

*არასამეწარმეო (არაკომერციული) კერძო იურიდიული  
პირისაქართველოს აგრარული უნივერსიტეტის  
აგროსაინჟინრო ფაკულტეტი, სასოფლო სამეურნეო  
ჰიდრომელიორაციის დეპარტამენტი*

*პაატა სიჭინავა*

**რესურსმზოგი ნაპირდამცავი ნაგებობები**

*აგროინჟინერიის დოქტორის  
აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი*

**დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა**

*სასოფლო-სამეურნეო მელიორაცია*

**სამეცნიერო ხელმძღვანელები:**

*ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,  
სრული პროფესორი ირაკლი ყრუაშვილი*

*ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,  
სრული პროფესორი ედუარდ კუხალაშვილი*

თბილისი  
2011 წ.

## შესავალი

როგორც ცნობილია, ეკოსისტემების წონასწორობის ჰარმონიულობის დრევეას პირველ რიგში თვით ბუნებაში მიმდინარე სტიქიური ხასიათის მოვლენები განაპირობებს, რომელთა შორის ყურადღებას იპყრობს ტროპიკული წვიმები, წყალდიდობები, წყალმოვარდნები, ციკლონები, მეწყერული, ეროზიული პროცესები, ხანძრები, მიწისძვრები, ცუნამი და სხვ. მათი გავლენა გარემოზე ხშირად კატასტროფულია, ინგრევა მდინარეებისა და წყალსაცავების ნაპირები, იკარგება ათეულ ათასობით მაღალნაყოფიერი მიწის და ტყის მასივები, იტბორება მჭიდროდ დასახლებული ტერიტორიები, სახალხო მეურნეობის სხვადასვა დანიშნულების ობიექტები, რაც ნეგატიურად მოქმედებს წყლის და მიწის არსებულ რესურსებზე იწვევს მის საგრძნობ შემცირებას, დაბინძურებას, ნიადაგის ნაყოფიერი ფენის მწყობრიდან გამოსვლას, ხშირად ადგილი აქვს ადამიანებისა და სხვა ცოცხალი არსებების მსხვერპლს. საკითხი მნიშვნელოვანია იმ თვალსაზრისითაც, რომ ყველაზე ნაყოფიერი მიწების, სარწყავი თუ დამშრობი მელიორაციული სისტემების, სატრანსპორტო კომუნიკაციების და სხვადასხვა დანიშნულების ობიექტების უდიდესი ნაწილი განლაგებულია დიდი, საშუალო თუ მცირე მდინარეების, წყალსაცავების ტბების და ზღვის სანაპიროების ზოლში და განიცდის სტიქიური მოვლენების უმძიმეს ზემოქმედებას წყალდიდობებით, წყალმოვარდნებით, ღვარცოფული გამონატანით, თოვლის ზვავებით და ქარიშხლებით გამოწვეული ტალღური ზემოქმედების სახით.

**თემის აქტუალობა.** წყალდიდობების და წყალმოვარდნების დარეგულირების პროცესში წარმოქმნილმა სირთულეებმა, კალაპოტური პროცესების გათვალისწინებით, და მათმა სარეგულიაციო-საინჟინრო გადაწყვეტებმა დღემდე ვერ მიიღო დასრულებული სახე და თანამედროვეობის ერთერთ აქტუალურ საკითხად რჩება.

წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების “საველე ლაბორატორიად” შეიძლება ჩაითვალოს საქართველო, რომლის ტერიტორიის მნიშვნელოვანი ნაწილი თავისი ჰიდროგრაფიული ქსელის, მშრალი ხეების სიხშირითა და მოსული ნალექების

ინტესიურობის განაწილების არათანაბრობით ქმნის ხელსაყრელ პირობებს ისეთი სტიქიური მოვლენების წარმოშობისა და გავრცელებისათვის, როგორცაა: წყალდიდობები, წყალმოვარდნები, ღვარცოფები და ა.შ. ზემოაღნიშნულ სტიქიათა განმეორადობა ბუნების სხვა კატასტროფებისაგან განსხვავებით მოითხოვს სხვადასხვა წარმოშობის და ბუნებრივი ძალების ანომალურობის გათვალისწინებას, მათი სარეგულაციო ღონისძიებათა მეცნიერული პროგრამების, ნორმების და წესების შემუშავების დროს.

აქედან გამომდინარე, წყალდიდობების და წყალმოვარდნების რეგულირების აუცილებელ პირობას წარმოადგენს წყალდენების კალაპოტების ჰიდრაულიკური და მორფომეტრული მახასიათებლების არსებულ საანგარიშო დამოკიდებულებების კორექტირება და დაზუსტება, წყალდენების ჰიდროლოგიური რეჟიმის შესწავლა ანთროპოგენური ფაქტორების მხედველობაში მიღებით, ახალი ენერგო- და რესურს-მზოგი გარემოსდამცავი ნაგებობის კონსტრუქციების შექმნა, მათი მშენებლობის ორგანიზაციის და ტექნოლოგიური ციკლების არსებული მეთოდების გამარტივება–სრულყოფა, მეორადი რესურსების მიზანდასახული უტილიზაცია და მათი კონსტრუირების სტრატეგია, საპროექტო პარამეტრები დაზუსტება და სხვ.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ გარემოსდამცავი ნაგებობების ახალი კონსტრუქციების საიმედოობისა და მდგრადობის პირობების შეფასებისათვის აუცილებელი პირობაა, მეცნიერულად დასაბუთებული მრავალმხრივი კვლევების მეთოდების საფუძველზე, მათი გავლენის შეფასება ბუნებრივ კალაპოტურ პროცესებზე, ნაკადის მოძრაობის ფიზიკური არსის გამოკვლევაზე ურთიერთგანმსაზღვრელ ფაქტორთა მაქსიმალურად გათვალისწინებით და შესაბამისი დამოკიდებულებების მიხედვით კალაპოტური პროცესების პროგნოზირება და პრაქტიკაში რეალიზაცია.

ნაშრომში დამუშავებულმა საკითხებმა ასახვა ჰპოვა გარემოს დაცვისადმი მიძღვნილ და საქართველოს სამთავრობო გადაწყვეტილებებში. ნაშრომში დამუშავებული საკითხები პასუხობს გაერთიანებული ერების ორგანიზაციის (ბრაზილია, რიო-დე-ჟანეირო) 1992 წლის დეკლარაციას ბუნების სტიქიური მოვლენების წინააღმდეგ ბრძოლის და გარემოს დაცვის საკითხებს.

**კვლევი მიზანი და ამოცანები.** ბუნებრივი სტიქიური მოვლენებით გამოწვეული

კატაკლიზმები, რომელთაგან აღსანიშნავია წყალდიდობები და წყალმოვარდნები, წარღვნით ემუქრება გარემოს, ფლორას, ფაუნას, დასახლებულ პუნქტებს, მატერიალურ და კულტურულ ფასეულებებს. ამ სტიქიებისაგან დაცვის ყველაზე ეფექტურ და საიმედო საშუალებას წარმოადგენს თვით ბუნებისაგან შექმნილი წყალდენების კალაპოტები, რომლებიც ურთულეს ნაგებობათა კატეგორიებს მიეკუთვნება. უწყვეტი ჰიდროდინამიკური და მორფომეტრული მახასიათებლების შეცვლის გარეშე ძნელი ხდება მიმდინარე კალაპოტური პროცესების რეგულირება და თვით კალაპოტის, როგორც დამცველი ნაგებობის ეფექტურად გამოყენება.

სადისერტაციო სამუშაოს მიზანია მოუპირკეთებელი წყალდენების (მდინარეების, არხების), კალაპოტების წყლისმიერი ეროზიით გამოწვეული დეფორმაციებისაგან დამცავი ახალი ტიპის, ეფექტური გარემოსდაცვითი, ნაპირსამაგრი და კალაპოტის მარეგულირებელი რესურსმზოგი ნაგებობების დამუშავება, კვლევა და რეალიზაცია, ბუნების სტიქიური მოვლენებით (წყალდიდობები, წყალმოვარდნები) გამოწვეული ხარჯების განტვირთვა რეგულირება.

### **კვლევი ძირითადი ამოცანები**

- ბმული და არაბმული გრუნტების მოუპირკეთებელი კალაპოტებისათვის, დასაშვები არაგამრეცხი სიჩქარეების არსებული მეთოდის დაზუსტება კალაპოტის ნაპირების დაფერდების გათვალისწინებით;
- ნაკადის კინემატიკური და დინამიკური სტრუქტურის შესწავლა ცვლადი კვეთის რეცხვად და არარეცხვად კალაპოტებში;
- ნატურის პირობებში წყალდენების კალაპოტების ჰიდროლოგიური და მორფომეტრული მახასიათებლების შესწავლა;
- მდინარეების ჰიდროტექნიკური კლასიფიკაცია კალაპოტების მახასიათებლების და გარემოსდაცვითი ღონისძიებების მიხედვით;
- წყალდენების კალაპოტების დეფორმაციებისაგან დამცავი არსებული ტრადიციული ღონისძიებების მუშაობის პირობების შესწავლა, ანალიზი, განზოგადება და მათი კონსტრუირების სტრატეგიის შემუშავება;

– არატრადიციული მასალებით წყალდენების კალაპოტური პროცესების მარეგულირებელი და დეფორმაციებისაგან დამცავი ახალი ნაგებობები და კონსტრუქციები გათვალისწინებით ენერგოტევადობისა და მასალტევადობის გათვალისწინებით;

– ახალი ტიპის ნაგებობების მშენებლობის ორგანიზაციისა და ტექნოლოგიის დამუშავება და სრულყოფა;

– ახალი ტიპის ნაგებობების სიმტკიცისა და საიმედოობის პროგნოზირების კრიტერიუმების განსაზღვრის კვლევის მეთოდის დამუშავება და საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანა;

– ახალი ტიპის ნაგებობებისა და კონსტრუქციების პრაქტიკაში რეალიზაციით ეკოლოგიურად განსაკუთრებით სარისკო ზონების უსაფრთხოების საიმედოობის გაზრდა;

– დასმული ამოცანები გადაწყვეტა თეორიული, ექსპერიმენტული, ლაბორატორიული და ნატურაში ჩატარებული კომპლექსური კვლევების საფუძველზე.

კალაპოტური პროცესების შესწავლა დაფუძნებულია სხვადასხვა მდინარეებზე ნატურაში კვლევების და ლაბორატორიაში ექსპერიმენტების მონიტორინგზე, აეროფოტო-გადაღების მასალებზე და სხვ.

რეცხვად და არარეცხვად კალაპოტებში სიჩქარეთა ოპტიმალური მნიშვნელობების დადგენა, ნაკადის ჰიდრავლიკის ამოცანების გადაწყვეტა, ნაკადის მახასიათებელი პარამეტრების გავლენა კალაპოტის მდგრად ფორმებზე, ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე ნაკადის გარშემოდენის კანონზომიერების შესწავლა და სხვა საჭირო ინფორმაციის მოპოვების მეთოდები შეესაბამება დღეისათვის დაგროვილ სამეცნიერო-ტექნიკური მიღწევების დონეს.

კალაპოტური პროცესების მოდელირების მიზნით, მისი მდგრადი ფორმების ოპტიმალური პარამეტრების დადგენის დროს, გამოყენებულია მათემატიკური სტატისტიკის და საიმედოობის თეორიის თანამედროვე მეთოდები.

წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნებისაგან გარემოს დამცავი ნაგებობების კონსტრუირების და გაანგარიშებისათვის გამოყენებულია საპატენტო და გამოგონებების ფონდებში არსებული ტექნიკური საინფორმაციო მასალები, მათემატიკური

პროგრამირების მეთოდები და თანამედროვე კომპიუტერული სისტემები.

**დაცვის საგანი.** კალაპოტის დეფორმაციული პროცესების განმსაზღვრელი მახასიათებლების გათვალისწინებით და მათი ანალიზის საფუძველზე (გამრეცხი საშუალო და ფსკერული სიჩქარეების საანგარიშო დამოკიდებულებები, ჰიდროლოგიური და მორფომეტრული მახასიათებლები, ნატურაში ნაგებობების ნაკადის და კალაპოტის ურთიერთგავლენის კანონზომიერება და სხვ.) განხორციელებულია მდინარეთა ჰიდროტექნიკური კლასიფიკაცია, დამუშავებულია წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნებისაგან გარემოსდამცავი ახალი ნაგებობები, მათი კონსტრუირების პრინციპები და საპროექტო პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებები, ნაპირდამცავი ნაგებობების მდგრადობის საიმედოობა, კალაპოტების სტაბილიზაციის მეთოდების სრულყოფა და საპროექტო პარამეტრების ანგარიში. წყალშემკრებ აუზებში ეკოლოგიური წონასწორობის უზრუნველყოფისა და ბუნებათმოწყობის რეკომენდაციები.

მდინარეთა წყალშემკრები აუზები, წყალდენების კალაპოტების დეფორმაციული პროცესების მახასიათებელი ადგილები, ფორმირებული წყალდიდობები და წყალმოვარდნები, გარემოსდამცავი ნაგებობები, წყალსამეურნეო, სამელიორაციო ობიექტები, მათ შორის ქ. ფოთის წყალგამყოფი კვანძის ფუნქციონირების საიმედოობა და სხვ.

**მეცნიერული სიახლე.** ჩატარებული თეორიული, ლაბორატორიული და საველე კვლევების საფუძველზე მიღებულია შემდეგი მეცნიერული სიახლეები:

– სხვადასხვა ლითოლოგიური შემადგენლობის გრუნტების მახასიათებლების გათვალისწინებით, წყალდენების კალაპოტების ფორმების ცვლილებისა და არსებული საანგარიშო სქემების საფუძველზე შემოთავაზებულია დასაშვები არაგამრეცხი სიჩქარეების საანგარიშო დამოკიდებულებები;

– მრავლობითი კორელაციის მეთოდის გამოყენების საფუძველზე, მოქმედ ფაქტორთა ერთობლიობისა და წილობრივი მონაწილეობის გათვალისწინებით, აღწერილია ნაკადის სიჩქარეთა ველის ფორმირების და ვერტიკალზე განაწილების კანონზომიერებანი;

– ზონალური ფაქტორების, სხვადასხვა დროს გადაღებული რუკების,

აეროგადაღების მასალების დამუშავების საფუძველზე, საველე პირობებისათვის მთის, მთისწინა და დაბლობის მდინარეთა უბნებისათვის შესწავლილია გრძივი და განივი დეფორმაციების ცვლილებების დინამიკა და შემოთავაზებულია შესაბამისი საანგარიშო დამოკიდებულებები;

– წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების ნატანის ტრანსპორტუნარიანობის და კალაპოტის ჰიდრავლიკური და მორფომეტრული პარამეტრების გათვალისწინებით წარმოდგენილია მდინარეთა ჰიდროტექნიკური კლასიფიკაცია;

– ნაკადის მყარ სხეულზე გარშემოდენის თეორიის გამოყენებით და ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე შემოთავაზებულია გადაწყვეტა საინჟინრო ჰიდრავლიკის კონკრეტული ამოცანები;

– არსებული მიდგომების, კომპლექსური გადაწყვეტის, ტრადიციული სამშენებლო მასალების მარაგის კლების, მათი ეკოსისტემებთან გავლენის ანალიზის საფუძველზე, შემუშავებულია ახალი რაციონალური ნაგებობების ფორმები და ენერგო- და მასალადაზოგი ნაგებობების კონსტრუირების სტრატეგია;

– დამუშავებულია ქ. ფოთთან, მდ. რიონზე არსებული ჰიდროკვანძის ზედა ბიეფების კალაპოტური პროცესების მარეგულირებელი, წყალდენების ფსკერისა და ფერდების დეფორმაციების, ხევების ეროზიული პროცესების, ღვარცოფული მოვლენების, სანაპირო ზონების წყლის ტალღური ზემოქმედებებისაგან დამცავი ახალი საინჟინრო ნაგებობების კონსტრუქციები, რომლებიც დაცულია საავტორო მოწმობებით: ს.მ. №1446213, 1988 წ., ს.მ. №1416597, 1988 წ., ს.მ. №1565103, 1990 წ.;

– ალბათურ-სტატისტიკური და მრავლობითი კორელაციის მეთოდების გამოყენების, ნატურაში რეალიზებული ახალი კონსტრუქციების მუშაობის ანალიზის და კალაპოტის ზღვრული წონასწორული ფორმის მახასიათებლების გათვალისწინებით მიღებულია ახალი კალაპოტური ნაგებობების პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებები;

– დამუშავებულია ახალი ტიპის ნაგებობების მშენებლობის წარმოების ორგანიზაცია და ტექნოლოგიები, რომლებიც დაცულია შესაბამისი საავტორო მოწმობებით (ს.მ. №1416597 ს.მ. № 1565103)

– წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების ინჟინრული მეთოდების რეალიზა-

ცია საშუალებას იძლევა ეკოლოგიურად განსაკუთრებით სარისკო ზონებში მათი მშენებლობის ნორმების და წესების დაზუსტებას და სრულყოფას, რაც ხელს უწყობს ბუნებათმოწყობის კომპლექსურობას და ეკოლოგიურ წონასწორობის შენარჩუნებას.

**მიღებული შედეგების საიმედოობა.** ნაშრომში წარმოდგენილი მეცნიერული სიახლეები მიღებულია ჰიდროლოგიის, ჰიდროდინამიკის, ჰიდრაულიკის, გრუნტების მექანიკის, ალბათობის თეორიის კლასიკური კანონებით, ხოლო ცდომილების სიდიდეები რეალურსა და მიღებულ მნიშვნელობებს შორის მოთავსებულია საინჟინრო პრაქტიკისათვის მისაღები სიზუსტის ფარგლებში.

**ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა.** მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს წყალდიდობის და წყალმოვარდნის დროს ფორმირებული ხარჯების უსაფრთხო ტრანზიტისა და სანაპირო ზოლში განლაგებული სხვადასხვა დანიშნულების ობიექტების დაცვის მიზნით, წყალდინების მდგრადი კალაპოტების, გარემოსდამცავი ახალი ნაგებობების დაპროექტების და მათი რაციონალური ექსპლუატაციის პირობების შესამუშავებლად, წყალდენების კალაპოტში მიმდინარე ბუნებრივ პროცესებზე ანთროპოგენური ზეგავლენის პროგნოზირებისათვის, ცალკეული რეგიონების სტიქიური მოვლენების, გარემოს დაცვის, მეორადი რესურსების უტილიზაციის კომპლექსური პრობლემების გადასაწყვეტად, წყალდენების კალაპოტის ფსკერის და ფერდების გამაგრება-რეაბილიტაციის სამუშაოების ჩასატარებლად.

ჩატარებული კვლევების შედეგებმა და ახალი ტიპის რესურსზოგმა ჰიდროტექნიკურმა ნაგებობებმა ასახვა ჰპოვა მონოგრაფიაში “ქ. ფოთთან, მდ. რიონზე არსებული წყალგამყოფი კვანძის კაშხლის ექსპლუატაციის პრობლემები და ღონისძიებები მათ აღმოსაფხვრელად”

**ნაშრომის პუბლიკაცია** დისერტაციის ცალკეულმა თეორიულმა, მეთოდოლოგიურმა და პრაქტიკული ხასიათის საკითხებმა ასახვა ჰპოვა 8 სამეცნიერო შრომაში, 3 გამოგონებაში და ერთ მონოგრაფიაში.

**ნაშრომის მოცულობა.** დისერტაცია შედგება შესავლის, 5 თავის, ძირითადი დასკვნების, გამოყენებული ლიტერატურის სიისა და დანართისაგან. ნაშრომი წარმოდგენილია 118 ნაბეჭდ გვერდზე, თანდართული 42 ნახაზით და 7 ცხრილით.



## თავი 1. საკითახის შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა

### 1.1 მდინარის (წყალმდენის) კალაპოტის შემადგენელი ბმული და არაბმული გრუნტების ძირითადი მახასიათებლები

მდინარის წყალშემკრები აუზების, მისი ფერდობების, ხეობებისა და კალაპოტის ეროზიულ-ღვარცოფული მოვლენებისაგან დასაცავად საჭირო ყველა სახეობის ჰიდროტექნიკური ნაგებობების დაპროექტება და მშენებლობა დამოკიდებულია წყალშემკრები აუზის გეომორფოლოგიურ, ჰიდრო-მორფომეტრულ, ჰიდრაულიკურ და სხვა ისეთ მნიშვნელოვან მახასიათებელთა დადგენაზე, რომლებიც უშუალოდ განაპირობებს ზემოხსენებულ პრობლემებს. მათ რიცხვს, თავისი მნიშვნელობით, განეკუთვნება მდინეთა წყალშემკრები აუზის წყალდენების კალაპოტებში განვითარებული ნიადაგ-გრუნტების ხასიათი, მისი მდგრადობა ეროზიული პროცესების მიმართ, მათი გამრეცხი წყლის ნაკადის სიჩქარის დადგენა და სხვ.

მდინარის კალაპოტის დეფორმაციული პროცესების განვითარებაში დიდ როლს ასრულებს ფხვიერი ნატანი მასალის მოცულობა, რომელიც წარმოიქმნება ბუნებაში მიმდინარე ეროზიული პროცესების შედეგად (გამოფიტვა, დენუდაცია, დალექვა და სხვ.) ზოგადი განხილვის შემთხვევაში ზემოაღნიშნული ფხვიერი მასალა შეიძლება დახასიათდეს საერთო სახელით – არაბმული გრუნტი. მხოლოდ სითხესთან შეწონილ (ტენიან) მდგომარეობაში მცირდება ნაწილაკთა ხაზოვანი ზომები და ის იძენს განსაზღვრულ ბმულობას, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია მის ტენიანობაზე.

არაბმული გრუნტების ძირითად მექანიკურ მახასიათებლებს, რომლებიც მოქმედებს გარეცხვის პროცესებზე, წარმოადგენს: ნაწილაკის ზომა და ფორმა, მისი მოცულობითი წონა, გრანულომეტრული შემადგენლობა და ფორიანობა.

მინერალური შემადგენლობის მიხედვით ნატანის კუთრი წონა იცვლება 2,45-დან 2,76 ტ/მ<sup>3</sup>-მდე, საშუალოდ 2,65 ტ/მ<sup>3</sup>. დიდი კუთრი წონით გამოირჩევა შლამის მარცვლები, ნაკლებით – ქვიშის.

„მსხვილი“ და „წვრილი“ მასალის ნაწილაკთა ზომების ფიზიკური საზღვარი ცვალებადია და დამოკიდებულია ქანების თვისებებზე, ნაწილაკთა წარმოქმნისა და არსებობის პირობებზე.

ქვიშისა და ხრეშის მარცვლების ფორმა, სტატისტიკური გასაშუალებით, ახლოსაა სამღერძიან ელიფსოიდთან მთავარი ღერძების სხვადასხვა თანაფარდობით. ერთი და იგივე გრუნტებში შეიძლება ერთროულად შეგვხვდეს ბრტყელი, ბირთვისებრი, ელიფსური ნაწილაკები და სხვა მოცულობითი ფორმები. სრულიად ბრტყელი ფირფიტები და სწორი ბირთვები წარმოადგენს ორ უკიდურეს შემთხვევას.

ფსკერის დეფორმაციული პროცესების შეფასებისას საჭიროა გაანგარიშებულ იქნეს მშრალი ნატანის მოცულობითი წონა. ამისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ ფორიანობის კოეფიციენტი “ $n$ ” ან მთლიანობის კოეფიციენტი, რომელიც პროცენტებში ტოლია  $(1-n)$ . ფორიანობის კოეფიციენტი შეიძლება იცვლებოდეს  $0,43\_1,00$  შუალედში.

მთლიანობის კოეფიციენტი, ორტის მონაცემებით [69, 70] სხვადასხვა სახის ნატანი ნალექისათვის ხასიათდება შემდეგი სიდიდეებით:

1. ფხვიერი ლამი, დალექვიდან 5 დღის შემდეგ –  $0,007\_0,205\%$
2. გამშრალი ლამი, დალექვიდან 5 დღის შემდეგ –  $0,28\%$
3. დანალექი ქვიშა, დალექვიდან 5 დღის შემდეგ –  $0,62\%$
4. დანალექი ხრეში, დალექვიდან 5 დღის შემდეგ –  $0,68\%$
5. ქვიშა-ხრეშოვანი დანალექი, დალექვიდან 5 დღის შემდეგ –  $0,78\%$

ვ.ვ. ოხოტინის მიხედვით ყველა ქვიშოვანი ფრაქციის ფორიანობის სიდიდე რთულ დამოკიდებულებაშია მინერალურ შემადგენლობასთან, ნაწილაკის დისპერსული მდგომარეობის ხარისხთან და ქვიშის სიმკვრივესთან. ყველა მგორავი ფრაქციის ფორიანობა დაახლოებით ერთნაირია და უდრის  $0,36\_0,38$ -ს.

ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი ფაქტორი რომელიც გავლენას ახდენს კალაპოტის რეცხვაზე, არის გრუნტის გრანულომეტრული შემადგენლობა. არაბმული გრუნტებისა და ნატანების შემადგენლობა მრავალგვარია. გრანულომეტრული შემადგენლობის ფორმირების პროცესების საკითხებზე ჩატარებული მთელი რიგი კვლევებისა გვიჩვენებს, რომ ძირითადი ფაქტორები: გამოფიტვა, გადატანა და დალექვა, იწვევს თავდაპირველი გრანულომეტრული შემადგენლობის ცვლილებას.

მდინარის ბუნებრივ ნატანების გრანულომეტრული შემადგენლობის დიდი ოდენობით მონაცემთა ანალიზის საფუძველზე ვ.ნ. გონჩაროვი [25] შემდეგ ტიპებს

გამოყოფს:

1. ერთგვაროვან შემადგენლობას წარმოადგენს გრუნტები და ნატანები, რომლებიც შესდგება მხოლოდ ერთი ფრაქციისაგან;
2. სხვადასხვა ფრაქციულ შემადგენლობას წარმოადგენს სხვადასხვა ფრაქციის უწყვეტი ნარევი ყოველი მათგანის თანაბარი წილით;
3. მსხვილფრაქციული შემადგენლობა ხასიათდება ნარევი შედარებით მსხვილი ფრაქციების სიჭარბით;
4. წვრილფრაქციული შემადგენლობა ხასიათდება წვრილი ფრაქციების სიჭარბით;
5. საშუალო ფრაქციული შემადგენლობა, რომელშიც მთავარი წილი მოდის საშუალო ფრაქციებზე და მცირე – წვრილზე და მსხვილზე;
6. ზღვრულფრაქციული ტიპი ხასიათდება ნარევი უკიდურესად წვრილი და უკიდურესად მსხვილი ფრაქციების სიჭარბით.

ნარევთა შემადგენლობის სხვა ტიპები შედარებით იშვიათად გვხვდება. რაც უფრო მსხვილია ნაწილაკები, მით უფრო მეტ ხანს იმყოფება ისინი წატაცებისა და გადაგორების მდგომარეობაში, რის გამოც ნაწილაკები ცვდება და ლეზულობს უფრო მომრგვალებულ ფორმას, ამასთან, მათი ზომები თანდათანობით მცირდება.

ექსპერიმენტულმა დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ ქვიშის ფრაქციის ნაწილაკები ძალიან ნელა იშლება, რადგან მცირე ზომის ნაწილაკთა ერთმანეთთან და ფსკერთან შეჯახება „შეუძლებელი ხდება ზედაპირული დაჭიმულობის განმზიდი ძალის გამო, რომელსაც ქმნის წყლის თხელი გარსი მარცვლის გარშემო...“, ამიტომ მცირე ნაწილაკებს არასწორი ფორმა და ხორკლიანი ზედაპირი აქვს. დაკვირვებებმა გვიჩვენა, რომ 0,2 მმ-იანი დიამეტრის კვარცი პრაქტიკულად არ ექვემდებარება მექანიკურ დაქუცმაცებას წყალში.

ნატანის სხვა მნიშვნელოვან ფიზიკურ თვისებას წარმოადგენს მისი ჰიდრავლიკური სიმსხო ( $\omega$  მმ/წმ), ანუ დალექვის სიჩქარე მშვიდ წყალში.

კავშირი წვრილი ნაწილაკების „ჰიდრავლიკურ“ და „გეომეტრიულ“ ზომებს შორის დიდი ხანია დადგენილია სტოკსის მიერ, რომელმაც მიიღო სფეროს ვარდნის სიჩქარე, ანუ ნატანის ჰიდრავლიკური სიმსხო შემდეგი განტოლების სახით:

$$\omega = \frac{2}{9} r^2 \frac{(D_1 - D_2)}{\eta} g, \quad (1.1.1)$$

სადაც  $r$  – სფეროსებრი ვარდნადი ნაწილაკის რადიუსია (სმ);

$\eta$  – სითხის სიბლანტე;

$D_1$  – ვარდნადი ნაწილაკის კუთრი წონა;

$D_2$  – სითხის კუთრი წონა, რომელშიც წარმოებს ანალიზი.

სტოქსის ფორმულა თეორიულად გამოყენებულია მხოლოდ იმ ნაწილაკებისათვის, რომელთა ზომები განსაზღვრულია 0,02–0,002 მმ – ინტერვალში და ხასიათდება ძალზედ მცირე კუთრი წონით. ფორმულა ასევე მისაღებია ნაწილაკთა მოძრაობისას მეტად ბლანტ სითხეებში.

ფორმულა (1.1.1) სამართლიანია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვის ძალზედ მცირე მნიშვნელობებისათვის ( $Re < 20$ ).

ნატანის ჰიდრავლიკური სიმსხოს განსაზღვრისათვის 1,5 მმ და ზემოთ საჭიროა გამოყენებულ იქნეს ფორმულა:

$$\omega = \sqrt{\frac{2g(\gamma_6 - \gamma_0)K}{1,75\gamma_0}}, \quad (1.1.2)$$

სადაც  $KK$  – ნატანის მარცვლების საშუალო სიმსხოა;

$\gamma_6, \gamma_0$  – შესაბამისად, ნაწილაკისა და წყლის კუთრი წონები.

ე.ი. ტურბულენტურ არეში  $\omega$  პროპორციულია კვადრატული ფესვისა ნატანის სიმსხოდან.

მარცვლებისათვის დიამეტრით 1,5 მმ-დან 0,15 მმ-დე, ანუ წინააღმდეგობის რეჟიმის გადასვლისას ტურბულენტურიდან ლამინარულისაკენ, ჰიდრავლიკური სიმსხო ტოლია:

$$\omega = \sqrt{\frac{(\gamma_6 - \gamma_0)\beta K}{\rho\mu}} \quad (1.1.3)$$

სადაც  $\beta$  – წარმოადგენს ემპირიულ ფუნქციას, რომელიც განსაზღვრავს სიბლანტის დამადაბლებელ გავლენას მარცვლების ზომების ზრდისას 0,15 მმ-დან 1,5 მმ-მდე;

$\rho$  – სითხის სიმკვრივე;

$\mu$  - სიბლანტის კოეფიციენტი.

როდესაც  $Re \leq 1$ , ჰიდრაულიკური სიმსხო განისაზღვრება ფორმულით

$$\omega = \frac{(\gamma_6 - \gamma_0)K^2}{24\mu} \quad (1.1.4)$$

## 1.2 არაბმული გრუნტის ნაწილაკების მდგრადობის პირობები და არსებული საანგარიშო ფორმულები ნაკადის კალაპოტის კრიტიკული სიჩქარეებისათვის

მყარი ნატანის ნაწილაკები, ნაკადში მოძრაობის ხასიათიდან გამომდინარე, იყოფა შეტივნარებულ (რომელთა მოძრაობის სიჩქარე ტოლია ან ძალიან ახლოა საშუალო სიჩქარესთან) და ფსკერულად ანუ მგორავად. ეს დაყოფა, არსებითად, პირობითად უნდა ჩაითვალოს, რადგან წყლის ნაკადით ტრანსპორტირებადი ნატანი იმყოფება შეტივნარებულ მდგომარეობაში ან გადაადგილდება ფსკერზე, რაც დამოკიდებულია მყარი ნატანის ნაწილაკების სიმსხოზე, ნაკადის სიჩქარეზე [13, 45, 46, 47, 50, 53, 55] და სხვ.

მყარი ნატანის შემადგენელი ნაწილაკის წინა კიდეზე ნაკადი ზემოქმედებს დადებითი წნევით, ხოლო უკანაზე ქმნის ვაკუუმს. ნაწილაკის ქვედა კიდეზე და ფსკერს შორის წარმოებს სითხის მოძრაობა წინა და უკანა კიდეზე შორის წნევათა სხვაობის ხარჯზე. რადგან წნევის აბსოლუტური სიდიდე წინა კიდეზე მეტია, ვიდრე უკანაზე. ამიტომ საშუალო წნევა ქვედა კიდეზე ნულზე მეტია ე.ი. ის დადებითია. ჯამური წნევა ზედა და ქვედა კიდეებზე მიმართულია ფსკერიდან ზემოთ. ასეთ ძალას ამწევ ძალას უწოდებენ.

ნაკადის ფსკერულ ზონაში გრიგალთა წარმოშობის შედეგად ნაწილაკები შეიძლება მოხვდეს მათი გავლენის ქვეშ, რასაც შეიძლება მოჰყვეს ვერტიკალურად მიმართული იმპულსების წარმოქმნა. ეს გრიგალური მოძრაობა, რომელიც განპირობებულია სიჩქარეთა სხვაობით საზღვრისპირა ფენაში, ფსკერზე ნულოვანი სიჩქარიდან, რომელიც ბუნებრივი სიჩქარის მანძილზე, რომელიც იზომება მოსაზღვრე ფენის სისქით და წარმოადგენს კალაპოტის გარეცხვის ძირითად მიზეზს.

ნაკადისა და კალაპოტის ურთიერთქმედების რთული სურათის გამო გაძნელებულია ნაკადის ფსკერზე მყარი ნაწილაკების გადაადგილების სიჩქარის თეორიული ანალიზი.

ამოცანის ამოხსნისას განიხილავენ აქტიური და პასიური ძალების ზღვრულ წონასწორობას.

ზოგიერთი მკვლევარის აზრით, საწყის მომენტში ხდება არა ნაწილაკთა შეჯახება, არამედ მათი ამობრუნება და გადაგორება რომელიღაც საყრდენი წერტილის მიმართ. ამოცანის ამოხსნისათვის ადგენენ განტოლებას, რომელიც ეყრდნობა ნაწილაკის რომელიღაც წერტილისათვის ნაკადის ძალით წარმოქმნილი გადამგორებელი მომენტებისა და უკუქმედი გადამგორებელი მომენტების ტოლობას.

დიდი ხნის განმავლობაში ამ საკითხის გადაწყვეტისას ნაწილაკზე მოქმედი ამწევი ძალა იგნორირებული იყო. განიხილავდნენ მხოლოდ ნაკადის მიერ ნაწილაკზე მოქმედ შუბლურ ძალებს.

ვიხილავთ რა ნაკადის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების ხასიათს ბუნებრივ ნატანზე, საჭიროა აღინიშნოს, რომ მოძრავი ნატანისა და გრუნტების ბუნებრივი მდგომარეობა ფსკერის ზედაპირზე ბევრად რთულია, ვიდრე განხილული შემთხვევები, რაც რეალურად ძალზედ ართულებს მოძრავი ნაკადების ფსკერთან ურთიერთობის მექანიზმის ანალიზს. ამიტომ რაიმე რაოდენობრივი და, მითუმეტეს, ხარისხობრივი მახასიათებლების მისაღებად აუცილებელია მოვლენის გასაშუალება და სქემატიზაცია.

მე-18 საუკუნის მეორე ნახევრიდან დაწყებული ჩნდება მრავალი დამოკიდებულება ნაკადის „კრიტიკული სიჩქარეების“ განსასაზღვრად. მაგრამ ამოცანის სირთულე ისეთი მნიშვნელოვანი აღმოჩნდა, რომ პირველი დამოკიდებულებები, რომელთაც პრაქტიკული მნიშვნელობა ჰქონდა გაანგარიშებებში, მხოლოდ მე-20 საუკუნის 30–40-იან წლებში გამოჩნდა. დიდი წვლილი ამ სფეროში შეიტანეს მეცნიერებმა: მ.ა. ველიკანოვმა, ი.ი. ლევიმ, ვ.ნ. გონჩაროვმა, ხოლო შემდგომ წლებში – ე.ა. ზამარინმა, ი.ვ. ეგიაზაროვმა, ც. ე. მირცხულავამ, ვ.ს. კნოროზმა, გ.ი. შამოვმა, სუნდბორგმა და სხვ. ზემოაღნიშნულ ავტორთა მიერ შესრულებული ყველა შრომა დაფუძნებულია უზარმაზარ ექსპერიმენტულ მასალაზე და სწორად ასახავს

მოვლენის ფიზიკურ არსს.

ქვემოთ მოყვანილია ამ ავტორთა მიერ მიღებული ძირითადი ფორმულები კრიტიკული სიჩქარეების განსაზღვრისათვის:

1. მ.ა. ველიკანოვი [13]

$$V_{\text{სრ}} = 3,9 \left( 1 + \frac{0,0004}{d} \right)^{1/2} \sqrt{gd} \quad (1.2.1)$$

2. ვ.ნ. გონჩაროვი [25]

$$V_{\text{სრ}} = 1,3 \cdot 3R^{0,2} \sqrt{(d + 0,0014)^{0,6}} \quad (1.2.2)$$

$$V_{\text{სრ}} = \lg \left( \frac{8,8H}{d} \right) \sqrt{\frac{2g}{3,5\gamma_0} (\gamma_6 - \gamma_0) d_{\text{საშ}}} \quad (1.2.3)$$

3. ი.ი. ლევი [50]

$$V_{\delta} = 1,4 \sqrt{gd} \cdot \lg \frac{12R}{d_k}, \text{ როცა } \frac{R}{d_k} > 60 \quad (1.2.4)$$

$$V_{\delta} = 1,3 \sqrt{gd} \left( 0,8 + \frac{2}{3} \lg \frac{10R}{d_k} \right), \text{ როცა } 10 < \frac{R}{d_k} < 40 \quad (1.2.5)$$

4. ე. ა. ზამარინი [33]

ა) წვერილი ხრეშისათვის (0,5 სმ-ზე ნაკლები ნაწილაკებისათვის)

$$V_{\text{სრ}} = 0,95^{2+R} \sqrt{R} \quad (1.2.6)$$

ბ) საშუალო ხრეშისათვის (1 სმ-მდე სიდიდის ნაწილაკებისათვის)

$$V_{\text{სრ}} = 1,05^{2+R} \sqrt{R} \quad (1.2.7)$$

გ) მსხვილი ხრეშისათვის (1,5 სმ-მდე სიდიდის ნაწილაკებისათვის)

$$V_{\text{სრ}} = 1,15^{2+R} \sqrt{R} \quad (1.2.8)$$

5. ც. ე. მირცხულავა [56]

$$V_{\text{სრ.ფსკ.}} = 1,25 \sqrt{\frac{2gm}{0,44\gamma_0 n} [(\gamma_6 - \gamma_0)d + 2C_{\gamma_{\text{სრ}}}^{\text{არ}} \cdot k]} \quad (1.2.9)$$

$$V_{\text{სრ.ფსკ.}} = \left( \lg \frac{8,8H}{d} \right) \sqrt{\frac{2gm}{0,44\gamma_0 n} [(\gamma_n - \gamma_0)d + 2C_{\gamma_{\text{არ}}}^{\text{არ}} \cdot k]} \quad (1.2.10)$$

6. ვ.ს. კნოროზი [44]

ა) კვადრატული არე ( $d > 1$  მმ)

$$V_{\text{სწ}} = 1,2 \cdot \lg \left( 14,7 \frac{R}{d^{0,75}} \right) \sqrt{gd} \quad (1.2.11)$$

ბ) გარდამავალი არე ( $1 < d < 0,25$  მმ)

$$V_{\text{სწ}} = 2,5d^{0,3} \lg \frac{3,6R}{d^{1,6}} \quad (1.2.12)$$

გ) გლუვი არე ( $d < 0,25$  მმ)

$$V_{\text{სწ}} = \frac{2,5d^{0,05}}{\sqrt{0,0008 + \frac{0,0060}{R^{0,25}}}} \quad (1.2.13)$$

7. გ.ნ. შამოვი [98]

$$V_{\text{სწ}} = 1,47 \sqrt{gd} \left( \frac{h}{d} \right)^{0,167} \quad (1.2.14)$$

8. ი.ვ. ეგიაზაროვი [28]

$$V_{\text{სწ}} = \sqrt{\frac{f_0}{\lambda_0}} \sqrt{gd \left( \frac{\gamma_6}{\gamma_0} - 1 \right)} \quad (1.2.15)$$

9. ბ.ი. სუდბორგი [91]

$$V_{\text{სწ}} = 5,751 \lg \left( \frac{30,2H}{d} \right) \sqrt{\frac{2g\delta_1\delta_2(\gamma_6 - \gamma_0)dtg}{3\gamma_0}} \quad (1.2.16)$$

სადაც  $\delta_1$  და  $\delta_2$  – კოეფიციენტებია და შესაბამისად 0,35 და 0,30 ტოლია;

$\varphi$  – შიდა ხახუნის კუთხე;

ფსკერისპირა ნაკადის ფენაში ნატანის მოძრაობის საწყისი პირობების განსაზღვრას მრავალი შრომა მიეძღვნა, მაგრამ მიუხედავად მათი დიდი მეცნიერული მნიშვნელობისა, არაგამრეცხი სიჩქარეების განსაზღვრის საკითხები ჯერ კიდევ შორსაა ამ საკითხის სრული გადაწყვეტისაგან.

ჩვენს მიერ ნაშრომში წარმოდგენილ ფორმულებში მიღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$V_{\text{სწ}}$  – წყლის მოძრაობის არაგამრეცხი სიჩქარე;

$H$  – წყლის სიღრმე;

$d$  – მარცვალთა (ნაწილაკთა) საშუალო სიძსხო, განსაზღვრული როგორც



ტოლი მოცულობის სფეროს დიამეტრი;

$f_0$  – მოძრავი კალაპოტის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;

$\gamma_6, \gamma_0$  – შესაბამისად, ნაწილაკისა და წყლის კუთრი წონა;

$\mu$  – ჰიდრაულიკური სიმსხო;

$\nu$  – სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი.

მრავალი ავტორის რეკომენდაციებისა და შედეგების ანალიზიდან ჩანს, რომ არაგამრეცხი სიჩქარეების სიდიდეები გვამლევს სხვადასხვა შედეგებს წყლისა და გრუნტის ერთი და იგივე პარამეტრებისათვის. დღემდე არ არის შემოთავაზებული ისეთი დამოკიდებულებები, რომლებშიც გათვალისწინებული იქნებოდა წვრილმარცვლოვანი ნატანის ბმულობის თვისება, ნატანის არაერთგვაროვნება და მისი ფორმა.

### 1.3 წყალდენების კალაპოტებში მიმდინარე პროცესების ჰიდროლოგიური და მორფომეტრიული კანონზომიერებანი

ნაკადის და კალაპოტის ურთიერთქმედებით მყარდება გარკვეული კავშირი მის ჰიდრაულიკურ და გეომეტრიულ მახასიათებლებს შორის, რამაც ასახვა ჰპოვა მეცნიერ-მკვლევართა შრომებში [5, 6, 7, 8, 41, 66, 103, 104, 105].

წყალდენების კალაპოტების მდგრადი ფორმების შეფასებისას მეცნიერთა დიდი ნაწილი ეფუძნება მდგრადობის თეორიის ბაზაზე მიღებულ კრიტერიულ განტოლებებს. ცხადია, წყალდენების კალაპოტების მდგრადი ფორმის შეფასების დროს საჭიროა დაცული იყოს ზღვრული წონასწორული მდგომარეობა, როგორც მის განივკვეთში, ისე სატრანზიტო უბნებზე მთლიანად.

ნატურაში კვლევების ანალიზით დადგენილია, რომ კალაპოტის ფორმის მდგრადობის ძირითადი კრიტერიუმი ე.წ. ფორმის პარამეტრითაა წარმოდგენილი და გამოხატავს ნაკადის სიგანისა და სიღრმის ურთიერთთანაფარდობას. პროცესის სირთულის გამო წყალდენების კალაპოტების მდგრადი ფორმის შეფასება თითქმის ვერ ხერხდება მექანიკის კანონებით და მოითხოვს ექსპერიმენტული და საველე-ნატურული კვლევების ჩატარებას. ვ. ალტუნინმა [4], შეასრულა რა ამ

მიმართულებით არსებული ლიტერატურის ანალიზი რუსეთის, შუა აზიის მდინარეების, არხების მონაცემების და ნატურაში ჩატარებული მრავალმხრივი ცდების საფუძველზე, დაადგინა კლაპოტების მდგრადობის ძირითადი კრიტერიუმი, ე.წ. ფორმის პარამეტრი – ნაკადის სიგანის შეფარდება მის საშუალო სიღრმესთან, ხოლო შემდეგ შეეცადა თეორიულად დაესაბუთებინა კავშირები ნაკადის ტურბულენტურ პარამეტრებსა და კლაპოტის შემადგენელი გრუნტის (აგრეგატის) ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებს შორის. ავტორმა შეძლო დაედგინა ნაკადის კინემატიკური მახასიათებლების რიცხობრივი სიდიდეები კლაპოტის მდგრადობის სხვადასხვა სტადიისათვის. ასე მაგალითად, სტატიკური მდგრადობის შემთხვევაში ეს სიდიდე მერყეობს 1/4-დან 1/6-მდე, დინამიკური მდგრადობის პირობებში – 1/6-დან 1/8-მდე, ხოლო ზღვრული დინამიკური მდგრადობის შემთხვევაში კი – 1/8-დან 1/10-მდე. ამასთან, არაბმული გრუნტებისათვის შემოთავაზებულ იქნა მდგრადი კლაპოტების ფორმის პარამეტრის საანგარიშო დამოკიდებულება:

$$\frac{B}{h} = D \left[ \frac{Q}{(GI)^{0.5}} \right]^{2.5+3x}, \quad (1.3.1)$$

სადაც  $B$  – არის ნაკადის სიგანე მდგრად კლაპოტში;

$h$  – ნაკადის საშუალო სიღრმე მდგრად კლაპოტში;

$D$  – ჰიდრომორფოლოგიური პარამეტრი,  $x = \frac{V_1 - V}{V}$ ;

$V_1, V$  – საშუალო ზედაპირული და საშუალო სიჩქარეები;

$Q$  – ხარჯი, მ<sup>3</sup>/წმ;

$I$  – ფსკერის ქანობი;

$g$  – სიმძიმის ძალის აჩქარება, მ/წმ<sup>2</sup>.

დინამიურად მდგრადი კლაპოტისათვის  $x \geq \frac{1}{8}$ . კერძო შემთხვევისათვის,

თუ მივიღებთ, რომ  $x = \frac{1}{5} \div \frac{1}{6}$ , ვღებულობთ ფ. შატბერაშვილისა და

ვ. ანტროპოვსკის მიერ 1972 წელს მიღებულ ანალოგიურ შედეგებს [99, 100, 101].

წარმოდგენილი დამოკიდებულების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ კლაპოტის ფორმის პარამეტრის რიცხობრივ სიდიდეზე დიდი გავლენას ახდენს კლაპოტის შემადგენელი გრუნტის საშუალო დიამეტრი ( $d$ ).

ვ. ალტუნინის და მ. სელიამიტოვის მიერ მოსკოვის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ჰიდროფიზიკურ ლაბორატორიაში 1980 წ. ჩატარებულმა ცდებმა დაადასტურა, რომ თუ კალაპოტის ფორმის პარამეტრი  $\frac{B}{h}$  მეტია ზღვრულ მნიშვნელობაზე, იწყება ნაკადის საერთო მდგრადობის რღვევა (დინამიკური ღერძის გამრუდება) და ფიქსირდება კალაპოტის მეანდრირების ნიშნები.

წყალდენების კალაპოტების მდგრადობის შესახებ კვლევის შემდგომი ეტაპი წარმოადგენდა მცდელობას, მიღებული ყოფილიყო კრიტერიალური განტოლება, რომლის მიხედვით შესაძლებელი იქნებოდა მთლიანი დინამიკური წონასწორობის რღვევის პირობას დადგენა შემდეგი სისტემით: ტურბულენტური ნაკადი – ერთგვაროვანი რეცხვადი კალაპოტი. აღნიშნულის მისაღწევად გამოყენებულ იქნა შედეგები, რომლებიც 1967 წელს იქნა მიღებული თ. ვონინი-სიანოჟენცკისა და ნ. კერესელიძის მიერ, ცნობილი მდგრადობის თეორიის დამუშავების საფუძველზე [18, 40]. თ. ვონინი-სიანოჟენცკიმ ნაკადიდან გამოყო ორი ფენა. ერთი, რომელიც ასახავდა ფსკერისპირა შრეს და გაჯერებული იყო ნატანით და მეორე, რომელიც შეიცავდა შეტივნარებულ ნატანს. ფსკერისპირა ფენა წარმოდგენილი იყო შევდოვ-ბინგამის მოდელით, რომელიც აღწერილი იყო ხენკი-ილიუშინის განტოლებით. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მიღებული იყო კალაპოტის გეგმური არამდგრადობის კრიტერიალური გამოსახულება:

$$\lambda = \frac{ph}{\sqrt{3}} \cdot \frac{CM}{g} \left(1 - K \frac{M}{C}\right)^{0.5} = \lambda_1, \quad (1.3.2)$$

სადაც  $M$  – არის ბუსინესკის პარამეტრი;

$\lambda$  – შეშფოთების რიცხვითი სიდიდე;

$\lambda_1$  – შეშფოთების კრიტიკული მნიშვნელობა;

$K$  – გრძივი სიჩქარის ლოგარითმული განაწილების პარამეტრი;

$C$  – შეზის კოეფიციენტი.

როცა  $\lambda \leq \lambda_1$ , მაშინ ნაკადის დინამიკური ღერძის გამრუდება გეგმაში არ არის მოსალოდნელი და დაცულია წყალდენების კალაპოტის სტაბილურობა, ხოლო როცა  $\lambda \approx \lambda_1$  – მოსალოდნელია კალაპოტის გეგმაში რღვევის დაწყება და მეანდრის პირველადი ფორმის ჩამოყალიბება.

ს. ალტუნინის მონაცემებით, თუ  $\lambda_1 = (6 \div 8)B$ , მაშინ კალაპოტის გამრუდებას გეგმაში ადგილი არა აქვს, ხოლო თუ  $B/h = 0,3CM/\sqrt{g} (1 - KM/C)^{0.5}$  და მხედ-

ველობაშია მიღებული, რომ  $K = \sqrt{g}/XC$ ,  $M = 23$  მ<sup>0.5</sup>/წმ,  $g = 9,81$  მ/წმ<sup>2</sup>,  $X = 0,667$ , კალაპოტის ფორმის პარამეტრის საანგარიშო დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$\frac{B}{h} = 0,7C \left( 1 - \frac{430}{C^2} \right)^{0,5}. \quad (1.3.3)$$

ხელოვნური წყალდენები (არხები), რომელთა კალაპოტები წარმოდგენილია წვრილქვიშოვანი გრუნტებით, როცა  $C \geq 40$ , მაშინ მდგრადობის ფორმის პარამეტრი  $B/h \geq 24$ . წარმოდგენილი შედეგი კარგ დამთხვევას იძლევა თ. ვოინიხ-სიანოჟენცკის და ნ. კერესელიძის თეორიულ გამოკვლევებთან და საშუალებას იძლევა კალაპოტის ფორმის ზღვრული მნიშვნელობის მიხედვით ვიმსჯელოთ კალაპოტური პროცესების განვითარებაზე. გეგმაზე დიდი მიწის არხების კალაპოტის შესანარჩუნებლად, როცა ხარჯი მერყეობს  $200 \div 1000$  მ<sup>3</sup>/წმ-მდე, დაცული უნდა იყოს პირობა  $40 \geq B/h \geq 20$ . მიღებული შედეგი საშუალებას იძლევა მოხდეს განსხვავება ხელოვნურ წყალდენებში და მდინარეებს შორის. ე. რაბკოვას მიხედვით, კალაპოტის ფორმის მახასიათებელი მდინარეებისათვის არის  $40 \div 50$ -ის საზღვრებში [71].

როგორც მრავალი მეცნიერის მიერ შესრულებული კვლევების ანალიზი გვიჩვენებს, კალაპოტის მდგრადობის მახასიათებელი კრიტერიუმები, რომლებიც სხვადასხვა ფორმით ითვლისწინებს ფიზიკურ-მექანიკურ მაჩვენებლებს და აისახება კალაპოტის მორფომეტრული მაჩვენებლებში, შეიძლება გამოყენებული იყოს როგორც დიდი არხების, ისე დინამიურად მდგრადი მდინარეების კალაპოტების საპროექტო პარამეტრების დასადგენად. რეკომენდებულ საანგარიშო პარამეტრებში განმსაზღვრელი ფაქტორებად გვევლინება ნაკადის ხარჯის სიჩქარე, კალაპოტის ფარდობითი სიგანე, სიღრმე, ფიზიკურ-მექანიკურ მაჩვენებელთა კომპლექსი და ხშირად უგულებელყოფილია ადგილობრივი ზონალური ფაქტორები [23, 24, 27, 29]. ამის გამო აუცილებელი ხდება კალაპოტური პროცესების შესწავლა მოქმედი ცვლადი ფაქტორების მაქსიმალური გათვალისწინებით, კვლევის თანამედროვე ფიზიკური და მათემატიკური მეთოდების გამოყენებით.

## თავი 2. წყადენების კალაპოტებში მიმდინარე პროცესები და მათი კვლევის შედეგები საველე პირობებში ჩატარებული მონიტორინგის საფუძველზე

### 2.1 საველე ცდების ჩატარების მეთოდოლოგია და კვლევის ობიექტები

საველე ცდების ჩასატარებლად კვლევის ობიექტად შერჩეულ იქნა ქ. ფოთის წყალგამყოფი კვანძი, რომელიც ექსპლუატაციაში შევიდა 1959 წელს (ნახ. 2.1.1).

წყალგამყოფი კვანძის ძირითადი შემადგენელი ნაწილია კაშხალი, რომელიც შედგება რკინაბეტონის 10 ბლოკისაგან და კეტავს მდ. რონის წყალგადამგდებ ტრაქტს ნაბადას მიმართულებით. მას გააჩნია 10 მალი სეგმენტური ტიპის ფარებით (კვეთი  $4 \times 14$ ), საერთო სიგრძით 180 მეტრი. კაშხალთან  $120^{\circ}$ -იანი კუთხით მიერთებულია რეგულატორი, რომელიც შედგება 20 ოთხკუთხა და 4 რკინაბეტონის ბლოკისაგან სწორკუთხა ფარებით და წარმოადგენს ქალაქის არხის სათავეს, საერთო სიგრძით 80 მეტრი. კაშხლის ფლუტბეტის მთლიანი სიგრძე, პონურის ჩაუთვლელად, შეადგენს 80 მეტრს, აქედან კაშხლის ტანს და წყალსაცემს უკავია 40 მ, ხოლო რისბერმას – დანარჩენი 40 მ. წყალსაცემის ბოლოში მოთავსებულია ე.წ. “ჟურინის კონსტრუქციის” ენერჯის ჩამქრობი, სამკუთხა ფორმის, 1,5 მეტრი სიმაღლის კბილები.

რისბერმა, ძირითადად, შესრულებულია რკინაბეტონის ფილებისაგან, ზომით  $2 \times 2 \times 0,4$  მ. რაც შეეხება რეგულატორის ფლუტბეტს, მას არა აქვს ენერჯის ჩამქრობი მოწყობილობა. წყალსაცემი ნაწილიდან 20 მეტრის სიგრძეზე, არხის ფსკერზე დალაგებულია რკინაბეტონის ფილები, ხოლო შემდგომი 20 მეტრი კი დაფარულია ბეტონის ლეიბებით. წყალგამყოფი კვანძის საძირკვლის ქვეშ განვითარებული გრუნტები არაერთგვაროვანია. საძირკვლის ფსკერი -5,5 მ სიღრმეზე, ქვიშოვან ფენაზე დევს, რომლის საშუალო დიამეტრი  $d = 0,4$  მმ, ხოლო შეჭიდულობა  $C = 0,04$  კგ/სმ<sup>2</sup>. შემდგომი 20-25 მეტრი უკავია მძიმე თიხნარებს, ამ ფენაში გვხვდება აგრეთვე საშუალო თიხნარები ლინზების სახით. ნაგებობის საძირკვლის -11,0 მ ნიშნულზე

განფენილია ტორფის 2-2,5 მეტრიანი შრე. ამგვარად, ერთის მხრივ, საძირკვლის ქვემოთ მდებარე გრუნტების ნაირსახეობამ და მათმა არადამაკმაყოფილებელმა ფიზიკურმა მახასიათებლებმა, ასევე მდინარის კალაპოტში მოსალოდნელმა რთულმა გეომორფოლოგიურმა და ჰიდროლოგიურმა პროცესებმა, ხოლო მეორე მხრივ, წყალგამყოფი კვანძის ნორმალური ექსპლუატაციისა და მის მიმართ წაყენებული მეტად მნიშვნელოვანი მოთხოვნების უზრუნველყოფამ განაპირობა, რომ წყალგამყოფ ნაგებობათა აღნიშნულ კომპლექსზე დაწესებულიყო მუდმივი მეთვალყურეობა.

ცნობილი სპეციალისტების, აკადემიკოს ც. მირცხულავას, პროფესორების ნ. დანელიას, ფ. შატბერაშვილის მიერ ჩატარებულმა თეორიულმა, ექსპერიმენტულმა და ნატურაში ჩატარებულმა კვლევებმა განაპირობა, რომ აღნიშნული წყალგამყოფი კვანძი შეტანილიყო საქართველოს იმ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ნუსხაში, რომლებიც მოითხოვს გაძლიერებულ ყურადღებას და სისტემატურ დაკვირვებას.

გამომდინარე აღნიშნულიდან, საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტში (ამჟამად სსიპ წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი) შემუშავდა სპეციალური სამეცნიერო-კვლევითი პროგრამა, რომელიც ითვალისწინებდა:

- წყალგამყოფი კვანძის ბურჯებისა და საყრდენი კედლების ჯდენით გამოწვეული ვერტიკალური და ჰორიზონტალური დეფორმაციების ფიქსირებას ნიველირებით, სპეციალურად დამონტაჟებული რეპერებისა და ბზარმზომების საშუალებით;

- წყალგამყოფი კვანძის ნაგებობის ზედა და ქვედა ბიეფების მდგომარეობის გამოკვლევას ყოველი მახასიათებელი ხარჯების გატარებისას, როგორც ქალაქის არხით, ისე ნაბადას მიმართულებით. ამ მიზნით ხორციელდებოდა მახასიათებელი კვეთების ტოპოგრაფიული გადაღება ექოლოტირებით, ნაგებობის ზედა ბიეფის 1,5 კმ-იან ზონაში, ასევე კაშხლის, რეგულატორის წყალსაცემის, რისბერმას განლაგების ზონაში და ქვედა ბიეფში (ნახ. 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5, 2.1.6, 2.1.7);

- თხიერი და მყარი ხარჯების ფიქსირება, როგორც ქალაქის არხში, ისე კაშხლის ქვედა ბიეფში, ნაბადას მიმართულებით, ამ მიზნით სპეციალურად

მოწყობილ ჰიდროპოსტებზე;

– ქალაქის არხის გამტარუნარიანობის დადგენა, არხის გრძივი და განივი კვეთების ტოპოგრაფიული გადაღება ექოლოტირებით 70 მახასიათებელ კვეთში, წყალგამყოფი ნაგებობიდან ზღვამდე.

სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოები აღნიშნული პროგრამის შესაბამისად დაიწყო 1957 წლიდან და გრძელდება დღემდე.

დაკვირვების მასალები გვიჩვენებს, რომ კაშხლის და რეგულატორის ბლოკებმა განიცადა თანაბარი ჯდენა. შესამჩნევი გადახრის შემთხვევები არ დაფიქსირებულა. გამონაკლისი იყო კაშხლის პირველი, მე-4 და მე-10 ბლოკები. მაქსიმალურმა ჯდენამ პირველ ბლოკზე შეადგინა 67 მმ, ხოლო მე-10 ბლოკზე – 77 მმ. შემდგომში მდგომარეობა შედარებით სტაბილური გახდა. ჯდენების ძირითადი მიზეზი იყო საძირკვლის ქვეშე ქვიშოვანი ფენის შეკუმშვა და ნაწილობრივ ქვიშის მექანიკური სუფოზია. რეგულატორის ბლოკებში ჯდენებმა, მე-5 ბლოკის გარდა, თანაბრად ჩაიარა. ამ ბლოკში ჯდენის სიდიდემ 70 მმ-ს მიაღწია, რაც გამოიწვია კაშხლის პირველი ბლოკსა და რეგულატორის მე-5 ბლოკს შორის სივრცის გრუნტით შევსებამ და შესაბამისმა დატვირთვებმა. პრინციპში, პირველი 10 წლის განმავლობაში მიმდინარეობდა ნაგებობების ბლოკების თანაბარი ჯდენა. რაც შეეხება ნაგებობის ჰორიზონტალურ დეფორმაციებს, როგორც ეს დაკვირვების ანალიზმა დაადასტურა, ბლოკებს შორის ბზარების სიდიდეები არ აღემატებოდა დასაშვებ 2 მმ-ს.

ყოველივე აღნიშნული საშუალებას გვაძლევს დავასკვნათ, რომ ნაგებობის მუშაობა, ძირითადად, მიმდინარეობდა მისი მდგრადობის სტაბილიზაციის პროცესით და ნაგებობისათვის წინასწარ დამუშავებული ექსპლუატაციის სქემის პირობების დაცვით. აღნიშნული სტაბილურობა მეტნაკლებად განპირობებული იყო რიგი ფაქტორების დროული გამოვლენით. მხედველობაში გვაქვს კაშხლისა და რეგულატორის ქვედა ბიეფში წარმოქმნილი ადგილობრივი დეფორმაციების (გამორეცხვების) დროული დაფიქსირება და საჭირო ღონისძიებების გატარება.

ჰიდროკვანძის ნორმალური ექსპლუატაციისათვის თავიდანვე უდიდესი ყურადღება მიექცა მისი ბიეფების მდგომარეობის შესწავლას, როგორც ლაბო-

რატორიული, ისე უშუალოდ ნატურაში საველე კვლევების ჩატარების გზით. ამის ძირითადი მიზეზი, პირველ რიგში, იყო მდინარის ფსკერზე განლაგებული, ადვილად რეცხვადი, ალუვიური წვრილი ქვიშოვანი ფრაქციებისაგან შემდგარი ფენები, რითაც ხასიათდება, საერთოდ, მდინარეების კალაპოტები დაბლობ ზონაში. სხვადასხვა რეგიონებში (ანალოგიურ პირობებში) ჩატარებული კვლევები გვიჩვენებს, რომ დაბლობ ზონებში ჰიდროტექნიკური ნაგებობების როგორც ზედა, ისე ქვედა ბიეფებში შესამჩნევი ხდება კალაპოტური პროცესების გააქტიურება ნაგებობის ექსპლუატაციაში გაშვების დღიდან და დიამეტრალურად განსხვავებულ მოვლენებთან არის დაკავშირებული (დალექვისა – ზედა ბიეფში, გამორეცხვისა – ქვედა ბიეფში), რომელთა პროგნოზირების თეორიული და ლაბორატორიული მეთოდებით, უმეტეს შემთხვევაში, არ იძლევა რეალურ სურათს. გათვალისწინებული იქნა რა მოსალოდნელი გართულებები, აღნიშნული ნაგებობის როგორც რეგულატორის, ისე კაშხლის ქვედა ბიეფში და აგრეთვე ნაგებობის ზედა ბიეფში მოსალოდნელი გართულებები, გადაწყდა ჩატარებულიყო ყოველწლიური დაკვირვებები, მდინარის კალაპოტის წინასწარ შერჩეულ მახასიათებელ კვეთებში, ჰიდროკვანძის როგორც ქვედა, ისე ზედა ბიეფში, ასევე მდინარის კალაპოტის მთელ სიგრძეზე, ნაგებობის გავლენის და ქალაქის არხის ზონაში. აღნიშნული კვეთები შერჩეულ იქნა მუდმივი რეპერების მოწყობით. მდინარეში ყოველი მახასიათებელი ხარჯის გავლისას ხდებოდა აღნიშნული კვეთების ექოლოტირება, მათი შედარება საპროექტო და გასული წლის მონაცემებთან და მიღებული ინფორმაციის ანალიზი.

დადგინდა, რომ ჰიდროკვანძის რეგულატორის ქვედა ბიეფში გამორეცხვის პროცესები დაიწყო ნაგებობის ექსპლუატაციაში გაშვების დღიდან და თანდათანობით ინტენსიური ხასიათი მიიღო. ეს მოვლენა ძირითადად განპირობებული იყო როგორც ადვილად რეცხვადი გრუნტების არსებობით, ისე რეგულატორის ქვედა ბიეფში ენერჯის ჩამქრობი მოწყობილობის გაუთვალისწინებლობით. პროექტის მიხედვით, რეგულატორიდან 20 მ მანძილზე, ფსკერზე დაგებულ იქნა რკინაბეტონის ბლოკები, ხოლო შემდგომ 20 მეტრზე – ბეტონის ლეიბები. პროექტის მიხედვით, რეგულატორი გაანგარიშებულია  $400 \text{ მ}^3/\text{წმ}$  ხარჯის მისაღებად, ხოლო მდინარეში, მოსალოდნელი  $0,1\%$  უზრუნველყოფის ხარჯის ( $500 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ ) გასატარებლად. ამ



ხარჯების დროს წყალსაშვის ზღურბლზე წყლის გადადინების სიღრმე შეადგენს 5,7 მ, ხოლო ქვედა ბიეფში რისბერმაზე -5,75 მეტრს. წყლის გაშვება რეგულატორიდან ქალაქის არხში დაიწყო 1959 წლის ნოემბრიდან. ამ პერიოდში მდინარეში გადიოდა 1700 მ<sup>3</sup>/წმ წყლის ხარჯი. ქალაქის არხში რეგულატორის 8 ცენტრალური ფარიდან გაშვებულ იქნა 350-400 მ<sup>3</sup>/წმ ხარჯი, წყლის დონეების სხვაობამ ზედა და ქვედა ბიეფს შორის შეადგინა 0,15 მ. პირველი საანგარიშო წყლის ხარჯის გაშვებამ ქალაქის არხში მთლიანად დაანგრია ბეტონის ლეიბების საფარი. გარეცხვის სიღრმემ ნაგებობიდან 35-50 მეტრის სიგრძეზე შეადგინა 5-7 მ. გარეცხვის მაქსიმალურმა სიღრმემ შეადგინა 8,5 მ. ყველაზე არახელსაყრელი, რეგულატორის ქვედა ბიეფისათვის აღმოჩნდა 1963 წლის 9-12 ივლისი და 1966 წლის 6-7 ივლისი, როდესაც მდინარეში გაიარა დიდმა ხარჯებმა, 3000-3400 მ<sup>3</sup>/წმ. ამ პერიოდში ქალაქის არხში გატარებულ იქნა 380-415 მ<sup>3</sup>/წმ ხარჯი. ბიეფებს შორის წყლის დონეების სხვაობამ შეადგინა 0,30-0,50 მ, ხოლო ხვედრიტმა ხარჯმა – 17 მ<sup>3</sup>/წმ. რეგულატორის ქვედა ბიეფში გარეცხვის სიღრმემ -9,70 მ-ს მიაღწია, 1967 წლის ბოლოს (29-30 დეკემბერი) ქვედა ბიეფში მდგომარეობა უფრო გართულდა, გარეცხვის სიღრმე 10 მ-მდე დავიდა და თანდათანობით მიუახლოვდა რეგულატორს. რისბერმის 40% მე-4 და მე-10 ხვრეტებს შორის ჩაინგრა. ამ მომენტისათვის მდინარეში წყლის ხარჯი 3000 მ<sup>3</sup>/წმ იყო. სწორედ ამ დროს შეიმჩნეოდა რეგულატორისა და კაშხლის ბლოკების ყველაზე დიდი ჯდენები.

1967-68 წლებში რეგულატორის ჯდენის სიდიდემ 31 მმ შეადგინა (№5 ბლოკი), კაშხლისათვის – 17 მმ (ბლოკი №1), ხოლო სანაპირო საყრდენი კედლის ჯდენამ შეადგინა 56 მმ (კედელი №4); საჭირო გახდა რეგულატორის ქვედა ბიეფის სასწრაფოდ გამაგრება და მოსალოდნელი ექსტრემალური სიტუაციის თავიდან აცილება. რაც შეეხება კაშხლის ქვედა ბიეფს, საველე გამოკვლევებმა უჩვენა, რომ აქ ფსკერის დეფორმაციების გააქტიურება დაიწყო 1964 წლიდან. მაშინ ქვედა ბიეფის გადაღების დროს აღმოჩენილ იქნა ადგილობრივი გარეცხვის ორმო -6,20 ნიშნულამდე, კაშხლიდან 73 მეტრის დაშორებით. 1965-77 წწ. გადაღებების დროს დადგენილ იქნა, რომ აღნიშნული ორმოს გაბარიტები თანდათანობით იზრდება და უახლოვდება კაშხალს. ქვედა ბიეფის 1977 წლის გადაღებებით დადასტურდა, რომ ორმოს ჩაღრმავებამ მიაღწია (-8, -9) ნიშნულამდე და მჭიდროდ მიუახლოვდა კაშხლის

რისბერმას. 1979 წლის ჰიდროლოგიური მონაცემები მიუთითებს, რომ მდინარეში მაქსიმალური ხარჯების ზრდამ ( $2500 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ ; 3.11.1979) და მისმა შემდგომმა გადიდებამ ( $2650 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ -მდე 4.12.1979) მდგომარეობა უფრო გაართულა. 1979 წლის თებერვალში ჩატარებულმა მახასიათებელი კვებების გადაღებამ უჩვენა, რომ მდგომარეობა მეტად სერიოზულ ხასიათს ღებულობდა და საჭირო იყო ქმედითი ღონისძიებების გატარება, რათა თავიდან ყოფილიყო აცილებული მოსალოდნელი ავარია. ჩატარებული კვლებების საფუძველზე “საქსახწყალპროექტმა” 1981 წელს დაამუშავა “წყალგამყოფი კვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის კაპიტალური გამაგრების პროექტი”.

პროექტის შესაბამისად, 1982-83 წლებში “კოლხიდმშენის” მიერ შესრულდა კაშხლის ქვედა ბიეფის გამაგრება ნაყარი, დიდი გაბარიტის ნაფლეთი ქვებით, რომლის ჩაყრა განხორციელდა მეტალის შპუნტების რიგებს შორის. ამ ღონისძიების ჩატარების შედეგად მოხდა ქვედა ბიეფის გარკვეული დროით სტაბილიზაცია, მაგრამ მიგვაჩნია, რომ სასურველი შედეგი მაინც არ იქნა მიღწეული, ისე, როგორც ეს განხორციელდა რეგულატორის ქვედა ბიეფის გამაგრების დროს. ამის მიზეზი იყო მშენებლობის წარმოების არასწორი ტექნოლოგია. პირველ შემთხვევაში გამაგრების სამუშაოები ჩატარდა რეგულატორის სრული გამოთიშვის პირობებში, სამუშაოს წარმოების ღია წესით, ხოლო მეორე შემთხვევაში – კაშხლის ქვედა ბიეფში წყლის გადინების შეუწყვეტად, მართალია წყალმცრობის დროს, მაგრამ მეტად რთულ ჰიდრაულიკურ პირობებში ( $3-6 \text{ მ}$  სიღრმისა და  $0,8-1,0 \text{ მ/წ}$  ნაკადის საშუალო სიჩქარეების შემთხვევაში). ყოველივე აღნიშნული არ იძლეოდა საშუალებას გამაგრება ჩატარებულიყო პროექტით გათვალისწინებული პარამეტრების სრული დაცვით. 1984-90 წლების გადაღებებმა და მათ ურთიერთშედარებამ გვიჩვენა, რომ ფსკერის სტაბილიზაცია არ არის მიღწეული სასურველი საიმედოობით. შეიმჩნევა ფსკერის ჩაღრმავება გამაგრების ზონაში და მაქსიმალური სიღრმეების ნელი ტემპით გადაადგილება კაშხლის რისბერმის მიმართულებით. ასე მაგალითად, 1990 წლის მონაცემებით  $3-3$  მახასიათებელ კვებში დაფიქსირებულია ფსკერის ნიშნული  $-5,6 \text{ მ}$  სიღრმეზე,  $5-5$  კვებში –  $-6,3 \text{ მ}$  სიღრმეზე, ხოლო  $8-8$  კვებში კი  $-6,8 \text{ მ}$  ნიშნულამდე. ანალოგიური სურათი იყო მიღებული 1991-92 წლების მონაცემებითაც, რაც იმას

მიუთითებდა, რომ გამორეცხვის პროცესმა შეიძლება უფრო ინტენსიური ხასიათი მიიღოს დიდი ხარჯების ქვედა ბიეფში გატარების დროს ან კაშხლის ფარების არასწორი მანევრირების შემთხვევაში.

აღნიშნული საკვებით დადასტურდა ჩვენს მიერ ჩატარებული [74, 75, 76] კვლევებით, რომლებიც ჩატარდა 1997-98 წლებში, მთელი შვიდწლიანი შესვენების შემდეგ. ექოლოტირებით მახასიათებელი კვებების გადაღებამ კაშხლის ქვედა ბიეფში დააფიქსირა მთელი რიგი ცვლილებები. ასე, მაგალითად: მე-4, მე-5, მე-6 და მე-7 ბურჯების გასწვრივ საკმაოდ დაზიანებულია რისბერმა, რის შედეგად მისი საპროექტო სიგრძე 40 მ-დან შემცირებულია 10-20 მ-მდე, ხოლო დაზიანებული ნაწილის შემდეგ ჩამოყალიბებულია გარეცხვის 6-8 მ-ის სიდიდის ორმო. განმეორებითმა საკონტროლო გადაღებებმა, რომელშიც, ჩვენი თხოვნით, მონაწილეობდნენ მოწვეული სპეციალისტებიც, დაადასტურა აღნიშნული.

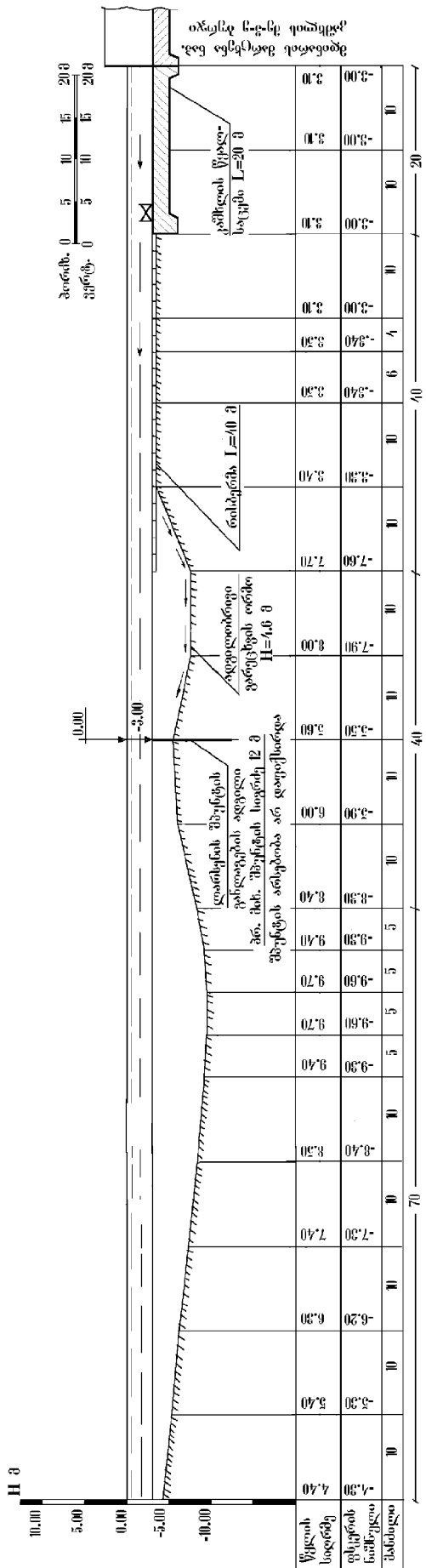
ამასთან, საჭიროა ითქვას, რომ 1981-82 წლებში ქვედა ბიეფის გასამაგრებლად ჩატარებულმა ღონისძიებებმა (ლარსენის ხიმინჯების და ნაყარი ქვის გამოყენებით) გარკვეული დადებითი როლი შეასრულა გამორეცხვის პროცესების შეყოვნებაში, მაგრამ ვერ მოხერხდა მისი ლიკვიდაცია. სამუშაოს მიმდებმა კომისიამ მაშინაც დააფიქსირა, რომ ჩატარებული ღონისძიებების მიუხედავად, ვერ მოხერხდა რისბერმის აღდგენა საპროექტო პარამეტრებში. ამასთან ერთად, მიზანშეწონილად მიიჩნია სისტემატური დაკვირვებების გაგრძელების აუცილებლობა და გადაუდებელი ტექნიკური ღონისძიებების დამუშავება ქვედა ბიეფის კაპიტალური გამაგრების შესასრულებლად.

ამრიგად, 1997 წელს ჩატარებულმა კვლევებმა საშუალება მოგვცა დაგვედგინა კაშხლის ქვედა ბიეფში, რისბერმის განლაგების ზონაში არსებული ფსკერის მდგომარეობის ზუსტი სურათი, ზედაპირის ნიშნულები და გამორეცხვის ორმოს მდგომარეობა, მაგრამ ვერ მოგვცა ინფორმაცია ფსკერის მასალის თვისობრივ მახასიათებლებზე, რის გამოსარკვევადაც ჩატარდა დამატებითი სამუშაოები მექანიკური ზონდირების გამოყენებით.

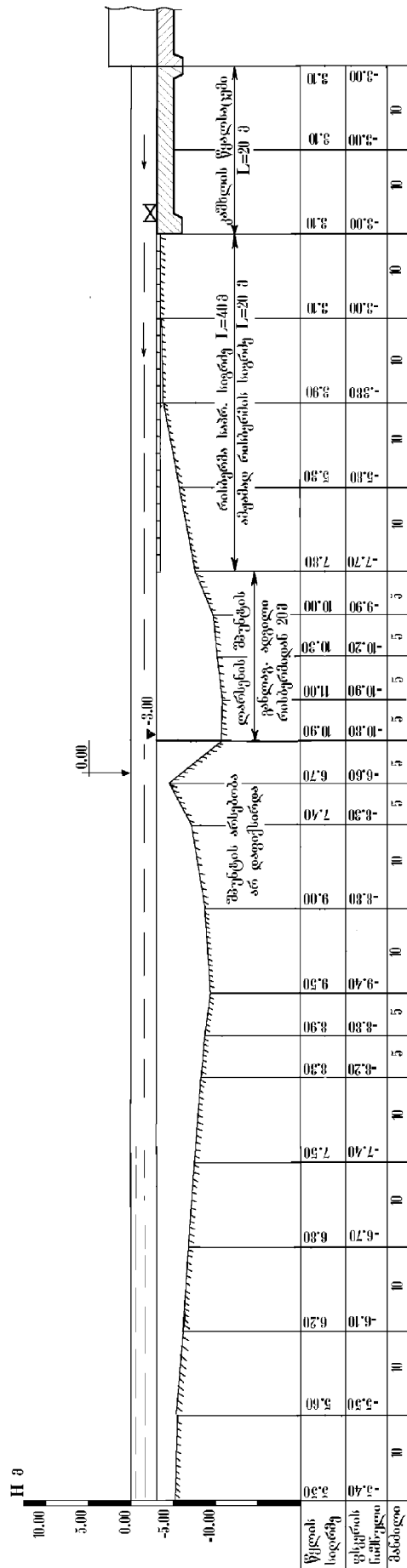
ზონდირებამ გვიჩვენა, რომ რისბერმის დეფორმირებულ ზონაში ფსკერის გარკვეული ნაწილი შედგება მყარი საფარისაგან, რომლის ზედაპირის ზოგიერთი

ადგილი დაფარულია მცირე, 0,5-1 მ ქვიშა-ლამით, ნაწილი ქვით, ხოლო ნაწილი საერთოდ დაუცველია. აღნიშნულიდან გამომდინარე შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა, რომ ქვედა ბიეფში, რისბერმის განლაგების ზონაში განვითარდა მოსალოდნელი ადგილობრივი გამორეცხვების, რამაც გამოიწვია რისბერმის რკინაბეტონის ფილების ჩაფენა, დეფორმირება და ზოგიერთ ადგილას ერთმანეთისაგან დაშორება. ამაზე მიუთითებს მახასიათებელი განივი კვეთების პარამეტრებიც, რომლებიც გაცილებით მეტია (5-6 მ-ით), ვიდრე რისბერმის პერიმეტრის საპროექტო სიდიდე (ნახ. 2.1.6).

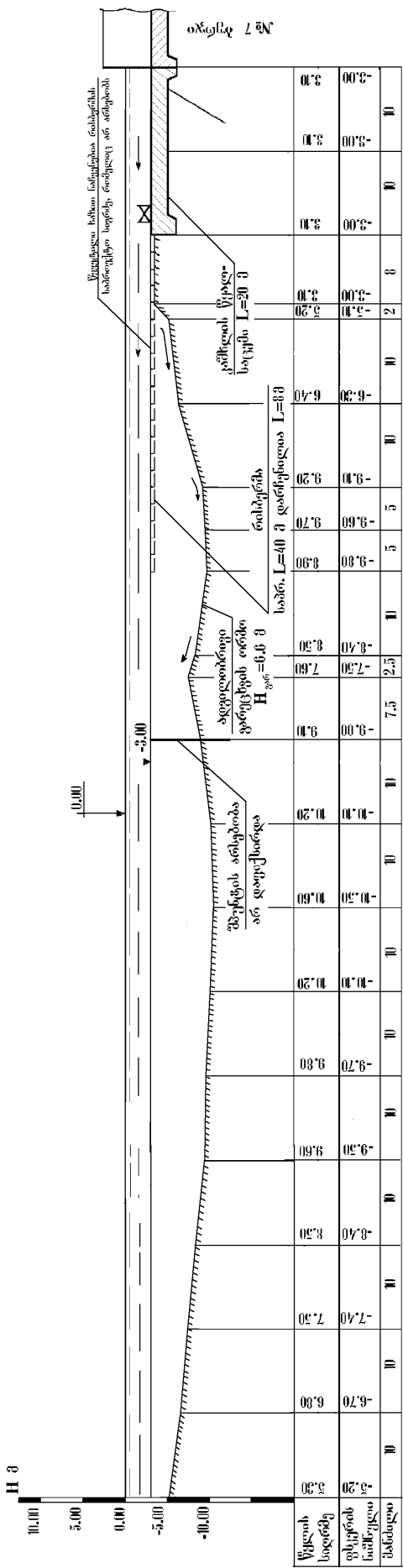
ამრიგად, წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფში შექმნილი მდგომარეობა მოითხოვდა გადაუდებელი ღონისძიებების განხორციელებას (რისბერმის დაზიანებული ნაწილის აღდგენა-რეკონსტრუქციას), რათა არ განვითარებულიყო დაწყებული პროცესი და თავიდან ყოფილიყო აცილებული მოსალოდნელი საფრთხე წყალსაცემი ნაწილის დაზიანებისა.



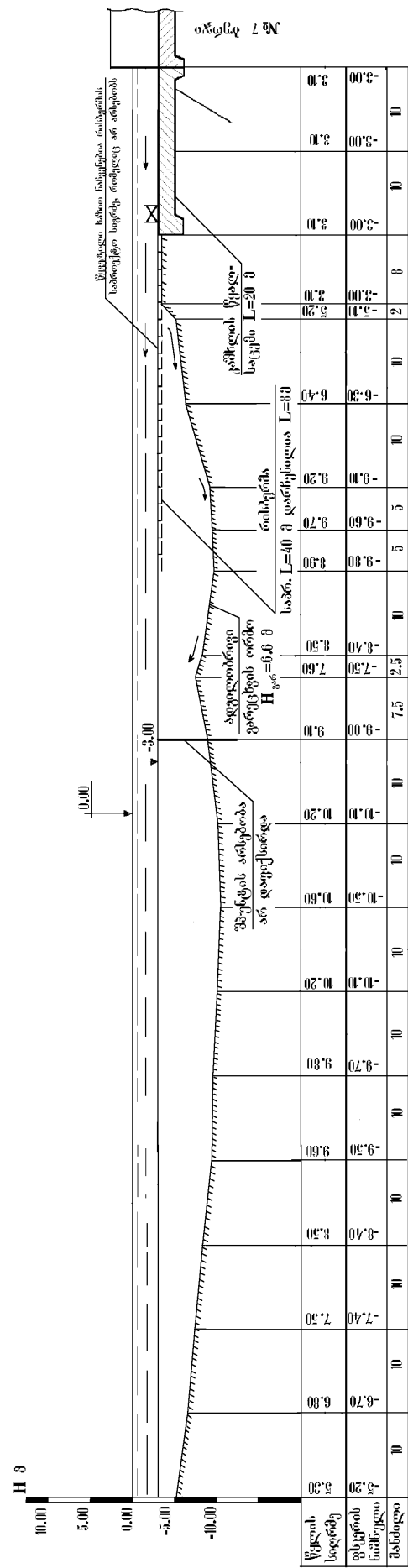
ნახ. 2.1.1. მახასიათებელი განივი ჭრილი III-III მე-3 ბურჯის გასწვრივ



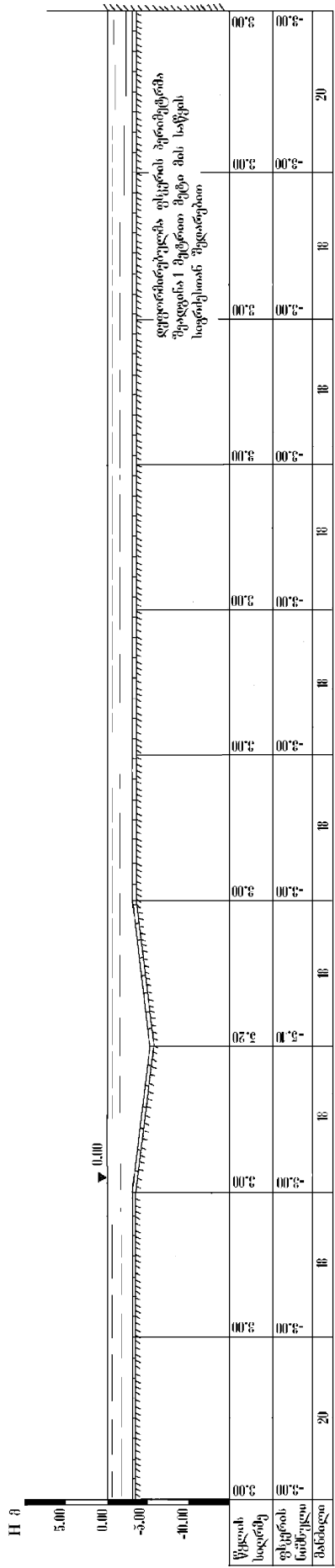
ნახ. 2.1.1.1. მახასიათებელი განივი ჭრილი V-V მე-5 ბურჯის გასწვრივ



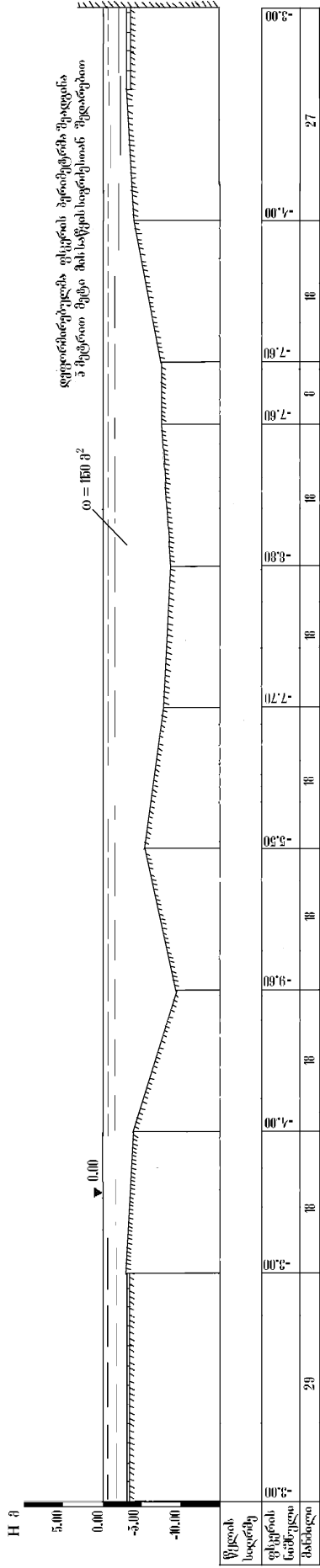
ნახ. 2.13. მახასიათებელი განივი ჭრილი VII-VII მკ-7 ბუჩქის გასწვრივ



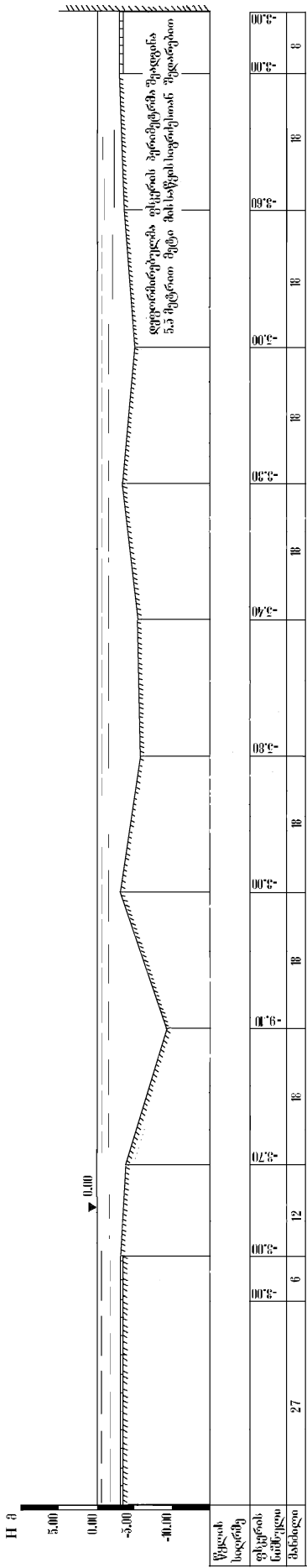
ნახ. 2.14. განივი ჭრილი



ნახ. 2.1.5. განივი კურილი 4-4



ნახ. 2.1.6. განივი კურილი



ნახ. 2.1.7. განივი კრილი



## 2.2 წყალდენების კალაპოტებში განვითარებული ჰიდროლოგიური და გეომორფოლოგიური პროცესები, მათი გავლენა გარემოზე

მდინარეთა ჰიდროგრაფიული ქსელის ზონაში განლაგებული მიწის რესურსების დაცვას და ეკოლოგიური წონასწორობის შენარჩუნებას განსაკუთრებული როლი ენიჭება ქვეყნის სოციალურ-ეკონომიკურ აღმავლობაში. პირველად საქართველოს ისტორიაში ამ საკითხმა ასახვა ჰპოვა კანონში წყლის შესახებ, რაც იურიდიული ბაზაა იმ ორგანიზაციებისათვის, რომლებიც წყლით სარგებლობას ეწევიან. ეს კანონი აღსანიშნავია იმითაც, რომ მასში განხილულია წყლის მავნე ზემოქმედების აცილების და ლიკვიდაციის საკითხები.

წყლის ნაკადის დინამიკური ზემოქმედება ბუნებრივ კალაპოტებზე დეფორმაციებით და ნგრევის ეფექტით წარმოჩინდება, სადაც ხდება ჭარბი ხარჯის აკუმულირება და ტრანზიტი უშუალოდ წყალმიმღებამდე. გამომდინარე აღნიშნულიდან, წყალდენების კალაპოტები (რომელთა საერთო სიგრძე საქართველოში 60 ათასამდე კმ-ია) ურთულეს ბუნებრივ ნაგებობათა კატეგორიას მიეკუთვნება, მათში განვითარებული უწყვეტი პროცესების ჰიდროდინამიკური თუ მორფოლოგიური მახასიათებლებით, რომელთა შეცნობის გარეშე ძნელი ხდება წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების რეგულირება და ამასთან, წყალდენების კალაპოტების, როგორც ნაგებობების ეფექტურად გამოყენება.

მრავალი უცხოელი და ქართველი მეცნიერის დღემდე არსებული მიდგომები გრუნტის არარეცხვადი (არადეფორმირებადი) კალაპოტების პარამეტრების დასადგენი და საანგარიშო დამოკიდებულებების მიღებისას სრულად ვერ ასახავენ ისეთ მნიშვნელოვან ფაქტორების, როგორცაა კალაპოტის გვერდების და ფორმის გავლენა მდგრადობა-გარეცხვაზე, კალაპოტის ცოცხალ კვეთში სიჩქარის სტრუქტურის ფორმირებაზე და სხვ. ამის შედეგია ის, რომ საანგარიშო მეთოდები ერთი და იგივე პირობებისათვის განსხვავებულ შედეგებს იძლევა.

ჰიდრავლიკური და ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების ცვლილებების გავლენა კალაპოტურ დეფორმაციებზე და თვით კალაპოტების მდგრადობის საკითხები პროცესის განვითარების სხვადასხვა ეტაპზე, ვრცლად არის გაშუქებული

სამეცნიერო შრომებში [2, 3, 10, 26, 30, 35, 36, 67, 94].

მდგრადი კალაპოტების გეომეტრიული და ნაკადის ჰიდრავლიკური ელემენტების დასადგენად გამოყენებულია სხვადასხვა მიდგომები და მეთოდები, კერძოდ, წამტაცი ძალების, ჰიდრომორფომეტრული განტოლებების, არაგამრეცხი სიჩქარეების და სხვ., რომლებშიც კალაპოტების მდგრადობა სტატიკური და დინამიკური ფორმებით არის წარმოდგენილი.

წამტაცი ძალის მეთოდით წყალდენების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას დგინდება მაქსიმალურად დასაშვები (არაგამრეცხი) სიჩქარეების შესაბამისი მხები ძაბვები, რომელთა განსაზღვრა, ძირითადად, ხდება ემპირიული დამოკიდებულებებით [42, 43]. კალაპოტის ზედაპირზე მოქმედი მხები ძაბვების სიდიდეების დასადგენად გამოყენებულია აგრეთვე მიახლოებითი მეთოდი, რომელიც ეფუძნება ნაკადის ელემენტარული მონაკვეთის მოცულობის წონასწორობის პირობას, სადაც ხდება ვერტიკალურ სიბრტყეზე მხები მოქმედი ძაბვების უგულველყოფა, რომლითაც შემოსაზღვრულია თვით ეს ელემენტარული მონაკვეთი და ამასთან, შემოღებულია ვერტიკალური და ნორმალური სიღრმეების ცნებები. ასეთი დაშვებები კალაპოტის ცენტრალური ნაწილში იწვევს მხები ძაბვების გადიდებას, ხოლო კალაპოტის ფერდებზე პირიქით, ხდება ამ მახასიათებლის 25-30%-ით შემცირება.

აქედან გამომდინარე, მდგრადი კალაპოტის ფორმა შეიძლება გამოისახოს კოსინუსოიდით, წარმტაცი ძალის განაწილება კალაპოტის ცოცხალ კვეთში შეფასდეს სითხის სიღრმის ცვლადებადობით კვეთის სიგანეზე, ხოლო მდგრადი კალაპოტის ფორმა დახასიათდეს ფერდობის ბუნებრივი დახრილობის კუთხიდან გამომდინარე. წყალდენების იმ უბნებზე, სადაც შენარჩუნებულია კალაპოტის მდგრადი ფორმა, ნატურული კვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ ნაკადისა და კალაპოტის ურთიერთგავლენის შედეგად მყარდება გარკვეული კავშირი ჰიდრავლიკურ პარამეტრებსა, წყალდენის კალაპოტის გეომეტრიულ და ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებს შორის. აღნიშნული კავშირები ზემოაღნიშნულ მახასიათებლებს შორის ჰიდრომორფომეტრული დამოკიდებულებებით არის აღწერილი.

ზემოაღნიშნული განტოლებების თანახმად წყალდენის კალაპოტს აქვს

პარაბოლას ფორმა, რომლის ხარისხის მაჩვენებელი დამოკიდებულია საინჟინრო-გეოლოგიურ პირობებზე, ნაკადის სიმღვრივეზე და იცვლება 2÷6 ფარგლებში. აღნიშნული მეთოდი სიმარტივის გამო პრაქტიკულ გამოყენებას პოულობს კონკრეტული ამოცანების გადაწყვეტისას.

ზემოთ დასახელებულ მეთოდებს შორის ყურადღებას იპყრობს გამოკვლევები, რომლებიც ოპტიმალურად მდგრადი ფორმის შეფასების თეორიულ მოსაზრებებს ეყრდნობა [48, 49, 51, 52, 63, 64, 65, 73].

თეორიული ხასიათის შრომები შეიძლება დაიყოს ორ ძირითად მიმართულებად: პირველი, რომლებიც მიღებულია აგრეგატის (გრუნტის) ნაწილაკის ზღვრული წონასწორობის პირობებიდან გამომდინარე, და მეორე, რომლებიც ვარიაციული მეთოდების გამოყენებასთან არის დაკავშირებული. რიგი ავტორების მიერ რეკომენდებულია სხვადასხვა სახის მდგრადი კალაპოტების ფორმები და სახეები, მოცემულია მათი ამსახველი პარამეტრები და ა.შ.

ამჟამად ლიტერატურაში და რეკომენდაციებში დიდი ადგილი უკავია ემპირიულ და ნახევრად ემპირიულ ფორმულებს, რომლებიც ერთმანეთთან ნაკადის ჰიდრავლიკურ მახასიათებლებს და კალაპოტის გრუნტის მახასიათებლებს აკავშირებს.

გრუნტების გამრეცხი და კრიტიკული სიჩქარეების დადგენას მიეძღვნა მრავალი ცნობილი მეცნიერების შრომები.

ნაკადისა და კალაპოტის ურთიერთქმედების ტრადიციული მეთოდებისაგან განსხვავებით გ. რუბინშტეინმა [72] არაგამრეცხი სიჩქარეების დასადგენ დამოკიდებულებებში გაითვალისწინა დამატებითი ჰიდროდინამიკური ძალები, გამოწვეული ფილტრაციული ნაკადის ზეგავლენით.

ი. ბურლაი და რ. დანელია შეეცადნენ გამოეკვლიათ ნაკადის სიღრმის გავლენა არაგამრეცხი სიჩქარეების სიდიდეებზე, ხოლო გ. მაკაევმა, ზემოთ დასახელებული მკვლევარებისაგან განსხვავებით, საანგარიშო მოდელში შეიტანა ატმოსფერული წნევის სიდიდე. ნ. კერესელიძემ, გამოიყენა რა მოძრაობის მდგრადობის ზოგადი თეორიის საფუძვლები და ნაწილაკის წონასწორობის კრიტერიუმები, შემოგვთავაზა გამრეცხი სიჩქარეების განსაზღვრის და შეზის კოეფიციენტის გამოყენების

შესაძლებლობები. თ. ჟორდანიამ თავისი გამოკვლევებით დაადგინა, რომ გამრეცხ სიჩქარეებზე არსებით გავლენას ახდენს გრუნტების სინოტივის ფაქტორი [31]. აღსანიშნავია კ. თაბუკაშვილის გამოკვლევები გარე ძალების (ქარის) გავლენაზე ნაკადის კინემატიკური სტრუქტურის ჩამოყალიბებაში და შესაბამისად, მისი გამრეცხი სიჩქარეების სიდიდეებზე.

ჩატარებული კვლევების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ არაბმული გრუნტების გარეცხვის საანგარიშოდ არსებობს უამრავი მიდგომა და საანგარიშო ფორმულა, ხოლო ბმული გრუნტებისათვის ანალოგიური კვლევები შედარებით ნაკლებია. პირველი რეკომენდაციები ბმული გრუნტების მდგრადობის შეფასებისათვის დამუშავებული იყო შრომებში [37, 39, 58, 61], სადაც დადასტურებულია ბმული გრუნტების მექანიკური სიმტკიცე წყლის ეროზიულ ზემოქმედებაზე, მათი ფიზიკურ-მექანიკური და ქიმიური მახასიათებლების გავლენა გამრეცხ სიჩქარეებზე.

ამრიგად, მრავალრიცხოვანი გამოკვლევების მასალები კიდევ ერთხელ მიგვითითებს იმ ფაქტზე, რომ წყალდენების კალაპოტების მდგრადობის და სტაბილიზაციის ამოცანა მეტად რთული და მრავალფაქტორიანია, პროცესი მიმდინარეობს სხვადასხვა ლითოლოგიურ და კლიმატური პირობების ფონზე და მოვლენების პროგნოზირება თითქმის შეუძლებელია.

აკადემიკოსმა ც. მირცხულავამ თავის თეორიულ, ლაბორატორიულ და ნატურაში ჩატარებული უნიკალური კვლევების საფუძველზე [54, 56, 57] შეძლო დაემუშავებინა უფრო საიმედო და რეალური მიდგომები აღნიშნული პრობლემების გადასაწყვეტად, დაუკავშირა რა ერთმანეთს ნაწილაკების ზღვრული მდგომარეობა, ბმული და არაბმული გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკური და სხვა მახასიათებლები და დაამუშავა მათი განსაზღვრისა და შეფასების მეთოდიკა. აღნიშნულმა მეთოდმა მალე მოიპოვა პოპულარობა და მის საფუძველზე შეიქმნა ახალი ერთიანი სამშენებლო ნორმები და რეკომენდაციები.

არსებული სხვადასხვა სახის თეორიული და ექსპერიმენტული გამოკვლევების ანალიზის საფუძველზე ბრტყელი ნაკადებისათვის გამოყვანილია არაგამრეცხი სიჩქარეების საანგარიშო დამოკიდებულებები, რომლებიც სრულად ვერ ითვალისწინებს დიდი სიგანის კალაპოტების მახასიათებლების სპეციფიკურობას

(გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკური შემადგენლობის ცვალებადობას, კალაპოტის ფორმას, კვეთში სიჩქარის განაწილების კანონზომიერებას მის სიგანეზე, აგრეგატის წონასწორობის პირობებს მის ფერდებზე, რომლითაც ის შემოსაზღვრულია და სხვ.).

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, ჩვენს მიერ შესწავლილ იქნა ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორების გავლენა წყალდენების კალაპოტების მდგრად ფორმებზე ბმული და არაბმული გრუნტებისათვის, აგრეთვე მდგრადობისა და დეფორმაციების შეფასების მეთოდები, რაც აუცილებელ წინაპირობას წარმოადგენს რესურს მზოგი ნაპირდამცავი ნაგებობების დაპროექტებისათვის.

წყალდენების კალაპოტებში მიმდინარე პროცესების განვითარებას ერთ-ერთ მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს იმ გრუნტების მახასიათებლები, რომლებისგანაც შედგება მისი ფსკერი და ფერდები. უმეტეს შემთხვევაში წყალდენების კალაპოტები შედგენილია არაბმული გრუნტებისაგან, ე.ი. შეჭიდულობის ძალის გარეშე (ქვიშები, ქვა-ლორღი და ა.შ.), რაც წარმოქმნილია გამოქარვის, დენუდაციის და ამოფრქვეული და დალექილი ქანების ეროზიის შედეგად. მათი სიმკვრივე  $2500 \pm 2800$  კგ/მ<sup>3</sup>-ის ფარგლებში შეიძლება მერყეობდეს, ფორიანობა კი დამოკიდებულია გრუნტის შემადგენელი ცალკეული ნაწილაკების (მარცვლების) წყობაზე. თუ მივიღებთ, რომ მარცვლებს სფეროს ფორმა აქვს და ისინი იმყოფება ფხვიერ მდგომარეობაში, მაშინ ფორიანობა შეიძლება იცვლებოდეს 47±48%-ის ფარგლებში, ხოლო მკვრივი წყობის შემთხვევაში კი შეადგენს 25,8%-ს. ქვიშის ფორიანობა ბუნებრივ პირობებში მერყეობს 28-დან 35%-მდე.

არაბმული გრუნტების შემადგენელი ნაწილაკების და ნატანის ფორმის დასახასიათებლად ლიტერატურაში ცნობილია სხვადასხვა მორფომეტრული კრიტერიუმები. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მარცვლის მორფოლოგიურ მახასიათებლებს დიდი როლი ენიჭება კალაპოტების მდგრადობის ჰიდროდინამიკური პროცესების განვითარებაში [12, 14, 17].

ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ფაქტორი, რომელიც განაპირობებს ნაკადის გარეცხვის უნარიანობას, წარმოადგენს არაბმული გრუნტების გრანულომეტრული შემადგენლობა. გრუნტების ერთგვაროვნობის შესაფასებლად ფართოდ იყენებენ ე.წ. არაერთგვაროვნობის კოეფიციენტს  $K = d_{95}/d_5 \leq 5$ , სადაც  $d_{95}$  და  $d_5$  არის იმ

ნაწილაკების დიამეტრი, რომლებიც შედის გრუნტის შემადგენლობაში, შესაბამისად, მთლიანი მასის 95 და 5 პროცენტში.

ქვიშის მინერალური შემადგენლობა ბევრად არის დამოკიდებული ძირითადი ქანების წარმოშობაზე. ქვიშებში, როგორც წესი, უმეტესი ნაწილი კვარცს უკავია, ხოლო ნაკლები რაოდენობა – მინდვრის შპატს, კალციტებს და სხვა სახის მსუბუქ მინერალებს. გრუნტების მინერალური და ქიმიური შემადგენლობა განსაზღვრავს ნატანის ფორმას, სიმტკიცეს და ა.შ. ცნობილია, რომ ქვიშებისათვის დამახასიათებელია გარკვეული შეჭიდულობა, რომელიც წარმოიშობა მარცვლებს შორის წყლის კაპილარული ძალების არსებობის შედეგად. ბუნებრივი აღნაგობის ქვიშებში სტრუქტურული სიმკვრივე შეიმჩნევა სხვადასხვა სინოტივის პირობებში. ცდებით დამტკიცებულია ისიც, რომ ქვიშების დატკეპნის შედეგად, გარკვეული დროის შემდეგ (დაახლოებით ერთი თვის განმავლობაში), ხდება მათი სტრუქტურული სიმტკიცის გაზრდა. მიკროფოტოგრაფირებით დადასტურებულია, რომ წვრილმარცვლოვან ქვიშებში შესაძლებელია შეჭიდულობის გაზრდა ცალკეულ ნაწილაკებს შორის, რომელიც დამოკიდებულია წყალში ქვიშის სიმკვრივეზე. სიმკვრივის შემცირებასთან ერთად, რაც უკავშირდება ფორიანობის ზრდას, მცირდება შეჭიდულობაც. ცნობილია ისიც, რომ წვრილმარცვლოვანი ქვიშები ხასიათდება თვისებით, შეინარჩუნოს გარკვეული წყლის რაოდენობა (ჰიგროსკოპული და აფსკისებრი), რაც ხასიათდება წყლის შეკავების კოეფიციენტით. ამრიგად, წყალგაჯერებულ წვრილმარცვლოვან ქვიშებში თავს იჩენს შეჭიდულობის და წყალშემაკავებელი აფსკის ფაქტორები.

არსებობს რეკომენდაციები და საანგარიშო ფორმულები, რომლებიც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს წვრილმარცვლოვანი კვარციტული ქვიშებისათვის ზედაპირული შეჭიდულობის ძალები, დადგინდეს მათი სიმტკიცე, წყალდენების ქვიშიანი კალაპოტების ხორკლიანობის კოეფიციენტი და ა.შ., როგორც ერთგვაროვანი, ისე არაერთგვაროვანი შემადგენლობის სხვადასხვა დიამეტრის მქონე მარცვლების გათვალისწინებით.

ქვიშიანი შემადგენლობის გრუნტების გარდა, წყალდენების კალაპოტების ფორმირებაში მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია თიხიან გრუნტებს, რომლებშიც

თიხების ნაწილაკების გარდა გარკვეული ნაწილი უკავია ქვიშიან და მასზე უფრო წვრილფრაქციული შემადგენლობის მტვრისებურ ნაწილაკებს.

მინერალური შემადგენლობით თიხოვანი ქანები უმეტეს შემთხვევაში პოლიმინერალიზებულია. მათი შემადგენლობა სამი სხვადასხვა ჯგუფის მინერალებით ხასიათდება: ა) თიხოვანი – კაოლინური, ჰიდროქსარები, მონტმორინოლიტები; ბ) ნამსხვრევი მთის ქანები (ქვიშოვან-მტვრისებრი ფრაქციები); გ) აუტოგენური ქანგულები და ჰიდროქანგულები რკინის და რკინის მანგანუმის კარბონატის სახით და ა.შ.

თიხოვანი ქანების სიმკვრივე საშუალოდ  $2700 \div 2780 \text{ კგ/მ}^3$  ფარგლებში მერყეობს, ხვედრითი წონა –  $1350 \div 1900 \text{ კგ/მ}^3$ , ტენიანობა – 5-დან 100%-მდე. ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებელს თიხოვანი ქანებისათვის წარმოადგენს მათი პლასტიკურობა, რომელიც გამოიყენება თიხების გრანულომეტრული კლასიფიკაციისათვის. არსებული სამშენებლო ნორმებით პლასტიკურობის მიხედვით თიხები დაყოფილია ქვიშა-თიხნარად ( $0,01 \div 0,07 \text{ მმ}$ ), თიხნარებად ( $0,07 \div 0,17 \text{ მმ}$ ) და  $0,17 \text{ მმ}$ -ზე მეტი დიამეტრის ფრაქციებად. თიხოვან გრუნტებში ნაწილაკებს შორის კონტაქტი ხორციელდება ჰიდრატ-კოლოიდური აფსკის მეშვეობით, რომელიც ხასიათდება გარკვეული სიბლანტით და მექანიკური სიმტკიცით.

მრავალწლიანი გამოკვლევებით დამუშავებულია თეორია, რომლითაც ახსნილია თიხოვან ნიადაგებში შეჭიდულობის ფიზიკური არსი [37, 38, 39]. აღნიშნული თეორიის მიხედვით შეჭიდულობა თიხოვან ქანებში ცალკეულ ნაწილაკებს შორის განპირობებულია მათ შორის საკუთარი ძალოვანი ველის არსებობით (ადსორბცია). თიხოვანი გრუნტების შეჭიდულობა განხილულია დიფერენცირებულად, როგორც ჯამი პირველადი და მეორადი შეჭიდულობებისა:

$$C = C_n + C_y, \quad (2.2.1)$$

სადაც პირველადი შეჭიდულობა წარმოადგენს შეჭიდულობის ნაწილს, რომელიც წარმოქმნილია მოლეკულური ძალებისაგან, ხოლო მეორადი შეჭიდულობა მიღებულია გრუნტის ცემენტაციის შედეგად, სხვადასხვა ქიმიური შემადგენლობით. ამრიგად, შეჭიდულობა არსებითად დამოკიდებულია თიხოვანი ქანების შემადგენლობაზე და მათში არსებულ სხვადასხვა ნაერთებზე. დისპერსულობის

ზრდასთან ერთად იზრდება შეჭიდულობის ფაქტორი. ამრიგად, გრუნტების ნაწილაკების წინააღმდეგობის უნარი, იყოს მედეგი ყოველგვარი გადაადგილების მიმართ, წარმოადგენს მათი სიმტკიცის ძირითად მახასიათებელ სიდიდეს და უდიდესი მნიშვნელობა ენიჭება ჰიდროტექნიკური თუ სხვა სახის მშენებლობებისათვის. შეჭიდულობის სიდიდე  $C$  და გრუნტის შინაგანი ხახუნის კუთხე  $\gamma$  ის ძირითადი ფაქტორებია, რომელთა მეშვეობით განისაზღვრება სხვადასხვა სახის ნაგებობის საძირკვლებში მათი სიმტკიცე და დგინდება გრუნტების წინაღობა სითხის ნაკადის გარეცხვის მიმართ, რასაც ასე დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მდგრადი კალაპოტების და პროექტების მშენებლობისა და ექსპლუატაციის პირობებისათვის. გრუნტის წინააღმდეგობა ძვრაზე, როგორც შეჭიდულობა, დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე (შემადგენლობა, სინოტივე და სხვ.).

როდესაც ხდება გრუნტების თიხის სახეობიდან ქვიშნარში გადასვლა, ერთნაირი კონსისტენციის პირობებში, მათი შიდა ხახუნის კუთხე იზრდება, ხოლო შეჭიდულობის ძალა მცირდება. თიხოვანი გრუნტების შეჭიდულობის სიდიდე, ცდების საფუძველზე, შეიძლება მიახლოებით იქნეს გაანგარიშებულია ერთდერძა შეკუმშვის პირობებისათვის, რომლის დროს მიღებულია, რომ  $C = 0,5\sigma_{შკ}$ , სადაც  $\sigma_{შკ}$  არის ერთდერძა კუმშვის დროს გრუნტის სიმტკიცის ზღვრული მნიშვნელობა.

წყალდენების შემთხვევაში კალაპოტის ნაკადის ბმული გრუნტების აგრეგატებზე დინამიური ზემოქმედების დასადგენად საჭიროა ვიცოდეთ მათი ნორმატიული წინაღობის ზღვრული მნიშვნელობა სიმტკიცეზე, რომელთა დასადგენად შეიძლება ვისარგებლოთ შესაბამისი სამშენებლო ნორმებითა და წესებით [89].

### 2.3 კალაპოტური პროცესების შეფასება და კლასიფიკაცია საველე-ექსპედიციური მონიტორინგის საფუძველზე

ბუნებრივად ჩამოყალიბებული წყალდენების კალაპოტების ნორმალური ფუნქციონირება ძირითადად მდინარის წყალშემკრები აუზის მახასიათებლებზეა დამოკიდებული. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მდინარეების კალაპოტების მიმართ



მთავარ მოთხოვნად შეიძლება ჩაითვალოს სატრანზიტო ხარჯების გასატარებლად მათი მზადყოფნა. ცნობილია, რომ ბუნებრივ წყალდენებში ნაკადის დინების მთელი ზონა დაყოფილია მაღალმთიან, მთის, მთისწინა, დაბლობ და ქვედა დინების ზონებად.

ყოველი ცალკეული უბნისათვის დამახასიათებელია კალაპოტური პროცესების განსხვავებული და მათი დინების დინამიკური ღერძის გადაადგილების თავისებურებანი. მთისა და მთისწინა ზონებში მდინარეები ხასიათდება ნატანის ტრანსპორტუნარიანობის დიდი შესაძლებლობებით და დინამიკური ღერძის სტაბილურობით.

მთისწინა უბნებზე ნატანის მზიდუნარიანობის თვალსაზრისით მდინარის სიმძლავრე მცირდება, ადგილი აქვს დინამიკური ღერძის გადაადგილებას ჭალაში და მდინარე იწყებს ხეტიალს, ხოლო დაბლობ უბნებზე მდინარის კალაპოტის ფორმირება გამონატან ალუვიურ დანალექებში ჯდება და ადგილი აქვს მისი დინამიკური ღერძის სინოსოიდურ ცვლილებას მეანდრის სახელწოდებით.

კალაპოტის მდგრადი ფორმის ჩამოყალიბებაში მდინარის შესაძლებლობების გამოვლენის შესასწავლად მიზანშეწონილია განხორციელდეს იმ კალაპოტების კვლევები, რომლებიც თვით მდინარის მიერ ყალიბდება. ზემოაღნიშნული პროცესის სრული სურათი შეესაბამება საქართველოს ტერიტორიაზე განლაგებულ კოლხეთის მდინარეებს.

ცნობილია, რომ ნაკადისა და კალაპოტის ურთიერთქმედების ხანგრძლივი პროცესის შედეგად მყარდება გამოკვეთილი დამოკიდებულება კალაპოტის მორფომეტრულ მახასიათებლებსა და ნაკადის ჰიდრაულიკურ პარამეტრებს შორის.

ჰიდრო მორფოლოგიური მიდგომებით კალაპოტების ფორმების დადგენა და კალაპოტური პროცესების შესწავლა გარკვეულ დადებით შედეგს იძლევა კალაპოტების დარეგულირებასთან დაკავშირებული საკითხების გადაწყვეტისას. კალაპოტების განმასხვავებელი ფორმები განსაკუთრებით ალუვიურ ქანებში არსებული წყალდენებისათვის არის დამახასიათებელი.

დასმული ამოცანის გადაწყვეტის მიზნით ვისარგებლეთ ცნობილ მკვლევართა მიდგომებით [78, 82], რომლის საფუძველზე გამოვლენილ იქნა სხვადასხვა სახის

სპეციფიკურობები და დადგინდა კოლხეთის მდინარეთა შემდეგი ტიპები:

1. მოხეტიალე – რომლისთვისაც დამახასიათებელია დიდი რაოდენობის ფსკერული და შეტივნარებული ნაკადის ტრანსპორტირება, დიდი გრძივი ქანობები და ნაკადის სიჩქარეები, ხასიათდება ცვალებადი ფსკერთა და ნაპირებით, კალაპოტის მრავალტოტიანობით, ნაკადის სიღრმის შეფარდება სიგანესთან 1-ზე ნაკლებია, კალაპოტწარმომქმნელი ნატანის გადაადგილება ძირითადად წარმოებს ქვიშიანი ბარხანული კვლების სახით;

2. მეანდრული – რომლისთვისაც დამახასიათებელია ზომიერი რაოდენობის ფსკერული ნატანის ტრანსპორტირება, დაურეგულირებელი წყლის რეჟიმი, გეგმაში წყალდენი ხასიათდება კლაკნილობით, კალაპოტს გააჩნია შედარებით სწორი და დამრეცი ნაპირები, ჭალაში შეიმჩნევა ძველი ნაკალაპოტარი ადგილები.

სხვადასხვა დროს გადაღებული კოლხეთის დაბლობის 1:10000 მასშტაბის რუკების გამოყენებით შესაძლებელი გახდა დაფიქსირებულიყო დაბლობზე არსებული წყალდენების კალაპოტების მახასიათებელი უბნები და მათში განივი დეფორმაციების დინამიკა მრავალწლიან პერიოდში, კალაპოტების მოხაზულობა, ჭალის რელიეფი, შეზღუდული და მოხეტიალე საზღვრები. დაფიქსირდა, რომ თავისუფალი მეანდრირება დამახასიათებელია კოლხეთის დაბლობზე გამდინარე წყალდენების უმეტესობისათვის (მდინარეები: მოქვა, ლალიძგა, ენგური, ხობი, სუფსა, რიონი თავისი შენაკადებით, ცივი, ტეხურა, აბაშა, ნოღელა). შედარებით ყველაზე დიდი სიგრძის თავისუფალი მეანდრირების უბნები გააჩნია მდ. რიონს სამტრედია-ფოთის მონაკვეთის 80 კმ სიგრძეზე, ხოლო ხობისწყალს და სუფსას – 40 კმ სიგრძეზე. ეს მდინარეები ხასიათდება ძლიერ მეანდრირებული კალაპოტით. კლაკნილობის კოეფიციენტი მეანდრირებადი კალაპოტების მქონე წყალდენებისათვის შეადგენს: მდ. რიონისათვის –1,71; მდ. ტეხურისათვის – 1,87; მდ. ხობისათვის – 1,98; მდ. აბაშისათვის – 1,65, ხოლო მდ. ცივისათვის – 1,59. კოლხეთის წყალდენებისათვის დამახასიათებელია თავისუფალი მეანდრირების უნარი და გარკვეული კანონზომიერებანი:

ა) ნაკადი გამოიმუშავებს ისეთ ფორმებს, რომლებსაც გააჩნია გარკვეული წრიული მოხაზულობა;

ბ) კლაკნილობის გადაადგილება ხდება დინების მიმართულებით და ინარჩუნებს თავის წინანდელ ფორმას გეგმაში;

ვ) კლაკნილობის მოხვევის კუთხე იზრდება, ხოლო მათი გადაადგილების სიჩქარე (ცოცვა) კლებულობს ან საერთოდ ქრება, ცალკეული კლაკნილი იღებს მარყუჟის ფორმას;

გ) მოპირდაპირე ნაპირის გარეცხვის შედეგად ხდება მარყუჟის ყელის გარღვევა და კალაპოტის ბუნებრივი გასწორხაზოვნება; ჩნდება მდინარის ნაკალაპოტარი უბანი.

გამომდინარე, წყალდენების ჰიდროლოგიური რეჟიმისა, კალაპოტის ფსკერისა და ნაპირების შემადგენელი გრუნტების გრანულომეტრული შემადგენლობიდან, მეანდრების წარმოქმნა და მათი შემდგომი განვითარების პროცესები სხვადასხვანაირად მიმდინარეობს. აღნიშნულ მოვლენაზე გარკვეულ გავლენას ახდენს როგორც კალაპოტის ქანობი, ისე ჭალის რელიეფის მახასიათებლები. საკვლევ რეგიონში გვხვდება მდინარეები მოხეტიალე კალაპოტით (ნახ. 2.3.1) და სტაბილური დინამიკური ღერძით (ნახ. 2.3.2). სურათები მიღებულია აეროფოტოგადაღებებით.

მოხეტიალე და მრავალტოტიანი კალაპოტები დამახასიათებელია კოლხეთის ყველა მდინარისათვის (კოდორი, ენგური, რიონი). ნატურაში ჩატარებული კვლევების საფუძველზე 2.3.1 ცხრილში მოყვანილია კოლხეთის ძირითადი წყალდენების კალაპოტური პროცესების განმსაზღვრელი პარამეტრები. აღნიშნული სიდიდეების და ანალოგიურ პირობებში, სხვადასხვა გეოგრაფიულ ზონებში მდებარე წყალდენების მონაცემების საფუძველზე აგებულ იქნა მრუდი (ნახ. 2.3.3), რომელიც ანალიტიკურად ჩაწერილ იქნა შემდეგი სახით:

$$I_{კრ} = \frac{0,003d}{Q_e^{0,30}} \quad (2.3.1)$$

აღნიშნული დამოკიდებულება მიგვითითებს, რომ თუ წყალდენის ქანობი ნაკლებია  $I_{კრ}$ -ზე (კრიტიკულ ქანობზე), მაშინ ადგილი აქვს წყალდენის კლაკნილობას (მეანდრირებას), ხოლო როცა იგი აღემატება ზღვრულ კრიტიკულ მნიშვნელობას, შეიმჩნევა დინამიკური ღერძის არაკანონზომიერი ცვალებადობა სატრანსპორტო უბანზე და როცა  $I = I_{კრ}$ , მოსალოდნელია ორივე სახის კალაპოტური

პროცესების განვითარება.

ცხრილი 2.3.1

№	წყალდენის და უბნის დასახელება	ნატურის მონაცემები			$\bar{I} / \bar{d}$
		ხარჯი მ <sup>3</sup> /წმ	ფსკერული ნატანის საშუალო სიღრმე $\bar{d}$	ქანობი $I$	
1.	რიონი –საქოჩაკიძესთან	1200	0,5	0,00020	0,00400
2.	ტეხური – სენაკთან	450	0,9	0,00042	0,00047
3.	ხობი – ხობთან	350	0,8	0,00035	0,00044
4.	აბაშა – აბაშასთან	206	1,1	0,00078	0,00070
5.	ცივი – სენაკთან	118	1,5	0,00106	0,00078
6.	ქალაქის არხი –ქ. ფოთთან	400	0,4	0,00021	0,00052

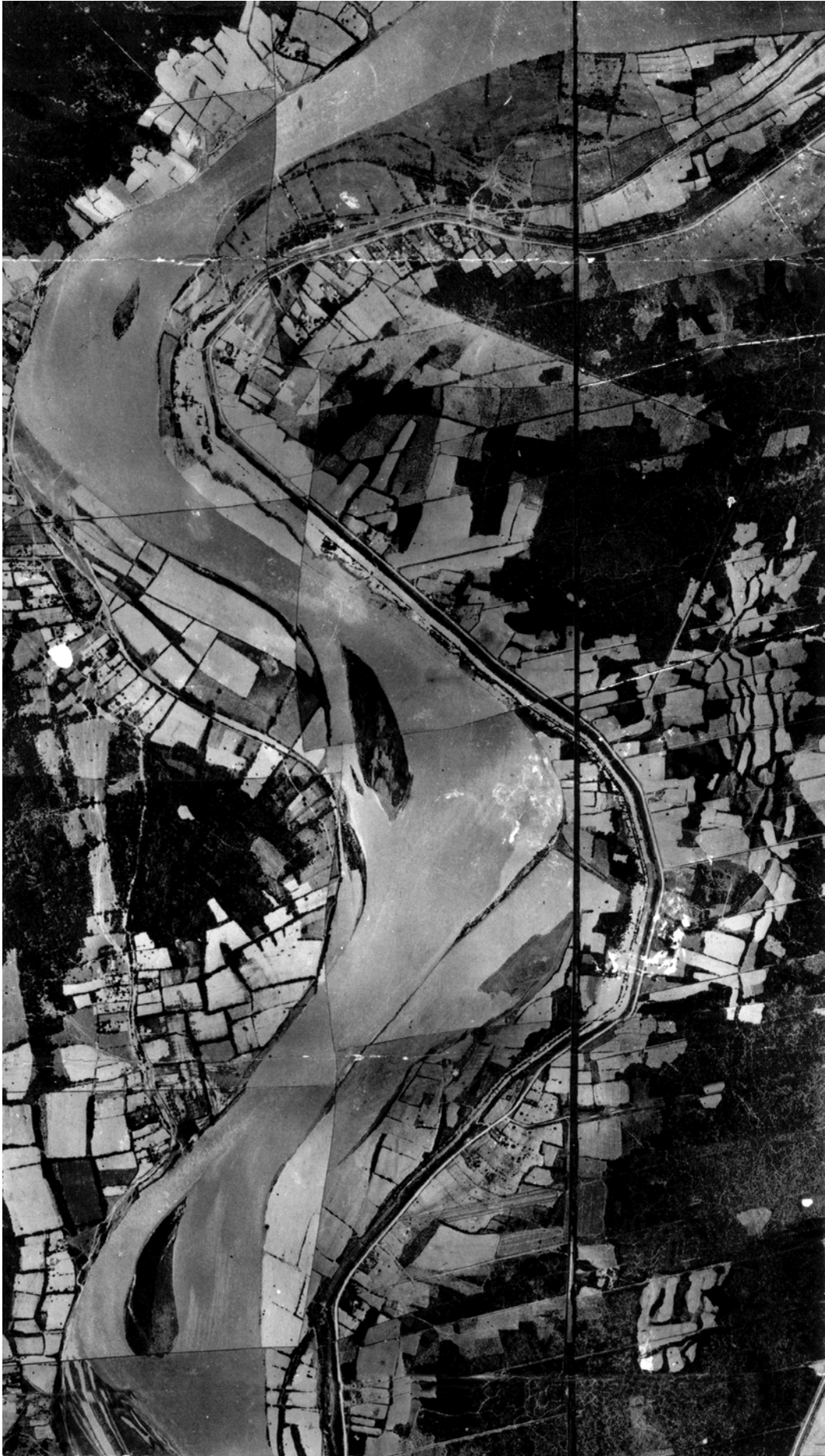
კალაპოტური პროცესების მორფომეტრული მახასიათებლების შეფასების დროს (რომლის მიხედვითაც უნდა დადგინდეს ვერტიკალური და ჰორიზონტალური დეფორმაციების სახეები და ინტენსივობა), საჭიროა ისეთი გეომეტრიული პარამეტრების ცოდნაც, როგორცაა კალაპოტის სიგანე და სიმაღლე, მოხვეულობის პარამეტრები, მეანდრის ბიჯი და სიგანე. ცნობილია, რომ კალაპოტის ფორმის ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებლად ითვლება სიღრმისა და სიგანის ფარდობა  $H/B$ , რომლის მნიშვნელობით შეიძლება ვიმსჯელოთ კალაპოტების გეოგრაფიულ მსგავსობაზე. ფარდობითი სიღრმის გადიდება იწვევს ნაკადის ფსკერთან შეხების ფართის და სიჩქარეების ვერტიკალური მდგენელების შემცირებას, რაც გარკვეულ გავლენას ახდენს დეფორმაციების თავისებურებაზე და ადიდება კალაპოტის მდგრადობის მაჩვენებელს, ხოლო მისი შემცირების შემთხვევაში კი, პირიქით.

კოლხეთის დაბლობის წყალდენების კალაპოტების მორფომეტრული მახასიათებლების ცვლილების დინამიკა მოცემულია 2.3.2 ცხრილში.

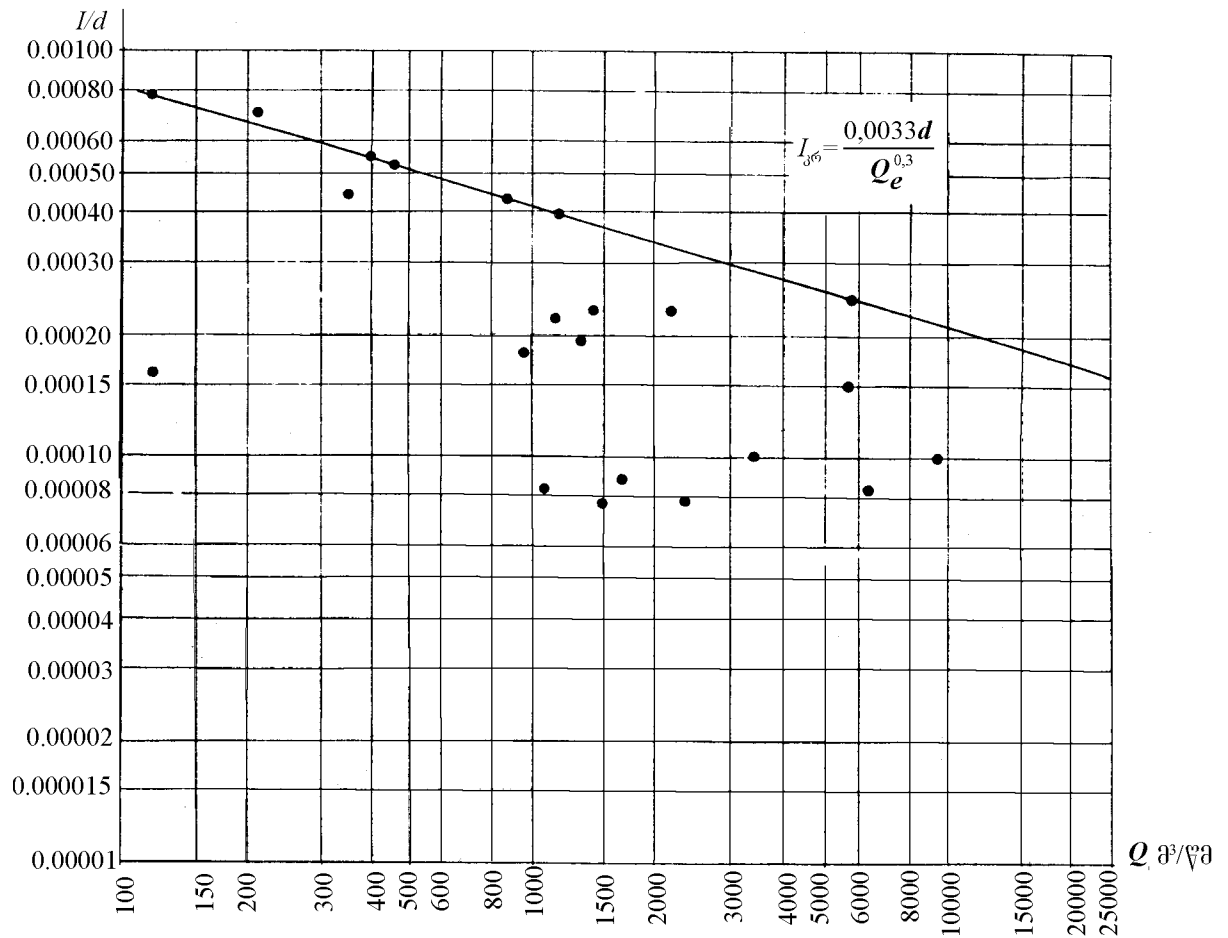
როგორც 2.3.2 ცხრილის ანალიზი გვიჩვენებს, ფარდობითი სიდიდე  $H/B$  არ არის მუდმივი და მისი მნიშვნელობა იზრდება ხარჯის ზრდასთან, ე.ი. ადგილი აქვს კალაპოტის გაშლას. ნახაზებზე 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6, 2.3.7 წარმოდგენილია კავშირები წყალდენების ნაკადის ჰიდრაულიკურ და მორფომეტრულ მახასიათებლებს შორის.



2.3.1. მდინარე მოხეტიალე კალაპოტით



2.3.2. მდინარე სტაბილური დინამიკური ღერძი



ნახ. 2.33.  $I/d = f(Q)$  დამოკიდებულების გრაფიკი

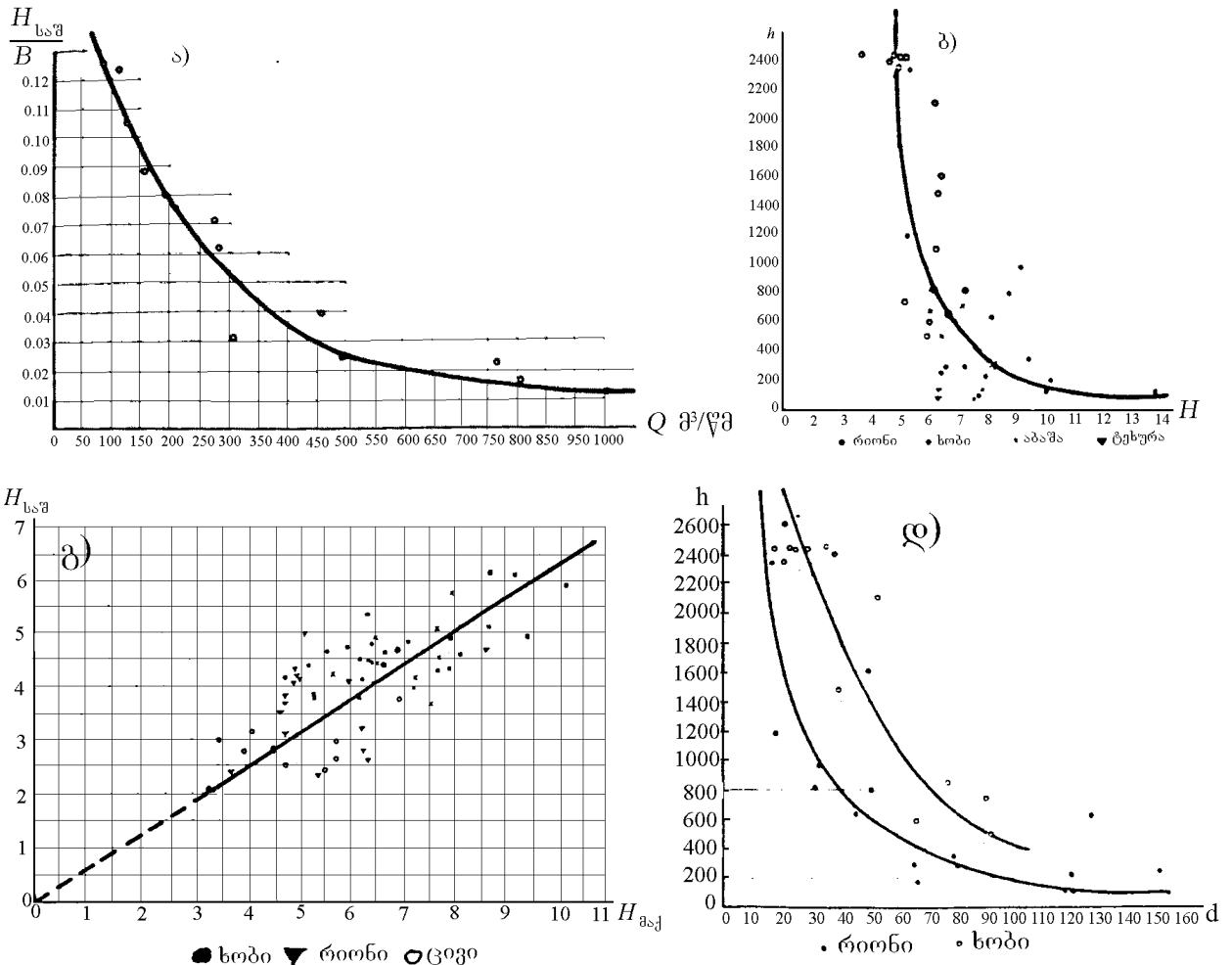
ცხრილი 2.32

კოლხეთის მდინარეთა მორფომეტრული მახასიათებლები

№	წყალდენის დასახელება	B მ	ω მ <sup>2</sup>	H = ω/B მ	H <sub>საშ</sub> /B	H <sub>მაქ</sub> მ	H <sub>საშ</sub> /H <sub>მაქ</sub>	K
1.	სობი	50-100	225-515	2,08-6,55	0,016-0,08	5,45-13,9	0,27-0,815	0,65-4,35
2.	რიონი	120-445	345-2245	1,95-5,10	0,006-0,043	3,4-12,4	0,27-0,8	0,37-8,23
3.	ტეხურა	45-220	225-525	2,3-5,65	0,025-0,75	4,0-7,5	0,28-0,79	0,4-3,9
4.	აბაშა	45-108	195-290	2,75-5,3	0,045-0,125	5,4-7,9	0,32-0,85	0,9-1,8

კოლხეთის წყალდენებისათვის კალაპოტის ფორმა (K) უახლოვდება კვადრატულ პარაბოლას, ცვლადი ხასიათის მაჩვენებლით. ხარჯების შემცირებასთან ერთად შეიმჩნევა აღნიშნული პარამეტრების სიდიდეების შემცირება. მაგალითად, მდ. რიონისათვის K-ს სიდიდე თუ 8-ს აღწევს, მდ. ცივისათვის ის მხოლოდ 1,7-ია. K-ს ცვალებადობის ასეთი კანონზომიერება შეიმჩნევა ნატანის ტრანსპორტირების

რეჟიმთან კავშირშიც. მისი დიდი მნიშვნელობები მიუთითებს ნაკადის ტრანსპორტირების მაღალ უნარზე.  $H_{\text{საშ}}/H_{\text{მ.ა.ქ}}$  ფარდობა კოლხეთის წყალდენებისათვის საშუალოდ 0,6-ს შეადგენს და როგორც კალაპოტის სიგანე, ისე წყალდენის ხარჯი გავლენას არ ახდენს წარმოდგენილ პარამეტრის სიდიდეზე. გარკვეულ ინტერესს იწვევს  $H_{\text{საშ}}/H_{\text{მ.ა.ქ}}$  ცვალებადობა სხვადასხვა მდინარეებისათვის. გ. ჟელეზნიაკოვის მიხედვით [30] რუსეთის მდინარეებისათვის ეს სიდიდე აღწევს 0,62-ს, ხოლო მ. ბუხინის მონაცემებით [12], კარპატის მდინარეებისათვის ის შეადგენს 0,64-ს. ასევე საინტერესოა თანაფარდობა  $V_{\text{საშ}}/V_{\text{მ.ა.ქ}} = 1,4$ , რაც დაფიქსირდა კოლხეთის მდინარეებისათვის (ნახ. 2.3.8) და დამოკიდებულება საშუალო სიჩქარეებსა და საშუალო სიღრმეებს შორის (ნახ. 2.3.9).

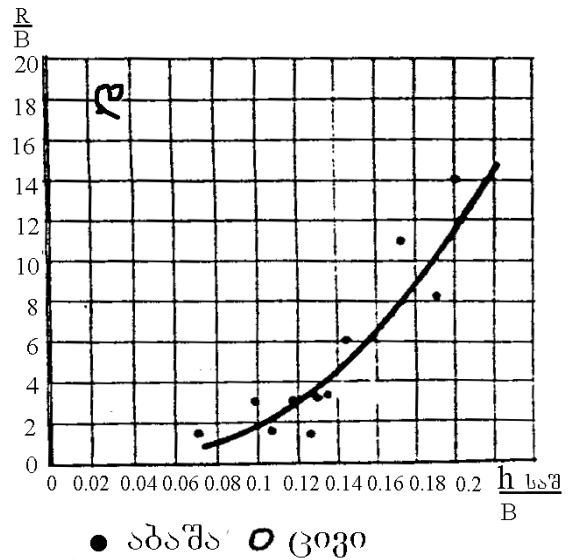
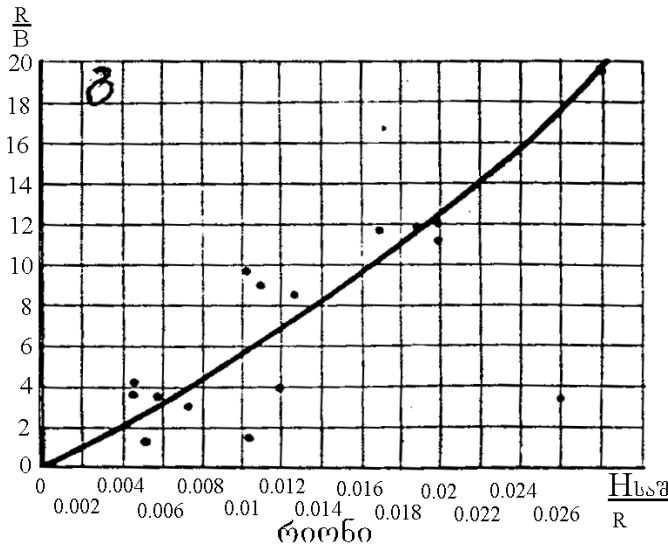
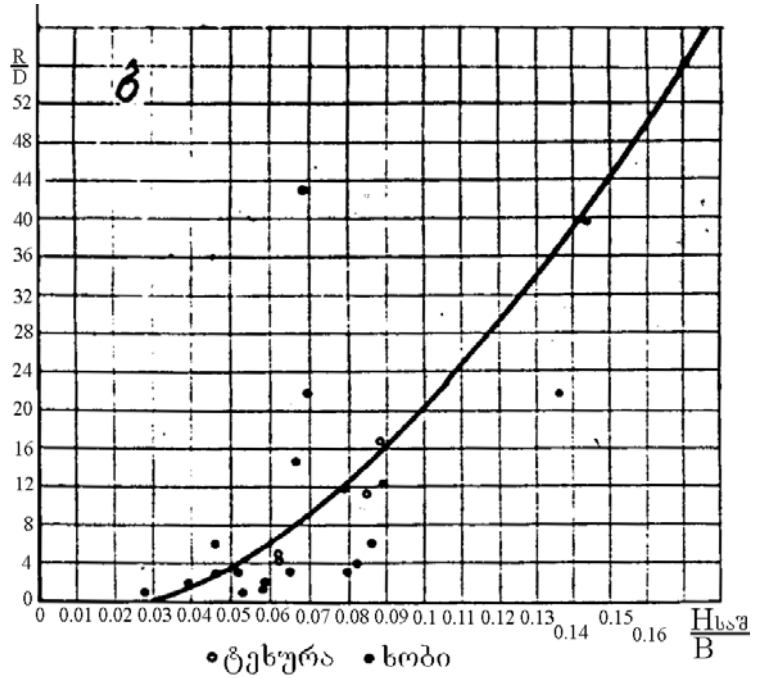
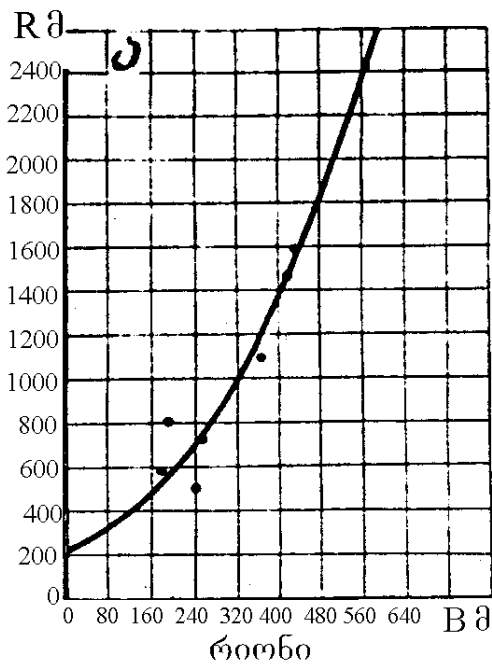


ნახ. 2.3.4. გრაფიკი დამოკიდებულებებისა:

ა)  $H_{\text{საშ}}/B = f(Q)$ ; ბ)  $h = f(H_{\text{მ.ა.ქ}})$ ;

გ)  $H_{\text{საშ}} = f(H_{\text{მ.ა.ქ}})$ ; დ)  $h = f(d)$



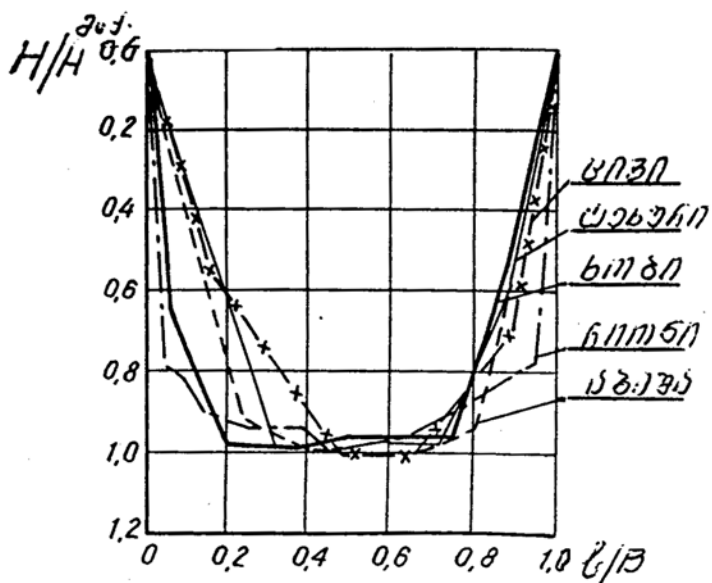


ნახ. 2.3.5. გრაფიკი დამოკიდებულებებისა:

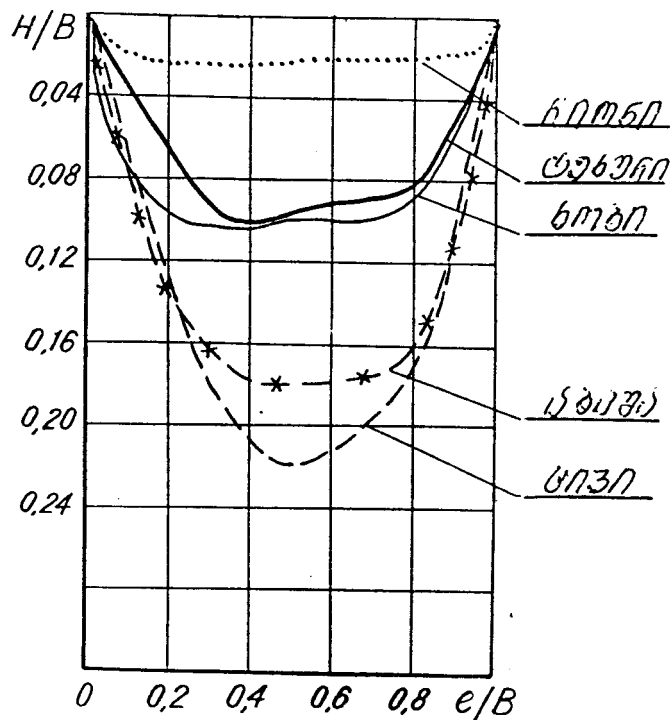
ა)  $R = f(B)$ ; ბ)  $R/B = f(H_{საშ}/B)$ ; გ)  $R/B = f(H_{საშ})$ ; დ)  $R/B = f(h_{საშ}/B)$

ცნობილია, რომ დაბლობის ტიპის წყალდენებისათვის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან მორფოლოგიურ მახასიათებელს წარმოადგენს მისი კლაკნილობა გეგმაში, რომელსაც შეიძლება ჰქონდეს სიმრუდის სხვადასხვა მახასიათებლები (სინუსოიდური) ან სხვა, უფრო რთული სახე. კოლხეთის მდინარეების აღნიშნული მახასიათებლის მიხედვით შესწავლამ გვიჩვენა, რომ კლაკნილობები სხვადასხვა მდინარეებისათვის არის მსგავსი და ძირითადად დამოკიდებულია მათ

მორფოლოგიურ და ჰიდრაულიკურ პარამეტრებზე.



ნახ. 2.3.6.  $H/H_{აქ} = f(l/B)$  დამოკიდებულების გრაფიკი

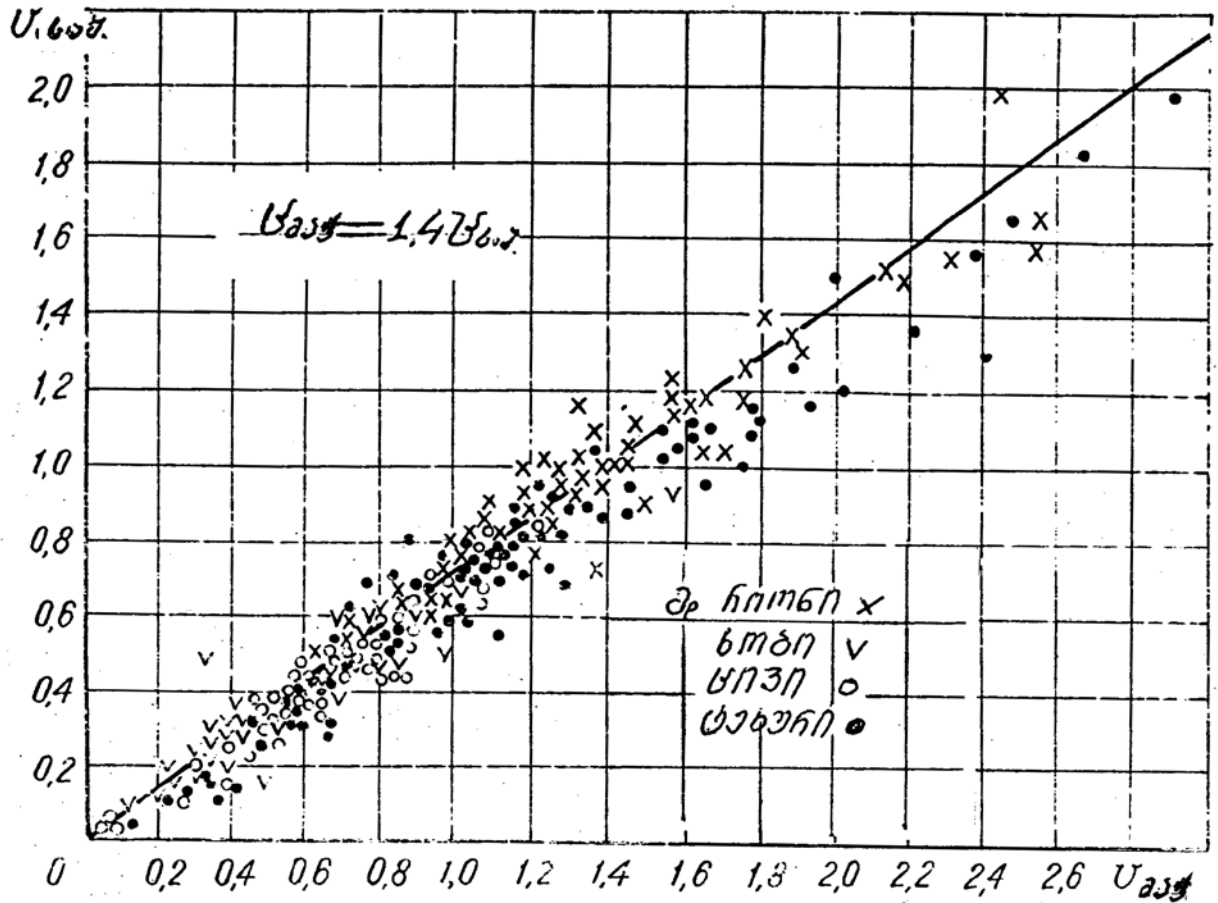


ნახ. 2.3.7.  $H/B = f(e/B)$  დამოკიდებულების გრაფიკი

კალაპოტის ფერდების და ფსკერის ნაფენი არაბმულ გრუნტებში ფორმირდება სხვადასხვა სახის (ხრეშოვანი) მასალით, რომლისთვისაც პარამეტრების რიცხვითი მნიშვნელობებია  $K = 0,42$ ,  $X_1 = 0,159$ ,  $X_2 = 0,08$ ,  $X_3 = 0,354$ . რაც შეეხება  $B/H$  პარამეტრის ზღვრულ მნიშვნელობას, რომლის ზრდის შემთხვევაში კალაპოტში

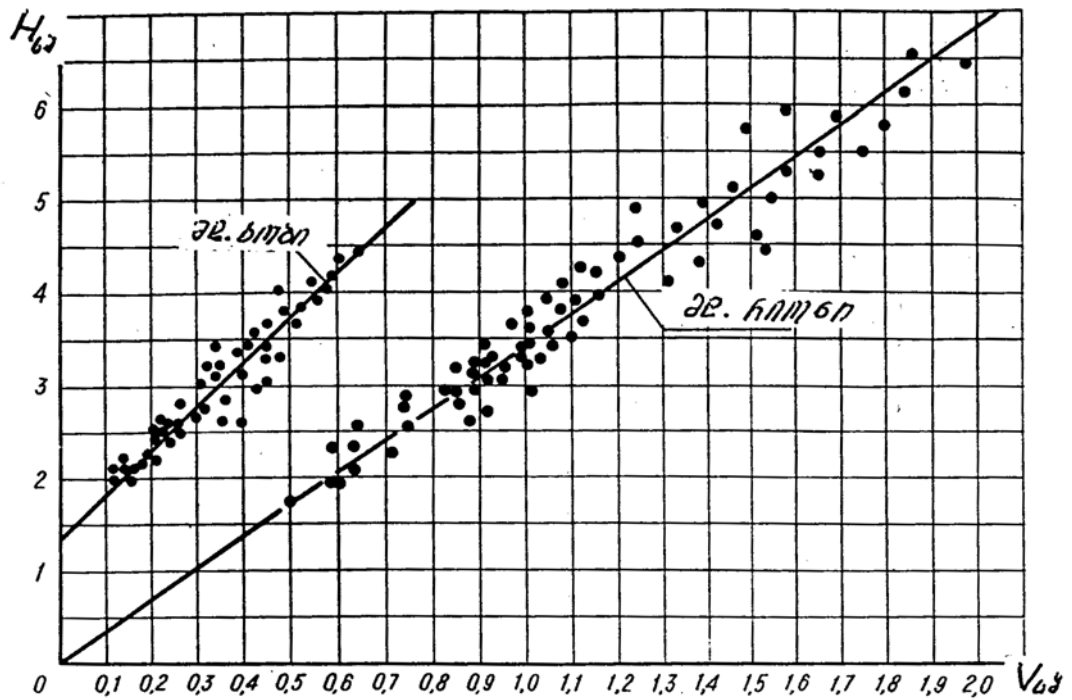
იწყება მისი მდგრადობის (გეგმაში) რღვევა, განისაზღვრება პირობით:

$$\frac{B}{H} \sqrt{\lambda F_z} \leq 0,45. \quad (2.3.2)$$



ნახ. 2.3.8. კოლხეთის მდინარეების საშუალო და მაქსიმალურ სიჩქარეთა დამოკიდებულების გრაფიკი

2.3.3 ცხრილში მოტანილი გვაქვს აღნიშნული მახასიათებლების გასაშუალებელი მნიშვნელობები, რაც მიუთითებს, რომ კალაპოტის მაფორმირებელი ხარჯების გადიდებასთან ერთად იზრდება მეანდრის პარამეტრები, რომლებიც შეიძლება შეფასებული იყოს შემდეგი დამოკიდებულებებით:  $R = (3 \div 5)B$ ;  $L = (10 \div 18)B$ ;  $L = (7 \div 14)B$ .



ნახ. 2.3.9. კოლხეთის მდინარეთა საშუალო სიღრმესა და სიჩქარეებს შორის დამოკიდებულების გრაფიკი

ცხრილი 2.3.3

№	მდინარე	წყალდიდობის საშუალო ხარჯი $Q$ მ <sup>3</sup> /წმ	კალაპოტის საშუალო სიგანე, $B$ მ	მოხვეულობის რადიუსი $R$ , მ	მეანდრირების ზონის სიგანე $D$ მ	მეანდრის ბიჯი, $L$ მ
1.	რიონი	1200	151	753	2000	2800
2.	ხობი	465	62	354	855	1100
3.	ტეხურა	403	54	273	450	955
4.	აბაშა	207	36	112	420	625
5.	ცივი	119	32	96	225	320

### თავი 3. წყალდენების კაპოტების დეფორმაციებისაგან დამცავი ეკოლოგიურად უსაფრთხო ენერგო და რესურსმზოგი ღონისძიებები

#### 3.1 კალაპოტური პროცესების მარეგულირებელი ნაგებობების კონსტრუირების პრინციპები

თანამედროვე მელიორაციის ერთ-ერთ ძირითად აქტუალურ საკითხად რჩება წყლისმიერი ეროზიის მოვლენების გავლენის შესწავლა გარემომცველ სამყაროზე, წყლის აქტიური ზემოქმედების კანონზომიერების ანალიზი და ამ მოქმედების შედეგად გამოწვეული პროცესების რეგულირება. პრობლემა მოიცავს არა მარტო ცალკეული გეოგრაფიულ რეგიონებს, არამედ გლობალურ ხასიათს ატარებს და ჩვენი პლანეტის მეტად მნიშვნელოვან პრობლემას შეეხება.

საერთაშორისო მონაცემებით, მდინარეების კალაპოტების გამორეცხვა და ნგრევა, რომელიც თან ერთვის წყალდიდობებს, წყალმოვარდნებს და გეომორფოლოგიური პროცესების გართულებებს, ყველაზე გავრცელებულია იმ სტიქიურ მოვლენებს შორის (მიწისძვრები, ტროპიკული ციკლონები, გვალვები, ხანძრები და სხვ.), რომლებსაც კაცობრიობისათვის უდიდესი მსხვერპლი, ეკონომიკური და სოციალური ზარალი მოაქვს. ნებისმიერი მდინარე მუდმივ ზემოქმედებას ახდენს თავის კალაპოტზე, იწვევს მის დეფორმაციას. სხვადასხვა ფიზიკურ-ქიმიური მექანიკური შემადგენლობის ქანებისაგან შექმნილი მდინარის კალაპოტი და წყლის ნაკადი საუკუნეების განმავლობაში ურთიერთზემოქმედებს. თუ ამ ორ ძირითად ფაქტორს დაემატება მესამე – გარემომცველი ბუნების კლიმატური (XX საუკუნის მეორე ნახევრიდან და XXI საუკუნის დასაწყისში გლობალურ დათბობასთან დაკავშირებით მკვეთრად დაჩქარდა კლიმატური ცვლილებები დედამიწის სხვადასხვა განედში) და სხვა ჰიდრომეტეოროლოგიური ფაქტორები, რის ფონზეც მიმდინარეობს აღნიშნული პროცესები, ადვილი ასახსნელია წყლის ნაკადის მიერ ჩატარებული ის უზარმაზარი მუშაობა, რომელიც მდინარის კალაპოტის ფორმირებაზეა გაწეული.

მდინარეების ნაპირების დაცვის საკითხი კალაპოტური პროცესების რეგუ-

ლირების გზით ერთ-ერთი ძირითადი მიმართულებაა უკანასკნელი ათწლეულის განმავლობაში. მეცნიერებისა და ტექნიკის სწრაფი ზრდის შედეგად შეიქმნა პროგრესული მეთოდები და რეკომენდაციები ჰიდროტექნიკური ნაგებობების დაპროექტებისა და მშენებლობის შემდგომი სრულყოფისათვის.

პრაქტიკამ გვიჩვენა, რომ წყალსაცავების საშუალებით მდინარეთა ჩამონადენის რეგულირება ყოველთვის არ წარმოადგენს საკითხის ერთადერთ ოპტიმალურ გადაწყვეტას და დღემდე წყალდიდობასთან ბრძოლის ძველ ეფექტურ ღონისძიებად რჩება მდინარეების ნაპირების გასწვრივ ნაპირდამცავი ნაგებობების მოწყობა. ამჟამად არსებული მათემატიკური მეთოდები შესაძლებლობას იძლევა ოპტიმიზაციის ამოცანისა და დინამიკური პროგრამირების გამოყენებით განვავითაროთ და გავაუმჯობესოთ წყალდიდობის საწინააღმდეგო დამბების დაპროექტების საკითხები (ტრასირება, დამბებს შორის მანძილები, სიმაღლე და გვერდების დაფერდება), მდინარის კალაპოტში მიმდინარე რთული პროცესები არ იძლევა საშუალებას ანალოგიური მიდგომა განვახორციელოთ მათი ნაპირების გამაგრების მათემატიკური მოდელის შედგენაში და ამ მიმართულებით ძიება გრძელდება. უკანასკნელი 20 წლის განმავლობაში უცხოელმა და ქართველმა ინჟინრებმა და მეცნიერებმა (ამერიკა, ბელგია, გერმანია, იაპონია, ინგლისი, რუსეთი, საფრანგეთი) შემოგვთავაზეს 250-ზე მეტი მეთოდი და რეკომენდაცია მდინარეებისა თუ არხების გამრეცხი ნაპირების სტაბილურობის შენარჩუნების მიზნით.

ბოლო წლებში ჩატარებული საველე დაკვირვებები [9, 15, 16, 19, 20, 90, 91, 94, 95, 102] ადასტურებს, რომ კალაპოტში მიმდინარე პროცესები ინტესიურ ხასიათს ღებულობს, რაც გამოწვეულია მათი მრავალსაუკუნოვანი რეჟიმის დარღვევით და ბუნებაში მიმდინარე გლობალური პროცესებით. ბოლო ათწლეულში გახშირებული წვიმებისა და სხვადასხვა დანიშნულებით მდინარეების აქტიური ათვისების შედეგად დაირღვა მათი ჰიდროლოგიური და ჰიდრაულიკური რეჟიმი, ფსკერული და შეტივნარებული ნატანის ტრანსპორტირების უნარი, რამაც გამოიწვია ჰიდროტექნიკური ნაგებობების, დამბების, ხიდების, ნაპირდამცავი ნაგებობების საძირკვლის და ნაპირების

ინტენსიური გამორეცხვა. გაიზარდა წყალდიდობების შედეგად დატბორილი ფართობები. ზემოთ ჩამოთვლილმა პრობლემებმა შექმნა აუცილებლობა, განხორციელდეს წყალდიდობების საწინააღმდეგო დიდმასშტაბიან ღონისძიებათა კომპლექსი. უკანასკნელ დროს დაპროექტდა და აშენდა სხვადასხვა ტიპის (აქტიური და პასიური) ნაპირდამცავი ნაგებობები.

პირველი მეთოდით ნაპირების გამაგრება მოიცავს ასაწყობი რკინაბეტონის კონსტრუქციების ქვაყრილის დეზების, გაბიონის წყობის, ბეტონისა და ბუტობეტონის კუბიკების გამოყენებას. აღნიშნული ნაგებობები აშენებულია საქართველოს მდინარეებზე: რიონზე, მტკვარზე, ენგურზე, ცხენისწყალზე, კოდორზე, ჭოროხზე და სხვ.

მეორე მეთოდით ნაპირების დაცვა ხორციელდება სხვადასხვა ტიპის სარტყლების მოწყობით ხიმინჯოვანი რიგებისაგან, მძიმე ფაშინებისაგან, ნაყარი ქვისაგან, ბეტონის და რკინაბეტონის ფილებისაგან და ა.შ. სხვადასხვა დროს აღნიშნული კონსტრუქციები აშენდა მდინარეებზე: მტკვარზე, რიონზე, ჭოროხზე, სუფსაზე და აღმოსავლეთ საქართველოს თითქმის ყველა მშრალ ხეზე.

ნაპირდამცავი ნაგებობების ექსპლუატაციის მრავალწლიანმა დაკვირვებებმა გვიჩვენა მათი არადამაკმაყოფილებელი მუშაობა. ადვილად რეცხვად გრუნტებში მძიმე ტიპის (ბეტონი, რკინაბეტონი) მონოლითური კონსტრუქციები ხასიათდება დაბალი დეფორმაციულობით, რის გამოც ირღვევა მათი მდგრადობა, ფერდებიდან ჩამოცურების შედეგად შიშვლდება დასაცავი ნაპირი, იხერგება მდინარის კალაპოტი, მახინჯდება ლანდშაფტი. ასეთ შემთხვევებში მუშაობის გაცილებით მაღალი ეფექტი მოგვცა ადგილობრივი მასალებისაგან აშენებული ნაგებობების გამოყენებამ (გაბიონების წყობა, მათი საფარი, ქვა-ფიჩხის ნაკადმიმმართველი დეზები და სხვ.).

ყველა სახის მდინარეზე მათი ნორმალური ფუნქციონირებისათვის აუცილებელ პირობას წარმოადგენს კალაპოტების წმენდა-გასუფთავების პროფილაქტიკური ღონისძიებების ჩატარება, ძირითადი კალაპოტის სტაბილურობა და ნაკადის დინამიკური ღერძის წარმართვა სასურველი მიმართულებით. კალაპოტის ჰიდრომორფომეტრული და ჰიდრაულიკური პარამეტრების და კალა-

პოტური პროცესების რეგულირების მიზნით შემუშავებულ იქნა საქართველოს მდინარეთა ჰიდროტექნიკური კლასიფიკაცია მათი ცალკეული მახასიათებელი უბნების და გარემოსდაცვითი ღონისძიებების მიხედვით (ცხრ. 4.3.1). კლასიფიკაციის შედგენის დროს გამოყენებულ იქნა ტიპური უბნები, სადაც აღწერილია კალაპოტში მიმდინარე პროცესები მის ცალკეულ მონაკვეთებზე. მდინარის ჰიდრაულიკური პარამეტრები, განსაზღვრულია გრძივი ქანობით, საშუალო სიღრმის შეფარდებით ნატანის დიამეტრთან  $h/d$ ,  $C$  კოეფიციენტით, ნაკადის კინემატიკური მახასიათებლით ( $A$ ), ფრუდის რიცხვით ( $Fr$ ) მდინარეების კალაპოტების მიმდებარე ტერიტორიების ათვისებით, წყალდიდობებით გამოწვეული გართულებების და გარემოსდაცვითი ღონისძიებების ჩვენებით. თითქმის ყველა სახის ნაპირდამცავი ნაგებობის მოწყობა ძვირადღირებული ღონისძიებაა. ხასიათდება დიდი ხარჯთაღრიცხვით და დიდი შრომატევადობით, რთულია მათი მშენებლობის ტექნოლოგია. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ნებისმიერი სახის მელიორაციული მშენებლობა, მათი მასშტაბების მიუხედავად, გარკვეულ გავლენას ახდენს გარემომცველი ბუნების ეკოსისტემაზე. ეს პრობლემა უშუალოდ უკავშირდება წყალდენების ბუნებრივი თუ ხელოვნური კალაპოტების ფორმირების საკითხებს, რადგანაც დიდია იმ სამშენებლო მასალების თვისებების ფიზიკური, მექანიკური და სხვა მახასიათებლების გავლენა გარემოზე, რომლის ბაზაზე ხორციელდება წყალდენების კალაპოტების რეგულირება. განსაკუთრებულ ზედამხედველობას მოითხოვს ისეთი ტრადიციული სამშენებლო მასალები, როგორცაა: ცემენტი, ასფალტი, კირი, ცემენტის აქტიური დანამატები და სხვ.

უკანასკნელ პერიოდში ტრადიციული სამშენებლო მასალების გვერდით ადგილს იკავებს არატრადიციული, ახალი ტიპის ხელოვნური, სინთეტიკური თუ პლასტიკური სახის მასალები, რომელთა გავლენა გარემოზე ნაკლებადაა შესწავლილი. არანაკლები მნიშვნელობა ენიჭება დამცველი ნაგებობის ფორმას, მის მასიურობას და განლაგებას დასაცავი ობიექტის ზედაპირზე (კაშხლების და დამბების ფერდობები, მდინარეების ნაპირები და ფსკერი, წყალსაცავების ნაპირები, ირიგაციული და ენერგეტიკული არხების ფერდობები, ფსკერი და სხვ.).



მასიური ტიპის დამცველი ნაგებობები, ნებისმიერი ფორმის და ნებისმიერი მასალისაგან (ბეტონის და რკინაბეტონის ფილები, ნაყარი ქვა და ქვის გაბიონები, ასფალტბეტონი და სხვ.) რომლებიც ერთიანად ფარავს დასაცავი ობიექტის ზედაპირს მის ბუნებრივ მდგომარეობაში, გამანადგურებლად მოქმედებს ბიოლოგიურ გარემოზე, წყალმცენარეების ფოტოსინთეზის პროცესებზე და იხტიოფაუნის გამრავლებაზე. ხშირად მდინარეების კალაპოტებში მიმდინარეობს ინერტული მასალების მოპოვება ყოველგვარი ნორმებისა და კანონზომიერების დაცვის გარეშე.

კარიერების მოწყობა მდინარის კალაპოტში იწვევს უსწორმასწორო ტრანშეების, ორმოების გაჩენას, კალაპოტის ეროზიის ბაზისის დაწევას ბუნებრივთან შედარებით და სხვა კალაპოტური პროცესების გააქტიურებას. ქვაბულების ზედა ზონაში ვითარდება ნაპირების რეგრესული გამორეცხვები, ხოლო ქვედა ზონაში – ადგილობრივი ხასიათის დეფორმაციები, რაც, თავისთავად, გამორეცხვის საფრხეს უქმნის ხიდებს, ნაპირდამცავ ნაგებობებს და სხვა სახის ჰიდროტექნიკურ კვანძებს. განვითარებული პროცესები უარყოფითად მოქმედებს ლანდშაფტზე, ნადგურდება ფლორა და ფაუნა, არსებული ბუნებრივი რეკრაციული პოტენციალი.

საქართველოს მდინარეების ჰიდროტექნიკური კლასიფიკაცია კალაპოტების მახასიათებლების და გარემოსდამცავი ღონისძიებების მიხედვით

№	მდინარეების უბნები	მდინარეების დახასიათება	კალაპოტებში მიმდინარე პროცესების ძირითადი სახეები, ნატანის მოძრაობის ფორმები	კალაპოტის ჰიდრაულიკური და მდგრადობის მახასიათებლები						მდინარეების კალაპოტების მიმდებარე ტერიტორიების ათვისება	წყალდიდობებით გამოწვეული გართულებები და გარემოს დაცვითი ღონისძიებები
				5	6	7	8	9	10		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.	მაღალმთიანი	ხდება მდინარის ჩასახვა, ნაკადის ფორმირება, რომლისთვის დამახასიათებელია ზემოაღმართული და მძაფრი დინებები, რომლებიც შესაძლებელია ატარებდეს ღვარცოფულ ხასიათსაც. მდინარეს გააჩნია ჩანჩქერები და წყალგარდნილები.	კალაპოტის ფორმა სამკუთხედი, გვერდები და ფსკერი კლდოვანი, შეზღუდული, რაც ხელს უწყობს დრმა კანიონის წარმოქმნას. კალაპოტის ფსკერს გააჩნია დიდი ქანობი, ჩახერგილია დიდი გაბარიტის კლდოვანი ლოდებით. ნაკადს მოაქვს დიდი ზომის ნატანი, მათი მოძრაობის ფორმა ძირითადად არის უსტრუქტურო თუმცა სელური მოვლენების დროს შეიძლება გააჩნდეს გარკვეული სტრუქტურა. კალაპოტში ვითარდება ვერტიკალური ეროზიული პროცესები, კალაპოტის მთელ სიგრძეზე.	0,01	1	10	1÷12	0,5	0,75	აღნიშნული უბნები წარმოადგენს ვიწრო ხეობებს, ნაკლებად ათვისებულს, თუ არ გამოიყენებოდა მხედველობაში საავტომობილო გზების ტრასებსა და ხეობის ფერდობებს, რომელიც გამოყენებულია საძოვრებად, ვიწრო კანიონი იძლევა საშუალებას მდინარის ენერგეტიკული ათვისებისთვის, კაშხლებისათვის და წყალმიმღები ნაგებობების მშენებლობისათვის	ინტენსიური წვიმებისა და თოვლის დნობის შედეგად მოსალოდნელია ღვარცოფების წარმოქმნა, ფერდობებზე ეროზიული პროცესების და გზის სავალი ნაწილის ჩამორეცხვა, საჭიროა ეროზიის საწინააღმდეგო კომპლექსური ღონისძიებების გატარება, რათა შემცირდეს ჩახერგვის სიდიდე და წყალმიმღები ნაგებობების და ვერტიკალური ეროზიის ინტენსივობა, დასტაბილდეს კალაპოტის ფსკერი განივი სახის სხვადასხვა ტიპის ნაგებობების გამოყენებით.

ცხრილი 4.3.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2.	მთავარი	მდინარის ნაკადი იღებს ჩამოყალიბებულ ფორმას, მას გააჩნია შენაკადები უფრო დიდი ქანობებით, ვიდრე ძირითადად ნაკადს, რაც ქმნის ყველა პირობას დვარცოფული ნაკადების წარმოშობისათვის. ძირითადი ნაკადის სიჩქარე მდინარეს გააჩნია წყალვარდნილები.	კალაპოტი არის კლდოვანი, განსაკუთრებით ფსკერი, ჩახერგილია კლდის ნამტრევეებით, კანიონი არის უფრო გაშლილი ფერდობების დენუდაციის შედეგად. კალაპოტის ფორმები ძირითადად ოთხკუთხედი ან ნახევრად ელიფსურია, შენაკადებს კალაპოტში შემოაქვს დიდი რაოდენობით ეროზირებული მასალა. იქმნება გამონატანის კონუსი უფრო მაღალ ნიშნულებში, რაც იწვევს ძირითადი კალაპოტის ჩახერგვას და ნაკადის გადაგდებას მოპირდაპირე ნაპირისაკენ. ნაკადს მოაქვს მსხვილი და კენჭოვანი საშუალო ზომის ნატანი, მათი მოძრაობის ფორმა ძირითადად უსტრუქტუროა, თუმცა სელური მოვლენების განვითარების შედეგად შეიძლება გააჩნდეს სტრუქტურა. კალაპოტში ვითარდება ვერტიკალური ეროზიული პროცესები მთელ სიგრძეზე.	0,01±0,02	1±3	10±20	1,2±0,8	0,5	0,9	აღნიშნული უბნები წარმოადგენს შედარებით გაშლილ ხეობებს, რაც მდინარის მიმდებარე ტერიტორიების სხვადასხვა დანიშნულებით ათვისების საშუალებას იძლევა. გვხვდება დასახლებული პუნქტები, სასოფლო-სამეურნეო დანიშნულების ობიექტები, ფერმები, საძოვრები, საქარგულები, აქაც კანონი იძლევა მდინარის ენერგეტიკული ათვისების, კაშხლების და წყალმიმღები ნაგებობების მშენებლობის საშუალებას.	ინტენსიური წვიმებისა და თოვლის დნობის შედეგად მოსალოდნელია დვარცოფების წარმოქმნა, განსაკუთრებით მდინარის შენაკადებში, რომლებიც დიდი ქანობის შედეგად და ეროზიული მასალის დიდი შემცველობით ხასიათდება და შეუძლია ჩაკეტოს ძირითადი კალაპოტი, რაც იწვევს გზების, მიმდებარე ტერიტორიების დატბორვას, წალეკვას, ნაპირების ჩამონგრევას. აუცილებელი ხდება მდინარის კალაპოტის გაწმენდა ფერდობებიდან ჩამოტანილი ნაშალი მასალისაგან, სელური გამონატანისაგან, საჭირო ხდება მდინარის ნაპირების გამაგრება, ფსკერის ბარაჟირება და ა. შ.

ცხრილი 4.3.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3.	მთის წინა უბანი	მდინარე გამოდის ვიწრო ხეობიდან გაშლილზე, მისი ქანობი საგრძნობლად მცირდება, რაც იწვევს ნაკადის სიჩქარის გადასვლას შედარებით წყნარ მდგომარეობაში და მისი ტრანსპორტირების უნარის შემცირებას.	მდინარის კალაპოტში შეიმჩნევა ალუვიური დანალექები, რიყის ქვები, ხრეში, როგორც კალაპოტის სიგანეზე ასევე მის სიგრძეზე. დარღვეულია კალაპოტის დინამიკური წონასწორობის პირობა, შეიმჩნევა ნაკადის განტოტვა და ხეტიანი, როგორც კალაპოტის სიგანეზე ასევე სიგრძეზე ჭაღის არსებობის პირობებში. ნატანის მოძრაობის ფორმა გარდამავალი კვაღის მსგავსია. კალაპოტში ძირითადად ვითარდება ჰორიზონტალური ეროზიული პროცესები, ნაპირების გამორეცხვა, ხოლო ვერტიკალური კი უფრო ადგილობრივი ხასიათს ატარებს სხვადასხვა ნაგებობებთან (ნაპირდამცავი, ხიდის ბურჯები, ქვედა ბიუფი და ა.შ.).	0.02-0.002	3÷30	20÷25	0.8÷0.4	0.9	1.0	მდინარის კალაპოტს გააჩნია გაშლილი ჭაღა, ნაყოფიერი მიწებით, რომელიც მაქსიმალურად არის ათვისებული სასოფლო-სამეურნეო სავარგულებით. ამ ზონაში განლაგებულია დასახლებული პუნქტები, სხვადასხვა დანიშნულების ობიექტები, წყალმომარაგების და კანალიზაციის ქსელები, საკომუნიკაციო საშუალებები, რკინიგზის და საავტომობილო გზები, სასმელ-სამეურნეო დანიშნულების წყალმიმღები სათავე ნაგებობები და ა.შ.	კატასტროფული წყალდიდობების შემთხვევაში აღნიშნული ტერიტორია მთლიანად ექცევა წყლის მაგნე ზემოქმედების ზონაში: დატბორვა, დაჭაობება, გაბინძურება სხვადასხვა სახის ნარჩენებით, ნაპირების წარეცხვა, სხვადასხვა სახის ნაგებობების დანგრევა, საძირკვლის გამორეცხვა. აუცილებელია დარეგულირებული კალაპოტის მოწყობა, ნაპირების გამაგრება, როგორც გრძივი ისე განივი ტიპის ნაგებობებით, დეზებით, და ა.შ.

ცხრილი 4.3.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3.	საშუალო (დაბლობი) უბნები	მდინარე ძირითადად მოედინება გაშლილი ველის პირობებში, მისი ქანობი დამყარებულია, ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე - დაწყნარებული.	მდინარის კალაპოტი მის ალუვიურ ჩამონატანში გადის, რომელიც ძირითადად შედგება საშუალო და წვრილი ქვიშისაგან, კალაპოტი დატოტვილია, ჩნდება ეგრეთწოდებული ნატანის ძარღვული დინება, მისი დაგროვება განსაზღვრულ უბნებზე და ფსკერის დეფორმაცია სხვა უბნებზე შეიმჩნევა მეანდრების წარმოშობა. კალაპოტი ძირითადად განიცდის ჰორიზონტალურ ეროზიულ პროცესებს, ვერტიკალური კი ძირითადად ადგილობრივი ხასიათისაა.	0.002÷0.001	30÷250	35÷45	0.4÷0.2	1.0	1.1	მდინარის მიმდებარე ტერიტორიები მთლიანად არის ათვისებული სასოფლო-სამეურნეო სავარგულებით, მჭიდროდ არის დასახლებული, განლაგებულია სხვადასხვა დანიშნულების ობიექტები, საკომუნიკაციო საშუალებები, რკინიგზა და საავტომობილო გზები, წყალმომარაგების და საკანალიზაციო ქსელები შესაბამისი წყალმიმღები სათავე ნაგებობები და სხვ.	კატასტროფული წყალდიდობის შემთხვევაში მეორდება იგივე ნეგატიური მოვლენები, რაც მთისწინა უბნებზე; უფრო მასშტაბური ხდება აღნიშნული მოვლენებით გამოწვეული შედეგები, დღის წესრიგში დგება მდინარის მიმდებარე ტერიტორიების მიწის დამბებით შემოზვინვა, რათა ტერიტორიები საიმედოდ იქნეს დაცული დატბორვა და წალეკვისაგან მელორირებული მიწები დაჭაობებისაგან, აუცილებელია კალაპოტის დარეგულირება, გასწორება და საკანალიზაციო ხაზოვნება, საჭირო ხდება გრძივი და განივი ნაგებობების ჩართვა და მდგრადი კალაპოტის პარამეტრების შენარჩუნება. გარკვეულ ტერიტორიაზე შესაძლებელია მოეწოს საკოლმტაციო უბნები.

ცხრილი 4.3.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4.	ქვედა დინების უბნები	მდინარე ძირითადად მოძრაობს დაბლობის (ვაკის) პირობებში, ქანობი საგრძნობლად არის შემცირებული, სინქარე მდორე.	მდინარის კალაპოტი ჩამოყალიბებულია მთლიანად მის ალუვიურ დანალექებში, წვრილ ქვიშაში. კალაპოტს გააჩნია თავისუფალი მეანდრირების საშუალება, გეგმაში კლაკნილობა, კალაპოტი შედგება სწორი და მრუდე უბნებისაგან შესაბამისი ჩაღრმავებული და თხელწყლიანი ადგილებით. კალაპოტი ძირითადად განიცდის ჰორიზონტალურ ეროზიულ პროცესებს ნაპირების გამორეცხვით, ხოლო ვერტიკალური დეფორმაციებს გააჩნია ადგილობრივი ხასიათი სხვადასხვა ტიპის ნაგებობებთან.	0.001 და ნაკლები	250÷1000	45÷60	0.2÷0.04	1.15	1.45	მდინარის მიმდებარე ტერიტორიები მთლიანად არის ათვისებული სასოფლო-სამეურნეო სავარგულებით, მჭიდროდ არის დასახლებული, განლაგებულია სხვადასხვა დანიშნულების ობიექტები, საკომუნიკაციო საშუალებები და სავლეთ საქართველოს დიდი მდინარეების ზღვასთან მიერთების ადგილას განთავსებულია ქალაქები და ნავსადგურები.	წყალდიდობების პერიოდში ყველა აღნიშნულ ობიექტებს ემუქრება დატბორვა, საკომუნიკაციო საშუალებების მოშლა, წყლის მაღალი დონეების გამო ირღვევა საკანალიზაციო და ნიაღვარგამყვანი კოლექტორების ნორმალური ფუნქციონირება, გარემოს დაცვის ღონისძიებები ითვალისწინებენ დამბების მოწყობას, კალაპოტების დარეგულირებას, გასწორხაზონებას, მდგრადი პარამეტრების შენარჩუნებას გრძივი და განივი ნაგებობების საშუალებებით. გარკვეული ყურადღება უნდა დაეთმოს როგორც ხელოვნური, ასევე ბუნებრივი საკოლმატაციო უბნების მოწყობას, რომლებმაც შეიძლება ამავე დროს მოახდინონ ზედმეტი ჭარბი წყლისაგან ძირითადი კალაპოტის განტვირთვა. დაბალი ნიშნულების მქონე ტერიტორიებზე ხშირ შემთხვევაში აუცილებელი ხდება სატუმბო სადგურების მოწყობა.

მდინარეებისათვის, რომელთა კალაპოტების ფორმირების პროცესში დიდი როლი ეკუთვნის ფსკერული ნატანის არსებობას, მარეგულირებელი ნაგებობების დაპროექტების საფუძვლები უნდა ითვალისწინებდეს ნაკადის ფსკერული დინებების განსაკუთრებულობას. თანახმად ჰიდროდინამიკის კანონებისა, ნაგებობებზე გარშემოდინების კონტური ძირითადად დამოკიდებულია მის ფორმაზე და ორიენტირებაზე ნაკადის მიმართ, კალაპოტის შევიწროების (შეზღუდვის) ხარისხზე და სხვ. თავისთავად, ნაპირდამცავი და მარეგულირებელი ნაგებობების ოპტიმალური ვარიანტები მოითხოვს მათი ცალკეული ელემენტების სწორ კონსტრუქციულ გადაწყვეტას. თანამედროვე ნაპირდამცავი ნაგებობების კონსტრუქციები, მათი ფორმები და ელემენტები მრავალფეროვანია. ჰიდროტექნიკური მშენებლობის მასშტაბმა, დედამიწაზე დეფიციტური სამშენებლო მასალების მარაგის და ენერგეტიკული რესურსების კატასტროფულმა კლებამ დღის წესრიგში დააყენა არსებული ტრადიციული მიდგომების სრულყოფა თანამედროვე მოთხოვნების გათვალისწინებით, რაც საშუალებას იძლევა გადაწყდეს ენერგო და მასალატევადობის საკითხები, მუშაობის საიმედოობა, მშენებლობის და ექსპლუატაციის სიმარტივე, გარემოს დაცვის მოთხოვნების მაქსიმალურად დაკმაყოფილება. ამგვარად, დამცავი საინჟინრო მეთოდების შექმნის, დაპროექტების და მშენებლობის სტრატეგია და პრინციპები ითვალისწინებს ყველა დასმული პრობლემის კომპლექსურ გადაწყვეტას: დასაცავი ობიექტის (რეგიონის) ბუნებრივ-კლიმატურ, ლითოლოგიურ, ჰიდროლოგიურ, ჰიდრომორფომეტრულ-ჰიდრაულიკურ თუ სხვა ფაქტორების გათვალისწინებას.

მდინარის კალაპოტის და მისი ნაპირის გარეცხვის საწინააღმდეგო ჰიდროტექნიკური ნაგებობის შექმნის გამარტივებული ტექნოლოგიას წარმოადგენს ჩვენს მიერ დამუშავებული მეთოდები: “წყალქვეშა დახრილობის დამცავი საფარის ამოყვანის მეთოდი” (ს.მ. №1446213, 22.08.1988) და “წყალქვეშა ფერდობების გასამაგრებლად ვაკისების დაწყობის მეთოდი და მისი განხორციელებისათვის საჭირო მოწყობილობა” (ს.მ. №1416597, 15.04.1988) [86, 87].

ზემოაღნიშნული პრინციპებიდან გამომდინარე, ჩვენს მიერ დამუშავებულ იქნა მდ. რიონზე არსებული, ფოთის რეგიონისათვის ეკონომიკურად და

ტექნიკურად მეტად მნიშვნელოვანი ობიექტის, ჰიდროკვანძის დეფორმირებული რისბერმის გამაგრების რამდენიმე ვარიანტი [80, 81, 82, 83, 84, 85], რომელთაგან ზოგიერთს ქვემოთ წარმოგიდგინთ (ნახ. 3.1.1, 3.1.2).

**გამაგრება ბეტონით შევსებული ამორტიზირებული საბურავებით**

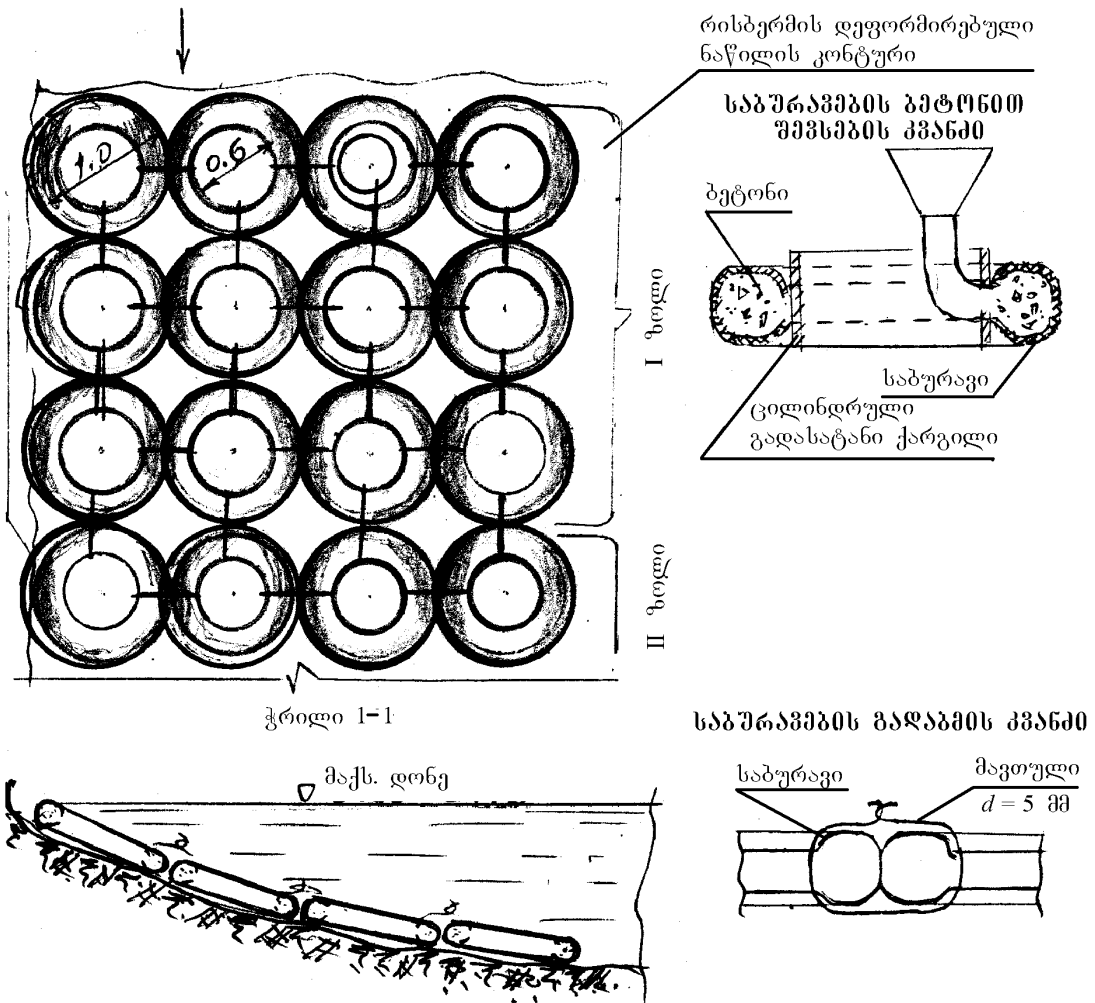
*ა) გამაგრება რისბერმის დეფორმირებულ ნაწილში*

ქვედა ბიეფში რისბერმის გარეცხილი ნაწილები იფარება ერთმანეთზე გადაბმული ამორტიზირებული საბურავებით, რომლებიც წინასწარ ივსება ბეტონით (ნახ. 3.1.1). ბეტონის მოცულობა ერთ საბურავში – 0.08 მ<sup>3</sup>, საბურავის წონა – 50 კგ, საბურავის წონა ბეტონით – 230 კგ. საბურავების საერთო რაოდენობა – 2750 ცალი, ბეტონის მოცულობა – 220 მ<sup>3</sup>.

*ბ) გამაგრება რისბერმის მთელ ფართობზე*

გასამაგრებელი ფართი 7600 მ<sup>2</sup>. საჭირო საბურავების რაოდენობა – 7600 ცალი, ბეტონის მოცულობა – 620 მ<sup>3</sup>.





ნახ. 3.1.1. ფსკერის გამაგრება ბეტონით შევსებული ამორტიზირებული საბურავებით

1. ერთ ზოლში საბურავების მაქსიმალური რაოდენობა – 3;
2. საბურავები ბეტონით წინასწარ შეივსება სამშენებლო მოედანზე;
3. საბურავების გადაბმა ხდება მცურავ პლატფორმაზე, საიდანაც ჩაეფინება ფსკერზე გამაგრება ამორტიზირებული საბურავებით და ქვის ნაყარით

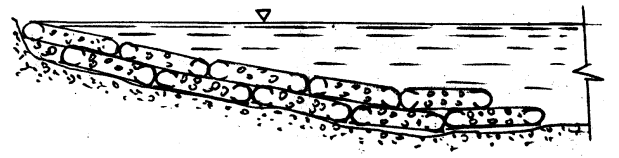
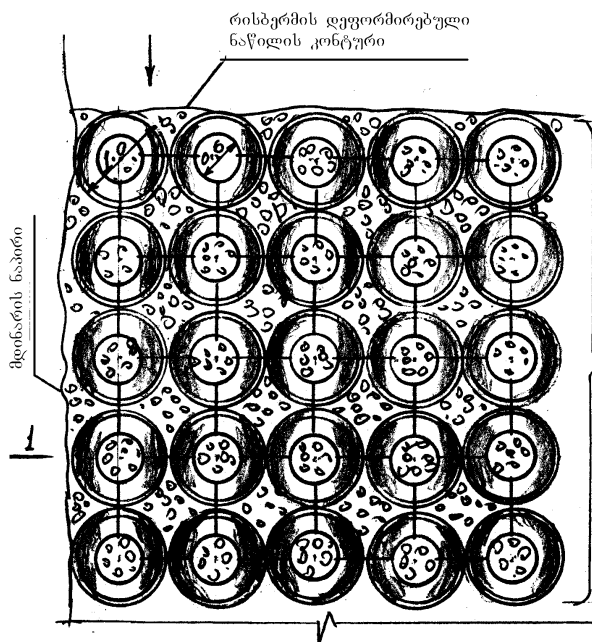
ა) გამაგრება რისბერმის დეფორმირებულ ნაწილში

ქვედა ბიეფში, რისბერმის დეფორმირებულ ნაწილში ლაგდება ერთმანეთზე გადაბმული ამორტიზირებული საბურავები. ერთი შრის დაფენის შემდეგ საბურავების და საბურავებს შორის არსებული სიცარიელები ივსება ნაყარი ქვით ( $d = 100$  მმ), შემდეგ ზემოდან კეთდება საბურავების მეორე ფენა და სიცარიელები კვლავ ივსება ნაყარი ქვით (ნახ. 3.1.2), საბურავების საერთო რაოდენობა შეადგენს 5500 ცალს, ნაყარი ქვის მოცულობა ორ შრეში – 550 მ<sup>3</sup>.

ბ) გამაგრება რისბერმის მთელ ფართობზე

გასამაგრებელი ფართი 7600 მ<sup>2</sup>. საჭირო საბურავების რაოდენობა – 15 200 ცალი,

ნაყარი ქვის მოცულობა – 1550 მ<sup>3</sup>.

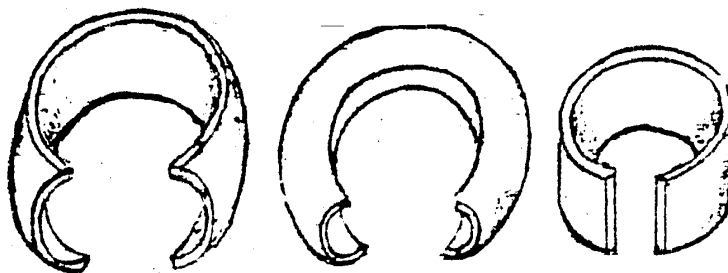


ჭრილი I-I

საბურავების მაქსიმალური რაოდენობა შეიძლება იყოს ხუთამდე. პირველი შრის დაგების შემდეგ საბურავებისა და მათ შორის დარჩენილი სივრცე ივსება ქვით ( $d > 100$  მმ). ამის შემდეგ იდება მეორე ფენა. მეორე ფენის დაგება იწყება ნაპირიდან. მეორე ფენის დამთავრების შემდეგ სივრცეები კვლავ ივსება ქვით.

1. ამორტიზირებული საბურავები იდება ორ ფენად. პირველი შრის დაგება იწყება რისბერმის მიმართულეებით. ერთ ზოლში

2. საბურავების გადაბმა ხდება მცურავ პლატფორმაზე, საიდანაც ხდება ფსკერზე ჩაშვება.



ნახ. 3.1.3. ტორისებრი ფორმის ღრუტანიანი ბლოკები

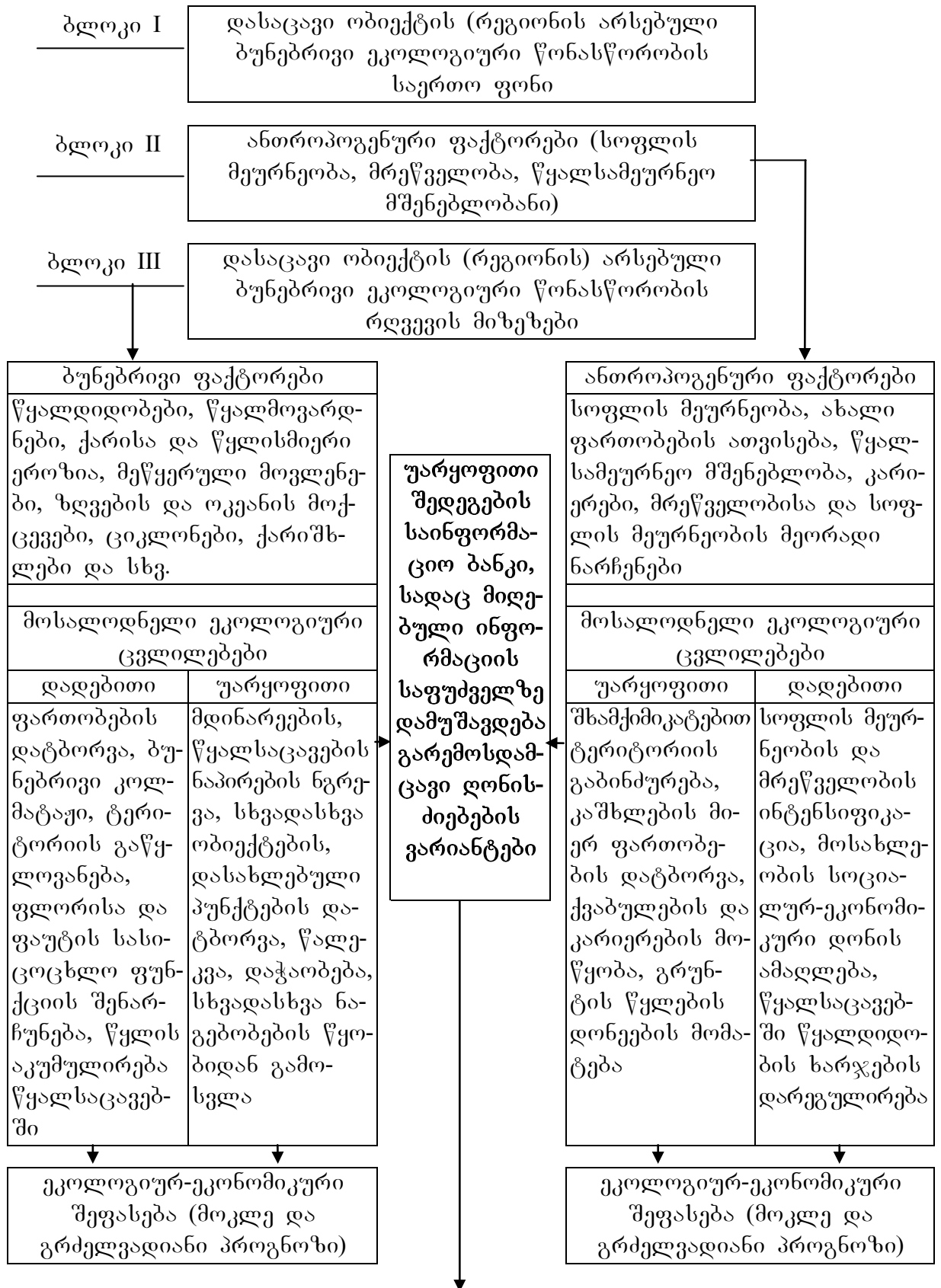
ნახ. 3.1.2. ფსკერის გამაგრება ამორტიზირებული საბურავებით და ქვის ნაყარით ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევებით დადასტურდა, რომ აღნიშნულ მოთხოვნებს

ძირითადად აკმაყოფილებს ცილინდრული ღრუტანიანი ბლოკები ტორისებრი ფორმით (ნახ. 3.1.3). წარმოდგენილი ფორმა ეკუთვნის გარსისებურ სისტემებს, ხასიათდება წყლის და აირის გარშემოდენის საუკეთესო თვისებებით. ასეთი ფორმა საშუალებას იძლევა, რომ კონსტრუქცია იყოს თხელკედლიანი, მიიღოს ნებისმიერი შინაგანი თუ გარეგანი დატვირთვა თანაბრად და უზრუნველყოს სტატიკური წონასწორობა. მისი ტანის გრუნტით შევსებით შესაძლებელია განხორციელდეს სხვადასხვა დანიშნულების დამცავი ნაგებობების მშენებლობა, მაგალითად: მაღალი სანაპირო კედლები, გადამკეტი ზღუდარები, კაშხლები და ნაპირების ფერდობების დამცავი პლასტიკური საფარი. ბლოკების ტანის გრუნტით შევსების შედეგად ხდება

ნაგებობის გადაქცევა გრუნტ-არმირებულ კონსტრუქციად, ხოლო დასაცავი ტერიტორიის ფართობზე იქმნება ხელსაყრელი პირობები გარემოს ბიოლოგიური პროცესების (ფოტოსინთეზის, მცენარეული საფარის, თევზის საკვები იხტიოფაუნის) სწრაფი განვითარებისა. შესაძლებელია, დასაცავ ფერდობზე დაითესოს, ან დაირგოს საჭირო მცენარეულობა და ეკონომიურად ვხარჯოთ ტრადიციული ან ახალი ტიპის სამშენებლო მასალები. დიდი მასშტაბით გამოიყენება მეორადი რესურსების ისეთი სახეობები, როგორცაა ამორტიზირებული რეზინის სალტები (საბურავები), რელსები, მეტალის ბაგირები, არაკონდიციური მეტალის და რკინაბეტონის მილები და სხვ [77, 79]. რეგიონში არსებული ეკოლოგიური წონასწორობის ფონზე, ბუნების სტიქიური თუ ანთროპოგენური ფაქტორების გავლენის გათვალისწინებით, გარემოსდამცავი ნაგებობების კონსტრუირების მოდელი წარმოდგენილია სქემით 3.1.1.

სქემა შედგება 3 ძირითადი ბლოკისაგან, რომელთაგან პირველში თავმოყრილია დასაცავი ობიექტის (რეგიონის) არსებული ბუნებრივ-ეკოლოგიური წონასწორობის ფონის შესახებ საერთო ინფორმაცია. მეორე ბლოკში ძირითადად თავმოყრილია ანთროპოგენური ფაქტორები (სოფლის მეურნეობის, მრეწველობის, წყალსამეურნეო მშენებლობის და სხვა მიმართულებები), რომლებიც გარკვეულ გავლენას ახდენს დასაცავი ობიექტის (რეგიონის) არსებულ ბუნებრივ ეკოლოგიურ წონასწორობაზე. მესამე ბლოკში ობიექტის (რეგიონის) არსებული ბუნებრივ-ეკოლოგიური წონასწორობის ფონის რღვევის ბუნებრივი მიზეზები და მათი კერები (მდინარეები, ტბები, წყალსაცავები, ზღვები, ხევები, ატმოსფერული ნალექები და სხვ.). ძირითად ბლოკებში აღნიშნული ინფორმაციების თავმოყრის შემდეგ ხდება მათი ბლოკ-სექციებში გადანაწილება.

გარემოს დამცავი ნაგებობებისა და ღონისძიებების შერჩევის სქემა ეკოლოგიურ მოთხოვნათა გათვალისწინებით



დამბები	წყალსაცავები	ნაპირგამაგრება	კომბინირებული
მოსალოდნელი ეკოლოგიური ცვლილებები			

დადებითი	უარყოფითი
----------	-----------

მიწის დამბები	ფერდების გამაგრების გარეშე
<ol style="list-style-type: none"> <li>ტერიტორიების, დასახლებული პუნქტების, სამრეწველო ობიექტების ლოკალური დაცვა დატბორვა-წალექებისაგან.</li> <li>დამბის ფერდებზე მცენარეების საფარის წარმოშობა.</li> <li>ღონისძიებების სიიაფე,</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ტერიტორიების გარკვეული ნაწილის გამოთიშვა მრავალწლიური რეჟიმისაგან, რაც უარყოფითად იმოქმედებს ფლორასა და ფაუნაზე.</li> <li>მიწის ზვინულის მოსაწყობად კარიერის საჭიროება.</li> <li>ფერდების დაუცველობა გამორეცხვისაგან.</li> <li>მოსალოდნელია დამბის გარღვევა.</li> </ol>
<p>დამბის ფერდის გამაგრება ტრადიციული რკინაბეტონის და სხვა კონსტრუქციებით</p>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>ტერიტორიის და მასზე განლაგებული ობიექტების ლოკალური დაცვა</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ტერიტორიების გარკვეული ნაწილის გამოთიშვა მრავალწლიური რეჟიმისაგან, რაც უარყოფითად იმოქმედებს ფლორასა და ფაუნაზე.</li> <li>კარიერის მოწყობა დამბისათვის</li> </ol>
<p>მდინარეებისა და წყალსაცავების ნაპირების გამაგრება ტრადიციული მეთოდით</p>	
	<ol style="list-style-type: none"> <li>უარყოფითი გავლენა გარემოს არსებულ ეკოსისტემაზე, ფლორა, ფაუნა, ძნელად შეგუება გარემოსთან</li> </ol>
<p>მდინარეებისა და წყალსაცავების ნაპირების გამაგრება შემოთავაზებული მეთოდით</p>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>დადებითი გავლენა არსებულ ეკოსისტემაზე, დეფორმატულობა, მშენებლობის და ექსპლუატაციის სიმარტივე, ხელსაყრელი პირობები ფლორისა და იხთიოფაუნის განვითარებისათვის.</li> <li>ხანმედევობა, ადვილად შერწყმა გარემოსთან. ძირითადად გამოყენებულია მეორადი რესურსები.</li> </ol>	

I სექციაში თავსდება ბუნებრივი ფაქტორების (წყალდიდობები, წყალმოვარდნები, წყლისა და ქარისმიერი ეროზიული პროცესები, მეწყრული მოვლენები, ზღვისა და ოკეანის მიმოქცევები, ქარიშხლები, ციკლონები და სხვ.) და ამ მოვლენებით გამოწვეული მოსალოდნელი ეკოლოგიური ცვლილებები, თავისი

დადებითი და უარყოფითი შედეგებით. I ბლოკ-სექცია მთავრდება მიღებული ინფორმაციების ეკოლოგიურ-ეკონომიკური შეფასებით, როგორც მოკლევადიანი, ასევე გრძელვადიანი პროგნოზირების გათვალისწინებით. II ბლოკ-სექციაში თავსდება ანთროპოგენური ფაქტორები და მათი გავლენით გამოწვეული მოსალოდნელი ეკოლოგიური ცვლილებები, მოცემულია მათი შეფასება დადებითი და უარყოფითი შედეგებით. II ბლოკ-სექცია მთავრდება მიღებული ინფორმაციის ეკოლოგიურ-ეკონომიკური შეფასებით, როგორც მოკლევადიანი, ასევე გრძელვადიანი პროგნოზით. I და II სექციებიდან მიღებული უარყოფითი ინფორმაციის აკუმულირება ხდება III ბლოკ-სექციაში ან ე.წ. უარყოფითი შედეგების საინფორმაციო ბანკში, სადაც მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე ხდება გარემოსდამცავი ღონისძიებების ვარიანტების განხილვა. III ბლოკ-სექციის ქვესექციებში დეტალურად არის განხილული ცალკეული გარემოსდამცავი ღონისძიებების, როგორც ტრადიციული, ისე არატრადიციულის, დადებითი და უარყოფითი მხარეები და გარემოს არსებულ ეკოლოგიურ წონასწორობაზე მათი ზეგავლენის დეტალური შეფასება, როგორც გრძელვადიანი, ისე მოკლევადიანი პროგნოზირების გათვალისწინებით. ტრადიციულ სამშენებლო მასალებთან და მეთოდებთან ერთად აქ ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ადგილი აქვს დათმობილი არატრადიციული მასალებისაგან (ძირითადად მეორადი რესურსების ბაზაზე) შექმნილ მეთოდებს, ნაგებობებს და კონსტრუქციებს და ინფორმაციას მათ შესახებ. გარჩეულია გარემოსდამცავ ღონისძიებათა ამჟამად პრაქტიკაში მიღებული ყველა ძირითადი სახეობა: დამბები, ნაპირსამაგრი ნაგებობები, წყალსაცავები და სხვა კომბინირებული მეთოდები. მოცემულია თითოეულის დადებითი და უარყოფითი გავლენა გარემო ბუნებაზე, როგორც გრძელვადიანი, ისე მოკლევადიანი პროგნოზირებით.

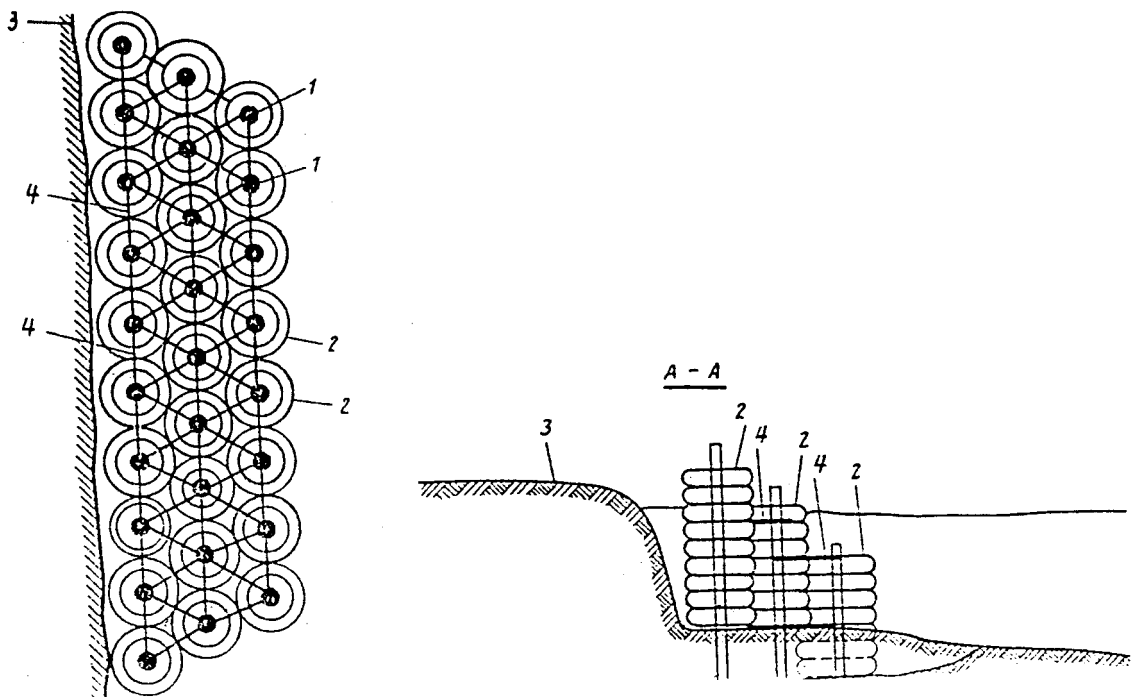
სანაპირო ზონების დამცავი ნაგებობები თავისი მუშაობის ხასიათით ურთულეს ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს წარმოადგენს და ერთდროულად შეიძლება რამდენიმე ფუნქციასაც ასრულებდეს (მდინარეთა ნაპირების დაცვა, ეროზიული და ტალღური ზემოქმედებისაგან დაცვა და სხვ.).

დანიშნულების შესაბამისად, აღნიშნული ნაგებობები ერთმანეთისაგან განსხვავდება კონსტრუქციული გადაწყვეტით.

ქვემოთ მოგვყავს ზოგიერთი მათგანის მოკლე აღწერა.

### 1. წყლის ეროზიული და ტალღური ზემოქმედებისაგან დამცავი ნაგებობა

ტალღური ზემოქმედებისაგან დამცავი ნაგებობა (ს.მ. №829762, ნახ. 3.2.1) შედგება ხიმინჯებისაგან (1), რომლებიც განლაგებულია ჭადრაკულად სანაპირო ზოლის გასწვრივ, ხოლო ხიმინჯებზე კი წამოგებულია ღრუტანიანი ცილინდრული ელემენტები (2). სხვადასხვა ზომის ხიმინჯები საფეხურებრივ მიმართულია ნაპირისაკენ (3) და იგი განსაზღვრავს ცილინდრული შტაბელების სიმაღლეს. ხიმინჯების დიამეტრზე რამდენჯერმე ნაკლებია ცალკეული ელემენტის დიამეტრზე, რაც მათ თავისუფალი გადაადგილების საშუალებას აძლევს, როგორც ვერტიკალურ, ისე ჰორიზონტალურ სიბრტყეში. ნაგებობის ასეთი კონსტრუქციული გადაწყვეტა საშუალებას იძლევა, ერთის მხრივ, მინიმუმამდე იქნეს დაყვანილი ტალღის დარტყმის ძალა, ხოლო მეორე მხრივ, სინქრონულად მოახდინოს ფსკერის გარეცხვის სიღრმის შევსება ცილინდრული ელემენტებით.



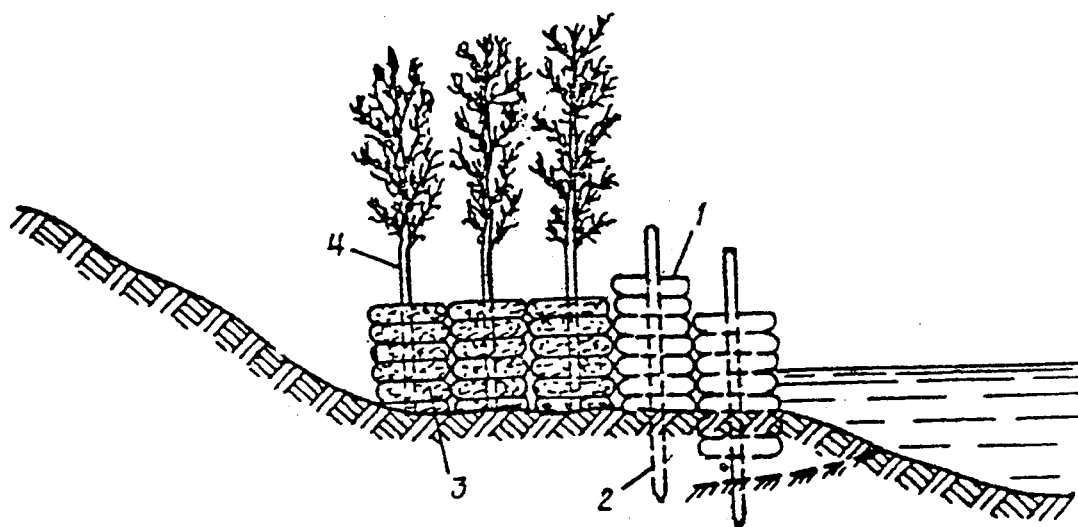
ნახ. 3.2.1. წყლის ეროზიული და ტალღური ზემოქმედებისაგან დამცავი ნაგებობა

1 – ხიმინჯები; 2 – ღრუტანიანი ცილინდრული ელემენტები; 3 – ცილინდრული შტაბელები

### 1. წყლის ეროზიული და ტალღური ზემოქმედებისაგან დამცავი კომბინირებული

## ტიპის ნაგებობა

ნაგებობა (ს.მ. №954540, ნახ. 3.2.2) იგივე კონსტრუქციული გადაწყვეტით ხასიათდება, როგორც წყლის ეროზიული და ტალღური ზემოქმედებისაგან დამცავი ნაგებობა, მხოლოდ მესამე რიგის ვერტიკალურ ღრუტანიან ბლოკებში ხიმინჯები შეიცვალა მრავალწლიანი მცენარეების ნარგავებით და შევსებულია გრუნტით. აღნიშნული ნაგებობის ძირითადი კონსტრუქციული ელემენტებია: ცილინდრული ან ტორისებრი ბლოკები (1), ხიმინჯები (2), ბლოკები შევსებული გრუნტით (3) და ნარგავები (4).



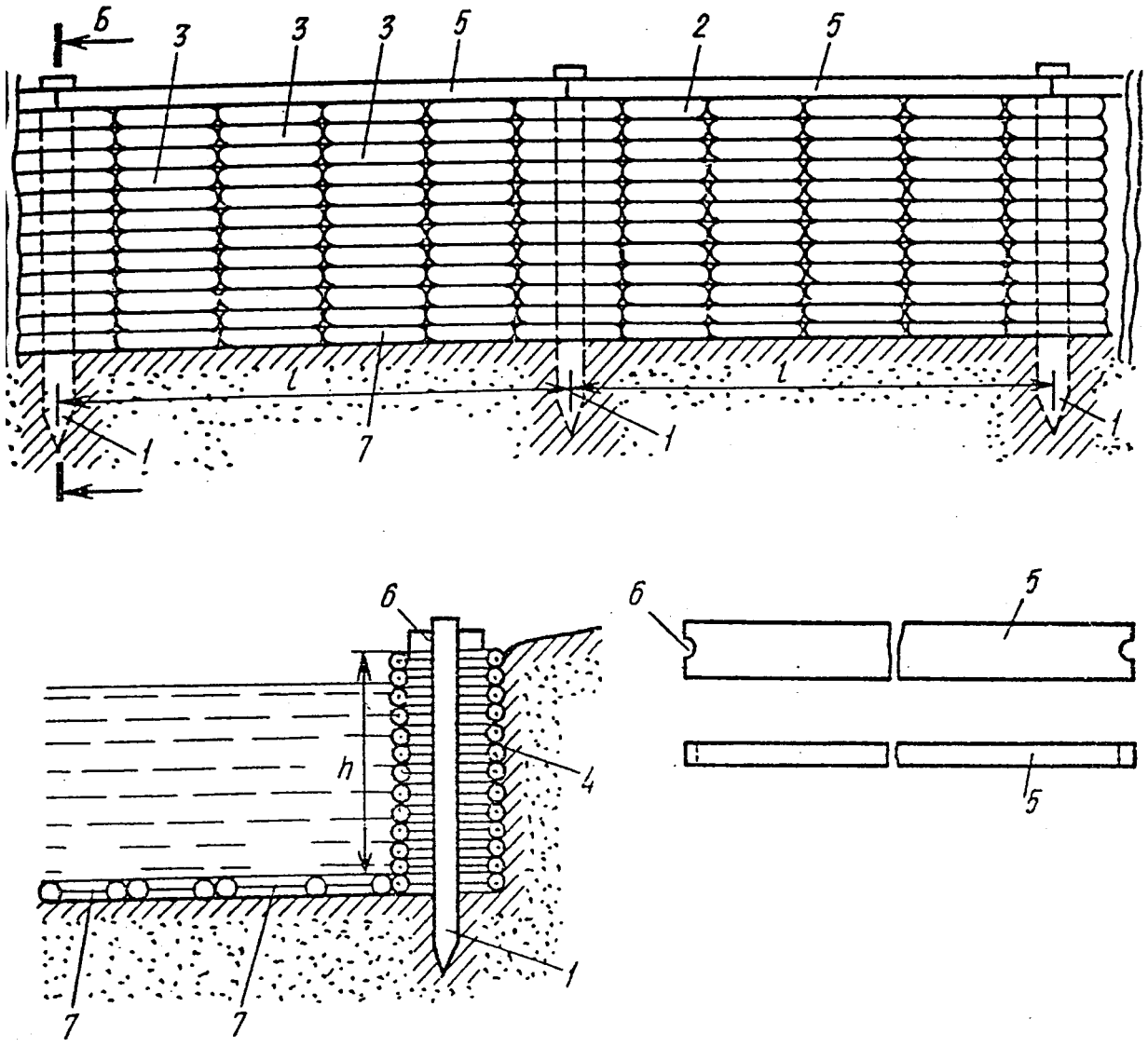
ნახ. 3.2.2. წყლის ეროზიული და ტალღური ზემოქმედებისაგან დამცავი კომბინირებული ნაგებობა: 1 – ღრუტანიანი ბლოკი, 2 – ხიმინჯი, 3 – ღრუტანიანი ბლოკები შემავსებლით, 4 – მწვანე ნარგავები

### 3. ნაპირის გარეცხვისაგან დაცვის მოწყობილობა – ნაპირდამცავი ელასტიკური სარტყელი

ნაგებობა (ს.მ. №1446213, ნახ. 3.2.3), რომელიც დამუშავებულია ჩვენს მიერ, შედგება ხიმინჯებისაგან (1), რომლებიც ერთმანეთისაგან გარკვეულ მანძილზე, ერთ რიგად ჩასმულია რეცხვადი ნაპირის გასწვრივ. ხიმინჯებზე წამოგებულია ღრუტანიანი ცილინდრული ელემენტები – ბლოკები (2), ხოლო ხიმინჯებს შორის ასევე დალაგებულია იგივე ბლოკები შტაბელების სახით (3), რომლებიც კომპლექსში ქმნის ერთიან ელასტიკურ კედელს (სარტყელს) დასაცავი ნაპირის



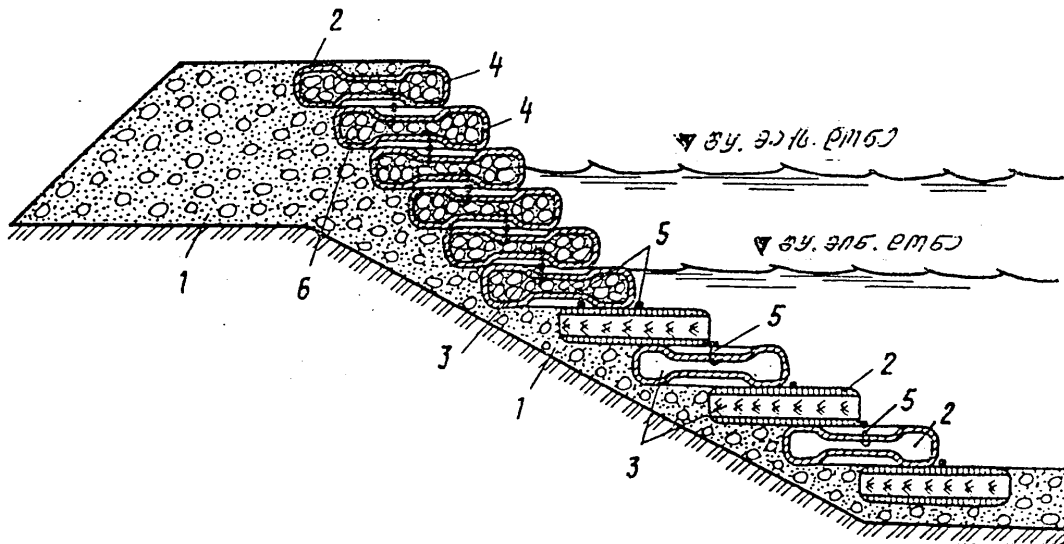
გასწვრივ. ბლოკები ივსება ადგილობრივი გრუნტით (4), ხოლო კონსტრუქციის მდგრადობის უზრუნველსაყოფად გათვალისწინებულია დამტვირთავი კოჭის (5) მოწყობა. მასზე მოწყობილი ღრიჭოთი (6), კოჭი უერთდება ვერტიკალური ხიმინჯის თავს და ქმნის ერთიანი სისტემის კონსტრუქციას. ნაგებობის ფსკერის ადგილობრივი გარეცხვებისაგან დაცვის მიზნით ფსკერზე ეწყობა დამცველი საფენი იგივე ღრუტანიანი ცილინდრული ბლოკებით (7).



ნახ. 3.2.3. ნაპირის გარეცხვისაგან დაცვის მოწყობილობა – ნაპირდამცავი ელასტიკური სარტყელი: 1 \_ ხიმინჯები; 2 \_ ცილინდრული ელემენტები; 3 \_ ელემენტები შტაბელების სახით; 4 \_ შემავსებელი გრუნტი; 5 \_ დამტვირთავი კოჭი; 6 \_ ღრიჭო; 7 \_ ფსკერის დამცავი ღრუტანიანი ცილინდრული ბლოკებისაგან შედგენილი საფენი

4. ნაპირდამცველი ნაგებობა

ნაგებობა (ს.მ. №1476040, ნახ. 3.2.4) წარმოადგენს მდინარის, წყალსაცავის, ზღვის, სანაპირო ზოლის დამცველ ნაგებობას. ნაგებობა მიღებულია ღრუტანიანი ცილინდრული ან ტორისებრი ბლოკების (2) კიბისებრი განლაგებით დასაცავი ნაპირის ფერდზე (1). წყლის მინიმალური ჰორიზონტის ქვემოთ ბლოკების რიგი (3) ნაწილობრივ ფარავს ერთმანეთს, რაც თავისთავად ქმნის გარკვეულ სიცარიელეს თევზის ქვირითის დასაყრელად. წყლის მინიმალური ჰორიზონტის ზემოთ ბლოკების რიგი შევსებულია ადგილობრივი გრუნტით (4) და მჭიდროდ ფარავს ერთმანეთს. ბლოკები ერთმანეთთან დაკავშირებულია (5, 7, 8) მოწყობილობებით. ტალღის ზემოქმედების შემთხვევაში გათვალისწინებულია უკუფილტრების მოწყობა.



ნახ. 3.2.4. ნაპირდამცავი ნაგებობა

1 \_ ბლოკების კიბისებრი განლაგებით დასაცავი ნაპირის ფერდი; 2 \_ ღრუტანიანი ცილინდრული ბლოკები; 3 \_ ბლოკების რიგი წყლის მინიმალური ჰორიზონტის ქვემოთ; 4 \_ რიგებს შორის სიცარიელე; 5, 7, 8 \_ ელასტიკური დამაკავშირებელი; 6 \_ შემავსებელი გრუნტი.

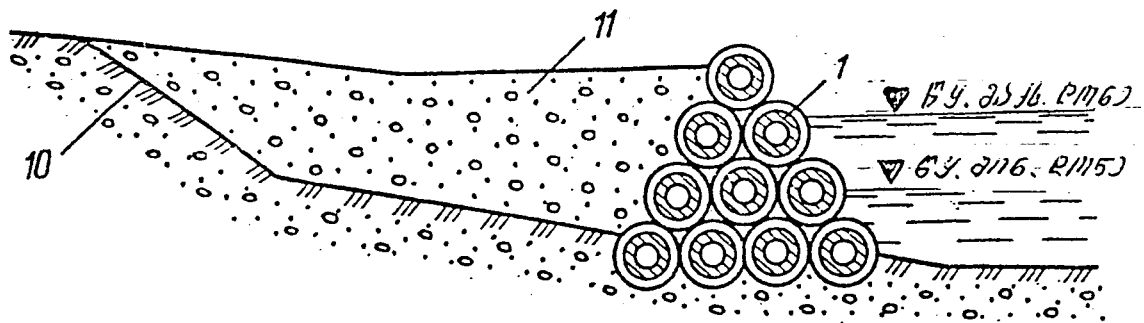
### 5. გადამღობი ნაგებობის კონსტრუქცია

ნაგებობა (ს.მ. №1596024; ნახ. 3..2.5) შეიძლება გამოყენებული იყოს როგორც სანაპირო ზოლის (მდინარეების, ტბების, ზღვის) დასაცავად, ისე სხვადასხვა დანიშნულებით. ნაგებობის ძირითად შემადგენელ ნაწილს წარმოადგენს

ელასტიკური გარსი (1), რომელიც მიღებულია ტორისებრი ღრუტანიანი ბლოკების (2) წამოგებით გულარზე (3). ნაგებობის, როგორც ნაპირების სამაგრი კონსტრუქციის აწყობის ტექნოლოგია და საჭირო მოწყობილობები მოცემულია გამოგონების აღწერაში.

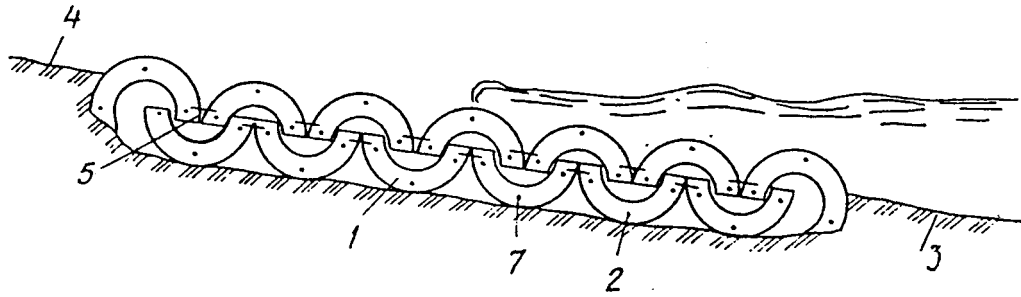
### 6. წყალდენის ნაპირების ფერდების დამცველი ნაგებობა

ნაგებობა (ს.მ. №1335616, ნახ. 3.2.6) შედგება ნახევრად წრიული თხელკედლიანი ღარებისაგან (1), რომლებიც დალაგებულია რიგში (2) ერთმანეთის მიჯრით, დასაცავი ფერდის (3) გასწვრივ, ორ იარუსად (5); პირველი იარუსის ღარები ფერდზე მოთავსებულია პირაღმა, ხოლო მეორე იარუსის ღარები –პირიქით. ზედა იარუსის ღარებით ხდება ქვედა იარუსის ღარების მიერთების ადგილების ჩაკეტვა, რის შედეგად ნაგებობა, ძლიერი ხორკლიანი ზედაპირით, იღებს შეკრულ სახეს. ნაგებობის მრუდწირულ ზედაპირზე მოძრავი ტალღა კარგავს ენერგიას, იზრდება მისი მოძრაობის ტრაექტორია. კონსტრუქციაში ღარები შეიძლება იყოს რკინაბეტონის, არმირებული პოლიმერული ან სხვა მასალისაგან. ღარების მოსაწყობად შესაძლებელია გამოყენებული იყოს ამორტიზირებული საბურავები. ამ უკანასკნელის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები განაპირობებს ნაგებობის ელასტიკურობას და მის სიიაფეს.



ნახ. 3.2.5. გადამღობი ნაგებობის კონსტრუქცია

1 – ელასტიკური გარსი; 2 – ღრუტანიანი ბლოკები; 3 – გულარი.



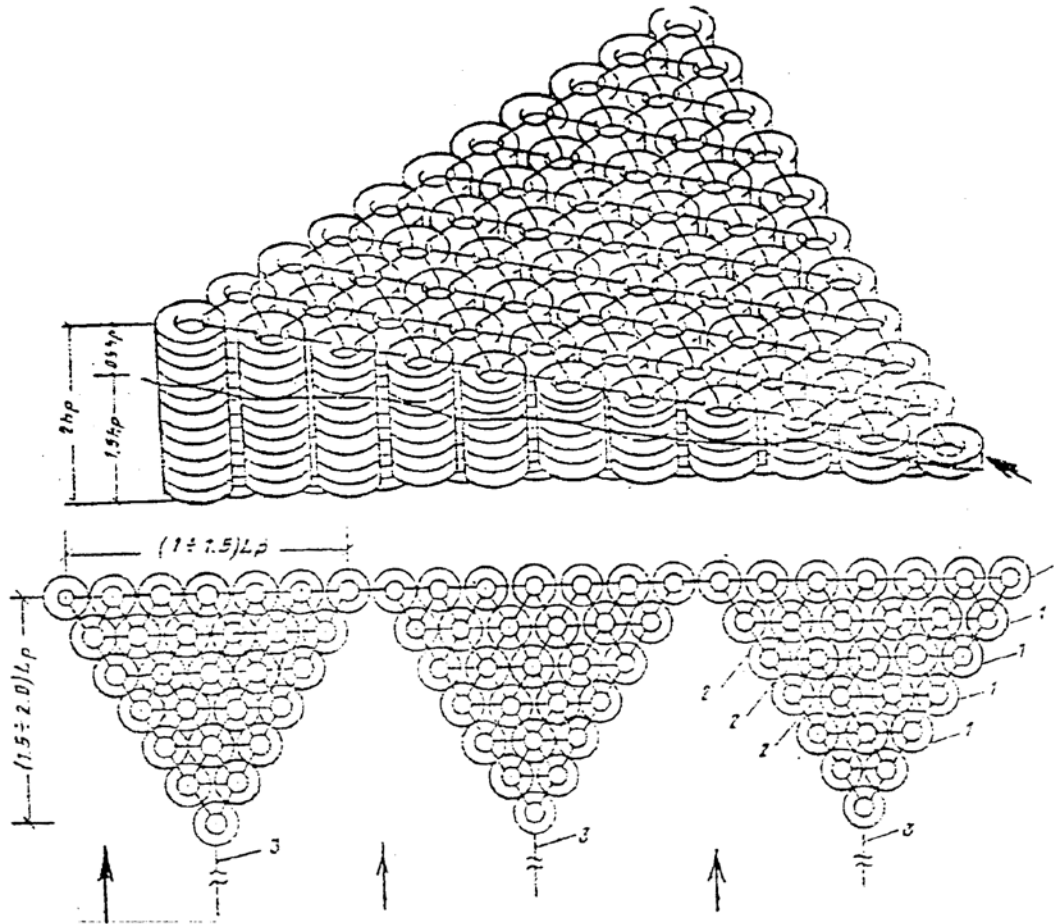
ნახ. 3.2.6. ნაპირების ფერდების დამცველი ნაგებობა

1, 2 \_ ნახევრად წრიული თხელკედლიანი ღარები;

3, 4 \_ დასაცავი ფერდები; 5 – ორიარუსიანი წყობა.

### 7. მცურავი კონსტრუქციის ტალღის ენერჯის ჩამქრობი ნაგებობა

განსხვავებით იმ ნაგებობისაგან, რომლებიც ძირითადად სტაციონარული ხასიათისა იყო, წარმოდგენილი ნაგებობა არასტაციონარულია და მიეკუთვნება მცურავი ტიპის დამცავ კონსტრუქციებს, რომლებსაც იყენებენ იმ შემთხვევაში, როცა დასაცავ ნაპირზე ვერ ხერხდება სტაციონარული ტიპის ნაგებობების მოწყობა ან ასეთი ნაგებობა არ იძლევა ენერჯის ჩამქრობის სათანადო ეფექტს მცურავი კონსტრუქციის ტალღის ენერჯის ჩამქრობი ნაგებობა (ს.მ. №829764, ნახ. 3.2.7), წარმოადგენს პირამიდის ფორმის მოწყობილობას, რომლის ფუძე ოთხკუთხედიან და მიმართულია დასაცავი ნაპირისაკენ, ხოლო წვერო – მოსალოდნელი ტალღის ფრონტის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ. კონსტრუქციის ასეთი გადაწყვეტა აძლევს მას საშუალებას მუდმივად ორიენტირებული იყოს ტალღის საწინააღმდეგოდ. ნაგებობა შედგება სხვადასხვა სიმაღლის ღრუტანიანი ცილინდრული ბლოკებისაგან (1), მათი დამაკავშირებელი მოწყობილობების (2), დამჭერი ბაგირისა (3) და მცურავი საშუალებებისაგან, რომლებიც მოთავსებულია ბლოკებში. ვერტიკალურ მდგომარეობაში მყოფი ცილინდრული ბლოკები გეგმაში განლაგებულია ჭადრაკულად. ტალღა, ხვდება რა აღნიშნულ ნაგებობაში, იყოფა წყალზედა და წყალქვეშა ნაწილებად. წყალზედა ნაწილი, ხვდება რა ვერტიკალურად განლაგებულ ბლოკებში, იცვლის მიმართულებას ზედაპირიდან ფსკერისაკენ, კარგავს ენერჯის დიდ ნაწილს და ქმნის დამატებით ბარიერს ტალღის წყალქვეშა ნაწილის ენერჯის ჩასაქრობად.



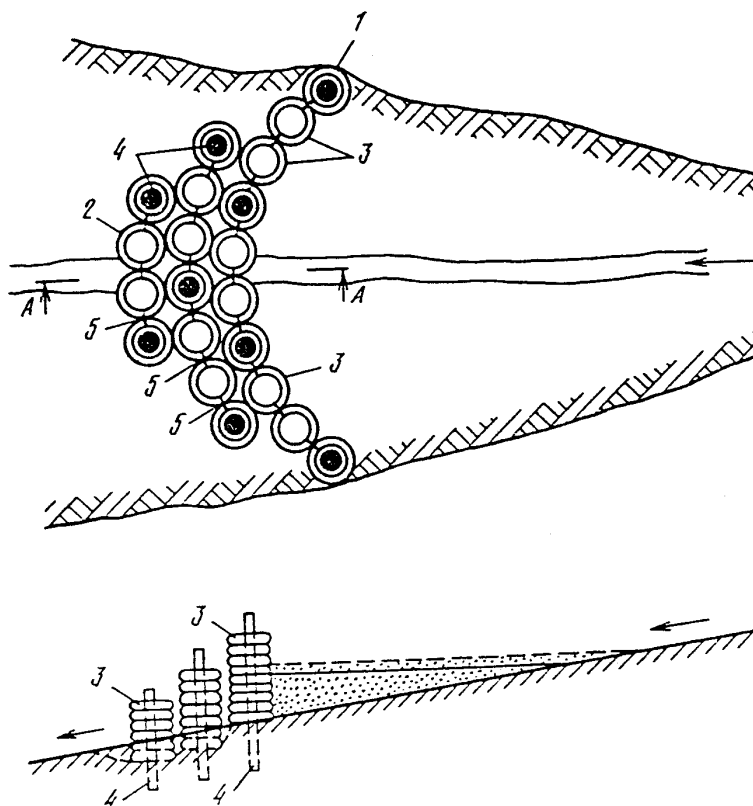
ნახ. 5.2.7. ტალღის ენერჯის ჩამქრობი მცურავი კონსტრუქცია

1 – ღრუტანიანი ბლოკები; 2 – ელასტიკური დამაკავშირებელი; 3 – დამჭერი ბაგირი.

დასმული პრობლემის სფერო გარკვეულწილად მოიცავს როგორც ხევების, ასევე მდინარეების კალაპოტების მთისა და მთისწინა უბნებს, სადაც ეროზიულ პროცესებს გარკვეული სიმძაფრე გააჩნია და წარმოადგენს ღვარცოფული მოვლენების განვითარების ერთ-ერთ განმსაზღვრელ ფაქტორს. ხევებში ეროზიული პროცესების და მდინარეების კალაპოტებში ღვარცოფული მოვლენების დარეგულირების და გაუვნებლობის მიზნით შემოთავაზებულია ახალი განივი და გრძივი ტიპის ნაგებობების კონსტრუქციები (რომელთა დამუშავებაში ჩვენც ვმონაწილეობდით). ასეთი სახის ნაგებობების უპირატესობა არსებულთან შედარებით გამოიხატება მათ ელასტიკურობაში, მუშაობის საიმედოობაში, ეკონომიურობაში, გარემოსთან შერწყმაში, ქვედა ბიეფში მოსალოდნელი გართულების თავიდან აცილებაში, სიმაღლის თანდათანობით ტრანსფორმაციაში და

მშენებლობის ტექნოლოგიების სიმარტივეში.

### 1. ხევის სარეგულაციო ნაგებობა

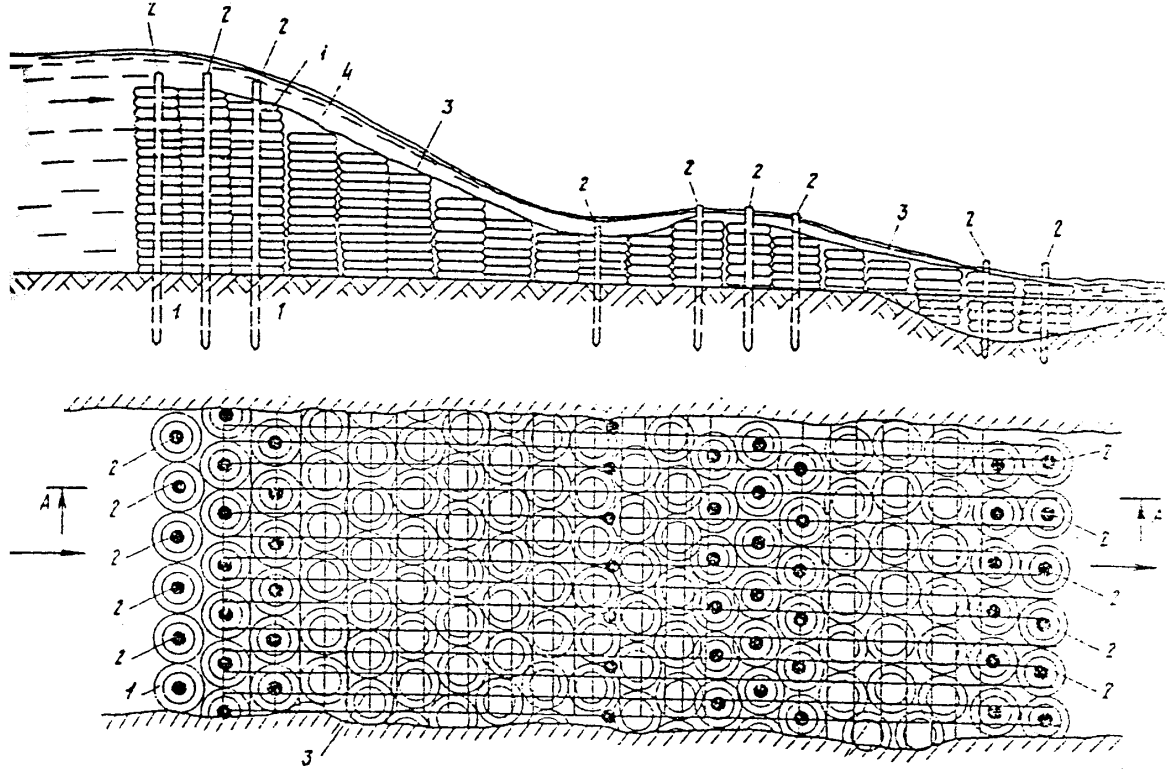


ნახ. 5.3.1. ხევის სარეგულაციო ნაგებობა: 1 \_ ელასტიკური კედელი;

2, 3 \_ ღრუტანიანი ბლოკები; 4 \_ ხიმინჯი; 6 \_ ელასტიკური კავშირი

ნაგებობა (ს.მ. №85931, ნახ. 3.3.1), შედგება გეგმაში თაღოვანი მოხაზულობის რამდენიმე ელასტიკური კედლისაგან (1), რომლებიც ნაკადის მოძრაობის მიმართ განლაგებულია შეზნექილი მხრიდან ერთმანეთის მიჯრით, ცვალებადი სიმაღლით ზედა ბიეფიდან ქვედა ბიეფისაკენ. კედელი შესრულებულია ცილინდრული ღრუტანიანი ბლოკებისაგან (2, 3), რომლებიც წამოგებულია ხიმინჯებზე (4), ბლოკები ერთმანეთთან დაკავშირებულია ელასტიკური კავშირებით (5). კონსტრუქციის ასეთი გადაწყვეტა ნაგებობას აძლევს მდგრადობას, ხოლო მუშაობის პროცესში მაქსიმალურად ახდენს ეროზირებული მასალის კონცენტრირებას ხევის ყველაზე დაბალ კერებში, ჯერ ახდენს მის ლოკალიზაციას, ხოლო შემდგომ სრულ ლიკვიდაციას.

## 2. წყალსაშვიანი კაშხალი



ნახ. 3.3.2. წყალსაშვიანი კაშხალი. 1 \_ ღრუტანიანი ბლოკები; 2 \_ ხიმინჯები;  
3 \_ ბადე; 4 \_ კაშხლის პროფილი.

ნაგებობა (ს.მ. №829763, ნახ. 3.3.2) შედგება ცილინდრული ღრუტანიანი ბლოკებისაგან (1), რომლებიც წამოგებულია ხიმინჯებზე (2) და ეწყობა როგორც კაშხლის დასაწყისში, ასევე მის შუა და ბოლო ნაწილში, ხოლო მათ შორის სივრცე – კაშხლის ტანი ამოვსებულია იგივე ცილინდრული ღრუტანიანი ბლოკებით, ზედაპირი კი დაფიქსირებულია ბადით (3). კაშხლის პროფილს (4) გააჩნია ქრობადი ტალღის მოხაზულობა, რაც უზრუნველყოფს კაშხლის ზღურბლზე გადადინებული წყლის მოცილებას ზედა ბიევიდან ქვედა ბიევისაკენ, ადგილობრივი გარეცხვებისა და ავარიების გარეშე. ასეთი კაშხლები მიზანშეწონილია აშენდეს წყალუბვ ხეობებში, როცა საჭიროა როგორც ხევის ფსკერის ამალღება, ისე ზედმეტი წყლის მოცილება ხევის ზედა ტერიტორიიდან მის ქვედა ნაწილში. ცნობილია, რომ ამ შემთხვევაში ყოველთვის არსებობს ქვედა ბიევის ინტესიური გამორეცხვის პრობლემა.

### 3. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური კაშხალი

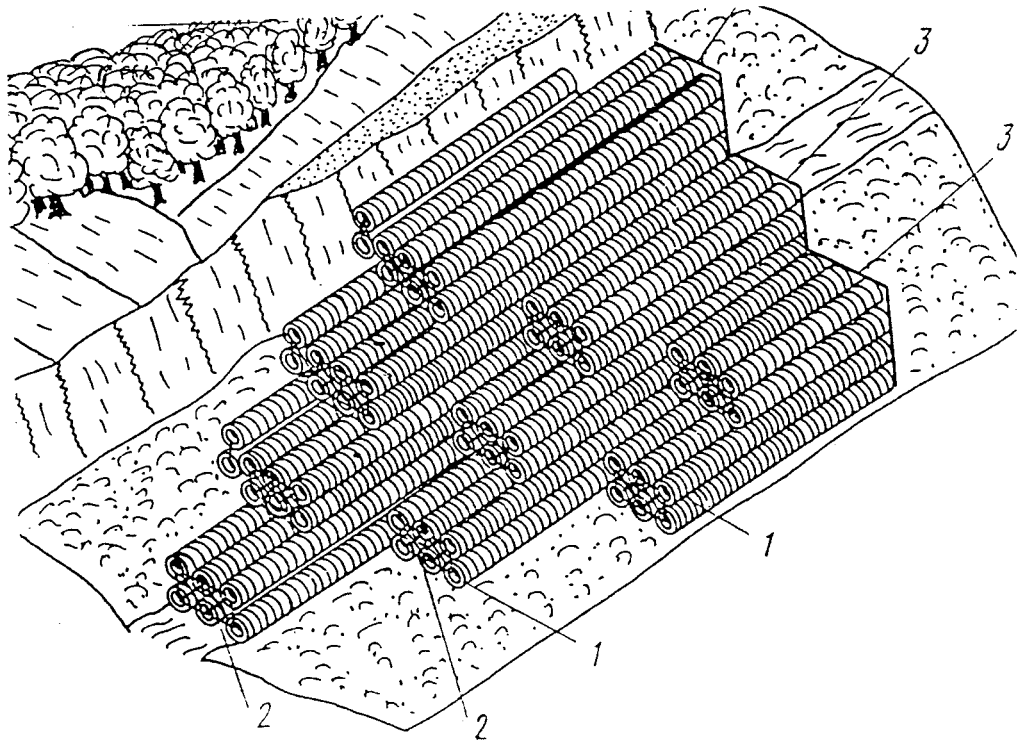
ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა (ს.მ. №11081519, ნახ. 3.3.3) შედგება ცალკეული ღრუტანიანი ელემენტებისაგან (1) ცილინდრული ბლოკების სახით და შეერთებულია მოქნილი კავშირებით (2) ბლოკებად (3). ბლოკები განლაგებულია საფეხურისებრად მდინარის ნაპირებიდან დინების დინამიური ღერძისაკენ და ზედა ბიეფის მხრიდან ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით.

ნაგებობის მუშაობის პრინციპი შემდეგში მდგომარეობს: ღვარცოფული ნაკადის დინამიკური ზემოქმედების დროს ხდება მისი სტრუქტურის შრეობრივად დაყოფა და თანდათანობით დაწნევის ზრდა ნაგებობის საფეხურისებრ პროფილზე, ხოლო ღვარცოფის მასის ნაწილის გატარება ხორციელდება ღრუტანიანი ბლოკების არხებით.

ღვარცოფის მასის შრეობრივი დაყოფა ხდება ნაგებობის ზედაპირზე წყალდენის კალაპოტის ქანობის საწინააღმდეგო მიმართულებით მისი მოძრაობით და კონტაქტით ნაგებობის სხვადასხვა სიბრტყესთან. ამ დროს ნაკადი კარგავს სიჩქარეს, ენერგიას და მასის გარკვეულ ნაწილს. ღვარცოფის ნაწილი, რომელიც აღწევს ნაგებობის ზღურბლის მაქსიმალურ ნიშნულს, გადაედინება ნაგებობის ქვედა ბიეფში, ხოლო ნაწილი ვარდება ნაგებობის ზედაპირზე კალაპოტის განივი მიმართულებით, რაც ნაკადის ენერგიის საბოლოო ჩაქრობას იწვევს.

ამ ნაგებობის გამოყენებით იზრდება ნაკადის ენერგიის ჩაქრობის შესაძლებლობა, რაც ღვარცოფთან მისი საფეხურებრივი კონტაქტითა და ელასტიკურობითაა გამოწვეული, ხოლო ნაგებობის მშენებლობაზე მეორადი რესურსების გამოყენების შესაძლებლობა მნიშვნელოვნად ამცირებს მის სამშენებლო ღირებულებას.





**ნახ. 3.3.3. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური კაშხალი**  
 1 – ღრუტანიანი ელემენტები; 2 – მოქნილი შემაერთებელი კავშირები;  
 3 – ღრუტანიანი ბლოკები.

#### 4. ენერგიის ჩამქრობი ბაგირის ტიპის ზღუდარი

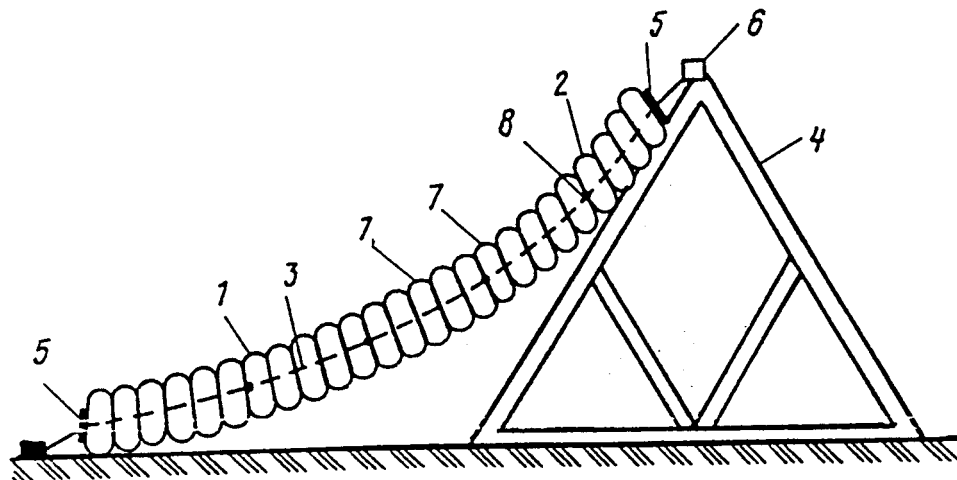
ენერგიის ჩამქრობი ბაგირის ტიპის ზღუდარი (ს.მ. №1335615, ნახ. 3.3.4) განკუთვნილია ხელოვნური და ბუნებრივი წყალსატევების სანაპირო ზოლის დაცვისა და ეკოლოგიური წონასწორობის შენარჩუნებისათვის. წარმოდგენილი ნაგებობა შეიძლება გამოყენებული იყოს, როგორც ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა. ენერგიის ჩამქრობი ზღუდარი წარმოადგენს ტრამპლინის ტიპის ფარდას, რომელიც შესრულებულია გირლიანდებით (1). გირლიანდები წარმოადგენს დრეკად ელემენტებთა სისტემას (2), რომელიც ჩამოცმულია ბაგირზე.

ელასტიკური ღერძის (3) ზედა ბოლოთი დამაგრებულია საყრდენი (4) კონსტრუქციის კორიზონტალურ (6) ელემენტზე. გირლიანდის საწყის და ბოლო წერტილებში მოთავსებულია ფიქსატორები (5), რომლებიც იცავს დრეკად ელემენტებს ელასტიკური ღერძიდან ამოვარდნის საშიშროებისაგან და უზრუნველყოფს მათ მჭიდრო ურთიერთკავშირს. გირლიანდების ღერძები შეერთებულია ერთმანეთთან

განივი ელასტიკური კავშირებით (8), რომლებიც უზრუნველყოფს მათ ურთიერთდაცვილებას.

ტალღების აგორების შემთხვევაში მრავალრიგიან ფარდაზე მიმდინარეობს ნაკადის ენერგიის ინტენსიური ჩაქრობა დრეკადი ელემენტების ურთიერთდაცვილებით, მრუდწირულ ზედაპირებზე გაძლიერებული სიმქისის, გირლიანდებსა და დრეკად ელემენტებს შორის მოთავსებული დრიჭობების საშუალებით. ღვარცოფებთან ენერგიის ჩამქრობი ზღუდარის გამოყენებისას არ ხდება ნაგებობის გირლიანდების ერთმანეთთან ურთიერთდაკავშირება. ნაკადის ნაგებობასთან მიახლოებისას, გირლიანდების დრეკადი ელემენტების კუმშვის გამო, ადგილი აქვს ღვარცოფის მასის ნაწილის ნაგებობის ქვეშ გავლას, რომელსაც ფარდის ზედაპირიდან ჩამოვარდნილი მასა ეცემა, რაც მისი ენერგიის ჩაქრობას იწვევს. ენერგიის ჩამქრობი ზღუდარი შეიძლება იყოს როგორც სტაციონარული, ისე ასაწყობ-დასაშლელი.

კონსტრუქციის ეს თავისებურება საშუალებას იძლევა მისი მშენებლობა განხორციელდეს უმოკლეს ვადაში.



ნახ. 3.3.4. ენერგიის ჩამქრობი ზღუდარი

1 – გირლიანდა; 2 – დრეკადი ელემენტები; 3 – ელასტიკური ღერძი; 4 – საყრდენი კონსტრუქცია; 5 – ფიქსატორი; 6 – გირლიანდის ზედა ბოლოს ჩასამაგრებელი ელემენტი; 7 – გირლიანდის ქვედა ბოლოს ჩამაგრების ანკერები; 8 – გირლიანდის დამაკავშირებელი დრეკადი ელემენტები.

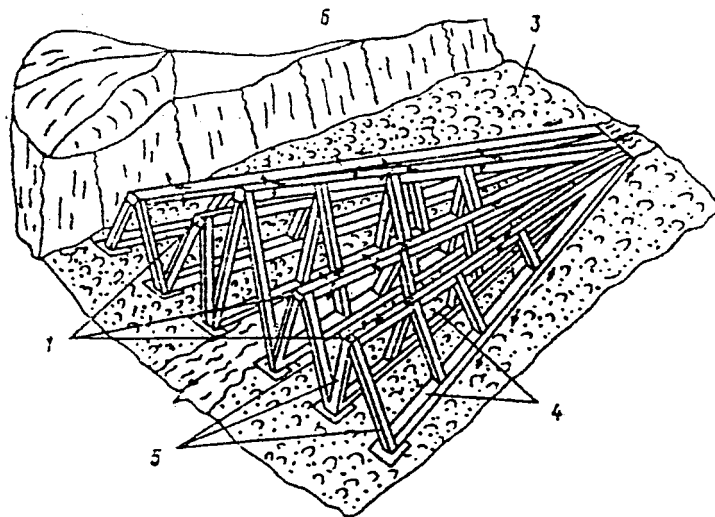
## 5. ღვარცოფდამჭერი ნაგებობა

ღვარცოფსაწინააღმდეგო გამჭოლი ნაგებობა (ს.მ. №1413185, ნახ. 3.3.5)

შესრულებულია პირველი, მეოთხე და მეხუთე კოჭების სისტემისაგან. საყრდენი კოჭები (4) ბოლოებით დაკავშირებულია მდინარის კალაპოტში (3) მოწყობილ ხისტ სამირკველთან (2). საყრდენ კოჭებზე დამაგრებულია დახრილი კოჭები (5), რომლებიც დგარების ფუნქციას ასრულებს და კოჭებთან კავშირში ქმნის ტრამპლინის ტიპის სივრცულ ნაგებობას.

ყოველი კოჭი (1) უახლოეს საყრდენ კოჭებთან (4) დაკავშირებულია წყვილი დახრილი კოჭით (5), რომლებსაც გეგმაში ჭადრაკული განლაგება აქვს. დახრილი კოჭები (5) ზედა ბოლოთი მიმაგრებულია გრძივ კოჭებთან (1).

ღვარცოფული ნაკადის ნაგებობასთან ურთიერთქმედების დროს წარმოებს მისი ტანის შრეობრივად დაშლა კალაპოტის სიგანეზე (3) და კოჭების (1) შედეგად ხორციელდება მისი ნაგებობის ზედაპირზე მოხვედრა. ნაკადი (1), (4), (5) კოჭებთან კონტაქტით კარგავს სიჩქარეს და ენერგიას. ღვარცოფის გავლის დროს მისი ტანი ნაწილობრივ ავსებს ნაგებობას და ზრდის მის მდგრადობას. დახრილ (5) წყვილ კოჭებს შორის მოთავსებული კუთხეები იზრდება ღვარცოფსატარის კალაპოტიდან (3) მისი ნაპირისაკენ (6), რაც უზრუნველყოფს ღვარცოფის ტანის სიჩქარის თანდათანობით შემცირებას.



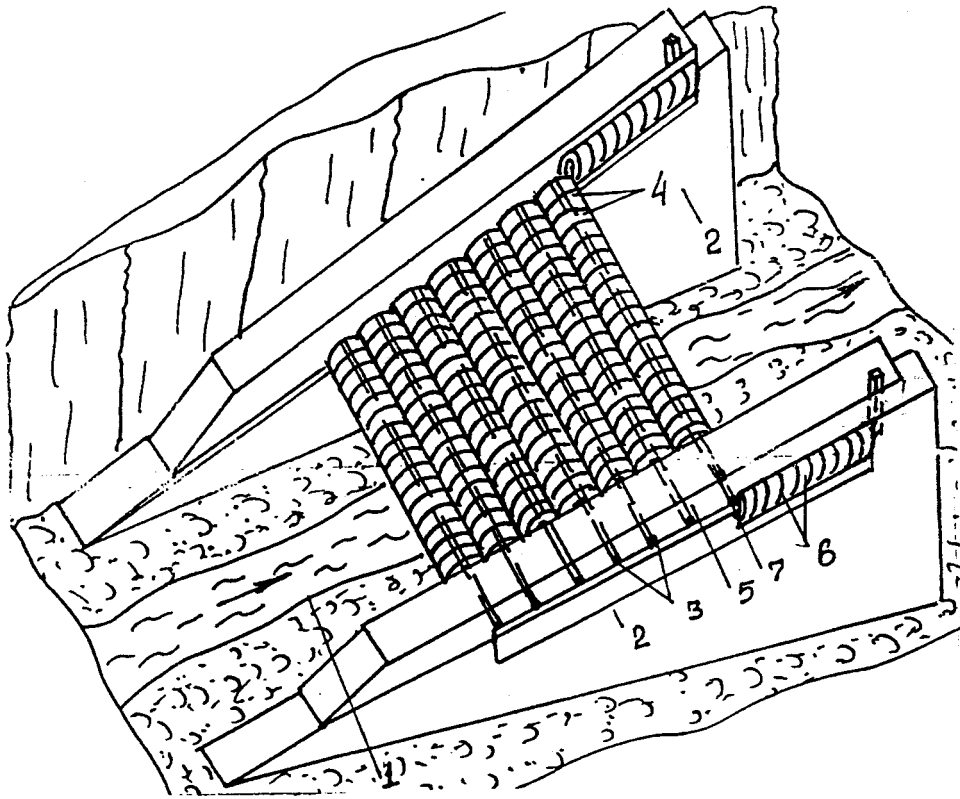
ნახ. 3.3.5. ღვარცოფსაწინააღმდეგო გამჭოლი ნაგებობა

- 1 – გრძივი კოჭები; 2 – ნაგებობის სამირკველი; 3 – ღვარცოფგამტარი კალაპოტი;
- 4 – საყრდენი კოჭები; 5 – დახრილი კოჭები; 6 – კალაპოტის ნაპირი.

## 6. ღვარცოფსაწინააღმდეგო გამჭოლი ნაგებობა

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა (ს.მ. №1645357, ნახ. 3.3.6) შეიცავს მოძრაობის საწინააღმდეგოდ დახრილ ღარს, რომლის ძრო (1) შესრულებულია სანაპირო საყრდენებზე (2) თავისუფლად დალაგებული კოჭებისაგან (6). კოჭებზე ჩამოცმულია ცილინდრული ფორმის ელემენტები (4). საყრდენებზე მოთავსებულია კოჭების (3) მოძრაობის შემზღვეველი, რომელიც აღჭურვილია საამორტიზაციო ელემენტებით (6). კოჭების გადაადგილება ხორციელდება საყრდენებში ჩაანკერებულ რელსებზე. ღვარცოფის გავლის შემთხვევაში მისი მასის ნაწილი ხვდება ნაგებობის ზედაპირზე, ხოლო ნაწილი გაედინება ნაგებობის ქვემოთ. ნაგებობაზე ნაკადის დინამიკური ზემოქმედების დროს ხორციელდება კოჭებზე ჩამოცმული ღრუტანიანი ცილინდრული ელემენტების (4) კუმშვა, რომლებიც დეფორმაციის ჭარბ ნაწილს გადასცემენ კოჭებს. საყრდენზე მოთავსებული კოჭები იწყებს მოძრაობას და აწვება ამორტიზატორს (6). ამ დროს ნაკადის ნაწილი გაედინება ღრიჭოს საშუალებით კალაპოტში, ხოლო ნაწილი ზღურბლიდან ვარდება კალაპოტის ძირზე. ურთიერთშემხვედრ ნაკადთა დაჯახების შედეგად საბოლოოდ ხდება ღვარცოფის კინეტიკური ენერჯის ჩაქრობა.

კოჭების (3) საყრდენებიდან (2) ამოვარდნის დაცვა ხორციელდება საყრდენებზე მოთავსებული ფიქსატორების (7) საშუალებით.



ნახ. 3.3.6. ტრამპლინის ტიპის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა

1 – ძრო; 2 – საყრდენი; 3 – კოჭი; 4 – ცილინდრული ელემენტი;

5 – ამორტიზატორის შემზღუდველი; 6 – ამორტიზატორი; 7 – კოჭის ფიქსატორი.

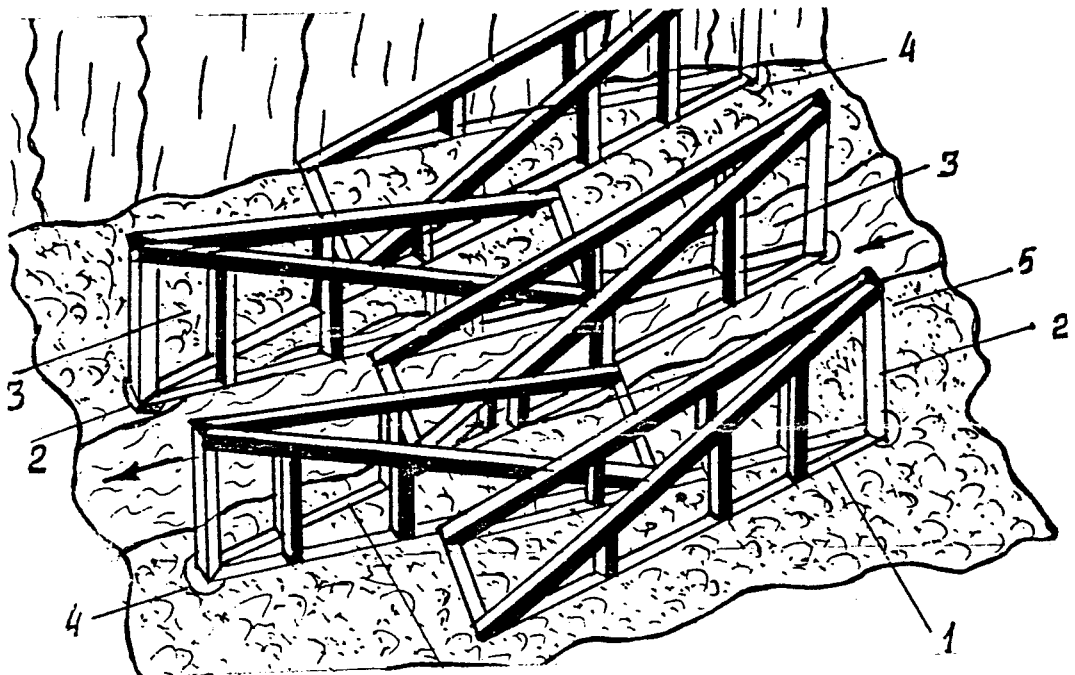
## 7. ენერგიის ჩამქრობი ნაგებობა

ენერგიის ჩამქრობი ნაგებობა (ს.მ. №1687707, ნახ. 3.3.7) შეიძლება გამოყენებული იყოს როგორც ღვარცოფული ნაკადებისაგან დაცვის მიზნით, ისე თოვლის ზვავების სალიკვიდაციოდ.

ნაგებობა წარმოდგენილია ცალკეული სივრცული სექციებით, რომლებიც გამაგრებულია ურთიერთშორის და ჩამაგრებულია საძირკველში.

ნაგებობა მუშაობს შემდეგი პრინციპით: ღვარცოფის ან ზვავის გავლის ტრასაზე მოთავსებულია გამჭოლი კონსტრუქცია. ვერტიკალურ ღვარზე (3) ღვარცოფის მოძრავი ტანით დარტყმისას წარმოებს მისი მასის ვერტიკალურ სიბრტყეში დაყოფა, ღვარცოფის მასის ნაწილი შედის სივრცულ სექციაში, რის

დროსაც ხდება მისი შრეობრივად დაყოფა, როგორც ვერტიკალურ სიბრტყეში კოჭზე (3), ისე კოჭებზე (1), (2) სხვადასხვა სიბრტყეში. ღვარცოფის მასის ნაწილი გაედინება უკან წაწეული სექციის მიმართულებით და ხვდება ნაგებობის დამჭერ ჯიბეებში (5). დამჭერი ჯიბეების შევსების შემდეგ ენერგიის ჩაქრობა ხორციელდება დახრილი კოჭებიდან (2) სივრცულ უკუჯიბეებში გადადენით. ღვარცოფის ნაგებობაზე გავლის დროს მისი მრავალჯერადი შრეობრივი დაყოფა და დაყოფილი მასების ურთიერთშეჯახება საშუალებას იძლევა საბოლოოდ ჩააქროს მოძრავი ნაკადის კინეტიკური ენერგია.



ნახ. 3.3.7. ენერგიის ჩამქრობი ნაგებობა

1 – ჰორიზონტალური კოჭები; 2 – დახრილი კოჭები; 3. დგარები; 4 – საყრდენი სამკუთხედის ფეხის საძირკველში ჩასაკერებელი ელემენტი; 5 – სექციების შემაერთებელი ელემენტი; 6 – დამჭერი ჯიბე.

## თავი 4. წყალდენების კალაპოტების დეფორმაციებისაგან დამცავი ახალი ნაგებობები

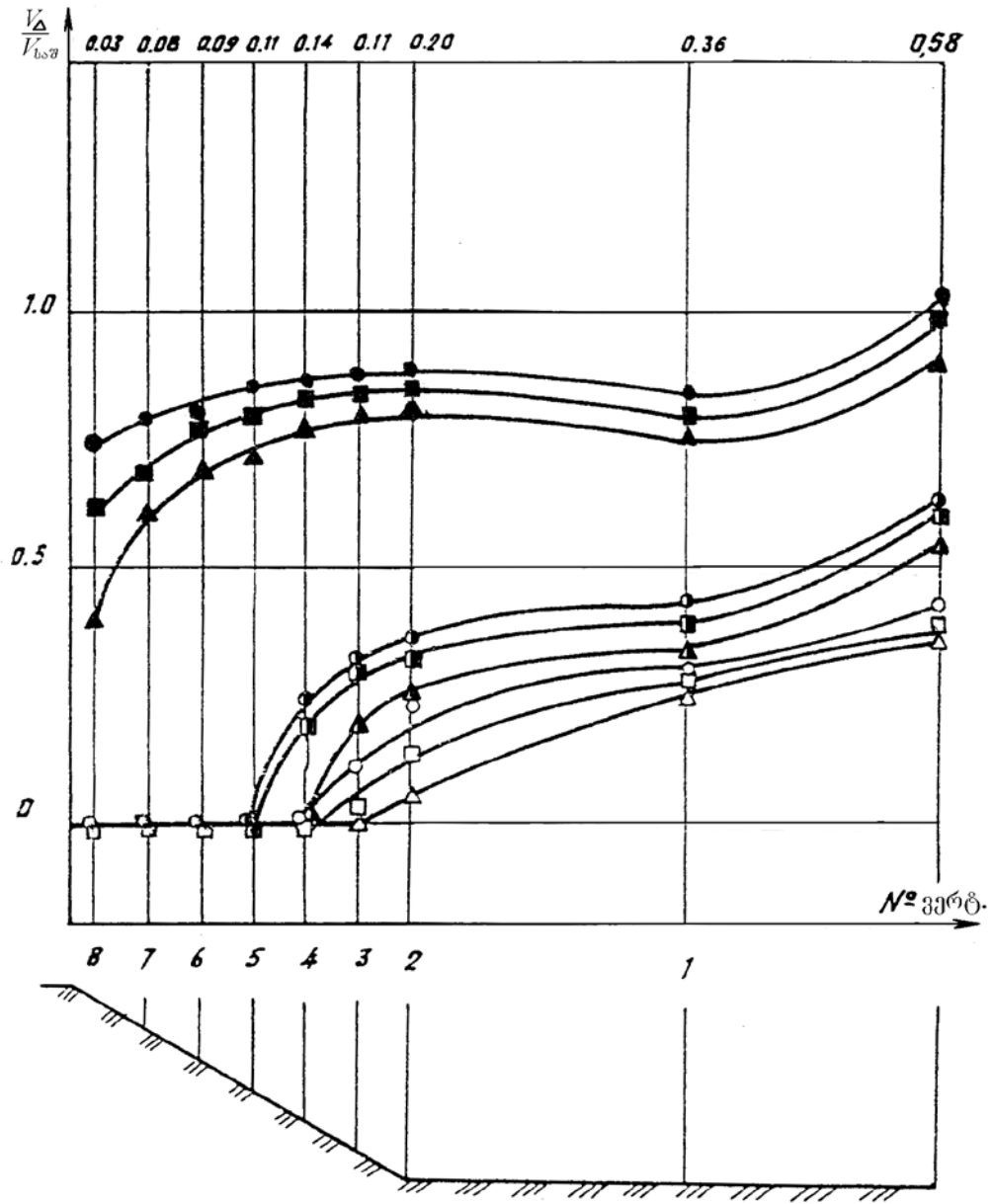
### 4.1 ნაგებობების ლაბორატორიული კვლევის შედეგები

ახალი კონსტრუქციების (მათ შორის ჩვენს მიერ დამუშავებულის) საპროექტო გადაწყვეტებში, რეალიზების მიზნით, განხორციელდა მათი მიზნობრივი გამოცდა როგორც ლაბორატორიაში, ისე ნატურის პირობებში. გამოცდა ჩატარდა საავტორო უფლების მქონე კალაპოტის ფერდობისა და ფსკერის დამცავ კონსტრუქციებს. კონსტრუქციების გამოცდა ტარდებოდა, როგორც ტრანზიტული ნაკადის დინამიკურ მახასიათებლების ცვალებადობასთან, ისე ტალღურ ზემოქმედებებთან კავშირში.

ცდების პირველი სერია ჩატარდა საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალეკოლოგიის ინსტიტუტის ლაბორატორიაში, ტრაპეციული კვეთის მქონე სახსრულ ფერდებიან ღარში, რომლის სიგრძე შეადგენდა 15, ხოლო სიმაღლე 0,5 მეტრს. ღარის სიგანე ფსკერზე ტოლი იყო 0,6 მ-ის. საცდელ მოდელზე ნაგებობის იმიტაცია განხორციელდა რეზინის ტორისებრი ფორმის ელემენტებით, რომლის შიგა და გარე დიამეტრი და სისქე შეესაბამებოდა ავტოსაბურავების ყველაზე გავრცელებული სტანდარტულ ზომებს (300-508P, 260-508P, 260-508P, 240-508P). მოდელის როგორც ჰორიზონტალური, ისე ვერტიკალური მასშტაბი  $\alpha_{\text{ჰორ}} = \alpha_{\text{ვერ}} = 15$ . საცდელი მოდელები წარმოდგენილი იყო როგორც ელასტიკური, ისე უჯრედოვანი საფარით. ცდები მიმდინარეობდა სამ ეტაპად. პირველი ეტაპის დროს დამცველი საფარის ეფექტურობის შეფასება წარმოებდა იმ პირობებისათვის, როცა იგი მასიურია და არ ხდებოდა ბლოკების სიცარიელების შევსება შემავსებლით, ხოლო მეორე ეტაპზე, ბლოკები ივსებოდა ინერტული მასალით. ექსპერიმენტის ჩატარების დროს გამოყენებული იყო დაგეგმვის თანამედროვე მეთოდი – ლათინური კვადრატი. ნაგებობის მუშაობის ეფექტურობის დადგენის მიზნით კალაპოტის პერიმეტრის მახასიათებელ წერტილებში მიმდინარეობდა ზედაპირული, საშუალო და ფსკერული სიჩქარეების ფიქსირება “დიზას” ტიპის თერმოანომეტრული ხელსაწყოთი. ზემოთ

წარმოდგენილ პარამეტრთა ფიქსაცია წარმოებდა როგორც დაუცველი, ისე საფარით დაფარული კალაპოტებისათვის.

შერჩეულ კვებებში აგებულ იქნა ფსკერული და საშუალო სიჩქარეების თანაფარდობის გრაფიკული დამოკიდებულებები. თვალსაჩინოების მიზნით გრაფიკული დამოკიდებულებები  $V_{\Delta} / V_{\text{საშ}} = f(N)$  საილუსტრაციოდ წარმოდგენილია ნახ. 4.1.1-ზე.



ნახ. 4.1.1.  $V_{\Delta} / V_{\text{საშ}} = f(N)$  დამოკიდებულების გრაფიკები

- ■ ▲ – შესაბამისად  $V_{\text{საშ}} = 0,39; 0,31; 0,26$  მ/წმ გამაგრების გარეშე;
- □ △ – იმავე სიჩქარეების დროს, როცა ფერდი და ფსკერი გამაგრებულია



უჯრედოვანი საფენით, ხოლო  $L = 3h$ ;

◻ ◻ ◻ – იმავე სიჩქარეების დროს, როცა ფერდი და ფსკერი გამაგრებულია უჯრედოვანი საფარით, ხოლო  $L = 2h$ ;

კალაპოტის მუდმივი მახასიათებლების დროს ( $b = 0,6$  მ;  $H = 0,5$ ;  $m = 1,6$ ;  $i = 0,002$ ) საშუალო სიჩქარე ითვლებოდა (16÷40) მ/წმ-ის დიაპაზონში.

ექსპერიმენტით დადასტურდა თეორიული პრინციპებით განსაზღვრული პროგნოზი და დაზუსტდა დამცავი საფარის ოპტიმალური გაბარიტები, რომლის დროსაც კალაპოტის მდგრადობის დარღვევას ადგილი არა აქვს. დადგინდა, რომ წარმოდგენილი საფარის რეცხვად კალაპოტებში გამოყენების დროს შეიძლება სიჩქარის (1,5ჩვ) მ/წმ-მდე გაზრდა და შესაბამისად, მისი გეომეტრიული ზომების შერჩევა, გამომდინარე ნაკადის ჰიდრაულიკიდან.

ცდების შედეგად დაფიქსირებული მონაცემების საფუძველზე, უმცირეს კვადრატთა მეთოდის გამოყენებით, შესაბამისი გარდაქმნებისა და გამარტივების საფუძველზე გამოყვანილ იქნა საშუალო დასაშვებ სიჩქარეთა საანგარიშო დამოკიდებულებები.

მასიური საფარისათვის

$$V_{\text{საშ.დას.}} = \frac{2,33V_{\text{ფ.დას.}}}{[0,256(h/H)^{1,1} + 0,17]} \quad (4.1.1)$$

უჯრედოვანი საფარისათვის

$$V_{\text{საშ.დას.}} = \frac{2,33V_{\text{ფ.დას.}}}{0,325(l/h)^{0,4} [0,256(h/H)^{1,1} + 0,17]} \quad (4.1.2)$$

სადაც  $V_{\text{ფ.დას.}}$  – კალაპოტის შემადგენელი გრუნტის დასაშვები არაგამრეცხი სიჩქარეა, მ/წმ;

$h$  – დამცველი ბლოკის სისქე, მ;

$H$  – წყლის სიღრმე წყალდენში, მ;

$l$  – ფსკერზე მოთავსებული საფარის უჯრედის სიგრძე, მ;

(4.1.2) დამოკიდებულებიდან შეიძლება განისაზღვროს  $l/h$  თანაფარდობა უგანზომილებო სიდიდეებში

$$l/h = \{3,08V_{\text{ფ.დას.}} [0,256(h/H)^{1,1} + 0,17] V_{\text{ფ.დას.}}\}^{2,5} \quad (4.1.3)$$

ცდების შედეგების მიხედვით გამოვლინდა აგრეთვე საინტერესო ფაქტი. იმ

შემთხვევაში, როდესაც წყალდენის კალაპოტში ადგილი არ აქვს ტალღურ მოვლენებს, დამცველი საფარი ინერტული ან სხვა მასალით შევსებას არ საჭიროებს ნაკადსა და ნაგებობას შორის შექმნილი წყლის ბალიშის გამო.

წარმოდგენილი ნაგებობები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს აგრეთვე ზღვების, ტბების, წყალსაცავების სანაპირო ზოლების ზედაპირული წარეცხვებისა და ტალღური ზემოქმედებისაგან დაცვის მიზნით. ნაგებობათა მუშაობის ეფექტურობის შეფასების მიზნით ექსპერიმენტი ჩატარებულ იქნა იმავე ლაბორატორიის ტალღის წარმომქნელ ჰიდრავლიკურ ღარებზე (დიდი ღარის სიგრძე 50 მ, სიგანე – 0,8 მ, სიმაღლე – 1,7 მ, მცირე ღარის სიგრძე 9 მ, სიგანე – 0,3 მ, სიმაღლე – 0,5 მ). ღარებში მაქსიმალური ტალღის სიმაღლე დიდში მერყეობდა 0,05\_0,45 მ-ის ფარგლებში, მცირეში – 0,02\_0,16 მ-ის ფარგლებში. ცდები ჩატარებულ იქნა ადვილად რეცხვად ქვიშის ფრაქციებისათვის ( $d_{საშ} = 1,0$  მმ), სანაპიროს ფერდობის სხვადასხვა დახრილობების შემთხვევებისათვის  $m = 1:2; 1:3; 1:5$  და ტალღის სხვადასხვა მახასიათებლებისათვის.

ექსპერიმენტის დროს დაფიქსირებული ტალღის პარამეტრების სიდიდეები მოცემულია ცხრილში 4.1.1.

ცხრილი 4.1.1

ტალღის რეჟიმი	ტალღის სიმაღლე $H$ მ	ტალღის სიგრძე $\lambda$ მ	ტალღის პერიოდი $t$ წმ	ტალღის სიმაღლე $h$ სმ	ტალღის სიგრძე $\lambda$ სმ	ტალღის პერიოდი $t$ წმ
№1	0,75	31,5	4,8	5,0	210,0	1,24
№2	0,98	20,4	4,3	6,5	136,0	1,12
№3	1,13	19,8	3,9	7,5	131,0	1,00
№4	1,28	18,0	1,8	8,5	120,0	0,48
№5	1,43	14,5	1,4	9,5	95,0	0,36

ტალღური პროცესების მოდელირება განხორციელდა მცირე ღარზე, გრავიტაციული მოდელირების საფუძველზე  $\alpha_{კორიხ} = \alpha_{ვერ} = 15$ , ხოლო მიღებული შედეგები, შედარებული მონაცემებთან, რომლებიც დაფიქსირებული იყო ღარზე, რომლის ზომები შეესაბამებოდა ნატურის პირობებს. ექსპერიმენტების შედეგად

შესწავლილ იქნა ტალღების ზეგავლენა დამცავი ელასტიკური საფარის მუშაობის ეფექტურობაზე. ჩატარებული ექსპერიმენტების პირველი ეტაპი ითვალისწინებდა დამცველი საფარის მუშაობას ბლოკების სიცარიელეთა შევსების გარეშე, ხოლო მეორე ეტაპზე ბლოკები იტვირთებოდა ადგილობრივი გრუნტით, ხრეშით, ღორღით და უკუფილტრების მოწყობისათვის იყო გათვალისწინებული. დაუცველ ნაპირზე ტალღების ზემოქმედება გრძელდებოდა მანამ, სანამ ფერდების დეფორმაცია მიაღწევდა სრულ სტაბილიზაციას. ტალღის ნაპირზე ზემოქმედების ფიზიკური არსის გამოვლენა მოცემული ექსპერიმენტების შემთხვევაში წარმოებდა

კოეფიციენტების მნიშვნელობა იცვლებოდა 1:2,5-დან 1:3,0-მდე. შესაბამისად, მიღებულ დაფერდებებზე უნდა მოეწყოს ფილტრი, ხოლო შემდგომ ელასტიკური საფარი შემავსებლებით (გრუნტი, ხრეში, ღორღი და სხვ.). ჩატარებული ექსპერიმენტები გახდა ნაშრომში წარმოდგენილი მთელი რიგი ახალი ტრადიციული კვლევების ანალოგიურად. ნაპირის დეფორმაციების და ტალღის პარამეტრების (სიმაღლე, სიგრძე, სიხშირე) ფიქსირება, როგორც საფარით, ასევე მის გარეშე მიმდინარეობდა უშუალო დაკვირვებებით, გაზომვით, ოსცილოგრაფიული ჩანაწერებით და ფოტოგადაღებებით.

ექსპერიმენტების შედეგებმა გვიჩვენა: შექმნილი ნაპირდამცავი კონსტრუქციებით შესაძლებელია შეიქმნას ტალღური ზემოქმედებისაგან ნაპირების (ფერდების) დამცავი საიმედო საფარი (ბარიერი), რომელიც თავისი ელასტიკური უნარიანობის გამო 3-4-ჯერ ამცირებს ტალღის ზემოქმედების ძალას (დარტყმის ძალას) და ანაწევრებს შეყურსული ტალღის მასას, მაგრამ დაშლილი ტალღის წყლის ნაკადის ფერდზე უკუდინების დროს ხდება ატივინარებული გრუნტის წვრილი ფრაქციების გამოტანა, რის გამოც ვერ ხერხდება დასაცავი ფერდის სრული სტაბილიზაცია. ნაპირის ფერდის ელასტიკური საფარით ტალღური ზემოქმედებისაგან დაცვის დროს აუცილებელია მისი ტანის სიცარიელის შევსება. ტალღის პარამეტრების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის დაფიქსირდა შემავსებლების (გრუნტი, ხრეში, ღორღი) დიამეტრის ცალსახა კავშირი ტალღის სიმაღლესა და სიხშირესთან. თუ 15 სმ-ის სიმაღლის ტალღების ზემოქმედების გაუვნებელსაყოფად საკმარისია ადგილობრივი გრუნტით ბლოკების შევსება,

ტალლის სიმაღლის 20\_30 სმ-მდე გაზრდის შემთხვევაში აუცილებელია ბლოკები შეივსოს ხრეშით ან ღორღით. ტალლის სიმაღლის (0,5±1,5) მეტრამდე ცვალებადობისას აუცილებელია დასაცავი ობიექტის ზედაპირზე მოეწყოს უკუფილტრები და ბლოკების სიცარიელები შეივსოს ღორღით ან ნაფლეთი ქვით.

კვლევებმა გვიჩვენა, რომ კონსტრუქციების ეფექტური მუშაობა ცალსახა კავშირშია დასაცავი ობიექტის დაფერდების ხარისხზე. აქედან გამომდინარე, საპროექტო გადაწყვეტილებებში აუცილებელია დასაცავი ობიექტის დაფერდების კონსტრუქციების შექმნის, დაპროექტების და წარმოებაში ფართოდ დანერგვის საფუძველი. 4.1.2 ცხრილში მოცემულია მოკლე ინფორმაცია ელასტიკური საფარის მუშაობის ეფექტურობაზე დასაცავი ობიექტის დაფერდების კოეფიციენტის, ტალლის პარამეტრების და შემავსებლის დიამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს.

ცხრილი 4.12.

## ელასტიკური საფარის მუშაობის ეფექტურობა დასაცავი ობიექტის დაფერდების კოეფიციენტთან კავშირში

ტალღის მასხასიათებ- ლები $h, \lambda, t, \lambda/h$	ნაპირის დაფერდება $m=1:5$				ნაპირის დაფერდება $m=1:3$			
	ნაპირი დაცვის გარეშე $d_{საშ} = 0,5 \div 0,7$ მმ	ნაპირი დაცულია ელასტიკური საფარით შევსების და უკუფილტრის გარეშე	ელასტიკური საფარი შევსებულია $d = 9$ მმ ღორღით უკუფილტრის გარეშე	ელასტიკური საფარი შევსებულია $d = 9$ მმ ღორღით უკუფილტრის მოწყობით	ნაპირი დაცვის გარეშე $d_{საშ} = 0,5 \div 0,7$ მმ	ნაპირი დაცულია ელასტიკური საფარით შევსების და უკუფილტრის გარეშე	ელასტიკური საფარი შევსებულია $d = 9$ მმ ღორღით უკუფილტრის გარეშე	ელასტიკური საფარი შევსებულია $d = 9$ მმ ღორღით უკუფილტრის მოწყობით
1	2	3	4	5	6	7	8	9
№1 რეჟიმი 0,75 მ, 31,5 მ, 4,8 წმ, 42	10.10	7.30	4.00	%	21.0	17.50	15.50	2.70/0
№2 რეჟიმი 0,98 მ, 20,4 მ, 4,3 წმ, 20,8	13.80	11.50	8.95	%	25.56	22.00	18.60	5.00/0
№3 რეჟიმი 1,13 მ, 19,8 მ, 3,9 წმ, 17,5	16.20	13.25	10.38	3.20/0	29.50	26.4	20.10	5.8/0
№4 რეჟიმი 1,28 მ, 18,0 მ, 1,8 წმ, 14,1	20.3	18.10	12.1	6.40/0	35.50	30.70	25.25	6.5/0
№5 რეჟიმი 1,43 მ, 14,3 მ, 1,4 მწ, 10.0	26.55	20.55	16.0	6.90/0	43.60	33.80	20.40	7.00/0

## 4.2 კალაპოტური დეფორმაციებისაგან დამცავი

### ნაგებობების საიმედოობა

კალაპოტების დეფორმაციებისაგან დამცავი ნაგებობების მუშაობის საიმედოობაზე გავლენას ახდენს ურთიერთდაკავშირებული მრავალი ფაქტორი, რომელთა რაოდენობრივი შეფასება და პრაქტიკული ამოცანების გადაწყვეტა მეტად გართულებულია [1, 21, 22, 32]. გამომდინარე აღნიშნულიდან, საიმედოობის შეფასება ხშირ შემთხვევაში ადვილად ფიქსირებად ფაქტორებს აქვს დათმობილი, ასეთ ფაქტორებად ნაგებობათა და კალაპოტური პროცესების შეფასების დროს მიღებულია მდინარის ჩამონადენი და მისი დონეების ცვალებადობა შერჩეულ კვეთში.

საიმედოობის ძირითადი სტატისტიკური მახასიათებლების, კერძოდ, საშუალო კვადრატული მნიშვნელობის, საშუალო კვადრატული გადახრის, საშუალო კვადრატული შეცდომის, განაწილების პარამეტრების მნიშვნელობების თეორიული და სტატისტიკური კრიტერიუმების თანხვედრის ხარისხის, სტატისტიკური რიგის განაწილების საწყისი და ცენტრალური მომენტების დადგენა ხორციელდება არსებული ტრადიციული დამოკიდებულებების საფუძველზე. მარეგულირებელ ნაგებობათა საიმედოობის მაჩვენებლები დადგენილ იქნა იმ ფიქსირებადი მტყუნებების საფუძველზე, როგორცაა კალაპოტის ზღვრული წონასწორული ფორმა, ნაგებობასთან ნაკადის მიდინების კუთხე, ნაგებობის ზღურბლზე ნაკადის გადადინება და ნაკადის მიერ ნაგებობის საძირკვლის გამორეცხვა.

ნაგებობის საიმედოობა, ნაკადის ზღურბლზე გადადინების დაუშვებლობის გათვალისწინებით, იანგარიშება შემთხვევითი სიდიდეების ფუნქციების განაწილების შესაბამისი დამოკიდებულებებით

$$P = p(h < h_0 - H_6) = S_0^{h_0 + H_6} \text{th}(\tilde{h}) d\tilde{h} \quad (4.2.1)$$

სადაც  $h$  – არის წყლის სიღრმე მდინარეში ნაგებობის მოწყობის ადგილას ათვლილი წყლის დონის საზომი ლარტყის ნულიდან;

$H_n$  – ნაგებობის სიმაღლე;

$h_0$  – ნაგებობის საძირკვლის ნიშნულის შესაბამისი სიმაღლე, ათვლილი იმავე ლარტყიდან.

ნაგებობის საიმედოობის საანგარიშოდ საძირკვლის, გამორეცხვის დაუმკვებლობის გათვალისწინებით მიღებულია გამოსახულება [59]:

88

$$\tilde{t} = 1,75 \frac{1}{d} kp^{3/2} \frac{m^2 h_1^{4/3} I}{2g} \quad (4.2.2)$$

სადაც  $\tilde{t}$  – არის გარეცხვის სიღრმე;

$d$  – ფსკერის შემადგენელი გრუნტის საშუალო დიამეტრი;

$p$  – ნაგებობის გარშემოედენის კოეფიციენტი;

$V$  – ნაკადის საშუალო სიქარე ნაგებობის მოწყობამდე;

$k$  – კოეფიციენტი, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია საძირკვლის გამორეცხვის ხასიათზე;

$m$  – ხორკლიანობის კოეფიციენტი;

$I$  – ნაკადის ზედაპირის ქანობი ნაგებობის მოწყობის ზონაში.

$A = 1,75 \frac{1}{d} kp^{3/2} \frac{m^2 I}{2g}$  აღნიშვნის შემდეგ (4.2.2) გამოსახულება მიიღებს სახეს

$$\tilde{t} = Ah_1^{4/3}. \quad (4.2.3)$$

იმისათვის, რომ დადგინდეს, გადააჭარბებს თუ არა ნაგებობის საძირკვლის გამორეცხვის სიღრმე მოცემულ  $\tilde{t}$  სიღრმეს, საჭიროა გამოითვალოს ალბათობა, რომ მდინარეში წყლის მოსალოდნელი სიღრმე  $h_{1i}$  არ გადაამეტებს  $h_1$  სიღრმეს, ე.ი.

$$h_{1i} = \left( \frac{t_i}{A} \right)^{3/4}, \quad (4.2.4)$$

სოლო საძიებელი სიდიდის ალბათობა გამოითვლება დამოკიდებულებით

$$p = \int_0^{h_0+h_i} t_h(\tilde{h}) dh. \quad (4.2.5)$$

ამრიგად, ასეთი მიდგომის დროს კალაპოტის რეგულირების და ნაგებობის საიმედოობის საანგარიშო პარამეტრები წარმოადგენს შემთხვევითი ცვლადი სიდიდეების ფუნქციებს მდინარის ხარჯებისა და დონეების სახით. მათი განსაზღვრისათვის, პირველ რიგში, დგინდება ხარჯების ( $\tilde{Q}$ ) და დონეების ( $\tilde{h}$ )

მაქსიმუმების განაწილების კანონზომიერებები ნაგებობის მოწყობის კვეთებში  $f_h(h)$  და  $t_0(\tilde{Q})$ . ალბათობის სიხშირის განაწილების სიდიდეების დადგენის დროს, მრავალწლიური ჰიდროლოგიური მონაცემების საფუძველზე, გამოიყენება მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდები.

ნაპირდამცავ ნაგებობათა საპროექტო პარამეტრების შერჩევა ხშირად ხდება საიმედოობის მაჩვენებლის გათვალისწინების გარეშე. არსებული საანგარიშო დამოკიდებულებები და საპროექტო გადაწყვეტები ხშირად დაფუძნებულია ერთი ცვლადი ფაქტორის განაწილების ფუნქციაზე. აქედან გამომდინარე, ნაგებობათა ოპტიმალური ვარიანტი, შესაბამისი საიმედოობის მაჩვენებელთა და მოქმედი ფაქტორების გათვალისწინებით, წარმოდგენილ იქნა შემდეგი ფუნქციონალური დამოკიდებულებებით:

$$R = f\left(\frac{L}{B}, \frac{H_{მსj}}{H_6}, \frac{B_{მდ}}{B}, \frac{G}{Q}, \frac{I_{საშ}}{I_{მდ}}, \frac{V_3}{V_6}\right) \quad (4.2.6)$$

სადაც  $L$  – არის კალაპოტის ნაგებობით გადაკეტვის სიგრძე;

$B, B_{მდ}$  – კალაპოტის საშუალო და მდგრადი სიგანე;

$H_{მსj}, H_6$  – წყლის მაქსიმალური და ნაგებობის სიმაღლე;

$G$  – მდინარის მყარი ხარჯი;

$Q$  – მდინარის მაქსიმალური ხარჯი;

$I_{საშ}, I_{მდ}$  – მდინარის საშუალო და მდგრადი ქანობი;

$V_3, V_6$  – გრუნტისა და ნაგებობის მასალის არაგამრეცხი სიჩქარე.

ნაგებობის საიმედოობაზე მოქმედი ფაქტორების მონაცემები აღებულია შესაბამისი გაანგარიშებების საფუძველზე, ხოლო საიმედოობის მაჩვენებელი – მდინარის ხარჯის განაწილების ფუნქციის მეშვეობით.

კორელაციური კავშირების გათანაბრების და ნორმალიზაციის ობიექტური მეთოდი შესაძლებელს ხდის მრუდწირული რეგრესიის განტოლებიდან იმ ფაქტორთა უგულებელყოფას, რომელთა წილი არ აღემატება კორელაციის სრული კოეფიციენტის კვადრატის გაორკეცებულ შეფარდებით საშუალო კვადრატულ ცდომილებას.

მრუდწირული რეგრესიის განტოლებას აქვს სახე:

$$\tilde{U}(R) = a_{01}\tilde{U}\left(\frac{L}{B}\right) + a_{02}\tilde{U}\left(\frac{H_{მსj}}{H_6}\right) + a_{03}\tilde{U}\left(\frac{B_{მდ}}{B}\right) + a_{04}\tilde{U}\left(\frac{G}{Q}\right) + a_{05}\tilde{U}\left(\frac{I_{საშ}}{I_{მდ}}\right) + a_{06}\tilde{U}\left(\frac{V_3}{V_6}\right) \quad (4.2.7)$$

საწყისი მონაცემების ნორმალიზაციის შემდეგ განსაზღვრულ იქნა ნორმა-



ლიზებული წყვილის კორელაციის კოეფიციენტი, რის მეშვეობითაც შედგენილ იქნა კორელაციის კოეფიციენტების სიმეტრიული მატრიცა. სიმეტრიული მატრიცის ელექტრონულ გამოთვლელ მანქანაზე (ეგმ) რეალიზებით დადგენილ იქნა რეგრესიის განტოლების უცნობი კოეფიციენტები. მიღებული კოეფიციენტთა მნიშვნელობების შეტანით რეგრესიის განტოლებას აქვს სახე:

$$\begin{aligned} \tilde{U}(R) = & -0,015\tilde{U}\left(\frac{L}{B}\right) + 0,7589\tilde{U}\left(\frac{H_{\text{მაქ}}}{H_6}\right) - 0,0092\tilde{U}\left(\frac{B_{\text{მე}}}{B}\right) + \\ & + 0,057\tilde{U}\left(\frac{G}{Q}\right) - 0,1273\tilde{U}\left(\frac{I_{\text{საშ}}}{I_{\text{მე}}}\right) + 0,1861\tilde{U}\left(\frac{V_{\text{ფ}}}{V_6}\right) \end{aligned} \quad (4.2.8)$$

რეგრესიის განტოლებაში შემავალ სიდიდეთა ნამდვილ და ნორმალიზებულ მნიშვნელობებს შორის კავშირი აპროქსიმირებული იქნა დამოკიდებულებებით:

$$\tilde{U}(R) = \ln \frac{(1+R)}{(1-R)} - 2,2, \quad (4.2.9)$$

$$\tilde{U}\left(\frac{L}{B}\right) = 84 \frac{L}{B} - 18,0, \quad (4.2.10)$$

$$\tilde{U}\left(\frac{H_{\text{მაქ}}}{H}\right) = 94,4 \frac{H_{\text{მაქ}}}{H} - 2,16, \quad (4.2.11)$$

$$\tilde{U}\left(\frac{B_{\text{მე}}}{B}\right) = 28,5 \frac{B_{\text{მე}}}{B} - 22,4, \quad (4.2.12)$$

$$\tilde{U}\left(\frac{V_{\text{ფ}}}{V_6}\right) = 85 \frac{V_{\text{ფ}}}{V_6}, \quad (4.2.13)$$

$$\tilde{U}\left(\frac{G}{Q}\right) = 3,8 \frac{G}{Q} - 7,8, \quad (4.2.14)$$

$$\tilde{U}\left(\frac{I_{\text{საშ}}}{I_{\text{მე}}}\right) = 26 \frac{I_{\text{საშ}}}{I_{\text{მე}}} - 29,5, \quad (4.2.15)$$

კორელაციის კოეფიციენტის ჭეშმარიტი მნიშვნელობა ტოლია 0,83-ის, ხოლო მოქმედ ფაქტორთა საიმედოობის მაჩვენებლების წილს აქვს სახე:

$$\delta(L/B) = 0,15\%, \quad \delta(H_{\text{მაქ}}/H_6) = 90,9\%, \quad \delta(B_{\text{მე}}/B) = 0,1\%,$$

$$\delta(G/Q) = 0,7\%, \quad \delta(V_{\text{ფ}}/V_6) = 5,3\%, \quad \delta(I_{\text{საშ}}/I_{\text{მე}}) = 2,9\%.$$

(4.2.9÷4.2.15) დამოკიდებულებების გათვალისწინებით (4.2.8) დამოკიდებუ-

ღება მიიღებს სახეს:

$$\ln \frac{1+R}{1-R} = 3,06 + 7,16 \left( \frac{H_{\text{მ.ქ.}}}{H_6} \right)^{2,7} + 15,82 \frac{V_{\partial}}{V_6} + 0,217 \frac{G}{Q} - 1,26 \frac{L_6}{B} + 0,262 \frac{B_{\text{მ.}}}{B} - 3,31 \frac{I_{\text{ბ.შ.}}}{I_{\text{მ.}}} . \quad (4.2.16)$$

მიღებული (4.2.16) საანგარიშო დამოკიდებულების საიმედოობის მახასიათებლის გათვალისწინებით, კალაპოტის ნაგებობით გადაკეტვის სიგანის ფარდობითი სიდიდის გამოსათვლელი საანგარიშო დამოკიდებულება მიიღებს სახეს

$$\frac{L_6}{B} = 2,428 + 5,68 \left( \frac{H_{\text{მ.ქ.}}}{H_{\text{ბ.შ.}}} \right)^{2,7} + 12,556 \frac{V_{\partial}}{V_6} + 0,172 \frac{G}{Q} - 0,794 \ln \frac{1+R}{1-R} - 0,208 \frac{B_{\text{მ.}}}{B} - 0,627 \frac{I_{\text{ბ.შ.}}}{I_{\text{მ.}}} . \quad (4.2.17)$$

### ა) ფერდობის დამცავი ნაგებობები

ამ ტიპის კონსტრუქციების ექსპლუატაციის პერიოდში მათი მოწყობის ადგილზე მოსალოდნელია წარმოიშვას ადგილობრივი გარეცხვები შესაბამისი სიღრმეებით. ანგარიში წარმოებს საერთოდ მიღებული სქემით. პირველ რიგში უნდა დადგინდეს მოსალოდნელი ადგილობრივი გარეცხვის სიღრმე  $h_{\text{საანგ.}}$  და გამორეცხვის შედეგად ფორმირებული დაფერდების  $m$ -ის სიდიდე. განიხილება ანგარიშის ორი ვარიანტი: (ნახ. 4.3.1 და 4.3.2). პირველი ვარიანტის დროს მოსალოდნელია დასაცავი ნაპირის დეფორმაცია მთელ პერიმეტრზე (ნახ. 4.3.1). შესაბამისად, დამცველი საფარის საერთო სიგანე იანგარიშება ფორმულით

$$b_{\text{საფ.}} = b_1 + b_2, \quad b_{\text{საფ.}} = h_{\text{საანგ.}} \sqrt{1+m^2} \quad (4.3.1)$$

$b_1$  სიდიდე, პრაქტიკული გამოცდილებიდან, რეკომენდებულია პატარა მდინარეების ნაპირების შემთხვევაში 1 მეტრამდე, ხოლო საშუალო და დიდი მდინარეებისათვის კი 2÷3 მეტრი;

რაც შეეხება  $b_2$ -ის სიდიდეს, ის გამოითვლება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$b_2 = h_{\text{საანგ.}} \sqrt{1+m^2} \quad (4.3.2)$$

ხოლო დამცავი საფარის მთლიანი სიგანე ტოლი იქნება

$$b_{\text{საფ.}} = b_1 + h_{\text{საანგ.}} \sqrt{1+m^2} . \quad (4.3.3)$$

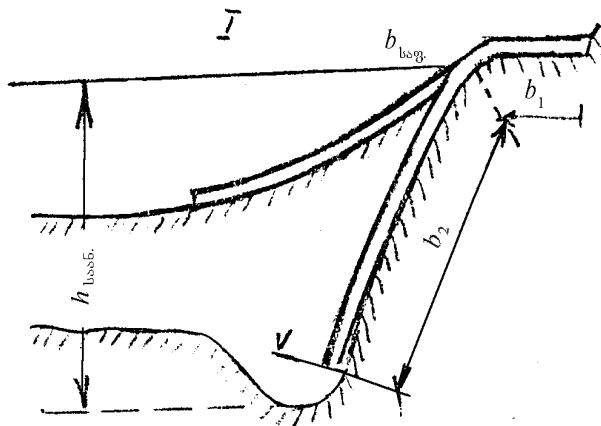
დამცავი საფარის სიგანე მეორე შემთხვევისათვის (ნახ. 4.3.2), როცა მოსალოდნელია ფერდობის პერიმეტრის ნაწილობრივი დეფორმაცია:

$$b_{\text{საფ.}} = b_1 + b_2 + b_3, \quad (4.3.4)$$

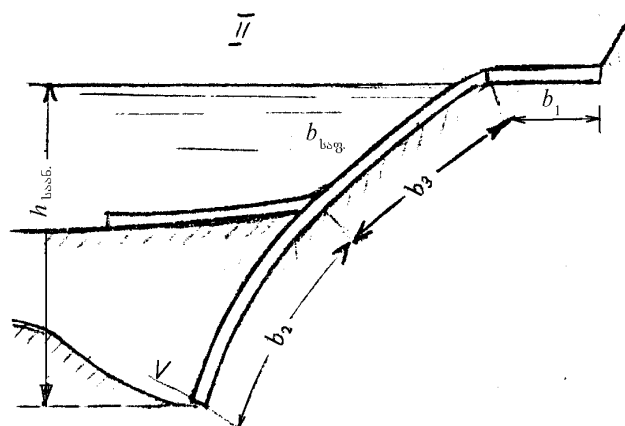
სადაც 
$$b_3 = h\sqrt{1+m^2},$$

ხოლო 
$$b_{\text{საფ.}} = b_1 + (h_{\text{საანგ.}} - h)\sqrt{1+m^2} - h\sqrt{1+m_3^2},$$

$h$  და  $m$  სიდიდეები დგინდება დაპროექტების დროს.



ნახაზი 4.31. ნაპირის დამცავი საფარი მთლიანად დეფორმირებად პერიმეტრზე



ნახ. 4.32. ნაპირის დამცავი საფარი ნაწილობრივ დეფორმირებად პერიმეტრზე

ნატურაში გამოკვლევები გვიჩვენებს, რომ ადგილობრივი გარეცხვის სიღრმეების და შესაბამისი ორმოს წარმოშობის გამო დასაცავ ფერდობსა და დამცველ საფარს შორის იწყება გრუნტის გამორეცხვა, რასაც მოსდევს დამცავი საფარის ელემენტებს შორის გამჭიმავი ძალების წარმოშობა და დამცავი საფარის დაცურების საშიშროება. მოსალოდნელი ავარიის სალიკვიდაციოდ საჭიროა განხორციელდეს აღძრული გამჭიმავი ძალების გაწონასწორება ხახუნის ძალებთან დამცავ საფარსა და დასაცავი ფერდობის ზედაპირს შორის, ან მოხდეს დამცავი საფარის ცალკეული ელემენტების გადაბმა ელასტიკურად და ჩაანკურება დასაცავი ნაპირის გასწვრივ.

გამჭიმავი ძალები, როგორც ცნობილია იანგარიშება დამოკიდებულით:

$$R = G \sin \alpha + F, \quad (4.3.5)$$

სადაც  $G$  – არის საფარის ელემენტების წონა, დამოკიდებული საფარის მასალაზე (მაგალითად რეზინის სალტე, შევსებული გრუნტით ან ქვით).

როცა საფარი მოთავსებულია წყალქვეშ, 1 მ სიგრძის ფერდობზე, მაშინ მოქმედი გამჭიმავი ძალა იანგარიშება დამოკიდებულით:

$$R_{\text{მაქ.}} = db(\gamma_{\text{საფ.}} - \gamma_{\text{წყლის}})\sqrt{1+f^2} \quad (4.3.6)$$

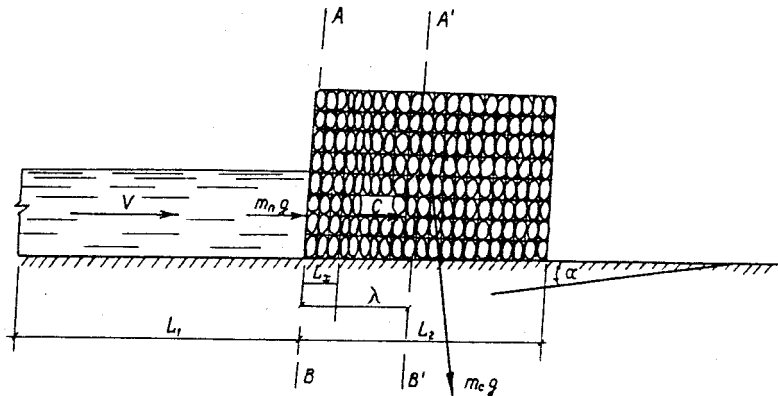
სადაც  $b$  – არის ფერდობის სიგრძე გარეცხვის შემდეგ.

აღნიშნულ  $R_{\text{მაქ.}}$  სიდიდეზე უნდა გაანგარიშდეს დამცავი საფარის ელე-

მენტის გადაბმა და მათი მიერთება დამჭერ საბრჯენებთან.

### ბ) ელასტიკური ტიპის კონსტრუქციები

ნაშრომში წარმოდგენილი გამჭოლი ელასტიკური ნაგებობები გათვალისწინებულია სხვადასხვა დანიშნულების ობიექტის დასაცავად ტალღური და დვარცოფული ნაკადებისაგან. ასეთ ნაგებობათა ტალღური ზემოქმედების საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 4.3.3-ზე.



ნახ. 4.3.3. ნაგებობაზე ტალღური ზემოქმედების საანგარიშო სქემა

აღნიშნული ტიპის ნაგებობის ნორმალური მუშაობა ბევრად არის დაკავშირებული მათი სტატიკურ მდგრადობასთან, მოსალოდნელი მყისი დატვირთვის პირობებში. საანგარიშო სქემა გამარტივებული სახით იხილავს ტალღის ზემოქმედებას ნაგებობაზე. ტალღის დარტყმის მომენტში ნაგებობის სადაწნო ზედაპირზე წარმოიშობა ე.წ. დეფორმაციის სიჩქარე  $C$ , რომელიც ნაგებობის სიგრძეზე განიცდის ცვალებადობას მის პირველად სიდიდესთან შედარებით და ნაგებობის ბოლოს უტოლდება 0-ს. ამასთან, მისი გავრცელების სიჩქარე, ნებისმიერ კვეთში ნაგებობის სიგრძეზე, პირველი მიახლოებით შეიძლება გამოისახოს დამოკიდებულებით:

$$C_x = (1 - L_x / \ell_2) C, \quad (4.3.7)$$

ხოლო ცოცხალი კვეთი

$$M = \int_0^{L_2} \frac{m_c C_x^2}{2} \cdot \frac{dL_x}{L_2}, \quad (4.3.8)$$

სადაც  $m_c$  – არის ნაგებობის მასა.

(4.3.8) გამოსახულებაში  $C_x$ -ის მნიშვნელობის შეტანის შემდეგ გვექნება:

$$M = \int_0^{L_2} \frac{m_c C^2}{2L_2} \left(1 - \frac{L_x}{L_2}\right) dL_x = \frac{m_c C^2}{6}. \quad (4.3.9)$$

მოძრაობის რაოდენობის განტოლება მოცემული სქემისათვის შემდეგნაირად შეიძლება ჩაიწეროს:

$$m_n C - \frac{1}{3} m_c C = m_n V, \quad (4.3.10)$$

სადაც  $m_n$  არის ნაკადის მასა, რომელიც ახორციელებს დარტყმას ნაგებობაზე, საიდანაც

$$C = \frac{m_n V}{m_n + 1/3 m_c}. \quad (4.3.11)$$

კინეტიკური ენერჯია  $m_n$  მასისა ნაგებობის მაქსიმალური შეკუმშვის დროს მთლიანად გარდაიქმნება პოტენციურ ენერჯიად ე.ი.

$$m_n g i(L_1 + \lambda) = \frac{\lambda^2 i^2 E \omega_2}{2L_2}, \quad (4.3.12)$$

სადაც  $V$  – არის ნაკადის სიჩქარე დარტყმის მომენტში;

$\lambda$  – ნაგებობის შეკუმშვის სიღიღე;

$E$  – ნაგებობის მასალის დრეკადობის მოდული;

$i = \sin \alpha L_1$  – ტალღის გადაადგილების სიგრძე;

$\omega_2$  – ნაგებობის განივკვეთის ფართი;

$L_2$  – ნაგებობის განივკვეთის სიგანე.

საანგარიშო სქემიდან და (4.3.10) განტოლებიდან დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$\frac{(m_n + 1/3 m_c) C^2}{2g} + m_n \lambda i = \frac{\lambda^2 i^2 E \omega_2}{2L_2 g}. \quad (4.3.13)$$

თუ (4.3.13) განტოლებაში შევიტანთ  $C$  სიღიღეს და ამოვხსნით  $\lambda$ -ს მიმართ, მივიღებთ:

$$\lambda = \lambda_{\text{სფ}} + \sqrt{\lambda_{\text{სფ}}^2 + 2\lambda_{\text{სფ}} i L_1 \left(1 + \frac{m_c}{3m_n}\right)}, \quad (4.3.14)$$

სადაც

$$\lambda_{\text{სფ}} = \frac{m_n g L_2}{E \omega_2}.$$

შესაბამისად, მაქსიმალური დაძაბულობა

$$\sigma_{\text{აქ}} = \frac{\lambda E}{L_2}. \quad (4.3.15)$$

თუ (4.3.14)-ის მნიშვნელობას შევიტანთ (4.3.15) დამოკიდებულებაში, მივიღებთ:

$$\sigma_{\text{აქ}} = \frac{m_n q}{\omega_2} + \sqrt{\left(\frac{m_n q}{\omega_2}\right)^2 + \frac{2m_n q}{\omega_2} \cdot \frac{L_1}{L_2} \left(1 + \frac{m_c q}{3m_n}\right) i}. \quad (4.3.16)$$

ნაგებობის მასალის სიმტკიცის პირობა შემდეგი სახით ჩაიწერება:

$$\sigma_{\text{აქ}} \leq R, \quad (4.3.17)$$

სადაც  $R$  – არის ნაგებობის მასალის საანგარიშო წინაღობა;

$L_2$  – სიდიდე (თანახმად სქემისა) განისაზღვრება ზღვრული წონასწორობის პირობიდან, როცა (4.3.17) გამოსახულებაში მიღებულია ტოლობის ნიშანი

$$L_2 = \frac{2m_n q E L_1 (1 + m_c / 3m_n) i}{R(R\omega_2 - 2m_n q)}. \quad (4.3.18)$$

ღვარცოფული ნაკადის დარტყმის ძალა ნაგებობაზე იანგარიშება გამოსახულებით

$$P = k \cdot S_1 \cdot \omega_1 \cdot V^2, \quad (4.3.19)$$

სადაც  $\omega_1$  – არის ღვარცოფული ნაკადის ცოცხალი კვეთი;

$S_1$  – ღვარცოფული მასის სიმკვრივე;

$k$  – ემპირიული კოეფიციენტი,

$k$ -ს სიდიდე, ყრუ ნაგებობის დარტყმის შემთხვევაში, მიღებულია 4,5. შესაბამისად, გვექნება

$$P = 4,5 S_1 \omega_1 V^2. \quad (4.3.20)$$

წყლის მასა, რომელიც ნაგებობაზე დარტყმით ზემოქმედებას ახდენს, შეიძლება გამოისახოს  $P$  ძალის მეშვეობით:  $m_n = qP$ , რის შემდეგ (4.3.20) გამოსახულება მიიღებს სახეს:

$$L_2 = \frac{2qPgEL_1(1 + m_c/3qP)i}{R(R\omega_2 - 2qP)}, \quad (4.3.21)$$

როცა  $P \ll m_n q$

$$L_2 = \frac{2KS_1\omega_1 V^2 qEL}{R(R\omega_2 - 2qP)}, \quad (4.3.22)$$

ვინაიდან წარმოდგენილი კონსტრუქცია გამჭოლია, შემასწორებელი კოეფიციენტი  $K_1$  ტოლია:

$$K_1 = P_{\text{გამჭ.}} / P_{\text{ყრ.}}$$

სადაც  $P_{\text{გამჭ.}}$  - არის ტალღის დარტყმის ძალა გამჭოლ ნაგებობაზე;

$P_{\text{ყრ.}}$  - იგივე ყრუ ნაგებობაზე.

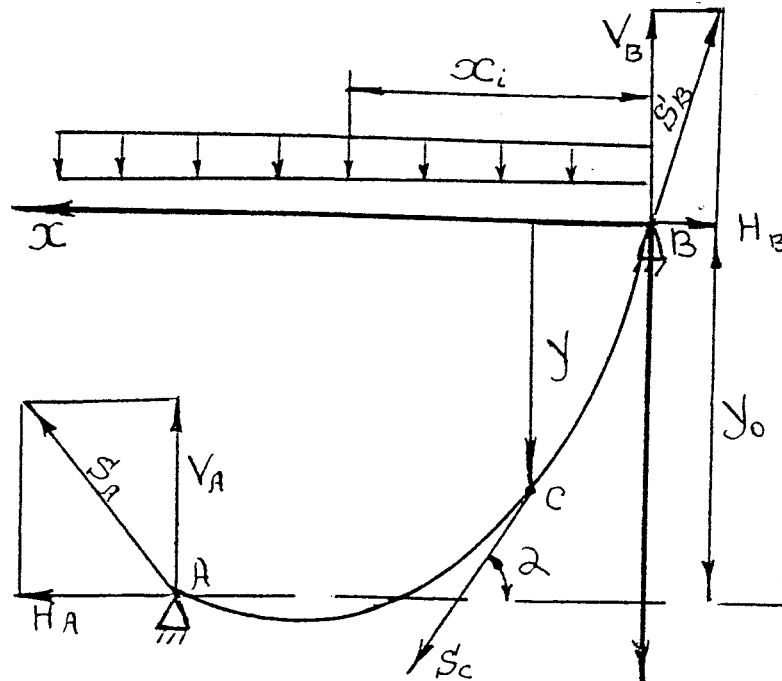
თანახმად საქწვალეკოლოგიის ინსტიტუტის გამოკვლევებისა

$$K_1 = \left[ (0.86 d_{\text{მსჯ.}} / d_{\text{მინ.}} - 0.16) \right]^{0.55} + 0.04V, \quad (4.3.23)$$

სადაც  $d_{\text{მსჯ.}}$  - არის ღვარცოფულ მასაში ჩართული ქვების მაქსიმალური დიამეტრი;  $d_{\text{მინ.}}$  - ნაგებობის გამჭოლიანობის მინიმალური დიამეტრი. გამჭოლი სელური ნაგებობის ოპტიმალური სიგანე შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს  $L_{2 \text{ გამ}} = K_1 L_2$

### გ) ვანტური ტიპის კონსტრუქციები

მეორე სახის ენერგიის ჩამქრობი კონსტრუქცია წარმოდგენილია ელასტიკური ტიპის ნაგებობის სახით და ცნობილი ვანტური ტიპის კონსტრუქციების მსგავსია (საანგარიშო სქემა ნახ. 4.3.4)



ნახ. 4.3.4. ვანტური ტიპის ელასტიკური ნაგებობის საანგარიშო სქემა

ნაგებობა წარმოადგენს რთულ სივრცობრივ დრეკად (ელასტიკურ) სისტე-

მას. მაქსიმალური დინამიკური და სტატიკური დატვირთვები ნაგებობაზე მოსალოდნელია მოხდეს იმ შემთხვევაში, თუ მას გამოვიყენებთ, როგორც ენერჯის ჩამქრობ ბარიერს, განსაკუთრებით ღვარცოფული ნაკადების ზემოქმედების შემთხვევაში. ნაგებობა განიხილება, როგორც ცალკეული ვანტებისაგან შემდგარი კონსტრუქცია და მთლიანი სისტემის გასაანგარიშებლად საკმარისია ერთ-ერთი მათგანის ანგარიში. ვიხილავთ შემთხვევას, როდესაც ვანტზე მოქმედებს თავისი სიმძიმის ძალა, რომელიც თანაბრად არის განაწილებული ვანტის მთელ სიგრძეზე, ხოლო ღვარცოფული მასით მიღებული დატვირთვა თანაბრად ნაწილდება ვანტის სიგრძეზე.

$q_1$  არის ვერტიკალური დატვირთვა, რომელიც გამოწვეულია ვანტის საკუთარი წონით და ნაგებობის ზედაპირთან შეჩერებული ღვარცოფული მასის წონით.  $q_2$  არის ჰორიზონტალური დატვირთვა, რომელიც ღვარცოფული მასის დინამიკური ზემოქმედებით არის გამოწვეული. ანგარიშის გამარტივების მიზნით აღნიშნული დატვირთვები შეცვლილია ერთი ტოლქმედი  $q$  ძალით. ვსაზღვრავთ ბაგირში წარმოქმნილ ძალებს. რეაქციის ძალებია  $S_A$  და  $S_B$ , რომლებიც გადაეცემა ბაგირს საყრდენებიდან და მიმართულია მხებად ვანტის მიმართ. ვინაიდან ვანტი არის აბსოლუტურად ელასტიკური, თითოეული რეაქციის ძალა შეიძლება დაიშალოს მდგენელებად  $V_A, H_B$ . ვიპოვოთ ისინი ვანტის წონასწორობის პირობიდან. ვახდენთ ყველა ძალის პროექციას ჰორიზონტალურ დერძეზე.

$$\sum X = H - H = 0, \quad (4.3.24)$$

სადაც  $H_A = H_B = 0$  ე.ი. განმრჯენი ძალები A და B წერტილებში ტოლია. იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ვერტიკალური მდგენელები  $V_A$  და  $V_B$ , ვწერთ წონასწორობის განტოლებას A და B საყრდენების მიმართ

$$\left. \begin{aligned} V_A l + H Y_a &= -q l^2 / 2 \\ V_B l + H Y_a &= q l^2 / 2 \end{aligned} \right\} \quad (4.3.25)$$

სადაც  $l$  – არის მანძილი საყრდენებს შორის.

ვინაიდან აღნიშნული განტოლებების სისტემა შეიცავს 3 უცნობს  $V_A, V_B$  და  $H$ , ვწერთ მესამე განტოლებას შემდეგი სახით, ვანტის მთლიანი სიგრძე ტოლია

$$L = \int_0^l \sqrt{1 + (Y')^2} dx. \quad (4.3.26)$$

$Y'$ -ის განსაზღვრისათვის ვიღებთ ყველა ძალის მომენტებს, რომლებიც მოქმედებს C წერტილიდან მარჯვნივ და ვუტოლებთ ნულს, ვინაიდან ვანტი



არის აბსოლუტურად ელასტიკური:

$$\sum M_c = q x^2/2 + Hy - V_B x = 0, \quad (4.3.27)$$

საიდანაც ვღებულობთ დრეკადი წირის განტოლებას შემდეგი სახით:

$$y = \frac{V_B X - qx^2}{H}. \quad (4.3.28)$$

(4.3.28) გამოსახულებიდან ვსაზღვრავთ მხების დახრის კუთხის ტანგენს ალნიშნული წირისათვის:

$$y^1 = \frac{V_B - qx}{H} = tg \alpha, \quad (4.3.29)$$

საბოლოოდ ვღებულობთ

$$L = \int_0^l \sqrt{1 + \frac{(V_B - qx)^2}{H^2}} dx = \int_0^l \frac{1}{H} \sqrt{H^2 + V_B^2 - 2V_B qx + q^2 x^2} dx. \quad (4.3.30)$$

ამრიგად, ერთობლივად უნდა ამოიხსნას ორი განტოლება (4.3.25) და (4.3.30) სამი უცნობით. რადგან (4.3.30) განტოლება ტრანსცენდენტულია, ანგარიშის გაადვილების მიზნით შედგენილ იქნა პროგრამა ელექტრონული გამოთვლელი მანქანისათვის.

ვანტის დაჭიმვა  $A$  და  $B$  საყრდენებში ტოლი იქნება:

$$S_A = \sqrt{V_A^2 + H^2}, \quad S_B = \sqrt{V_B^2 + H^2}. \quad (4.3.31)$$

ვანტის მაქსიმალური დაჭიმულობა წარმოიქმნება საყრდენების კვეთებში. ამასთან დაკავშირებით ვირჩევთ მაქსიმალურ  $S_A$  და  $S_B$ -ს და მის მიხედვით ვადგენთ ბაგირის კვეთს, შემდეგი პირობიდან გამომდინარე:

$$F \geq \frac{S_{\max}}{[R]}, \quad (4.3.32)$$

სადაც  $F$  – არის ბაგირის განივკვეთის ფართი;

$[R]$  – ბაგირის მასალის ზღვარი გაწვევებაზე.

ალნიშნული მეთოდები შემოწმებულ იქნა კონკრეტული ამოცანების გადაწყვეტის დროს და მიღებულ იქნა დამაკმაყოფილებელი შედეგები.

#### დ) კალაპოტის მდგრადობის საანგარიშო პარამეტრები

კალაპოტის მდგრადობის შენარჩუნებაში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება კალაპოტის სიგანის შეზღუდვის კრიტიკული სიდიდის დადგენას, რომელიც, თავის მხრივ, დამოკიდებულია ნაკადის ჰიდრავლიკურ და კალაპოტის მორფომეტრულ მახასიათებლებზე.

კალაპოტის შეზღუდვის საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 4.3.5-ზე.

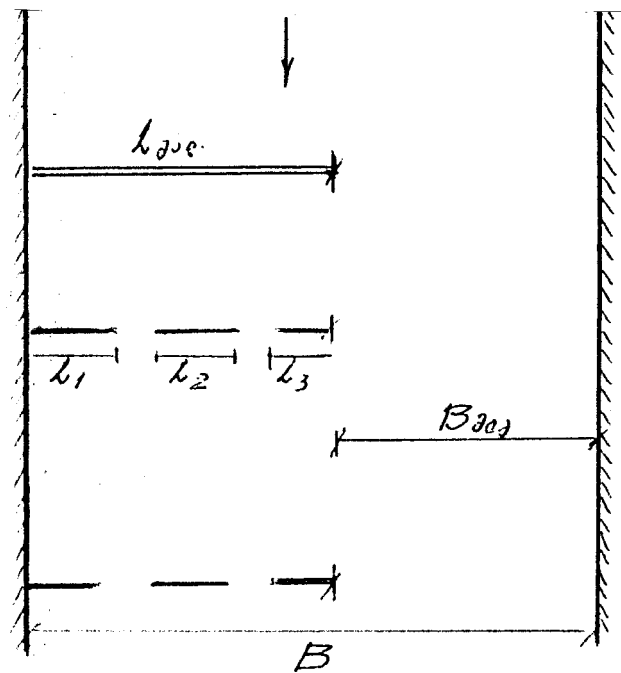
კალაპოტის შეზღუდვის კრიტიკულ სიდიდედ მიღებულია

$$n = \frac{L_{ნაგ.}}{B}, \quad (4.3.33)$$

სადაც  $n$  – არის კალაპოტის შეზღუდვის კოეფიციენტი;

$L_{ნაგ.}$  – კალაპოტის მარეგულირებელი ნაგებობის სიგრძე;

$B$  – კალაპოტის სიგანე.



ნახ. 4.3.5. კალაპოტის შეზღუდვის საანგარიშო სქემა

კვლევებმა გვიჩვენა, რომ როცა  $n \geq 0,3$ , ნაგებობის სითხით გარშემოედენის პარამეტრები განიცდის მოპირდაპირე ნაპირის გავლენას, ხოლო როცა  $n \leq 0,3$  მაშინ გარშემოედენის პარამეტრები მუდმივი რჩება. კალაპოტის მდგრადი განიკვეთის ზღვრული სიდიდე, როცა აქტიური ნაგებობა ყრუ ან გამჭოლი ნაკადის მიმართ მართობულად არის ორიენტიებული, შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$B - L_{ნაგ.}(1 + K) = B_{მღგ.}, \quad (4.3.34)$$

სადაც  $L_{ნაგ.}(1 + K)$  – არის აქტიური მარეგულირებელი ნაგებობის სიგრძე;

$K$  – გამჭოლიანობის კოეფიციენტი ( $K = L_{გაგ.} / L_{გრ.}$ );

$B$  – კალაპოტის მდგრადი სიგანე.

(4.3.34) გამოსახულებიდან ვღებულობთ:

$$1 - \frac{L_{\text{ნაგ}}(1+K)}{B} = \frac{B_{\text{მდ}}}{B}, \quad (4.3.35)$$

ან

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{n}{1-n(1+K)} \cdot B_{\text{მდ}}. \quad (4.3.36)$$

როგორც (4.3.36) გამოსახულებიდან ჩანს, ნაგებობის ოპტიმალური სიგრძე დამოკიდებულია მდგრადი კალაპოტის სიდიდეზე, რომელიც სწორხაზოვან უბანზე განისაზღვრება დამოკიდებულებებით:

$$B_{\text{მდ}} = \frac{2,6}{I^{0,2}} \left( \frac{Q}{\sqrt{g}} \right)^{0,4} \quad \text{როცა } I \geq 0,005$$

$$B_{\text{მდ}} = \frac{1,1}{I^{0,2}} \sqrt{Q} \quad \text{როცა } I \leq 0,005$$
(4.3.37)

(4.3.37) გამოსახულების გათვალისწინებით შეიძლება განისაზღვროს

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{1,647n}{[1-n(1+K)]I^{0,2}} \left( \frac{Q}{\sqrt{g}} \right)^{0,4} \quad \text{როცა } I \geq 0,005$$

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{1,1n}{[1-n(1+K)]I^{0,2}} \sqrt{Q} \quad \text{როცა } I \leq 0,005$$
(4.3.38)

სადაც  $Q$  – არის კალაპოტის მაფორმირებელი ხარჯი;

$I$  – კალაპოტის ქანობი.

იმ შემთხვევაში, როდესაც გვაქვს ერთ ნაგებობით კალაპოტის რეგულირება, ე.ი.  $K = 0$ , გვექნება:

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{1,647n}{(1-n)I^{0,2}} Q^{0,4} \quad \text{როცა } I \geq 0,005$$

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{1,1n}{(1-n)I^{0,2}} Q \quad \text{როცა } I \leq 0,005$$
(4.3.39)

მდგრადი კალაპოტის ზღვრული მდგომარეობის გათვალისწინებით, როცა  $n \geq 0.3$

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{0,705Q^{0,4}}{I^{0,2}} \quad \text{როცა } I \geq 0,005$$

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{0,47Q^{0,5}}{I^{0,2}} \quad \text{როცა } I \leq 0,005$$
(4.3.40)

თუ ნაგებობა არის გამჭოლი ტიპის, მაშინ მისი სიგრძე ტოლი იქნება

$$L_{\text{გაბ}} = L_{\text{ნაგ}} \cdot K; \quad (4.3.41)$$

რაც შეეხება მანძილებს ნაგებობებს შორის, ის იანგარიშება ფორმულით

$$L = L_{\text{ნაგ}} \sin \alpha \cot \beta + L_{\text{ნაგ}} \cos \alpha, \quad (4.3.42)$$

სადაც  $\beta$  – ნაკადის მოსვლის კუთხეა;

$\alpha$  – ნაგებობის მიერთების კუთხე ნაპირთან ან

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{0,705Q^{0,4}}{I^{0,2}} (\sin \alpha \cot \beta + \cos \alpha) \quad \text{როცა } I \geq 0,005 \quad (4.3.43)$$

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{0,47Q^{0,5}}{I^{0,2}} (\sin \alpha \cot \beta + \cos \alpha) \quad \text{როცა } I \leq 0,005$$

გამჭოლი ნაგებობის შემთხვევაში:

$$l_{\text{გაბ}} = l \cdot K \quad (4.3.44)$$

ანალოგიური მიდგომით, მოხვეული უბნებისათვის:

$$B_{\text{მღვ}} = \frac{0,47Q^{0,4}}{I^{0,5}} \quad \text{როცა } I \geq 0,005 \quad (4.3.45)$$

$$B_{\text{მღვ}} = \frac{0,58Q^{0,4}}{I^{0,08d^{0,5}}} \quad \text{როცა } I \leq 0,005$$

ხოლო

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{0,475n}{1-n(1+K)} \cdot \frac{Q^{0,4}}{I^{0,5}} \quad \text{როცა } I \geq 0,005 \quad (4.3.46)$$

$$L_{\text{ნაგ}} = \frac{0,585n}{1-n(1+K)} \cdot \frac{Q^{0,4}}{I^{0,08d^{0,5}}} \quad \text{როცა } I \leq 0,005$$

თუ მივიღებთ, რომ  $n = 0,3$ ;  $K = 0$ , მაშინ

$$L_{\text{ნაგ}} = 0,68Q^{0,4} / I^{0,5} \quad \text{როცა } I \geq 0,005 \quad (4.3.47)$$

$$L_{\text{ნაგ}} = 0,83Q / I^{0,08d^{0,5}} \quad \text{როცა } I \leq 0,005$$

სიმრუდის რადიუსი მდგრადი კალაპოტებისათვის მოხვეულობის უბანზე მიღებულია 4B-ს ტოლად.

მარეგულირებელი ნაგებობის ზომების დადგენის შემდეგ მიზანშეწონილია ჩატარდეს გაანგარიშებანი, რომლებიც უზრუნველყოფს ნაგებობის საიმედოობას, მისი მუშაობის სხვადასხვა პირობებისათვის (ნაკადის არახელსაყრელი კუთხით მოდინება, წყლის გადადინება ნაგებობის ზღურბლზე, ნაგებობის საძირკვლის გამორეცხვა და სხვ.). ჩატარებული კვლევების შემდეგ, არსებული რეკომენდაციების საფუძველზე, შედგენილ იქნა საიმედოობის დასადგენად შემდეგი სახის დამოკიდებულება:

ნაკადის ნაგებობასთან მოძინების კუთხე  $\beta$  გამოითვლება

$$\cos \beta = \frac{(A \cdot V^5 \cdot m^4)^{5/22}}{I \cdot Q^{5.22}}, \quad (4.3.48)$$

სადაც  $A$  – არის კოეფიციენტი, რომელიც მერყეობს 0,7÷1,7 ფარგლებში;

$V$  – გამრეცხი სიჩქარე;

$m$  – ხორკლიანობის კოეფიციენტი;

$I$  – მდინარის ფსკერის ქანობი.

შემოვიტანოთ აღნიშვნა  $(A \cdot V^5 \cdot m^4)^5 / I = K$ , მაშინ გვექნება:

$$\cos \beta = K / Q^{0.227}. \quad (4.3.49)$$

## თავი 5. წყალდენების კალაპოტების გამაგრება-რეაბილიტაციის სამუშაოების მეთოდების სრულყოფა

ცნობილია, რომ მდინარეების კალაპოტების, მისი ნაპირების, ხეობების ფერდობების, ტბების, ზღვის ფსკერის და მისი ნაპირის, ასევე სხვადასხვა დანიშნულების (კაშხლები, წყალმიმღები, წყალგამყოფი და სხვ.) ჰიდროტექნიკური ნაგებობების გამორეცხვისაგან დაცვა, აგრეთვე გამაგრება-რეაბილიტაციის ღონისძიებები, მოითხოვს წყალქვეშა სამუშაოების შესრულებას, რომელიც ძვირადღირებულ რთულ ტექნოლოგიებთან არის დაკავშირებული და დამოკიდებულია გასამაგრებლად გამოყენებული მასალების სახეობაზე, დასაცავი ობიექტის მდგომარეობაზე და ნაგებობების საძირკვლის ქვეშ მდებარე გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. რაც შეეხება გასამაგრებლად გამოყენებულ მასალებს, ესენია: ბეტონის და რკინაბეტონის სხვადასხვა ზომის და ფორმის კონსტრუქციები, ქვები, ასფალტ-ბეტონის, გრუნტ-ბეტონის და სხვა მასალებისაგან დამზადებული ლეიბები (ტიუფიაკები) და გაბიონები, ხის, ლითონის, რკინაბეტონის ხიმინჯები და ა.შ. გამოყენებული მასალის მიხედვით, ტრადიციულად არსებობს წყალქვეშა სამუშაოთა ტექნოლოგიური სქემა. ასე მაგალითად, ქვით, რკინაბეტონის კონსტრუქციებით და ხიმინჯებით წყალქვეშა გამაგრების შემთხვევაში

(მდინარეების, წყალსატევების და ზღვების დიდი სიღრმეების დროს) ტექნოლოგიური სქემა ითვალისწინებს ნაპირამდე მასალების მოზიდვას, შემდგომ მის ჩატვირთვას ბარჟაში, ტრანსპორტირებას მცურავ პლატფორმამდე, საიდანაც ამწის საშუალებით ხდება მათი ჩაყრა მონიშნულ ადგილას, ხოლო ხიმინჯების შემთხვევაში მცურავ პლატფორმაზე ამონტაჟებენ სპეციალურ ხიმინჯების ჩამსობ მოწყობილობას. ექსტრემალურ სიტუაციებში ამ მიზნისათვის იყენებენ საჰაერო ტრანსპორტს, ვერტმფრენის სახით. ტექნოლოგია საკმაოდ ძვირად ღირებულია, განსაკუთრებით მაშინ, როცა მდინარის, ტბის, ზღვის ფსკერი შედგება სუსტი გრუნტებისაგან, დიდი სიღრმისაა და ტალღურ ზემოქმედებას აქვს ადგილი.

პრაქტიკიდან შეიძლება მოვიყვანოთ იმის კლასიკური მაგალითები, როცა ასეთი ტექნოლოგიით შესრულებული სამუშაოები, განსაკუთრებით სუსტი გეოლოგიური აღნაგობის ფსკერისათვის საერთოდ შედეგს არ იძლევა, ან ნაკლებად ეფექტურია. ტრიესტის პორტის რეკონსტრუქციის დროს ახლად აშენებული 1 კმ სიგრძის მოლი, რომელიც ამოყვანილი იყო საპროექტო ნიშნულამდე, სამუშაოს მიღებამდე რამდენიმე დღით ადრე ფსკერმა შთანთქა, ანალოგიური სურათი განმეორდა მდ. რიონის წყალგამყოფი კვანძის ქვედა ბიეფის რეკონსტრუქციის დროს, 1979-1982 წლებში. ორივე შემთხვევაში არასწორად იქნა შერჩეული სამუშაოს წარმოების ტექნოლოგია, რომელიც არ ითვალისწინებდა ფსკერზე განლაგებული გრუნტების ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებს, მათზე დასაშვებ დატვირთვებს, რის შედეგად მოხდა წყლით გაჯერებული გრუნტის გადინება და ჩაყრილი გასამაგრებელი მასალის – ქვის და ბეტონის კუბიკების შთანთქმა ფაფისებურ მასაში.

რაც შეეხება გამაგრებას, ბეტონის, რკინაბეტონის, ასფალტ-ბეტონის და სხვა სახის ლეიბებით (ტიუფიაკებით) შესრულების ტექნოლოგია ითვალისწინებს სპეციალურ დოლზე (ბარაბანზე) მათ დახვევას რულონების სახით, ხოლო შემდგომ მისი მდინარის კალაპოტის ფერდობზე ან ფსკერზე დაფენას პლატფორმიდან ამწეს საშუალებით. დოლზე (ბარაბანზე) ლეიბის დახვევის და მის ფსკერზე ან ფერდობზე დაფენის პროცესი მეტად რთულია და არც ისე ზუსტი, დასაცავი ფართობის გადაფარვის თვალსაზრისით. იყო მცდელობა ამწეების სპეციალურ ვაკუუმ-ჩარჩოებით აღჭურვისა და მათი მეშვეობით ასფალტბეტონის ლეიბების ფსკერზე და

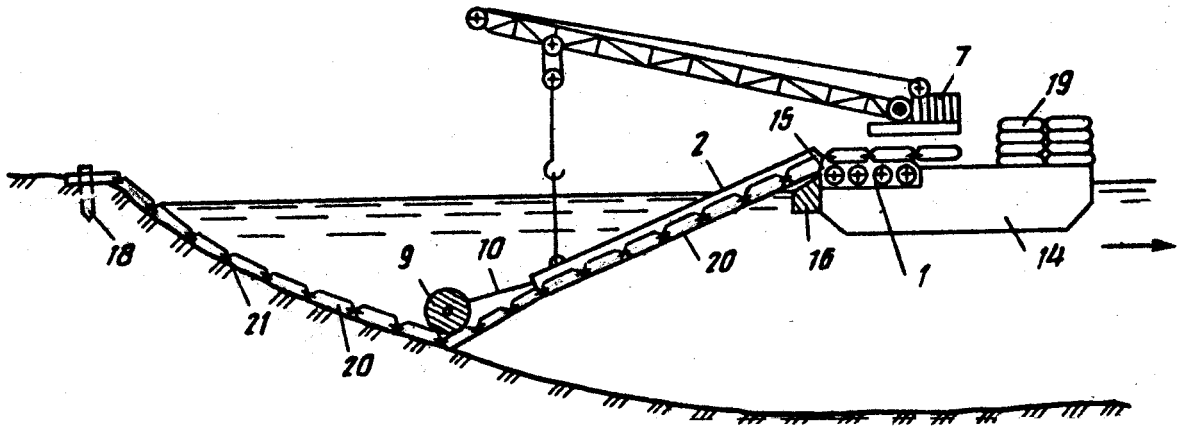
ფერდობზე დალაგების.

ამრიგად, მდინარეების და წყალსაცავების ფსკერისა და ფერდობების არსებულმა გამაგრების მეთოდებმა და მათი შესრულების ტექნოლოგიებმა კიდევ ერთხელ დაადასტურა, რომ ტრადიციული მიდგომები მეტად შრომატევადია, და დიდ ენერგორესურსების ხარჯვასთან არის დაკავშირებული, ხოლო მიღებული შედეგები ყოველთვის ვერ უზრუნველყოფს სასურველ მიზანს, რადგან არ არსებობს ზუსტი კონტროლი დაზიანებული ზედაპირის დამცველი საფენებით გადაფარვაზე.

გაითვალისწინა რა დასმული ამოცანის სირთულე და, ამასთან, საპროექტო ორგანიზაციების აზრი წყალდენების კალაპოტების ფსკერისა და ფერდობის გამაგრება-რეაბილიტაციის სამუშაოების წარმოების ტექნოლოგიური პროცესების გამარტივების და სრულყოფას შესახებ, საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტის გარემოს დაცვის ლაბორატორიაში ამ მიმართულებით ჩვენს მიერ განხორციელდა მთელი რიგი კვლევები და სამუშაოები, როგორც ლაბორატორიულ, ასევე ნატურის პირობებში, შეიქმნა ფსკერის და ფერდობების გამაგრების ახალი მეთოდები, დამუშავდა მათი შესრულების ტექნოლოგიები, როგორც მდინარეების და წყალსაცავების, ასევე ზღვისპირა მიმდებარე ტერიტორიების დასაცავად დატბორვისა და ტალღური ზემოქმედებისაგან [60, 61, 62, 88, 92].

ქვემოთ, მოცემული შემთხვევისათვის წარმოდგენილია წყალქვეშა სამუშაოს წარმოების ტექნოლოგიის ორი სქემა:

პირველი ითვალისწინებს მდინარის ფერდობის და ფსკერის გამაგრებას უწყვეტ (ლენტური) სისტემით, დამცავი საფარის აწყობა, გადაბმა და დასაცავი ობიექტის ზედაპირზე წყალქვეშ დაფენა ხდება ერთდროულად, მცურავი პლატფორმიდან, სპეციალური მოწყობილობის საშუალებით (ნახ. 5.1).

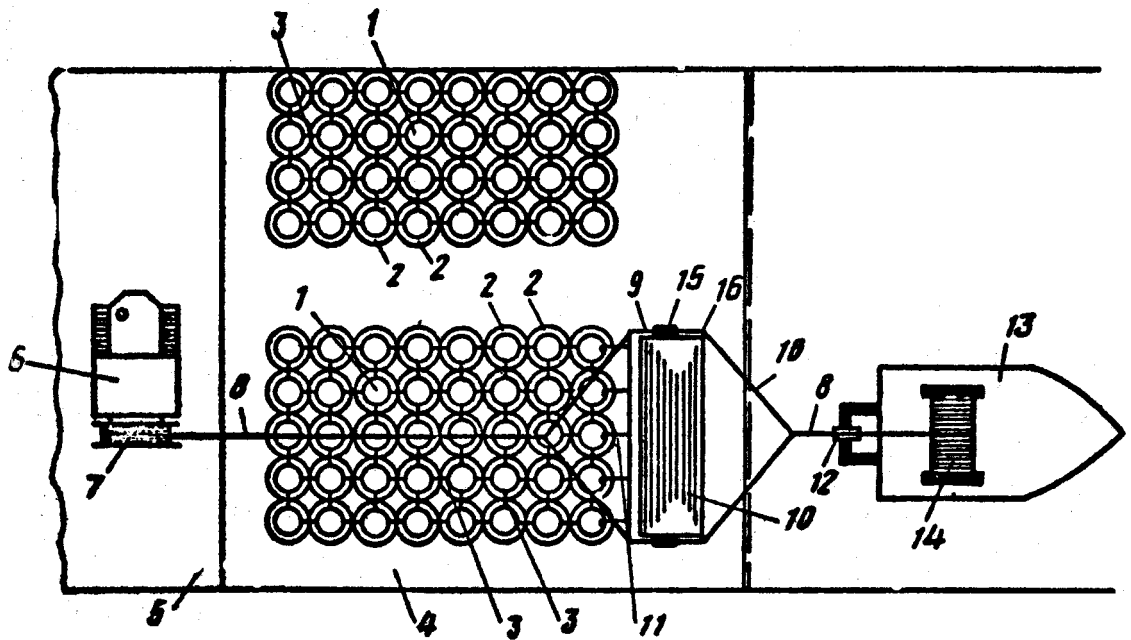


ნახ. 5.1. მდინარის ფერდობის და ფსკერის გამაგრება უწყვეტი სისტემით, დამცავი საფარის მცურავ პლატფორმაზე აწყობით

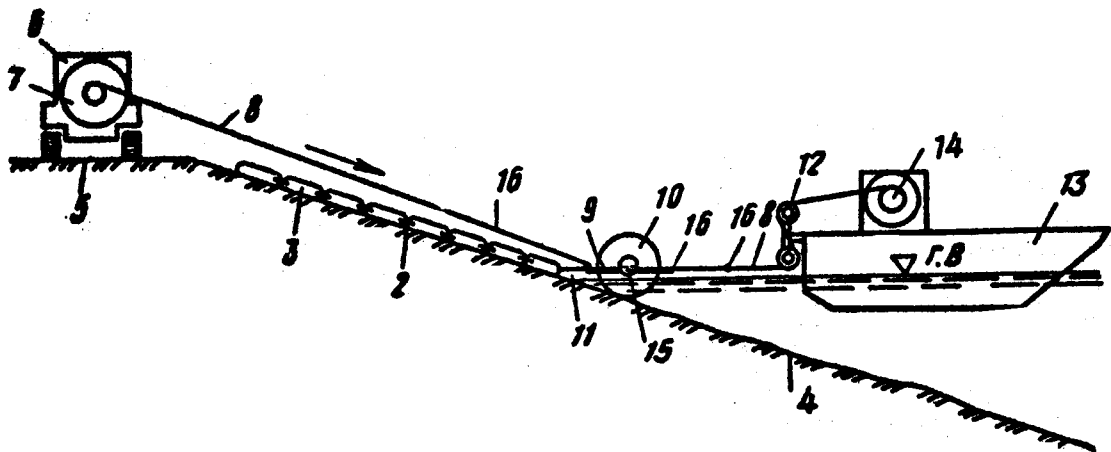
1 \_ მცურავი პლატფორმა მოძრავი ბაქნით (გორგოლაჭებით), 2 \_ მიმმართველი ჩარჩო, 3 \_ მიმმართველი ჩარჩოს საყრდენი, 4 \_ მიმმართველი ჩარჩოს პერფორირებული ფსკერი, 5 \_ მიმმართველი ჩარჩოს თავსახური, 6 \_ მიმმართველი ჩარჩოს საყურეები ამწე მექანიზმის ჩასაბმელად, 7 \_ ამწე მექანიზმი, 8 \_ მიმმართველი ჩარჩოს თავსახურის ასახდელად, 9 \_ საგორავი, 10 \_ საგორავის მიმმართველი დერო, 11 \_ საგორავის დამაგრების მარეგულირებელი ელემენტი, 12 \_ ბაგირი, საგორავის მუშა სიგრძის დასარეგულირებლად, 13 \_ ჯალამბარი ბაგირის სიგრძის დასარეგულირებლად, 14 \_ მცურავი საშუალება, 15 \_ მიმმართველი ჩარჩოს დამაკავშირებელი სახსარი მცურავ მოწყობილობასთან, 16 \_ მიმმართველი ჩარჩოს კუთხის შემზღუდავი, 17 \_ დასაცავი ზედაპირი, 18 \_ ნაპირზე დამცავი საფარის დასამაგრებელი პალო, 19 \_ მცურავ პლატფორმაზე დამცავი საფარის დასაწყობი ადგილი, 20 \_ მიმმართველ ჩარჩოში დამცველი საფარის საფენის ბლოკები, 21 \_ საფენი-დამცავი ბლოკების გადაბმა.

მეორე სქემა ითვალისწინებს მდინარის ფერდობის და ფსკერის გამაგრებას უწყვეტი (ლენტური) სისტემით, რომლის დროსაც დამცავი საფარის აწყობა და გადაბმა ხდება ნაპირზე, ხოლო დასაცავი ობიექტის ზედაპირზე მისი დაფენა ხორციელდება კატერის მეშვეობით, რომელიც ნაპირზე აწყობილი საფენის ბუქსირებას აწარმოებს წყალქვეშ სპეციალური მოწყობილობების საშუალებით, საჭირო მიმართულებით (ნახ. 5.2, 5.3).





ნახ. 5.2. მდინარის ფერდების და ფსკერის გამაგრება უწყვეტი სისტემით დამცავი საფარის ნაპირზე აწყობით (ზედხედი)



ნახ. 5.3. მდინარის ფერდების და ფსკერის გამაგრება უწყვეტი სისტემით დამცავი საფარის ნაპირზე აწყობით (გვერდხედი)

1 \_ დამცავი საფარის სექცია, აწყობილი ნაპირზე, 2 \_ დამცავი საფარის შემადგენელი ბლოკები, 3 \_ ბლოკების ელასტიკური კავშირები, 4 \_ დასაცავი ნაპირი, 5 \_ დასაცავი ნაპირის ბერმა, 6 \_ ტრაქტორი \_ თვითმავალი მექანიზმი, 7 \_ ჯალამბარი, რომელიც მოთავსებულია ტრაქტორზე, 8 \_ დამჭერი ბაგირი, 9 \_ საგორავის ჩარჩო, 10 \_ საგორავი, 11 \_ საგორავის ჩასაბმელი კაუჩუბი, 12 \_ ბაგირის მარეგულირებელი სისტემა, 13 \_ მცურავი პლატფორმა, 14 \_

ჯალამბარი მცურავ პლატფორმაზე, 15 – საგორავის ღერძი, 16 – დასამაგრებელი მოწყობილობები.

წარმოდგენილი გამაგრების ტექნოლოგიური პროცესების სქემები საშუალებას იძლევა წყალდენების კალაპოტების ფსკერისა და ფერდების გამაგრებარეაბილიტაციის სამუშაოები ჩატარდეს წყალქვეშ დიდი სიღრმეების პირობებში, დასაცავი ობიექტის ზუსტი დაფიქსირებით და ამავე დროს დამცავ საშუალებად გამოყენებულ იქნეს როგორც ბეტონის, რკინაბეტონის, ასფალტბეტონის ლეიბები (ტიუფიაკები), გაბიონები, ისე ღრუტანიანი ბლოკები, გათვალისწინებულია აგრეთვე ქვებით გამაგრების შესაძლებლობები. დამუშავებული მეთოდების მუშაობის პრინციპები და სხვა დეტალური აღწერილობა მოცემულია საავტორო მოწმობებში (იხ. ს.მ. №1416597, ს.მ. №1565103) [86, 88].

წყალდენების კალაპოტების ფსკერისა და ფერდების გამაგრების ტექნოლოგიური სქემები საფუძვლად დაედო რეკომენდაციებს მდ. რიონზე წყალგამყოფი სათავე კვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის აღდგენა-რეაბილიტაციის სამუშაოების შესრულებაზე, რეკომენდაცია მოწონებულ იქნა მაშინდელი მელიორაციისა წყალთა მეურნეობის დეპარტამენტის ტექნიკურ-ეკონომიკურმა საბჭოს მიერ (ოქმი №3, 22 ივლისი 1998 წელი) და სარეალიზაციოდ გადაეცა “წყალპროექტს”.

## ძირითადი დასკვნები

ნაშრომში წარმოდგენილი თეორიული ექსპერიმენტული და ნატურაში კვლევების საფუძველზე წარმოდგენილია შემდეგი დასკვნები:

– მრავალმხრივი კვლევების მიუხედავად, დღემდე არ არსებობს ბუნებაში ფიქსირებული წყალდიდობებით გამოწვეული წყალდენების კალაპოტებში მიმდინარე რთული პროცესების პროგნოზირების და რეგულირების ერთიანი სრულყოფილი მეთოდები, რის გამოც აუცილებელი ხდება აღნიშნული მოვლენების დიფერენცირებული შესწავლა და წყალდენების კალაპოტების გამტარუნარიანობის საიმედოობის უზრუნველყოფა კვლევის თანამედროვე მიდგომების გამოყენებით;

– ლაბორატორიული კვლევების სტანდარტული და მოდიფიცირებული მეთოდების, ნატურული და ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე შესწავლილია წყალდენების კალაპოტში მიმდინარე პროცესებზე მოქმედი ძირითადი ფაქტორები. შემოთავაზებულია არაგამრეცხი სიჩქარეების საანგარიშო დამოკიდებულებები;

– წყალდენების ნატანის ტრანსპორტუნარიანობის გათვალისწინებით და კალაპოტის ჰიდრავლიკური და მორფომეტრული მახასიათებლის მხედველობაში მიღებით მოცემულია მდინარეთა ჰიდროტექნიკური კლასიფიკაცია, წყალდიდობებით მოსალოდნელი გართულებების პროგნოზი და გარემოსდაცვითი ღონისძიებების სახეები;

– წყალდენების კალაპოტების რეგულირების არსებული ტრადიციული მიდგომების ანალიზის, ბუნებაში მიმდინარე შეუქცევადი პროცესების, არაგანახლებადი ენერგეტიკული და მატერიალური რესურსების ინტენსიური კლებისა და გარემოს ეკოსისტემებზე მზარდი ტექნოგენური ზემოქმედების გათვალისწინებით შექმნილია ჰიდროკვანძების ზედა ბიეფის მარეგულირებელი (მდ. რიონზე, ქ. ფოთთან არსებული ჰიდროკვანძის მაგალითზე), წყალდენების ფსკერისა და ფერდების დეფორმაციების, ხევების ეროზიული პროცესების, სანაპირო ზონების ტალღური ზემოქმედებისაგან დამცავი ახალი ენერგო და რესურსმზოგი,

ეკოლოგიურად უსაფრთხო საინჟინრო ნაგებობები და მოწყობილობები, რომელთა სიახლის პრიორიტეტი დაცულია საავტორო მოწმობებით;

– ალბათურ-სტატისტიკურ მეთოდებზე დაყრდნობით, მრუდხაზოვანი კორელაციის მეთოდის გამოყენებით, ექსპერიმენტის დაგეგმვის მათემატიკური თეორიის საფუძველზე, გამოყვანილია წყალდენების კალაპოტის დამცავი ნაგებობების საპროექტო პარამეტრების საანგარიშო ახალი დამოკიდებულებები;

– კალაპოტში მიმდინარე დეფორმაციული პროცესების შესწავლის საფუძველზე დამუშავებულია მდ. რიონზე არსებული წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის რისხერმის გამაგრების რამდენიმე ვარიანტი;

– ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დადგენილია, რომ კალაპოტური მოვლენების საწინააღმდეგო მოთხოვნებს წარმატებით აკმაყოფილებს ცილინდრული ტიპის ღრუტანიანი ბლოკები, ტორისებრი ფორმის ჰიდროტექნიკური ნაგებობა, რისთვისაც გამოიყენება მეორადი, იაფი სამშენებლო მასალები: ძველი საბურავები, რკინიგზის ძველი რელსები და სხვ.;

– მდინარის კალაპოტისა და მისი ნაპირის გარეცხვის საწინააღმდეგოდ შემოღებულია გამარტივებული სახისა და ტექნოლოგიის რესურსმზოგი ჰიდროტექნიკური ნაგებობები.

– წყალდიდობებით გამოწვეული კალაპოტური პროცესების კვლევის, ბუნებრივ წყალდენებში ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობით შექმნილი სირთულეების ანალიზით მიღებული ჰიდრავლიკური და მორფომეტრული მახასიათებლები და გარემოს ეკოლოგიური მდგრადობის შენარჩუნების პირობები დაედო საფუძვლად ახალი გარემოსდამცავი ნაგებობების კონსტრუირებისა და დაგეგმარების მეთოდებს, მშენებლობის წარმოების ორგანიზაციას და ტექნოლოგიების სრულყოფას;

– ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ წარმოდგენილ ნაგებობათა მუშაობის საიმედოობა, მათი გარემოსთან შერწყმის უნარი, მშენებლობისა და ექსპლუატაციის სიმარტივე და ეკონომიურობა საშუალებას იძლევა შენარჩუნებულ იქნეს წყალდენების მდგრადი კალაპოტები, დაცული იყოს მდინარეების, წყალსაცავების,

ზღვის სანაპირო ზოლის რეცხვადი ნაპირები და მიწის რესურსები, მათზე განლაგებული სხვადასხვა დანიშნულების სასიცოცხლო ობიექტები.

### გამოყენებული ლიტერატურა

1. Абальянц С. Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. Л. Гидрометеиздат, 1981, 240 с.
2. Аверьянов С.Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод. «Колос», М., 1982, 234 с.
3. Алиев Т.А. Исследование рус каналов, формируемых потоком в связных грунтах. Автореф. Дис. К.т.н. –м.: ВНИИГиМ, 1978, 19 с.
4. Алтунин С.Т. Регулирование русл рек –М.: Сельхозиздат, 1962, 271с.
5. Алтунин В.С. Деформация русл каналов. – М.: Колос, 1972, 120 с.
6. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах – М.: Колос, 1979, 255 с.
7. Алтунин В.С., Алиев Т.А., Халыклычев Б.Р. Гидравлические расчеты устойчивого русла канала в легкоразмываемых грунтах. – Гидротехническое строительство, 1980, № 8, с.38-42.
8. Алтунин В. С., Сичинава О. А. Способы защиты русл равнинных рек и каналов от береговых деформаций. – Гидротехника и мелиорация, 1985, №5, с.21-23.
9. Артамонов К.Ф. Регулировочные сооружения при водозаборе на реках в предгорных районах. Фрунзе, изд –во АН Кирг. ССР, 1963, 342с.
10. Бзиава К.Г. Гидравлическая модель расчета фильтрации из естественных каналов. Сб. научных трудов ГрузГАУ, т. XXIX, Тбилиси, 2004, с. 143-146.
11. Бурлай И.Ф. О начальной скорости донного влечения. – Метеорология и гидрология, 1946, №6, с. 36-40.
12. Бухин М.Н., Онищук В.В. Определение неразмывающих скоростей для неоднородных несвязных грунтов. – В кн.: Эрозионные и селевые процессы и борьба с ними, 1978, вып. 6, Тбилиси, с. 19-26.

13. Великанов М.А. Гидрология суши. Изд. Гидрометеоиздат, Л., 248 с.
14. Вершинин П.В. Почвенная структура и условия ее формирования. М.-Л., АН СССР, 1968, 188 с.
15. Великанов М.А. Русловой процесс – М.: Госфизматгиз, 1958, 395 с.
16. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. т. 1, 1954, 322 с, т. 2. Гостехиздат, М., 1955, 323 с.
17. Высоцкий Г.Н. Очерки о почвах и режиме грунтовых вод. «Бюллетень почвовед» №1-2, 1967, с. 27-31; №5-8, с. 37-40
18. Войнич-Сяноженцкий Т.Г. Гидродинамика устьевых участков рек и взморий бесприливных морей.- Труды ЗакНИГИМ, 1972, вып.46 (52). Л.: Гидрометеоиздат, 203 с.
19. Гавардашвили Г.В. Новые виды противоселевых сооружений и методика их расчёта. В кн.: Защита народнохозяйственных объектов от воздействия селевых потоков (Материалы Международной конференции по селям), Новочеркасск- Пятигорск, 2003, с.79-81.
20. Гавардашвили Г.В., Цулукидзе Л.Н. Противоэрозионное сооружение для горных откосов. Патент Грузии №1080И, бюлл.№5(153), Тбилиси, 2004, 18с.
21. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. «Сабчота Сакартвело», Тбилиси, 1970, 380 с.
22. Гвелесиани Л.Г. К вопросу исследования природных наносов. Метеорология и гидрология, 1939,№6, с. 67-75.
23. Гиоргадзе С.А., Хараишвили О.И., Одилавадзе Т.В., Купреишвили Ш.З. Определение капиллярного потенциала в почво-грунтах. «Проблемы аграрной науки». Сб. научных трудов, 2004, с. 124-126.
24. Глушков В.Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований – М.: Изд-во АН СССР, 1961,156 с.
25. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков – М.: Гидрометеоиздат, 1962, 374 с.
26. Гришанин К.В. Устойчивость русел рек и каналов – Л.: Гидрометеоиздат, 1974, 142с.

27. Губеладзе Д.О. Влияние руслового потока на подруговое фильтрационное течение. АСХН Груз., Тбилиси, 1991, с. 165.
28. Егиазаров И.В. О расходе влекомых наносов. – Известия АН Арм. ССР, 1949, т. 2, №5, с. 321-338.
29. Егиазаров И.В. Сопоставление методов расчета расхода наносов с измерениями в натуре. – В кн.: методы изучения и использования водных ресурсов. – М.: наука, 1964, с. 142-148.
30. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1981, 312с.
31. Жордания Т.Г. Влажность как один из основных факторов, определяющих размываемость связных грунтов. – Труды ГрузНИИГиМ, 1957, вып. 18-19, с. 62-69.
32. Жордания Т.Г. Результаты полевых исследований по уменьшению склоновой эрозии с помощью нерозина. Эрозионные и селевые процессы и борьба с ними. Сборник научных трудов. Выпуск 1. Москва, 1972 с. 52-55.
33. Знаменская Н.С. Донные насосы и русловые процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1976, 191 с.
34. Зон В.В. Строфонда обтекания и обтекаемые формы в дорожно-мостовом деле. Труды Ленинградского Автодорожного института, сбор №7, Дориздат, 1954, с. 29-34.
35. Ибад-заде Ю.А. Водопроводные каналы. – М.: Стройиздат, 1975, 192 с.
36. Кадыров А.А., Булапкин В.И. Стабилизация русел крупных каналов в несвязных и полусвязных грунтах. – В кн.: Гидравлические исследования в водном хозяйстве. – М.: 1982, с.61-69.
37. Кацарава Т.Е. К вопросу расчета фильтрации через земляные сооружения с учетом начального градиента. Труды ГрузНИИ гидротехники и мелиорации, вып. 25. Т., 1967, с. 194-200.
38. Кацарава Т.Е. К вопросу установления некоторых гидрологических характеристик почво-грунтов. Труды ГрузНИИ гидротехники и мелиорации, вып. 27. Т., 1969, с. 213-216.

39. Качинский Н.А. Физика почв. «Высшая школа», М., 1965, 318 с.
40. Кереселидзе Н. Б. Некоторые вопросы устойчивости течения потока в деформируемых руслах и устойчивость граничных поверхностей (ложе русла). Известия ТНИИСТЭИ, 1967, т. 17, с. 3-20.
41. Клячко Л.С. Приближенный метод определения начальной скорости трогания твердых донных частиц. – Известия АН СССР, ОНТ, 1952, №3, с.28-35
42. Кнороз В.С. Неразмывающие (предельные) скорости разнозернистых по крупности материалов. – Известия ВНИИГ, 1962, т. 71, с.19-38.
43. Кнороз В. С. О деформациях дна и о их влиянии на гидравлические режимы потоков. – Труды III, Всесоюзного гидрологического съезда, т. 5, 1960, с. 166-176.
44. Кнороз В.С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы ее определяющие. - Известия ВНИИГ, т. 59,1958, с.62-71
45. Костяков А.Н. Основы мелиорации. Сельхозгиз. М., 1960, 622 с.
46. Круашвили И.Г. Прогнозирование процессов водной эрозии на горных и предгорных водосборах. Автореферат докторской диссертации. Тбилиси, 1999, с 1-52.
47. Кузьминов Ю.М. Мелиоративные каналы в легкоразмываемых грунтах. – М.: Колос, 1977, 192 с.
48. Кухалашвили Э.Г. К оценке гранулометрического состава селевого потока. Респ. научная конференция молодых ученых и аспирантов на тему «Водохозяйственное строительство и мелиорация в Грузии» (тезисы докладов). Тбилиси, 1981, с. 18-19
49. Кухалашвили Э. Г., Сичинава П. О., Ундилашвили Н. В. Условия движения многокомпонентных потоков. Известия аграрной науки. Изд. « Универсал». Т.3, 2005, с. 98-101
50. Леви И. И. Движение речных потоков в нижних бьефах гидротехнических сооружений. - М. - Л.: Госэнергоиздат, 1955, 256 с.
51. Лыков Л.В. Явления переноса в капиллярных пористых телах. Гос. изд. ТТЛ, М., 1954, 296 с.



52. Маслов Б.С. Режим грунтовых вод переувлажненных земель и его регулирование. М.: Колос, 1970, с. 57-62.
53. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1982, 511 с.
54. Мирцхулава Ц.Е. Надежность гидромелиоративных сооружений М.: Колос, 1974, 325с.
55. Мирцхулава Ц.Е. Приближенное моделирование процессов размыва связных грунтах. – Гидротехническое строительство, 1985, №1, с.21-24.
56. Мирцхулава Ц.Е. О надежности крупных каналов – М.: Колос, 1981, 318с.
57. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русл и методика оценки их устойчивости - М.: Колос, 1967, 180с.
58. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии – М.: Колос, 1970, 240с.
59. Мирцхулава З.Ц. Исследование деформации размываемых сооружений и методы их прогноза-1984, автореф, дисс. К.т.н., Тбилиси, 18с.
60. Натишвили О.Г. О некоторых частных задачах переноса твердых частиц русловым потоком. Сб. Трудов ВАСХИЛ «Противоэрозионные гидротехнические мероприятия и орошение в горных условиях» М. Изд-во «Колос» 1976, с. 123-129.
61. Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Гидравлические закономерности связных селей. Мецниереба, Тбилиси, 1996, с. 1-52.
62. Нафетваридзе Т.Ш. Сичинава О.А. Надежность струенаправляющих дамб и траверс по признаку недопущения образования воронки местного размыва у дна оголовка. Республиканская научная конференция «Водохозяйственное строительство и мелиорация в Грузии», Тезисы докладов, Тбилиси, 1981, с.42-43.
63. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Физика почв. Л., Гидрометеиздат, 1967, 583 с.
64. Одилавадзе Т. В., Кацарава Т.Е. Определение высоты капиллярного поднятия в гидрофильных пористых телах. Сборник научных трудов «Проблемы аграрной науки», Тб., 2004, с. 121-123.

65. Одиладзе Т.В. Кинематика капиллярного передвижения влаги в почво грунтах. Изв. Армянской сельхоз. Академии, 2005, с. 69-71.
66. Одиладзе Т. В., Купреишвили Ш. З. Определение основных гидромеханических и морфометрических параметров склонового потока. «Известия аграрной науки», т. 3, 2005, с. 101-104
67. Пас Мартинес Хавьер. Исследование влияния формы русла на кинематическую характеристику потока и разработка рекомендаций по расчету земляных каналов. Автореф. дисс. к.т.н., М.: МТУ, 1983, 23 с.
68. Печкуров А. Ф. Устойчивость русла регулированных рек. Минск, Ураджай, 1950, 125с.
69. Пхакадзе П.С., Сичинава О.А. Некоторые результаты исследования эрозии осушительной системы в условиях Колхиды. Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова. Эрозионные и селевые процессы и борьба с ними сборник научных трудов. Выпуск I, Москва, 1972, с.111-117.
70. Пхакадзе П.С., Сичинава О.А. Исследование осушительных систем Колхиды. Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР. Белорусский научно-исследовательский институт мелиорации и водного хозяйства, спец. Выпуск сборника мелиорация осушительных систем в зоне избыточного увлажнения. Минск, 1974, с. 48-51.
71. Рабкова Е.К. Метод расчета больших каналов. – Гидротехника и мелиорация, 1976, №4, с. 25-31.
72. Рубинштейн А.Л. Совместное влияние фильтрационного и руслового потока на величину размывающей скорости – Известия ВНИИГ, 1954, с. 112-116.
73. Сергеев Е. М. Грунтоведение. Изд-во Московского университета. 1983, 388 с.
74. Сичинава О. А., Кухалашвили Э.Г., Сиамашвили А.Р., Гвилия М.З. Новые конструкции энергогасящих сооружений системы ГрузНИИГиМ. Проблемы противоселевых мероприятий. Главное управление по строительству и эксплуатации селезащитных сооружений при совете министров казахской ССР.

- Научный совет акад.наук.СССР по инженерной геологии и гидрологии. Сборник научных трудов Алма-Ата «Казахстан».1988, с 138-145.
75. Сичинава О.А., Кухалашвили Э.Г. А.С. №413185 (СССР), «Противоселевое устройство». / ГрузНИИГиМ – заявлено 11.12.84, 3824263, с. 29-15
76. Сичинава О. А., Зубкова Н.Г. О надежности каналов на изогнутых участках. Минводхоз СССР, Грузинский научно-исследовательский институт гидротехники. Основные вопросы надежности гидромелиоративных сооружений. Сборник научных трудов, Тбилиси, 1986, с 86-91.
77. Сичинава О.А. К вопросу строительства и эксплуатации противозерозионных берегозащитных сооружений рек Колхиды. Научно-тех. Конфер. По проблеме Осушение и с/х освоение земель Колхидской низменности. Госкомитет совмина Груз. ССР по науке и технике, минсельхоз Груз. ССР, Минводхоз Груз. ССР, Главгрузводстрой, академия наук Груз. ССР, Закавказское отделение ВАСХНИЛ. Тезисы докладов, «Мецниереба», Тбилиси, 1981, с.24-25.
78. Сичинава О. А. Результаты исследования эксплуатации берегозащитных сооружений на реках Колхидской низменности. Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР. Мелиорация земель влажных субтропиков Колхиды. Сборник научных трудов, ГрузНИИГиМ, Тбилиси, 1981, с.76-81.
79. Сичинава П. О. Возможности решения гидравлических и гидротехнических задач с использованием современных микрокомпьютерных систем. Академия Наук Грузии, Институт Водного хозяйства и инженерной экологии, Тбилиси, 1999, с.169-171.
80. Сичинава П. О. Исследование и оценка существующих способов защиты берегов рек и земляных откосов от водной эрозии. Грузинский технических университет, Труды международная конференции по русловым процессам, гидравлике трубопроводного транспорта, гидротехнических сооружений и вопросам гидроэнергетики, Тбилиси, 2000, 74-76 ст.
81. Сичинава О. А., Сичинава П. О., Кухалашвили Э. Г. Перспективы практической новых энерго иресурсосберегающих гидротехнических и мелиоративных

- сооружении. Грузинский технических университет, Труды международной конференции, Тбилиси, 2000, с.150-151.
82. Сичинава О. А., Сичинава П. О. Гидрологическая и геоморфологическая классификация русел рек грузии. Академия Наук Грузии, Институт Водного хозяйства и инженерной экологии, труды международной конференции, Тбилиси, 2001, с. 200-207
83. Сичинава П. О. Принципы конструирования ресурсосберегающих сооружений для защиты окружающей среды. Академия Наук Грузии, Институт Водного хозяйства и инженерной экологии, Сб. научных трудов, Тбилиси, 2003, с.145-151
84. Сичинава О. А., Сичинава П. О. Новые энерго-и ресурсосберегающие сооружения для регулирования русел грязекаменных потоков Защита наорднохозяйственных объектов от воздействия селевых потоков, Материалы Международной конференции по селям. Пятигорск, 2004, с. 78-80
85. Сичинава О. А., Сичинава П. О. Эксплуатационные проблемы вододелительного узла на р. Риони, уг. Поты и мелоприятия по их претупреждению. Академия Наук Грузии, Институт Водного хозяйства и инженерной экологии, , Тбилиси, 2005, 105 с.
86. Сичинава О. А., Сичинава П. О. Способ подводной укладки полотнищ укрепляющих земляные откосы и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство №1416597, Заявка № 4125920, 1988.
87. Сичинава Н.О., Сичинава О. А., Сичинава П. О. Устройство для предохранения берегов от размыва Авторское свидетельство №1446213, Заявка № 3863839, 1988.
88. Сичинава О. А., Сичинава П. О. Способ возведения защитного покрытия подводного откоса. Авторское свидетельство №1565103, Заявка № 4459683, 1990 .
89. СНИ П 11-52-74-М.: Госстройиздат,1973.
- 90.Снищенко Б.Ф. Методы решения практических задач на основе гидроморфометрических теорий руслового процесса –В кн. Труды ТУ Всесоюзного гидрологического съезда, 1976, с. 376-382.
- 91.Студеничников Б.И. Размывающая способность потока и методы русловых расчетов – М.: Госстойиздат. 1964, 183 с.

92. Тевзадзе В.И. Расчетные модели плотности селовой смеси и объема селевых выносов. Г.Г.А.У. Юбилейный том, 1999,с. 383-386.
93. Терцаги К. Теория механики грунтов. Пер. с нем. под ред. Н.А. Цитовича. Из 1. Госстройиздат, М., 1961, 482 с.
94. Троицкий А.В. К вопросу о форме гидравлики устойчивых сечений каналов – в кн.: Вопросы гидротехники, вып.1, 1963, с. 33-59.
95. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. Государственное издательство иностранной литературы. М., 1948, 153 с.
96. Черкасов А.А. Мелиорация и сельскохозяйственное водоснабжение. Сельхозгиз. М., 1958, 376 с.
97. Чугаев Р.Р. Гидравлика. «Энергия» Ленинградское отделение, 1971, 541 с.
98. Шапов Г.И. Речные наносы – изд.Гидрометеиздат,1999,с. 376
99. Шатберашвили П.А., Панчулидзе Д.Н., Мамасахлиси Ж.Г. Методика гидрологического расчета осушительной системы Колхиды на поверхностный сток. Тезисы докладов научно-произв. сессии по проблеме «Осушение и освоение переувлажненных земель Колхидской низменности», Тбилиси-Хоби, 1975, с. 68-70
100. Шатберашвили П.А. Сравнительные лабораторные испытания руслорегулирующих сооружений в верхнем бьефе вододелительного узла на р. Риони Минводхоза СССР Грузинский научно – исследовательский институт Гидротехники и мелиорации. Вопросы гидромелиорации в Грузии, вып.4 Сборник трудов, Тбилиси, 1977 г. с. 128-131.
101. Шатберашвили П. А. , Сичинава О. А. и др. Методические рекомендации по регулированию рек водоприемников осушительных систем Колхиды и креплению их русел. Минводхоз ГССР, ГрузНИИГиМ, Госком ГрузССР по делам издательств. 1982, с.1-47.
102. Gavardashvili G., Chakhaia G. The analysis of possible failure of spring-board type mud-flow-protective new structures in transport corridor. International Scientific Journal “Problems of Applied Mechanics”. # 4(13), Tbilisi, 2003, pp. 38-42.

103. Gavardashvili G. Analysis of the Onset of Avalanches Motion Using the Theory of Catastrophes Bulletin of the Georgian Academy of Sciences, Tbilisi. March-April 2006, pp. 396-399.
104. LASEY G. Flow in alluvial Channels with Sand Mobile Beds. Proceeding of the institution of Civil Engineering., London, Vol. 9. 1958.
105. SCIELDS A. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebewegung., Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, 1936, h.26., Seite 245.