

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ვახტანგ ბოგვერაძე

მდინარე არაგვის წყალშემკრები აუზის გარემოსდაცვითი რეგულირების
მოდელები

სადოქტორო პროგრამა „წყლის რესურსების ინჟინერია“

შიფრი 0712

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
სამშენებლო ფაკულტეტი
ჰიდროტექნიკისა და სამოქალაქო ინჟინერიის N104 დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი ედუარდ
კუხალაშვილი

რეცენზენტები:

1. ინაშვილი ირმა-პროფესორი, სტუ (რეცენზენტი); სამშენებლო ფაკულტეტი;
2. გავარდაშვილი- გივი აკადემიკოსი, ც.მირცხულავას სახელობის წყალთა
მეურნეობის ინსტიტუტის დირექტორი, სტუ (მოწვეული რეცენზენტი)

საჯარო დაცვა შედგება 2026 წლის 27 თებერვალს, 15 საათზე, საქართველოს
ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის
დაცვის კოლეგიის სხდომაზე I კორპუსი, V სართული, აუდიტორია 508 (ბიბლიოთეკა)

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 68

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ–ს ბიბლიოთეკაში,

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77

ხოლო ავტორეფერატისა – ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული

მდივანი, პროფესორი

დემურ ტაბატაძე

შესავალი

გეოგრაფიული კონსტრუქციულობის თვალსაზრისით, მთისა და მთისწინა რაიონების მდგრადობის რღვევა, ბუნებრივი რესურსების უკონტროლო გამოყენება, მოსახლეობის რაოდენობრივი ზრდა, ასევე ჰაერისა და წყლის დეფიციტი წარმოადგენენ რისკფაქტორებს, რომლებიც ხელს უწყობენ ბუნებრივი ანომალიების წარმოქმნას. აღნიშნული ანომალიები, თავის მხრივ, იწვევენ ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის მდგრადობის და ეკოლოგიური წონასწორობის არასტაბილურობას.

საქართველო ბუნებრივი ანომალიების ზემოქმედების შემთხვევებითა და ობიექტებზე ზემოქმედების განსაკუთრებულობებით ურთულეს რეგიონადაა წარმოდგენილი და ანომალურობის სხვა სახეებთან ერთად წყალდიდობის, ღვარცოფების, ზემოქმედების ზონაშია მოქცეული.

სტიქიათა ფონური გააქტიურების შემთხვევაშიც კი, გამოწვეული ზარალის მასშტაბები ასეული მილიონობით დოლარს აღემატება.

ღვარცოფების ზემოქმედების ზონაში განლაგებულია დაახლოებით 2 მილიონამდე ჰექტარი ფართობის ტერიტორია, რომელიც ძირითადად თერგის, არაგვის, ალაზნის, ენგურის და რიონის წყალშემკრები აუზების ზემო ნაწილში მდებარეობს. საველე კვლევის მასალების მიხედვით, აღმოჩენილია 350-მდე აქამდე უცნობი ღვარცოფწარმომქმნელი კერა. აღსანიშნავია, რომ საშიშროების ზონაშია დაახლოებით 53 ათასამდე მეწყრულ-გრავიტაციული უბანი, 3 000-მდე ღვარცოფული სადინარი და 30 ათასამდე დასახლებული პუნქტი. ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის მდგრადობა განპირობებულია ანომალიათა წარმოქმნის პოტენციალით, დეფორმაციულობისა და მორფომეტრიული პარამეტრების შერწყმის სირთულეებით. წარმოდგენილი ანომალიების ენერგეტიკა, წყალსადინარების ტრასების აუზებში განლაგება, პრიზმატულობის განსაკუთრებულობები, ატმოსფერული ნალექებით წარმოქმნილი ზედაპირული ჩამონადების ტრანსპორტუნარიანობა და ღვარცოფების თვითფორმირების მახასიათებლები განსაზღვრავენ მათ გარემოზე ზემოქმედების ხარისხს.

ამასთან, რთულდება ანომალიების გარემოს მდგრადობაზე ზემოქმედების მოდელებისა და შეფასების ოპერატიული მეთოდების შექმნის შესაძლებლობები.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში მიღებული მეცნიერული სიახლეები წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

– დადგენილია, რომ ღვარცოფსადინარების განლაგების კონფიგურაცია და მათი გრძივი პროფილის სიგრძეზე ცვლილების კანონზომიერება შესაძლებელია მათემატიკურად იქნეს აღწერილი. კვლევებმა აჩვენა, რომ განივი კვეთის ფორმა ყველაზე მეტად მიახლოებულია მრუდწირული ტრაპეციის კონფიგურაციასთან, რაც ქმნის მისი მოდელირების უფრო ზუსტ და ფიზიკურად დასაბუთებულ საფუძველს;

– სტიქიური მოვლენების ზემოქმედებითი შესაძლებლობების მახასიათებლებზე დაყრდნობით შეფასებულია უწყვეტი ტალღის დინამიკურ პარამეტრებთან ფარდობის პრინციპი; მოძრაობის რეჟიმზე დაყრდნობით გამოყვანილია, როგორც ტალღის სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება, ისე რეოლოგიურ მახასიათებელთან კავშირში დაზუსტებულია მდგრადობის ქანობის ცვლილების მათემატიკური მოდელი;

– დიფერენციალურ განტოლებებზე დაყრდნობით, დადგენილია ღვარცოფული მასის დეფორმაციულობის სტატიკური და დინამიკური მახასიათებლები;

– დადგენილია ღვარცოფული მასის დეფორმაციულობის დამოკიდებულება მასზე მოქმედ ძალებსა და აჩქარებაზე, ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებთან კავშირში;

– კალაპოტის მდგრადი სიგანის მოდელზე დაყრდნობით, ღვარცოფული გამონატანით ფორმირებული სადინარისთვის, მიღებულია ზღვრული გამრეცხი სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება;

– ჰიდრავლიკური ტალღის მოდელზე დაყრდნობით, გამოყვანილია ფორმირებული ღვარცოფის განმსაზღვრელი პარამეტრების, კერძოდ დამეწყრილი და კერაში დარჩენილი ღვარცოფული მასის სიღრმის, დამეწყვრის დროის, სიგრძის, ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულებები;

- ღვარცოფწარმოქმნელი კერების, გამოტანის კონუსების, ღვარცოფსადინარების სავლე ექსპერიმენტული კვლევის შედეგებით ღვარცოფთა მახასიათებლების დროში ხარჯის პროგნოზისათვის, უსაფრთხო ტრანზიტის განივი და გრძივი მონაკვეთების გამაგრება-რეაბილიტაციის მიზნით შემოთავაზებულია საპროექტო გადაწყვეტების კრიტერიუმების რეკომენდაციები;

- ღვარცოფული გამონატანით თვითფორმირებული სადინარებისათვის შეფასებულია დეფორმაციულობა, გამრეცხი სიჩქარე და დაზუსტებულია სადინარის მდგრადობის წინააღმდეგობრივი შესაძლებლობები;

თემის აქტუალურობა. ბუნებრივი ანომალიების სიხშირისა და გარემოს რისკების გათვალისწინებით, გარემოსა და ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის მდგრადობა დაკავშირებულია მრავალ პრობლემასთან, რომელთაც ისტორიული, კულტურული და საგანმანათლებლო მნიშვნელობა აქვთ. ამავე დროს, სარეგულაციო და საინჟინრო გადაწყვეტების არსებული კვლევები გარემოსდაცვითი ეფექტების შეფასების თვალსაზრისით ჯერ კიდევ არასრულია, ხოლო მდგრადობის შეფასების მოდელების სრულყოფილი, სისტემატიზებული ფორმები ნაკლებად არის შემუშავებული. გარდა ამისა, ექსპლუატაციაში არსებული ნაგებობების გარემოსდაცვითი შესაძლებლობები დაბალ დონეზეა, რაც ხელს უწყობს ეროზიული და ღვარცოფული პროცესების პოტენციალის ზრდას და შემდგომ საფრთხეებს უქმნის გარემოსა და ინფრასტრუქტურას.

მნიშვნელოვანია ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის მდგრადობის, ღვარცოფების დარეგულირების ეფექტიანობისა და ეკოლოგიური წონასწორობის განმაპირობებელი ფაქტორების ზუსტი შეფასება, რისთვისაც აუცილებელია: მდგრადობის შეფასების ოპერატიული მოდელების დახვეწა; წყალშემკრები აუზების გარემოს მდგრადობის რღვევის შესაძლებლობების განსაზღვრა ბუნებრივი ანომალიების პირობებში; აღნიშნული შესაძლებლობების მათემატიკური მოდელებით შეფასება და პროგნოზირება; ნაკადისა და სადინარის კალაპოტის მორფომეტრიული პარამეტრების ურთიერთკავშირის უზრუნველყოფა; სარეგულაციო კონსტრუქციების

განგარიშების მოდელების სრულყოფა; სამშენებლო ნორმებისა და წესების დაზუსტება.

ამ პრობლემათა კომპლექსური გადაწყვეტა რჩება აქტუალურ გამოწვევად, რომელიც მოითხოვს ინოვაციურ მიდგომებსა და მიზანმიმართულ კვლევებს.

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა. სადისერტაციო ნაშრომით შემოთავაზებული ღვარცოფთა ენერგეტიკისა და საინჟინრო გადაწყვეტების მოდელები ხელს შეუწყობს გარემოს დაცვისა და ეკოლოგიური წონოსწორობის მდგრადობის პირობებს. წარმოქმნილი მოდელები, რომლებიც ტალღის დინამიკურ პარამეტრებთან და ღვარცოფული მასის რეოლოგიურ მახასიათებლებთან არის ინტეგრირებული, ქმნიან მყარ საფუძველს ღვარცოფული პროცესების რეალისტური პროგნოზირებისა და რისკების შეფასებისთვის. აღნიშნული მიდგომა საშუალებას აძლევს ინჟინრებს და გარემოსდაცვით სპეციალისტებს განსაზღვრონ სტიქიური მოვლენების ზემოქმედება, შეაფასონ სადინარებისა და ინფრასტრუქტურის მდგრადობა, დაგეგმონ ეფექტური კონტროლისა და დამცავი ღონისძიებები, და, საბოლოოდ, გაზარდონ მდინარის აუზის მართვის უსაფრთხოება და ეფექტიანობა.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები თავების მიხედვით

ღვარცოფული პროცესები, გარემოზე ზემოქმედების მრავალმხრივი სპექტრით, მასშტაბურობით, დროში სიხშირით, დასახლებულ პუნქტებზე მიყენებული ნეგატიური შედეგებით, მთიანი რეგიონების ურთულესი ანომალითაა წარმოდგენილი.

სადისერტაციო ნაშრომის პირველ თავში – „**ლიტერატურული მიმოხილვა – ღვარცოფული მოვლენები**“ განხილულია ღვარცოფული მოვლენების შესახებ არსებული სამეცნიერო ცოდნა და კვლევითი გამოცდილება როგორც საერთაშორისო, ისე ქართულ სამეცნიერო სივრცეში, რომელიც მიზნად ისახავს ღვარცოფული პროცესების თეორიული საფუძვლების სისტემატიზაციას, მათი წარმოშობის, განვითარების და გავრცელების მექანიზმების კომპლექსურ გაანალიზებას, რაც

აუცილებელ წინაპირობას წარმოადგენს შემდგომი კვლევების მეცნიერული დასაბუთებისთვის.

განსაკუთრებული ყურადღება გამახვილებულია ღვარცოფების როლზე, როგორც ერთ-ერთ ყველაზე საშიშ სტიქიურ მოვლენაზე, განსაკუთრებით მთიან და მთისწინა რეგიონებში.

განხილულია ღვარცოფთა კლასიფიკაციის ძირითადი სქემები, რომლებიც ეფუძნება სხვადასხვა კრიტერიუმს, მათ შორის გენეზისს, გრანულომეტრიულ შემადგენლობას, მყარი მასისა და წყლის თანაფარდობას, მოძრაობის სიჩქარესა და ენერგეტიკულ პოტენციალს. პარალელურად გაანალიზებულია ღვარცოფთა შეფასების მეთოდები, რომლებიც გამოიყენება მათი საშიშროების დონის, ინტენსივობისა და პოტენციური ზემოქმედების განსაზღვრისათვის, რაც მნიშვნელოვანია როგორც მეცნიერული, ისე პრაქტიკული თვალსაზრისით.

შესწავლილია ღვარცოფული მოვლენების შესწავლის განვითარების ისტორიული ეტაპები. აღწერილია კლასიკური, გეოლოგიური და გეომორფოლოგიური მიდგომებიდან თანამედროვე ინტერდისციპლინურ კვლევებამდე განვლილი გზა, მათ შორის ჰიდროლოგიური, გეოფიზიკური და საინჟინრო მიმართულებების ინტეგრაცია. განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა წამყვანი მეცნიერების ნაშრომებსა და მათ მიერ შემოთავაზებულ თეორიებს ღვარცოფთა ფორმირებისა და დინამიკის შესახებ. დეტალურად არის აღწერილი ღვარცოფული მოვლენების სივრცითი გავრცელება საქართველოს სხვადასხვა ფიზიკურ-გეოგრაფიულ რეგიონში. წარმოდგენილია ღვარცოფების აქტივობის რეგიონული თავისებურებები, მათი კავშირი კლიმატურ პირობებთან, გეოლოგიურ აგებულებასა და რელიეფის მახასიათებლებთან. გაანალიზებულია სტატისტიკური მონაცემები, რომლებიც ასახავს ღვარცოფებით გამოწვეულ ზიანს და საფრთხეს დასახლებულ პუნქტებსა და ინფრასტრუქტურულ ობიექტებზე.

კვლევების არსებული მასალებიდან გამომდინარე, ღვარცოფთა საანგარიშო მახასიათებლების სრულყოფასა და მოვლენაზე მათემატიკური მოდელების

ადაპტირების მიზნით, მოვლენაზე მეცნიერთა სხვადასხვა წარმოდგენების მიუხედავად, უამრავი სამეცნიერო ნაშრომია მიძღვნილი. წარმოდგენილი შრომების უმრავლესობა ძირითადად სპეციალურ და მომიჯნავე სფეროში გამოყენებული ფუნდამენტური თეორიების შერწყმის მეთოდებზეა დაფუძნებული. განსაკუთრებით ყურადღებას იპყრობს ბ. ახმედოვის, გ. ბერუტაშვილის, მ. გაგოშიძის, გ. გავარდაშვილის, ზ. გვიშიანის, დ. კერესელიძის, ი. ყრუაშვილის, ე. კუხალაშვილის, ც. მირცხულავას, ო. ნათიშვილის, გ. სვანიძის, გ. ხარაიშვილის, გ. ხერხეულიძის, რ. დიაკონიძის სამეცნიერო შრომები.

მრავალკომპონენტურობა და კონცენტრაციული ცვლილების დიდი დიაპაზონი ღვარცოფთა ზემოქმედებითი მონაცემებით არის დადასტურებული. მეცნიერული თვალსაზრისით, განსაკუთრებულ ყურადღებას კერებში მათი მდგრადობის რღვევის, დაძრული მასის სადინარში ქცევის, გარემოსდაცვითი მოდელების ოპერატიული საშუალებების სრულყოფის და ინოვაციურით აღწერის სფეროში მონაწილე ფაქტორთა სპექტრის მაქსიმალურად გათვალისწინება იპყრობს.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, მნიშვნელოვანია როგორც ნაკადის მდგრადობის რღვევის, ისე შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების დროს მოძრაობის სხვადასხვა რეჟიმით ჩამოყალიბებისა და შესაბამისი მოდელების ნაკადთან ადაპტაციის შესაძლებლობები, რასაც ადასტურებს ღვარცოფთა შესწავლის მრავალწლიანი ისტორია და ოპერატიული საშუალებებით მიღებული შედეგების ერთმანეთისაგან განსხვავებულობა.

განგარიშების შემოთავაზებული მეთოდები და ოპერატიული საშუალებების არსებული საანგარიშო დამოკიდებულებების თანამედროვე სახეების ანალიზი ადასტურებს, რომ მათი უმრავლესობა სრულად არ შეესაბამება სადინარში ღვარცოფთა ქცევას და ვერ იძლევა ენერგეტიკული მახასიათებლებით მოვლენის სრულყოფილად აღწერის შესაძლებლობას. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ინოვაციური მოდელებით მოვლენის აღწერის სურათი ნაშრომში უფრო

სრულყოფილი სახით არის წარმოდგენილი და კარგად ადაპტირებულია მოვლენის ფიზიკასთან.

მეორე თავი „ღვარცოფთა დინამიკური მახასიათებლები“ მოიცავს ღვარცოფთა გარემოზე ზემოქმედების შესწავლას, სარისკო სიტუაციების განმსაზღვრელი ფაქტორების (გეოგრაფიული პირობები, ზღვრული წონასწორობა, სიმძლავრე) ანალიზს, ასევე მათი ჰიდროლოგიური რისკების შეფასებასა და ოპერატიული შეფასების საშუალებების შექმნას.

კვლევის მიზანი არა მხოლოდ საანგარიშო მოდელების შექმნა, არამედ არსებული თეორიული და ექსპერიმენტებით მიღებული მოდელების კორექტირება და სამშენებლო ნორმებისა და წესების დაზუსტებაა.

კონკრეტული სამეცნიერო შედეგების მიღების, სადინარების დარეგულირების მეთოდისა და საინჟინრო გადაწყვეტების მოვლენასთან ადაპტაციის მიზნით საკვლევ ობიექტად შერჩეულია მდინარე არაგვის წყალშემკრები აუზი (სურ.1).



სურ. 1. მდინარე არაგვის წყალშემკრები აუზის სქემა

ღვარცოფთა ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების, ბმულობის და ენერგეტიკული სიდიდეების დადგენის მიზნით საკვლევ ობიექტში შერჩეული იქნა როგორც მარჯვენა ისე მარცხენა შენაკადები. მილიმეტრიანი და მასზე ნაკლები დიამეტრის მქონე ნაწილაკების ბმულობის შესწავლის მიზნით კვლევების პირველი სერია ჩადისციხის, ქვემო ამირთხევის, ზემო ამირთხევისა და დიდი ქიმბარანის ადვილად მისაწვდომ უბნებზე წარმოებდა, ხოლო ჩამონადენის ჰიდროლოგიური პროცენტულობის შესწავლის მიზნით დაკვირვებები 32 შენაკადის ჩამონადენზე ხორციელდებოდა.



ა. ჩადისციხის ხევი



ბ. ქვემო ამირთხევი



გ. ზემო ამირთხევი



დ. დიდი ქიმბარანი

სურ. 2. შერჩეული ხევებიდან ნიმუშების აღება

კვლევებით დადასტურდა, ცალკეული შენაკადების ღვარცოფული გამონატანის მოცულობითი წონების განსხვავებული მნიშვნელობები: ჩადისციხის ხევი – 21800 ნ/მ³, ქვემო ამირთხევი – 18400 ნ/მ³, ზემო ამირთხევი ნ/მ³, დიდი ქიმბარანი – 22800 ნ/მ³.

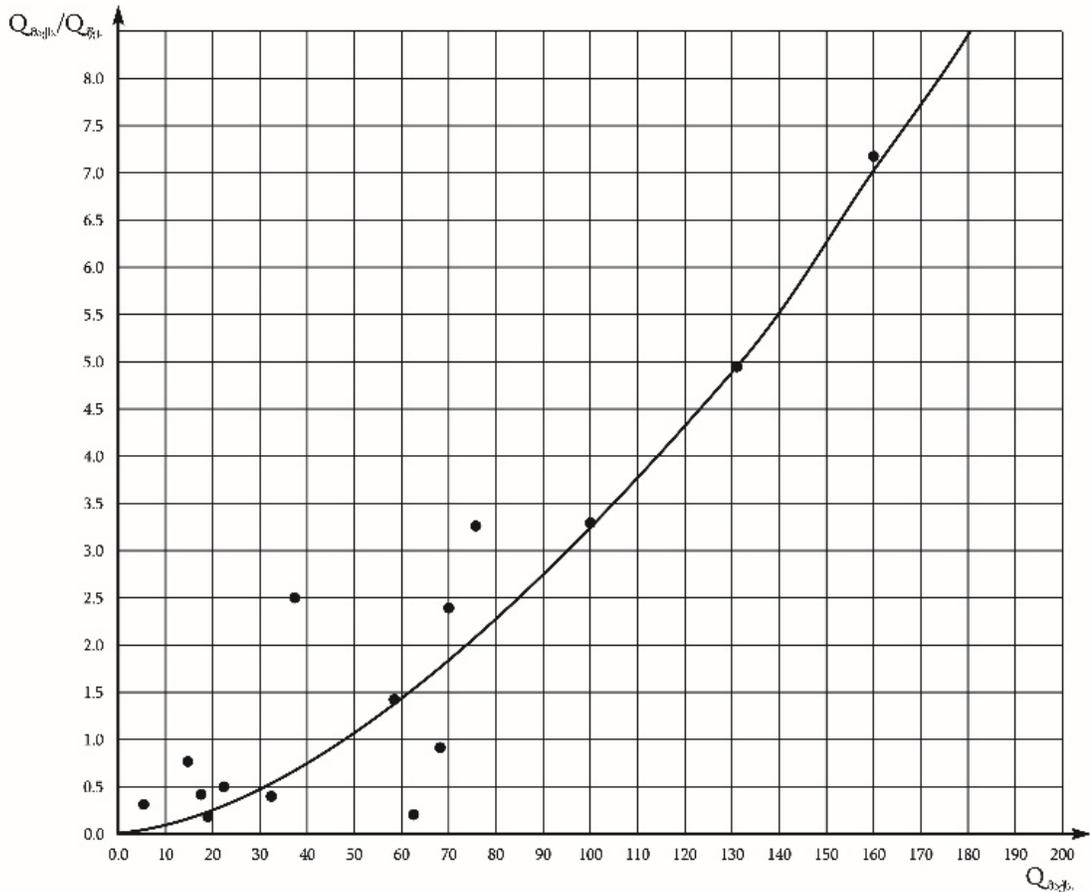
ცალკეული ღვარცოფსადინარისთვის შერჩეული მეთოდიკა ობიექტთან კავშირში ღვარცოფთა წყალშემკრებისთვის განხორციელდა ღვარცოფული მასის ფრაქციული შეცულობის ანალიზით სადინარებთან კავშირში. აღმოჩნდა, რომ მყარი მასალით ღვარცოფწარმომქმნელი გრუნტის მომარაგება სადინარებში იშვიათი გატყიანების ფერდობების ქანობით და კლიმატური პირობებით არის განპირობებული.

გარემოს დაცვითი მიზნობრიობიდან გამომდინარე, სადინარებიდან ჩამოდინებული ღვარცოფის ჰიდროლოგიური პოტენციალი და მოსალოდნელი რისკების სიმწვავე გარემოს მდგრადობის ფაქტორთან არის დაკავშირებული.

აღნიშნული გარემოებების გათვალისწინებით, სავსე კვლევების მეორე სერია მიზნად ისახავდა ღვარცოფწარმომქმნელი მყარი მასისა და წყლის თანაფარდობის

გავლენისა და მათი ურთიერთკავშირის დადგენას სადინარის წყლის ხარჯთან მიმართებით. კვლევები მიმდინარეობდა მდინარე არაგვის 32 შენაკადზე.

მყარი გამონატანის წყლთან თანაფარდობის კავშირი სადინარის წყლის ხარჯთან წარმოდგენილია გრაფიკული დამოკიდებულებით $Q_{მ.წ.} / Q_{წ.წ.} = f(Q_{წ.წ.})$ ნახ. 1.



ნახ. 1. მყარი გამონატანის წყლთან თანაფარდობის კავშირი სადინარის წყლის ხარჯთან მყარი გამონატანის წყალთან ფარდობის სადინარების წყლის ხარჯთან კავშირის აპროქსიმირებული საანგარიშო დამოკიდებულება შემდეგი სახით არის მოცემული

$$Q_{მ.წ.} / Q_{წ.წ.} = 0,0017 Q_{წ.წ.}^{1,644} \quad (1)$$

ფორმულით მიღებული სიდიდეების, დაკვირვების მასალების მონაცემებთან შედარებით კორელაციური კავშირის კოეფიციენტის მნიშვნელობა 0,65 –ის ტოლია.

მოსული ატმოსფერული ნალექებით ფორმირებული Q წყლის ხარჯის სიდიდის საანგარიშოდ ნალექების H ინტენსივობის, ჩამონადენის α კოეფიციენტის, წყალშემკრები აუზის ფართობზე წვიმების უთანაბრობის δ კოეფიციენტის, F

წყალშემკრები აუზის ფართობიდან და თავსხმა წვიმების T ხანგრძლივობიდან გამომდინარე

$$Q = 8,52H \left(\frac{\alpha\beta\delta}{T} F \right)^{0,59} \quad (\text{მ}^3/\text{წმ}) \quad (2)$$

კავშირი ტურბულენტური ღვარცოფის Q_{δ} ხარჯსა და $Q_{\text{ვჟ}}$ წყლის ხარჯს შორის თეორიულად, როცა მოცულობითი წონა ტურბულენტური ღვარცოფის γ_{δ} ტოლია, წყლის მოცულობითი წონა $\gamma_{\text{ვჟ}}$ –ით არის წარმოდგენილი და ღვარცოფის მყარი შემადგენლის მოცულობითი წონა $\gamma_{\text{მჟ}}$ –ით

$$Q_{\delta} = Q_{\text{ვჟ}} \left(1 + \frac{\gamma_{\delta} - \gamma_{\text{ვჟ}}}{\gamma_{\text{მჟ}}} \right). \quad (\text{მ}^3/\text{წმ}) \quad (3)$$

მე–(3) დამოკიდებულების საფუძველზე ტურბულენტური ღვარცოფის ხარჯი

$$Q_{\delta} = Q_{\text{ვჟ}} \left(1 + \frac{Q_{\text{მჟ}}}{Q_{\text{ვჟ}}} \right) \quad (\text{მ}^3/\text{წმ}) \quad (4)$$

წყალშემკრები აუზის მონაცემებზე დაყრდნობით ტურბულენტური ღვარცოფის ხარჯი, როცა სადინარში ნაკადის სიღრმე H –ის ტოლია:

$$Q_{\delta} = 8,52 \left(\frac{\alpha\beta\delta}{T} \right)^{0,59} H \left[1 + 0,0017 \left(\frac{\alpha\beta\delta}{T} \right)^{0,377} \right] \quad (\text{მ}^3/\text{წმ}) \quad (5)$$

ბმული ღვარცოფის ფორმირების შემთხვევაში, როცა წყალშემკრები აუზის სიგანე B –ს ტოლია.

$$Q_{\text{ღვ}} = 8,52H_{\text{ღვ}} \left(\frac{\alpha\beta F}{T} \right)^{0,52} \left(1 - h_0 / H_{\text{ღვ}} \right) \left(1 + 0,49h_0 / H_{\text{ღვ}} \right) \quad (\text{მ}^3/\text{წმ}) \quad (6)$$

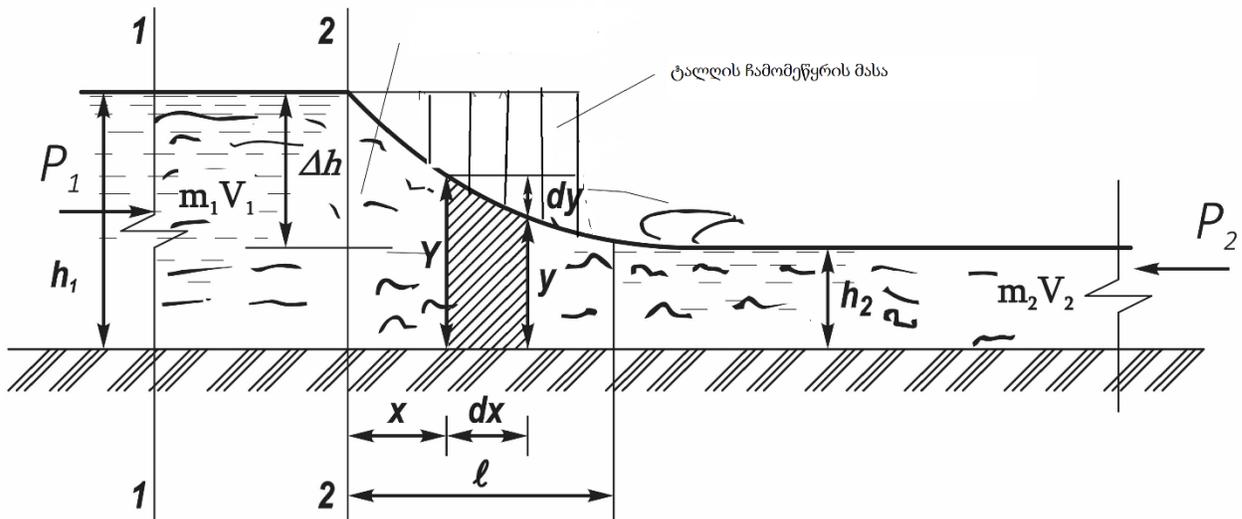
მე–(5) და მე–(6) საანგარიშო მოდელებით შესაძლებელია განსაზღვრული იქნეს როგორც ტურბულენტური, ისე ბმული ღვარცოფის ხარჯი.

სადისერტაციო ნაშრომის მე–3 თავი „ღვარცოფის გარემოზე ზემოქმედება“ კერაში ფორმირებული ღვარცოფის შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების, ღვარცოფსადინარებში მიმდინარე კალაპოტური პროცესების, ღვარცოფთა რეგულირებისა და ენერგეტიკული მახასიათებლების ღვარცოფ გამონატანით

შექმნილი სადინარების მორფომეტრიის განმსაზღვრელი პარამეტრების ინოვაციური მოდელების მოვლენასთან ადაპტაციაზეა ორიენტირებული.

ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის ეკოლოგიური წონასწორობა ვერ პასუხობს გარემო, ანომალიების გამლიერებული ზემოქმედებით რისკებს. გადაუდებელ აუცილებლობას დაცვითი მოდელების სრულყოფა და გაანგარიშების ოპერატიული საშუალებების ინოვაციური სახეების შექმნა.

კერაში ფორმირებული ღვარცოფის მდგრადობის შეფასების მიზნით, როცა მისი ტანის მდგრადობის ფიზიკის რღვევა ჩამომეწყვრით არის განპირობებული, მდგრადობის რღვევის სურათი კვეთებს შორის ტალღის ფორმის საანგარიშო სქემით ნახ. 2-ზე არის წარმოდგენილი.



ნახ. 2. კერაში ფორმირებული ღვარცოფის მდგრადობის საანგარიშო სქემა

გარე ძალების იმპულსით ღვარცოფის ρ სიმკვრივის, q ხვედრითი ხარჯისა და სიჩქარის ვერტიკალზე განაწილების α კოეფიციენტის გათვალისწინებით, მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების მოდელი

$$\frac{2\alpha q^2}{g} = 2h^3 + 3h^2\Delta h + h\Delta h^2 . \quad (7)$$

დამეწყვრილი ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირის ცვლილება q ხვედრითი ხარჯის შემთხვევაში

$$y = \Delta h \sqrt{1 - \frac{\eta \alpha \Delta h x^2 f(\beta)}{6qt}} \quad (8)$$

ხარჯის ცვლილება დამეწვევის ზონაში

$$q_x = q \left(1 - \frac{\eta \alpha \Delta h x^2 f(\beta)}{6q} \right) \quad (9)$$

სრული დამეწვევის შემთხვევაში ღვარცოფის კერის სიგრძე

$$\ell = \sqrt{\frac{2qt}{\eta \alpha \Delta h f(\beta)}} \quad (10)$$

ღვარცოფთა რეგულირების მიზნობრიობიდან გამომდინარე, როგორც ენერგეტიკის, ისე ტრანსპორტუნარიანობის მახასიათებლების ოპერატიული საშუალებები სრულად ვერ პასუხობს მათი ზემოქმედების შეფასების კრიტერიუმებს. აქვე აქტუალურია ნაკადის ნაგებობაზე დამყოლობის, ელასტიკური მიღების, გარშემოდენის ოპერატიული საშუალებებით აღწერისა და ინოვაციური სახეების შექმნის სირთულე. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ანომალიების რეგულირებისა და სარეგულაციო ღონისძიებების შერჩევის საიმედოობა, არსებული საანგარიშო მოდელების სრულყოფა და ინოვაციური სახით წარმოჩენა ძალთა თეორიაზე დაყრდნობით არის წარმოდგენილი.

გამომდინარე ღვარცოფული მასის დრეკადობიდან, ხაზოვანი დეფორმაციულობა Δ_{st} ნიმუშის h_0 ბმულობის ექვივალენტური სიღრმის შემთხვევაში, როცა შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტი ψ სიდიდითაა წარმოდგენილი

$$\Delta_{st} = h(1 - h_0/h)\psi \quad (11)$$

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ღვარცოფის ზემოქმედების შემთხვევაში, როცა მისი სახე ტალღის ფორმით არის წარმოდგენილი Δ_{dyn} დინამიკური დეფორმაციულობა

$$\Delta_{dyn} = h(1 - h_0/h)\psi \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4}{(1-h_0/h)\psi}} \right) \quad (12)$$

ხაზოვანი წაგრძელების მოდელიდან გამომდინარე, P_{dyn} დინამიკური დატვირთვის სიდიდე

$$P_{dyn} = K^* \frac{\alpha \omega V_{sp}^2}{g} \quad (13)$$

სადაც K^* კოეფიციენტი, ნაკადის ω ცოცხალი კვეთის ფართობი, V ნაკადის საშუალო სიჩქარე, α სიჩქარის შემასწორებელი კოეფიციენტი, K^* კოეფიციენტის სიდიდის საანგარიშოდ ღვარცოფთა სახეებთან კავშირში მოცემულია ცხრილი 1-ის სახით.

K^* კოეფიციენტის საანგარიშო მნიშვნელობები

ცხრილი 1.

$\frac{h_0}{h}$ ψ	0	0.2	0.4	0.6	0.8	10
0.1	33.2	30.7	28.9	27.4	26.1	25.0
		7	0	4	7	9
0.2	25.0	23.3	22.0	20.9	20.0	19.4
	9	2	5	7	9	0
0.4	19.4	23.0	17.2	16.5	15.9	15.4
		3	4	6	7	8
0.6	16.9	15.9	14.8	14.7	14.2	13.8
	5	7	9	0	0	2
0.8	15.4	11.4	14.1	13.6	13.3	12.8
	8	7	1	2	2	4
1.0	14.5	13.8	13.3	12.9	12.5	12.2
	0	1	2	2	4	5

ღვარცოფთა სადინარში მოძრაობა და მდგრადობის დაკარგვის შესაძლებლობა სტიქიაზე შემხვედრი წინააღმდეგობების ზემოქმედების რისკთაა დაკავშირებული. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მათემატიკური მოდელების მოვლენასთან ადაპტაცია სირთულეებთან არის დაკავშირებული.

ნაკადის მდგრადობის რღვევის პირობიდან გამომდინარე, როცა მის სადინარს საფარდ სიბრტყესთან დახრის კუთხე α -ს , ნაკადის სიღრმე h -ის და სადინარის

ქანობი i -ი ტოლია, $\alpha = (1 - h_0 / h)\psi$ კოეფიციენტის და კინემატიკურობის α -ს გათვალისწინებით ნაკადის მდგრადობის პირობიდან გამომდინარე

$$3V_{ep} > c \quad (14)$$

მდგრადობის კარგვის შესაბამისი i ქანობი

$$i \geq \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\alpha^2 \cos \alpha}{qh^3 q}} \quad (15)$$

ღვარცოფული მასის დეფორმაციულობის გამომწვევი ძალის ინტეგრალური სიდიდის აჩქარებასთან დამოკიდებულების მოდელიდან გამომდინარე

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + bx = 0 \quad (16)$$

როცა აჩქარება ემთხვევა ძალის მიმართულებას და მე-(16) განტოლებაში b -ს სიდიდე დადებითია, დეფორმაციულობა

$$\Delta h = h \left(\frac{\gamma(1 - h_0 / h)\psi}{39,94} \left(\sqrt{\frac{(1 + h_0 / h)\psi}{4 + \psi + h_0\psi}} - 1 \right) \right) \quad (17)$$

წყლის შემთხვევაში, ე.ი. როცა $h_0 = 0$, $\psi = 1,0$ და $\gamma = 1$, $\Delta h = -0,98h$ და შეუღლებული სიღრმე $h_1 = 1,98 \approx 2h$.

ღვარცოფსადინარებში მიმდინარე კალაპოტური პროცესებით დადასტურებულია, რომ, როცა სიგანის ზღვრული მნიშვნელობის შეფასების მოდელად როცა Q ხარჯის, U სადინარის ქანობის და სადინარში საშუალო V სიჩქარის პარამეტრთა კომბინაციაა გამოყენებული და ზღვრის სიგანის საანგარიშო დამოკიდებულება $B_{ზღ.} = Q^{0,5} / U^{0,2} \sqrt{V_{ზღ.}}$, ღვარცოფსადინარის ზღვრული სიგანის სრულ სიგანესთან ფარდობა

$$\frac{B_{ზღ.}}{B} = \left(1 - \frac{\alpha}{1 + \alpha} \frac{\alpha^3 + 4\alpha\sqrt{\alpha}}{4(1 + \alpha)} \frac{QL}{qih^3 f(\beta)\psi^3} \right) \quad (18)$$

ღვარცოფსადინარში მიმდინარე კალაპოტური პროცესები არის სპეციფიკური და დიამეტრულად განსხვავებულია ანალოგიური წყალსადინარებისაგან.

ჩატარებული კვლევებით გეოტექნიკური მახასიათებლების მქონე ღვარცოფსადინარის განივი კვეთი სხვადასხვა სახით შეიძლება იყოს წარმოდგენილი.

მიმდინარე წყალსადინარში კალაპოტური პროცესები სპეციფიკურად გამორჩეულია და დიამეტრულად განსხვავებულია ანალოგიური წყალსადინარებისაგან. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მისი შეფასება სამეცნიერო თვალსაზრისით აქტუალურ პრობლემად რჩება.

შესაბამისად, ღვარცოფსადინარების მდგრადი ფორმის შეფასების მიზნით შეიძლება გამოყენებული იქნეს მე-(18)-ე ფორმულა, რომლის განმსაზღვრელ სიდიდეებად ღვარცოფის ხარჯი, სადინარის ქანობი და კალაპოტის შემადგენელი გრუნტის ნაწილაკის დიამეტრია წარმოდგენილი.

დასკვნები

- მდინარე არაგვის წყალშემკრები აუზის მაგალითზე წარმოდგენილია კვლევის ძირითადი შედეგები და გარემოსდაცვითი მოდელები, რომლებიც საშუალებას იძლევა სრულყოფილად შეფასდეს და აღწერილ იქნეს ღვარცოფული ნაკადების დინამიკა, ტალღური მოძრაობის პარამეტრები, განისაზღვროს გარემოზე ზემოქმედების შესაძლებლობები ღვარცოთა ფორმირებისა და შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების დროს;
- შემოთავაზებულია ღვარცოფების დეფორმაციულობის დინამიკური მათემატიკური მოდელების აგების მეთოდოლოგია;
- აღწერილია ღვარცოფის დამკრის, დამეწყრისა და მოძრაობის განმსაზღვრელი პარამეტრები, გადინება სადინარებში, შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების პროგნოზირება და გარემოს დაცვის სრულყოფის მეთოდები;
- გამოყვანილია ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის მდგრადობის რღვევის საპროგნოზო მაჩვენებლების მოდელები;

- დასაბუთებულია, რომ თეორიული გზით მიღებული მოდელები კარგადაა ადაპტირებული ნატურაში ფიქსირებულ შედეგებთან და პროცენტული გადახრა არ აღემატება ნორმატივებით განსაზღვრულ დასაშვებ ფარგლებს;
- დადგენილია, რომ განმსაზღვრელი პარამეტრებით ღვარცოფთა სახეებად ფორმირება და კრიტერიალური ზღვრები რეოლოგიურ მახასიათებლებთან არის კავშირში, ხარჯის სიდიდე კი კვაზი-ერთგვაროვნებიდან გამომდინარეობს;
- პრიზმატულ სადინარებში ღვარცოფული ნაკადის კუმშვა-გაჭიმვით გამოწვეული დეფორმაციების გათვალისწინებით გამოყვანილია ნაკადის დინამიკური ზემოქმედების საანგარიშო ფორმულა;
- მდ. არაგვის წყალშემკრები აუზის ღვარცოფსადინარების სათავეებში ღვარცოფთა ფორმირების ადგილებში ღვარცოფწარმომქმნელი მასის შემადგენელ კომპონენტთა რაოდენობრივი სიდიდეების შეფასების მიზნით გამოყენებულია სადინარების სათავეებში აღებული ნიმუშები;
- ცხურების კომპლექტის გამოყენებით ჩატარებული საველე კვლევებით დადგენილია ღვარცოფული მასის შემადგენელ კომპონენტთა თანაფარდობები, მილიმეტრიან და მასზე მცირე ნაწილაკებთან მყარ მასასთან ფარდობის ზღვრები, ასევე მათი მყარ მასასთან ფარდობისა და სახეებად დაყოფის შესაძლებლობები;
- დეფორმაციულობის შეფასების მოდელი ითვალისწინებს ღვარცოფული მასის გაჭიმვისა და კუმშვის შესაძლებლობების დაკავშირებას ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებთან, ხოლო ნაკადის უსაფრთხო ტრანზიტის შესაძლებლობა ხიდი-გადასასვლელელების მოწყობის ადგილზე შეფასებულია კვლევის შედეგად მიღებული გაანგარიშების მეთოდოლოგიით.

Abstract

The function of debris-flow (mudflow) regulation structures is complex in nature and encompasses such domains as ecological balance, landscape infrastructure, the safety of settlements, and others. For a territorially small and mountainous country like Georgia, the sustainability and reliability of protective structures against debris-flow hazards are of vital importance from an economic perspective. According to the recent history of operation and ranking, the majority of these structures are outdated or virtually nonexistent, which results in a low level of effectiveness of environmental protection measures.

Statistical data indicate numerous cases of disruption of ecological balance, leading to adverse socio-economic consequences for settlements. This impact is particularly acute in mountainous regions where geological conditions are characterized by easily disintegrating rocks and intensive erosion processes. In zones of anomalous activity, large-scale research efforts are required. Accordingly, among the objects of study, special attention is drawn to the Aragvi River, which represents a sensitive hydrological system in Georgia, especially in high-mountain regions. The geomorphological characteristics of its catchment basin create a specific hydrological regime. Energy-laden flows within the river channel trigger active erosion processes, channel deformation, and localized debris-flow formation. Flow intensity is directly dependent on slope gradients, channel sinuosity, soil structure, and the spatial distribution of precipitation within the basin. The river regularly undergoes hydrological changes caused by variations in temperature and precipitation, which increase the dynamics of solid and liquid material transport within the channels.

Climate change significantly intensifies debris-flow activity. Abundant and intense rainfall during summer and spring increases water volumes in the channel, accelerates erosion, and promotes debris-flow generation. Rising temperatures during winter and spring enhance snow and glacier melt, increasing flow energy and accelerating the movement of solid material within channels. Uneven precipitation distribution and variations in melt intensity lead to hydro-potential imbalances in flows, increasing channel instability and the severity of debris-flow processes.

Field studies have shown that debris-flow materials formed within the Aragvi River channels differ in size, physic-mechanical properties, and morphology. The obtained data also improve the accuracy of river management models, particularly under conditions of climate change.

Given the increase in debris-flow transport capacity and the wide variability of rheological properties within the Aragvi River catchment—especially under conditions where such flows are characterized by self-formation and exert significant impacts on the river's ecological environment—the existing calculation methodologies require differentiation, refinement, and further specification.

-Predictive equations describing the temporal variation of the factors governing debris-flow formation, stability failure, movement, and the regulation of their interaction with opposing resistances within the debris-flow channels of the study area, as well as their transport capacity potential, have been evaluated. Based on the characteristics of the tributary transit zones and the catchment area of the Aragvi River, predictive equations have been established for the

variations in the energy characteristics and transport capacity of debris flows formed in the transit zone, according to their types. Accordingly, using the analog of soil mechanics and qualitative functions, corresponding assessment models have been developed.

- The criteria for assessing the disruption of stationarity and transport capacity in the transit zone have been established. In addition, based on studies conducted on samples of debris flow deposits in individual channels, the limits of changes in the physical-mechanical properties and constituent components have been determined, and the weight composition of the colloidal fraction of the debris flow mass within the solid material has been investigated.
- The potential for the formation of diverse types of debris flows within channels is determined by the ratio between the constituent solid mass and water. Accordingly, based on the research data, the relationship between the solid mass and water, with respect to the magnitude of the runoff, is qualitatively presented. On the basis of approximation, a predictive model for the ratio of solid mass to water runoff has been established.

The models developed as a result of the research make it possible to determine the level of hydrological, rheological, and geomorphological resilience of the Aragvi River catchment basin; to forecast the dynamics of environmental conditions under various climatic and hydrological scenarios; and to provide a solid scientific basis for the development of an integrated environmental management system for the river basin. This, in turn, supports the optimization of engineering solutions, the formulation of data-driven strategies, and the application of integrated approaches in the management of the Aragvi River basin.

სამეცნიერო ნაშრომთა სია

1. E. Kukhalashvili T. Odilavadze N.Kvashilava, N. Beraia, Sh. Kupreishvili, V. Bogveradze - Regulation of Landslides and Innovative Models in Energy. Publishing house "Technical university", from a series of monographs "Ecology of the Environment" European Innovative Technologies in Environmental Protection Engineering, Volume IV, Tbilisi, 2025, 90-101 pp.
2. V. Bogveradze - Forces of water flow on a large stone placed at the bottom of a water channel. Publishing house "Technical university", VI Student conference on innovative technologies in engineering, Tbilisi, 2025, 31-40 pp.
3. E. Kukhalashvili Sh. Kupreishvili N. Beraia, V Bogveradze - The Impact of a Debris Flow on Opposing Obstacles. The scientific and technical magazine "Construction", 10 pp
4. A.N. Bagration-Davitashvili; Z.O. Tsinadze; K.G. Gordeziani; M. Mzhavanadze; V.A. Bogveradze. Review of Treatment Technologies for Winery Wastewater. Journal "Georgian Engineering News"; (GEN), 2025, No. 2.