაბამისად, შემარბილებელი ღონისძიებების ჭრილში შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ინფრასტრუქტურის მოდერნიზაცია და სისტემური დანაკარგების შემცირება იქნება ყველაზე ეფექტური გზა კლიმატური ცვლილებით გამოწვეული რისკის შესამცირებლად.

მიზანი

კვლევის მთავარ მიზანს წარმოადგენს წყალშემკრებ აუზში არსებული და სამომავლო წყლის რესურსის შეფასება და მასთან დაკავშირებული ანალიზი, თუ როგორ შეიძლება კლიმატურმა ცვლილებამ, წყლის მოთხოვნის ზრდამ (ტყის საფრის მდგომარეობის, ნიადაგის ეროზიისა და წყალსაცავის ინერტული მასალით შევსების შესახებ შეზღუდული მონაცემების გათვალისწინებით) იმოქმედოს წყლის განაწილებაზე და მთლიანად სისტემის მდგრადობაზე.

ვინაიდან წყალსაცავის ოპერირების ჩანაწერები, ბათიმეტრიული ინფორმაცია არსებული მოცულობა, წყლის დონე-რაოდენობის დამოკიდებულების მრუდი და მდინარის ხარჯის, როგორც ინერტული, ისე წყლის გრძელვადიანი დაკვირვებების რიგი, შეზღუდულად არის ხელმისაწვდომი, შეფასება დაგეგმილია როგორც სკრინინგის დონის ჰიდროლოგიური და წყლის განაწილების ანალიზი. შესაბამისად, კვლევა ფოკუსირებულია აუზის მასშტაბზე წყლის ხელმისაწვდომობის აღდგენაზე (გასული საუკუნის 80-იანი წლებიდან 2021 წლის ჩათვლით), სისტემის ძირითადი პარამეტრების 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.

- აუზისთვის რელევანტური ხელმისაწვდომი ჰიდრომეტეოროლოგიური, ტოპოგრაფიული, მიწის საფრის, სარწყავი და კლიმატური პროგნოზების მონაცემების შეკრება და მიმოხილვა.

- მიწისპირა დაკვირვების რიგის, კალიბრირებული სატელიტური ნალექის მონაცემებისა და წყლის ბალანსის რეკონსტრუქციის გამოყენებით საბაზისო კლიმატური და ჰიდროლოგიური პირობების განსაზღვრა.

- შერჩეული კლიმატური სცენარების პირობებში ტემპერატურისა და ნალექების პროგნოზირებული ცვლილებების შეფასება და ჩამონადენის აკუმულირებაზე მათი სავარაუდო გავლენების ანალიზი.

- არსებული წყლის რესურსებისა და ძირითადი სექტორული მოთხოვნების ბალანსის შეფასება, მათ შორის: სასმელი წყლით უზრუნველყოფა, სარწყავი წყლის მოთხოვნა, ეკოლოგიური ხარჯების მოთხოვნები და ჰიდროენერგიასთან დაკავშირებული რეგულირება.

- ტყის საფრის გავლენის შეფასება ჩამონადენზე, ფილტრაციაზე, ევაპოტრანსპირაციაზე და ჰიდროლოგიურ რესურსზე (წლიურ ჭრილში).

- შეზღუდული მონაცემების პირობებში ნიადაგის ეროზიისა და ინერტული მასალის წყალსაცავში აკუმულაციის იდენტიფიცირება, მისი გავლენა სასარგებლო მოცულობის ცვლილებაზე და წყლის განაწილებაზე მომხმარებლებს შორის.

- წყლის მართვის, ინფრასტრუქტურის ეფექტიანობის გაუმჯობესების, მონიტორინგის გაძლიერებისა და წყალშემკრები აუზის დაცვის რეკომენდაციების შეთავაზება აუზის მართვაში ჩართულ პასუხისმგებელი ინსტიტუციებისთვის.

შეფასების შედეგები მიზნად ისახავს, ხელი შეუწყოს ინფორმირებული გადაწყვეტილებების მიღებას კლიმატმედეგი წყლის განაწილების და წყალშემკრები აუზის მართვისთვის, ასევე, გამოავლინოს ძირითადი ხარვეზები, რომლებიც აუცილებელია წყალსაცავის სათანადო ოპერირების და მყარი ჩამონადენით მისი შევსების კვლევებისთვის.

ამასთანავე, უნდა აღინიშნოს, რომ კვლევა აქცენტირებულად გამოყოფს არაგვიჟინვალის წყალშემკრები აუზის ტყის დაცვით და წყალმარეგულირებელ მნიშვნელობას და ახორციელებს მის შეფასებას სტრატეგიული წყლის რესურსების გრძელვადიანი უზრუნველყოფის კონტექსტში. წყალსაცავის წყალშემკრები აუზის მდგრადობა პირდაპირ უკავშირდება თბილისის, მცხეთისა და რუსთავის სასმელი და საყოფაცხოვრებო წყლით უზრუნველყოფას, ასევე სარწყავი წყლის მიწოდებას, 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

არსებული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე შესრულებული ჰიდრომეტეოროლოგიური ანგარიშები და კვლევა წარმოადგენს საბაზისო ინფორმაციას 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.

კერძოდ, ანგარიშში განხილული წყალშემკრები აუზი დაკავშირებული არის თბილისის, მცხეთისა და რუსთავის სასმელი და საყოფაცხოვრებო წყლით მომარაგებასთან. ამასთან, წყალსაცავის ქვედა ბიეფში ენერგეტიკული, სარწყავი და ეკოლოგიური საჭიროებებისთვის წყლით უზრუნველყოფა დამოკიდებულია წყალშემკრები აუზის როგორც ჰიდროლოგიურ მდგრადობაზე, ისე მისი სასარგებლო მოცულობის შენარჩუნებასა და ეფექტურ კონტროლზე.

ამ კონტექსტში, კვლევის შედეგებზე დაყრდნობით, არაგვი-ჟინვალის აუზის ტყე უნდა განვიხილოთ, როგორც წყალმარეგულირებელი და ნიადაგდაცვითი ბუნებრივი ინფრასტრუქტურა.

ჰიდროლოგიური ანგარიში და მოდელირება, ვარჯის სტრუქტურისა და ფოთლის ფართობის ინდექსზე დაკვირვების საშუალებით, წარმატებით ასახავს მიწის საფრის ზოგად გავლენას ევაპოტრანსპირაციასა და ჩამონადენის განაწილებაზე, ასევე აჩვენებს მნიშვნელოვან ცვლილებებს მდინარის ჰიდროლოგიურ რეჟიმზე.

კერძოდ, სახეზეა მდინარის წლიური ხარჯის თვალსაჩინო ზრდა, რაც განპირობებულია მცენარეულობის დაბალ სიმჭიდროვესთან დაკავშირებული ევაპოტრანსპირაციისა და შეწოვის დანაკარგების შემცირებასთან. უფრო კონკრეტულად, მოდელირება აჩვენებს პიკური ხარჯების ამპლიტუდის ზრდას, როგორც მაქსიმალურ, ისე მინიმალურს, რაც გულისხმობს იმას, რომ შემცირებული მწვანე საფარი გამოიწვევს, ერთი მხრივ, გაზრდილ მაქსიმალურ ხარჯებს, ხოლო, მეორე მხრივ, კიდევ უფრო შემცირებულ მინიმალურ ჩამონადენს საბაზისო ხარჯის შემცირების გამო 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 ცვალებადობის 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, სახელმწიფომ, ტყის ინვენტარიზაციისა და ზონირების პროცესში, არაგვი-ჟინვალის წყალშემკრები აუზის ტყეები უნდა განიხილოს მაღალი დაცვითი ღირებულების ტყეებად, მიანიჭოს სპეციალური ტყის კატეგორია და დააწესოს შესაბამისი რეჟიმი, რაც ტყეების მართვის ძირითად მიზნად აღნიშნული ფუნქციის შენარჩუნებას და გაუმჯობესებას განსაზღვრავს.

პროექტის კლიმატური რისკების სკრინინგი

პროექტის არეალი მოიცავს საქართველოს, მდინარე არაგვი-ჟინვალის წყალსაცავის სისტემას, რომელიც მდებარეობს თბილისიდან ჩრდილო-დასავლეთით. ჟინვალის წყალსაცავი სტრატეგიულად მნიშვნელოვანი წყლის ობიექტია როგორც სარწყავი მეურნეობის, ჰიდროენერგეტიკული, ისე წყალმომარაგებისთვის. კვლევის მიზანია ჟინვალის წყალსაცავის ზედა დინების (წყალშემკრები აუზის) შეფასება, წყლის რესურსის განაწილება მოთხოვნასთან მიმართებით.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, წყალსაცავი წარმოადგენს მრავალმიზნობრივ, ექსპლუატაციაში მყოფ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობას, რომელიც უზრუნველყოფს სარწყავი სისტემების ფუნქციონირებას, ჰიდროენერგიის გენერაციას, ასევე თბილისის, მცხეთისა და რუსთავისთვის საყოფაცხოვრებო დანიშნულების წყლის მიწოდებას. შესაბამისად, მისი კლიმატური მგრძნობიარობა იზრდება იმის გამო, რომ სისტემა უკვე მუშაობს ოპერაციული წნეხის პირობებში _ მოთხოვნის მუდმივი ზრდის ფონ-

ზე. მიმდინარე შეფასებაში კლიმატური რისკი განისაზღვრება, როგორც ის ალბათობა, რომ ჰიდროკლიმატური პირობების ცვლილება, ინფრასტრუქტურის შეზღუდვებთან და წყლის ხელმისაწვდომობის ცვლილებასთან ერთად, შეამცირებს არაგვი-ჟინვალის ჰიდროკვანძის უნარს, დააკმაყოფილოს პრიორიტეტული წყლის გამოყენებები და შეინარჩუნოს წყალსაცავის სტაბილური მუშაობა. ამ კონტექსტში ყველაზე მნიშვნელოვანი ზემოქმედების ფაქტორებია: ჰაერის ტემპერატურის ზრდა, სეზონური ჩამონადენის გადანაწილების ცვლილება, მშრალ წლებში წყლის ჩამონადენის შემცირება, სარწყავი და საყოფაცხოვრებო წყალზე მოთხოვნის ზრდა, ასევე, ეროზიისადმი მიდრეკილი ზონებიდან მყარი ჩამონადენის ზრდა. ასევე უნდა ითქვას, რომ მონაცემთა სკრინინგი აჩვენებს, რომ ისტორიული ჰიდროლოგიური მახასიათებლების გამოსათვლელად საჭირო მიწისპირა მონიტორინგის მონაცემების დიდი ნაწილი ან „ხმაურიანია“, ან ძალიან შეზღუდულია, ამიტომ ძირითადი ანგარიშები განხორციელდება სატელიტური მონაცემების გამოყენებით.

ჰიდროკვანძის ოპერირებაზე ძირითადი გავლენა აქვს ჰიდროკლიმატურ ცვალებადობასა და წყლის სასარგებლო მოცულობის კლებას შორის ურთიერთდამოკიდებულების მრუდს. მიუხედავად იმისა, რომ წყალსაცავი დაპროექტებული იყო 520 მლნ მ³ საერთო მოცულობით და 370 მლნ მ³ სასარგებლო მოცულობით, 2013 წლისთვის (ჟინვალის EIA) სასარგებლო მოცულობა უკვე შემცირებული იყო დაახლოებით 320 მლნ მ³-მდე ინერტული მასალით შევსების გამო, ხოლო წყალსაცავში დაგროვილი ნალექის მოცულობამ მიაღწია დაახლოებით 126 მლნ მ³-ს[3]. ეს ხაზს უსვამს, რომ მომავალი ჰიდროლოგიური სტრესი განისაზღვრება არა მხოლოდ შემოდინების შესაძლო ცვლილებებით, არამედ იმითაც, რომ წყალსაცავს ნაკლები შესაძლებლობა ექნება, დააბალანსოს სეზონური ცვალებადობა განსაკუთრებით გვალვის პირობებში.

პირველ რიგში, მოსალოდნელია ჩამონადენის დროის სეზონური წანაცვლება, რადგან უფრო თბილი ზამთარი და გაზაფხულზე მაღალი ტემპერატურები ცვლის წყალშემკრებ აუზში თოვლის დაგროვებისა და დნობის პროცესებს იწვევს. მეორე _ ზაფხულის წყლის დეფიციტი, სავარაუდოდ, გაძლიერდება, რადგან მაღალი ტემპერატურა ზრდის სასოფლო-სამეურნეო სავარგულების წყლის მოთხოვნასა და აუზის ევაპოტრანსპირაციას სწორედ იმ პერიოდში, როდესაც სარწყავ წყალზე მოთხოვნა მაქსიმალურია. მესამე _ ჰიდროლოგიური ცვალებადობა და მშრალი წლებისადმი მგრძნობიარობა, სავარაუდოდ, გაიზრდება, რაც შეამცირებს წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობაზე დაფუძნებული მიწოდების სანდოობას მაშინ, როდესაც დაგროვება უკვე შეზღუდულია და მოსალოდნელია, რომ კიდევ უფრო შეიზღუდება. მეოთხე _ ეროზიისა და მყარი ჩამონადენის წყალსაცავში აკუმულირების

[3] GWP - N OG26-1210393

რისკი შეიძლება გაიზარდოს უფრო ინტენსიური ნალექების ეპიზოდების დროს, განსაკუთრებით მშრალი პერიოდების შემდეგ დეგრადირებულ ფერდობებზე, მცირე ხევებში, დამუშავებულ მიწებზე და დარღვეულ კალაპოტურ ზონებში. მეხუთე _ ოპერაციული რისკი, რომელიც წარმოიშობა კლიმატური სტრესის ურთიერთქმედებით სისტემის შემცირებულ ეფექტურობასთან (წყალსაცავში წყლის სასარგებლო მოცულობის შემცირება), არასაკმარისი მონიტორინგისა და წყალსაცავის არასათანადო „გაწმენდის“ პირობებში.

საერთო ჯამში, სკრინინგი მიუთითებს, რომ წყალშემკრები აუზი ექვემდებარება საშუალო-მაღალ, თუმცა მართვად კლიმატურ რისკს; ყველაზე დიდი რისკი წარმოიშობა არა მხოლოდ წყლის რესურსის არსებობასთან, არამედ დათბობის, წყლის მოთხოვნის გაზრდის, ინერტული მასალის და წყალშემკრების მდგომარეობის ზოგადი გაუარესებით, განსაკუთრებით მაშინ, როცა შეზღუდული ოპერაციული მოქნილობა სახეზე გვაქვს.

მეთოდოლოგია

გამომდინარე იქიდან, რომ მონაცემები (ყოველდღიური და საათობრივი დაკვირვების რიგი) შეზღუდულია და სრულყოფილად კალიბრირებული წყალსაცავის ოპერირების მოდელის შექმნა შეუძლებელია. კვლევა დაფუძნებულია სატელიტურ მონაცემებზე და კარგად აპრობირებულ მეთოდოლოგიაზე, რომელიც იყენებს ნალექს, ტემპერატურას და წყლის ბალანსის გამოთვლისათვის საჭირო მათემატიკურ ფორმულებს, ასევე, კლიმატის ცვლილების დამატებით მონაცემებს და დამხმარე ინფორმაციას სხვადასხვა საჯაროდ ხელმისაწვდომი კვლევებიდან.

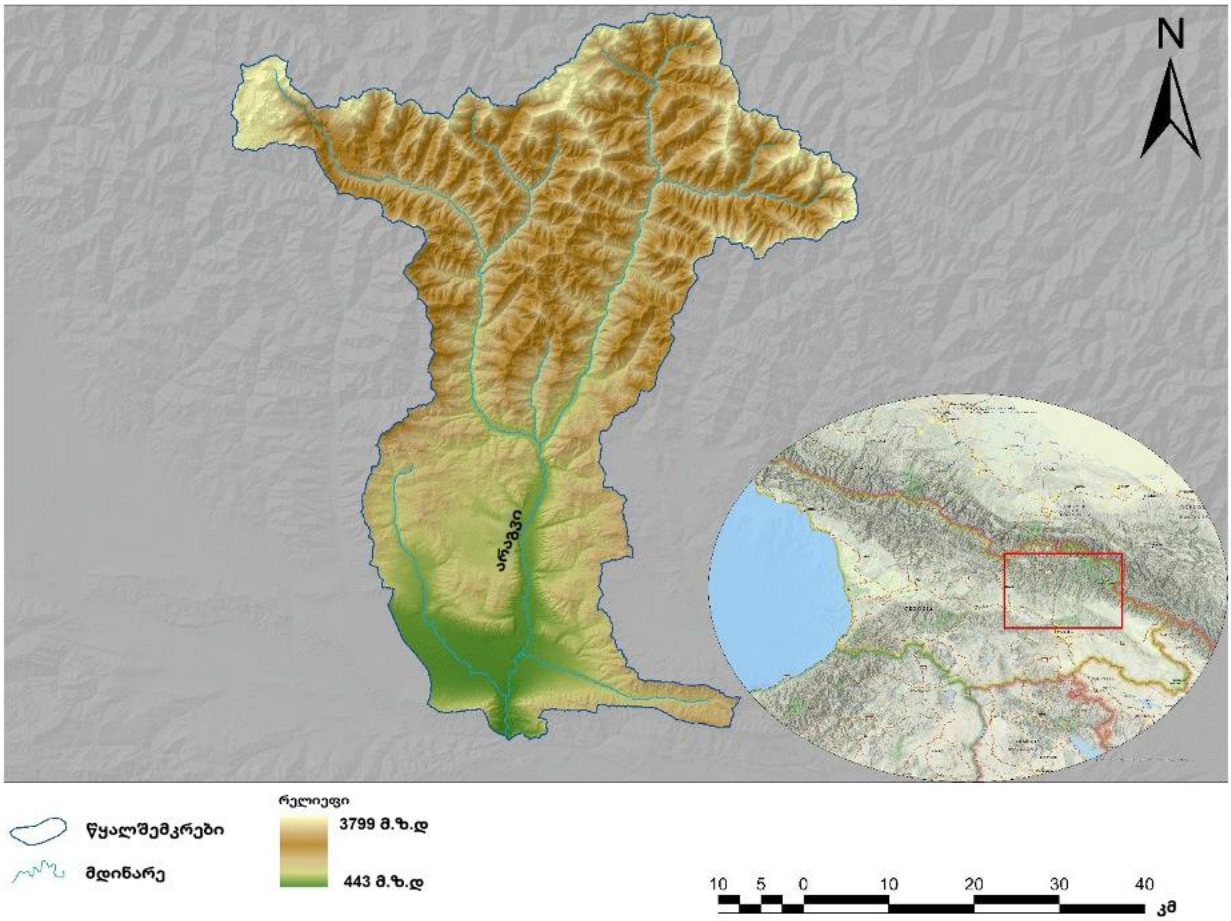
ხელმისაწვდომი ნალექისა და ტემპერატურის მონაცემები შეგროვდა მიწისპირა სადგურებიდან და დაემატა geoCHIRPS-ის სატელიტურ მონაცემთა ნაკრებს, რათა გაუმჯობესებულიყო აუზის მასშტაბზე ნალექის ცვალებადობის სივრცითი განაწილება. შემდეგ აუზის წყლის ხელმისაწვდომობა აღდგა გამარტივებული წყლის ბალანსის მეთოდით, რომელიც ეფუძნება ნალექს, ტემპერატურას, ევაპოტრანსპირაციასა და ჩამონადენის შეფასებას. ეს მიდგომა მიზნად ისახავს ხელმისაწვდომი წყლის რესურსების წლიური მასშტაბის და ცვალებადობის შეფასებას და არა წყალსაცავის ყოველდღიური ოპერაციების სიმულაციას.

კლიმატის ცვლილების მიმართ აუზის ჰიდრომეტეოროლოგიური დამოკიდებულება შეფასდება World Bank Group Climate Change Knowledge Portal-ის პროგნოზების, ასევე CMIP6 მონაცემების გამოყენებით. რადგანაც კლიმატური მოდელები აუზის ძლიერი ტოპოგრაფიული გავლენის და მაღალი გრადიენტის გამო სათანადოდ ვერ ასახავს ნალექის გადანაწილებას წყალშემკრებ აუზზე, აღნიშნული პარამეტრის გავლენა უფრო ფრთხილად და ფართოდ განიმარტება კვლევის პროცესში.

შერჩეული მდინარე

მდინარე არაგვი, აღმოსავლეთ საქართველოს ერთ-ერთი უდიდესი მდინარე, სათავეს იღებს ხორისარის მთის სამხრეთ ფერდობზე (თეთრი არაგვი) მდებარე წყაროებიდან, ზღვის დონიდან 3.120 მ სიმაღლეზე და ჯერ ჩაედინება ჟინვალის წყალსაცავში, ხოლო შემდეგ მდინარე მტკვარში, მცხეთასთან ახლოს. მისი საერთო სიგრძე 105 კმ-ია, ხოლო წყალშემკრები აუზის ფართობი დაახლოებით 2.754 კმ²-ს შეადგენს. აუზის ამ ნაწილს ახასიათებს ძლიერი ჰიდროგრაფიული ქსელი, რომელიც შედგება მრავალი მცირე და საშუალო შენაკადისგან, მათ შორის: შავი არაგვი, ხევსურეთის არაგვი, ნარეკვავი და სხვ. არაგვის აუზს ასიმეტრიული ფორმა აქვს და მოიცავს დიდი კავკასიონის ქედსა და მის სამხრეთ განშტოებებს, მათ შორის, ყელის ვულკანურ პლატოსა და მათ შორის არსებულ V ფორმის ღრმა ხეობებს. წყალგამყოფის სიმაღლეები მცირდება 3,700-4,300 მ.ზ.დ-დან (დიდი კავკასიონი) 400-450 მ.ზ.დ-მდე მცხეთის სიახლოვეს. ყველაზე დაბალი რეგიონი, შიდა ქართლი, წარმოადგენს ფართო ვაკეს. აუზის ზემო დინების ამგებელი ქანების გეოლოგიაში დომინირებს ვულკანური ქანები, ხოლო პალეოზოური, იურული და ცარცული ქვიშაქვები, ეოცენურ თიხებთან ერთად, ქმნის მთისწინეთის სტრუქტურას. ქართლის ველი ძირითადად შედგება ძველი და თანამედროვე ალუვიური დანალექებისგან. მდინარის გასწვრივ ვაკეებზე ჭარბობს ყავისფერი ნიადაგები. მცენარეულობა იცვლება სიმაღლის მიხედვით: 2.500 მ-ზე ზემოთ ალპური თანასაზოგადოებებია, მის ქვემოთ სუბალპური სარტყელი, მთისწინეთში _ შერეული ფოთლოვანი ტყეები, ხოლო ქართლის ვაკეზე ფართო სასოფლო-სამეურნეო ტერიტორიები. მდინარის ხეობის მორფოლოგია მნიშვნელოვნად იცვლება დინების მიხედვით. არაგვი იკვებება თოვლის დნობით, ნალექითა და მიწისქვეშა წყლებით. მისი ჰიდროლოგიური რეჟიმი ხასიათდება გამოკვეთილი გაზაფხულის წყალმოვარდნებით, რომლებიც სეზონურ თოვლის დნობას უკავშირდება და შედარებით დაბალი ხარჯებით ზაფხულსა და ზამთარში. გაზაფხულზე წლიური ჩამონადენის დაახლოებით 47-58% მოდის, რაც მას ყველაზე წყალუხვ პერიოდად აქცევს. ზაფხული შეადგენს 22-27%-ს, რაც აღემატება როგორც შემოდგომის, ისე ზამთრის წილს. ზოგიერთ წლებში ძლიერმა და თავსხმა წვიმებმა შეიძლება გააძლიეროს და დაემთხვეს თოვლდნობით გამოწვეულ წყალმოვარდნებს და გამოიწვიოს კატასტროფული წყლის დონის მატება. მაგალითად, 1968 წლის 18-19 აპრილის წყალმოვარდნა, რომლის დროსაც თბილისთან ახლოს წყლის დონე 6-6,5 მ-ით გაიზარდა. მინიმალური ხარჯები, როგორც წესი, ზამთარში ფიქსირდება.

სურათი 1. არაგვის მდინარის აუზი



რეგიონული კლიმატი შედარებით მშრალია, ცივი ზამთრებითა და თბილი ზაფხულით. ყველაზე მშრალი პერიოდი მოდის შემოდგომასა და ზამთარზე, როდესაც ნალექის წლიური ოდენობა დაახლოებით 200 მმ-ია, ხოლო ყველაზე ნოტიო პერიოდი მოიცავს გაზაფხულსა და ზაფხულის დასაწყისს; ამ დროს ნალექი აუზის მასშტაბით 300-დან 900 მმ-მდე მერყეობს ტოპოგრაფიისა და მდებარეობის მიხედვით. ნალექის განაწილება დიდწილად განისაზღვრება გეომორფოლოგიით, რის შედეგადაც წყალგამყოფზე ყალიბდება გამორჩეულად მაღალი ჩამონადენის ფენა. სეზონური ნალექის დინამიკა წლის განმავლობაში ნათლად ცვალებადია. ყველაზე მაღალი ნალექი მაისში ფიქსირდება (119 მმ), რაც გვიანი გაზაფხულის ნალექების პიკს წარმოადგენს. ყველაზე დაბალი მნიშვნელობები იანვარშია (28 მმ), რაც მშრალი ზამთრის სეზონის დაწყებას ასახავს. ნალექი მკვეთრად იზრდება მარტიდან მაისამდე, რაც უფრო ნოტიო პირობებზე გადასვლას მიუთითებს. მეორე პიკი ივნისშია (103 მმ), რაც ადრეულ ზაფხულშიც ძლიერი ნალექიანობის გაგრძელებაზე მიუთითებს. ივნისიდან აგვისტომდე ნალექი თანდათან მცირდება, შემდეგ ოქტომბერში

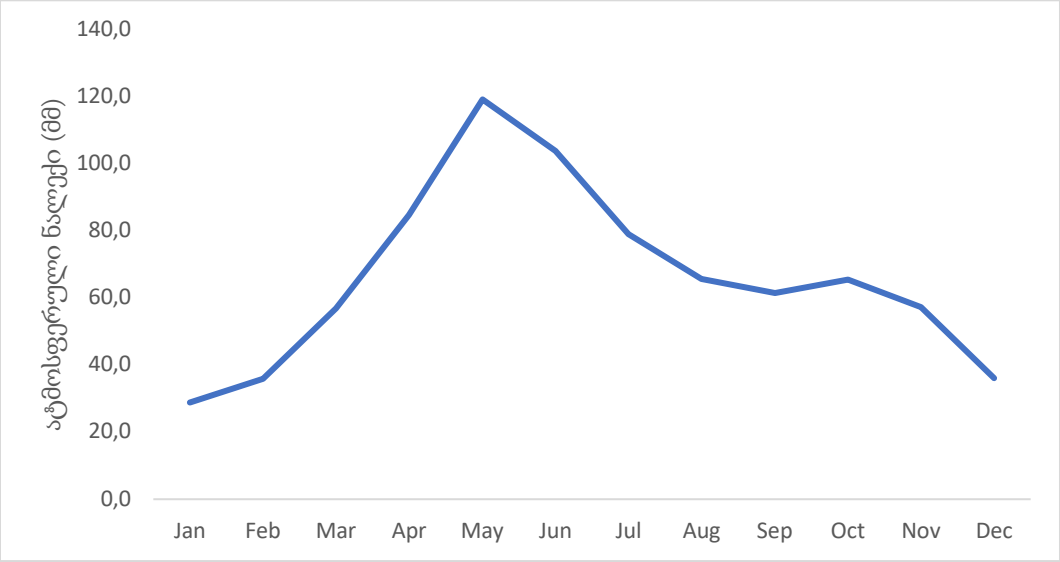
მცირე ზრდა შეინიშნება, რაც, სავარაუდოდ, მეორეული ნოტიო პერიოდის დაწყებას ან მშრალი სეზონის დასრულებას უკავშირდება. დაკვირვების რიგის მიხედვით დეკემბერი, იანვარი და თებერვალი ყველაზე მშრალი თვეებია.

ცხრილი 1. არაგვის ზოგადი ინფორმაცია

წყალშემკრები აუზის ფართობი (კმ²)	**2,754**
საერთო სიგრძე (კმ)	105
დაქანება	0.55
საშუალო სიმაღლე (მ)	1611.06

შედეგად, მდინარის ხარჯის რეჟიმს ახასიათებს ძლიერი სეზონური ცვალებადობა, რომელიც განპირობებულია როგორც ნალექის გადანაწილებით, ისე მიწისქვეშა წყლების მონაწილეობით. აღნიშნულს მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს წყლის რესურსების მართვისა და ეკოლოგიური მდგრადობის შენარჩუნებისათვის.

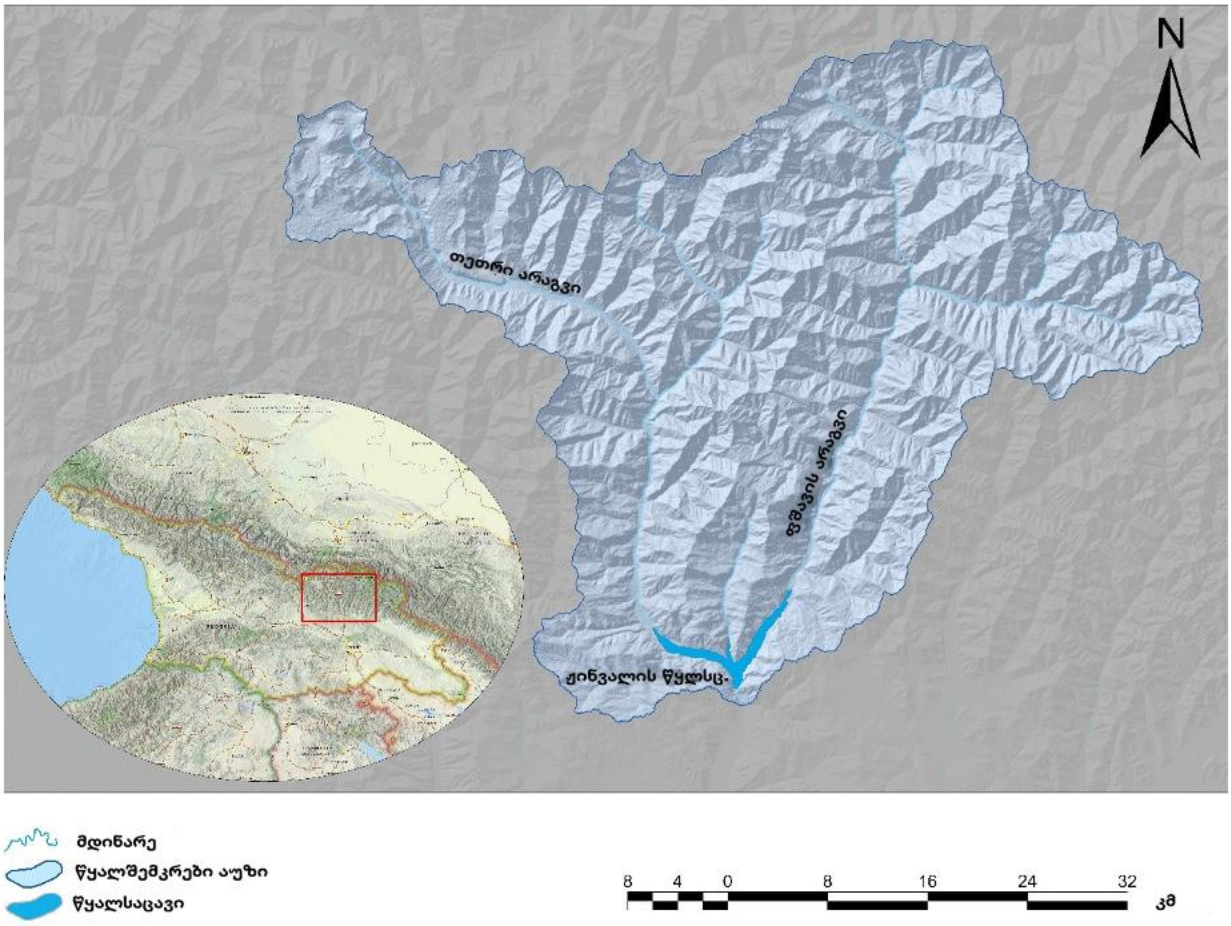
სურათი 2. თვიური ნალექის განაწილება წყალშემკრებში[2]



მრავალწლიური საშუალო ნალექისა და ტემპერატურის მაჩვენებლები

არაგვის 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 ჰიდრომეტეოროლოგიური მაჩვენებლების ინტერპრეტაცია ძირითადად ეყრდნობა geoCHIRPS ნალექის მონაცემთა ნაკრებს, ხოლო ხელმისაწვდომი ტემპერატურის სადგურები გამოიყენება გრძელვადიანი დათბობის ტენდენციებისა და სეზონური კლიმატური ცვალებადობის შესაფასებლად. ეს კომბინირებული მიდგომა უზრუნველყოფს უფრო თანმიმდევრულ წარმოდგენას იმ კლიმატურ ფაქტორებზე, რომლებიც აკონტროლებს ჩამონადენის გენერაციას და წყლის მოთხოვნას აუზის მასშტაბით.

ანალიზი ასევე ეყრდნობა გაერო-ს კლიმატის ცვლილების სამთავრობათაშორისო პანელის (IPCC) უახლეს პროგნოზებს, რომლებშიც 1994-2014 წლების მონაცემებია გამოყენებული, როგორც სანიმუშო პერიოდი. ეს პროგნოზები საშუალებას იძლევა, შეფასდეს წყალშემკრებ აუზში მიმდინარე კლიმატური პარამეტრების ცვლილებები. მოდელირებული პროგნოზები დამატებით შეივსო ადგილობრივი მიწისპირა სადგურების მონაცემებით (არსებობის შემთხვევაში), რომლებიც ადასტურებს მდინარის აუზში მიმდინარე კლიმატურ ცვლილებებს.



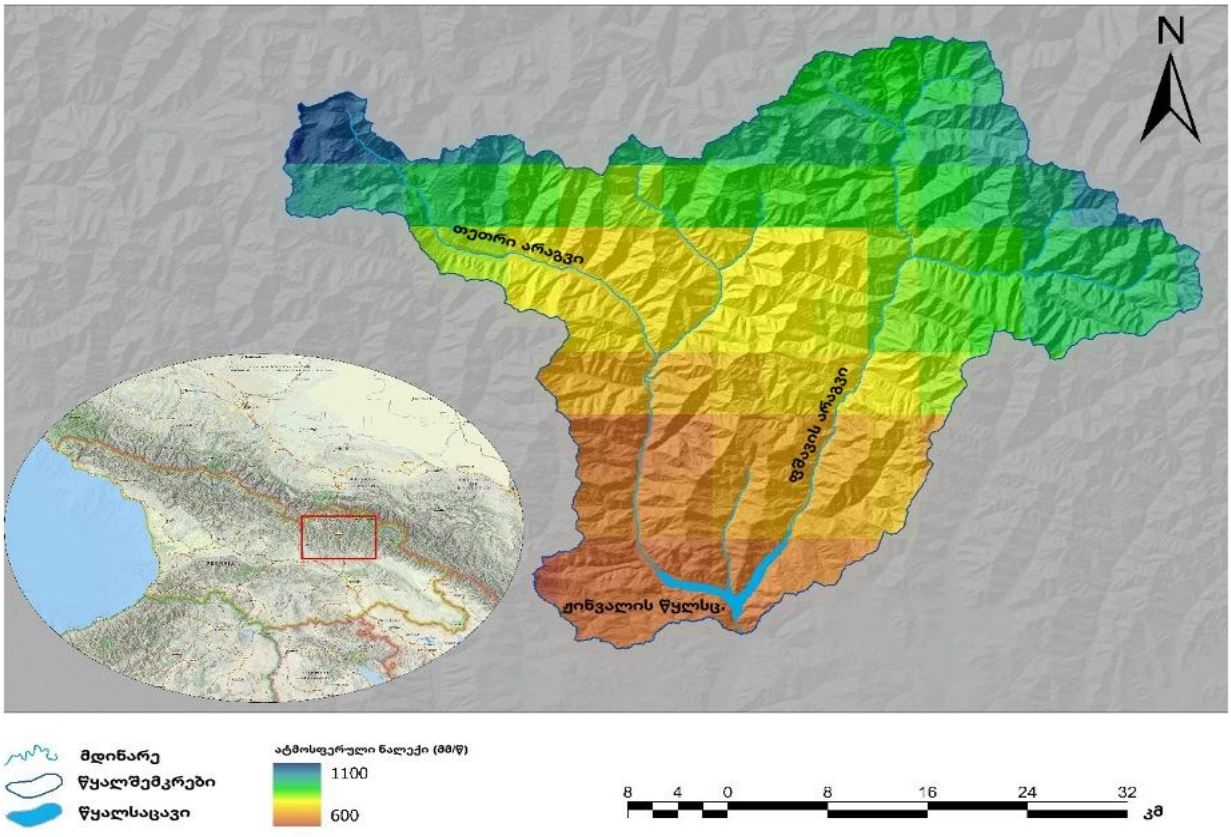
სურათი 3. ჟინვალის წყალსაცავის მდებარეობა შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში (კვლევის არეალი)

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

ცხრილი 2. შერჩეული (საანგარიშო) წყალშემკრები აუზის ზოგადი ინფორმაცია

წყალშემკრები აუზის ფართობი (კმ^2)	1,898
საერთო სიგრძე (კმ)	68
დაქანება	0.63
საშუალო სიმაღლე (მ)	1914

ანალიზში გამოყენებულია 1981-დან 2021 წლამდე (ყოველთვიური) შეგროვებული ნალექის და ტემპერატურის მონაცემები შემდეგი ადგილმდებარეობებისათვის: ფასანაური, თიანეთი და თბილისი. მონაცემები გაანალიზებულია საკვლევი პერიოდის განმავლობაში ნალექების ტენდენციების, ცვალებადობისა და ნალექების რეჟიმში ნებისმიერი მნიშვნელოვანი ცვლილების გამოსავლენად.

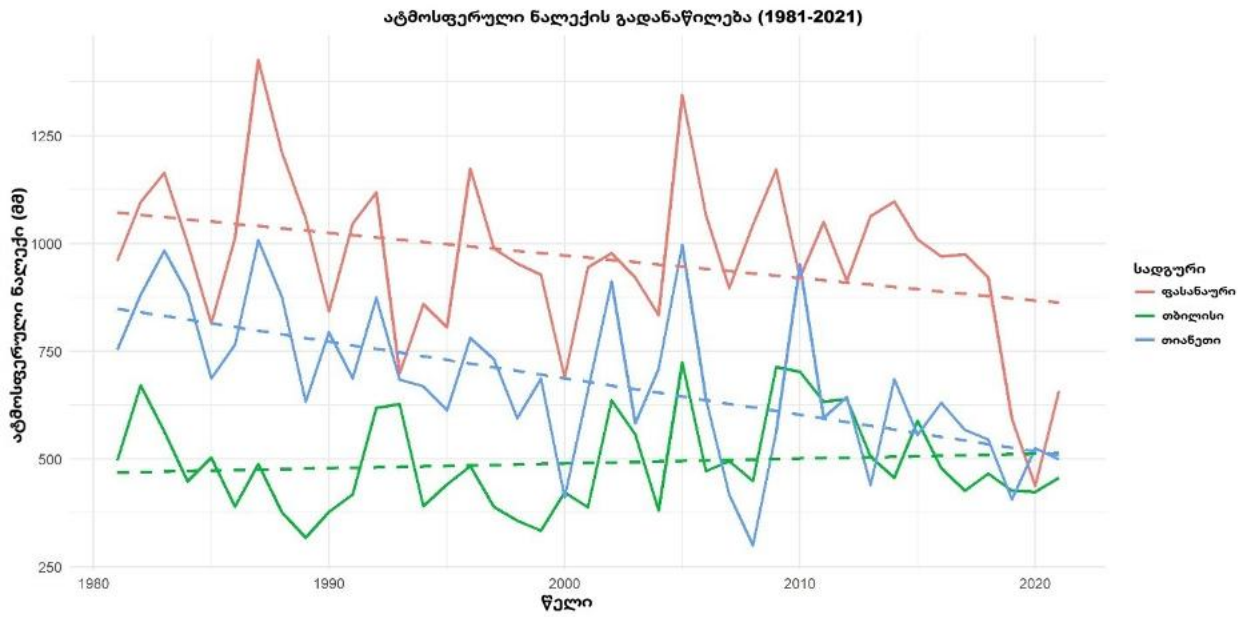


სურათი 4. მრავალწლიური საშუალო ნალექის განაწილება (1981-2021)

1981-2021 წლებში ფასანაურის, თიანეთისა და თბილისის ნალექის მაჩვენებლები აჩვენებს მკვეთრ სივრცით გრადიენტს და მნიშვნელოვან წლიდან წლამდე ცვალებადობას. ფასანაურში თანმიმდევრულად ფიქსირდება ყველაზე მაღალი ჯამები, თიანეთი გამოირჩევა შუალედური მნიშვნელობებით, ხოლო თბილისი ჩანაწერის მთელ პერიოდზე შედარებით უფრო დაბალია. ეს ასახავს ოროგრაფიული გავლენის მნიშვნელობას როგორც ზედა, მთიან ზონაში, ისე თანდათანობით კლებას დაბლობების მიმართულებით.

1980-იანი წლები ხასიათდება გაზრდილი ცვალებადობით, განსაკუთრებით ფასანაურში, სადაც 1987 წელს დაფიქსირდა პიკი, რომელიც მონაცემების მიხედვით 1400 მმ-ს აჭარბებს. 1990-იან წლებში შეინიშნება ზომიერი სტაბილიზაცია, თუმცა რამდენიმე მშრალი წელი ფიქსირდება 1993-1995 წლების პერიოდში. 2001-2010 ათწლეული გამოირჩევა ნალექის მნიშვნელოვანი რაოდენობით, რისი მაჩვენებელიცაა აუზის მასშტაბით მაქსიმუმი 2005 წელს და მომატებული ჯამები 2009-2010 წლებში ყველა სადგურზე, თუმცა გაზრდილია პიკებს შორის სხვაობები.

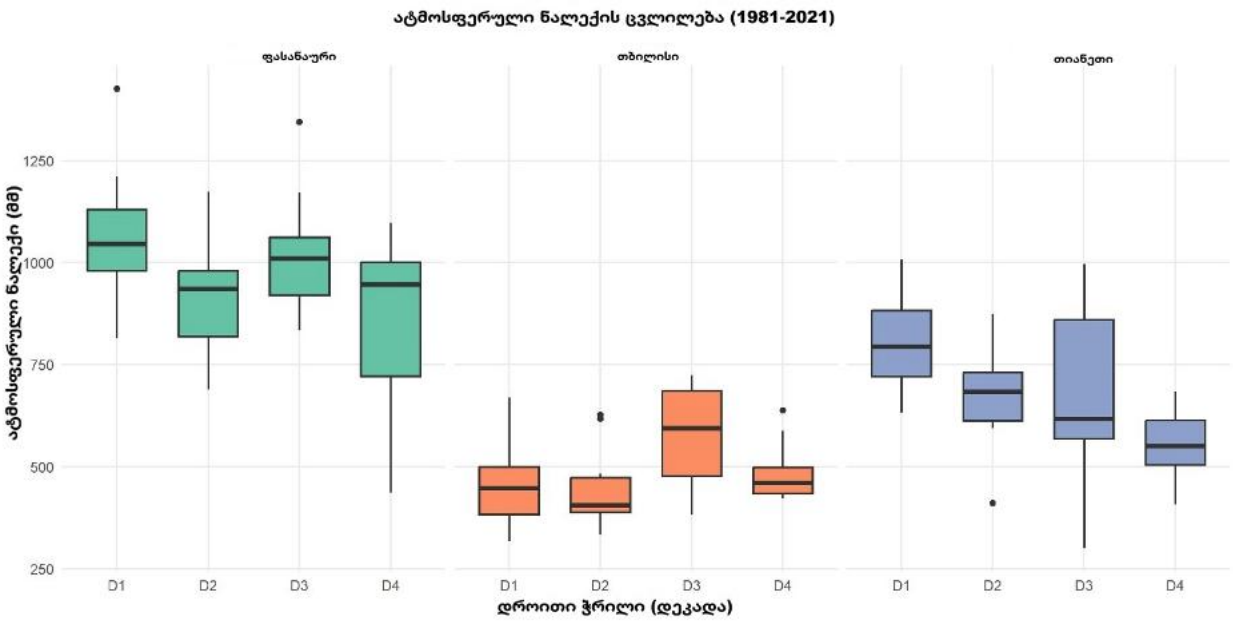
სურათი 5. ნალექის ცვლილება დროში მოცემულ ლოკაციებზე არსებული ნალექის სადგურების მონაცემების მიხედვით



2011 წლის შემდეგ ცვალებადობა კვლავ შენარჩუნებულია, თუმცა უკიდურესი პიკები შედარებით ნაკლებად გვხვდება. აღსანიშნავია, რომ 2019-2020 წლებში ფასანაურის დაკვირვების რიგი აჩვენებს მნიშვნელოვნად მშრალ პირობებს წინა ათწლეულებთან შედარებით, ხოლო თბილისი და თიანეთი რჩება შედარებით სტაბილურად, თუმცა დაბალი მასშტაბის მნიშვნელობებით.

საერთო ჯამში, მთელ პერიოდზე მკაფიო, ერთმნიშვნელოვანი გრძელვადიანი ტენდენცია არ იკვეთება. ამის ნაცვლად, დომინანტურ სიგნალს წარმოადგენს ძლიერი წლიდან წლამდე და ათწლეულური ცვალებადობა, როდესაც ყველა სადგურზე ერთდროულად ვლინდება თანხვედრილი ტენდენციები _ ნოტიო და მშრალი წლების მონაცვლეობის კუთხით.

სურათი 6. ნალექის განაწილება ადგილმდებარეობების მიხედვით



საერთო ჯამში, უმეტეს სადგურებზე წლიური ნალექი კლებად ტენდენციას აჩვენებს; თუმცა „წელი-ნალექი“ ხაზოვანი დამოკიდებულება უმეტეს შემთხვევაში სტატისტიკურად მნიშვნელოვნად არ არის დადასტურებული (ცხრილი 4). შესაბამისად, შეიძლება ითქვას, რომ კლიმატის ცვლილებამ უფრო მეტად იმოქმედა სეზონური ნალექის განაწილებაზე მაშინ, როდესაც წლიური საშუალო მნიშვნელობა ძირითადად სტაბილურად რჩება.

ცხრილი 3. მრავალწლიანი საშუალო ნალექი და მისი თვიური განაწილება სადგურების მიხედვით (1981-2021)[2]

	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 ($R^2 = 0.110$), რაც მიუთითებს, რომ წლიდან წლამდე ცვალებადობის მხოლოდ დაახლოებით 11% აიხსნება დროით, უარყოფითი დახრა მაინც მიანიშნებს წლიური ნალექის ნელ, გრძელვადიან კლებაზე. ოთხი ათწლეულის განმავლობაში ეს შეესაბამება დაახლოებით 200 მმ-ზე მეტ კუმულაციურ შემცირებას, რაც ჰიდროლოგიურად მნიშვნელოვანია სადგურის მაღალი საბაზისო ჯამების გათვალისწინებით.

თბილისი აჩვენებს მცირედ დადებით ზრდას (დახრა = +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 ძალით ($R^2 = 0.346$). ნალექის ცვალებადობის დაახლოებით 35% დაკავშირებულია დროით ტრენდთან, რაც მიუთითებს კვლევის პერიოდში არსებით და მდგრად კლებაზე.

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

სადგური	P Value	Slope	R squared
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 ქვეაუზებისთვის იდენტიფიცირებულია თვიური და წლიური ნალექის სიხშირე/ინტენსივობა (სურათი 6).

ცხრილი 5-ში წარმოდგენილია შერჩეული ქვეაუზისთვის წლიური ნალექის ჯამები (მმ), რომელიც მოიცავს 41-წლიან პერიოდს 1981-დან 2021 წლამდე; ამ პერიოდში მუდმივად ზრდადი ან კლებადი გრძელვადიანი ტენდენცია არ იკვეთება. თუმცა ლოკაციებს შორის საშუალო ნალექის მკაფიო განსხვავებები ხაზს უსვამს რეგიონული ტოპოგრაფიის, სიმაღლისა და კლიმატური ქვეზონების გავლენას.

საერთო ჯამში, მონაცემი აჩვენებს ნალექის მკაფიო გრადიენტს: მთიან და მაღალ-მთიან სადგურებზე (ფასანაური) ნალექი უფრო მაღალია, ვიდრე დაბლობ ტერიტო-რიებზე, როგორიცაა თბილისი.

ცხრილი 5. ნალექის განაწილება შერჩეულ წყალშემკრებში (geoCHIRPS, 1981-2021)

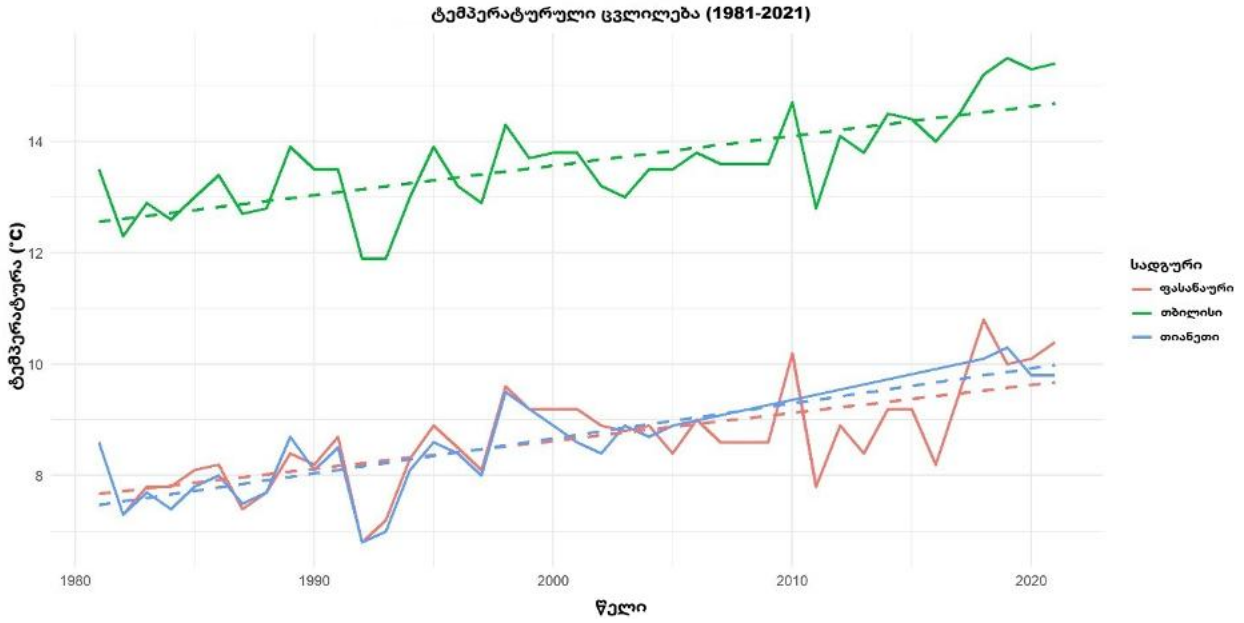
წელი	მმ	წელი	მმ
1981	914.8	2002	1025.3
1982	989.0	2003	805.0
1983	1022.2	2004	806.6
1984	885.2	2005	1162.5
1985	866.3	2006	867.4
1986	856.0	2007	749.4
1987	1118.6	2008	727.6
1988	1042.2	2009	919.0
1989	907.1	2010	904.7
1990	859.3	2011	978.5
1991	855.3	2012	840.0
1992	1029.3	2013	794.4
1993	781.0	2014	896.0
1994	852.8	2015	861.8
1995	822.5	2016	891.2
1996	899.0	2017	817.4
1997	948.8	2018	751.4
1998	762.7	2019	693.7
1999	827.0	2020	653.6
2000	643.9	2021	751.2
2001	774.9	Aver	867.2

ზემოთ მოცემული სატელიტური მონაცემების (geoCHIRPS) საფუძველზე შეგვიძლია ვთქვათ, რომ არაგვის აუზში მრავალწლიანი საშუალო ნალექი შეადგენს 867 მმ/წელს.

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

სამივე სადგურისათვის p-მნიშვნელობები მნიშვნელოვნად დაბალია გავრცელებულ მათემატიკურ ზღვართან შედარებით (მაგ. 0,05 ან 0,01), რაც საშუალებას იძლევა, უცვლელობის ჰიპოთეზა მაღალი სანდოობით უარვყოთ. p-მნიშვნელობები შესაბამისი სადგურებისათვის მიუთითებს სტატისტიკურად მნიშვნელოვან ტემპერატურულ ცვლილებას ფასანაურში, თიანეთსა და თბილისში 1981 წლიდან პერიოდში. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ამ სადგურებზე დაფიქსირებული ტემპერატურის ცვლილებები ძალიან ნაკლებად არის შემთხვევითი და უფრო მეტად რეალურ, გრძელვადიან დათბობის ტენდენციას ასახავს.

სურათი 7. საშუალო ტემპერატურის ცვლილება შერჩეული სადგურების მონაცემების მიხედვით



კვლევის პერიოდში თიანეთში, ფასანაურსა და თბილისში დაფიქსირებული ტემპერატურის ცვლილებაზე გავლენას ახდენს რამდენიმე ფაქტორი, მათ შორის: სიმაღლე, გეოგრაფიული მდებარეობა და ლოკალური კლიმატური თავისებურებები. მიუხედავად იმისა, რომ სამივე ლოკაციისთვის გამოვლინდა მნიშვნელოვანი გრძელვადიანი ტემპერატურული ტენდენციები, დამატებითი სადგურებისა და განმარტებითი ცვლადების ჩართვა უზრუნველყოფდა ტემპერატურის ცვლილების ძირითადი განმაპირობებელი ფაქტორების უფრო ღრმა ანალიზს. მიუხედავად ამისა, განსხვავებით ნალექისაგან, ტემპერატურა არის ფართობზე გავრცელებული პარამეტრი და გამოირჩევა მაღალი კორელაციით. შესაბამისად, მიღებული შედეგები შეგვიძლია მივიჩნიოთ სანდოდ და ჰიდროლოგიური ანგარიშებისათვის გამოსადეგად.

ცხრილი 6. შერჩეული სადგურებისთვის მრავალწლიანი საშუალო ტემპერატურის ცვალებადობა

	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

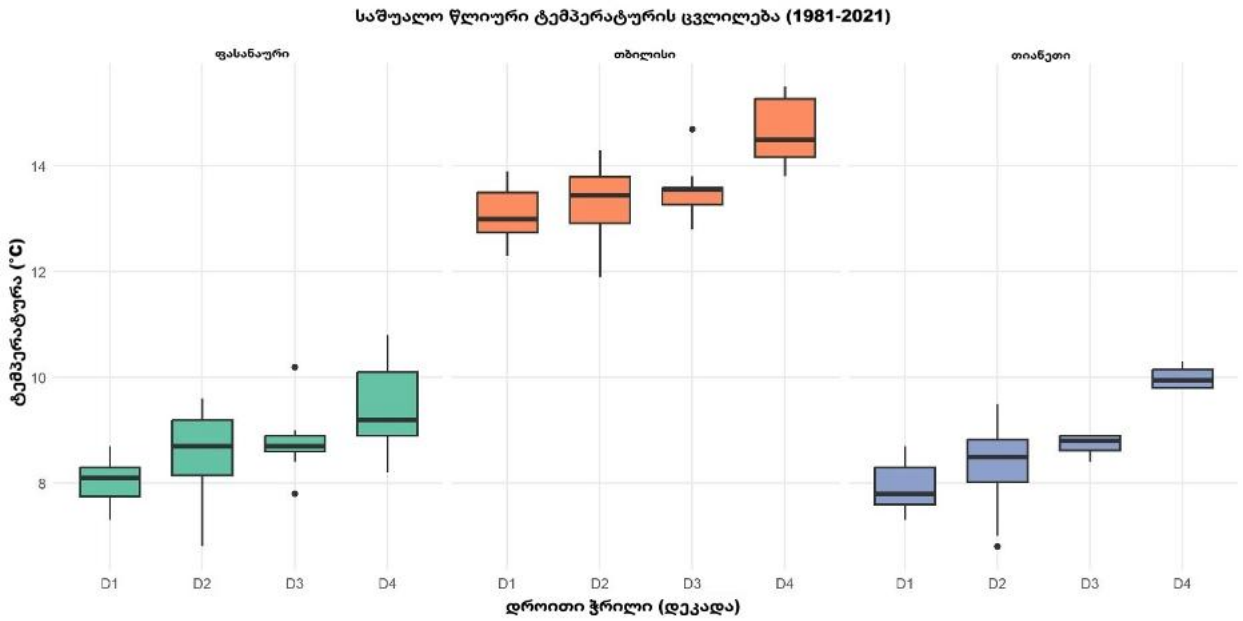
1981-2021 წლების ტემპერატურის მონაცემები ფასანაურის, თბილისისა და თიანეთისთვის აჩვენებს მკვეთრ აღმავალ ტენდენციას, რაც რეგიონში დათბობის მკაფიო სიგნალზე მიუთითებს. მაგალითად, თბილისში საშუალო წლიური ტემპერატურა გაიზარდა დაახლოებით 13,1°C-დან (1980-იანი წლების დასაწყისი) 14,1°C-ზე მეტამდე 2021 წლისთვის. სტატისტიკურმა ანალიზმა სამივე სადგურისთვის აჩვენა ძალიან დაბალი p-მნიშვნელობები (ცხრილი 7), რაც ადასტურებს, რომ დაკვირვებული დათბობა ძალიან ნაკლებად არის შემთხვევითი ცვალებადობის შედეგი. ამ ტენდენციების თანამიმდევრულობა რამდენიმე სადგურზე მიუთითებს ტემპერატურის ცვლილების რეგიონულ და არა მხოლოდ ლოკალურ მასშტაბზე.

ეს შედეგები თანხვედრაშია გლობალური კლიმატის ცვლილების საერთო ტენდენციებთან და გულისხმობს პოტენციურ ლოკალურ ზემოქმედებებს, მათ შორის: ნალექის რეჟიმების ცვლილებას, ექსტრემალური ამინდის მოვლენების სიხშირის ზრდას, მცენარის 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 სადგურებისთვის



ზემოთ წარმოდგენილი შედეგების საფუძველზე ფასანაურის, თბილისის და თიანეთის გრძელვადიანი ტემპერატურის მონაცემები იძლევა ძლიერ მტკიცებულებას რეგიონში მნიშვნელოვანი დათბობის ტენდენციების შესახებ. ასევე აღსანიშნავია, რომ ეს ტემპერატურის მონაცემები გამოყენებული იქნება ევაპოტრანსპირაციის განსასაზღვრად.

შერჩეული აუზის კლიმატის ცვლილების ნიმუშები

CC[2] სცენარში, საცნობარო პერიოდთან (1995-2014 წლები) შედარებით, შერჩეული მომავალი პერიოდისთვის (2021-2099) მრავალწლიანი ნალექი მერყეობს და ცვლილება დამოკიდებულია ემისიების სცენარზე. ამასთან, ზოგიერთ თვეში ნალექი იზრდება (ცხრილი 8), განსაკუთრებით ზამთრის თვეებში.

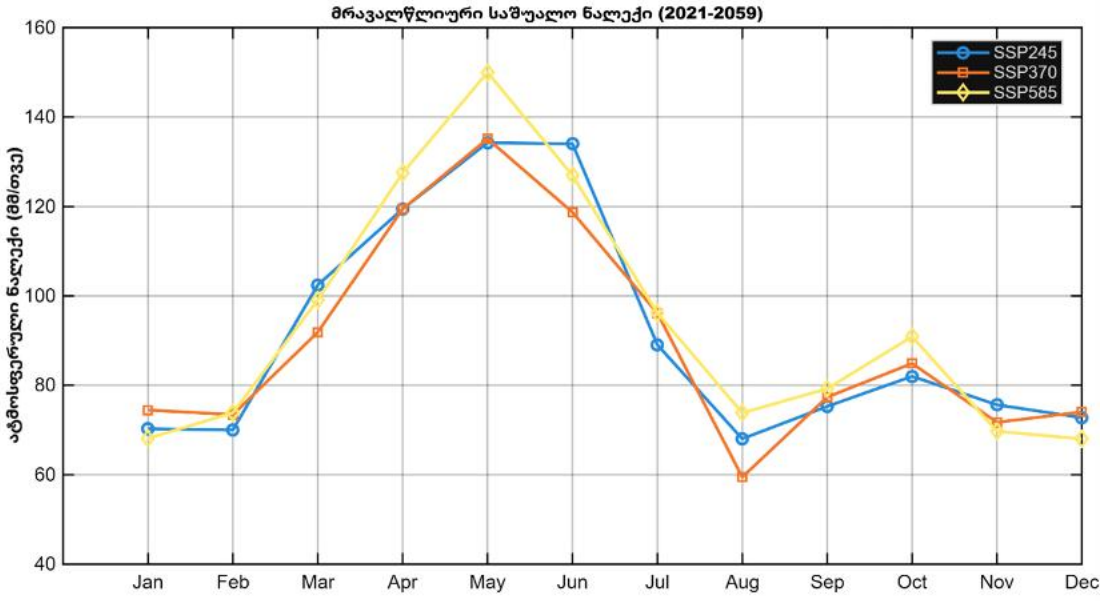
ცხრილი 8. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში ნალექის პროგნოზირებული ცვლილება (მმ) 2021-2059 წლებისთვის

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
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

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
SSP5-8.5	68.1	73.8	99.1	127.5	150.0	127.0	96.2	73.8	79.2	90.9	69.7	68.0	1123.4
SSP3-7.0	74.5	73.4	91.9	119.4	135.2	118.7	96.1	59.5	77.3	84.9	71.7	74.0	1076.7
SSP2-4.5	70.3	70.0	102.4	119.5	134.3	134.0	89.1	68.0	75.3	82.0	75.6	72.8	1093.2

სურათი 9. აუზში ნალექის პროგნოზირებული განაწილება (მმ) 2021-2059 წლებისთვის



CMIP6-ის კლიმატის ცვლილების პროგნოზების მიხედვით, საცნობარო პერიოდისთვის (1994-2014) მრავალწლიანი საშუალო ნალექი შეფასებულია 1076-1125 მმ/წელში. ეს მნიშვნელობა მეტია როგორც მიმდინარე სატელიტური დაკვირვებებით მიღებულ შედეგებზე, ასევე არაგვის აუზისთვის მიწისპირა სადგურების მონაცემებზე, რომელიც 867 მმ/წელს შეადგენს. შესაბამისად, ვვარაუდობთ, რომ ეს განსხვავება, სავარაუდოდ, გამოწვეულია კლიმატური პროგნოზების ბადის (grid) რეზოლუციით (0,5°) და კლიმატის ცვლილების ტრენდით, რის გამოც აუზში ნალექის ნიმუშები შესაძლოა არაზუსტად იყოს წარმოდგენილი, განსაკუთრებით რთული ტოპოგრაფიული მდგომარეობის გათვალისწინებით (არაგვი; რაც ასევე ჩანს გამოთვლების რუკაზე). ზოგადად, ნალექის განაწილება მეტად გაურკვეველია (ტემპერატურისგან განსხვავებით), რადგან იგი დამოკიდებულია რამდენიმე კომპლექსურ ცვლადზე, მათ შორის: ტოპოგრაფიაზე, ღრუბლების სიმაღლეზე, ტემპერატურასა და ტენიანობაზე. ამიტომ მომავალი ნალექის პროგნოზებისთვის გამოვიყენებთ როგორც კალიბრირებულ სატელიტურ

მონაცემთა ბაზას (geoCHIRPS), ასევე CMIP6-ს, რაც უზრუნველყოფს წლიური ნალექის უფრო რეალისტურ შეფასებას.

ცხრილი 10. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში ნალექის პროგნოზირებული ანომალია (%) 2021-2059 წლებისთვის

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
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, ნალექის სადგურებისგან განსხვავებით, უწყვეტი და უხარვეზო ისტორიული მონაცემები მხოლოდ სამ ტემპერატურულ სადგურს აქვს. თუმცა ტემპერატურა, როგორც წესი, უფრო მარტივად პროგნოზირებადია წყალშემკრებზე ან უფრო დიდ არეალზე, რადგან იგი ძირითადად დამოკიდებულია სიმაღლესა და მზის რადიაციაზე, ნაკლებად არის მგრძნობიარე სხვა გეოგრაფიული ფაქტორების მიმართ და ნალექთან შედარებით ნაკლებად ექვემდებარება გაზომვის გაურკვევლობას. შესაბამისად, იგი კლიმატური პროგნოზებისთვის შედარებით საიმედო პარამეტრად მიიჩნევა (ცხრილები 11 და 12), რაც ასევე დასტურდება დაკვირვებული (მიწისპირა სადგურების) და კლიმატური ცვლილების მოდელების შედარებით.

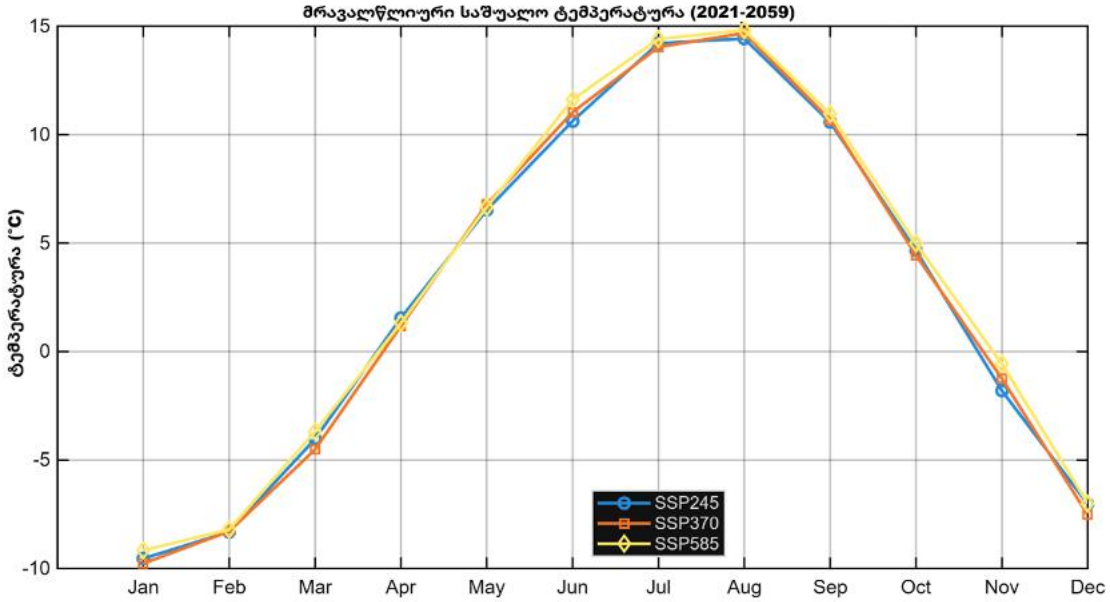
ცხრილი 11. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში საშუალო წლიური ტემპერატურის პროგნოზირებული განაწილება (°C) 2021-2059 წლებისთვის

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
SSP5-8.5	-9.2	-8.2	-3.7	1.3	6.7	11.6	14.4	14.8	10.9	5.0	-0.6	-7.0	3.0
SSP3-7.0	-9.8	-8.3	-4.5	1.2	6.8	11.0	14.0	14.7	10.7	4.4	-1.2	-7.5	2.6
SSP2-4.5	-9.5	-8.3	-4.0	1.5	6.5	10.6	14.2	14.4	10.6	4.7	-1.8	-7.0	2.7

ცხრილი 12. არაგვის წყალშემკრებ აუზში ტემპერატურის პროგნოზირებული ანომალია (°C) 2021-2059 წლებისთვის

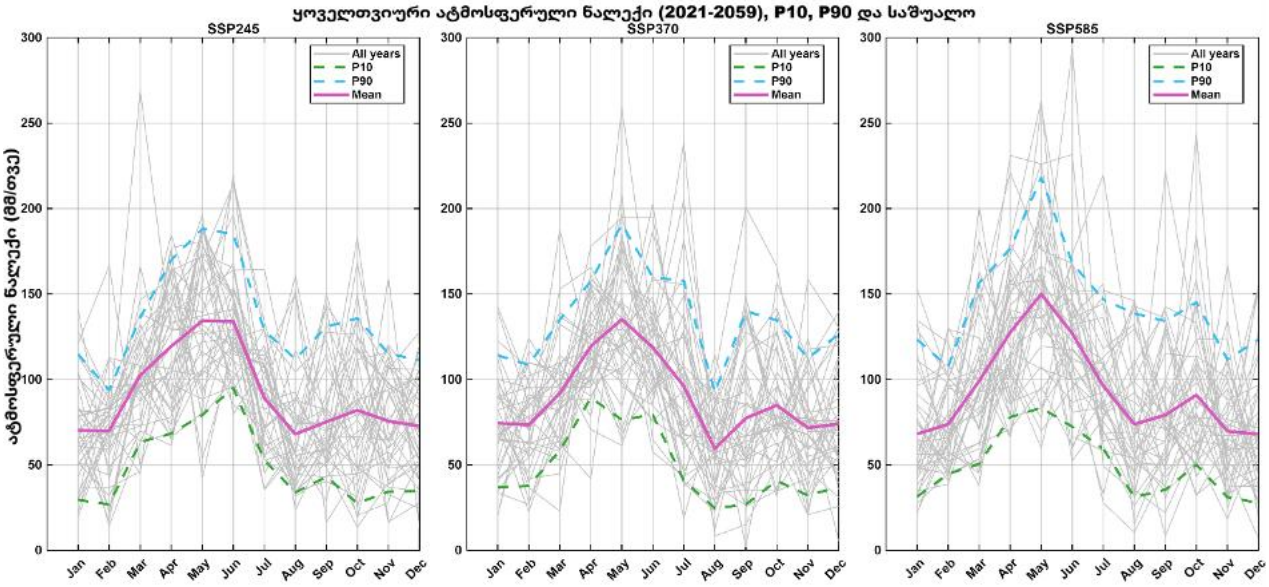
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
SSP5-8.5	2.1	2.0	2.0	1.8	2.1	2.6	3.1	3.5	3.2	2.5	2.0	2.0	2.4
SSP3-7.0	2.0	2.0	1.4	1.5	1.9	2.1	2.6	3.1	2.4	2.0	1.5	1.5	2.0
SSP2-4.5	1.3	1.3	1.5	1.3	1.6	2.0	2.5	2.8	2.5	1.8	1.3	1.5	1.8

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

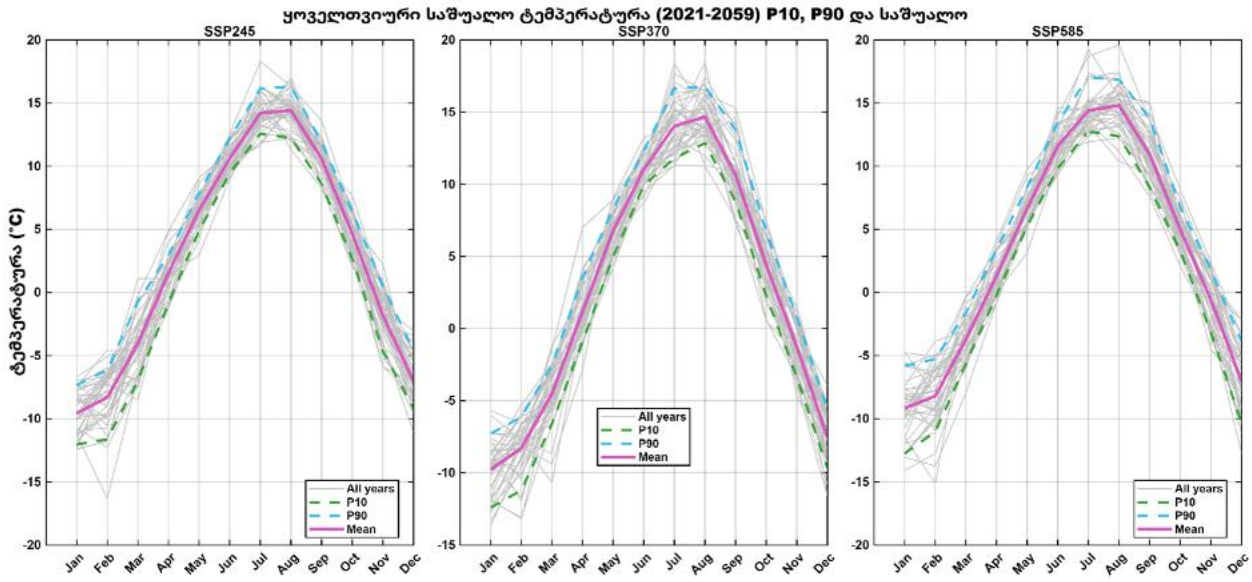


ზემოთ წარმოდგენილი ტემპერატურის მონაცემები ასახავს მოსალოდნელ ზრდას უფრო მაღალი ემისიების სცენარებში და თანხვედრაშია სადგურების მონაცემებთან, რომლებიც უკვე მიუთითებს ტემპერატურის თანდათან ზრდაზე. ყველა SSP სცენარი თანმიმდევრულად აჩვენებს უფრო მაღალ ტემპერატურებს ყველა თვეში, რაც ხაზს უსვამს დათბობის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

სურათი 11. წყალშემკრებში თვიური ნალექის განაწილება და ცვალებადობა (2021-2059)

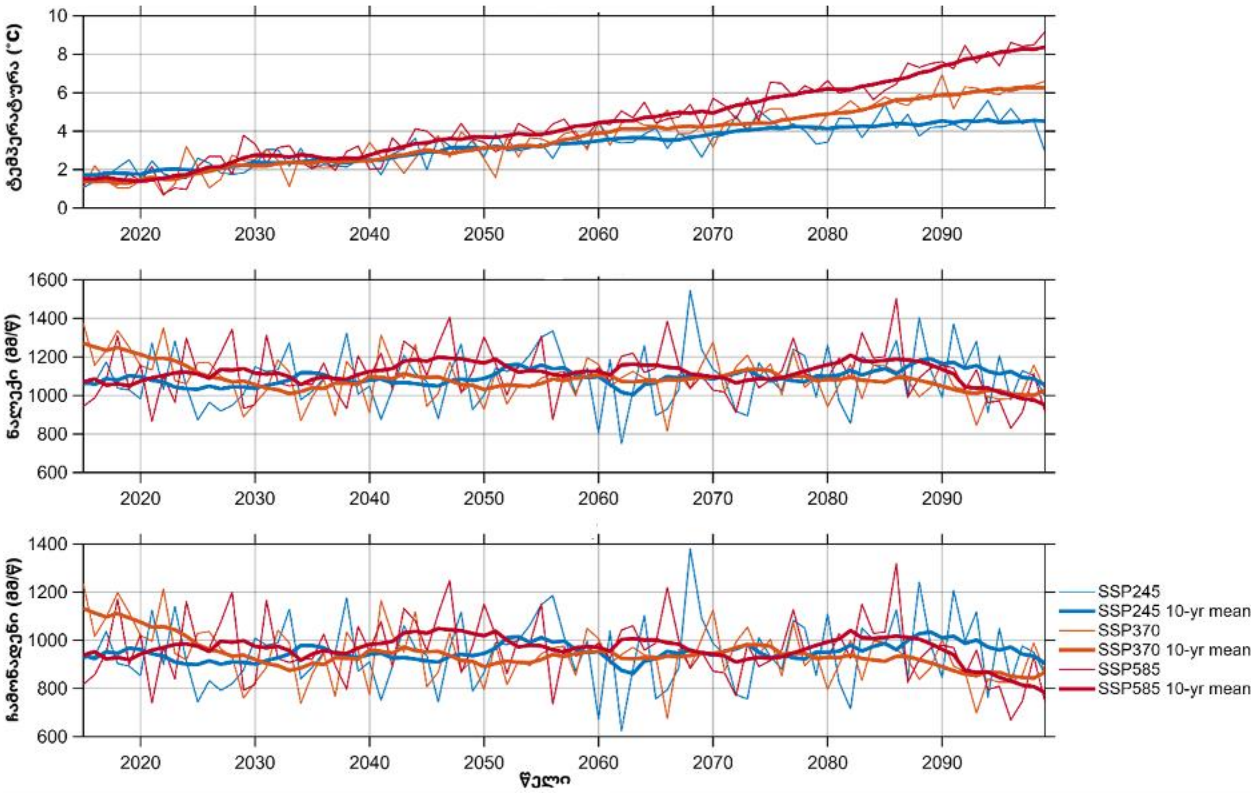


სურათი 12. წყალშემკრებში თვიური ტემპერატურის განაწილება და ცვალებადობა (2021-2059)



დამატებით, უფრო დეტალური ანალიზისთვის, შერჩეული წყალშემკრებისათვის მონაცემები ამოღებულია CMIP6 მონაცემთა ნაკრებიდან 2015-2100 წლების პერიოდისთვის, რაც შემდგომ გამოყენებული იქნება არაგვის წყალშემკრებ აუზში წყლის რესურსების გრძელვადიანი ცვლილებების დასადგენად.

სურათი 13. წყალშემკრების CMIP6-ის გრძელვადიანი კლიმატის ცვლილების პროგნოზი



მოდელირებული ჰიდროლოგიური რეჟიმი

მდინარის საბაზისო მახასიათებლები

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ჰიდროლოგიური საგუშაგოები ბოლო რამდენიმე ათწლეულის პერიოდს სრულფასოვნად არ ფარავს, განსაკუთრებით სსრკ-ის დაშლის შემდეგ. მონაცემები ხშირად „ხმაურიანია“, რაც ამცირებს შეფასების სანდოობას. ამიტომ მდინარის ჰიდროლოგიური მახასიათებლების დამატებით განსასაზღვრად გამოვიყენებთ ნალექის მონაცემებს (სადგურების და სატელიტური შეფასებები), რათა ბოლო 3-4 ათწლეულის მდინარის ჩამონადენი აღდგეს. ამ მიზნით შეგროვდა ზემოთ ხსენებული მეტეოროლოგიური მონაცემები და გამოყენებულ იქნა პოტენციური ევაპოტრანსპირაციის (PET), ფაქტობრივი ევაპოტრანსპირაციის (ETp) და ჩამონადენის (R) გამოთვლის ფორმულა; დამატებით, ტყის გავლენის დასადგენად ჩამონადენის გენერაციაზე გამოყენებულია ფოთლის ფართობის ინდექსი (Leaf Area Index, LAI), რომელიც ინტეგრირდა ფორმულაში მდინარის ხარჯის ცვლილებების გამოსავლენად. ფორმულის გამარტივებული ვარიანტი გამოისახება:

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

სადაც T არის ტემპერატურა (ცელსიუსში)

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

სადაც P არის ნალექი (მმ)

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

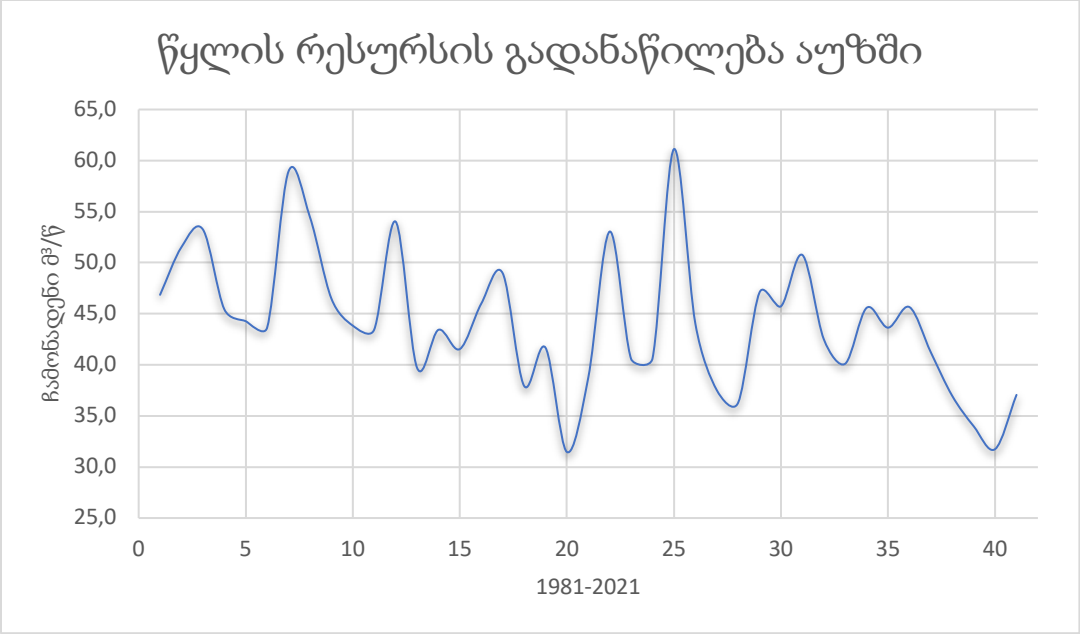
სადაც R არის ჩამონადენი, ხოლო ΔS წარმოადგენს მარაგის (შენახვის) ცვლილებას. ქვემოთ წარმოდგენილია მოდელირებული წყლის ჩამონადენი ($მ^3$/წმ).

ცხრილი 13. წყლის რესურსი ($მ^3$/წმ) ქვეაუზებში, ნალექისა და ევაპოტრანსპირაციის განსაზღვრისთვის გამოყენებული განტოლების საფუძველზე[21]

წელი	Q $მ^3$/წ	წელი	Q $მ^3$/წ
1981	46.9	2002	53.0
1982	51.5	2003	40.6
1983	53.3	2004	40.6
1984	45.4	2005	61.1

წელი	Q მ³/წ	წელი	Q მ³/წ
1985	44.3	2006	44.0
1986	43.6	2007	37.5
1987	58.9	2008	36.3
1988	54.5	2009	47.1
1989	46.5	2010	45.7
1990	43.8	2011	50.8
1991	43.4	2012	42.5
1992	54.0	2013	40.1
1993	39.7	2014	45.6
1994	43.4	2015	43.6
1995	41.5	2016	45.7
1996	46.0	2017	41.2
1997	49.0	2018	37.0
1998	37.9	2019	34.0
1999	41.7	2020	31.7
2000	31.5	2021	37.1
2001	38.7	Aver	44.2

მოცემული ინფორმაციისა და ნალექი/ტემპერატურის მონაცემების (როგორც სადგურებიდან, ისე სატელიტური შეფასებებიდან) ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ არაგვის მრავალწლიანი საშუალო ხარჯი შეადგენს 44,2 $მ^3$/წმ-ს; თუმცა ბოლო ათწლეულში წყლის რესურსის სტაბილური კლება აშკარად შეინიშნება.



სურათი 14. წყალშემკრებში წყლის რესურსის ჩამონადენი მოდელირებული რიგის მიხედვით (მ³/წმ)

შედარების მიზნით ასევე გაანალიზდა არაგვის აუზის ისტორიული მონაცემები, რაც აჩვენებს, რომ ჟინვალის ჰიდროლოგიურ სადგურზე (კვეთის მონაკვეთში) გაზომილი მრავალწლიანი საშუალო ხარჯი შეადგენს 43,1 მ³/წმ-ს. ეს მნიშვნელობა ძალიან ახლოსაა მოდელირებულ შედეგთან, შესაბამისად, შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ შერჩეული ადგილისათვის მოდელირების პარამეტრები მისაღები სიზუსტის ფარგლებშია.

ცხრილი 14. წყლის რესურსების განაწილება არაგვის აუზში ჟინვალის ჰიდროლოგიური სადგურის მიხედვით (Q მ³/წმ)

წელი	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**	**საშ.**
P50	17.8	18.2	26.8	61.6	94.6	86.4	58.3	40.8	33.5	32.0	26.4	20.8	43.1

არაგვის ჰიდროლოგიური მახასიათებლების ეს შეფასება აერთიანებს ისტორიული ჰიდროლოგიური საგუშაგოების მონაცემებს ნალექისა და ტემპერატურის საფუძველზე შესრულებული წყლის ბალანსის მოდელირებას, რათა ბოლო ათწლეულებში არსებული მნიშვნელოვანი მონაცემთა დანაკლისი იქნას შევსებული. ძირითადი ჰიდროლოგიური მოდელირებით მიღებული მდინარის ჩამონადენის მონაცემების ანალიზი მიუთითებს, რომ მდინარის მრავალწლიური საშუალო ხარჯი დაახლოებით 44,2 მ³/წმ-ს შეადგენს. წყალდიდობის სიხშირის და მინიმალური ხარჯების ანალიზი დამატებით დაადასტურებდა, რომ ექსტრემალური ჰიდროლოგიური მოვლენები უფრო მნიშვნელოვან ფაქტორად რჩება, თუმცა აღნიშნული ნაწილი ამ

კვლევის ფარგლებს სცდება. ასევე, შეზღუდული დაკვირვების რიგიდან და დროიდან გამომდინარე, რთულია უფრო დეტალური მოდელირების ამ ეტაპზე შესრულება.

კაშხალი და წყალსაცავი

არაგვის აუზში ჟინვალის წყალსაცავი წარმოადგენს მთავარ მარეგულირებელ ნაგებობას, რომელიც აკონტროლებს სეზონურ მოცულობას სხვადასხვა მიზნით, მათ შორის წყალმომარაგების და ენერგეტიკული გამოყენების. ჟინვალი მდებარეობს არაგვის ხეობაში, დაბა ჟინვალთან, თბილისიდან დაახლოებით 60 კმ-ში და წყალსაცავის ზემოთ წყალშემკრები აუზის ფართობი შეადგენს დაახლოებით 1,898 კმ²-ს; საშუალო წლიური ხარჯი _ 43,2 მ³/წმ, ხოლო საშუალო წლიური ჩამონადენი _ დაახლოებით 1,380 მლნ მ³. კომპლექსის მშენებლობა დაიწყო 1975 წელს და ექსპლუატაციაში შევიდა 1985 წლის დეკემბერში. სისტემა ასრულებს რამდენიმე სტრატეგიულ ფუნქციას, მათ შორის: თბილისისა და მიმდებარე ტერიტორიების სასმელი და საყოფაცხოვრებო წყალმომარაგება, ქვემო სამგორისა და არაგვის აუზის სასოფლო-სამეურნეო მიწების სარწყავი წყლით უზრუნველყოფა, ბუფერული ზონის ქვემოთ მდინარის კალაპოტის სანიტარიულ-ეკოლოგიური წყლით უზრუნველყოფა და პიკური დატვირთვის რეგულირებისთვის ჰიდროენერგიის გენერაცია. ჰიდროტექნიკურ კომპლექსში შედის ჟინვალჰესი, სეზონური რეგულირების წყალსაცავი და ბოდორნას ბუფერული ზონის წყალსაცავი.

ტექნიკური თვალსაზრისით, წყალსაცავი დაპროექტდა 520 მლნ მ³ საერთო მოცულობით და 370 მლნ მ³ სასარგებლო მოცულობით, ხოლო ჰიდროელექტროსადგურს აქვს 130 MW დადგმული სიმძლავრე, გამყვანი გვირაბი 115 მ³/წმ საპროექტო ხარჯით და ოთხი ჰიდრო აგრეგატი. წყალსაცავის ექსპლუატაცია ხორციელდება ოფიციალური ოპერირების ინსტრუქციის შესაბამისად; შევსებისა და დაცლისთვის მზადდება წლიური საორიენტაციო გრაფიკები, ხოლო წყლის დონის რეალური მერყეობები უწყვეტად ფიქსირდება. ამასთან, ერთ-ერთ ანგარიშში აღნიშნულია, რომ ჰიდროენერგეტიკული კომპლექსი ექსპლუატაციაში შევიდა არასრული სამშენებლო-სამონტაჟო პირობების ფონზე სასწრაფო წყალმომარაგების საჭიროებების გამო და რომ ობიექტი დღემდე მუშაობს დროებითი ოპერაციული სქემით.

წყალსაცავის გრძელვადიან სანდოობაზე ერთ-ერთი მთავარი მოქმედი ფაქტორი ინერტული მასალით შევსების დონეა. აღსანიშნავია, რომ ჟინვალის გზშ-ში ციტირებული ბათიმეტრიული კვლევების მიხედვით, წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობა 2013 წლისთვის უკვე შემცირებული იყო დაახლოებით 320 მლნ მ³-მდე, რაც ნაკლებია საპროექტო 370 მლნ მ³ მნიშვნელობაზე. ამავე ანგარიშში აღნიშნულია, რომ წყალსაცავში დაგროვილი დანალექის მოცულობა შეადგენდა დაახლოებით

126 მლნ მ³-ს; საშუალო წლიური დონე კი დაახლოებით 4,5 მლნ მ³/წელს უდრის; აორთქლების გამო წლიური წყლის დანაკარგი შეფასებულია 6,3 მლნ მ³-ად.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ქვემო დინების რეგულირება ხორციელდება ბოდორნას ბუფერული წყალსაცავის მეშვეობით, რომლის მოცულობა 1,0 მლნ მ³-ს შეადგენს და განკუთვნილია ჰიდროელექტროსადგურიდან გამოშვებული წყლის ხელახალი რეგულირებისთვის ქვედა დინებაში არსებული ყოველდღიური საჭიროებების დასაკმაყოფილებლად. ბუფერულ აუზში მოწყობილია საყოფაცხოვრებო და მუნიციპალური წყალმომარაგების წყლის მიმღები ნაგებობა 14,2 მ³/წმ საპროექტო გამტარუნარიანობით[2], ასევე, ავარიული გადამღვრელი, რომელსაც შეუძლია გაატაროს 380,0 მ³/წმ. ბუფერული წყალსაცავის ქვემოთ შენარჩუნებულია უწყვეტი გაშვება 27,3 მ³/წმ ოდენობით, მათ შორის: 10,0 მ³/წმ სანიტარიულ-ეკოლოგიური საჭიროებებისთვის კალაპოტში დატოვებული წყლის ხარჯი, 14,2 მ³/წმ წყალმომარაგებასთან დაკავშირებული ფილტრატების შევსების და 3,1 მ³/წმ მუხრანისა და საგურამოს სასოფლო-სამეურნეო მიწების სარწყავად. დამატებით ბუფერული აუზის მარცხენა დამცავი ჯებირის სიახლოვეს მდებარე წყლის მიმღებიდან იწყება 40 კმ სიგრძის მთავარი წყალმომარაგების მაგისტრალი 15,0 მ³/წმ საპროექტო გამტარუნარიანობით.

ჰიდროელექტროსადგურსა და ბუფერულ აუზს შორის ჰიდრავლიკური კავშირი ასევე ქმნის ოპერაციულ შეზღუდვებს. ბუფერულ აუზამდე გამყვან გვირაბს აქვს 115,0 მ³/წმ საპროექტო გამტარუნარიანობა, თუმცა ერთ მონაკვეთზე კვეთის შემცირების გამო მისი მაქსიმალური უდაწნეო (unpressurized) გამტარუნარიანობა არ აღემატება 67,0 მ³/წმ-ს[3], რომლის მხოლოდ 77% ბრუნდება მდინარის კალაპოტში.

სარწყავი წყლის მოთხოვნა

სარწყავი მოთხოვნა წყლის რესურსებზე კრიტიკულად მნიშვნელოვანია არაგვის წყლის რესურსების შეფასებისას; შესაბამისად, მოთხოვნის დასადგენად გამოყენებულია განტოლება ROPWAT მიდგომით (Smith, 1992), რომელიც დეტალურადაა განმარტებული Döll და Siebert (2002)-ში. ამ მიდგომით, სარწყავ ერთეულ ფართობზე მოთხოვნა სავეგეტაციო პერიოდის განმავლობაში (მაის-სექტემბერი) გამოითვლება, როგორც 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} = სარწყავ ერთეულ ფართობზე წმინდა მოთხოვნა [mm/d]

E_{pot_c} = კულტურისთვის სპეციფიკური პოტენციური ევაპოტრანსპირაცია [mm/d]

P_{eff} = ეფექტური ნალექი [mm/d]

E_{pot} = პოტენციური ევაპოტრანსპირაცია [mm/d]

k_c = სასოფლო-სამეურნეო კულტურის კოეფიციენტი [უგანზომილებო], რომელიც ჩვენს შემთხვევაში უდრის 1.2-ს.

თუმცა (ეფექტური ნალექი) ძალიან რთულად დასადგენია (Smith, 1992) და ჩვენს შემთხვევაში ასევე ვიყენებთ იმავე მიდგომას, რომელიც გამოყენებულია Döll და Siebert (2002)-ში.

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 თითოეული რეგიონისთვის გაანგარიშებული სარწყავი წყლის მოთხოვნა წარმოდგენილია ცხრილში 15.

ცხრილი 15. ტერიტორიისთვის წმინდა სარწყავი მოთხოვნა (10,240 ჰა)

წელი	Q მ³/წ	Q მლნ³	წელი	Q მ³/წ	Q მლნ³	წელი	Q მ³/წ	Q მლნ³
1981	2.07	27.37	*1995*	2.91	38.43	*2009*	1.24	16.42
1982	1.59	21.00	*1996*	2.99	39.48	*2010*	2.80	37.01
1983	1.65	21.80	*1997*	2.60	34.34	*2011*	2.20	29.03
1984	3.09	40.89	*1998*	3.13	41.39	*2012*	1.89	24.93
1985	2.54	33.58	*1999*	3.00	39.71	*2013*	2.20	29.05
1986	3.05	40.29	*2000*	3.15	41.58	*2014*	3.37	44.61
1987	2.94	38.87	*2001*	2.89	38.23	*2015*	2.93	38.78
1988	3.06	40.49	*2002*	2.24	29.60	*2016*	2.77	36.67
1989	3.29	43.43	*2003*	2.52	33.29	*2017*	3.13	41.37
1990	3.26	43.13	*2004*	2.75	36.31	*2018*	3.02	39.91
1991	3.23	42.66	*2005*	1.85	24.43	*2019*	2.61	34.56

წელი	Q მ³/წ	Q მლნ³	წელი	Q მ³/წ	Q მლნ³	წელი	Q მ³/წ	Q მლნ³
1992	2.13	28.14	*2006*	3.07	40.64	*2020*	3.38	44.64
1993	1.68	22.22	*2007*	3.03	40.02	*2021*	3.33	44.00
1994	3.28	43.40	*2008*	2.63	34.78	*Aver.*	2.69	35.62

დამატებით, საქართველოს სტატისტიკის ეროვნული სამსახურის მონაცემებით, სისტემური დანაკარგები დაახლოებით 67%-ს შეადგენს, რაც შეესაბამება წლიურად დაახლოებით 24,2 მლნ მ^3-ის (ჯამში დაახლოებით 1,8 მ^3/წმ) დამატებით წყლის დანაკარგს. ასევე უნდა აღინიშნოს, რომ წყლის მოთხოვნა დამოკიდებულია ტემპერატურის ცვალებადობაზე და ინფრასტრუქტურის მდგომარეობაზე. გარდა ამისა, მნიშვნელოვანია, რომ კვლევაში მოდელირებული სარწყავი მოთხოვნები და ზემოთ გამოყენებული განტოლებები ახლოსაა საქართველოს მელიორაციის მონაცემთა წელიწლიურებში დაფიქსირებულ მნიშვნელობებთან; თუმცა აუზში რეალურად მორწყული სასოფლო-სამეურნეო მიწის ზუსტი ფართობი უცნობია და მოდელირებული ფართობი შეფარდებითია.

ფოთლის ფართობის ინდექსი (LAI)

მცენარეული საფარი, განსაკუთრებით კი ტყის სტრუქტურა, ფუნდამენტურ როლს ასრულებს წყალშემკრების ჰიდროლოგიის რეგულირებაში, რადგან გავლენას ახდენს ნალექის სახით მოსული წყლის რესურსის შემცირებაზე, ევაპოტრანსპირაციაზე, ფილტრაციის უნარზე და ნიადაგის ტენიანობის დინამიკაზე. აუზში ტყის საფრის ჰიდროლოგიური გავლენის რაოდენობრივად შესაფასებლად ფოთლის ფართობის ინდექსის (Leaf Area Index, LAI) გამოთვლა უზრუნველყოფს მათემატიკურად დასაბუთებადი პარამეტრების გათვალისწინებას.

ფოთლის ფართობის ინდექსი (LAI) განისაზღვრება, როგორც ჯამური მწვანე ზედაპირის (ფოთლის) ფართობი მიწის ზედაპირის ფართობზე (მ²/მ²) და წარმოადგენს მცენარეულობის სიმჭიდროვისა და ვარჯის განვითარების მთავარ ბიოფიზიკურ ინდიკატორს. როგორც წესი, უფრო მაღალი LAI უკავშირდება ნალექის მცენარის მიერ შეწოვის ზრდას, ტრანსპირაციის დონის ზრდას და ნიადაგის სტრუქტურის გაუმჯობესებას ფესვური გამაგრებისა და ორგანული ნივთიერებების დაგროვების გზით. ეს პროცესები ერთობლივად ამცირებს ეფექტურ ნალექს, რომელიც აღწევს ნიადაგის ზედაპირს და ცვლის ჩამონადენის წარმოქმნის მექანიზმს (აყოვნებს და ანაწილებს).

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

- ზრდის ვარჯის მიერ გამოწვეული წყლის რესურსის დანაკარგებს;
- აძლიერებს ევაპოტრანსპირაციას (ET);
- უწყობს ხელს ინფილტრაციას ნიადაგის ფორიანობის გაუმჯობესების გზით;
- ამცირებს ზედაპირული (პიკური) ჩამონადენის მნიშვნელობებს ნალექიანი მოვლენების დროს;
- აყოვნებს ჰიდროგრაფის რეაქციას (დროში ახანგრძლივებს) და ასუსტებს ხარჯის პიკებს.

ჩამონადენის შეფასებაში ტყის გავლენის ჩასართავად LAI შეიძლება გავითვალისწინოთ წყლის ბალანსის ფორმულაში (მოდელირების გზით) ევაპოტრანსპირაციის ან ჩამონადენის კოეფიციენტების კორექტირების მიზნით. მაგალითად, პოტენციური ევაპოტრანსპირაცია (PET) შეიძლება შეიცვალოს მცენარეულობაზე დამოკიდებულების ფაქტორით:

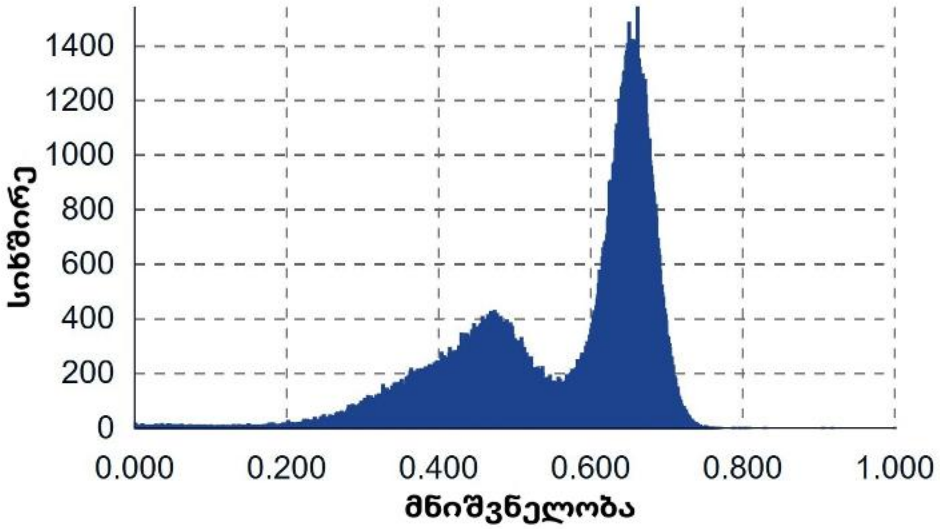
$$ET_{actual} = PET \times f(LAI)$$

სადაც წარმოადგენს ვარჯზე დამოკიდებულ ფუნქციას, რომელიც ასახავს ტრანსპირაციის ეფექტიანობას და შეწოვის უნარს.

ალტერნატიულად, ემპირიული ჩამონადენის მოდელებში ჩამონადენის კოეფიციენტები (C) შეიძლება დაზუსტდეს LAI-ის ფუნქციად:

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

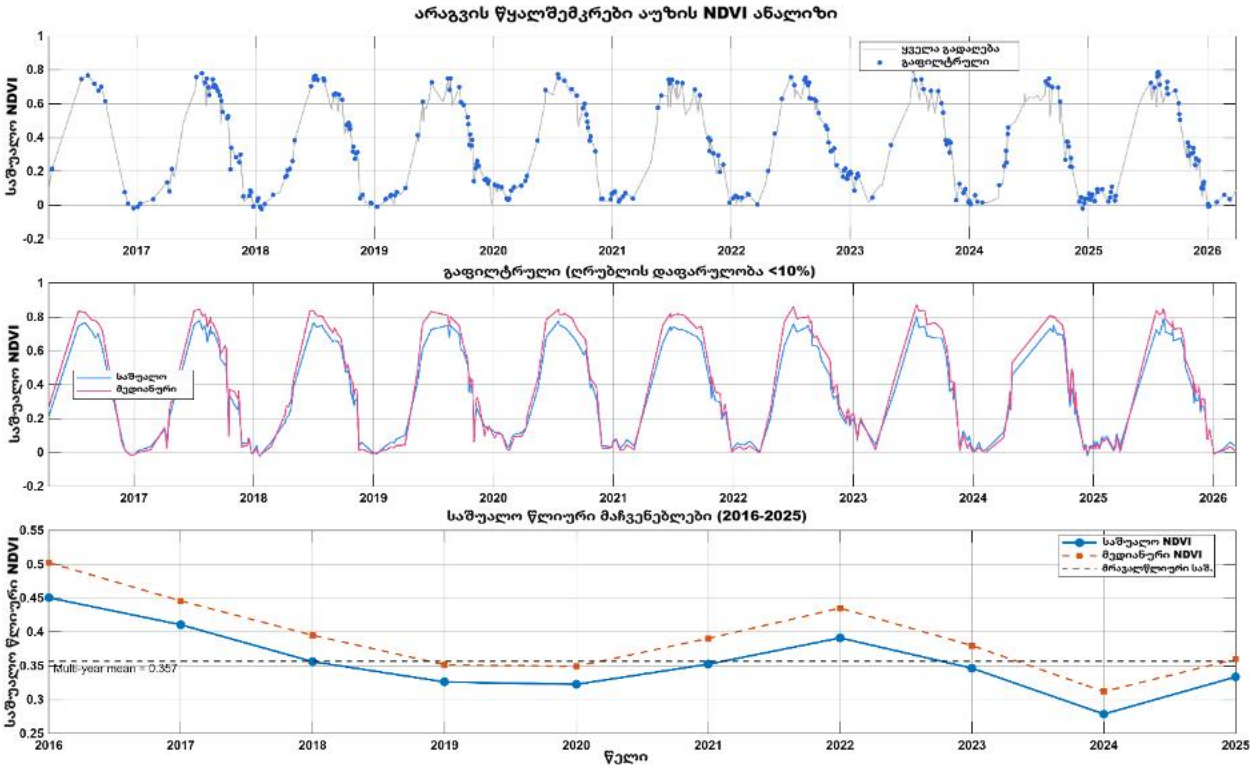
სადაც LAI-ის ზრდა ამცირებს ეფექტური ჩამონადენის კოეფიციენტს მშრალი ნიადაგის (unsaturated) პირობების დროს. მნიშვნელოვანია უზრუნველვყოთ, რომ მოდელის სტრუქტურა ასახავდეს დომინანტური ჩამონადენის მექანიზმებს (მშრალი პირობების ზედაპირული ჩამონადენი vs. ნიადაგის გაჯერების დონეზე დამოკიდებული ჩამონადენი), რადგან მაღალი LAI-ის მქონე ტყეებმა შეიძლება ერთდროულად გაზარდოს ინფილტრაცია, მაგრამ ხანგრძლივი მშრალი პერიოდების დროს შეამციროს ნიადაგის ტენიანობის „ხელმისაწვდომი“ მარაგი.



სურათი 15. NDVI-ის მნიშვნელობა არაგვის აუზში შერჩეული თვისთვის და მისი სივრცითი განაწილება

დისტანციური ზონდირების პროდუქტები (მაგ. NDVI-ზე დაფუძნებული მაჩვენებლები) იძლევა აუზის მასშტაბით მცენარეულობის სიმჭიდროვის სივრცითი განაწილების დადგენის შესაძლებლობას. ეს საშუალებას გვაძლევს, ქვეაუზების დონეზე გაიმიჯნოს ტყიანი ზონები სასოფლო-სამეურნეო ან დეგრადირებული ტერიტორიებისგან. მთიან ზონაში, სადაც ტყის საფარი კონცენტრირებულია, LAI-ის ინტეგრირება განსაკუთრებით რელევანტურია ბაზისური ჩამონადენის დადგენისა და წყალდიდობის მრუდის (stormflow) პიკების შესუსტების სიმულაციისთვის.

Sentinel-2-ის NDVI (2016-2025) ანალიზი არაგვის აუზში გამოკვეთს ძლიერ და შიდა განაწილების თვალსაზრისით თანმიმდევრულ სეზონურ ციკლს. აუზის NDVI/LAI ნიმუშების უკეთ გასაგებად Sentinel-2 მონაცემთა ბაზიდან გამოირიცხა 10%-ზე მეტი ღრუბლიანობის მქონე სატელიტური გამოსახულებები და განისაზღვრა აუზის საშუალო სეზონური NDVI განაწილება. შედეგები გვაჩვენებს, რომ აუზის საშუალო NDVI დაბალია ზამთარსა და ადრეულ გაზაფხულზე, სწრაფად იზრდება აპრილში, მაქსიმუმს აღწევს ივნის-აგვისტოში და შემდეგ შემოდგომაზე თანდათან მცირდება. მრავალწლიანი საშუალო ყოველთვიური NDVI დაახლოებით 0,10-0,15-ია იანვარ-მარტში, იზრდება დაახლოებით 0,25-მდე აპრილში და 0,47-მდე მაისში, პიკს აღწევს დაახლოებით 0,70-0,80-თან ივნის-აგვისტოში და სექტემბერშიც შედარებით მაღალი რჩება (~0,73), შემდეგ კი მცირდება ~0,55-მდე ოქტომბერში, ~0,37-მდე ნოემბერში და ~0,21-მდე დეკემბერში. საკვლევი პერიოდისათვის (2016-2025), აუზის საშუალო წლიური NDVI მერყეობს დაახლოებით 0,3-0,45 დიაპაზონში, ხოლო მრავალწლიანი საშუალო მნიშვნელობა ახლოსაა 0,35-თან (სურათი 16).

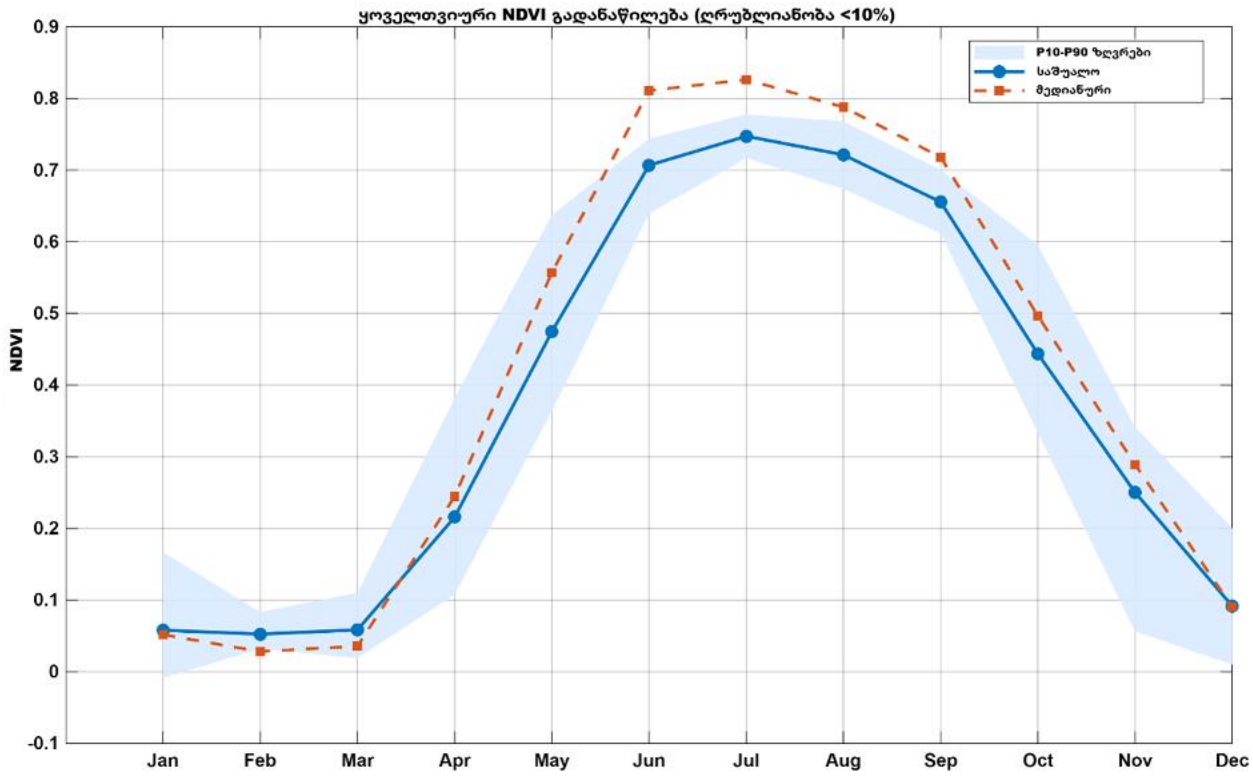


სურათი 16. აუზის დონეზე NDVI-ის განაწილება

*რადგანაც ძირითადი მონაცემები საშუალო მრავალწლიური მასშტაბის არის და ჰიდროლოგიური ანგარიშებიც საშუალო მონაცემებს ეფუძნება და არა სეზონურს ან ყოველდღიურს, რელევანტური NDVI ინდიკატორი არ არის სეზონური მაქსიმუმი, არამედ ვარჯის საშუალო წლიური მდგომარეობა, რომელიც აკონტროლებს კუმულაციურ ევაპოტრანსპირაციას, შეწოვას და ნიადაგის წყლის გამოყენებას მთელი ჰიდროლოგიური ციკლის განმავლობაში. არაგვის აუზში ღრუბლიანობის მიხედვით გაფილტრული საშუალო წლიური NDVI დაახლოებით **0,35**-ია, მაშინ, როცა პიკური სეზონის მნიშვნელობები ხშირად აღემატება **0,78**-ს. შესაბამისად, ზაფხულის სცენებიდან მიღებული NDVI მნიშვნელობები ასახავს ვარჯის თითქმის მაქსიმალურ განვითარებას და შეიძლება მნიშვნელოვნად გადაამეტოს მცენარეულობის რეალურ წლიურ გავლენას წყლის რესურსის გადანაწილებაზე, თუ იგი პირდაპირ იქნება გამოყენებული წლიური ჩამონადენის გაანგარიშებებში.*

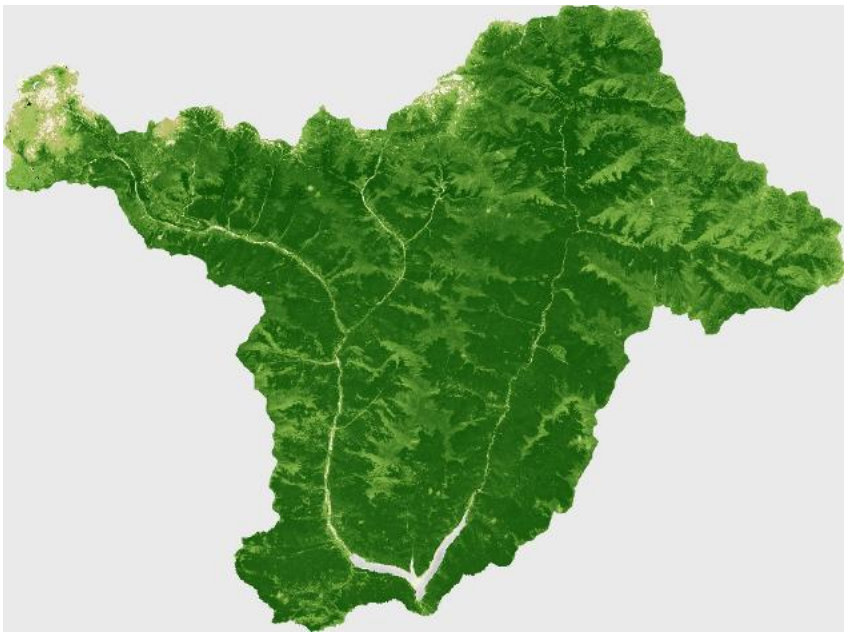
ჰიდროლოგიური თვალსაზრისით, სეზონური ციკლი ნიშნავს, რომ მცენარეულობის ეფექტები წლის განმავლობაში იცვლება. გვიან გაზაფხულსა და ზაფხულში, როდესაც NDVI/LAI და ვარჯის სიმჭიდროვე მაქსიმალურია, მოსალოდნელია, რომ ყველაზე მაღალი იქნება ევაპოტრანსპირაციის მაჩვენებელი, ნალექის შეწოვა და ნიადაგის ტენიანობის ათვისებაც. ასეთ პირობებში მცენარეულობამ შეიძლება შეამციროს ეფექტური ჩამონადენის გენერაცია და ხელი შეუწყოს ზაფხულის ბაზისური ხარჯების შემცირებას, განსაკუთრებით მშრალ წლებში/თვეებში და აუზის უფრო გარკვეულ ნაწილებში. ამის საპირისპიროდ, ზამთარსა და ადრეულ გაზაფხულზე მცენარეულობის აქტივობის შემცირება ამცირებს ტრანსპირაციის მოთხოვნას და საშუალებას აძლევს ნალექისა და თოვლდნობის შედეგად გენერირებული ჩამონა-

დენის უფრო დიდ ნაწილს, მონაწილეობა მიიღოს ნიადაგის გაჯერებასა და გარდაიქმნას ჩამონადენში. შესაბამისად, მცენარეულობის გავლენა ხარჯზე დროში მუდმივი არ არის და უნდა განიმარტოს, როგორც მკვეთრად სეზონური და წვიმის სახით მოსულ ატმოსფერულ ნალექთან მნიშვნელოვნად დამოკიდებული.



სურათი 17. აუზის დონეზე NDVI-ის თვიური განაწილება (2016-2025)

ჟინვალის წყალსაცავის მსგავსი რეგულირებული აუზების შემთხვევაში, მცენარეულობის გავლენა მნიშვნელოვნად ურთიერთქმედებს წყალსაცავის შევსების, სარწყავი წყლის მოთხოვნის და კლიმატური ცვალებადობით გამოწვეული წყლის რესურსის გადანაწილების ცვლილებასთან. აუზის მასშტაბით წყლის რესურსების გამოთვლამ, თუ არ ითვალისწინებს მცენარეული საფრის სეზონურ დინამიკას, შეიძლება გადაამეტოს წლიურ ჭრილში წყლის რესურსის რაოდენობა ან არასწორად შეაფასოს ჩამონადენის დროითი განაწილება, განსაკუთრებით დათბობის პირობებში, როდესაც წყლის მოთხოვნა იზრდება. ამიტომ LAI პარამეტრის გათვალისწინება ანგარიშებში აუმჯობესებს ჰიდროლოგიურ შეფასებას მიწის საფრის მდგომარეობის დაკავშირებით ევაპოტრანსპირაციასთან და ჩამონადენის გადანაწილებასთან. შესაბამისად, წლიური ჩამონადენის შეფასება უნდა ეყრდნობოდეს წლიურ ვეგეტაციურ მეტრიკას, რაც უფრო შესაფერისია ევაპოტრანსპირაციისა და ჩამონადენის წლიური ცვალებადობის ინტერპრეტაციისთვის (Martínez and Gilabert, 2009; Yan et al., 2022; Zhang et al., 2003).



სურათი 17: შერჩეულ აუზში NDVI ინდექსი (მუქი მწვანე მიუთითებს მკვრივ ტყეზე)

ამ პირობებში, მცენარეულობამ შეიძლება შეამციროს ეფექტური ჩამონადენის გენერაცია და ხელი შეუწყოს ზაფხულში ბაზისური ხარჯების შემცირებას, განსაკუთრებით მშრალ წლებში, თუმცა მისი გამოყენება უნდა შეესაბამებოდეს წყლის ბალანსის მოდელის პარამეტრიზაციას. მცენარეულობის ზემოქმედებების უფრო ზუსტი რაოდენობრივი შეფასება მოითხოვს უფრო მაღალი რეზოლუციის ჰიდროლოგიურ მოდელირებას ყოველდღიური ჰიდროკლიმატური-კლიმატური პარამეტრებით, თვიური ვეგეტაციური დინამიკით და დაგროვების/ოპერაციული კონტროლების გაუმჯობესებული პროტოკოლებით (Wang et al., 2005; Yan et al., 2022).

ტყის საფრის გავლენა ჩამონადენზე

როგორც ზემოთ ვისაუბრეთ, მცენარეული საფარი წარმოადგენს წყალშემკრებში ჰიდროლოგიური პროცესების ერთ-ერთ მთავარ მარეგულირებელ ფაქტორს, რადგან არეგულირებს ევაპოტრანსპირაციას, ნალექის შეწოვას, ნიადაგის ტენიანობის დინამიკას და ჩამონადენის გენერაციას. როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები, მცენარეულობის სიმჭიდროვე წარმოდგენილია ნორმალიზებული განსხვავების ვეგეტაციის ინდექსით (NDVI), რომელიც მიღებულია Sentinel-2-ის სატელიტური დაკვირვებებიდან და გამოყენებულია, როგორც ვარჯის სტრუქტურისა და ფოთლის ფართობის ინდექსის (LAI) პროქსი. არაგვის აუზისთვის NDVI მნიშვნელობებზე ჩატარებულმა მოდიფიკაციებმა გამოიწვია მდინარის წლიური მოდელირებული ხარჯის სისტემური ზრდა. ეს რეაქცია თანხვედრილია როგორც ჰიდროლოგიურ თეორიასთან, ისე ექსპერიმენტულ მტკიცებულებებთან, რომლებიც აჩვენებს მცენარეულობის სიმჭიდროვეს აუზის წყლის ბალანსთან კოლერაციას.

NDVI მჭიდროდ თანხვედრაშია LAI-სა და ვარჯის ბიომასასთან, რომლებიც პირდაპირ გავლენას ახდენს ევაპოტრანსპირაციის პროცესებზე. უფრო მკვრივი მცენარეულობა, მაღალი NDVI მნიშვნელობებით, ზრდის წყლის დანაკარგებს ორი ძირითადი მექანიზმით: ვარჯის მიერ წყლის შეწოვით და მცენარეთა ტრანსპირაციით. ტყის ვარჯი აკავებს ნალექს მანამ, სანამ იგი მიწის ზედაპირს მიაღწევს, ხოლო ინტერცეპცირებული წყლის ნაწილი პირდაპირ ორთქლდება ატმოსფეროში. ამასთანავე, ღრმა ფესვთა სისტემა და დიდი ფოთლის ფართობი აძლიერებს ტრანსპირაციის სიჩქარეს, რაც ზრდის საერთო ევაპოტრანსპირაციას (ET). შედეგად, შემომავალი ნალექის უფრო დიდი წილი ბრუნდება ატმოსფეროში და ნაკლები მონაწილეობს მდინარეულ ჩამონადენში.

წლიურ დროით მასშტაბზე წყალშემკრების წყლის ბალანსი შეიძლება გამოიხატოს შემდეგნაირად:

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

სადაც P აღნიშნავს ნალექს, ET _ ევაპოტრანსპირაციას, Q _ ჩამონადენს (მდინარის ხარჯს), ხოლო ΔS _ მარაგის ცვლილებებს. ხანგრძლივ პერიოდებზე მარაგის ცვლილებები შედარებით მცირეა და ჩამონადენი უმეტესად კონტროლდება ევაპოტრანსპირაციის დანაკარგებით. შესაბამისად, მცენარეულობის სიმჭიდროვის შემცირება ამცირებს ევაპოტრანსპირაციის დონეს და ტოვებს ნალექის უფრო დიდ ნაწილს ჩამონადენისთვის ხელმისაწვდომად.

მოდიფიცირებულ სცენარებში NDVI მნიშვნელობები შემცირდა საწყის საშუალო მნიშვნელობასთან (0,35) შედარებით და მივიღეთ უფრო დაბალი ეფექტური LAI (0,25), რაც თავის მხრივ ამცირებს შეწოვის დაგროვების უნარს და ტრანსპირაციის ნაკადებს. ევაპოტრანსპირაციის კლების ფონზე ნარჩენი წყლის ბალანსი გადაინაცვლებს გაზრდილი ხარჯის მიმართულებით, რაც ხსნის ორივე აუზში მდინარის წლიური ჩამონადენის დაკვირვებულ ზრდას.

ეს დამოკიდებულება ფართოდ არის დოკუმენტირებული ჰიდროლოგიურ კვლევებში. მცირე ზომის წყალშემკრებ აუზებზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ ტყის საფრის შემცირება სისტემატურად ზრდის წლიურ ჩამონადენს (water yield), ხშირად 10-40%-ით, რაც დამოკიდებულია კლიმატისა და მცენარეულობის ტიპზე (Bosch & Hewlett, 1982). ანალოგიურად, Zhang et al. (2001) აჩვენებს, რომ მცენარეულობის ცვლილება ცვლის საშუალო წლიურ ევაპოტრანსპირაციას და იწვევს წყალშემკრების ჩამონადენის გაზომვად ცვლილებებს. Brown et al. (2005) და Farley et al. (2005) მიერ შესრულებულმა ანალიზმა და ექსპერიმენტმა დამატებით დაადას-

ტურა, რომ მცენარეულობის სიმჭიდროვის შემცირება ზრდის მდინარის ხარჯს, ხოლო ტყის გაშენება/გაზრდა (afforestation) ამცირებს წყლის ჩამონადენს გაძლიერებული ევაპოტრანსპირაციის გამო.

არაგვის აუზის ქვემო წელს უფრო მშრალი მახასიათებლები და უფრო მაღალი წყლის დეფიციტი ახასიათებს (საშუალო სიმაღლის და წყალშემკრების ზოგადი კლიმატური პირობების გამო), რის შედეგადაც ევაპოტრანსპირაცია წლიური წყლის ბალანსის უფრო დიდ წილს შეადგენს. ასეთ პირობებში მცენარეულობის მიერ წყლის გამოყენების მცირე შემცირებამაც კი შეიძლება არაპროპორციულად გაზარდოს ჩამონადენი, რამაც თავის მხრივ შეიძლება ხელი შეუწყოს მყარი ჩამონადენის ზრდას და ნიადაგის ეროზიასაც.

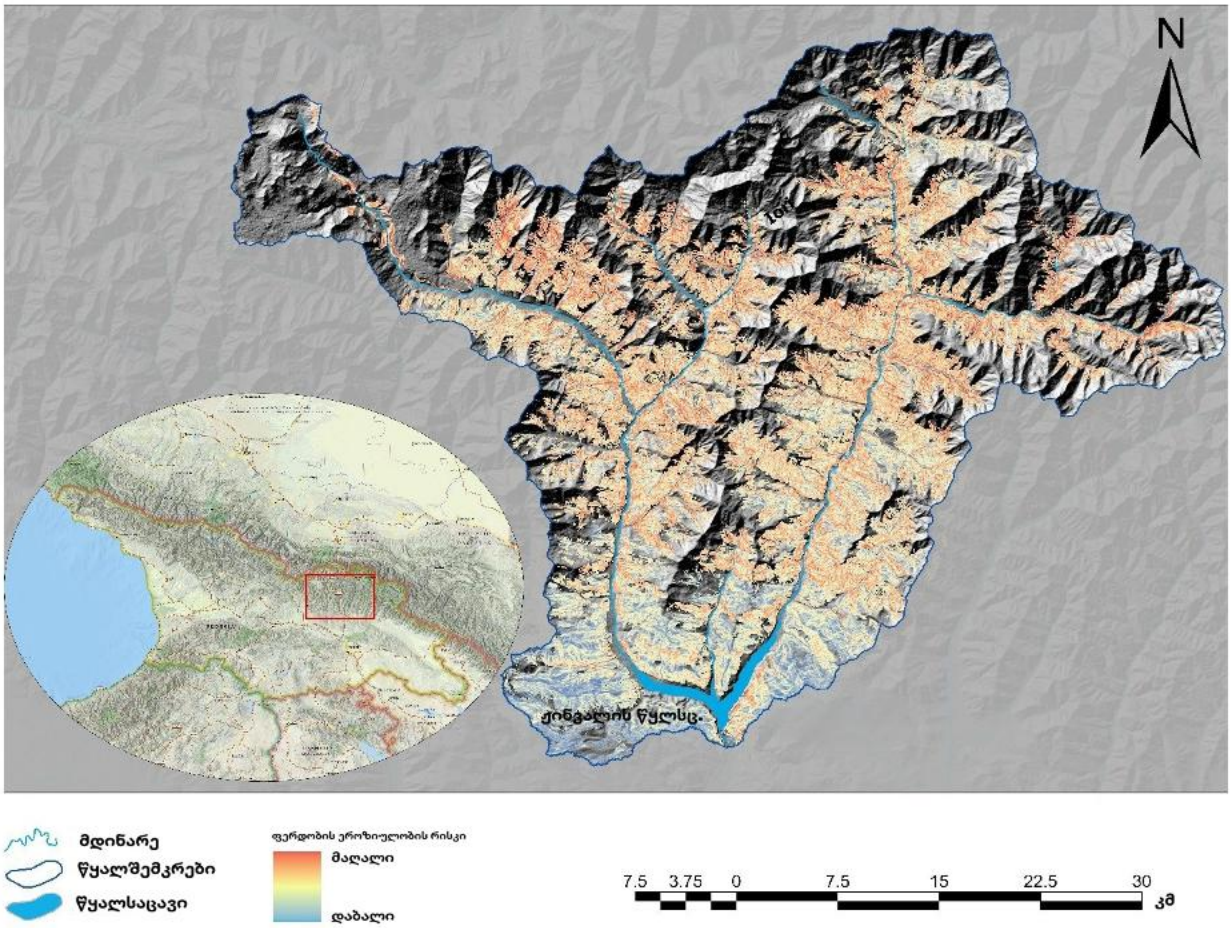
მნიშვნელოვანია განვასხვაოთ წლიური ჩამოანდენი (water yield) და მოვლენაზე დამოკიდებული (event-scale) ჰიდროლოგიური ქცევა. მიუხედავად იმისა, რომ მცენარეულობის სიმჭიდროვის შემცირება ზრდის მთლიან წლიურ ჩამონადენს, ამავე დროს შეიძლება გამოიწვიოს ინფილტრაციის სტაბილურობის შემცირება, ზედაპირული ჩამონადენის პიკების ზრდა და ჰიდროლოგიური რყევადობის გაძლიერება. ტყიანი აუზები, როგორც წესი, ასუსტებს პიკურ ხარჯებს და უზრუნველყოფს წყლის უფრო თანდათანობით განაწილებას ნიადაგის მარაგისა და ბაზისური ჩამონადენის (baseflow) პროცესების გაუმჯობესების საშუალებით. შესაბამისად, დაბალი NDVI პირობებში წლიური ხარჯის ზრდა ავტომატურად არ ნიშნავს ჰიდროლოგიური სტაბილურობის ან ეკოსისტემური მდგრადობის გაუმჯობესებას. მეტიც, ჩამონადენის ზრდა შეიძლება ნიშნავდეს უფრო მაღალ და ხშირ წყალმოვარდნებს და ბაზისური ხარჯის შემცირებას, რამაც შესაძლოა გამოიწვიოს უფრო ხანგრძლივი გვალვის პერიოდები, როდესაც წყალი დეფიციტურია.

მოდიფიცირებული NDVI სცენარის პირობებში (ცხრილი 16) მრავალწლიანი საშუალო ხარჯი აუზში გაიზარდა 5,1 მ³/წმ-ით (+10,3%). არაგვში უფრო ძლიერი შედარებითი რეაქცია შეესაბამება უფრო მეტად ევაპოტრანსპირაციით კონტროლირებულ (წყლით შეზღუდულ) რეჟიმს, სადაც ვარჯის სიმჭიდროვის შემცირება ამცირებს შეწოვის და ტრანსპირაციის დანაკარგებს და, შესაბამისად, ზრდის ნალექის იმ წილს, რომელიც ჩამონადენში გადადის. თუმცა, შიდაწლიური ჰიდროლოგიური მახასიათებლებისა და ცვლილებების დასადგენად საჭიროა უფრო მაღალი სივრცითი რეზოლუციის მონაცემები (ყოველდღიური ან საათობრივი) როგორც სატელიტური, ისე მიწისზედა მონიტორინგის სისტემების.

ცხრილი 16. შერჩეულ წყალშემკრებ აუზში ვარჯის შემცირების გავლენა წყლის ბალანსზე

წელი	Q მ³/წ	წელი	Q მ³/წ
1981	52.0	2002	58.5
1982	56.6	2003	45.6
1983	58.5	2004	45.6
1984	50.4	2005	66.7
1985	49.2	2006	49.2
1986	48.6	2007	42.3
1987	64.2	2008	41.0
1988	59.7	2009	52.3
1989	51.6	2010	51.2
1990	48.8	2011	55.9
1991	48.5	2012	47.6
1992	59.0	2013	45.0
1993	44.3	2014	50.8
1994	48.4	2015	48.8
1995	46.6	2016	50.7
1996	51.1	2017	46.3
1997	54.1	2018	42.2
1998	43.0	2019	38.9
1999	46.8	2020	36.6
2000	36.1	2021	42.2
2001	43.7	საშ.	49.2

შესაბამისად, შეგვიძლია ვთქვათ, რომ NDVI-ზე დაფუძნებული მცენარეულობის პარამეტრიზაცია წარმატებით ასახავს მიწის საფრის ზოგად გავლენას ევაპოტრანსპირაციაზე და ჩამონადენის გადანაწილებაზე. ტყის საფრის პარამეტრების ჩართვამ ჰიდროლოგიურ მოდელირებაში გაზარდა მიღებული შედეგების სანდოობა, განსაკუთრებით მიწის საფრის ცვლილებით და კლიმატის ცვლილებით გამოწვეული სცენარების გათვალისწინებით.



სურათი 18. ნიადაგის ეროზიის რისკი ტყის საფრის პირობებში „სუფთა ჭრის“ (clean cut) შემთხვევაში

როგორც ზემოთ აღინიშნა, LAI-ის შემცირების შემდეგ მდინარის წლიური ხარჯის თვალსაჩინო ზრდა განპირობებულია მცენარეულობის დაბალ სიმჭიდროვესთან დაკავშირებული ევაპოტრანსპირაციისა და შეწოვის დანაკარგების შემცირებით. ეს შედეგი შეესაბამება თეორიულ მოლოდინებს და ფართო ემპირიულ მტკიცებულებებს, რომლებიც აჩვენებს, რომ მცენარეულობა წარმოადგენს წყალშემკრებში წყლის გენერირებაზე (water yield) დომინანტურ მარეგულირებელს. მიღებული შედეგები ხაზს უსვამს მცენარეულობის დინამიკის გათვალისწინების მნიშვნელობას გრძელვადიანი ჰიდროლოგიური ცვალებადობისა და წყლის რესურსების ხელმისაწვდომობის შეფასებისას. ამასთანავე, შედეგები აჩვენებს ნიადაგის ეროზიის რისკის ზრდას ქაოტური და არარეგულირებული ტყის „სუფთა ჭრის“ შემთხვევაში, რაც ასევე ზრდის წყალსაცავის მოლამვის რისკს და კიდევ უფრო აუარესებს წყალსაცავის წყალტევადობას.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, არაგვი-ჟინვალის წყალშემკრები აუზის შემთხვევაში ტყის საფრის მდგომარეობა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან აუზი

პირდაპირ არის დაკავშირებული სტრატეგიული წყლის რესურსების უზრუნველყოფასთან. თბილისის, მცხეთისა და რუსთავის სასმელი და საყოფაცხოვრებო წყლით მომარაგება, ასევე ქვედა დინებაში სარწყავი და ეკოლოგიური საჭიროებები, დიდწილად დამოკიდებულია წყალშემკრები აუზის ჰიდროლოგიურ მდგრადობაზე და ჟინვალის წყალსაცავის ეფექტურ მარეგულირებელ ფუნქციაზე.

ამ კონტექსტში არაგვი-ჟინვალის აუზის ტყე უნდა განვიხილოთ, როგორც წყალმარეგულირებელი და ნიადაგდაცვითი ბუნებრივი ინფრასტრუქტურა. ტყის საფრის კვლევამ მნიშვნელოვანი გავლენა აჩვენა: მათ შორის იმაზე, რომ ჯამურად გაიზარდა ზედაპირული ჩამონადენი და პიკური ხარჯები, რაც ამცირებს საბაზისო ხარჯს და სტაბილურობას წლის ყველაზე მშრალ პერიოდებში, ხოლო მაღალი ტემპერატურული ამპლიტუდა და ტყის საფრის კიდევ უფრო დეგრადაცია აუცილებლად გააქტიურებს ნიადაგის ეროზიას და გაზრდის წყალსაცავში ინერტული მასალის აკუმულაციის რისკს. შესაბამისად, ტყის დაცვა ამ აუზში არ არის მხოლოდ სატყეო ან ბიომრავალფეროვნების საკითხი; იგი პირდაპირ უკავშირდება სასმელი წყლის უსაფრთხოებას, წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის შენარჩუნებას და კლიმატმედეგი წყლის განაწილების უზრუნველყოფას. ასევე, აუცილებელია გაფართოვდეს მონიტორინგის 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 WBG-ის კლიმატის ცვლილების მონაცემებთან ერთად, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება კლიმატური რისკებისა და წყლის რესურსების კვლევებში და, შესაბამისად, მიიჩნევა ერთ-ერთ ყველაზე საიმედო წყაროდ. აღნიშნული პროგნოზები შესაძლებელია პირდაპირ გარდაიქმნას ჰიდროლოგიური ანალიზისთვის საჭირო მონაცემებად. კლიმატის ცვლილების პროგნოზები ეყრდნობა მომავალი სათბურის გაზების ემისიების ტრაექტორიებს და გამოიყენება იმის შესაფასებლად, თუ როგორ შეიძლება შეიცვალოს იგი. უახლესი პროგნოზების საფუძველზე (საცნობარო პერიოდი: 1995-2014), შესაძლებელია წყალშემკრებ აუზში ნალექისა და ტემპერატურის ცვლილებების რაოდენობრივი შეფასება.

შერჩეული კლიმატის ცვლილების სცენარები, ისტორიულ მონაცემებთან (როგორც სატელიტური გაზომვების, ისე მიწისპირა სადგურის) შედარებით, 2021-2099 წლებისთვის მრავალწლიანი ნალექის მკვეთრ ზრდას აჩვენებს. ეს შედეგი მიუთითებს, რომ აუზის რთული ტოპოგრაფიის გამო კლიმატურმა მოდელებმა შესაძლოა ნალე-

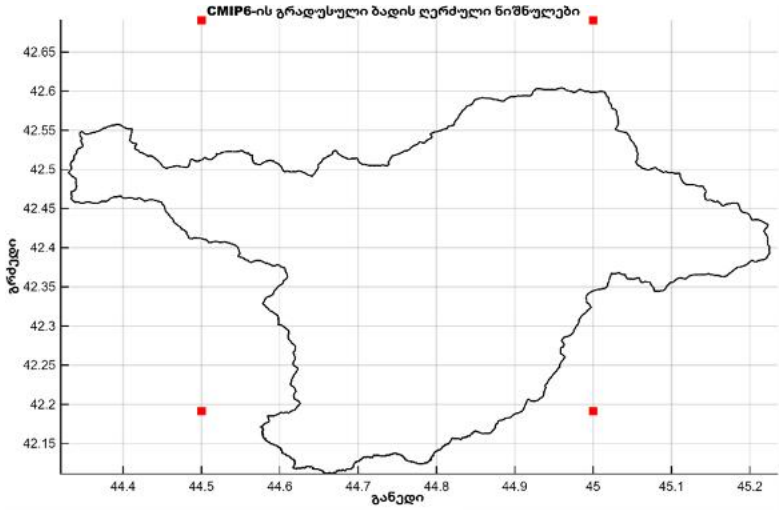
ქის მაჩვენებლები არასწორად (გადაჭარბებით) ასახა. ამასთან, მონაცემთა ანალიზი აჩვენებს, რომ CMIP6-ის ნალექისა და ტემპერატურის შედეგები ზოგადად თანხვედრაშია მიწის ზედაპირის სადგურებიდან მიღებულ ისტორიულ ჩანაწერებთან (განსაკუთრებით ტემპერატურული რეჟიმი).

ამიტომ შერჩეულ აუზში წყლის რესურსების მომავალი ცვლილებების შესაფასებლად, ჰიდროლოგიურ მოდელში ასევე გამოყენებულია როგორც ტემპერატურაზე, ისე ნალექზე დაფუძნებული პარამეტრები. ეს ფაქტორები ირიბად ითვალისწინებს ნალექის სეზონურ ვარიაციებსაც, მათ შორის გარკვეულ თვეებში მოსალოდნელ ზრდას, როგორც ეს შეჯამებულია ცხრილში 17.

ცხრილი 17. კლიმატის ცვლილების ინდიკატორების შედარება არაგვის აუზის ისტორიულ მონაცემებთან

	ნალექი (მმ/წ)	**T (ცელ)**	**ET (მმ/წ)**	**ჩამონადენი (მმ/წ)**	**Q მ³/წმ**
ისტორიული (1981-2021)	867.0	3.5	133.8	733.3	44.1
SSP5-8.5 (2021-99)	1114.0	4.4	152.3	962.2	57.9
SSP3-7.0 (2021-99)	1087.5	3.6	146.1	941.4	56.7
SSP2-4.5 (2021-99)	1092.9	3.2	143.9	949.1	57.1

როგროც ზემოთ ითქვა, მოდელის შედეგები მიუთითებს მრავალწლიანი ნალექის მნიშვნელოვან ზრდაზე ყველა შერჩეულ ემისიის სცენარში. თუმცა CMIP6-ის კლიმატის პროგნოზები მიღებულია გლობალური კლიმატური მოდელებიდან, რომელთა მიახლოებითი სივრცითი რეზოლუცია შეადგენს **0.5°**-ს. შესაბამისად, თითოეული ბადის უჯრა (grid cell) წარმოადგენს დიდ გეოგრაფიულ არეალს, რომელიც მნიშვნელოვნად აღემატება არაგვის წყალშემკრების სივრცით ზომას. ამ აუზებისთვის დამახასიათებელი რთული მთიანი ტოპოგრაფიისა და მკვეთრი სიმაღლის გრადიენტის გამო, ნალექს აქვს მაღალი სივრცითი ცვალებადობა, რომელიც ამ მასშტაბზე სრულად ვერ გამოიხატება. შედეგად, მოდელის პიქსელებიდან ამოღებული ნალექის მნიშვნელობები, სავარაუდოდ, ასახავს ბადის საშუალო პირობებს და არა აუზისთვის სპეციფიკური ნალექის ნიმუშებს, რაც მცირე წყალშემკრებებზე პირდაპირი გამოყენებისას იწვევს გადაჭარბებულ შეფასებას. ეს კარგად გამოჩნდა მიღებულ შედეგებში.



სურათი 19. არაგვის აუზისთვის გამოყენებული CMIP6-ის ბადის უჯრები (grid cells)

ამის საპირისპიროდ, ჰაერის ტემპერატურა რეგიონულ მასშტაბებზე მნიშვნელოვნად ნაკლებ სივრცით ცვალებადობას ავლენს და კლიმატური მოდელების მიერ უფრო თანმიმდევრულადაა პროგნოზირებული, თუნდაც უხეშ რეზოლუციაზე. CMIP6-ის პროგნოზებიდან მიღებული ტემპერატურის ტრენდები თანხვედრაშია ისტორიულ დაკვირვებებში გამოვლენილ დათბობის დახრასთან და ამიტომ ქმნის უფრო საიმედო საფუძველს კლიმატის ცვლილებაზე ჰიდროლოგიური რესურსის შესაფასებლად. ტემპერატურის ზრდა ჰიდროლოგიაზე ძირითადად განაპირობებს ევაპოტრანსპირაციის მოთხოვნის ზრდას, თოვლდნობის დროის და ჩამონადენის სეზონური გადანაწილების ცვლილებას.

ცხრილი 18. CMIP6-ის მონაცემების დათვლა აუზისთვის ფართობის წონის (area weight) განტოლების საფუძველზე

lon	lat	Area weight
44.5	42.19135088	0.740905988
44.5	42.69065651	0.735025176
45	42.19135088	0.740905988
45	42.69065651	0.735025176

საერთო ჯამში, ანალიზი მიუთითებს, რომ პროგნოზირებული დათბობა, სავარაუდოდ, გაზრდის ევაპოტრანსპირაციას და შეცვლის აუზის წყლის ბალანსს, რის შედეგადაც მომავალი კლიმატური სცენარების პირობებში მოსალოდნელია ჩამონადენის ცვლილება. თუმცა უხეში სივრცითი რეზოლუციის მქონე ნალექის პროგნოზებთან დაკავშირებული გაურკვევლობები რჩება ერთ-ერთ მთავარ შეზღუდვად.

მომავალი კვლევებისთვის პრიორიტეტული უნდა იყოს მაღალი რეზოლუციის რეგიონული კლიმატური მოდელირება და მასში ინტეგრირებული მიწისპირა სადგურების უფრო დიდი ქსელი, რათა გაუმჯობესდეს ოროგრაფიული ნალექის პროცესების წარმოდგენა და შემცირდეს გაურკვევლობა აუზის მასშტაბის ჰიდროლოგიურ პროგნოზებში.

კლიმატის ცვლილების გავლენა შერჩეული აუზების საშუალო ხარჯზე

მოდელირების შედეგად მოსალოდნელია, რომ კლიმატის ცვლილება შეცვლის არაგვის საშუალო ხარჯის რეჟიმს პირველ რიგში ტემპერატურის ცვლილებების გზით, ხოლო ნალექის გავლენა იქნება მეორეული და უფრო გაურკვეველი. მიწის ზედაპირის ტემპერატურული სადგურებისა და კლიმატური პროგნოზების (SSP-ები) საფუძველზე ჩატარებული ანალიზი აჩვენებს აუზზე დათბობის თანმიმდევრულ ტენდენციას, მაშინ, როდესაც მრავალწლიანი/წლიური ნალექის ჯამების გრძელვადიანი ცვლილებები რჩება გაურკვევლად და სივრცითად აუზის რთული ტოპოგრაფიის გამო.

ტემპერატურით განპირობებული ზემოქმედებები

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

- გაზრდილ **პოტენციურ ევაპოტრანსპირაციას**, რაც შეამცირებს ეფექტურ ჩამონადენს;
- ზემო, მთიან ზონებში **თოვლდნობის ნაადრევ დაწყებას**;
- სეზონური ჩამონადენის განაწილების წანაცვლებას _ გაზაფხულზე უფრო ადრე უფრო მაღალი ხარჯებით და გვიან ზაფხულსა და შემოდგომაზე შემცირებული ხარჯებით.
- წყლის რესურსების შემდგომ შემცირებას თბილისის, მცხეთისა და რუსთავის წყალმომარაგებაზე და სარწყავზე გაზრდილი მოთხოვნის გამო.

აღნიშნული პროცესები, დიდი ალბათობით, გამოიწვევს **წყლის მოთხოვნის ზრდასა და მდინარის ხარჯების შემცირებას**, მაშინაც კი, თუ წლიური ნალექის ჯამში ცვლილებები შეზღუდული იქნება. განსაკუთრებით 21-ე საუკუნის მეორე ნახევრიდან (სურათი 13).

ნალექთან დაკავშირებული გაურკვევლობა

მიუხედავად იმისა, რომ ზოგიერთი კლიმატური მოდელის შედეგები მიუთითებს მრავალწლიანი ნალექის ზრდაზე შუა საუკუნის პერიოდში (2021-2059), მიწის ზედაპირის სადგურებიდან და კალიბრირებული სატელიტური მონაცემებიდან მიღებული ისტორიული დაკვირვებები არ ადასტურებს ნალექის სტატისტიკურად მნიშვნელოვან გრძელვადიან ტენდენციას. ეს შეუსაბამობა მიუთითებს, რომ აუზისთვის ნალექის პროგნოზები შეიძლება იყოს მნიშვნელოვნად დამოკიდებული მოდელის გაურკვევლობებზე, რომლებიც დაკავშირებულია რთულ რელიეფთან, ოროგრაფიულ ეფექტებთან, ასევე SSP-ების სივრცით რეზოლუციასთან (სურათი 19). შედეგად, საშუალო ხარჯის ნალექით განპირობებული ზრდა ნაკლებად მოსალოდნელად ითვლება, ვიდრე ტემპერატურით განპირობებული ზემოქმედებები.

საშუალო ხარჯის მოსალოდნელი ცვლილებები

დათბობის, ევაპოტრანსპირაციის ზრდისა და ჩამონადენის სეზონური წანაცვლების ერთობლივი ეფექტების გათვალისწინებით, მოსალოდნელია, რომ კლიმატის ცვლილება გამოიწვევს:

- წყალშემკრებში დიდი ალბათობით წლიური საშუალო ხარჯის შემცირებას.
- ზაფხულსა და ადრეულ შემოდგომაზე საშუალო ხარჯების შემცირებას, როდესაც წყლის მოთხოვნა მაქსიმალურია, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, თუ LAI ინდექსიც გაუარესდება.
- შიდაწლიური ცვალებადობის ზრდას _ უფრო მკვეთრ ცვლილებას (რყევის ამპლიტუდა) ნოტიო და მშრალ სეზონებს შორის, განსაკუთრებით, თუ ტყის საფარი დაზიანდება; ეს საბოლოოდ გაზრდის წყალდიდობის საშიშროების რისკს და შეამცირებს მდინარეში ბაზისური ხარჯის დონეს.
- ზაფხულის ტემპერატურის ზრდისა და გახანგრძლივებული გვალვების გამო, მოსალოდნელია როგორც სარწყავი წყლის მოთხოვნის ზრდა, ასევე ევაპოტრანსპირაციის ზრდა.
- წყალმომარაგებისთვის წყლის მოთხოვნის ზრდა მოსალოდნელია; თუმცა ამჟამად არ არსებობს დადასტურებული მომავალი მოთხოვნის სცენარები. საქართველოს სტატისტიკის ეროვნული სამსახურის მიხედვით, წყალმომარაგებისა და სარწყავი სისტემების წყლის დანაკარგები დაახლოებით 68%-ს შეადგენს. შესაბამისად, მიუხედავად იმისა, რომ საერთო მოთხოვნა შეიძლება გაიზარდოს, მნიშვნელოვანი შემარბილებელი პოტენციალი არსებობს წყლის ინფრასტრუქტურის გაუმჯობესებისა და სისტემური დანაკარგების შემცირების გზით.

ცხრილი 19. არაგვის მდინარის ხარჯის განაწილება და წყლის რესურსების ხელმისაწვდომობა (მრავალწლიანი საშუალო, სინთეზურ მოდელირებაზე დაფუძნებული)

მდიანრე არაგვი (ჟინვალის წყალსაცავი)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	საშ.
მოდინება	*18.2*	*18.6*	*27.4*	*63.0*	*96.8*	*88.4*	*59.7*	*41.7*	*34.3*	*32.7*	*27.0*	*21.3*	*44.1*
ჰესის მოხმარება[4]	*27.3*	*27.3*	*27.3*	*27.3*	*67.0*	*67.0*	*67.0*	*27.3*	*27.3*	*27.3*	*27.3*	*27.3*	*37.2*
ირიგაცია					*4.5*	*4.5*	*4.5*	*4.5*	*4.5*	*4.5*			*4.5*
დანაკარგი	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*	*2.3*
თბილისის მოთ.[5]	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*	*14.2*
გარემოს. -ხარჯი	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*	*10.0*
წყლის დეფიციტი.	*-8.3*	*-7.9*	*0.9*	*36.5*	*65.8*	*57.4*	*28.7*	*10.8*	*3.3*	*1.8*	*0.5*	*-5.2*	*15.4*

აღსანიშნავია, რომ ცხრილში 19 წარმოდგენილი დეფიციტის მნიშვნელობები წარმოადგენს შეფასებას, რომელიც მიღებულია იმ დაშვებით, რომ ჟინვალის წყალსაცავის სისტემაში სარწყავი და წყალმომარაგების მოთხოვნები სრულად კმაყოფილდება მხოლოდ წყალსაცავიდან განხორციელებული გაშვებებით. ეს წარმოაჩენს ჟინვალის წყალსაცავის კრიტიკულ მარეგულირებელ ფუნქციას იმის გათვალისწინებით, რომ შემოდგომა-ზამთრის პერიოდი რეალურად დეფიციტურია. ეს ფაქტორი, ყოველდღიური ხარჯის მონაცემებთან და ოპერირების პროტოკოლთან ერთად, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს წყლის რეალურ განაწილებაზე.

ჟინვალის წყალსაცავისა და ბოდორნას წყლის მიმღების ერთობლივი ოპერირება, როგორც წესი, საშუალებას იძლევა, მიმდინარე მოთხოვნები დაკმაყოფილდეს საშუალო ჰიდროლოგიურ წლებში. თუმცა, ანალიზი მიუთითებს, რომ სისტემა მუშაობს ოპერაციული შესაძლებლობების ზღვართან ახლოს _ გაზრდილი მოლამვის, ჰიდროლოგიური პარამეტრების ცვლილებისა და წყლის მოთხოვნის ზრდის ფონზე. იმ წლებში, როდესაც ნალექი საშუალოზე დაბალია ან ჩამონადენი შემცირებულია, წყალსაცავის არსებობით შექმნილი ბუფერული წყლის მოცულობა აღარ არის საკმარისი და სისტემა შეიძლება მოექცეს მნიშვნელოვანი ზეწოლის ქვეშ, რაც გაუარესებს წყლის მიწოდების სანდოობას და რესურსის მართვას.

[4] ჰიდროენერგიის გამოყენება შუალედური პროცესია და, შესაბამისად, არ აქვს პირდაპირი გავლენა წყლის სხვადასხვა საჭიროებებზე განაწილებაზე. დამატებით, საჯაროდ ხელმისაწვდომი ოპერირების პროტოკოლი არ არსებობს, რის გამოც დაშვება ზოგად ხასიათს ატარებს.

[5] GWP - N OG26-1210393

დასკვნა

ჩატარებულმა ანგარიშებმა და მიმოხილვამ აჩვენა, რომ არაგვი-ჟინვალის სისტემა წარმოადგენს ჰიდროკლიმატურად და წყლის რესურსის მართვის კუთხით მოწყვლად, მკაცრად რეგულირებად და მრავალმიზნობრივ წყლის სისტემას. ჟინვალის მონაკვეთზე მოდელირებული გრძელვადიანი საშუალო ხარჯი _ დაახლოებით 44,2 მ³/წმ, ძალიან ახლოს ემთხვევა სადგურზე დაკვირვებულ გრძელვადიან მნიშვნელობას (43,1 მ³/წმ), ეს კი მიუთითებს, რომ მოდელის პარამეტრიზაცია ადეკვატურია. ამასთან, ბოლო ათწლეულში აუზში წყლის ხელმისაწვდომობის შესამჩნევი კლება გამოიკვეთა, რაც ნიშნავს, რომ არსებული პირობების ფონზე ოპერაციული სანდოობის „მარაგი“ ნელ-ნელა მცირდება.

ანგარიშში იდენტიფიცირებული კლიმატური პარამეტრები ტემპერატურისთვის მნიშვნელოვნად უფრო ძლიერია, ვიდრე ნალექისთვის. დაკვირვებითი ანალიზი აჩვენებს სტატისტიკურად მნიშვნელოვან დათბობას სამივე შერჩეულ სადგურზე 1981 წლიდან, რაც მიუთითებს, რომ ტემპერატურის ზრდა უკვე დამკვიდრებული რეგიონული ტენდენციაა და არა მხოლოდ ჰიპოთეზური მომავალი შესაძლებლობა. ამის საპირისპიროდ, ნალექს ახასიათებს მკვეთრი წლიდან წლამდე ცვალებადობა, სივრცითი ერთგვაროვნება და პროგნოზირების მაღალი გაურკვევლობა აუზის რთული ტოპოგრაფიისა და ხელმისაწვდომი კლიმატური მოდელების უხეში სივრცითი რეზოლუციის გამო. შესაბამისად, ყველაზე დასაბუთებული კლიმატური რისკის დასკვნა არის ის, რომ დათბობა გააძლიერებს ევაპოტრანსპირაციას, შეცვლის თოვლდნობისა და ჩამონადენის დროით რეჟიმს და გაზრდის წყლის სეზონურ მოთხოვნას, განსაკუთრებით გვიან გაზაფხულსა და ზაფხულში, იმ შემთხვევაშიც კი, თუ მომავალი წლიური ნალექის ჯამები გაურკვეველი დარჩება.

ამ კონტექსტში, ჟინვალის წყალსაცავი კვლავაც რჩება აუზის ცენტრალურ მარეგულირებელ ელემენტად, თუმცა მისი ეფექტური „ბუფერული“ ფუნქცია უკვე მცირდება განგრძობადი მოლამვის გამო. არსებული მონაცემები მიუთითებს, რომ სასარგებლო მოცულობა საპროექტო მნიშვნელობიდან (370 მლნ მ³) 2013 წლისთვის შემცირდა დაახლოებით 320 მლნ მ³-მდე, ხოლო წყალსაცავის ოპერატორის მიერ მოწოდებული ინფორმაციით, 2024 წლის აგვისტოში წყალსაცავში წყლის სასარგებლო მოცულობა დაახლოებით 310 მლნ მ³ იყო. იგივე წყაროები მიუთითებს, რომ წყალსაცავში დაგროვილი არის დაახლოებით 126 მლნ მ³ დანალექი; საშუალო წლიური მოლამვის ტემპი შეადგენდა დაახლოებით 4,5 მლნ მ³/წ; ხოლო წლიური, წყალსაცავიდან აორთქლების შედეგად გამოწვეული დანაკარგი დაახლოებით 6,3 მლნ მ³-ს. ეს ადასტურებს, რომ დაგროვების მოცულობის შემცირება მნიშვნელოვა-

ნია, რადგან შემცირებული ეფექტური მოცულობა პირდაპირ ამცირებს წყალსაცავის შესაძლებლობას, დააბალანსოს მშრალი პერიოდები, დაარეგულიროს სეზონური ცვალებადობა და უზრუნველყოს ქვედა დინების საიმედო განაწილებები.

ანალიზი ასევე აჩვენებს, რომ არსებული წყლის განაწილების ზეწოლა განპირობებულია არა მხოლოდ ჰიდროლოგიური ცვლილებით, არამედ სისტემის არაეფექტიანობითაც. მონაცემები მიუთითებს, რომ საშუალო სარწყავი წყლის მოთხოვნა შეადგენს დაახლოებით 2,69 მ³/წმ-ს, რაც შეფასებული მორწყული ფართობისთვის განაწილებით წლიურად დაახლოებით 35,62 მლნ მ³-ს უდრის; ამავე დროს, სისტემური დანაკარგები დაახლოებით 67%-ს შეადგენს[6], რაც დამატებით წლიურად დაახლოებით 24,2 მლნ მ³ დანაკარგს (ან დაახლოებით 1,8 მ³/წმ) ნიშნავს. ანგარიშში გამოყენებულ სეზონური განაწილების ჩარჩოში სარწყავი მოთხოვნა სარწყავ პერიოდში წარმოდგენილია დაახლოებით 4,5 მ³/წმ-ის დონეზე, რაც კიდევ უფრო ნათლად აჩვენებს მოთხოვნის კონცენტრაციას თბილ სეზონზე.

კვლევის შედეგები მიუთითებს, რომ არაგვი-ჟინვალის წყალშემკრებ აუზში ტყის საფარი უნდა განიხილებოდეს, როგორც სტრატეგიული წყალმარეგულირებელი და ნიადაგდაცვითი ბუნებრივი ინფრასტრუქტურა. NDVI/LAI ანალიზმა აჩვენა, რომ მცენარეულობის შემცირების სცენარში ყოველი 0,1 პუნქტით მრავალწლიური საშუალო ხარჯი იზრდება დაახლოებით 5,1 მ³/წმ-ით, ანუ 10,3%-ით. თუმცა ეს ზრდა არ არის დადებითი ჰიდროლოგიური ეფექტი, რადგან მცენარეულობის დეგრადაცია ზრდის ზედაპირულ ჩამონადენს, პიკური ხარჯების, ფერდობების ეროზიას და წყალსაცავში მყარი ნატანის მოხვედრის რისკს, 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.

[6] სტატისტიკის ეროვნული სააგენტო

ჯამურად, შეგვიძლია ვთქვათ, რომ არაგვი-ჟინვალის სისტემა უკვე ფუნქციონირებს მნიშვნელოვანი, თუმცა ჯერ კიდევ მართვადი სტრესის პირობებში. სამომავლო ძირითადი რისკი დაკავშირებულია დათბობასთან, წყლის მოთხოვნის ზრდასთან, წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის კლებასთან, რაც აუცილებლად გაძლიერდება მცენარეული საფრის დეგრადაციის გაძლიერების პარალელურად.

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 არაგვი