

გივი გაგარდაშვილი

მდინარე დურუჯის აუზში  
ერთიუღ-ღვარცოფული პროცესების  
პრობნოზირება და მათი საწინააღმდეგო  
ახალი სანქინრო-ეკოლოგიური  
ღონისძიებები

« მეცნიერება »  
თბილისი  
2003

# საქართველოს მეცნიერებათა აკადემია

წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტი

551.311.21 : 627.141.1

რედაქტორი :

- ოთარ ნათიშვილი,  
საქართველოს მეცნიერებათა  
აკადემიის აკადემიკოსი.

რეცენზენტი :

- ვახტანგ თევზაძე,  
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,  
პროფესორი.

გ ი ვ ი  
გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი  
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,  
პროფესორი.

ნაშრომში 2001-2002 წწ. ჩატარებული საველე-ექსპედიციური კვლევების ანალიზის საფუძველზე შეფასებულია მდინარე დურუჯის წყალშემკრებ აუზში მიმდინარე ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესები და დამუშავებულია მათი პროგნოზირების მეთოდები.

საველე სტატისტიკური რიგისა და ალბათობის თეორიის გამოყენებით დადგენილია მდინარე დურუჯის ღვარცოფებისათვის სხვადასხვა უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯები და ღვარცოფის მიერ ტრანსპორტირებული ღვარცოფული მასის მოცულობები.

თეორიული კვლევის საფუძველზე მიღებულია დამოკიდებულებები, რომლის დახმარებით იანგარიშება ბმული ღვარცოფის ფრონტის ძირითადი მაჩვენებლები.

კატასტროფების თეორიის გამოყენებით შესწავლილია ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესებისა და ღვარცოფის ტრამპლინის ტიპის ნაგებობაზე ზემოქმედებისას წყობიდან გამოსვლის თვისობრივი ხასიათი.

მდინარე დურუჯის კალაპოტის რეგულირებისათვის წარმოდგენილია ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესებისა და თოვლის ზვავის საწინააღმდეგო ახალი საინჟინრო-ეკოლოგიური ღინისძიებები.

განხილულია კონსტრუქციების პროექტირებისათვის შესაბამისი გაანგარიშების მეთოდოლოგია, ნაგებობების მუშაობის საიმედოობისა და წყობიდან გამოსვლის რისკის მხედველობაში მიღებით.

წიგნი იბეჭდება ავტორის ხარჯებით

© გ. ვ. გავარდაშვილი

ISBN 5-525-379

თბილისი 2003

## შ ი ნ ა ა რ ს ი

შესავალი .....	5
1. მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზის ზოგადი დახასიათება .....	7
2. 2001 – 2002 წლის ზაფხულში მდინარე დურუჯის წყალშემკრებ აუზში ჩატარებული საველე ექსპედიციური კვლევების შედეგები .....	11
3. მდინარე დურუჯის კალაპოტში მიმდინარე ეროზიულ-დვარცოფული პროცესების პროგნოზირება .....	15
4. მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული დვარცოფის სხვადასხვა უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯების დადგენა .....	20
5. მდინარე დურუჯის კალაპოტში ტრანსპორტირებული დვარცოფული მასის პროგნოზირება .....	25
6. დვარცოფის დინამიკის ზოგიერთი საკითხები. . . . .	29
ბმული დვარცოფის სიჩქარის განსაზღვრა ჰაერის წინაღობის გათვალისწინებით .....	29
6.2. ბმული დვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობა ჰაერის შუბლური წინაღობის გათვალისწინებით .....	35
6.3. ბმული დვარცოფის ტალღის ფორმების დადგენა ხახუნისა და ჰაერის წინაღობის გათვალისწინებით .....	44
7. დვარცოფული პროცესების პროგნოზირება	

კატასტროფების თეორიის გამოყენებით.....	49
7.1. ღვარცოფული მასის წონასწორობისა და მისი დაძვრის ანალიზი .....	49
7.2. ღვარცოფის ზემოქმედებისას ტრამპლინის ტიპის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ახალი ნაგებობების შესაძლო წყობიდან გამოსვლის გამოკვლევა.....	58
8. მდინარე დურუჯის კალაპოტის რეგულირებისათვის ახალი საინჟინრო-ეკოლოგიური ღონისძიებები .....	69
8.1. ეროზიის საწინააღმდეგო ნაგებობები .....	71
8.2. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობები .....	74
8.3. თოვლის ზვავის საწინააღმდეგო ნაგებობა .....	84
9. ტრამპლინის ტიპის თაღოვანი და საფეხურებიანი ფორმის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირებისათვის გაანგარიშების მეთოდოლოგია და მათი მუშაობის საიმედოობის შეფასება. ....	87
9.1. ნაგებობის გაანგარიშების მეთოდოლოგია.....	87
9.2. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის საიმედოობის შეფასება .....	93
დასკვნა .....	98
Заклучение .....	101
Conclusion .....	103
ლიტერატურა .....	105
ავტორის შესახებ .....	112

## შესავალი

საქართველოს პრეზიდენტის ბატონ ედუარდ შევარდნაძის 2001 წ. 2 თებერვლის №84 განკარგულების “ქ. ყვარლის, მისი მოსახლეობისა და მიმდებარე ტერიტორიების მდ. ღურუჯის ღვარცოფული ნაკადებისაგან დაცვის ღონისძიებათა შესახებ” თანახმად მდ. ღურუჯის წყალშემკრები აუზის თანამედროვე ეკოლოგიური მდგრალობის შეფასების მიზნით საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტის დირექტორის აკადემიკოს ცოტნე მირცხულავას ბრძანებითა და ფინანსური დახმარებით შედგა მივლინება ქ. ყვარელში 2001 - 2002 წწ. გაზაფხული-ზაფხულის პერიოდში.

საველე-ექსპედიციური კვლევის მიზანს წარმოადგენდა მდინარე ღურუჯის კალაპოტის თანამედროვე ეკოლოგიური მდგომარეობის შეფასება შესართავიდან(მდ. ალაზნიდან) მის სათავემდე(შავ კლდემდე);

უნდა აღინიშნოს ისიც, რომ მდ. ღურუჯის მთლიანი წყალშემკრები აუზის ვიდეო-ვიზუალური აგეგმვა (ფილმი არის 2.30 სთ. ხანგრძლივობის) ჩატარებული იქნა პირველად, რომელმაც საშუალება მოგვცა შეგვეფასებინა მდ. ღურუჯის კალაპოტში გავლილი ღვარცოფებისა და მის მიერ გამოტანილი ღვარცოფული მასის ძირითადი მორფომეტრიული, ჰიდროლოგიური და ჰიდრაულიკური მაჩვენებლები.

სპეციალური ხელსაწყოთა და თეოდოლიტის საშუალებით გაზომილი და გადაღებული იყო მდ. ღურუჯის მახასიათებელი განივი და გრძივი პროფილები, შესაბამისი დახრის კუთხეების მხედველობაში მიღებით.

ვიდეო, ფოტო მასალისა და სტატისტიკური რიგის დამუშავებით მდ. ღურუჯის არსებული მდგომარეობა შეფასებულია კატასტროფულად და პრეზიდენტის განკარგულებაში აღნიშნული მდ. ღურუჯის საგანგებო ეკოლოგიურ ზონად გამოცხადების შესახებ აუცილებ-

ბელია; აქედან გამომდინარე შესაბამისმა სამთავრობო, სამეცნიერო თუ არასამთავრობო ორგანიზაციებმა, თუნდაც ინვესტიციების, თუ გრანტების გათვალისწინებით სასწრაფოდ უნდა ჩაატარონ შესაბამისი გადაუდებელი ღონისძიებები, რომელიც დაიცავს ქ. ყვარლის მოსახლეობასა და მიმდებარე ტერიტორიებს მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული კატასტროფული ღვარცოფებისაგან.

ავტორი დიდ მადლობას უცხადებს საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტის დირექტორს, აკადემიკოს ცოტნე მირცხულავას, რომლის მეცნიერული კონსულტაციებისა და რეკომენდაციების, აგრეთვე ფინანსური მხარდაჭერის გარეშე შეუძლებელი იქნებოდა, მდინარე დურუჯის კალაპოტში საველე-ექსპედიციური კვლევების ჩატარება.

ავტორი დიდი მადლიერია წიგნის რედაქტორის, აკადემიკოს ოთარ ნათიშვილის და რეცენზენტის პროფესორ ვახტანგ თევზაძისა იმ შენიშვნებისათვის, რომლებიც დამეხმარა ნაშრომში დასახული ამოცანის უფრო ღრმად განხილვისა და წარმოდგენისათვის.

უნდა აღნიშნოს გაზეთ “საქართველოს რესპუბლიკის” რედაქციის განყოფილების გამგის, ბატონ ბონდო გულიაშვილისა და ჟურნალისტის ქალბატონ, მარადი ანასაშვილის ის ოპერატიული შრომა, რომლებმაც დროის მოკლე პერიოდში გაზეთში გააშუქეს მდ. დურუჯის თანამედროვე ეკოლოგიური მდგომარეობა; სავალე-ექსპედიციური კვლევების ნორმალურად ჩატარებისათვის ქ. ყვარელში მხარში გვედგნენ: კახეთის რეგიონისა და რაიონის ხელმძღვანელები, სასისტემო სამართველოს უფროსი, აწ გარდაცვლილი ბატონი ჯემალ ავაზაშვილი და ასოციაცია “კავკასიის მერიდიანის” თანამშრომლები; საველე კვლევებში მონაწილეობას იღებდა ინსტიტუტის ასპირანტი გოგა ჩახაია.

ყველა იმ შენიშვნას, სურვილს, რომელსაც მკითხველში აღძრავს წიგნის გაცნობისას, ავტორი დიდი მადლიერებით მიიღებს.

## 1. მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზის ზოგადი დახასიათება

მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზში ჩატარებულმა საველე-ექსპედიციურმა კვლევამ ნათელი გახადა, რომ როგორც თეთრი ასევე შავი დურუჯის აუზებში კალაპოტის თანამედროვე ეკოლოგიური მდგომარეობა რთულია.

როგორც ცნობილია შავი დურუჯის ეროზიულ-დვარცოფული კერა შავი კლდის სახელით არის ცნობილი, ხოლო თეთრი დურუჯის ეროზიული კერა მდებარეობს ფოხალოს მთის სამხრეთ ფერდობზე ზღვის დონიდან 2994 მ. სიმაღლეზე რომლის ჩრდილოეთი ფერდობი ესაზღვრება დაღესტანს.

შავი და თეთრი დურუჯის დვარცოფწარმომქმნელი კერების საერთო ფართობი 308 ჰექტარის ტოლია, მათ შორის 250 ჰექტარი ფართობი განლაგებულია სუბალპურ და ალპურ ზონებში, აქედან 60-70 ჰექტარი ფართობი განლაგებულია ტყიან ზოლში[30].

მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზის მთლიანი ფართობი გამოტანის კონუსის ჩათვლით 116 კმ<sup>2</sup> –ია, აქედან გამოტანის კონუსის ფართობი 36 კმ<sup>2</sup> –ს შეადგენს.

მდინარე დურუჯის გამოტანის კონუსის სიგრძემ შესართავიდან ხერხეულიძის ნაგებობამდე 8,0 კმ-ი შეადგინა, მდინარის სიგრძე ხეობაში კი დაახლოებით 18 კმ-ია, აქედან გამომდინარე მდინარის მთლიანი სიგრძე 26 კმ-ია, კალაპოტის საშუალო ქანობით  $i = 0,222$ .

მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზის სიგანის საშუალო სიდიდე 4,3 - 4,5 კმ-ის ფარგლებში მერყეობს, მაქსიმალური კი უტოლდება 6,5-7,0 კმ[30].

**გეოლოგია.** მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზი გეოტექნიკური მიმართულებით იყოფა ორ ნაწილად: მთავარი კავკასიონის ქედი და ალაზნის ველი[63]. მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზი ლითოლოგიური ჭრილის მიხედვით იყოფა:

1. ძირითადი ფიქალების წყობა; 2. თიხა-ფიქალებისა და ქვიშა-ქვების ჩანართები მორიგეობის სახით და 3. მეოთხეული დანალექები.

**კლიმატი.** მდინარე დურუჯის აუზის საშუალო წლიური ტემპერატურა მერყეობს  $+12,2-14^0$  –ის ფარგლებში, ხოლო ზამთარში კი საშუალო წლიური ტემპერატურა –  $3,7^0$ . ზაფხულში ყველაზე მაღალი ტემპერატურა  $+25^0$  –ს აღემატება.

ნალექების საშუალო წლიური რაოდენობა მდ. დურუჯის აუზში ტოლია 960 მმ, ყვარელში კი 901 მმ.[30]. ნალექების მაქსიმალური რაოდენობა მოდის გაზაფხულ-ზაფხულის პერიოდში(მაისი-ივნისი). მეტეოსადგურის მონაცემების მიხედვით ნალექების მაქსიმალური რაოდენობის  $1/4$  მოდის მაისი-ივნისის პერიოდში.

**ნიადაგები.** მდინარე დურუჯის აუზში ძირითადად გავრცელებულია ნიადაგის ექვსი ტიპი: ტყის ყავისფერი ნიადაგები, ყომრალი ყავისფერი, ნაკლებად განვითარებული წარეცხილი ნიადაგები (ფერდობები), მთა-ტყის-მდელოს ნიადაგები, განუვითარებელი ღია წაბლისფერი ნიადაგები, რომლებიც ძირითადად გვხვდება ალ-პურ და სუბალპურ ზონებში, პროალუვიური და დელიუვიარული ნიადაგები[59].

**მცენარეულობა.** მდინარე დურუჯის წყალშემკრებ აუზში მთლიანი ფართობი განაწილებულია შემდეგი თანმიმდევრობით: ტყით დაფარულია 76% ( 6600 ჰა.) ტყით არ არის დაფარული 4,3% (390 ჰა) საზაფხულო საძოვრები 16%(1400 ჰა), კლდეები 4,3% (330 ჰა).

სურათზე – 1.1 ნაჩვენებია მდ. დურუჯის კალაპოტში ღვარცოფის გავლის კვალი ყრუ კაშხლიდან (ყრუ კაშხალი მდებარეობს შესართავიდან 10 კმ. მანძილზე) 560 მ. მანძილის დაშორებით, მდინარის სათავის მიმართულებით.

ჩატარებულმა საველე-ექსპედიციურმა გამოკვლევამ დაადასტურა, რომ მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული ღვარცოფების სიმძლავრეზე, მომავალში დიდ გავლენას მოახდენს ასევე





### სურათი 1.1.

მდ. დურუჯის კალაპოტში ღვარცოფის  
გაფლის კვალი. (ფოტო ავტორისა).

მდ. თეთრი დურუჯის წყალშემკრები აუზი, რადგან ფოხალოს მთაზე ზღვის დონიდან 2990 მეტრზე დაფიქსირებული იყო მთის ქანების ტექტონიკური რღვევის ხაზი (იხ. სურ. 1.2), რომელიც მომავალში მეწყრული პროცესების გააქტიურებას გამოიწვევს, ეს კი ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესების გაძლიერების დასაწყისია[36].

ეროზიულ-ღვარცოფული და მეწყრულ პროცესებს მდ. დურუჯის აუზში დაემატა აგრეთვე თოვლის ზეგავების მოქმედებაც. 2001 წლის 22 ივნისს მდ. დურუჯის წყალშემკრებ აუზში დაფიქსირებული იყო მდინარე წიფელ გორის წყლის ხეობიდან (მდ. შავი დურუჯის მარცხენა შენაკადი) ჩამოცურებული თოვლის ზეგავი (იხ. სურ. 1.3 ), რომლის სიგრძემ 150 მეტრი, ხოლო სიმაღლემ კი 5 – 6 მ. შეადგინა. მდინარე დურუჯის კალაპოტის გრძივი პროფილის დახრის კუთხემ ამ ადგილას  $17^{\circ}$  შეადგინა, კალაპოტის სიგანემ – 4,6 მ. , ხოლო წყლის ნაკადის სიღრმემ კი 0,32 მ. [35,36].



**სურათი 12.**  
ფოხალის მთის მწვერვალზე  
მთის ქანების ტექტონიკური რღვევის ხაზი.  
2001 წ. 22 ივნისი (ფოტო ავტორისა).



**სურათი 13.**  
თოვლის ზგავი მდინარე შავი  
ღურუჯის კალაპოტში 2001 წ.  
(ფოტო ავტორისა).

ამრიგად, მდინარე შავი და თეთრი დურუჯის წყალშემკრებ აუზში ჩატარებული საველე-ექსპედიციური კვლევის ანალიზი იძლევა საშუალებას, რომ აღნიშნული ტერიტორიების ეკოლოგიური მდგომარეობა შეფასებული იყოს კატასტროფიულად, რომელიც დაუყოვნებლივ საჭიროებს შესაბამისი ღონისძიებების განხორციელებას.

## **2. 2001 - 2002 წლის ზაფხულში მდინარე დურუჯის წყალშემკრებ აუზში ჩატარებული საველე-ექსპედიციური კვლევის შედეგები.**

ჩატარებული საველე-ექსპედიციური კვლევები წარმოადგენს იმ ტრადიციული, სამეცნიერო კვლევების გაგრძელებას, რომელსაც საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტში საფუძველი ჩაუყარა პროფესორმა მ. გაგოშიძემ, ხოლო შემდეგ ეტაპზე ეს კვლევები გაგრძელებული იყო აკადემიკოსების ც. მირცხულავას, ო. ნათიშვილის, და პროფესორ ვ. თევზაძის ხელმძღვანელობით.

საველე-ექსპედიციური კვლევის შედეგად მიღებული სტატისტიკური რიგისა და სამეცნიერო ლიტერატურის [23,29,30,35,36] ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია ჩამოყალიბდეს შემდეგი სახის დასკვნები:

– ქ. ყვარლის მდ. დურუჯის ღვარცოფებისაგან დამცავი მიწის დამბასა და მდინარის კალაპოტის ნიშნულებს შორის სხვაობა გამოტანის კონუსზე ქ. თელავსა და ქ. ყვარელს შორის შემაერთებელ

მაგისტრალურ გზატკეცილზე აშენებულ ხიდიდან 100-150 მ. მანძილის დაცილებით( მდ.-ის სათავის მიმართულებით) არ აღემატება 0,5 მ-ს;

– მდ. დურუჯის გამოტანის კონუსზე კალაპოტის გაწმენდის შედეგად ხელოვნურად გაკეთებული ე.წ. “ღვარცოფმიმღები საგუბრები” მთლიანად შევსებულია ღვარცოფული მასით და შესაძლებელია ღვარცოფის მოვარდნისას მდინარის კალაპოტმა ვერ დაიტოს ინერტული მასა და ნაკადი გადმოვიდეს კალაპოტიდან, ეს კი ქ. ყვარელს ნგრევისა და დატბორვის საშიშროებას შეუქმნის;

– მდ. დურუჯის კალაპოტში კრიტიკული წერტილი, სადაც შესაძლებელია ღვარცოფის კალაპოტიდან გადმოსვლა, რომელიც საფრთხეს შეუქმნის ქ. ყვარლის მოსახლეობას დაფიქსირებული იქნა მდ. სამალის ხევისა და მდ. დურუჯის შეერთების ადგილში, სადაც ნაპირდამცავი კედლის სიმაღლე არ აღემატება 3 – 4 მეტრს;

– მდ. დურუჯის კალაპოტში აშენებული ყველა ის ჰიდროტექნიკური ნაგებობა, რომელიც წინააღმდეგობას უწევდა ღვარცოფებს და აკავებდა ღვარცოფული მასის გარკვეულ მოცულობას, მთლიანად წყობიდან არის გამოსული;

– ვიდეო, ფოტო მასალის დამუშავების შედეგად მიღებული სტატისტიკური რიგის ანალიზმა დაგვანახა, რომ მდ. დურუჯის კალაპოტში ბოლო ათწლეულებში მოვარდნილმა ღვარცოფების მაქსიმალურმა სიმაღლემ ტრანზიტულ უბანზე 17 – 20 მ. მიაღწია;

– ჩატარებულმა გაზომვებმა გვიჩვენა, რომ მდ. დურუჯის გამოტანის კონუსის გრძივი პროფილის დახრის კუთხის მნიშვნელობა შესართავიდან (მდ. ალაზნიდან) მისი მარჯვენა შენაკადის მდ. სამალის ხევამდე 2-6 გრადუსის ფარგლებში იცვლებოდა, ხოლო სატრანზიტო უბნიდან სათავემდის კი 7 – 22 გრადუსის საზღვრებში მერყეობს;

– მდ. დურუჯის წყალშემკრებ აუზში მთის ფერდობებზე შეიმჩნევა თიხა-ფიქალების აქტიური ეროზიულ-მეწყრული პროცესები,

რომელიც კიდევ უფრო აძლიერებს კატასტროფული ღვარცოფის მოვარდნის საშიშროებას; უნდა აღინიშნოს ისიც, რომ მდ. დურუჯის აუზში მთის ფერდობების ორივე მხარეს შეიმჩნევა ხევების მძლავრი გამოტანის კონუსები, რომელთა სიმაღლე მდ. დურუჯის კალაპოტში დაფიქსირდა 2–6 მ-ის ფარგლებში, ხოლო დახრის კუთხე კი 8–35 გრადუსის ფარგლებში იცვლება;

– მდ. დურუჯის კალაპოტში მიმდინარე ეროზიულ-ღვარცოფულ პროცესებს დაემატა აგრეთვე თოვლის ზვავების მოქმედებაც, რომელიც კიდევ უფრო აძლიერებს კატასტროფული ღვარცოფის ფორმირების საშიშროებას (იხ. სურათი 1.3);

– მდ. დურუჯის წყალშემკრებ აუზში დაფიქსირებულ შავი კლდის ეროზიულ ღრანტეებს დაემატა აგრეთვე მისი მარჯვენა შენაკადის მდ. სავეფხო-გორის წყლისა და მდ. თეთრი დურუჯის წყალშემკრებ აუზებში მიმდინარე აქტიური ეროზიულ-მეწყურული პროცესები, რომელიც კიდევ უფრო ზრდის მყარი მასის მოცულობის მომატების საშიშროებას და კატასტროფული ღვარცოფის ფორმირებისათვის მხოლოდ შესაბამისი კლიმატური პირობებიც არის საჭირო. ამას ისიც ადასტურებს, რომ მდ. შავი დურუჯის კალაპოტში დაფიქსირებული იყო ქვის დიდი ლოდი (იხ. სურ. 2.1 ) რომლის წონამ 63,1 ტონა შეადგინა და 2 თვის განმავლობაში შავი დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული წყალმოვარდნებისა და საშუალო სიმძლავრის ღვარცოფებმა ის 200 მეტრის მანძილით ქვემოთ ჩამოიტანა. ჩატარებულმა გამოკვლევამ დაადასტურა, რომ აღნიშნული ქვის ლოდი ეკუთვნის მდ. სავეფხო-გორის წყლის (მდ. დურუჯის მარჯვენა შენაკადი) წყალშემკრებ აუზს;

– მდ. შავი დურუჯის სათავეებში შავი კლდის მიდამოში (იხ. სურ. 2.2. ) შეიმჩნევა მთის ფერდობებზე აქტიური ეროზიული პროცესები, ხოლო თვით კალაპოტში დაგროვილია დიდძალი

მოცულობის ინერტული მასალა, რომელიც დვარცოფის ფორმირების ერთ-ერთ ძირითად კომპონენტად ითვლება;



**სურათი 2.1.**  
ქვის 63,1 ტონის ლოდი მდ. დურუჯის კალაპოტში  
(ფოტო ავტორისა).



**სურათი 2.2.**  
შავი კლდის ეროზირებული ფერდობები.  
(ფოტო ავტორისა).

### 3. მდინარე დურუჯის კალაკოტში მიმდინარე ეროზიულ - დვარცოფული პროცესების პრობნოზირება

მდ. დურუჯის წყალშემკრებ აუზში ჩამდინარე აქტიური ეროზიულ-დვარცოფული ხასიათის ხეების ეროზიული დრანტეების შეფასებისათვის, სავსე კვლევებისა და აერო-კოსმოსური გადაღებების დეშიფრირების საფუძველზე მიღებული იყო დამოკიდებულება რომლითაც იანგარიშება მთის ფერდობის ეროზიის კოეფიციენტი ( $E$ ), [29] :

$$E = [0,58 + 1,40(F_1 / F_0)] \cdot (t/T)^{0,21}, \quad (3.1)$$

სადაც,  $F_1$  – არის მდინარის წყალშემკრებ აუზში ეროზირებული ფართობი(კმ<sup>2</sup>),  $F_0$  – მდინარის მთლიანი წყალშემკრები აუზის ფართობი (კმ<sup>2</sup>),  $t$ - საკვლევი დროის ინტერვალი(წელი) ,  $T$ - მთლიანი დაკვირვების პერიოდი (ხვენს შემთხვევაში  $T=30$  წელს).

(3.1) - დამოკიდებულების პრაქტიკაში გამოყენების ზღვრებია:

$$0,061 \leq (F_1/F_0) \leq 0,24 ; 0,1 \leq (t/T) \leq 1,0; \quad (3. 2)$$

(3.1) დამოკიდებულებით გაანგარიშებული იყო მდ. დურუჯის წყალშემკრები აუზის მთის ფერდობების ეროზიის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, შესაბამისი დაზიანების ხარისხის მხედველობაში მიღებით, რომელთა რიცხობრივი მაჩვენებლებიც მოცემულია ცხრილში (იხ. ცხრილი 3.1 ).

2002 წ. მდ. დურუჯის სათავეებში ე.წ. “შავ კლდეზე” ზოგ ადგილებში დაფიქსირებული იყო დარებისა და ხრამების ინტენსიური ქსელი სიხშირით 15-20 მ-ი, ეს კი ცნობილი ინგლისელი პროფესორის

რ. მორგანის [46] კლასიფიკაციით შეესაბამება ეროზიის მე - 7 კლასს, სადაც ეროზიის ინტენსიურობა მეტია 500 (ტ/ჰა) წელიწადში.

რაც შეეხება 3.1 ცხრილში დამყარებულ კავშირს მთის ფერდობის ეროზიის კლასსა და ეროზიის კოეფიციენტს შორის იგი შეფასებულია პროფესორ რ. მორგანის შკალის მიხედვით [46].

მდ. დურუჯის კალაპოტის მდგრადობის შეფასებისათვის გაზომილი იყო კალაპოტის ცოცხალი კვეთისა(b) და ნოღა კალაპოტის(B) სიგანეები; წყლის ნაკადის სიღრმეები (h) , მდინარის კალაპოტის დახრის კუთხეები( $\alpha$ ) და ნაკადის სიჩქარეები(V), რის შემდეგაც გაანგარიშებული იყო წყლის ნაკადის ხარჯები ( $Q_0$ ); სტატისტიკური დაკვირვებების რიცხვმა 177 წერტილი შეადგინა.

### ცხრილი 3.1

მდ. დურუჯის წყალშემკრებ აუზში მთის ფერდობის ეროზიის კოეფიციენტისა და ეროზიის კლასის მნიშვნელობები.

№	მდინარის დასახელება	ეროზიის კოეფიციენტის მნიშვნელობები				ეროზიის კლასი (2001 წ.)	ეროზიის ინტენსიურობა წელიწადში (ტ / ჰა)
		1980 წ.	1990 წ.	2000 წ.	2001 წ.		
1	ნახეის ხევი	0,077	0,080	0,195	0,207	მეორე	2-5
2	სამალის ხევი	0,050	0,061	0,072	0,171	მეორე	2-5
3	სალესაგის ხევი	0,30	0,45	0,68	0,75	მესამე	5-10
4	უთხოვარის ხევი	0,84	0,92	0,98	1,00	მეოთხე	10-50
5	მშრალი გორის ხევი	0,76	0,94	1,00	1,05	მეოთხე	10-50
6	საკეფხო გორის წყალი	0,82	0,96	1,11	1,15	მეოთხე	10-50
7	წიფელ გორის წყალი	0,83	0,99	1,21	1,23	მეხუთე	50-100
8	დურუჯის სათავეები (შავი კლდე)	1,00	1,45	1,95	2,01	მექექსე	100-500



ემპირიულ გამოსახულებებს აქვს შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned}(h/b) &= 0,3 \cdot (\alpha)^{-0,62}, \\(b/B) &= 0,001(\alpha)^{2,11}.\end{aligned}\tag{3.3}$$

(3.3) დამოკიდებულებების გამოყენების ზღვრებია:

$$\begin{cases} 0,01 \leq (h/b) \leq 0,185; & 4^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ \\ 0,01 \leq (b/B) \leq 0,75; & 2^\circ \leq \alpha \leq 22^\circ \end{cases};\tag{3.4}$$

მიღებული (3.3) დამოკიდებულებების პრაქტიკაში გამოყენების საიმედოობის დასადგენად გაანგარიშებული სიდიდეები შედარებული იყო ბუნებაში გაზომილ მონაცემებთან, ცდომილება მათ შორის 0,95 % უზრუნველყოფის ალბათობით იცვლება 5-20 %-ის საზღვრებში, რაც პრაქტიკაში ჰიდროლოგიური ანგარიშისათვის დამაკმაყოფილებელ სიდიდედ ითვლება.

მდ. დურუჯის წყალშემკრებ აუზში დაგროვილი დვარცოფული მასის მოცულობის პროგნოზირებისათვის მდინარის ნოღა კალაპოტში გაზომილი იყო მთის ფერდობებიდან დენუდირებული მასის ძირითადი მახასიათებლები, როგორც არის: გამოტანის კონუსის გეომეტრიული ზომები, ხევის გამოტანის კონუსზე მყარი ფრაქციების ზედაპირის დახრისა და შიგა ხახუნის კუთხეები, ფრაქციების საშუალო დიამეტრები და ა.შ.

სურათზე 3.1 ნაჩვენებია შავი დურუჯის სათავეების ეროზირებული ღრანტეების საერთო ხედი შავი კლდიდან 700 მეტრის დაშორებით, ხოლო 3.2 სურათზე კი მდ. თეთრი დურუჯის სათავეებში ფოხალის მთაზე ორ იარუსიანი ეროზირებული მთის ფერდობი, ზღვის დონიდან 2800 მ.



**ფოტო 3.1.**  
შავი კლდის ეროზირებული ფერდობები,  
2001 წლის 21 ივნისი (ავტორის ფოტო).



**სურათი 3.2.**  
ფოსალოს მთის ორ იარუსიანი  
ეროზირებული ფერდობი.  
(ფოტო ავტორისა), 2001 წ.

მდ. დურუჯის გამოტანის კონუსიდან აღებული მყარი შემადგენლის ნიმუშების გრანულომეტრიული ანალიზის შედეგები წარმოდგენილია 3.2 ცხრილში [30], ხოლო დვარცოფული მასის წარმოებაში გამოყენების თვალსაზრისით ჩატარებული იყო კოლოიდური მასის ქიმიური ანალიზი [32], რომლის შედეგებიც მოყვანილია 3.3 ცხრილში (ქიმიური ელემენტების რაოდენობა მოცემულია %-ში).

რაც შეეხება მდ. შავი დურუჯის წყალშემკრებ აუზში მთის ფერდობებიდან დენუდირებული მასის მოცულობას 2001 წლის ივნის-ივლისის მონაცემებით შეადგინა 300 000 მ<sup>3</sup> –მდე, რაც ამ კალაპოტის პირობებისათვის საშუალო მაჩვენებლად ითვლება.

**ცხრილი 3.2**  
**მდ. დურუჯის გამოტანის კონუსზე**  
**აღებული დვარცოფული მასის**  
**მექანიკური შემადგენლობა.**

№	ფრაქციის ზომები (მმ)	წონა (კგ)	პროცენტული შემცველობა (%)
1	ქვები >30	116,0	42,0
2	ღორღი 30-10	48,9	17,7
3	ხრეში და მსხვილი სილა (10-1)	43,4	15,7
4	წვრილ მარცვლოვანი:	68,0	24,6
	(1-0,05)		8,4
	(0,05-0,005)		8,8
	(0,005-0,001)		4,0
	< 0,001		3,4

**ცხრილი № 3.3.**  
**მდ. დურუჯის კოლოიდური**  
**მასის ქიმიური ანალიზი % - ში.**

Si O <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ti O <sub>2</sub>	Ca O	Mg O	Mn O	Na O	K <sub>2</sub> O
49,5	27,0	12,02	0,29	0,90	2,90	0,80	1,08	5,60

ამრიგად, მდ. თეთრი და შავი დურუჯის წყალშემკრებ აუზებში 2001 - 2002 წ. ზაფხულში ჩატარებულმა საველე - ექსპედიციურმა კვლევებმა დაგვანახა, რომ მთის ფერდობების ეროზიული პროცესების მდგომარეობა კრიტიკულია და იგი ზოგ ადგილებში შეესაბამება ეროზიის მე-7 კლასს.

#### **4. მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული ღვარცოფის სხვადასხვა უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯების დადგენა.**

მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული ღვარცოფის სხვადასხვა უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯების დადგენის მიზნით გამოყენებული იყო სამეცნიერო ლიტერატურა [2,15,19,22,23, 24,30,39,45,47,48,49,52,57,61,62], აგრეთვე ავტორის მიერ დამუშავებული და აღდგენილი სტატისტიკური რიგი, რისთვისაც გამოყენებულია ჰიდრომეტეოროლოგიის ოფსერვასტორიის მონაცემები.

მდინარე დურუჯის კალაპოტში სხვადასხვა დროს (1899-1999 წწ.) გავლილი ღვარცოფების ხარჯის ფარდობითი სიდიდის ჯამური მნიშვნელობა ტოლია  $\sum_{i=1}^{46} Q_i / Q_{\max} = 7,856$  (მ<sup>3</sup>), ხოლო საველე დაკვირვებების სტატისტიკურმა რიცხვმა კი შეადგინა  $N = 46$  წერტილი.

ღვარცოფის ხარჯის ფარდობითი სიდიდის საშუალო მნიშვნელობა ( $Q_i / Q_{\max}$ ) ტოლია:

$$(\bar{Q}_i / Q_{\max}) = \frac{\sum_{i=1}^{46} Q_i / Q_{\max}}{N} = \frac{7,856}{46} = 0,187 ; \quad (4.1)$$

ღვარცოფის ხარჯის ვარიაციის კოეფიციენტი კი ტოლია [29,41,44]:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Q_i / Q_{\max}) - 1]^2}{N - 1}} = \sqrt{\frac{57,34}{45}} = 1,128 ; \quad (4.2)$$

ასიმეტრიის კოეფიციენტი გამოითვლება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$C_s = 2 \cdot C_v = 2 \cdot 1,128 = 2,256 ; \quad (4.3)$$

მიღებული სიდიდეების გამოყენებით გაანგარიშებულია მდინარე ღურუჯის ღვარცოფის სხვადასხვა უზრუნველყოფის ხარჯები, რომელთა მნიშვნელობებიც მოყვანილია ცხრილში ( იხ. ცხრილი 4.1)

#### ცხრილი 4.1

მდ. ღურუჯის სხვადასხვა უზრუნველყოფის ხარჯები.

განმეორებადობა ერთხელ n წელიწადში	1000	100	33	20	10	4
უზრუნველყოფა P(%)	0,1	1	3	5	10	25
საველე მონაცემები	3094,89	1967,62	1421,06	1216,09	891,57	491,90
(4.4) დამოკიდებულებით	4267,55	1778,14	1244,69	1066,88	889,07	533,44
ცდომობა (%)	27,5	9,6	12,4	12,3	2,8	7,8

საველე ექსპედიციური მონაცემების შეფასებისათვის, რომელიც შემდგომ ეტაპზე მდინარე ღურუჯის ღვარცოფის სხვადასხვა

უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯების პროგნოზირების საშუალებას იძლევა, გამოყენებულ იყო ემპირიული დამოკიდებულება [22,29] რომელსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$Q_{\max} = A \cdot (34 + 400 \cdot i) \cdot F^{0,61} \text{ , (მ}^3/\text{წმ) ,} \quad (4.4)$$

სადაც, A- კოეფიციენტია, რომლის კავშირი ხარჯის უზრუნველყოფის კოეფიციენტთან მოცემულია 4.2 ცხრილში; i – მდინარე დურუჯის საშუალო ქანობია, რომელიც ტოლია  $i = 0,222$  ; F – მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზის ფართობი -  $F = 80,0$  (კმ<sup>2</sup>);

#### ცხრილი 4. 2

A -კოეფიციენტსა და ხარჯის უზრუნველყოფას P % შორის კავშირი.

უზრუნველყოფა P(%)	0,1	1	3	5	10	25
A კოეფიციენტი	2,4	1,0	0,7	0,6	0,5	0,3

ღვარცოვის მაქსიმალური ხარჯის საშუალო კვადრატული გადახრა იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით[45] :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{46} [(Q_i / Q_{\max})_j - (Q_i / Q_{\max})]^2}{N}} = \sqrt{\frac{1,6873}{46}} = 0,1915 \text{ , (მ}^3/\text{წმ);} \quad (4.5)$$

ჰისტოგრამის ასაგებად საჭირო მონაცემები კი მოცემულია 4.3 ცხრილში.

ცხრილი 4.3

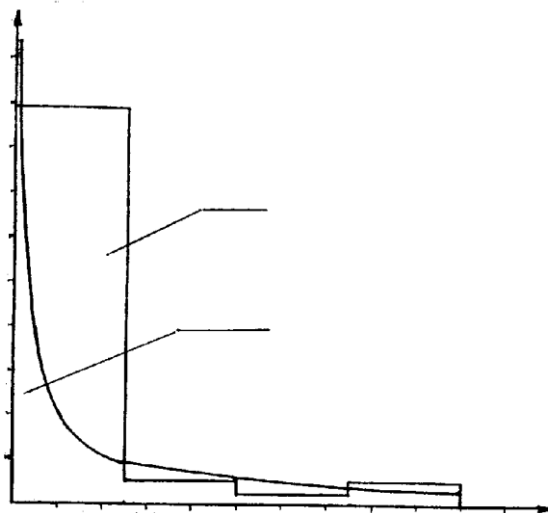
ღვარცოფის ხარჯის ფარდობითი მნიშვნელობები შესაბამის ინტერვალებში

ღვარცოფის ხარჯის ინტერვალები ( $Q_i / Q_{max}$ )	0 - 0,25	0,25 - 0,50	0,50 - 0,75	0,75 - 1,00
$m_i$ სისშირე	41	2	1	2
$f(Q_i / Q_{max})$	0,891	0,044	0,022	0,044

მათემატიკური ლოდინი გამოითვლება შემდეგი ფორმულით[4,29]:

$$m_* = \sum_{i=1}^{46} f(Q_i / Q_{max}) \cdot (Q_i / Q_{max}) = 0,891 \cdot 0,125 + 0,044 \cdot 0,375 + 0,022 \cdot 0,625 + 0,044 \cdot 0,875 = 0,1801; \quad (4.6)$$

მდინარე ღურუჯის მაქსიმალური ხარჯების ფარდობითი მნიშვნელობების ჰისტოგრამა და შესაბამისი თეორიული განაწილების მრუდი ნაჩვენებია 4.1 სურათზე.



სურ. 4.1.  
ღვარცოფის მაქსიმალური ხარჯის ჰისტოგრამა (1) და შესაბამისი თეორიული განაწილების მრუდი (2).

4.1 სურათზე გამოსახულ მრუდს შეესაბამება ვეიბულის განაწილება [4,41], რომელსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$f(Q_i/Q_{\max}) = 0,035 \cdot (Q_i/Q_{\max})^{-0,82} \cdot \exp[-0,192 \cdot (Q_i/Q_{\max})^{0,18}] . \quad (4.7)$$

თუ გავიანგარიშებთ მდინარე ღურუჯის მაქსიმალურ ხარჯებს ვეიბულის გამოსახულებით, მაშინ (4.7) დამოკიდებულებით მიღებული სიდიდეების საიმედოობა იანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$P(Q_i/Q_{\max}) = \int_0^1 0,035 (Q_i/Q_{\max})^{-0,82} \cdot \exp[-0,192 \cdot (Q_i/Q_{\max})^{0,18}] \cdot d(Q_i/Q_{\max}) . \quad (4.8)$$

(4.8) განტოლების ამოხსნის შემდეგ მივიღებთ  $P(Q_i/Q_{\max}) = 0,549$ , ხოლო წარმოდგენილი ანგარიშის რისკი კი ტოლია:

$$R = 1 - P(Q_i/Q_{\max}) = 1 - 0,549 = 0,461 . \quad (4.9)$$

თუ ჩავატარებთ ანალიზს დავინახავთ, რომ მდინარე ღურუჯის მაქსიმალური ხარჯის პროგნოზირებისათვის (4.4) დამოკიდებულებით გაანგარიშებული სიდიდეები უფრო საიმედოა, ახლოს არის ბუნებაში გავლილი ღვარცოფების ხარჯის მონაცემებთან, ვიდრე ვეიბულის ფორმულით გაანგარიშებულ მაჩვენებლებთან (იხ. ცხრილი 4.2).

მიღებული შედეგები აგრეთვე შედარებული იყო აკადემიკოს ცოტნე მირცხულავას მიერ დამუშავებულ მეთოდოლოგიასთან [45], რომელმაც პირველად მათემატიკური მოდელებით, კერძოდ ალბათობის თეორიის გამოყენებით დადგინა ღვარცოფის მაქსიმალური ხარჯების ცვლილების ხასიათი. თანხვედრა მათ შორის დამაკმაყოფილებელია.



## 5. მდინარე დურუჯის კალაპოტში ტრანსპორტირებული ღვარცოფული მასის პრობნოზირება

მდინარე დურუჯის კალაპოტში ღვარცოფის მიერ გამოტანილი ღვარცოფული მასის პროგნოზირების მიზნით გამოყენებული იყო, როგორც 2001-2002 წლებში ზაფხულის პერიოდში ჩატარებული საველე-ექსპედიციური კვლევის შედეგები, აგრეთვე განვლილ პერიოდში გამოქვეყნებული სამეცნიერო ლიტერატურა [2,23,24,30,38,39,48, 52,57].

მდინარე დურუჯის კალაპოტში გავლილი ღვარცოფების სტატისტიკური რიგი, ავტორის მიერ გადამუშავებული და ზოგიერთ შემთხვევაში აღდგენილიც კი, მოცემულია სამეცნიერო ნაშრომში [24]; ზემოთ აღნიშნული სტატისტიკური რიგის (40 წერტილი) დამუშავებით მიღებულია ემპირიული დამოკიდებულება, რომლითაც იანგარიშება მდინარე დურუჯის კალაპოტში ღვარცოფის მიერ ტრანსპორტირებული ღვარცოფული მასის მოცულობა ( $W$ ).

მათემატიკურ გამოსახულებას აქვს შემდეგი სახე:

$$W = 0,138 \cdot T^{1,52} \cdot Q_{\max}^{0,73} \quad , \quad (მ^3), \quad (5.1)$$

სადაც,  $T$  არის მდინარის კალაპოტში ღვარცოფის მოძრაობის დრო (წმ);  $Q_{\max}$  - ღვარცოფის მაქსიმალური ხარჯი ( $მ^3 / წმ$ ).

(5.1) დამოკიდებულების გამოყენების ზღვრებია:

$$\begin{aligned} 180 \leq T \leq 2160 \quad , \quad (წმ); \\ 100 \leq Q_{\max} \leq 2000 \quad , \quad (მ^3 / წმ); \end{aligned} \quad (5.2)$$

(5.1) დამოკიდებულებით გაანგარიშებული იყო მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული ღვარცოფის მიერ ტრანსპორტირებული ღვარცოფული მასის მოცულობები ( $W$ ), რომელთა

მაჩვენებლებიც შედარებული იყო ბუნებაში გავიღებ მონაცემებთან; მათი თანხვედრის პროცენტული მაჩვენებლები მოცემულია ცხრილში (იხ. ცხრილი № 5.1).

### ცხრილი 5. 1

მდინარე დურუჯის ღვარცოვის მიერ ტრანსპორტირებული ღვარცოვული მასის თანხვედრის მაჩვენებლები

№	ღვარცოვის გაელის წელი	ღვარცოვის ხარჯი $Q_{max}$ (მ <sup>3</sup> /წმ)	ღვარცოვის ხანგრძლიობა $T$ (წმ)	ღვარცოვის მოცულობა - $W$ (მ <sup>3</sup> )		ცდომილება (%) - ებში
				საკვლე მონაცემები	(5.1) ფორმულით	
1	2	3	4	5	6	7
1	1899	434,8	1380	600024	689361	12,9
2	1906	2000,0	900	1 800000	1096675	39,6
3	1947	1666,6	960	1 599936	1058926	33,8
4	1949	370,4	1620	600048	782448	23,3
5	1956	253,2	900	227880	242579	6,1
6	1957	199,2	960	191232	224600	14,8
7	1961	159,6	900	143640	173197	17,1
8	1961	210,0	660	138600	132055	4,7
9	1961	740,0	1560	1 154400	1224423	5,7
10	1961	250	2160	540000	909388	40,6
11	1963	172,0	960	165120	201774	18,2
12	1963	132	420	55440	47341	14,6
13	1963	703	1740	1 223220	1 392487	12,2
14	1963	144	840	120960	144673	16,4
15	1963	73	420	30660	30722	0,2
16	1963	470	3300	1 551000	2 745691	43,5

## 5. 1 ცხრილის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7
17	1963	103	180	18540	10896	41,2
18	1963	1244	720	895680	552387	38,3
19	1963	443	1380	611340	698827	12,5
20	1963	288	300	86400	50172	41,9
21	1963	150	360	54000	41115	23,8
22	1963	262	720	188640	177167	6,1
23	1963	446	360	160560	91091	43,3
24	1963	205	900	184500	207926	11,3
25	1963	82	300	24600	20053	18,5
26	1963	62	1020	63240	105050	39,8
27	1973	200,6	900	180540	204658	11,8
28	1976	240,2	840	201768	210185	4,0
29	1977	167,6	720	120672	127863	5,6
30	1981	264,0	1200	316800	387263	18,2
31	1982	458,0	300	137400	70394	48,7
32	1983	229,0	720	164880	160585	2,6
33	1984	162,0	960	155520	193142	19,5
34	1986	282,0	720	203040	186942	7,9
35	1986	160,0	1500	240750	377177	36,2
36	1986	321,0	900	288900	288454	0,2
37	1990	114,0	1200	136800	209785	34,8
38	1992	330,2	1500	495300	640086	22,6
39	1997	221,1	1080	239868	289889	17,3
40	1999	333,3	1500	500000	644477	22,4

თუ ჩავატარებთ 5.1 ცხრილის ანალიზს დაეინახავთ, რომ მდინარე დურუჯის კალაპოტში დვარცოფის მიერ ტრანსპორტირებული დვარცოფული მასის მოცულობის სიდიდეების შედარება (5.1) ფორმულით გაანგარიშებულ მონაცემებთან იძლევა ცდომილებებს 0,2 – 40 %, რაც ჰიდროლოგიური ანგარიშისათვის დამაკმაყოფილებელია.

ამრიგად, მდ. დურუჯის წყალშემკრებ აუზში ჩატარებულმა საველე-ექსპედიციურმა კვლევებმა საშუალება მოგვცა გამოგვეტანა შემდეგი დასკვნა: **თეთრი და შავი დურუჯის მდინარეთა წყალშემკრები აუზების თანამედროვე ეკოლოგიური მდგომარეობა კატასტროფიულია და აუცილებელია სასწრაფოდ განხორციელდეს ფიტო-მელიორაციული, სატყეო-მელიორაციული, საინჟინრო-ეკოლოგიური და კომპლექსური დანიშნულების ღონისძიებები.**

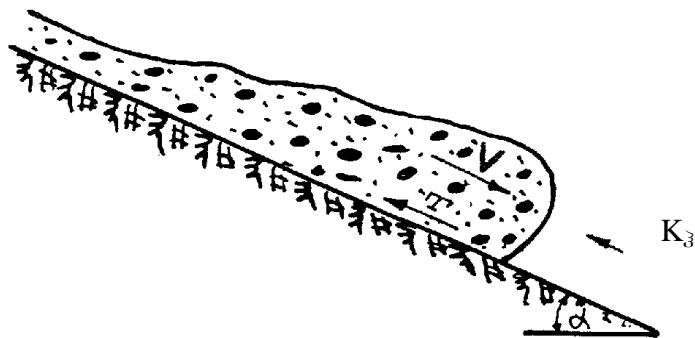
## 6. ღვარცოვის დინამიკის ზობიერთი საკითხები

### 6.1. ბმული ღვარცოვის სიჩქარის განსაზღვრა ჰაერის წინაღობის გათვალისწინებით

მდინარე დურუჯის ტრანზიტულ, შევიწროებულ უბნებზე, ბმული ღვარცოვის დიდი სიჩქარით მოძრაობის დროს, როდესაც მასის რიცხვი იცვლება  $M=0,015-0,073$  საზღვრებში ნაკადის ფრონტზე, ანალოგიურად თოვლის ზეგვის მოძრაობისა [34], თავს იჩენს ჰაერის წინაღობის ძალა, რომელიც ჩვეულებრივი ჰიდრაულიკურ წინაღობასთან ერთად ითვლება ღვარცოვის სიჩქარის ერთერთ განმსაზღვრელ პარამეტრად. ამ დროს ნაკადის ფრონტზე ჰაერის წინაღობის მხედველობაში მიღების შემთხვევაში მოძრაობის სრული წინაღობის კოეფიციენტი  $K_*$  წარმოდგენილი უნდა იყოს, როგორც შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტის /სიბლანტის/ ძალით გამოწვეული წინაღობისა  $K_b$  და ნაკადის ფრონტის მიმართ ჰაერის წინაღობის  $K_3$  კოეფიციენტის ჯამის სახით [17], ე.ი.

$$K_* = K_b + K_3 \quad (6.1)$$

ზემოთ მოყვანილი სქემის გათვალისწინებით განვიხილოთ ბმული ღვარცოფული მასის მოძრაობა ერთიანი კომპაქტური მაღალი კონცენტრაციის მქონე ნაკადის სახით [17], მდინარის  $\alpha$  კუთხით დახრილ კალაპოტში (იხ. სურ. 2.1).



სურ. 6.1. ბმული ღვარცოვის მოძრაობის

საანგარიშო სქემა.

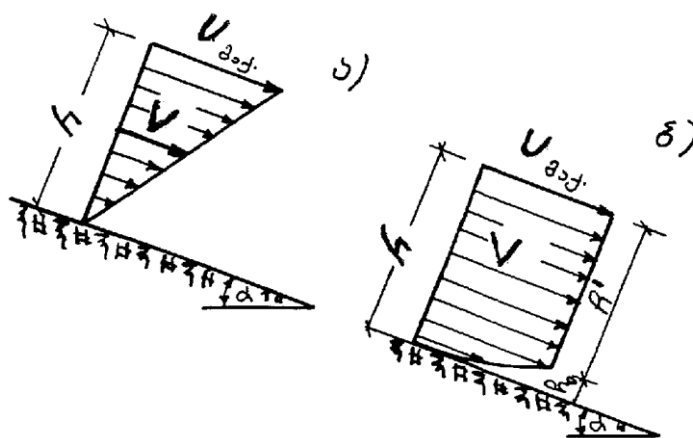
ამ შემთხვევაში შვედოვ-ბინგამის მოდიფიცირებულ დამოკიდებულებას ექნება შემდეგი სახე [55]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{U_{\text{მაქ}}}{h} + K \rho_3 V^2, \quad (6.2)$$

სადაც,  $\mu$  — ღვარცოფის სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი (გრ.ძ. წმ/სმ<sup>2</sup>),  $U_{\text{მაქ}}$  არის კვეთში ღვარცოფის მაქსიმალური სიჩქარე (სმ/წმ),  $V$  — ღვარცოფის ფრონტის საშუალო სიჩქარე (სმ/წმ),  $h$  — ღვარცოფის სიღრმე ფრონტის არეში (სმ),  $\rho_3$  — ჰაერის სიმკვრივე ( $\rho_3=1,0$  კგ/მ<sup>3</sup>), ხოლო  $\tau_0$  — საწყისი მხები ძაბვა ( $\tau_0 = \gamma i h_0$ ).

როგორც ცნობილია ღვარცოფის თანაბარი მოძრაობის დროს მხები ძაბვა ტოლია  $\tau = \gamma i h$  [30], სადაც  $\gamma$  — ღვარცოფის მოცულობითი წონაა (კგ.ძ./სმ<sup>3</sup>), ხოლო  $i$  — კალაპოტის ქანობია.

ღვარცოფის მოძრაობისას განვიხილოთ სიჩქარის ცვლილების ორი სახის ეპიურა, პირველი როდესაც სიჩქარის გრადიენტი მუდმივია ნაკადის მთელ სიღრმეზე და მეორე, როდესაც სიჩქარის გრადიენტი არსებობს მხოლოდ ნაკადის ფსკერთან თხელ შრეში (იხ. სურ. 6.2). პირველ შემთხვევაში ნაკადის მაქსიმალური სიჩქარე ტოლია  $U_{\text{მაქ}} = 2V$ , ხოლო მეორეში  $U_{\text{მაქ}} = V$ .



სურ. 6.2 სიჩქარის ცვლილების ეპიურები.

თუ (6.2) განტოლებაში შევიტანთ მაქსიმალური სიჩქარის მნიშვნელობას  $U_{ააქ} = 2V$  და გავამარტივებთ მივიღებთ:

$$K_h \rho_h V^2 + \frac{2\mu}{h} V - \gamma i (h - h_0) = 0 \quad . \quad (6.3)$$

(6.3) განტოლების ამოხსნით მივიღებთ ღვარცოფის ფრონტის საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობას, რომელსაც ჰაერის წინაღობის გათვალისწინებით აქვს შემდეგი სახე:

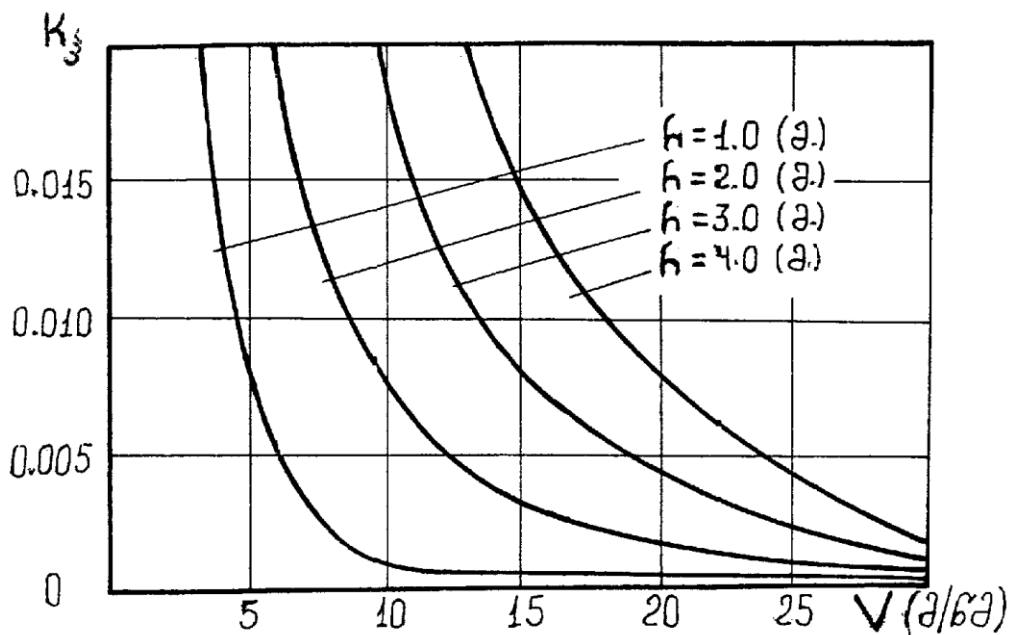
$$V = \frac{\left[ \mu^2 + K_h \rho_h \gamma i h^2 (h - h_0) \right]^{0,5} - \mu}{K_h \rho_h h} \quad , \quad (6.4)$$

სადაც  $h \neq h_0$ .

ნაკადის ფრონტის საშუალო სიჩქარესა და ჰაერის წინაღობის კოეფიციენტს შორის გრაფიკული დამოკიდებულება პარამეტრთა შემდეგი მნიშვნელობებისათვის:  $i = 0,2$ ;  $\mu = 6,0$  (გრ.დ.წმ/სმ<sup>2</sup>);  $\gamma = 2,06$  (გრ.დ/სმ<sup>3</sup>);  $h = 100, 200, 300$  და  $400$  (სმ) გამოსახულია 6.3 სურათზე.

თუ (6.3) განტოლებაში შევიტანთ მეორე დაშვებას, როდესაც  $U_{ააქ} = V$  მივიღებთ დამოკიდებულებას, რომლის მიხედვით აგებულ გრაფიკებსაც აქვთ ანალოგიური ფორმა, ხოლო შესაბამისი მნიშვნელობები შემცირებული ექნება 2-ჯერ [17].

თუ ბმული ღვარცოფის მოძრაობის დროს ნაკადის ფრონტს განვიხილავთ, როგორც ჰაერის ნაკადისაგან გარსშემოდინების ობიექტს, მაშინ ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტსა და რეინოლდსის რიცხვს (Re) შორის გრაფიკებს აგრეთვე აქვს ლოგა-



სურ. 6.3.  $K_3 = f(V, h)$  დამოკიდებულების გრაფიკი.

რითმული ფორმა, ისეთი, რომელიც ნახვენებია სურ. 6.3-ზე, იმ განსხვავებით, რომ ბმული ღვარცოფის მოძრაობის დროს, როდესაც ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტი იცვლება შემდეგ საზღვრებში  $K_3=0-0,02$ , რეინოლდსის რიცხვი  $Re=10^3$ -ის რიგისაა. თუ მოვახდენთ ჩატარებული კვლევის ანალიზს და შევადარებთ მყარი სხეულის მოძრაობის დროს ჰაერის შუბლურ წინაღობასა და რეინოლდსის რიცხვს შორის დამოკიდებულებების გრაფიკებს [60] დაეინახავთ, რომ ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტი იცვლება შემდეგ საზღვრებში  $K_3 = 0 - 1,0$ , ხოლო რეინოლდსის რიცხვი კი  $Re = 10^5$  რიგისაა.  $K_3 = f(Re)$  დამოკიდებულების გრაფიკის დახასიათებისათვის ისე, როგორც მიღებულია აეროდინამიკასა და ჰიდროდინამიკაში (ნიკურაძის გრაფიკები), საჭიროა ლაბორატორიული ცდების ჩატარება და შედეგების განზოგადოება.

განვიხილოთ ბმული ღვარცოფის მოძრაობა უფრო მკაცრი სქემით, როდესაც მხები ძაბვის გამომსახველ განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:



$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} + \tau_3, \quad (6.5)$$

სადაც  $\frac{du}{dy}$  — სიჩქარის გრადიენტი ა ვერტიკალური  $y$  — ღერძის გასწვრივ.  $\tau_3 = K_3 \rho_3 U^2$  — ჰაერის მხები ძაბვაა. თუ ანალოგიურად პირველი აღნიშვნისა (6.5) განტოლებაში შევიტანთ შესაბამის მნიშვნელობებს და გარდავქმნით, მივიღებთ:

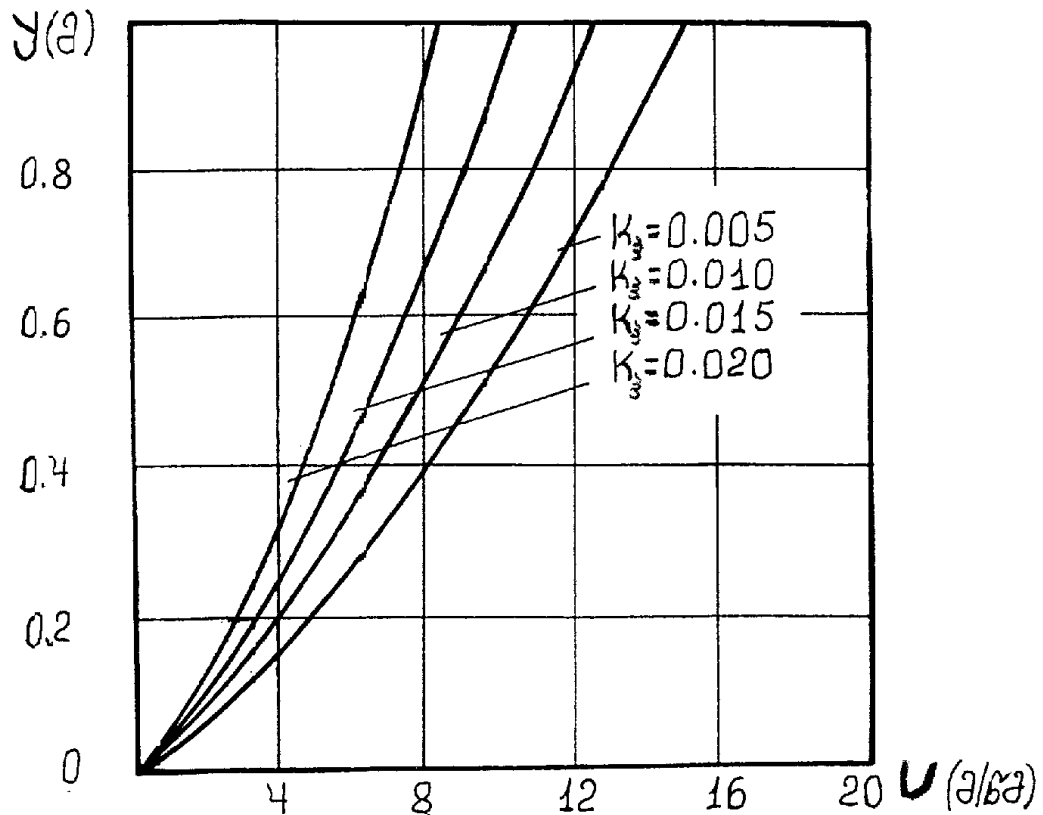
$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} [\gamma i(h-h_0) - \gamma i y - K_3 \rho_3 U^2]. \quad (6.6)$$

მათემატიკაში (6.6) განტოლება ცნობილია, როგორც რიკატის განტოლება, რომელსაც ჩაწერილი (6.6) დამოკიდებულების სახით ზოგადი ამონახსნი არ გააჩნია.

ამოცანის ამოხსნისათვის ვსარგებლობთ დიფერენციალური განტოლების ამოხსნის რიცხვითი მეთოდით [31,37]. ვიღებთ საწყის მონაცემებს და შეგვყავს სპეციალური პროგრამის დახმარებით კომპიუტერში; საწყისი მონაცემებია  $i = 0,2$ ;  $\gamma = 2,06$  (კგ.ძ/სმ<sup>3</sup>);  $h = 100$  (სმ);  $K_3 = 0,005 - 0,02$ ;  $\mu = 6,0$  (გრ.ძ.წმ/სმ<sup>2</sup>).

კომპიუტერზე რეალიზაციის შემდეგ ფუნქციური კავშირი ღვარცოფის სიჩქარესა და ნაკადის სიღრმეს შორის, ნაჩვენებია 6.4 სურათზე. თუ მიღებულ შედეგებს შევადარებთ იმ დამოკიდებულებებს [57], რომელშიც გათვალისწინებული არ არის ჰაერის შუბლური წინაღობა და ვინახავთ, რომ როდესაც ბმული მაღალი კონცენტრაციის ღვარცოფი მოძრაობს დაბალი სიჩქარეებით (როდესაც მახის რიცხვი  $M < 0,015$ ) განსხვავება მიღებულ და არსებულ დამოკიდებულებებს შორის იმდენად მცირეა, რომ ამ ფაქტორის გავლენა ნაკადის მოძრაობის სიჩქარეზე შეიძლება უგულებელყოფილი იყოს ე.ი.  $K_3 = 0$ ; ხოლო იმ შემთხვევაში, როდესაც, მახის რიცხვი იცვლება  $M = 0,015 - 0,073$  საზღვრებში ე.ი. როდესაც ბმული ღვარცოფი

მოძრაობს დიდი სიჩქარეებით განსხვავება მათ შორის იზრდება და იგი თითქმის 10 – 25% - მდე აღწევს.



სურ. 6.4.  $y = f(U, K_3)$  დამოკიდებულების გრაფიკი.

აღსანიშნავია, რომ დვარცოფების ფიზიკურ-მექანიკური და დინამიკური მოდელების დამუშავებაში პრიორიტეტი დამსახურებულად ეკუთვნით აკადემიკოს ო. ნათიშვილს და პროფესორ ვ. თევზაძეს [47, 48, 49].

ჩატარებული თეორიული კვლევების ანალიზმა და ზემოთ დასახელებული ავტორების მონოგრაფიებში დამუშავებულ მოდელებთან შედარებამ დაგვანახა, რომ მიღებული შედეგები ზუსტად ასახავს ბმული დვარცოფის ბუნებას და მისი მოძრაობის კანონებს, ეს კი მიუთითებს ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევების საიმედო მიმართულებაზე.

## 6.2. ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობა

### ჰაერის შუბლური წინაღობის გათვალისწინებით

ბუნებრივ კალაპოტებში, მათ შორის მდინარე ღურუჯის ღვარცოფსადინარშიც ბმული ღვარცოფის სიჩქარის ანგარიში ხორციელდება მდინარის კალაპოტის ცალკეული უბნებისათვის, სადაც დაგეგმილი იყო ღვარცოფსაწინააღმდეგო სხვადასხვა ტიპის ნაგებობების მშენებლობა. ამ შემთხვევაში ღვარცოფის გაანგარიშებისას ჰიდრაულიკური ელემენტები განისაზღვრებოდა ნაკადის თანაბარი მოძრაობის განტოლებებით.

ასეთი სახით ღვარცოფის ანგარიში უგულებელყოფს ისეთი ძირითადი დინამიკური სიდიდეების მხედველობაში არ მიღებას, რომელიც განაპირობებს სხვადასხვა დანიშნულების ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების სამშენებლო მასალის დიდი რაოდენობით გადახარჯვას და სხვა.

ღურუჯის კალაპოტის ზედა უბნებში ბმული ღვარცოფის ფორმირების დროს და მისი დაუმყარებელი მოძრაობისას ღვარცოფსადინარის ქვედა უბნებისაკენ ნაკადი სისტემატურად იცვლის თავის ჰიდრაულიკურ სიდიდეებს, რომლებიც ნაკადის ანგარიშისას აუცილებლად მხედველობაში უნდა იყოს მიღებული [2,22,30,39,49,52,61].

ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობისას ანგარიშის რიცხვითი მეთოდები ემყარება სენ-ვენანის განტოლებათა სისტემის ამოხსნას [15,31,37,54 და სხვა], რომლის რეალიზაცია კომპიუტერზე ეფუძნება სასაზღვრო პირობების ზუსტ შერჩევას; ამ მონაცემებს უნდა ქონდეთ ფიქსირებული საზღვრები, რომლის გათვალისწინების გარეშე დასახული ამოცანა სასურველი სიზუსტით არ ამოიხსნება.

ღურუჯის კალაპოტში ბმული ღვარცოფის მოძრაობა ზოგადად შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სქემით: “მოძრაობის დაწყება”, მოძრაობა ტრანზიტულ ზონაში და გაჩერება მდინარის გამოტანის კონუსზე. კერძო შემთხვევაში ბმული ღვარცოფის ფიზიკურ-

მექანიკური და რეოლოგიური თვისებებიდან გამომდინარე შესაძლებელია ნაკადის გაჩერება მდინარის ტრანზიტულ უბნებზეც. თითოეულ ამ ფაზას აქვს თავისი განსაკუთრებული თავისებურება გამომდინარე ამოცანის ამოხსნის მათემატიკური თვალსაზრისიდან, კერძოდ ალგორითმის შედგენაში, პროგრამის დამუშავებაში და ა.შ. ყველა ამ ფაზების გათვალისწინებით ამოცანის ამოხსნის დროს მხედველობაში უნდა იყოს მიღებული სასაზღვრო პირობების ისეთი მნიშვნელობები, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ამ ფაზებში ჰიდრაულიკური ხახუნისა და ჰაერის შუბლური წინააღობის კოეფიციენტების გათვალისწინებით გავიანგარიშოთ ბმული ღვარცოფს ძირითადი მაჩვენებლები. რაც შეეხება ბმული ღვარცოფის მოძრაობას ცვალებადი ხარჯის გათვალისწინებით, ჰიდრაულიკური ხახუნისა და ჰაერის წინააღობების კოეფიციენტის მხედველობაში მიღებით, ჯერ კიდევ ნაკლებად შესწავლილია და მოითხოვს ამ მეთოდების დახვეწას.

კვლევის მიზანს წარმოადგენს შევისწავლოთ ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობა მდინარე დურუჯის კალაპოტის ნებისმიერ უბანზე, როდესაც ნაკადის საშუალო სიჩქარე  $V > 5,0$  (მ/წმ).

როგორც ცნობილია მდინარის კალაპოტში ფორმირებული ბმული ღვარცოფი ღვარცოფსადინარში ნელ-ნელა იკრებს სიჩქარეს და გადადის “მოძრაობის” ფაზაში, რომელიც კალაპოტში იღებს ერთჯერადი ტალღის სახეს. ტალღა მოძრაობს კალაპოტის ტრანზიტულ უბნისაკენ ზემოთ განხილული სქემის მიხედვით, რომლის სიჩქარე მატულობს და ნაკადის საწინააღმდეგოდ ყალიბდება ჰიდრაულიკური ხახუნისა და ჰაერის წინააღობის ძალები (იხ. ნახ. 6.1) .

განვიხილოთ ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობა ცვლადი ხარჯის შემთხვევაში მდინარე დურუჯის  $\alpha$  -კუთით დახრილ

კალაპოტში, რომლის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას აქვს შემდეგი სახე [15]:

$$\begin{cases} B \frac{\partial h}{\partial t} + B \frac{\partial(hV)}{\partial x} = q_* \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = g \sin \alpha - g \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial x} - v^2 \left( \frac{K_b}{h} + \frac{K_3}{l} \right) - \frac{q_* V}{\omega} \end{cases}, \quad (6.7)$$

სადაც,  $B$  — მდინარის სიგანეა (მ),  $h$  — ღვარცოფის სიღრმე (მ),  $V$  — ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე (მ/წმ),  $X$  არის მდინარის კალაპოტის უბნის სიგრძე (მ),  $q_*$  — ღვარცოფის ხარჯის ცვლის ინტენსიობაა, რომელიც განპირობებულია მდინარის სიგრძეზე ფაზების შედინებით და გადინებით;  $g$  — თავისუფალი ვარდნის აჩქარება (მ/წმ<sup>2</sup>),  $i$  — მდინარის კალაპოტის ქანობი,  $K_b$  — ჰიდრავლიკური ხახუნის კოეფიციენტი,  $K_3$  — ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტი,  $l$  — ნაკადის მოძრაობის სიგრძე (მ),  $\omega$  — ღვარცოფის ცოცხალი კვეთის ფართობი (მ<sup>2</sup>).

(6.7) განტოლებათა სისტემის ამოსახსნელად ვიყენებთ დიფერენციალური განტოლების ამოხსნის რიცხვით მეთოდს, კერძოდ “ნაკადის ვექტორის გახლეჩის სქემას” [37,54].

ნაკადის ვექტორი გამომდინარე განტოლებათა სისტემიდან განსხვავდება ეილერისა და აეროდინამიკის ვექტორისაგან, იგი არ ითვლება ერთჯერად ფუნქციად. ამ შემთხვევაში იგი დაფუძნებულია ჰიპერბოლური განტოლებების თვისებების გამოყენებაზე, რომლის დახმარებით შესაძლებელია ვექტორის გახლეჩის სქემის აგება, რომელიც დიდი სიზუსტით ანგარიშის ჩატარების საშუალებას იძლევა.

როდესაც მიმდინარეობს ბმული ღვარცოფის სიჩქარის დადგენა ჰაერისა და ხახუნის წინაღობის კოეფიციენტების გათვალისწინებით ერთ-ერთ ძირითად პრობლემას წარმოადგენს “ნაკადის ვექტორის გახლეჩის სქემის” აგება. სტეიჯერმა და უორმინგმა [54] გამოიყენეს ის ფაქტორი, რომ ნაკადის ვექტორი  $f(G)$  განტოლებათა სისტემის (6.7)

დამოკიდებულებისათვის ჩათვალეს  $G$ -ს ერთადერთ ვექტორ – ფუნქციად.

ყოველივე ზემოთ აღნიშნულის გათვალისწინებით (6.7) განტოლებათა სისტემა ჩავწეროთ დიფერენციური ფორმით კონსერვატიული ცვლადებისათვის ( $J$  — იმპულსი,  $h$  — ნაკადის სიღრმე) ვექტორული ფორმით,

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} f(G) = W(G), \quad f(G) = W(G), \quad (6.8)$$

სადაც,  $Q = (J, h)^T$ ,  $J = hV$  და

$$\begin{cases} f(G) = \left( \bar{J}^2 / h + gh^2 / 2; \bar{J} \right)^T ; \\ w(G) = \left[ \frac{1}{h} \left\{ g \sin \alpha - V^2 \left( \frac{K_b}{h} + \frac{K_3}{\ell} \right) - \frac{qV}{\omega} \right\}; q_* B \right]^T ; \end{cases} \quad (6.9)$$

ბმული დვარცოფის ფორმირების პროცესს განვიხილავთ, როგორც ბუნებრივი ზღუდარის ან მიწის კაშხლის განგრევის შემთხვევას, როდესაც სასაზღვრო პირობებს აქვს შემდეგი მნიშვნელობები:

ა) ნაკადის სიღრმისათვის:

$$\begin{cases} 1; & t < 0,12 \\ 1 + \frac{(t-0,12)}{0,3}; & 0,12 \leq t \leq 0,72 \\ 3,0; & 0,90 < t < 2,40 \\ 1,0; & t \geq 2,40 \end{cases} ; \quad (6.10)$$

ბ) ნაკადის სიჩქარისათვის:

$$V_0(x) = 0,2; \quad h_0(x) = 1,0 ; \quad (6.11)$$

ამოცანის რეალიზაციის პროცესში მხედველობაშია მიღებული, როგორც ღვარცოფული მასის ძირითადი ჰიდროლოგიური, ჰიდრაულიკური თვისებები, ასევე მდინარის კალაპოტის გეოლოგიურ-ტოპოგრაფიული მახასიათებლები. ამისათვის ვიყენებთ  $\nabla = \frac{\partial F}{\partial Q}$  მატრიცის საკუთრივ მნიშვნელობებს, რომლებსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$\lambda_1 = V + \sqrt{gh \cos \alpha}; \quad \lambda_2 = V - \sqrt{gh \cos \alpha}; \quad (6.12)$$

შემოვიტანოთ აღნიშვნა  $C_0 \equiv \sqrt{gh \cos \alpha}$ , რომელიც ბმულ ღვარცოფში სიჩქარის იმპულსის სიდიდეს აღნიშნავს, ყოველივე ზემოთ აღნიშნულის გათვლისწინებით ღვარცოფი შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემდეგი სახით:

$$f(G) = \frac{h}{2} \left[ \frac{V(\lambda_1 + \lambda_2) + c_0(\lambda_1 - \lambda_2)/2}{\lambda_1 + \lambda_2} \right], \quad (6.13)$$

ხოლო საკუთრივი რიცხვითი მნიშვნელობები  $\lambda_1$  და  $\lambda_2$  კი წარმოვიდგინოთ:

$$\lambda_1 = \lambda_1^+ + \lambda_1^- \quad \lambda_2 = \lambda_2^+ + \lambda_2^-, \quad (6.14)$$

სიდიდეები  $\lambda_1$  და  $\lambda_2$  შეიძლება შევარჩიოთ სხვადასხვა სახით, მაგალითად:

$$\begin{aligned} \lambda_1^+ &= 0,5(V + |V|) + C_0; \\ \lambda_1^- &= 0,5(V - |V|); \\ \lambda_2^+ &= 0,5(V + |V|); \\ \lambda_2^- &= 0,5(V - |V|) + C_0; \end{aligned} \quad (6.15)$$

თუ (6.14) მნიშვნელობებს შევიტანთ (6.13), მივიღებთ:

$$\tilde{f}(\Pi) = a^+(\Pi) - a^-(\Pi) = p \left[ \frac{V(|V| + C_0)}{|V| + C_0} \right]. \quad (6.16)$$

ჩვენს მთლიანად კონსერვატიული სხვაობითი სქემა არაწრფივი რეგულატორით და თუ გავითვალისწინებთ (6.7) განტოლებათა სისტემის მარჯვენა მხარეს მივიღებთ:

$$\Pi_e + a(\Pi \delta - \alpha \delta \sigma) = K_{\text{ყფ}}(\Pi) + \Pi(\Pi) \delta, \quad (6.17)$$

სადაც,

$$G = (j^-, h)^T; j^- = hV;$$

ე.ი.

$$\begin{cases} f(G, \alpha, \sigma) = (J^{-(\alpha)} \cdot V(\sigma) + 0,5 \cos \alpha (h^2) \alpha; J^{-(\alpha)} \cdot V(\sigma))^T \\ R(G) = \frac{h \Delta x}{4} \begin{bmatrix} (|V + C_0| + |V - C_0| \cdot V + 0,5 C_0 h |V + C_0| - |V - C_0|) \\ |V + C_0| - |V - C_0| \end{bmatrix}^T \\ w(G) = \left[ \frac{1}{h} \left\{ g \sin \alpha - V^2 \left( \frac{K_b}{h} + \frac{K_z}{\ell} \right) - \frac{q_* V}{\omega} \right\}; q_* B \right]^T \end{cases}, \quad (6.18)$$

როდესაც  $\alpha = 0$  და  $\sigma = 0$ , სხვაობითი სქემა (6.17) იცვლის სახეს და მიიღება ბმული ღვარცოფის “ვექტორის გახლეჩის სქემა”, ე.ი.

$$\Pi^{T+1} = \Pi^T - \tau' [a(\Pi)_{\text{ყ}} - 0,65 \Delta \varphi a(\Pi)_{\text{ყ}}] + \tilde{w}, \quad \Pi(6.19)$$

სადაც,  $\tau'$  დროის ცვალებადობის ბიჯია;  $\Delta X$  - თანაბარი სივრცით ბადის ბიჯი,  $n$  - დროებითი ფენის ნომერი, ხოლო  $\tilde{w}$  - განტოლების სისტემის მარჯვენა ნაწილის დისკრეტული ანალოგია.

სქემის რეალიზაციისათვის საჭიროა შესრულდეს კურანტ-ფრიდრიხს - ლევის მდგრადობის პირობა [54],

$$\tau' \leq \frac{Cr \cdot \min \Delta x}{\max(|V| + C_0)}, \quad (6.20)$$

სადაც,  $Cr$  - კურანტის რიცხვია.



დამოკიდებულება (6.17) გამოვსახოთ გაშლილი სახით, მივიღებთ,

$$\begin{aligned}
 (hV)_i^{n+1} = & (hV)_i^n - t' \left[ \frac{1}{2\Delta x} \left\{ \left( hV^2 + \frac{gh^2 \cos \alpha}{2} \right)_{n+1}^n - \left( hV^2 + \frac{gh^2 \cos \alpha}{2} \right)_{i-1}^n \right\} - \frac{1}{2\Delta x} \left\{ [hV(|V| + C_0)]_{i+1}^n \right\} - \right. \\
 & \left. - 2 \cdot [hV \cdot (|V| + C_0)]_i^n + [hV(|V| + C_0)]_{i-1}^n \right\} + \frac{1}{h_i^n} \left[ g \sin \alpha - (V_i^n)^2 \cdot \left( \frac{K_b}{h} + \frac{K_3}{l} \right) - \frac{q_* V_i^n}{\omega} \right] ;
 \end{aligned}
 \tag{6.21}$$

$$\begin{aligned}
 h_i^{n+1} = & h_i - \tau' \left[ \frac{1}{2\Delta x} \left\{ (hV)_{i+1}^n - (hV)_{i-1}^n \right\} - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2\Delta x} \left\{ [h \cdot (|V| + C_0)]_{i+1}^n - 2[h(|V| + C_0)]_i^n + [h(|V| + C_0)]_{i-1}^n \right\} + q_* / B \right].
 \end{aligned}
 \tag{6.22}$$

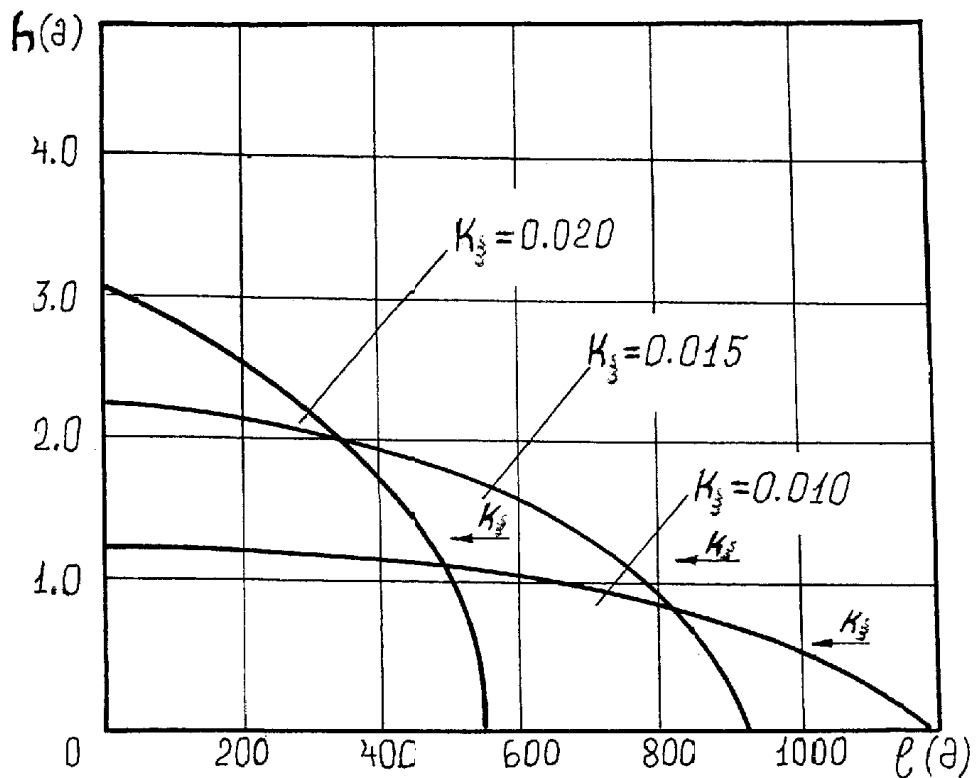
ბმული ღვარცოვის დაუმყარებელი მოძრაობის ანგარიში ჰაერისა და ჰიდრაულიკური ხახუნის წინააღმდეგობის კოეფიციენტების გათვალისწინებით რეალიზებულია კომპიუტერზე ბეისიკის ენაზე.

საწყისი მონაცემების მნიშვნელობები იცვლებოდა შემდეგ საზღვრებში: კალაპოტის ქანობი  $i = 0,05 \dots 0,7$ ; კალაპოტის სიგანე  $B = 5,0 \dots 25,0$  (მ); ბმული ღვარცოვის ხარჯის ცვლის ინტენსივობა  $q_* = 500 \dots 4000$  (კგ/მ.წმ); ჰიდრაულიკური ხახუნის კოეფიციენტი  $K_b = 0,1 \dots 0,05$ ; ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტი  $K_3 = 0,01 \dots 0,05$ ; მდინარის ტრანზიტული უბნის სიგრძე  $l = 300 \dots 1500$  (მ).

კონკრეტული მაგალითისათვის დაუშვით, რომ  $i = 0,2$ ;  $K_3 = 0,1$ ; ხოლო  $l$  კი  $300 \leq l \leq 1500$  (მ). ანგარიშის შედეგი დატანილია 6.5 სურათზე.

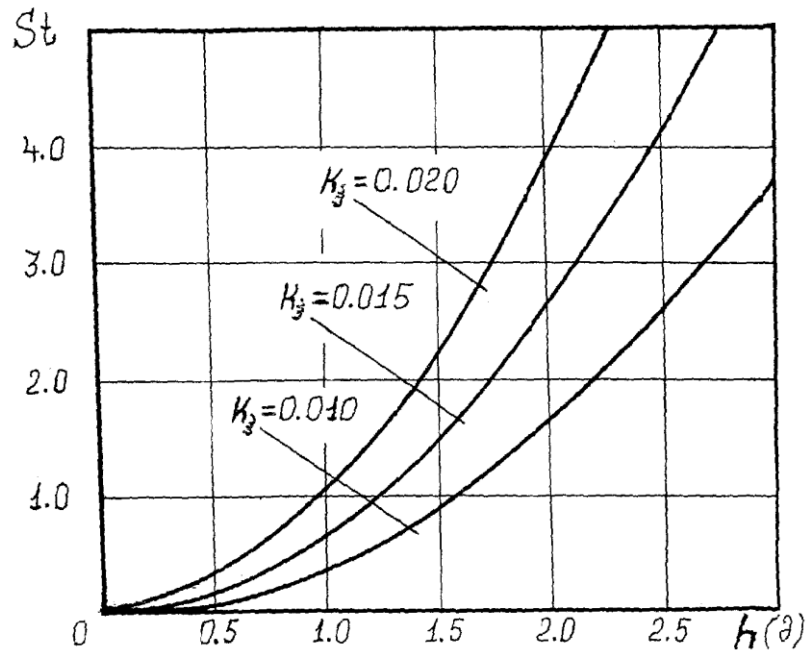
ბმული ღვარცოვის ტალღის დაუმყარებელი მოძრაობის დროს ერთ-ერთ ძირითად მახასიათებელ სიდიდეთ ითვლება ინერციის ძალის მნიშვნელობის დადგენა, რომელიც აეროდინამიკაში [60]

ცნობილია, როგორც სტრუხალის (St) რიცხვი. საქართველოს ღვარცოფული ტიპის მდინარეებზე, მათ შორის მდინარე დურუჯზე გავლილი ღვარცოფის ბუნებრივი დაკვირვებების ანალიზმა დაგვანახა, რომ სტრუხალის რიცხვი იცვლება შემდეგ საზღვრებში  $0 < St < 10$ , ხოლო კონკრეტული მაგალითისათვის სტრუხალის რიცხვსა და ნაკადის ტალღის სიღრმეს შორის დამოკიდებულების გრაფიკები, ჰაერის შუბლური წინააღობის კოეფიციენტის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს ნაჩვენებია 6.6 სურათზე.



სურ. 6.5.

ბმული ღვარცოფის ტალღური მოძრაობის გრძივი პროფილები ჰაერის წინააღობის კოეფიციენტის სხვადასხვა მნიშვნელობებისას.



სურ. 6. 6.

$St = f(h, K_3)$  დამოკიდებულების გრაფიკი.

ამრიგად, წარმოდგენილი მეთოდი ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობის ანგარიში ჰიდრაულიკური ხახუნისა და ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტების გათვალისწინებით გვაძლევს საშუალებას დროის ნებისმიერ მომენტში ვიანგარიშოთ ნაკადის ყველა ის ძირითადი პარამეტრები, რომლებიც განაპირობებენ ბმული ღვარცოფის ტალღურ მოძრაობას ღვარცოფსადინარის იმ უბნებზე, სადაც ინტენსიურად მიმდინარეობს მდინარე დურუჯის კალაპოტის დეფორმაციული პროცესები.

### 6.3. ბმული ღვარცოფის ტალღის ფორმების დადგენა ხახუნისა და ჰაერის წინაღობის გათვალისწინებით

ბმული ღვარცოფის კინეტიკური ენერგია და შესაბამისად ამ ნაკადების დამანგრეველი ძალის სიდიდე სხვა ფაქტორებთან ერთად დამოკიდებულია, ნაკადის ტალღის, როგორც ფორმასთან, აგრეთვე მის სიგრძესთან, რადგანაც ეს სიდიდეები განაპირობებენ ღვარცოფის სიმძლავრეს.

თეორიული კვლევებისა და მდ. დურუჯზე გავლილი ბმულ ღვარცოფზე დაკვირვებებმა დაგვანახა, რომ ტალღის სიჩქარის მნიშვნელობები ფრონტის არეში გაცილებით მეტია, ვიდრე მის უკანა ნაწილში, ამიტომ ნაკადის ტალღის როგორც ფორმის, ასევე მისი სიგრძის შესწავლა ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტის გათვალისწინებით აქტუალურია.

ამ საკითხის შესწავლის მიზნით განვიხილოთ ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობის განტოლება მუდმივი ხარჯის შემთხვევაში [15]:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hV)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = g \sin \alpha - g \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial x} - V^2 \left( \frac{K_b}{h} + \frac{K_3}{\ell} \right) \end{cases} ; \quad (6.23)$$

ტალღის ფორმების დადგენისათვის (ხახუნისა და ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტების გათვალისწინებით) საჭიროა (6.23) განტოლებათა სისტემა ჩავწეროთ ნაკადის ტალღის ფრონტისათვის, ამისათვის დავუშვათ, რომ  $X = (x-Vt)$ . თუ გავითვალისწინებთ ზემოთ განხილულ დაშვებას და გავამარტივებთ (6.23) დამოკიდებულებას მივიღებთ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial X} \cdot \frac{\partial(x - V_1 t)}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial X} (-V_1) \\ \frac{\partial(hV)}{\partial x} = \frac{\partial(hV)}{\partial X} \cdot \frac{\partial(x - V_1 t)}{\partial x} = \frac{\partial(hV)}{\partial X} \\ \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \frac{\partial(x - V_1 t)}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial X} (-V_1) \\ \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial X} \cdot \frac{\partial(x - V_1 t)}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial X} \\ \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial X} \cdot \frac{\partial(x - V_1 t)}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial X} \end{array} \right. , \quad (6.24)$$

სადაც,  $V_1$  – ნაკადის ფრონტში გავრცელების სიჩქარეა (მ/წმ).

თუ (6.24) გამოსახულების მნიშვნელობებს შევიტანო (6.23) განტოლებათა სისტემაში და გავითვალისწინებთ სასაზღვრო პირობებს, მივიღებთ:

$$g \cos \alpha \frac{dh}{dx} = g \sin \alpha - V^2 \left( \frac{K_b}{h} + \frac{K_3}{\ell} \right) , \quad (6.25)$$

ე.ი.

$$\frac{dh}{dX} = \operatorname{tg} \alpha - \frac{V^2}{g \cos \alpha} \left( \frac{K_b}{h} + \frac{K_3}{\ell} \right) \quad (6.26)$$

გავაინტეგრავთ (6.26) დამოკიდებულებას,

$$\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha - \frac{K_3 V^2}{\ell \cdot g \cos \alpha}} h + \frac{K_b V^2 / g \cos \alpha}{\left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{K_3 V^2}{\ell \cdot g \cos \alpha} \right)^2} \cdot \ln \left| h \left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{K_3 V^2}{\ell \cdot g \cos \alpha} \right) - \frac{K_b V^2}{g \cos \alpha} \right| = X + C \quad (2.27)$$

ინტეგრების მუდმივას დასადგენად დაუშვათ, რომ როდესაც  $X = 0$ , მაშინ  $h = 0$ , ე.ი.

$$C = \frac{K_b V^2}{g \cos \alpha \left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{K_3 V^2}{\ell \cdot g \cos \alpha} \right)} \cdot \ln \left| - \frac{K_b V^2}{g \cos \alpha} \right| . \quad (6.28)$$

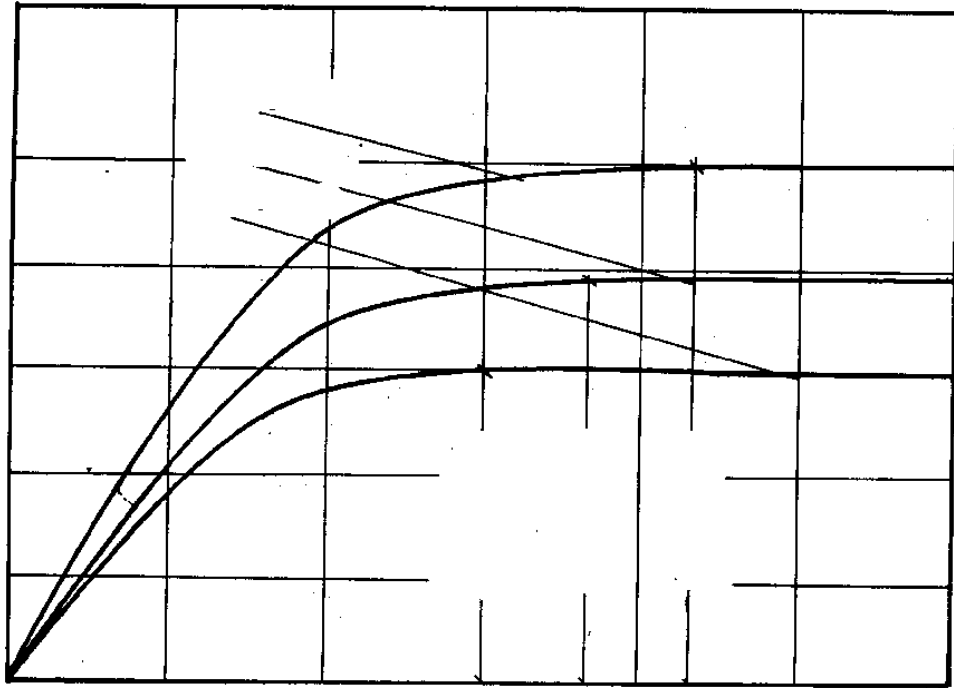
თუ (6.28) გამოსახულების მნიშვნელობას შევიტანო (6.27) განტოლებათაში და გარდავქმნით, მივიღებთ დამოკიდებულებას, რომლის

დახმარებითაც შესაძლებელი იქნება ნაკადის ტალღის ფრონტის ფორმების დადგენა:

$$h + \frac{K_b V^2}{g \cos \alpha \left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{K_3 V^2}{\ell \cdot g \cos \alpha} \right)} \cdot \ln \left| \frac{\frac{K_b V^2}{g \cos \alpha \left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{K_3 V^2}{\ell \cdot g \cos \alpha} \right)} - h}{\frac{K_b V^2}{\ell g \cos \alpha \left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{K_3 V^2}{\ell \cdot g \cos \alpha} \right)}} \right| = X \left( \operatorname{tg} \alpha - \frac{K_3 V^2}{\ell \cdot g \cos \alpha} \right), \quad (6.29)$$

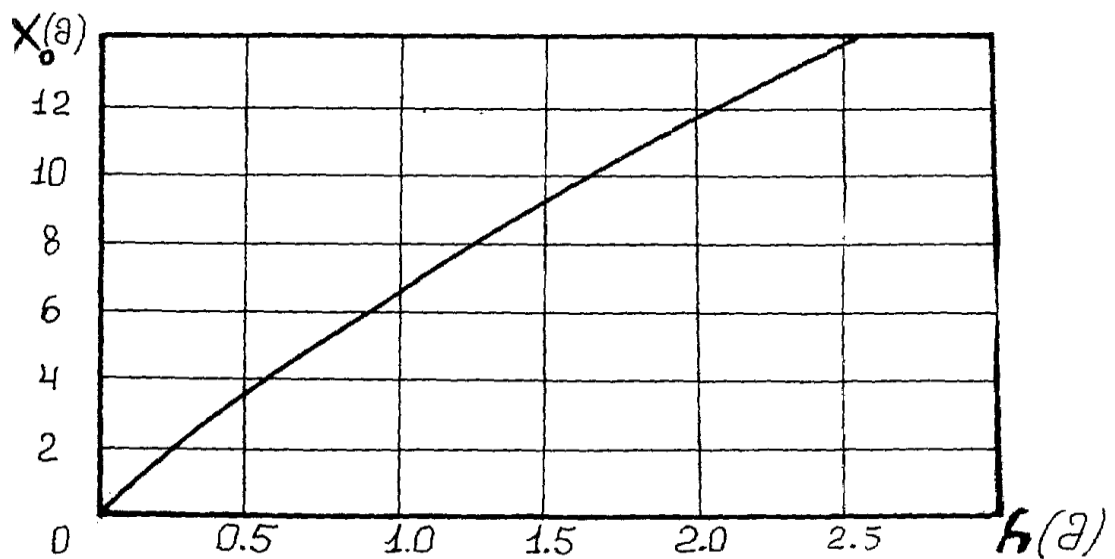
სადაც  $X$  – არის მანძილი, რომელიც დაკავშირებულია მოძრავ კოორდინატებთან. ნაკადის ტალღის ფორმების დადგენისათვის ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტის ( $K_3$ ) სხვადასხვა სიდიდეების გათვალისწინებით, ვუშვებთ საწყის მნიშვნელობებს:  $K_b = 0,2$ ;  $V = 10$  (მ/მწ);  $\alpha = 30^\circ$ ;  $K_3 = 0,01$ ;  $0,020$  და  $0,025$ . ანგარიშის მნიშვნელობები დატანილი არის 6.7 სურათზე.

ღვარცოფის ნაგებობაზე დარტყმის ძალის მაქსიმალური სიდიდის დასადგენად სხვა ფაქტორებთან ერთად ერთ-ერთ ძირითად პარამეტრს წარმოადგენს ბმული ღვარცოფის ტალღის სიგრძის დადგენა, რომლის მნიშვნელობაც ღვარცოფის საშუალო სიღრმის მიხედვით ნაჩვენებია ნახაზზე ( იხ. სურათი 6. 8. ).



სურ. 6. 7.

$h = f(X, K_3)$  დამოკიდებულების გრაფიკი.



სურ. 6.8.

$X_0 = f(h)$  დამოკიდებულების გრაფიკი.

ღვარცოფის ტალღის სიგრძე იანგარიშება შემდეგი ემპირიული დამოკიდებულებით :

$$X_0 = 6,5 h^{0,77} , \quad (მ). \quad (6.30)$$

ჩატარებული კვლევის საიმედოობის დასადგენად მიღებული შედეგები შედარებული იყო იაპონელი მეცნიერის პროფესორ ტ. ტაკაჰაშის [55] მონაცემებთან. შედარებამ დაგვანახა, რომ ღვარცოფის დიდი სიჩქარეებით მოძრაობის შემთხვევაში (როდესაც მახის რიცხვი  $M > 0,015$ ) 20%-ით და ზოგჯერ მეტი სიდიდითაც განსხვავდებიან. ეს განსხვავება გამოწვეულია იმით, რომ ჩვენს მათემატიკურ მოდელში ღვარცოფის ტალღის ფორმების დადგენის დროს ჰიდრაულიკური ხახუნის კოეფიციენტთან ერთად გათვალისწინებულია ჰაერის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტიც, რომელიც ძირითადად განაპირობებს ნაკადის ტალღის, როგორც ფორმის, ასევე სიგრძის მნიშვნელობებს.

ამრიგად, ვიცით, რა ღვარცოფის ტალღის, როგორც ფორმის საანგარიშო გამოსახულება (6.29), ასევე მისი სიგრძის დასადგენი დამოკიდებულება (6.30) სირთულეს აღარ წარმოადგენს ვიანგარიშით ნაკადის მაქსიმალური (დამანგრეველი) ძალის სიდიდის მნიშვნელობა გამოწვეულს ნაკადის ტალღის მოქმედებით, რომლის მნიშვნელობაც გაცილებით დიდია, ვიდრე ძალისა გაანგარიშებული ნაკადის საშუალო სიჩქარის გათვალისწინებით.



**7. ღვარცოფული პროცესების პრობნოზირება  
კატასტროფების თეორიის გამოყენებით  
ღვარცოფული მასის წონასწორობისა  
და მისი დაძვრის ანალიზი**

ბუნებაში დაფიქსირებულია ისეთი მოვლენები (კაშხლების ნგრევა, თოვლის ზვაგების დაძვრა და სხვა), რომელთა მოძრაობის დაწყება მიმდინარეობს არა თანდათანობით, არამედ ნახტომის ფორმით—უეცრად, რაღაც მცირე დროის მონაკვეთში, გამონაკლის არც ღვარცოფული პროცესები წარმოადგენენ, რომელთა მასის მომზადება ხდება, როგორც მთის ფერდობის ეროზიის, ასევე მთის ფერდის წონასწორობის დარღვევით (მეწყერი), ხოლო ღვარცოფული მასის წონასწორობის დარღვევა ხდება უეცრად [12,14].

განვიხილოთ მდინარე დურუჯის სათავეში შავი კლდის ეროზიულ დრანტეებში დაგროვილი ღვარცოფული მასა, რომელიც იმყოფება ზღვრულ წონასწორულ (უძრავ) მდგომარეობაში. ამ შემთხვევაში ეროზიულ დრანტეებში დაგროვილი ერთეული მოცულობის ღვარცოფული მასისათვის დეფორმაციის პოტენციალური ენერჯია  $E_3$  ცნობილი ლიტერატურული წყაროებისა [1,12,14,15] და ჩატარებული გარდაქმნებით გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებით

$$E_3 = \frac{2}{E \sin 2\alpha} \cdot \frac{\xi^3 - \xi^2 + \xi + 1}{\xi^3 - \xi^2 - \xi + 1} (\text{atg}\phi + c)^2, \quad (7.1)$$

სადაც  $E$  — გრუნტის დრეკადრობის მოდულია  $\sin\alpha$  — მდინარის კალაპოტის ქანობი,  $\xi$  — გრუნტის გვერდითი წნევის კოეფიციენტი, რომელიც პუასონის კოეფიციენტთან დაკავშირებულია შემდეგი დამოკიდებულებით [1]:

$$\mu' = \frac{\xi}{\xi + 1}. \quad (7.2)$$

შემოვიტანოთ აღნიშვნა:

$$A \equiv \frac{2}{E \sin 2\alpha} \cdot \frac{\xi^3 - \xi^2 + \xi + 1}{\xi^3 - \xi^2 - \xi + 1} . \quad (7.3)$$

გრუნტის საკუთარი წონით გამოწვეული ვერტიკალური წნევა ( $P_{\varphi}$ ), ტენიანობის ( $W'$ ) გათვალისწინებით ტოლია [50]:

$$P_{\varphi} = \gamma_{\text{გვ}} (1+0,01W') \cdot h' . \quad (7.4)$$

თუ გავითვალისწინებთ (7.3) და (7.4) დამოკიდებულებებს, (7.1) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$E_3 = a (\operatorname{tg}\varphi + c)^2, \quad (7.5)$$

სადაც,  $\varphi$  — გრუნტის შიგა ხახუნის კუთხეა,  $c$  — გრუნტის შეჭიდულობის ძალაა, ხოლო,

$$a \equiv 2\gamma_{\text{მს}} h' \cos 2\alpha (1+0,01 W') . \quad (7.6)$$

როგორც (7.5) გამოსახულებიდან ჩანს ღვარცოფული მასის დეფორმაციის პოტენციალური ენერგია დამოკიდებულია ორ  $\varphi$  და  $c$  შინაგან ცვლადზე და ერთ გარეგან -  $W'$  პარამეტრზე — ტენიანობაზე.

დავადგინოთ პოტენციალური ენერგიის გრადიენტი კოორდინატთა სათავეში, სიმარტივისათვის აღვნიშნოთ:

$$y_1 = \varphi, y_2 = c \quad \text{და} \quad \nabla E_3 = \left( \frac{dE_3}{dy_1}, \frac{dE_3}{dy_2} \right) . \quad (7.7)$$

განვიხილოთ  $\operatorname{tgy}_1$  ფუნქციის ტეილორის მწკრივად გაშლა:

$$\operatorname{tgy}_1 = y_1 + \frac{1}{3}y_1^3 + \frac{2}{15}y_1^5 + \dots \quad (7.8)$$

თავდაპირველად შევისწავლოდ  $\operatorname{tgy}_1$  ფუნქციის (7.8) ტეილორის მწკრივად გაშლის მესამე ნაკადი ( $j_3$ ), ე.ი.

$$(j_3) \operatorname{tgy}_1 = y_1 + \frac{1}{3}y_1^3. \quad (7.9)$$

(7.9) განტოლების გათვალისწინებით (7.5) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$E_3 = \left[ a \left( y_1 + \frac{1}{3}y_1^3 \right) + y_2 \right]^2. \quad (7.10)$$

პოტენციალური ენერჯიის გრადიენტი ტოლია;

$$\begin{cases} \frac{dE_p}{dy_1} = 2Aa \left[ a \left( y_1 + \frac{1}{3}y_1^3 \right) + y_2 \right] \cdot (1 + y_1)^2; \\ \frac{dE_p}{dy_2} = 2A \left[ a \left( y_1 + \frac{1}{3}y_1^3 \right) + y_2 \right]; \end{cases} \quad (7.11)$$

რადგან პოტენციალური ენერჯიის გრადიენტი კოორდინატთა სათავეში ტოლია ნულის ( $\nabla_3 = (0,0) = 0$ ), მაშასადამე არაცხადი ფუნქციის თეორემის გამოყენება არ შეიძლება და საჭიროა შევამოწმოთ მორსის ლემის პირობა, ე.ი. დავადგინოთ ე.წ. “ჰესიანის” გადაგვარების პირობა [33,51]. შემოვიტანოთ აღნიშვნა:

$$H^* \equiv \left( \frac{d^2 E_3}{d y_i d y_j} \right)_{ij}, \quad ij = \overline{1,2} \quad (7.12)$$

პოტენციალური ენერჯიის მეორე რიგის კერძო წარმოებულის პოენის შემდეგ “ჰესიანი” კოორდინატთა სათავეში მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{vmatrix} 2Aa^2 & 2Aa \\ 2Aa & 2A \end{vmatrix} = 0, \quad (7.13)$$

ხოლო (7.13) გამოსახულების დეტერმინანტი ტოლია:

$$\det(H^*) = 4A^2a^2 - 4A^2a^2 = 0, \quad (7.14)$$

ე.ი. მორსის ლემის პირობა არ სრულდება და მაშასადამე კრიტიკული წერტილი არაიზოლირებული გადაგვარებული წერტილია, ანუ წარმოადგენს არა მორსის კრიტიკულ წერტილს; რადგან  $\nabla E_3 = 0$  და  $\det(H^*) = 0$ , ამიტომ შეიძლება გამოვიყენოთ განცალკევების ლემა, ამისათვის საჭიროა ვიპოვოთ “ჰესიანის” მახასიათებელი განტოლების საკუთრივი მნიშვნელობა,

$$\begin{vmatrix} a^2 - \lambda & a \\ a & 1 - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (7.15)$$

(7.15) განტოლების ამოხსნით მივიღებთ  $\lambda_1 = 0$  და  $\lambda_2 = (a^2+1)$ , რადგან  $\lambda_2 \neq 0$ , ამიტომ საწყისი შინაგანი ორი ცვლადიდან ცვლადთა ლოკალური გარდაქმნით, გადაგვარდება მხოლოდ ერთი ცვლადი, ე. ი. პოტენციალური ფუნქცია ცვლადთა გარდაქმნის  $\left( \begin{smallmatrix} \cdot \\ = \end{smallmatrix} \right)$  შემდეგ მიიღებს სახეს [51]:

$$E_3 \stackrel{\cdot}{=} \text{Cat}(J, K) + f_M(X_2), \quad (7.16)$$

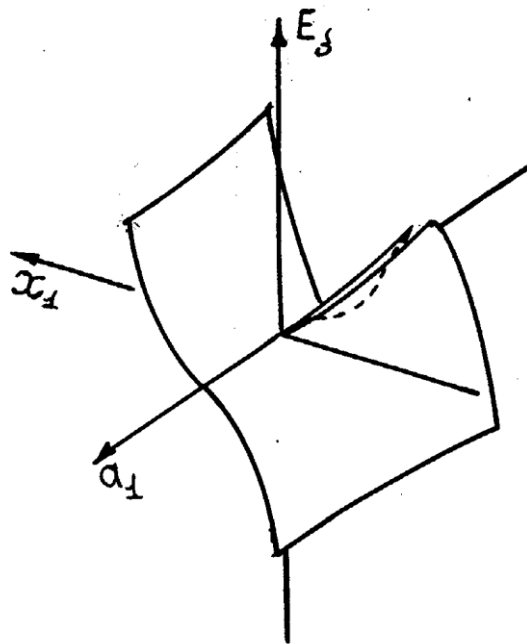
სადაც,  $\text{Cat}(J, K)$  — კატასტროფის ფუნქციაა [3,51],  $J$  — ცვლადთა რაოდენობა, ხოლო  $K$  — პარამეტრების რაოდენობა,  $f_M$  — მორსის კვადრატული ფორმა. ჩვენს შემთხვევაში  $J = 1$ ,  $K = 1$  ამიტომ ტომის თეორემის თანახმად [33,51], მივიღებთ:

$$\text{Cat}(1,1) = x_1^3 + a_1 x_1 . \quad (7.17)$$

მიღებული კატასტროფა წარმოადგენს ტომის შვიდი კატასტროფიდან ე.წ. “ნაკეცის” კატასტროფას. პოტენციალური ენერჯიის ლოკალური სახე კოორდინატთა სათავეში მოცემულია 7.1 სურათზე, ხოლო კრიტიკული წერტილის მნიშვნელობა კი ტოლია:

$$X_1 = \pm \sqrt{-(a_1/3)} . \quad (7.18)$$

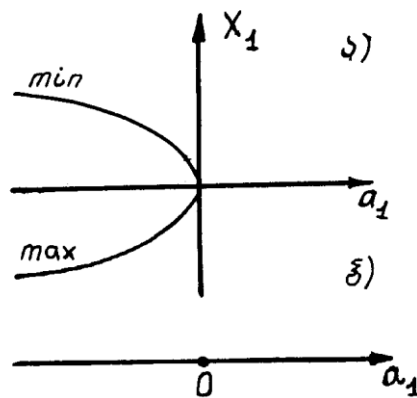
კრიტიკულ წერტილთა სიმრავლე მოცემულია სურ. 7.2-ა-ზე, როგორც (7.18) გამოსახულებიდან ჩანს ფუნქციის ლოკალური მინიმუმია  $X_1 = -\sqrt{-(a_1/3)}$ , რომელშიც იმყოფება ფაქტიურად ზემოთ აღწერილი მოვლენა  $a_1$  პარამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის.



სურ. 7.1.

პოტენციალური ენერჯიის გრაფიკი.

როგორც ჩანს პარამეტრის უარყოფითი მნიშვნელობებისათვის პოტენციალურ ენერგიას აქვს ერთი ლოკალური მინიმუმი, ხოლო დადებითი მნიშვნელობებისათვის ფუნქციას ლოკალური მინიმუმი საერთოდ არ გააჩნია, რაც იმას მიუთითებს, რომ ( $a_1 = 0$ ) წერტილში პოტენციალური ენერგიის გრადიენტი განიცდის ნახტომს და ფიზიკური მოვლენა გადადის სხვა მდგომარეობაში, რომელსაც ჩვენი მათემატიკური მოდელი არ აღწერს, ე.ი. იწყება ზღვრულ წონასწორობაში მყოფი დვარცოფული მასის მოძრაობა. ( $a_1 = 0$ ) — წერტილს ეწოდება ბიფურკაციის წერტილი და იგი ჩვენს შემთხვევაში ერთადერთია (იხ. სურ. 7.2–ბ ).



სურ. 7.2.

პოტენციალური ენერგიის კრიტიკული წერტილები.

ა) ლოკალური მინიმუმები და მაქსიმუმები.

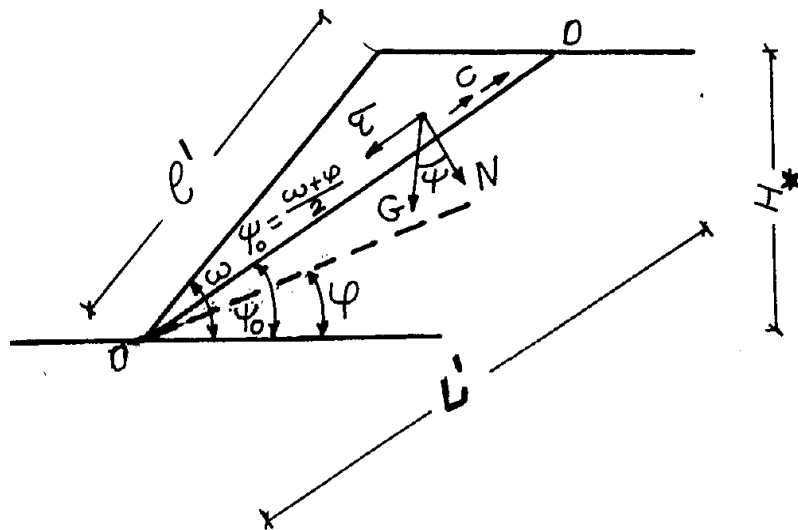
ბ) ბიფურკაციის წერტილი.

ამრიგად, ერთ პარამეტრიანი ბმული დვარცოფული მასის მოდელის შემთხვევაში, დვარცოფული მასის ზღვრულ წონასწორობიდან გამოსვლა აღიწერება “ნაკეცის” კატასტროფით. აკადემიკოს ც. მირცხულავას ნაშრომში [43] ნახვენები აქვს, რომ თოვლის ზვავისა და დვარცოფის ფრონტის გაჩერების აღმწერი მოვლენა წარმოადგენს

“ნაკეცის” კატასტროფას, რაც ერთხელ კიდევ მიუთითებს ჩატარებული კვლევის საიმედო მიმართულებაზე.

განვიხილოთ მცირე სიმაღლის მეწყერი და დაუშვათ, რომ მთის ფერდის დაძვრის სიბრტყეს აქვს წრფივი ხასიათი (იხ.სურ. 7.3); სადაც  $l'$  — მთის ფერდობის სიგრძეა,  $L'$  — დაცურების სიბრტყის სიგრძეა,  $H_*$  — მთის ფერდობის სიმაღლე. ჩამოცურების სიბრტყეში გრუნტის აქტიური (კრიტიკული) შეჭიდულობის ძალის მნიშვნელობა ტოლია [50]:

$$c = \frac{\gamma H_*}{2} \cdot \frac{\sin(\omega - \psi) \cdot \sin(\psi - \varphi)}{\sin \omega \cdot \cos \varphi} \quad (7.19)$$



სურ. 7. 3.

მთის ფერდის განივი ჭრილი.

გავაწარმოთ (7.19) გამოსახულება  $\psi$  — კუთხით (გრუნტის ჩამონგრევის კუთხე) მივიღებთ:

$$\frac{dc}{d\psi} = \frac{\gamma H_*}{2} \cdot \frac{\cos(\psi - \varphi) \cdot \sin(\omega - \psi_0) - \sin(\psi_0 - \varphi) \cdot \cos(\omega - \psi_0)}{\sin \omega \cdot \cos \varphi}; \quad (7.20)$$

განვიხილოთ  $c(\psi)$  ფუნქციის ტეილორის მწკრივად გაშლა:

$$c(\psi_0 + \varphi) = a_0 + a_1 \psi + a_2 \psi^2 + a_3 \psi^3 + \dots \quad (7.21)$$

დავადგინოთ (7.21) მწკრივის კოეფიციენტები:

$$a_0 = a' \sin^2 \frac{(\omega - \varphi)}{2}; \quad (7.22)$$

$$a_1 = 0; \quad (7.23)$$

$$a_2 = -a'; \quad (7.24)$$

$$a_3 = 0; \quad (7.25)$$

$$a_4 = \frac{1}{3} a'; \quad (7.26)$$

სადაც, 
$$a' \equiv \frac{\gamma H_*}{2 \sin \omega \cdot \cos \varphi}$$

მწკრივის კოეფიციენტების გათვალისწინებით (7.21) გამოსახულება მიიღებს შემდეგ სახეს[12]:

$$c(\psi_0 + \psi) = a' \sin^2 \frac{(\omega - \varphi)}{2} - a' \psi^2 + \frac{1}{3} a' \psi^4 - \dots ; \quad (7.27)$$

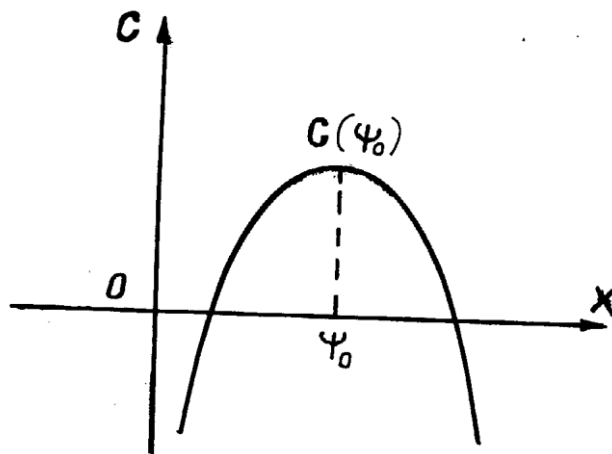
კატასტროფების თეორიიდან ცნობილია, რომ კრიტიკული წერტილი გადაუგვარებელია, მაშინ და მხოლოდ მაშინ, როდესაც  $D^2 f|_{x_0} \neq 0$ , სადაც  $f: R \rightarrow R$  ფუნქცია და  $x_0$  — კრიტიკული წერტილია; ამ შემთხვევაში მორსის ლემის თანახმად არსებობს კოორდინატთა გლუვი ლოკალური გარდაქმნა, რის შედეგადაც  $f$  — ფუნქცია მიიღებს  $\pm x^2$ -ის მნიშვნელობას, სადაც ნიშანი



ემთხვევა  $D^2f|_{x_0}$ -ის ნიშანს, ჩვენს შემთხვევაში  $D^2c|_{\psi_0} = -a' \neq 0$ , ე.ი. გრუნტის მასის შეჭიდულობის ძალის ფუნქციის ქვედა  $\psi_0$  წერტილში ლოკალურად აღიწერება  $(-a'\psi^2)$  ფუნქციით, რომლის გრაფიკი მოცემულია 7.4 სურათზე [12].

ჩატარებული მათემატიკური ანალიზიდან გამომდინარე შეიძლება გავაკეთოდ შემდეგი დასკვნა:

მთის ფერდობის გრუნტის მოცულობითი წონის გაზრდასთან დაკავშირებით გრუნტის შიგა ხახუნის კუთხე ( $\varphi$ ) იზრდება და როდესაც ის მიაღწევს ლოკალური მაქსიმუმის წერტილს ( $\psi_0$ ), მაშინ გრუნტის შეჭიდულობის ძალის მნიშვნელობა კრიტიკულია  $c(\psi_0)_{კრ}$ , რომლის მცირედი ცვლილებისას (შემფოთებისას) იწყება მთის ფერდის ჩამოცურება სიბრტყეზე სიგრძით —  $L_0$  (იხ. ნახ. 7.3)



სურ. 7. 4.

მთის ფერდის გრუნტის შეჭიდულობის ძალის ფუნქციის გრაფიკი.

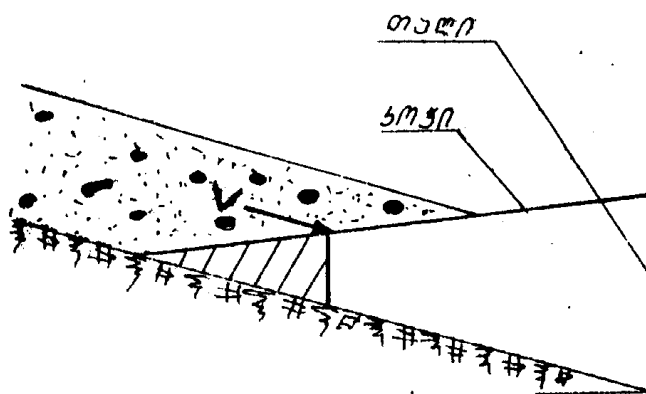
## 7. 2. ღვარცოფის ზემოქმედებისას ტრამპლინის ტიპის ახალი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების შესაძლო წყობიდან გამოსვლის გამოკვლევა.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, მათ შორის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობებიც შედგება ცალკეული კვანძებისაგან, რომელთა კრიტიკულ ზღვარზე მუშაობამ შესაძლებელია გამოიწვიოს კონსტრუქციის წყობიდან, გამოსვლა.

განვიხილოთ ტრამპლინის ტიპის გამჭოლი (თაღოვან-კოჭოვანი) ნაგებობა, რომელზეც მოქმედებს ღვარცოფი (იხ.სურ. 7.5).

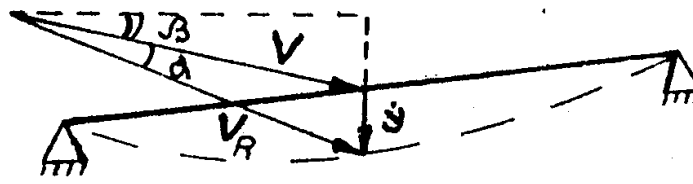
ღვარცოფის ზემოქმედების შედეგად კონსტრუქციის კვანძების მიხედვით ნაგებობის შესაძლო წყობიდან გამოსვლა, შეიძლება განვიხილოთ: ა) კოჭის რხევა; ბ) კოჭის ღუნვა; და გ) თაღის წყობიდან გამოსვლა.

განვიხილოთ ნაგებობის წყობიდან გამოსვლა, კოჭის რხევის შედეგად. ღვარცოფი, რომელიც მოძრაობს  $\alpha$  კუთხით დახრილ მდინარის კალაპოტში, ნაგებობაზე მოქმედებს ძალით (F) , რომლის



სურ. 7. 5. საანგარიშო სქემა.

ზემოქმედების შედეგად კოჭი იწყებს რხევას და ჩაიღუნება  $y$  მიმართულებით (იხ.სურ. 7.6) [13,58].



სურ. 7. 6. ძალთა სამკუთხედის ასაგები საანგარიშო სქემა.

ნაგებობაზე მოქმედი დინამიკური ძალის მნიშვნელობა ტოლია [13]:

$$F = 4,5\rho V^2 \omega C(\alpha) , \quad (7.28)$$

სადაც,  $\rho$  არის ღვარცოფის სიმკვრივე,  $\omega$  — ნაგებობის ის ფართობი, რომელზედაც მოქმედებს ღვარცოფი,  $C(\alpha)$  — საძიებელი კუთხეა.

ღვარცოფის ზემოქმედებისას კოჭის რხევის ამსახველ განტოლებას აქვს შემდეგი სახე [58]:

$$my'' + ry' + ky = 4,5\rho \omega V^2 C(\alpha) , \quad (7.29)$$

სადაც,  $m$  არის კოჭის მასა,  $r$  — კოჭის დემპფერი,  $k$  — დრეკადი ზამბარის მახასიათებელია,  $y$  — კოჭის ღუნვა, ხოლო  $y'$  — კოჭის ღუნვის სიჩქარეა. ძალთა სამკუთხედიდან განვსაზღვროთ  $(\alpha + \beta)$  კუთხის მნიშვნელობა (იხ. ნახ. 7.6), მივიღებთ:

$$(\alpha + \beta) = \arctg \left[ V \operatorname{tg} \beta + \frac{y'}{V \cos \beta} \right] . \quad (7.30)$$

(7.29) დამოკიდებულებაში შემავალი ფუნქციის კრიტიკული წერტილების საპოვნელად, (7.30) დამოკიდებულება გავშალოთ ტეილორის მწკრივის სახით. თუ ამ მწკრივს გავაწრფივებთ და გარდავქმნით, მივიღებთ:

$$C(\alpha + \beta) = A_0 - A_1 \alpha , \quad (7.31)$$

სადაც,

$$\begin{cases} A_0 \equiv \frac{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\beta}-1}{\operatorname{tg}\beta}; \\ A_0 \equiv \frac{2\operatorname{tg}^2\beta+1-\sqrt{1+\operatorname{tg}\beta}}{\sin^2\beta\sqrt{1+\operatorname{tg}\beta}}; \end{cases} \quad (7.32)$$

(7.31) და (7.32) განტოლებების გათვალისწინებით (7.29) დამოკიდებულება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$my'' + ry' + ky = 4,5\rho\omega V^2(A_0 - A_1\alpha) \quad (7.33)$$

(7.33) განტოლებაში  $\alpha$ -კუთხე აღვნიშნოთ, როგორც  $\alpha = \operatorname{arctg}x$ , მაშინ,

$$\alpha(x) = \operatorname{arctg}0|_0 + x \cdot \frac{1}{1+x^2} |_0 = x \quad (7.34)$$

ე.ი.

$$\operatorname{arctg}'x = \frac{1}{1+x^2} \quad (7.35)$$

(7.34) და (7.35) განტოლებების გათვალისწინებით  $\alpha$  — კუთხის მნიშვნელობა ტოლი იქნება:

$$\alpha = V\operatorname{tg}\beta + y' / V\cos\beta - \beta. \quad (7.36)$$

(7.36) დამოკიდებულების გათვალისწინებით (7.29) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$my'' + ry' + ky = 4,5\rho\omega V^2[A_0 - A_1(V\operatorname{tg}\beta + y' / V\cos\beta - \beta)]. \quad (7.37)$$

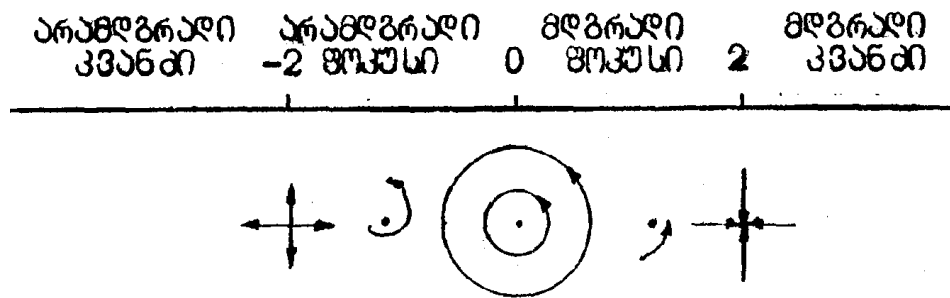
(7. 37) განტოლებაში შემოვიტანოთ აღნიშვნა:

$$\begin{cases} A_0 + A_1\beta \equiv B_0; \\ A_1\operatorname{tg}\beta \equiv B_1; \\ A_1 / \cos\beta \equiv B_2; \\ 4,5\rho\omega V^2(B_0 - B_1V^3) \equiv f(V); \end{cases} \quad (7.38)$$

(7.38) დამოკიდებულებების მნიშვნელობები შევიტანოთ (7.37)-ში, მივიღებთ:

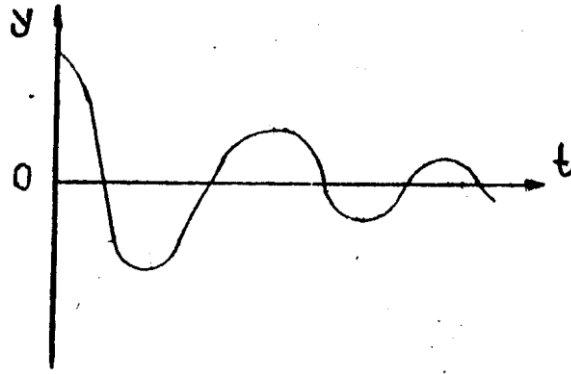
$$my''+(r+4,5\rho\omega V)y'+ky=f(V). \quad (7.39)$$

თუ ჩავატარებთ (7.39) განტოლების ანალიზს მივიღებთ, რომ ღვარცოფის ნაგებობაზე ზემოქმედებისას, კოჭის რხევას აქვს მდგრადი ფოკუსი, ე.ი. ადგილი აქვს ხოფის მაღალი ხარისხის ბიფურკაციას (იხ. სურ. 7.7), ხოლო კოჭის რხევის გრაფიკი დროსთან კავშირში ნაჩვენებია 7.8 სურათზე.



სურ. 7.7. ნაგებობის მდგრადი და არამდგრადი წერტილები.

როგორც გრაფიკიდან ჩანს (იხ. სურ. 7.8) კოჭის რხევა დროსთან კავშირში მიღვევადია, ეს ნიშნავს, რომ ნაგებობების წყობიდან გამოსვლა კოჭის რხევის შედეგად დაუშვებელია, რადგან ტრამპლინის ტიპის ნაგებობის ზედა ბიეფში დაგროვილი ღვარცოფული მასის წონა გამოიყენება კოჭის დემპფერს რხევის ჩაქრობაში. თუ ტრამპლინის ტიპის ნაგებობების დაპროექტების დროს, სხვა მაჩვენებლებთან ერთად გავითვალისწინებთ ოპტიმიზაციის ელემენტებსაც, ნაგებობის მუშაობის პროცესში კოჭის რხევა შეიძლება გამყენებული იყოს ღვარცოფის ენერჯის ეფექტური ჩაქრობისათვის;



სურ. 7.8. კოჭის რხევის გრაფიკი დროსთან კავშირში.

რაც შეეხება ნაგებობის წყობიდან გამოსვლას კოჭის ღუნვის შედეგად, როდესაც კოჭის ორივე ბოლო ხისტად არის ჩამაგრებული და მისი სიგრძე უცვლელია, ეს პროცესი კატასტროფების თეორიის მიხედვით შესწავლილია და იგი წარმოადგენს ე.წ. "აწყოების კატასტროფას".

განვიხილოთ ნაგებობის წყობიდან გამოსვლა თაღის აგარიის შემთხვევაში. თაღზე ღვარცოფის ზემოქმედების შედეგად მოქმედებს ჯამური ძალა, რომელიც ტოლია [15] :

$$F_x = 4,5\rho\omega V^2 C(\alpha) + 0,5\gamma B[H_1(l_{st}^2 - H_1^2)^{0,5} + 2l_{st}h] , \quad (7.40)$$

სადაც,  $\gamma$  არის ღვარცოფული მასის მოცულობითი წონაა (კგ.ძ/მ<sup>3</sup>),  $H_1$ - ნაგებობაზე ღვარცოფული მასის სიმაღლე (მ),  $l_{st}$  - ნაგებობის სიგრძეა (მ).

ღვარცოფული მასის გავლენით თაღის ფორმა შევისწავლოთ ფურიეს მწკრივად გაშლის სახით [58]:

$$y(x) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j \sin\left(\frac{j\pi x}{l_1}\right), \quad (7.41)$$

სადაც  $y(x)$  თაღის ფორმის აღმწერი ფუნქცია,  $a_j$  — არის თაღის შუა წერტილის დაშორება  $X$  — ღერძიდან, ხოლო  $l_1$  — კი თაღის მალის სიგრძეა.

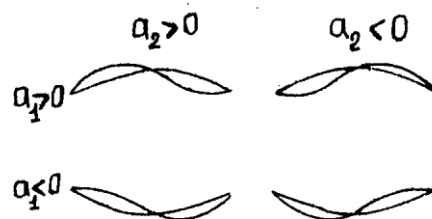
თაღი ღვარცოფის ზემოქმედების პროცესში განვიხილოთ როგორც არაკუმშვადი კოჭი, რომლის საწყისი ფორმა სინუსოიდალური სახისაა. ამ დროს თაღის სიგრძე აღიწერება შემდეგი დამოკიდებულებით [13]:

$$L_{01} = l_1 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{\infty} a_j^2 \left(\frac{j\pi}{l_1}\right)^2 \cdot \frac{l_1}{2} + \dots \quad (7.42)$$

(7.41) განტოლება თაღის ფორმის წარმოდგენის უსასრულო სახეა, რომელიც შეიძლება შეიცვალოს თაღის ფორმის მდგრადობის სასრულზოლიანი სივრცით, ამისათვის კი (7.41) დამოკიდებულებაში საკმარისია ფურიეს მწკრივის პირველი ორი კოეფიციენტი, რომელთაგან პირველი გვიჩვენებს თაღის მდგრადობას, მეორე კი თაღის სიმრუდეს (დეფორმაციას), ე.ი.

$$y(x) = a_1 \sin\left(\frac{\pi x}{l_1}\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi x}{l_1}\right). \quad (7.43)$$

(7.43) განტოლებაში ე.წ. ფურიეს კოეფიციენტები შეგვიძლია განვიხილოთ, როგორც დატვირთვის გარეგანი პარამეტრები. ღვარცოფის თაღზე ზემოქმედების პროცესში თაღს ფიზიკურად შეიძლება ქონდეს დეფორმაციის ოთხი ფორმა (იხ. სურ. 7. 9).



სურ. 7. 9. თაღის დეფორმაციის ფორმები.

(7.43) დამოკიდებულების გათვალისწინებით (7.42) გამოსახულება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$L_{01} = \ell_1 + \frac{\ell_1}{4} \left[ \left( \frac{\pi a_1}{\ell_1} \right)^2 + \left( \frac{2\pi a_2}{\ell_1} \right)^2 \right] - \frac{\ell_1}{8} \left[ \frac{3}{8} \left( \frac{\pi a_1}{\ell_1} \right)^4 + \frac{3}{2} \left( \frac{\pi a_1}{\ell_1} \right)^2 \cdot \left( \frac{2\pi a_2}{\ell_1} \right)^2 + \frac{3}{8} \left( \frac{2\pi a_2}{\ell_1} \right)^4 \right]. \quad (7.44)$$

ღვარცოფის ზემოქმედების დროს თაღის მუშაობის პრცესში აღძრული პოტენციალური ენერგია ტოლია [58]:

$$E_3 = \frac{B'}{2} \int_0^{\ell_1} \left( \frac{d^2y}{dx^2} \right) dx, \quad (7.45)$$

სადაც,  $B'$  — თაღის დეფორმაციის კოეფიციენტი.

თუ (7.42) გამოსახულების მნიშვნელობას შევიტანთ (7.45)–ში და თაღის მუშაობის პოტენციალურ ენერგიას გამოვსახავთ ფურიეს მწკრივის ორი კოეფიციენტით, მივიღებთ:

$$E_3 = \frac{B'\ell_1}{2} \left[ \left( \frac{\pi}{\ell_1} \right)^4 a_1^2 + \left( \frac{2\pi}{\ell_1} \right)^4 a_2^2 \right]. \quad (7.46)$$

ღვარცოფის ზემოქმედების შედეგად ჯამური ძაღის ( $F_{\text{ჯ}}$ ) მიერ შესრულებული მუშაობა, რომელიც იწვევს თაღის დეფორმაციას და გადაადგილებას  $\Delta y(x)$  მანძილით, ტოლია:

$$\Delta y(x) = y_0(x) - y(x) = a_1^0 \sin\left(\frac{\pi x}{\ell_1}\right) - a_1 \sin\left(\frac{\pi x}{\ell_1}\right) - a_2 \sin\left(\frac{2\pi x}{\ell_1}\right). \quad (7.47)$$



ე.ი. ღვარცოფის ჯამური ძალის ( $F_{\Sigma}$ ) მოქმედებისას პოტენციალური ენერგია, რომელიც აღწერს სტატიკურად იდეალურ თაღს გამოსახება შემდეგი ფუნქციით:

$$\Delta E_3(a_1, a_2, F_j) = \frac{B'\ell_1}{2} \left[ \left(\frac{\pi}{\ell_1}\right)^4 a_1^2 + \left(\frac{2\pi}{\ell_1}\right)^4 a_2^2 \right] - \frac{2F_{\Sigma}\ell_1}{\pi} (a_1^0 - a_1). \quad (7.48)$$

(7.48) დამოკიდებულება შეიძლება გავამარტივოთ, თუ კოეფიციენტებს  $a_1$  - ს და  $a_2$  -ს ორი ცვლადის მაგივრად გამოვსახავთ ერთი ცვლადით. თუ ეს გამოსახვა ინვარიანტულია ნიშნის მიმართ ე.ი.  $a_1 \rightarrow -a_1$  და  $a_2 \rightarrow a_2$ , ხოლო ნიშანი შეირჩევა თაღის ფორმის ცვლილების მიხედვით, მივიღებთ:

$$a_1 = \pm f(a_2), \text{ სადაც } a_1^0 = f_1(0). \quad (7.49)$$

რადგან  $a_2 \rightarrow \pm a_2$  ( $a_1 > 0$ ) ამიტომ  $f$  — ფუნქცია ლუწია და ტეილორის მწკრივად გაშლის დროს კენტი ხარისხები არ გვექნება, ხოლო კოეფიციენტები კი ისე შევარჩიოთ, რომ გარდაქმნები გამარტივდეს. რადგან კოეფიციენტთა რაოდენობრივი ცვლილება არ იწვევს პროცესის სტრუქტურულ ცვლილებას ანუ არ იცვლება ტოპოლოგიური ფორმა, მივიღებთ:

$$\begin{cases} a_1 = a_1^0 - \frac{2}{a_1^0} a_2^2 - \frac{2}{(a_1^0)^3} a_2^4 - \dots; \\ a_1^2 = (a_1^0)^2 - 4 a_2^2; \end{cases} \quad (7.50)$$

შევიტანოთ (7.50) გამოსახულების მნიშვნელობები (7.46)–ში:

$$E_3 = \frac{B'\ell_1}{2} \left( \frac{\pi}{\ell_1} \right)^4 (a_1^0)^2 + \left[ 3 \left( \frac{\pi}{\ell_1} \right)^4 - \frac{4F_{\Sigma}\ell_1}{\pi a_1^0} \right] a_2^2 - \frac{4F_{\Sigma}\ell_1}{\pi (a_1^0)^3} a_2^4 + \dots \quad (7.51)$$

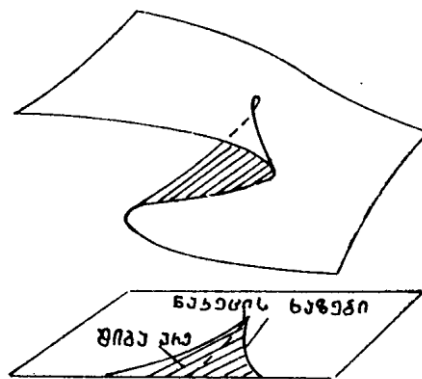
შემოვიტანოთ აღნიშვნები:

$$\begin{cases} \dot{A}_0 \equiv B' \ell_1 / 4 \cdot (\pi / \ell_1)^4 \cdot (a_1^0)^2; \\ \frac{1}{2} \dot{A}_2 \equiv 3B' \ell_1 (\pi / \ell_1)^4 - 4F_{\text{ჯ}} \ell_1 / \pi a_1^0; \\ \frac{1}{4} \dot{A}_4 \equiv 4F_{\text{ჯ}} \ell_1 / \pi (a_1^0)^3; \end{cases} \quad (7.52)$$

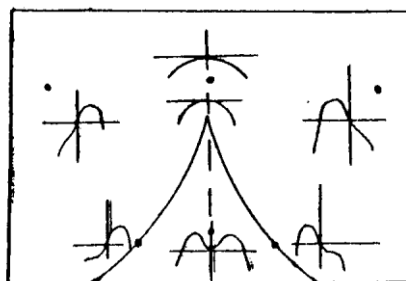
(7.52)-ის გათვალისწინებით, (7.51) გამოსახულება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$E_3 = \dot{A}_0 + \frac{1}{2} \dot{A}_2 a_2^2 - \frac{1}{4} \dot{A}_4 a_2^4 \quad . \quad (7.53)$$

(7.53) გამოსახულება წარმოადგენს ე.წ. "შებრუნებული აწყობის" კატასტროფას (იხ. სურ. 7.10), იგი ჩვეულებრივი "აწყობის" კატასტროფისგან განსხვავდება მხოლოდ უარყოფითი ნიშნით, მაგრამ ეს უმნიშვნელო განსხვავება იწვევს დიდ ფიზიკურ ცვლილებას, კერძოდ ღვარცოფის თაღზე ჯამური ძალის ( $F_{\text{ჯ}}$ ) მოქმედების შედეგად პოტენციალური ენერჯიის აღმწერი ფუნქციის მინიმუმები და მაქსიმუმები იცვლიან ადგილს. საზოგადოდ "აწყობის" კატასტროფას ყოველთვის გააჩნია ერთი მაინც "გლობალური" მინიმუმი და მართველი პარამეტრების ცვლილების დროს, თუ "იკარგება" ერთი მინიმუმი მაშინვე წარმოიშობა მეორე და ამდენად "აწყობის" კატასტროფა აღწერს მდგრად სისტემას, მაგრამ ჩვენს შემთხვევაში "შებრუნებული აწყობის" კატასტროფას მხოლოდ ერთი "ლოკალური" მინიმუმი გააჩნია, როცა პარამეტრები იმყოფებიან მართველი პარამეტრების სივრცის შიგა არეში (იხ. სურ. 7. 11).



სურ. 7. 10. "შებრუნებული აწყობის" კატასტროფის გრაფიკი.

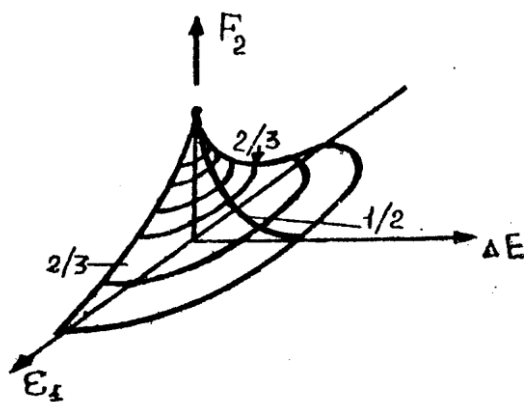


სურ. 7. 11. "შებრუნებული აწყობის" კატასტროფის "ლოკალური" მინიმუმების გრაფიკი.

რადგან ღვარცოფების მოძრაობა ბუნებაში მიმდინარეობს ტალღისებურად, ამიტომ ნაგებობაზე დატვირთვები, როგორც სტატიკური, ასევე დინამიკური იზრდება და მიისწრაფის იმ კრიტიკული ძალის მნიშვნელობისაკენ, რომლის დროსაც ფურიეს მწკრივის მეორე კოეფიციენტის  $|a_2|$ -ის მნიშვნელობის მცირე სიდიდით "შეშფოთებაც" კი იწვევს თაღის უეცრივ წყობიდან გამოსვლას. თაღის დანგრევა ღვარცოფის მოქმედების შედეგად იწვევს მაშინ, როდესაც მისი სიმძიმის ცენტრი გადაადგილება, ანუ როდესაც ღვარცოფის ნაგებობაზე მოქმედი ძალის მუშაობა გადააჭარბებს თაღის დეფორმაციის ენერგიას. ამ დროს თაღი იწვევს მოძრაობას ქვემოთ და მას ვერაფერი ვერ დააკავებს ამობრუნებულ მდგომა-რეობის მიღებამდე. ეს კიდევ ერთხელ მიუთითებს, რომ ღვარცოფის

ზემოქმედების დროს თაღის წყობიდან გამოსვლა აღიწერება "შებრუნებული აწყობის" კატასტროფით და თაღის ნგრევა ხდება ღვარცოფის კრიტიკული ძალის გადაჭარბებისთანავე — მყისიერად. მართლაც, როდესაც მართველი პარამეტრები გადაკვეთენ ნაკეცის ბიფურკაციის წირებს ისინი მოხვდებიან იმ გარე არეში, სადაც ფუნქციას საერთოდ არ გააჩნია მინიმუმი და ხდება თაღის წყობიდან გამოსვლა ( იხ. ნახ. 7. 10).

რეალურად ღვარცოფსაწინააღმდეგო მშენებლობის პრაქტიკაში არ არსებობს უდევექტო ნაგებობების კვანძი როგორც მშენებლობის პროცესში დაშვებული შეცდომის, ასევე სამშენებლო მასალის დაბალი ხარისხი; აგრეთვე ღვარცოფის ბუნებიდან გამომდინარე ტრამპლინის ტიპის ნაგებობაზე ზემოქმედებისას დატვირთები არასიმეტრიულად არის განაწილებული, რომლებიც საერთო ჯამში იწვევს ნაგებობის წყობიდან გამოსვლას კრიტიკულ ძალაზე ნაკლები ძალით. თუ გავითვალისწინებთ ზემოთ აღნიშნულ მოსაზრებას და  $\varepsilon$ -ით აღვნიშნავთ თაღის შესაძლო განზოგადოებულ დეფექტებს, ხოლო  $\Delta$  -ით ღვარცოფის ნაგებობაზე მოქმედების შედეგად თაღში აღძრულ კინეტიკური ენერჯიის ნაზრდს, მივიღებთ შემდეგ შემთხვევას(იხ. სურ. 7. 12). თუ წინასწარ გვეცოდინება, ან ჩვენ შევაფასებთ თაღის დეფექტის ხარისხს, მაშინ  $\varepsilon$ -ის შესაბამის წირზე



სურ. 7. 12. თაღის ავარიის გამომწვევი მინიმალური ძალის გრაფიკი.

წერტილის მოქებით ვიპოვით იმ მინიმალური ძალის მნიშვნელობას, რომელიც ამ ნაგებობისათვის დამანგრეველი იქნება, ე.ი. თუ თაღმა ადრე ღვარცოფის ზემოქმედების შედეგად მიიღო საშუალო ხარისხის დეფექტი, მაშინ შემდეგი ღვარცოფის ზემოქმედებისას, მიუხედავად იმისა, რომ ამ ძალის სიდიდე არ იქნება კრიტიკული ძალის სიდიდის ტოლი, სავსებით შესაძლებელია მოხდეს თაღის წყობიდან გამოსვლა, მითუმეტეს შემთხვევაში თუ ეს დატვირთვა დინამიკურია.

## **8. მდინარე ღურუჯის კალაკოტის რეზულტირებისათვის ახალი საინჟინრო-ეკოლოგიური ღონისძიებები**

საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტში ავტორის მიერ დამუშავებული არის ბუნების სტიქიური მოვლენების საწინააღმდეგო ახალი ნაგებობები, რომელთა მეცნიერულ-ტექნიკური სიახლის პრიორიტეტებიც დაცულია 10 საზღვარგარეთული და 7 საქართველოს პატენტის მოწმობებით.

იუნესკოს საერთაშორისო პროგრამის (“IDNDR”, 1991-2000 წწ) შესაბამისად ავტორმა ფრანგულ ენაზე გამოსცა მონოგრაფია ”გარემოს დამცავი ნაგებობების ახალი კონსტრუქციები”, სადაც განხილულია ზემოთ აღნიშნული გარემოსდამცავი ნაგებობების კონსტრუქციული დახასიათება და მათი პროექტირებისათვის გაანგარიშების მეთოდოლოგია [21].

ზემოთ აღნიშნული წიგნის მეცნიერ რედაქტორი აკადემიკოსი ცოტნე მირცხულავა აღნიშნავს, რომ ” ნაგებობების პრაქტიკაში გამოყენება, მათი კონსტრუქციული თავისებურებიდან გამომდინარე, საგრძნობლად გაზრდის კაშხლების საიმედო მუშაობის ალბათობას და შემცირდება კონსტრუქციის წყობიდან გამოსვლის რისკი. სტიქიური მოვლენების წარმოშობის თვალსაზრისით, საქართველო არის ბუნებრივი ლაბორატორია და თუ მხედველობაში მივიღებთ მდინარეების დურუჯის, არაგვის, ცხენისწყლის, აჭარის წყლის და სხვა დვარცოფსადინარების წყალშემკრები აუზების კატასტროფიულ ეკოლოგიურ მდგომარეობას, შეიძლება ითქვას, რომ სამეცნიერო ნაშრომი ჩვენი ქვეყნისათვის და არამარტო საქართველოსათვის აქტუალურია და მეცნიერ სპეციალისტების ყურადღების ცენტრში მოექცევა” [53].

აკადემიკოს ც. მირცხულავას პროგნოზმა მართლაც, რომ გაამართლა, როდესაც წიგნის პრეზენტაცია 1999 წ. შედგა ამერიკის შეერთებულ შტატებში ქ. ვაშინგტონში ავტორის სტაჟირების დროს; ამერიკის გარემოს დაცვისა და აგრარულ დეპარტამენტებში დიდი შეფასება მისცეს მსოფლიოში ცნობილმა მეცნიერ-სპეციალისტებმა: ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორებმა, პროფესორებმა: ა. ბორტვიკმა (ოქსფორდის უნივერსიტეტი), დ. ვანდაი (კანადა), მ. ბეხტმა (გერმანია), დ. ვიკზორეკმა (აშშ), პროფესორმა ხ. ტოგნასამ (შვეიცარია), “იუნესკოს” სტიქიური უბედურებისა და გარემოს დაცვის განყოფილების გამგემ, პროფესორმა ტ. შააფმა (საფრანგეთი) და ა.შ.

წარმოდგენილ ნაშრომში განხილულია ახალი კონსტრუქციები, რომლებიც შესაძლებელია გამოყენებული იყოს მდინარე დურუჯის აუზში მიმდინარე დედამიწის ზედაპირის დესტრუქციული პროცესების საწინააღმდეგოდ.

## 8.1. ეროზიის საწინააღმდეგო ნაგებობები

მთის ფერდობის ეროზიის საწინააღმდეგო ახალი კონსტრუქცია [10] უზრუნველყოფს გრუნტის ნაწილაკების ადგილზე შეკავებას, ეწინააღმდეგება ეროზიის გავრცელებას მთის ფერდობზე, ქმნის მცენარისათვის ნორმალურ ეკოლოგიურ გარემოს და ხასიათდება დაბალი სამშენებლო-სამონტაჟო ხარჯებით.

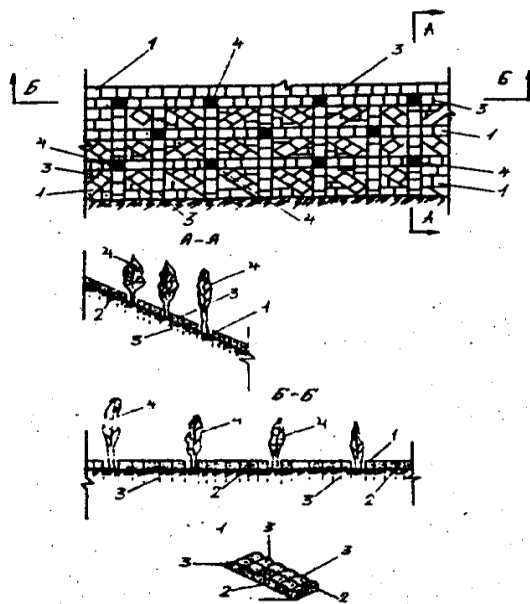
ნაგებობა შედგება პოლიეთილენის ტომრებისაგან (1), რომლებიც შევსებულია ადგილობრივი გრუნტით (2), იხილე სურათი 8.1.

პოლიეთილენის ტომრები (1) გრუნტის ზედაპირზე დამაგრებული არის ლითონის სამაგრებით (3), ხოლო მთის ფერდობის თავისუფალ ადგილებში ჭადრაკული განლაგებით დარგულია მწვანე ნარგავები (4). პოლიეთილენის ტომრები (1) გეგმაში გრუნტის ზედაპირზე განლაგებულია მცენარეების გარშემო რადიალურად, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია (გადაბმულია) პოლიეთილენის მასალით.

ეროზიის საწინააღმდეგო მოწყობილობა, რომელიც ნაჩვენებია 8.2 ნახაზზე შედგება მტკიცე სინთეტიკური მასალისაგან დამზადებული გრძელი ტომრებისაგან – 1, რომლებიც შევსებულია ადგილობრივი ინერტული მასალით – 2 და მთის ფერდობზე დამაგრებულია მაღალი სიმტკიცის სამაგრებით- 3 (იხილე საქართველოს პატენტი № U 925, ბიულ. № 15(115) , 2002 გვ. 25 - 26) .

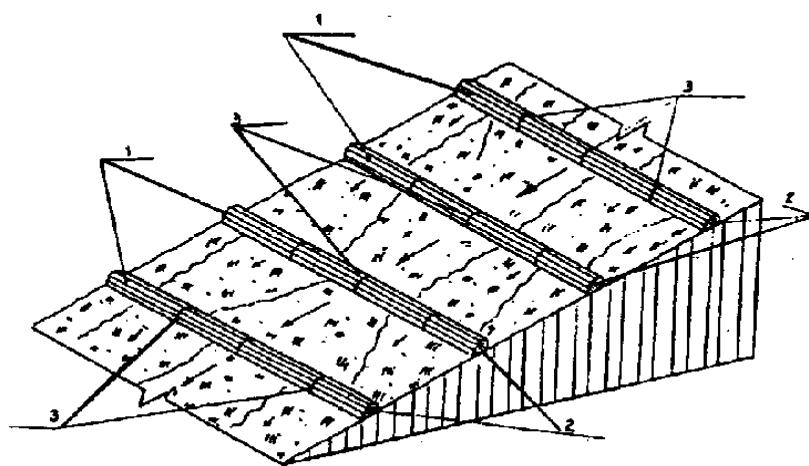
მთის ფერდობზე მოსული დიდი ინტენსიური წვიმების შედეგად წარმოშობილი ზედაპირული წყლის ნაკადების კინეტიკური ენერჯის ჩასაქრობად სინთეტიკური გრძელი ტომრების განლაგება ფერდობის მთელ სიგანეზე ერთმანეთის მიმართ პარალელურად, ტეხილ ხაზზე, ან რკალზე უზრუნველყოფს ზედაპირული წყლის ნაკადის სიჩქარის შემცირებას და აქედან გამომდინარე, ამცირებს ნაგებობის ზედა ბიეფში ტომრებსა და ნიადაგს შორის გრძივი მიმართულებით ნაღვარელებისა და ხრამების წარმოშობას. ეროზიის საწინააღმდეგო

ნაგებობის ეფექტური მუშაობისათვის სინთეტიკურ ტომრებს შორის მანძილი ისე უნდა დაპროექტდეს, რა თქმა უნდა გამრეცხი სიჩქარის გათვალისწინებით, რომ მთის ფერდობზე ადგილი არ ქონდეს, როგორც სიღრმით, ასევე სიბრტყით ეროზიას ადგილი.



სურ. 8. 1.

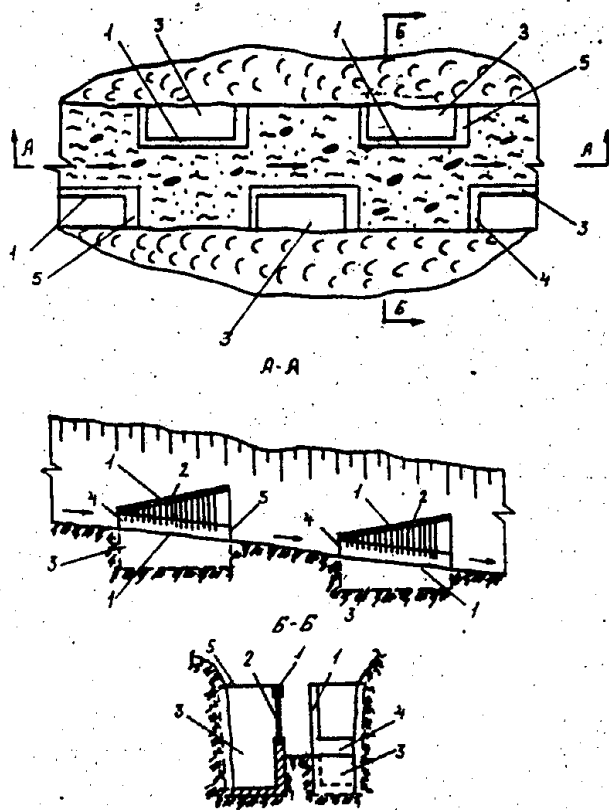
ეროზიის საწინააღმდეგო კონსტრუქცია.



სურ. 8. 2.

ეროზიის საწინააღმდეგო მოწყობილობა.





სურ. 8. 3.

მდინარის კალაპოტის ეროზიის  
საწინააღმდეგო ნაგებობა.

მდინარის კალაპოტში ეროზიის საწინააღმდეგო ნაგებობა [9], წარმოადგენს კონსტრუქციას, რომელიც შედგება მდინარის კალაპოტში ჭადრაკულად განლაგებული რკინა-ბეტონის მართკუთხა კვეთის ჭებისაგან, რომლებიც დამაგრებული არის მდინარის კალაპოტის ფერდებზე (იხ. სურ. 8.3). ნაგებობის წინა კედელს აქვს ისეთი სიმაღლე, რომ კალაპოტში წამოსულმა ნორმალური ხარჯის შესაბამისმა წყლის სიმაღლემ, არ გადააჭარბოს ნაგებობის წინა კედლის სიმაღლეს, ხოლო კონსტრუქციის სიგანე მდინარის კალაპოტის სიგანის ნახევარზე ნაკლებია.

ეროზიის საწინააღმდეგო ნაგებობა შედგება: რკინა-ბეტონის ჭებისაგან (3), გამჭოლი მიწის ზედა კედლისაგან (1), რომელიც

შედგება ვერტიკალური კოჭებისაგან (2), წინა (4) და უკანა (5) ბეტონის კედლებისაგან. ნაგებობის მდინარეში კალაპოტში ეფექტური განლაგება გამორიცხავს მდინარეებში მოვარდნილი წყლის ჰიდროლოგიური რეჟიმის დარღვევას, აგრეთვე უზრუნველყოფს მთის ნაკადების მიერ ტრანსპორტირებული ნატანების მაქსიმალურ შეჩერებას მდინარის ეკოლოგიური რეჟიმის დაურღვევლად.

მდინარის კალაპოტში ეროზიის საწინააღმდეგო ნაგებობა მუშაობს შემდეგი პრინციპით: მთის ნაკადი, რომლის სიმაღლე მეტია, ვიდრე ნორმალური წყლის ხარჯის სიმაღლე, მოქმედებს რკინა-ბეტონის ჭის წინა კედელზე (4), რომელზედაც გადაედინება ხარჯის ნაწილი და მყარ ფრაქციებთან ერთად ჩაედინება ჭაში (3) სადაც ხდება ნაწილი ნატანების მოხვედრა და დალექვა, ხოლო ენერგია-დაკარგული ნაკადი წვრილ ფრაქციებთან ერთად ჩაედინება ნაგებობის გვერდითი გამჭოლი ფერდიდან (1) და ა.შ. ნაკადი მოძრაობს ჭიდან ჭამდე, ვიდრე არ მოხდება მთის ნაკადის ენერჯის ჩაქრობა.

## **8. 2. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობები**

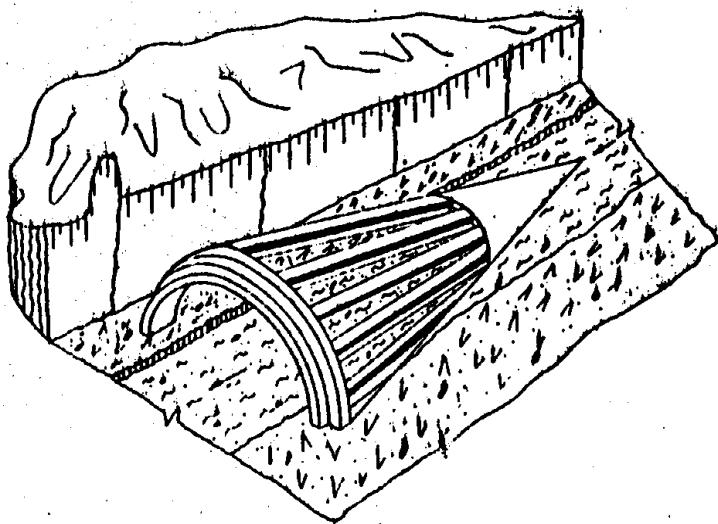
ღვარცოფსაწინააღმდეგო გამჭოლი, ტრამპლინის ტიპის ახალი ნაგებობების დანიშნულებას წარმოადგენს ნაკადის დარტყმის ძალის შემცირება, განსაკუთრებით ნაკადის პარამეტრების კატასტროფული მნიშვნელობებისას, აგრეთვე კონსტრუქციების გამარტივება-გაიაფება.

ქვემოთ განხილული კონსტრუქციების უპირატესობა არსებულთან შედარებით შემდეგია: ა) ნაგებობის საიმედო და ხანგრძლივი მუშაობა; ბ) მთის მდინარეების ეფექტური სტაბილიზაცია და გ) დიდი ეკონომიური ეფექტი - წარმოდგენილი ნაგებობები შენდება

რკინა - ბეტონისა და მეორეული მასალისაგან (ჩამოწერილი რკინის რელსები, ამორტიზირებული ლითონის ბაგირები და ა.შ.), რომელთა რაოდენობა მთლიანი სამშენებლო მასალის 50–80%-ს შეადგენს.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა [56] წარმოადგენს თაღოვან-კონუსურ კონსტრუქციას, ყრუ კონუსური წვერით, რომელიც დაკავშირებული არის რკინის რელსებთან და ნახევრად წრიული თაღების მეშვეობით ქმნის ტრამპლინს. კონუსის წვერი მიმთულია ნაკადის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ (იხ. სურ. 8. 4). რკინის კოჭები ნაგებობის ზედაპირზე ქმნიან სამკუთხედის, ან ზოგ შემთხვევაში ტრაპეციული კვეთის ღრეჩოებს, რომლის საშუალებითაც თხიერი ხარჯი წვრილ ფრაქციებთან ერთად ჩაედინება ნაგებობის ქვედა ბიეფში, ხოლო შედარებით მსხვილი ფრაქციები რჩება ნაგებობის ზედაპირზე, ანუ ზედა ბიეფში.

ღვარცოფის მოძრაობისას ნაგებობის წვერი შუაზე ყოფს ნაკადს, რომლის შემდეგ ენერგიადაკარგული ნაკადი მოძრაობს ნაგებობის ზედაპირზე, სადაც ხდება ნაკადის ენერგიის ძირითადი ჩაქრობა.



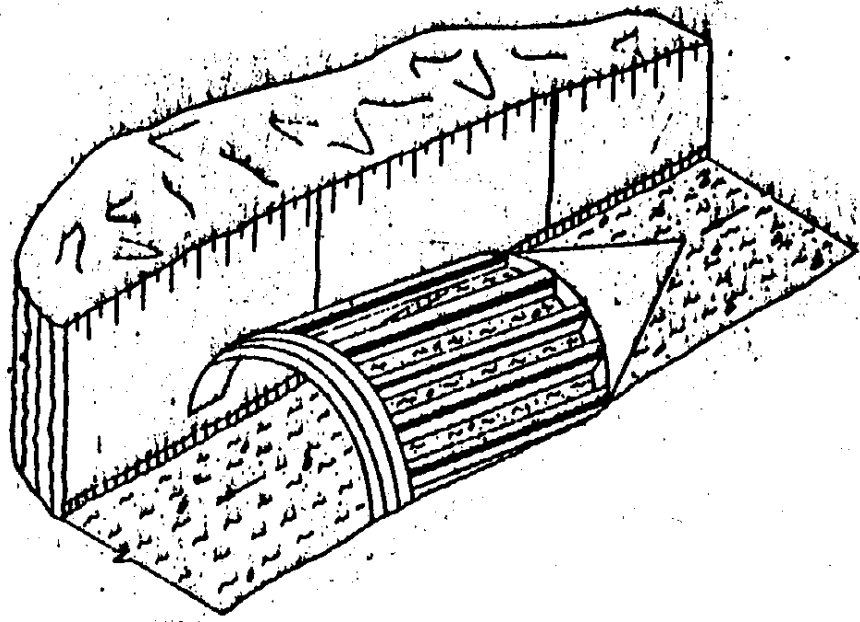
სურ. 8. 4.

თაღოვან-კონუსური ფორმის ნაგებობა.

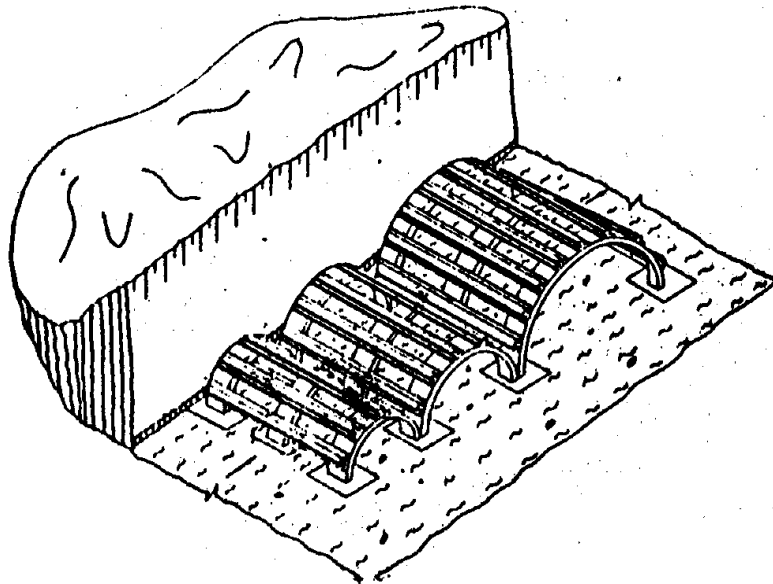
კონსტრუქცია, რომელიც წარმოდგენილია 8.5 – სურათზე წარმოადგენს ცილინდრული ფორმის ტრამპლინის ტიპის ნაგებობას, რომელიც წინა კონსტრუქციისაგან განსხვავდება, ღრეჩოების მარტკუთხა ფორმით [5]. ნაგებობის ყრუ კონუსით გადაკეტილია მდინარის კალაპოტის მთელი განივი კვეთი, რომელიც თანაბრად ამცი-რებს ნაკადის დარტყმის ძალას ნაგებობაზე და გამორიცხავს ნაკადის ძალისმიერ მოქმედებას თაღის ქუსლებში. ნაგებობის მაკეტი გაგზავნილი იყო გამომგონებელთა მსოფლიო გამოფენაზე (ბულგარეთი ქ. პლოვდივი, 1985 წ.) რომელიც დაჯილდოვდა დიპლომით და პრემიით, ასევე ქ. მოსკოვში საერთაშორისო გამოფენაზე (ВДНХ), ნაშრომი დაჯილდოვდა ბრინჯაოს მედლით. ნაგებობის მუშაობის პრინციპი თითქმის ანალოგიურია წინა კონსტრუქციასთან შედარებით, იმ განსხვავებით, რომ თაღოვან - ცილინდრული ფორმის ნაგებობის ზედაპირზე უფრო ეფექტურად ხდება ღვარცოფის ენერჯის ჩაქრობა.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო თაღოვან-საფეხურებიანი ფორმის ნაგებობა [40], წარმოადგენს რკინის რელსებისაგან შეკრულ კარკას, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია შედუღებით, ან მოქლონებით, რკინის კარკასი მდინარის კალაპოტში ჩამაგრებულია ბეტონით (იხ.სურ. 8.6).

ნაგებობის ღრეჩოების მარტკუთხა ფორმა ღვარცოფის ენერჯის ეფექტური ჩაქრობის საშუალებას იძლევა და გამორიცხავს ნაკადის ნაგებობაზე მაქსიმალურ ძალურ მოქმედებას. ღვარცოფის გავლის დროს, ძირითად (პირველ) ძალისმიერ ზემოქმედებას იღებს ნაგებობის პირველი საფეხური, სადაც ხდება ნაკადის სტრუქტურის პირველი რღვევა; შემდეგ ნაკადი მოძრაობს ნაგებობის ცილინდრული ფორმის საფეხურებზე, სადაც მიმდინარეობს ღვარცოფის ენერჯის თანაბარი ჩაქრობა.



სურ. 8. 5.  
 ცილინდრული ფორმის  
 ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.

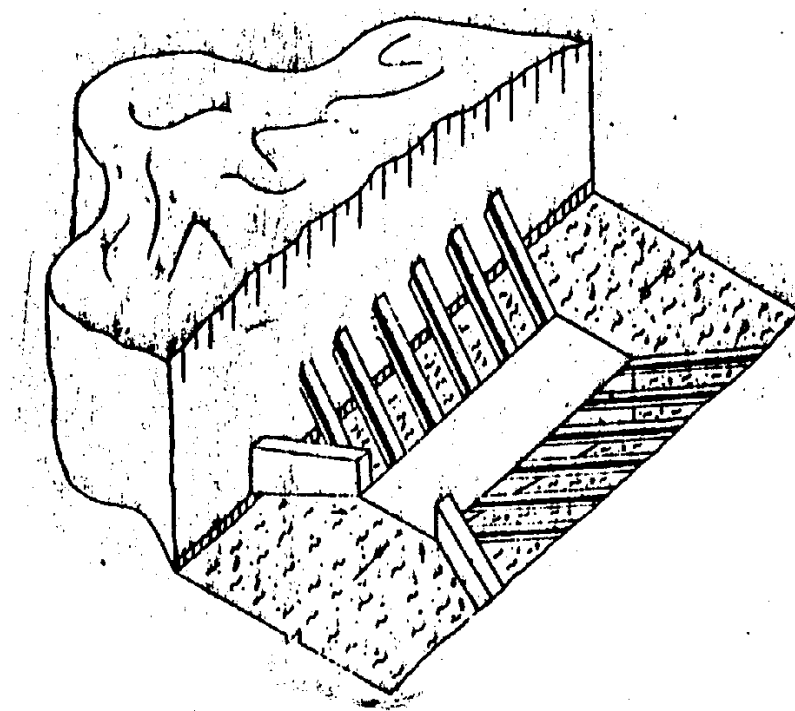


სურ. 8.6.  
 თაღოვან საფეხურებიანი ფორმის ნაგებობა.

კონსტრუქცია [6], რომელიც ნაჩვენებია არის 8.7-სურათზე წარმოადგენს ტრაპეციული ფორმის ღარს ნაკადმიმართველი რკინა-ბეტონის კედლებით; ნაგებობის ფერდები დაკავშირებულია მდინარის კალაპოტის (ხეობის) გვერდებთან რომელთა კუთხის მნიშვნელობაც იცვლება 110 – 160<sup>0</sup> –ის ფარგლებში.

ნაგებობის ფერდები წარმოადგენენ რკინის კოჭებს, რომლებიც ერთმანეთთან ქმნიან მართკუთხა ფორმის ღრეჩოებს. ნაგებობის ცენტრში მოთავსებულია რკინა-ბეტონის საძირკველი, რომელსაც აქვს ტრამპლინის ფორმა და რომელზეც მოძრაობს ღვარცოფი.

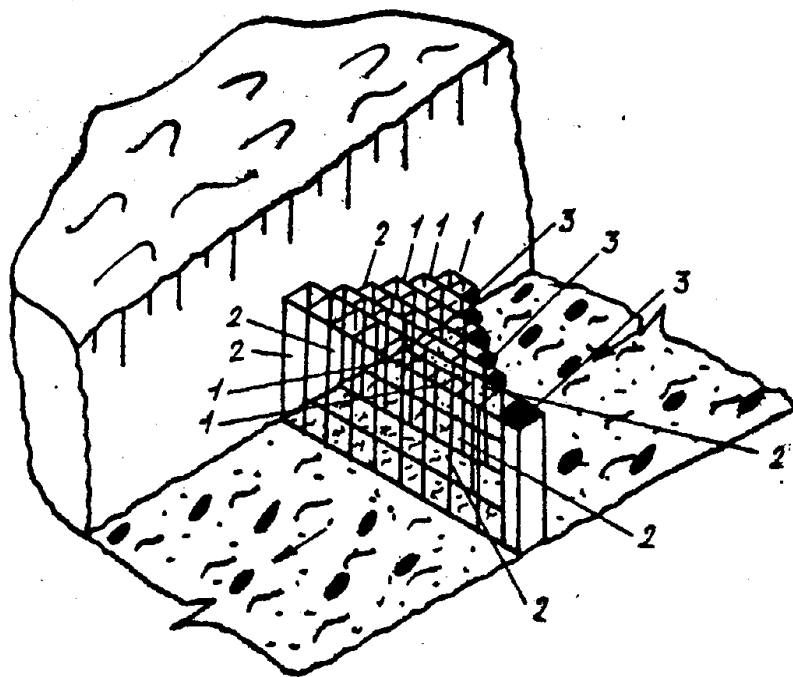
ნაგებობის ტრაპეციული ფორმა, ნაკადმიმართველი კედლებით, საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ, როგორც ნაკადის დარტყმის ძალის მნიშვნელობა, ასევე ნაგებობაზე მოქმედი ნატანების ანუ ღვარცოფული მასის გრავიტაციული (წონითი) დაწოლა, რომელიც ნაგებობის საიმედო მუშაობის გარანტიას იძლევა.



სურ. 8. 7. ტრაპეციული ფორმის ნაგებობა.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო საფეხურებიანი ბარაჟი [8] შედგება რკინა-ბეტონის ჰორიზონტალურად განლაგებული კოჭებისაგან, რომლებზედაც ვერტიკალურ სიბრტყეში დამაგრებულია რკინის კოჭები და მეორე ბოლოთი კი ჩამაგრებულია მდინარის კალაპოტში (იხ. სურ. 8. 8). რკინა - ბეტონის კოჭების ბოლოები ერთმანეთთან დაკავშირებულია ელიფსური ფორმის ბეტონის თავებით, რომლებიც ნაგებობის მუშაობისა და მდგრადობის ალბათობას ზრდიან.

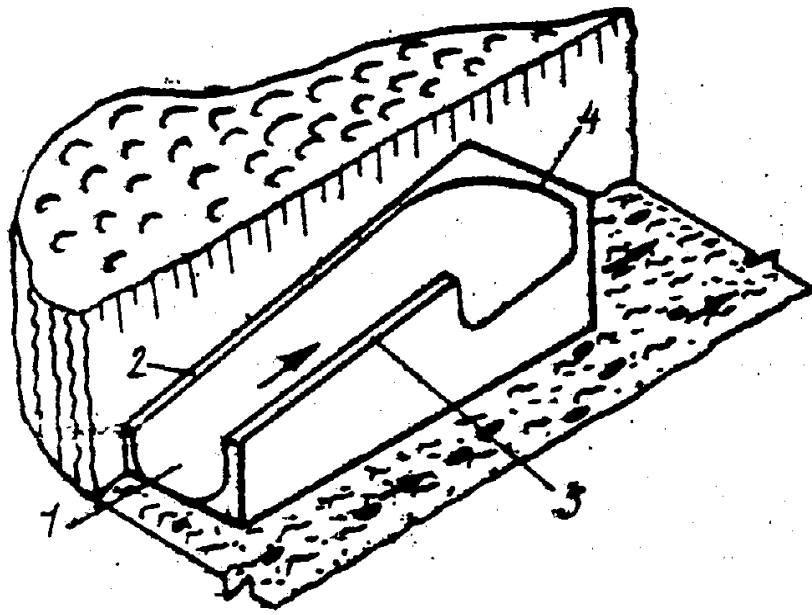
ღვარცოფის მოძრაობისას ნაგებობის ჰორიზონტალურად განლაგებული რკინა-ბეტონის კოჭები ნაკადის ენერგიას ამცირებენ ვერტიკალურ სიბრტყეში, ხოლო ელიფსური ფორმის ბეტონის თავები ნაკადს ანაწილებენ კალაპოტის მთლიან სიგანეზე ჰორიზონტალურ სიბრტყეში.



სურ. 8.8. ღვარცოფსაწინააღმდეგო საფეხურებიანი ბარაჟი.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა [11], რომელიც წარმოადგენს ტრამპლინის ტიპის კონსტრუქციას შედგება რკინა-ბეტონის ღარი-

საგან, რომლის სიმაღლე იზრდება ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით (იხ. სურ. 8. 9. ).



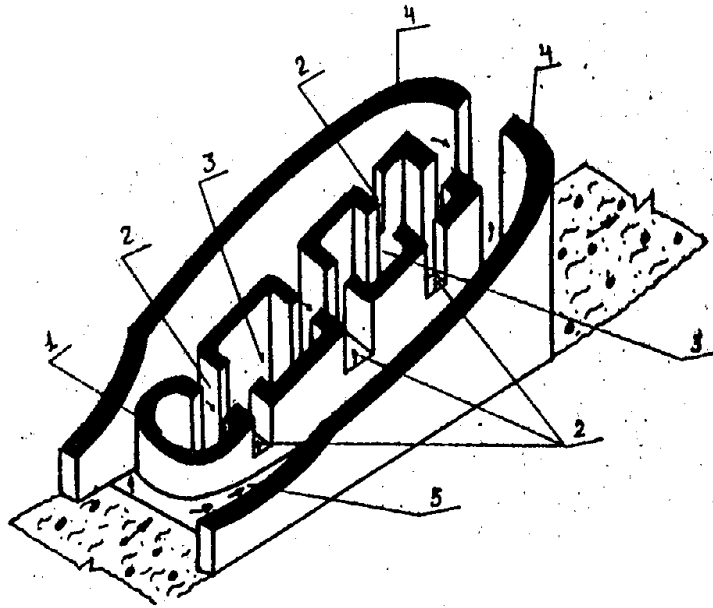
სურ. 8. 9. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.

ნაგებობა წარმოადგენს პარაბოლური ფორმის ღარს, ბოლოში მოხვეულობით მდინარის ღერძისაკენ, სიგანით მდინარის კალაპოტის ნახევარზე ნაკლები, რომელიც მიშენებული არის მდინარის ფერდზე. ღარის პარაბოლური ფორმა საშუალებას იძლევა როდესაც მდინარის კალაპოტში მოედინება კატასტროფული ღვარცოფი, წარქმოდგენილი კონსტრუქცია არ იტბორება და იგი მუშაობს ეფექტურად.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა [25] შედგება თავით ელიფსური მოხაზულობის ტრამპლინისაგან, აგრეთვე გამჭოლი განივი და გრძივი ნაკვეთურებისაგან მოთავსებულს მდინარის კალაპოტის ცენტრში, სიმაღლის ზრდადობით ნაგებობის ზედა ბიეფიდან ქვედა ბიეფისაკენ, ამასთანავე კონსტრუქციის გამჭოლ ტანსა და მრუდწირულ ნაკადმიმართველ კედლებს შორის მოთავსებულია ჰიდრაულიკური ღარები ნაკადის ენერჯის დამატებითი ჩაქრობისათვის,



რომელთა სიგანეც მცირდება თანდათანობით ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით (იხ. სურ. 8. 10 ).



სურ. 8. 10. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.

მდინარის კალაპოტში ღვარცოფის მოძრაობის დროს ნაგებობის ელიფსური მოხაზულობის კვანძი (1) ორად ყოფს ნაკადს. დაყოფილი ნაკადები მოძრაობენ ჰიდრაულიკურ ღარებში (5), შემდეგ ნაკადი განივი ნაკვეთურების (2) საშუალებით ჩაედინება გრძივ ნაკვეთურებში (3), სადაც ენერგიის ჩაქრობის მიზნით, ხდება დაყოფილი ნაკადების ერთმანეთთან შეჯახება.

ნაკადის ენერგიის ეფექტური ჩაქრობისათვის კონსტრუქციის მუშაობის პროცესში პირველად გამოყენებულია პრინციპი — “ნაკადი ნაკადის წინააღმდეგ”.

ენერგიადაკარგული ნაკადები მოძრაობენ ტრამპლინის ტიპის ჰიდრაულიკურ ღარებში და ნაკვეთურების საშუალებით ხდება ნაკადის ენერგიის დაკარგვა. ბოლოს ნაგებობის გრძივი ნაკვეთურების საშუალებით (3) ნაკადი გაედინება კონსტრუქციის ტანიდან.

თუ მდინარის კალაპოტში მოედინება კატასტროფული პარამეტრების მქონე ნაკადი, ამ შემთხვევაში ნაგებობა მუშაობს იგივე

პრინციპით, იმ განსხვავებით, რომ ნაკადის ენერჯის საბოლოო ჩაქრობა ხდება მრუდწირული ნაკადმიმართველი კედლებისა (4) და მრუდწირული კვანძის (1) საშუალებით, რომელიც მიმდინარეობს ნაგებობის ქვედა ბიუფის დასაწყისში.

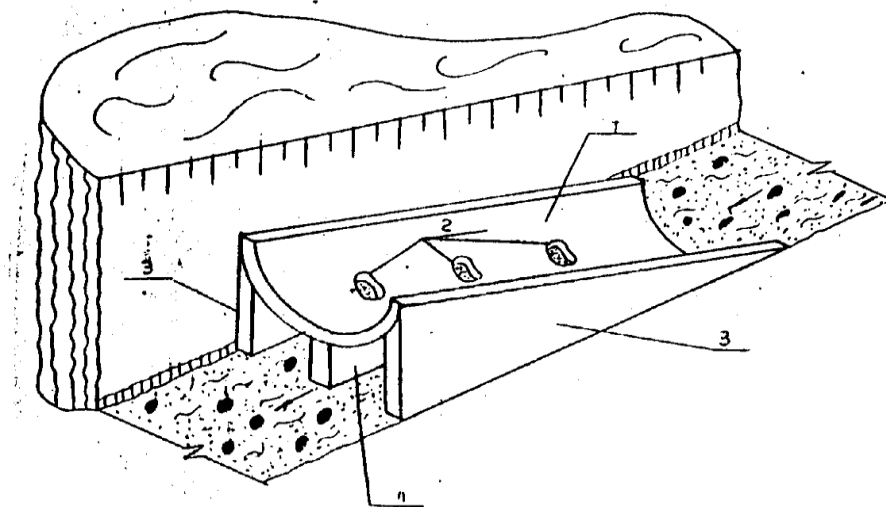
როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ნაკადის ენერჯის ჩაქრობისათვის გამოყენებულია პრინციპი “ნაკადი ნაკადის წინააღმდეგ”, რომელიც ხორციელდება ეტაპობრივად.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის ზომები, მათი განლაგების სქემა, გრძივი და განივი ნაკვეთურების, აგრეთვე მდინარის კალაპოტში ადგილის შერჩევა ხდება, როგორც ღვარცოფის სიმძლავრის, და სხვა დინამიკური მახასიათებლების, აგრეთვე მდინარის კალაპოტის ბუნებრივ-ტოპოგრაფიული პირობების გათვალისწინებით. რაც შეეხება ნაგებობის მშენებლობისათვის გამოყენებულ სამშენებლო მასალას, შესაძლებელია, ამ შემთხვევაში გამოყენებული იყოს მდინარის კალაპოტში არსებული ადგილობრივი ნედლეული, როგორცაა: სილა, ღორღი, ქვა, კირქვები; ხოლო სადულაზე მასალად გამოყენებული იყოს მდინარის კალაპოტში არსებული თეთრი ქვის გამოწვის შედეგად მიღებული კირი, თუ ეს ამის საშუალებას არ გვაძლევს გამოვიყენოთ ცემენტის ხსნარი.

ღვარცოფის ენერჯის ჩამსშობი ნაგებობა [26] წარმოადგენს გამჭოლ ნაკვეთურებიან ღარული ტრამპლინის ტიპის კონსტრუქციას, რომელიც მდინარის კალაპოტში ეყრდნობა საყრდენებზე (იხ. სურ. 8.11). ღარი შესრულებულია ნახევარცილინდრის ფორმით, რომლის ზედაპირზეც ამოკვეთილია წრიული ფორმის ნაკვეთურები, ამასთან ერთად საყრდენებს შორის გათვალისწინებულია ღვარცოფ-გამყოფი საყრდენი კედელი.

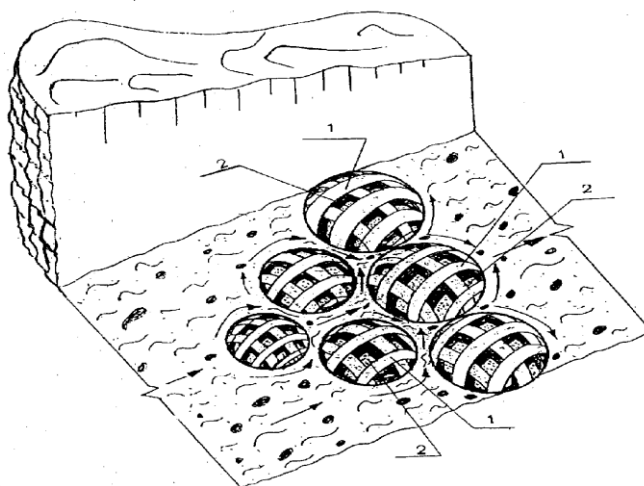
ღარზე ღვარცოფის მოძრაობისას წრიული ფორმის ნაკვეთურებში თხიერ მასასთან ერთად ჩაედინება წვრილი ფრაქციები, ხოლო შედარებით დიდი დიამეტრის მქონე ფრაქციები რჩება ღარის

ზედაპირზე რომლებიც უკუ მოძრაობით რჩებიან ნაგებობის ზედა ბიეფში.



სურ. 8. 11. ღვარცოფის ენერჯის ჩამქრობი ნაგებობა.

ცხაურა ტიპის ღრუტანიანი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარაჟი (იხ. სურ. 8. 12) შედგება ნახევრად სფერული ფორმის ელემენტებისაგან - 1, რომელთა ტანშიც ამოკვეთილია მრუდწირული ფორმის ნაკვეთურები - 2 (იხილეთ საქართველოს პატენტი № P 2862, ბიულეტენი №15(115) , თბილისი 2002, გვ. 19. ).



სურ. 8. 12. ცხაურა ტიპის ღრუტანიანი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარაჟი.

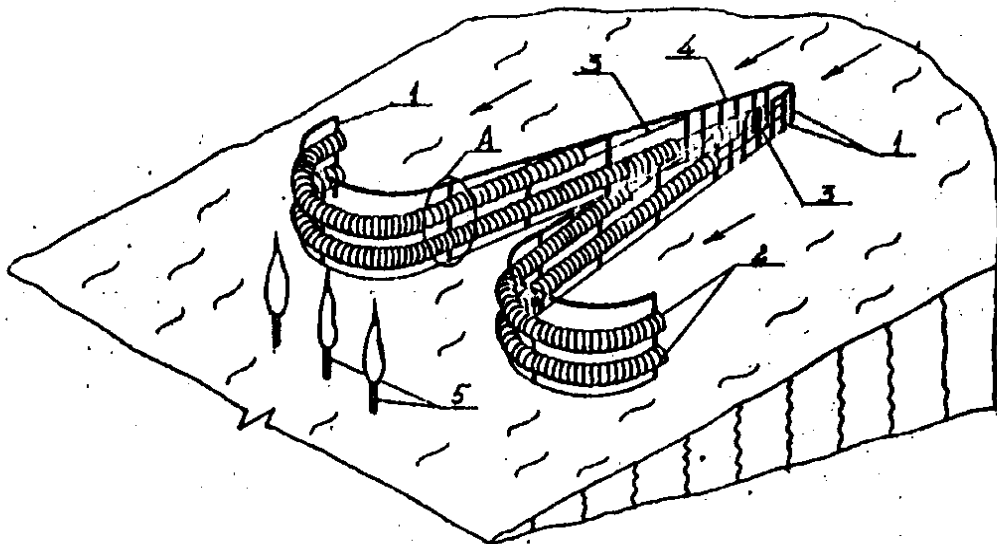
ბარაჟი შეიძლება დამზადებული იყოს როგორც რკინა-ბეტონის, ასევე მაღალი სიმტკიცის სინთეტიკური მასალისაგან, ან ჩამოსხმული იყოს ლითონისაგან. ბარაჟის ელემენტები ცალ-ცალკე ჩამაგრებულია კალაპოტში, მაგალითად ანკერით –3, ბეტონის ფუძეზე.

ნაგებობის ტექნიკური შედეგია ბარაჟის ექსპლუატაციის ვადისა და საიმედოობის გაზრდა, რომელიც მიიღწევა ღრუტანიანი ნახევრად სფერული ფორმის საფეხურების მდინარის კალაპოტში გეგმაში ტოლფერდა სამკუთხედის განლაგებით, წვერით ღვარცოფის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ, რომელთა სიმაღლეც იზრდება ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით.

### **8. 3. თოვლის ზვავის საწინააღმდეგო ნაგებობა**

ზვავსაწინააღმდეგო ნაგებობა [18] შედგება ფერდობზე ჩამაგრებული სხვადასხვა სიმაღლის ლითონის (ჩამოწერილი) დგარებისაგან (1), რომლებშიც სექციებად გაყრილია ავტომანქანის ამორტიზირებული საბურავჩამოცმული (2) ლითონის ელასტიური ბაგირები (3), ხოლო დგარების თავზე ხისტად დამაგრებულია ლითონის რიგელი (4), რომლის გრუნტიდან დაშორება იზრდება თოვლის ზვავის მოძრაობის მიმართულებით (იხ. სურ. 8. 13. ).

თოვლის ზეგვის საწინააღმდეგო ნაგებობას გეგმაში აქვს ღუზის მსგავსი ფორმა, წვერით მიმართული ზეგვის მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით, ხოლო ნაგებობით მთის ფერდობის დაცულ ზოლებში შესაძლებელია გაშენებული იყოს მწვანე ნარგავები;



სურ. 8. 13. ზეგვისაწინააღმდეგო ნაგებობა.

იმის და მიხედვით, თუ წარმოდგენილი ნაგებობა მთის ფერდობის რა ადგილზე იქნება განლაგებული, მუშაობის პრინციპიდან გამომდინარე შეიძლება განვიხილოთ ორი ვარიანტი:

**1. როდესაც ნაგებობები განლაგებულია მთის ფერდობის მთელ ფართობზე.**

ამ შემთხვევაში ნაგებობა წარმოადგენს თოვლის ზეგვის წარმოშობის წინააღმდეგ მომუშავე კონსტრუქციას.

მთის ფერდობზე ნაგებობების ჭადრაკული ან სხვა ოპტიმალური სახით განლაგება, ასევე მათ შორის მანძილების სწორად დადგენა საშუალებას იძლევა, რომ მთის ფერდობზე არ მოხდეს თოვლის საფარის სტატიკური წონასწორობის დარღვევა და თუ ეს მოხდა,

მაშინ კონსტრუქციის ფორმიდან გამომდინარე, თოვლის ზეავს ექნება მცირე მოცულობა.

გარდა ზემოთ აღნიშნულისა, მთის ფერდობზე ნაგებობის მიერ დაცულ ზოლებში დარგული მწვანე ნარგავები, არა მარტო ავსებენ (აღადგენენ) მთის ფერდის ეკოსისტემას, არამედ ეწინააღმდეგება თოვლის ზეავის წარმოშობის პროცესს;

2. იმ შემთხვევაში, როდესაც მთის ფერდობის ტოპოგრაფიული გარემო არ გვაძლევს წარმოდგენილი კონსტრუქციის მთის ფერდობის მთელ ფართობზე განლაგების საშუალებას ამ დროს ნაგებობა მუშაობს, როგორც თოვლის ზეავის მოძრაობის საწინააღმდეგო კონსტრუქცია.

კერძოდ მისი მუშაობის პროცესი მდგომარეობს შემდეგში: თოვლის ზეავის მოძრაობისას, ძირითად დარტყმის ძალას იღებს ნაგებობის წვერი, რომელიც თოვლის ზეავს ეოფს ორ ნაწილად, ხოლო ენერგიადაკარგული თოვლის ნაკადები შემდეგ მოძრაობენ ნაგებობის გამჭოლ სექციებისაკენ, სადაც ხდება მათი ენერჯის სრული ჩაქრობა. თოვლის ზეავის დინამიკიდან ცნობილია, რომ ზეავის მოძრაობის დროს მისი მოცულობა მოძრაობის მიმართულებით თანდათან იზრდება, ამიტომ წარმოდგენილ კონსტრუქციაში ნაგებობის რიგელის (4) გრუნტიდან დაშორებაც თოვლის ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით იზრდება, რომელიც ნაგებობის მიერ თოვლის ზეავის მოცულობის დიდი რაოდენობით შეკავების საშუალებას იძლევა.

ნაგებობის წარმოდგენილი კონსტრუქციული გადაწყვეტა მთის ფერდობის დაცულ ზოლებში მწვანე ნარგავების (5) გაშენების შესაძლებლობას იძლევა, რაც ამჟამად ასე აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს, მაღალმთიან რეგიონებში მთის ფერდობების ეკოსისტემების აღდგენის საქმეში.

**9. ტრამპლინის ტიპის თაღოვანი და საფეხურებიანი ფორმის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირებისათვის გაანგარიშების მეთოდოლოგია და მათი მუშაობის საიმედოობის შეფასება.**

**9.1. ნაგებობის გაანგარიშების მეთოდოლოგია**

ღვარცოფებთან ბრძოლის ერთ-ერთ პერსპექტიულ ღონისძიებას წარმოადგენს მცირე გაბარიტიანი, არატრადიციული კონსტრუქციის საინჟინრო ნაგებობათა სხვადასხვა სახეობები, რომელთა გამოყენების სფერო განისაზღვრება ღვარცოფების ტიპების მიხედვით.

ტრამპლინის ტიპის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების( იხ. მერვე თავი) დაპროექტებისათვის, ღვარცოფის ფიზიკურ-მექანიკური, რეოლოგიური და სხვა ძირითადი მახასიათებლების გათვალისწინებით თეორიული, ლაბორატორიული და საველე კვლევების საფუძველზე დამუშავებული იქნა ღვარცოფების ჰიდროლოგიური და ღვარცოფსაწინააღმდეგო კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდოლოგია.

წარმოდგენილი მეთოდოლოგიის საილუსტრაციოდ განვიხილოთ კონკრეტული მაგალითი, რისთვისაც დაშვებულია ღვარცოფული ტიპის სადინარში ტურბულენტური ღვარცოფის ფორმირება და მისი რეგულირება თაღოვან-კონუსური ფორმის ნაგებობით (იხ. სურ. 8. 4 ).

დასარეგულირებელია  $l_0 = 1$ კმ. სიგრძის ღვარცოფული ხასიათის მდინარის კალაპოტი. კალაპოტის გრძივი ქანობია  $i = 0.05$ ; წყალშემკრები აუზის ფართობი  $F = 0.21$  კმ<sup>2</sup> ; მყარი ნატანის საშუალო და მინიმალური დიამეტრები კი  $d = 22.6$  (სმ),  $d_{\min} = 20.0$  (სმ); ტურბულენტური ღვარცოფის მოცულობითი წონა კი ტოლია  $\gamma_{\text{ფ}} = 1.3$  (ტ.ძ/მ<sup>3</sup>).

### ა) ღვარცოფის ჰიდროლოგიური ანგარიში

ტურბულენტური(არაბმული) ღვარცოფის 0.1 %-იანი უზრუნველყოფის ხარჯი გამოითვლება (4.4) დამოკიდებულებით:

$$Q_{\max}^{0.1\%} = 2.4(34 + 400 \cdot 0.5) \cdot 0.21^{0.61} = 50.0 \text{ (მ}^3/\text{წმ)}. \quad (9.1)$$

მდინარის კალაპოტის სიგანე და ამ კალაპოტში ტურბულენტური ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე გამოითვლება შემდეგი დამოკიდებულებით[19]:

$$\begin{aligned} B &= 3.0d^{0.51} \cdot Q_{\max}^{0.53} = 3.0 \cdot (0.226)^{0.51} \cdot 50^{0.53} = 11.2 \quad (\text{მ}) \\ V &= 0.16 d^{0.37} Q_{\max}^{0.70} = 0.16 \cdot (0.226)^{0.37} \cdot 50^{0.70} = 1.5 \quad (\text{მ}^3/\text{წმ}) \end{aligned} \quad ; \quad (9.2)$$

ტურბულენტური ღვარცოფის მიერ ტრანსპორტირებული მყარი ნატანების საშუალო დიამეტრი ტოლია[19]:

$$d = (0.2 + 6.55 \cdot i^{2.73}) Q^{0.64} = (0.2 + 6.55 \cdot 0.05^{2.73}) \cdot 50^{0.64} = 0.24 \quad (\text{მ}). \quad (9.3)$$

განსხვავება ბუნებრივ მონაცემებსა (22.6 სმ.) და მიღებულ სიდიდეს შორის (24 სმ.) არ აღემატება 6 %-ს, ამიტომ შემდგომ ანგარიშში ვსარგებლობთ (9.3) ფორმულით მიღებულ მაჩვენებლით.

ტურბულენტური ღვარცოფის სიღრმე მდინარის სწორკუთხა ფორმის განივიკვეთში ტოლია:

$$h = \frac{Q_{\max}}{V \cdot B} = \frac{50.0}{1.5 \cdot 11.2} = 2.97 \quad (\text{მ}) \quad (9.4)$$

ტურბულენტური ღვარცოფის კონცენტრაცია (S) პროფ. მ. გაგოშიძის [30] დამოკიდებულებით ტოლია:



$$S = \frac{\gamma_{\text{ვს}} - \gamma_{\text{ვმ}}}{\gamma_{\text{მს}} - \gamma_{\text{ვმ}}} = \frac{1.3 - 1.0}{2.65 - 1.0} = 0.18; \quad (9.5)$$

ამრიგად, ტურბულენტური ღვარცოფის ძირითადი ჰიდროლოგიური მაჩვენებლების დადგენის შემდეგ შესაძლებელია ტრამპლინის ტიპის ახალი ღვარცოფსაწინააღმდეგო თაღოვან-კონუსური ნაგებობის ჰიდრაულიკური ანგარიში.

### ბ) ნაგებობის ჰიდრაულიკური ანგარიში.

დასაპროექტებელია ტრამპლინის ტიპის ნაგებობა[56], რომელიც წარმოადგენს თაღოვან-კონუსურ გამჭოლ სივრცულ გარსს და მიიღება ზრდადი სიმაღლით თაღოვან საყრდენებზე გრძივი ლითონის კოჭების გადახურვით(იხ. სურ. 8. 4). კოჭები ერთმანეთისაგან დაშორებულია გარკვეული მანძილებით, რაც ქმნის ნაგებობის ზედაპირის გამჭოლობას ტრაპეციული ფორმის ღრეჩობით. ნაგებობას აქვს სოლის ფორმის გრძივი ჭრილი, განივკვეთში კი თაღის ფორმა, რაც განაპირობებს მისი მუშაობის მდგრადობასა და საიმედოობას.

ნაგებობის წრიული თაღის შემთხვევაში კონსტრუქციის სიმაღლე ტოლია:

$$H_3 = R = \frac{B}{2} = 0.5 \cdot 11.2 = 5.6 \text{ (მ)}; \quad (9.6)$$

ნაგებობის სიგრძეს ვიღებთ მასზე ღვარცოფის გარსშემოდინების გათვალისწინებით. პროფ. მ. გაგოშიძის[30] მიერ დადგე-

ნილია, რომ ღვარცოფის გაშლის კუთხე  $\alpha'$  იცვლება  $11^\circ$  –დან  $13^\circ$  – მდე. კონკრეტულ შემთხვევაში კონუსის გაშლის კუთხე ფუძეზე ვიღებთ:  $\alpha_0 = 2\alpha' = 2 \cdot 12.5 = 25^\circ$ .

კონსტრუქციის მაქსიმალური სიგანის (11.2 მ) და კონუსის გაშლის კუთხის ( $25^\circ$ ) მიხედვით ვადგენთ ნაგებობის სიგრძეს, რომელიც ტოლია 28.0 მ-ის. ნაგებობის მუშაობის საიმედოობიდან გამომდინარე კონსტრუქციის ყრუ ნაწილის სიგრძეს ვიღებთ მთლიანი სიგრძის  $1/3$  –ის ტოლს, ე.ი. 9.0 მ.

ნაგებობის ღრეხოს ზომების დასადგენად ვსარგებლობთ დამოკიდებულებით  $(d/\Delta) = 0.85$ , ე.ი. როდესაც ღვარცოფის მოცულობაში ქვების ჩანართები 85 % -ია, მაშინ კოჭებს შორის საშუალო მანძილი იქნება:

$$\Delta = d/0.85 = 0.26/0.85 = 0.30 \quad (\text{მ}); \quad (9.7)$$

თუ კონუსის დასაწყისში ღრეხოს სიგანეს მივიღებთ 0.30 მ. მაშინ ბოლოში იგი ტოლია:

$$b_{\text{მ.ბ.}} = 2\Delta - b_{\text{მ.გ.}} = 0.60 - 0.20 = 0.40 \quad (\text{მ}). \quad (9.8)$$

ამრიგად, ნაგებობის ბოლოში ღრეხოს მაქსიმალური სიგანე ტოლია 0.40 მ., ხოლო დასაწყისში კი 0.20 მ.

დაუშვათ, ღვარცოფი მდინარის კალაპოტში მოძრაობა  $T = 6$  წთ-ს, მაშინ ნაგებობის მიერ 1 წთ-ში შეკავებული ღვარცოფული მასის მოცულობა იანგარიშება ფორმულით[22]:

$$W_T = \frac{S \cdot Q_{\text{max}}}{[0.95 + 0.05(d/\Delta)] \cdot (1/T)^{0.58}} = \frac{0.18 \cdot 50.0}{[0.95 + 0.05 \cdot (0.24/0.30)] \cdot (1/360)^{0.58}} = 276.2 \quad (\text{მ}^3). \quad (9.9)$$

თაღვან-კონუსური ფორმის ნაგებობის ზედა ბიეფში დაგროვილი ღვარცოფული მასის გამაწონასწორებელი ქანობის ( $i_0$ ) მნიშვნელობა იანგარიშება შემდეგი ემპირიული დამოკიდებულებით[7]:

$$i_0 = [1.25 + 0.52(d/\Delta) - (1.4 + d/\Delta) \cdot (i/i_0)] \cdot (q_{\text{მყ}}/q_{\text{წყ}}) , \quad (9.10)$$

სადაც,  $i_0$  არის კონსტრუქციის უკუქანობი,  $q_{\text{მყ}}$  და  $q_{\text{წყ}}$  – მყარი ნატანებისა და თხიერი ფაზის ხვედრითი ხარჯია. შესაბამისი მონაცემების გათვლისწინებით (9.10) დამოკიდებულება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$i_0 = [1.25 + 0.52 \cdot (0.24/0.3) - (1.4 + 0.56) \cdot 0.65] \cdot 0.18^{1.07} = 0.036 ; \quad (9.11)$$

თუ ღვარცოფსადინარის რეგულირებას ვახდენთ ბარაჟების მოწყობით, მაშინ ნაგებობებს შორის მანძილი ტოლია[38]:

$$L = \frac{H_d}{i - i_0} = \frac{5.6}{0.05 - 0.036} = 400.0 \text{ (მ)} . \quad (9.12)$$

ნაგებობის მიერ 90 % -იანი ქვების ჩანართების დაჭერის შემთხვევაში ღვარცოფის კონცენტრაცია ( $S'$ ) იანგარიშება[24]:

$$S' = S - \frac{90 \cdot S}{100} = 0.18 - \frac{90 \cdot 0.18}{100} = 0.018 ; \quad (9.13)$$

ღვარცოფის ნაგებობაში გავლის შემდეგ ტურბულენტური ნაკადის მოცულობითი წონა იქნება[22]:

$$\gamma_{\text{გვ}}' = \gamma_{\text{წყ}} + S' (\gamma_{\text{ქვ}} - 1) = 1.0 + 0.018(2.65 - 1) = 1.03 \text{ (ტ.მ./მ}^3\text{)} ; \quad (9.14)$$

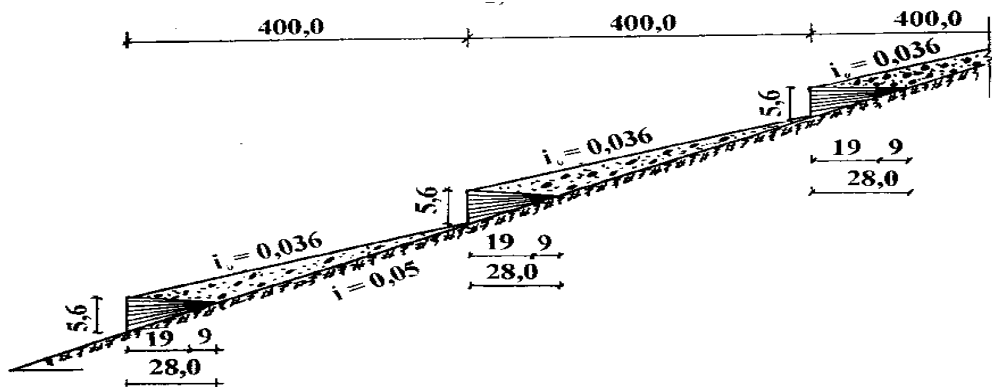
ნაგებობების რაოდენობა ( $n$ ) ღვარცოფსადინარის დასარეგულირებელ უბანზე ტოლი იქნება[38]:

$$n = \frac{l_0}{L} = \frac{1000}{400} \approx 3. \quad (9.15)$$

ამრიგად მდინარის კალაპოტში ასაშენებელია თანმიმდევრობით განლაგებული ტრამპლინის ტიპის თაღოვან-კონუსური ფორმის სამი ნაგებობა ( იხ. სურ. 9.1).

ერთი ნაგებობის მიერ შეკავებული მყარი ნატანების შესაძლო მოცულობა ( $W_0$ ) იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით[22]:

$$W_0 = \frac{L \cdot H_0 \cdot B}{2} = \frac{400 \cdot 5.6 \cdot 11.2}{2} = 12544 \quad (\text{მ}^3); \quad (9.16)$$



სურ. 9. 1. მდინარის კალაპოტში ნაგებობების განლაგების სქემა.

შემდეგ ეტაპზე წარმოებს ნაგებობის ანგარიში მდგრადობაზე, რომლის მიხედვითაც ზუსტდება საძირკვლის დასაშვები დეფორმაციები და ზომები. მისი განხორციელება შესაძლებელია კომპიუტერზე სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენებით[20].

## 9. 2. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის საიმედოობის შეფასება

ტრამპლინის ტიპის, თაღოვანი და საფეხურებიანი ფორმის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების საიმედოობის შეფასებისათვის საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის “ჰიდროეკოლოგიის” ინსტიტუტის ჰიდრაულიკურ ლაბორატორიაში პროფესორ ფ. შატბერაშვილის ხელმძღვანელობით ჩატარებული იყო ექსპერიმენტები, რომლის დროსაც დაცული იყო მოდელირების ძირითადი მოთხოვნები[7].

ღვარცოფის ნაგებობაზე ზემოქმედების მოდელის დაზუსტებისათვის გამოყენებული იყო დარგის ცნობილი მეცნიერების - აკად. ო. ნათიშვილის, პროფ. მ. გაგოშიძის, პროფ. ვ. თევზაძის, ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატების: გ. ბერუჩაშვილის, ზ. იორდანიშვილის, მ. მაქარაშვილის, ბ. კალაძის, ნ. კვაშილავას, ე. კუხალაშვილის, ლ. სოხაძის, ლ. სულაქველიძის, დ. ფრუიძის, ი. ხერხეულიძის, გ. ხერხეულიძის და სხვა მეცნიერების მიერ გამოქვეყნებული შრომები.

ექსპერიმენტის ჩატარების პროცესში განხილული იყო ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის, როგორც ზედა ბიეფის ფორმირების პროცესი, ასევე ნაგებობის ზედა ბიეფში ღვარცოფული მასის წონითი დატვირთვისა და ღვარცოფის დინამიკური დარტყმის ძალის ცვლილების ხასიათი.

ლაბორატორიული ცდების ჩატარების პროცესში აგრეთვე ყურადღება გამახვილებული იყო ნაკადში მყარი ფრაქციების კონცენტრაციაზე, ნატანების საშუალო დიამეტრის ზომაზე, ჰიდრაულიკური ღარის ქანობზე, ტურბულენტური ღვარცოფის სიჩქარისა და მყარი ფრაქციების ხარჯის ცვლილებაზე.

ტრამპლინის ტიპის, ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობაზე მყარი ფრაქციების წონითი დატვირთვის ( $W_p$ ) სტატისტიკური მაჩვენებლები ინტერვალებში და შესაბამისი სიხშირის მაჩვენებლები მოცე-

მული არის ცხრილში (იხ. ცხრ. 9.1), სადაც ( $m_i$ ) არის ინტერვალებში განმეორადობის რაოდენობა,  $P_i$  – განმეორადობის სიხშირე ( $P_i = m_i/n$ ), სადაც  $n$ - სტატისტიკური რიგის რაოდენობა ( $n = 41$ );  $A_i = \sum_{j=1}^i (p_i/j)$ , სადაც  $j$  ინტერვალების მნიშვნელობებია.

### ცხრილი 9. 1.

მყარი ფრაქციების წონითი დატვირთვის მნიშვნელობები.

$j \cdot 10^{-2}$	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75	75-90	90-105	105-120
$m_i$	21	5	4	3	2	3	1	1
$P_i$	0.51	0.12	0.09	0.07	0.05	0.07	0.02	0.02
$A_i$	3.40	0.80	0.60	0.46	0.33	0.46	0.13	0.13
$W_i$	0.428	0.279	0.182	0.118	0.078	0.051	0.033	0.014
$n \cdot W_i$	17.55	11.44	7.46	4.84	3.19	2.09	1.35	0.57

ცხრილის მონაცემების გამოყენებით (იხ. ცხრ. 9. 1), აგებული იქნა წონითი დატვირთვის ფუნქციის განაწილების მრუდი, რომელსაც შეესაბამება ექსპონენციალური განაწილება და მათემატიკურად ის ასე გამოისახება[27]:

$$f(W_p) = 2.857 \exp(-2.857W_p) ; \quad (9.17)$$

ამ შემთხვევაში პირსონის კრიტერიუმი ტოლია  $\chi^2 = 8.71$ , თავისუფლები ხარისხის კი  $N = 6$ ; გაანგარიშებული იყო თეორიულ განაწილებასა და პისტოგრამის მონაცემებს შორის თანხვედრის მაჩვენებელი, რომელმაც 95 %-იანი ალბათობით 80 %-ი შეადგინა.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ტრამპლინის ტიპის საიმედოობა ნაგებობის ზედა ბიეფის ღვარცოფული მასის შეესებამდე შეადგინა:

$$P_1(W_p) = \int_0^l f(W_p) dW_p = \int_0^{0.61} 2.857 e^{-2.857W_p} dW_p = 0.825 ; \quad (9.18)$$

ნაგებობის წყობიდან გამოსვლის რისკი ( $R_1$ ) კონსტრუქციის ზედა ბიევის ღვარცოფული მასის წონითი დატვირთვის შემთხვევა-ში ტოლია:

$$R_1 = 1 - P_1(W_p) = 1 - 0.825 = 0.175 . \quad (9.19)$$

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ტრამპლინის ტიპის ნაგებობაზე ღვარცოფის დინამიკური დარტყმის ძალის მნიშვნელობა ( $F$ ), გაანგარიშებული იყო პროფესორ მ. გაგოშიძის მიერ მიღებული დამოკიდებულებით[30], რომელსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$F = K\rho\omega V^2 \sin\alpha \quad , \quad (9.20)$$

სადაც,  $K$  არის კოეფიციენტი, რომელიც ტოლია  $K = 4.5$  (წყლის ნაკადისათვის ეს მაჩვენებელი ტოლია  $K = 1.0$ , ხოლო თოვლის ზედასათვის კი  $K = 1.5$ ),  $\rho$ - ღვარცოფის სიმკვრივეა ( $\text{კგ/მ}^3$ ),  $\omega$ - ნაგებობის ის ფართობი რომელზეც მოქმედებს ღვარცოფი ( $\text{მ}^2$ ),  $V$ - ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე ( $\text{მ/წმ}$ ),  $\alpha$ - ტრამპლინის ტიპის ნაგებობის მდინარის კალაპოტში დახრის კუთხე (გრადუსი).

ტრამპლინის ტიპის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობაზე ღვარცოფის დინამიკური დარტყმის ძალის განაწილების ფუნქციის დადგენის მიზნით გამოყენებული იყო, როგორც ლაბორატორიული მონაცემები, ასევე ბუნებაში ღვარცოფის გავლის სტატისტიკური რიგი, რომლის რაოდენობამაც შეადგინა 55 წერტილი. ღვარცოფის ნაგებობაზე დინამიკური დარტყმის ძალის მნიშვნელობები იცვლება 3. 88 - 3024. 8 ( $\text{ნ} / \text{მ}^2$ ) საზღვრებში [28,30,47,48,49,61].

ბუნებრივი მონაცემების გამოყენებით, რომელთა მნიშვნელობებიც მოცემულია ცხრილში(იხ. ცხრილი 9.2) აგებული იყო ჰისტოგრამა; მათემატიკური ლოდინი ტოლია  $m_* = 437.45$ , ხოლო ექსპო-

ნენციალური განაწილების ხარისხის მაჩვენებელი ტოლია:  
 $\lambda = -1/m_* = -0.0023$  , [27,28].

## ცხრილი 9. 2.

ღვარცოფის დინამიკური დარტყმის ძალის მნიშვნელობები.

$F_i \cdot 10^2$ (ნ/მ <sup>2</sup> )	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21
$m_i$	31	12	3	5	1	1	1
$f(F_i)$	0.564	0.218	0.055	0.091	0.018	0.018	0.018

ტრამპლინის ტიპის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობაზე ღვარცოფის დინამიკური დარტყმის ძალის განაწილებას აქვს შემდეგი სახე[15]:

$$f(F_i) = 0.0023 \exp(-0.0023 F_i); \quad (9.21)$$

მიღებული (9.21) გამოსახულება შეესაბამება ექსპონენციალურ განაწილებას, ხოლო თანხვედრა თეორიულ განაწილებასა და ჰისტოგრამის მონაცემებს შორის პირსონის კრიტერიუმის  $\chi^2$  -ის მიხედვით[4] 70 % შეადგინა.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის საიმედოობა ღვარცოფის დინამიკური ძალის მხედველობაში მიღებით ტოლია[28]:

$$P_2(F_i) = \int_0^l f(F_i) dF_i = \int_0^{0.61} 0.0023 e^{-0.0023} dF_i = 0.928; \quad (9.22)$$

ტრამპლინის ტიპის თაღოვანი და საფეხურებიანი ფორმის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის წყობიდან გამოსვლის რისკი, კონსტრუქციაზე ღვარცოფის დინამიკური დარტყმის ძალის მხედველობაში მიღებით ტოლია:



$$R_2 = 1 - P_2(F_i) = 1 - 0.928 = 0.072 ; \quad (9.23)$$

ბუნებაში ღვარცოფის ნაგებობაზე ზემოქმედების შემთხვევაში, პარალელურად მიმდინარეობს, როგორც დინამიკური, ასევე სტატიკური ძალების მოქმედება, ამიტომ ხდომილებების ერთდროულად მოხდენის შემთხვევაში ნაგებობის სრული საიმედოობა ( $P_0$ ) ტოლია:

$$P_0 = P_1(W_p) \cdot P_2(F_i) = 0.825 \cdot 0.928 = 0.766 ; \quad (9.24)$$

ხოლო ნაგებობის წყობიდან გამოსვლის რისკი ( $R_0$ ) ხდომილებების ერთდროულად მოხდენის შემთხვევაში ტოლია:

$$R_0 = 1 - P_0 = 1 - 0.766 = 0.234 ; \quad (9.25)$$

თუ განვიხილავთ მიღებული შედეგების ანალიზს დავრწმუნდებით, რომ წარმოდგენილი ტრამპლინის ტიპის ახალი ნაგებობები, არსებულთან შედარებით ხასიათდებიან მაღალი საიმედოობით, რომელიც ძირითადად განპირობებულია კონსტრუქციული გადაწყვეტილებით.

რაც შეეხება ახალი საინჟინრო-ეკოლოგიური ღონისძიებების ეკონომიურ მაჩვენებლებს, ბაზისურ რკინა-ბეტონის ღვარცოფსაწინააღმდეგო არსებულ კონსტრუქციებთან შედარებით, იგი საორიენტაციოდ ერთ გრძივ მეტრზე შეადგენს 85 - 210 ლარს, რომელიც საგრძნობლად მაღალ მაჩვენებლად ითვლება ღვარცოფსაწინააღმდეგო ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში.

## დასკვნა

მდინარე დურუჯის წყალშემკრებ აუზში 2001-2002 წწ. ჩატარებული საველე-ექსპედიციური კვლევებისა და ავტორის მიერ გამოქვეყნებული სამეცნიერო ლიტერატურის ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია ჩამოყალიბებული იყოს შემდეგი სახის ძირითადი დასკვნები და რეკომენდაციები:

1. ქ. ყვარლის მოსახლეობის მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული ღვარცოფებისაგან ეფექტური დაცვის მიზნით დადგენილია ის კრიტიკული ადგილები, სადაც შესაძლებელია მდინარის კალაპოტიდან ღვარცოფის ამოვარდნა;
2. შესწავლილია მდინარე დურუჯის წყალშემკრებ აუზში ჩამდინარე ღვარცოფული ტიპის შენაკადების მთის ფერდობების ეროზიის კოეფიციენტები, რომელიც კავშირს ამყარებს ეროზიის კლასსა და ფერდობის დაზიანების ხარისხს შორის;
3. დადგენილია მდინარე დურუჯის ღვარცოფის სხვადასხვა უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯები, რომლის გამოყენებითაც შესაძლებელია ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების დაპროექტება;
4. საიმედოობისა და რისკის თეორიის გამოყენებით დადგენილია მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული მაქსიმალური ხარჯების ფუნქციის განაწილების კანონი, რომელსაც აქვს ვეიბულის სახე;
5. მიღებულია ემპირიული დამოკიდებულება, რომლითაც იანგარიშება მდინარე დურუჯის კალაპოტში ფორმირებული ღვარცო-

- უების მიერ ტრანსპორტირებული ღვარცოფული მასის მოცულობები;
6. შემოთავაზებულია ბმული ღვარცოფის ფრონტის საშუალო სიჩქარის, ტალღის სიგრძისა და ფრონტის ფორმების საანგარი-შოდამოკიდებულებები ნაკადის ჰიდრაულიკური ხახუნისა და ჰაერის შუბლური წინააღმდეგობის გათვალისწინებით;
  7. კატასტროფების მათემატიკური თეორიის გამოყენებით პირველად დადგენილია მდ. დურუჯის ეროზიულ ღრანტეებში დაგროვილი ღვარცოფული მასის დაძვრის, მცირე სიმძლავრის მეწყრის მოძრაობის დაწყებისა და ტრამპლინის ტიპის ახალი ღვარცოფს-აწინააღმდეგო ნაგებობების წყობიდან გამოსვლის კრიტერიალური მნიშვნელობები, რომლებიც აღნიშნული პროცესების პროგნოზირების საშუალებას იძლევა;
  8. დამუშავებულია ახალი მეთოდოლოგია, რომლის გამოყენებითაც მდინარე დურუჯის კალაპოტში შესაძლებელია ტრამპლინის ტიპის ახალი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების დაპროექტება;
  9. საიმედოობისა და რისკის თეორიის გამოყენებით შეფასებულია ტრამპლინის ტიპის ახალი კონსტრუქციების საიმედოობა და წყობიდან გამოსვლის რისკი, ღვარცოფის დინამიკური დარტყმის ძალისა და ღვარცოფული მასით გამოწვეული წონითი დატვირთვის ნაგებობაზე ცალკე-ცალკე და ერთდროულად მოქმედების შემთხვევაში;

10. მიღებული შედეგები მდინარე დურუჯის აუზში მიმდინარე ეროზიულ - დვარცოფული პროცესების პროგნოზირების საშუალებას იძლევა, ხოლო ნაშრომში წარმოდგენილი ახალი საინჟინრო - ეკოლოგიური ღონისძიებების პრაქტიკაში დანერგვა ქალაქ ყვარლის მოსახლეობისა და მდინარე დურუჯის კალაპოტის მიმდებარე ტერიტორიების დვარცოფებისაგან ეფექტური დაცვის საშუალებას იძლევა;
  
11. მდინარე დურუჯის კალაპოტში ჩატარებული საველე-ექსპედიციური კვლევის შედეგები მოხსენებული იყო 2002 წლის 17 დეკემბერს იუნესკოს პროგრამის “ადამიანი და ბიოსფეროს” საქართველოს ეროვნული კომიტეტის (MAB)-ის სხდომაზე.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**На основе полево-экспедиционных работ в бассейне реки Дуруджи и анализе опубликованных научных трудов автора, можно сделать следующие выводы и рекомендации:**

- 1. Для эффективной защиты населения г. Кварели от селевых потоков, формирующихся на реке Дуруджи, установлены те критические места в русле р. Дуруджи, где возможен перелив селевого потока;**
- 2. Изучены коэффициенты эрозии горных откосов в бассейне р. Дуруджи, которые связывают между собой класс эрозии и степень повреждения откоса;**
- 3. Установлены максимальные расходы селевого потока р. Дуруджи разной обеспеченности, при помощи которых, на следующем этапе, осуществляется проектирование противо-селевых сооружений;**
- 4. На основе теорий надежности и риска установлен закон функции распределения максимальных расходов селея, формирующегося на р. Дуруджи, который имеет форму закона Вейбула;**
- 5. Получена эмпирическая зависимость, с помощью которой рассчитывается объем селевой массы выносимой селевым потоком, формирующимся в бассейне р. Дуруджи;**
- 6. Установлена средняя скорость фронта, длина и форма волны**

связного селевого потока, с учетом гидравлического трения и лобового сопротивления воздуха;

7. С помощью математической теории катастроф впервые определены критические значения сдвига селевой массы, накопленной в эрозионных очагах реки Дуруджи, условия начала движения маломощных оползней, которые дают возможность прогнозирования вышеуказанных процессов и выхода из строя новых противоселевых сооружений трамплинного типа;
8. Разработана новая методология расчета, при помощи которой осуществляется проектирование новых противоселевых сооружений трамплинного типа на р. Дуруджи;
9. На основе теорий надежности и риска оценена надежность работы и выход из строя новых противоселевых сооружений трамплинного типа, при совместном и раздельном динамическом и статистическом воздействии селея;
10. Полученные результаты дают возможность эффективно прогнозировать эрозионно-селевые процессы в бассейне р. Дуруджи, а внедрение новых инженерно-экологических мероприятий, разработанных в работе, дают возможность эффективной защиты населения г. Кварели и примыкающих территорий р. Дуруджи от селевого потока;
11. Основные результаты полево-экспедиционных работ, проведенных на р. Дуруджи докладывались 17 декабря 2002 г. на заседании Национального Комитета Грузии по программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера».

## **C O N C L U S I O N**

**Taking into consideration the field -forwarding investigation on the basin of the river Duruji and analysis of works published by the author the following main conclusions can be made and recommendations can be given :**

- 1. For effective protection of the population of Kvareli from debris flow formed on the river Duruji, the critical places on the river-bed of Duruji, where overflow of debris flow is possible were spotted;**
- 2. Erosion coefficients of mountain slopes of debris flow flowing into the basin of river Duruji, which establishes links between the class of erosion and degree of damage of a slope, were explored;**
- 3. Maximum charges on debris flow of river Duruji in different provisions were established, through which, at the following stage, anti-debris flow constructions are planned to design;**
- 4. On the basis of the theories of reliability and risk, the law of function distribution of the maximum charges on debris flow, formed on river Duruji, which has the form of the law Veibul was established;**
- 5. Empirical dependence, which helps us to calculate the volume of debris flow born by a flow formed on the river-bed of Duruji was received;**
- 6. Taking into account the hydraulic friction and frontal resistance of air, rated ratio of average speed of front, of length and form of a wave of structural debris flow was offered;**
- 7. Applying the mathematical theory of catastrophes, for the first time, conditions of movement of debris-flow mass stored in the erosive**

**centres of river Duruji , the reasons of beginning of low-power landslips and critical values of wreck of new spring-board type debris flow protection structures, which enable the forecasting of the above-mentioned processes were established;**

- 8. The new calculation methodology, through which it is possible to design new spring-board type debris flow protection structures in the river-bed of Duruji was worked out;**
- 9. Applying the theories of reliability and the risk, the reliability of new spring-board type debris flow protection structures and the risk of their damage in case of joint and separate dynamic and statistic influence of debris flow on the constructions was determined;**
- 10. The received results enable us to predict effectively erosive-debris flow processes in the river-bed of Duruji, and introduction of new engineer-ecological measures worked out in the process of work ensures the effective protection of the population of Kvareli and contiguous territory of river Duruji from debris - flow;**
- 11. The basic results of the field-forwarding investigation carried out on river Duruji were reported at programme: UNESCO " The Man and Biosphere" session of National Committee of Georgia on December 17, 2002;**



## ლიტერატურა

1. Б е л я е в Н. М.- Сопротивление материалов.- М.: 1954, 828 с.
2. Б е р у ч а ш в и л ი Г. М. , К о к о რ ი შ ვ ი ლ ი В. И. – Некоторые результаты исследования селевых потоков.Труды КазНИГМИ, Алма-Ата, вып. 33,1969, с.42-62.
3. Б р е к е რ Т. , ლ ა ნ დ ე რ ლ. – Дифференцируемые ростки и катастрофы. М. : Мир, 1977,206 с. (пер. с англ.).
4. В е н т ц е ლ ე ე. С. – Теория вероятностей. М.: 1962, 564 с.
5. Г ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. В.- Противоселевое сооружение трамплинного типа. Авт.св. СССР №1165736, Бюлл. №25, М.: 1985, с.101.
6. Г ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. В.- Противоселевое устройство. Авт.св. СССР №1242570, Бюлл. №25, М.: 1986, с.108.
7. Г ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. В.- Исследование уравнительного уклона занесения в верхнем бьефе противоселевых перегораживающих сооружений на горных реках. Сообщения АН Грузии , т.123, № 1, Тбилиси , 1986 , с. 105 - 108.
8. Г ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. В., Х е გ ა ი ე. А. - Противоселевая запруда. Авт. св. СССР №1596006, Бюлл. №36, М.: 1990, с.100.
9. Г ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. В., შ ა რ ა ნ გ ი ა რ. ლ. –Противоэрозионное устройство. Авт.св. СССР №1738902, Бюлл. №21, М.: 1992, с.183.
10. Г ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. В., შ ა რ ა ნ გ ი ა რ. ლ. - Устройство для борьбы с эрозией. Авт.св. СССР №1783042, Бюлл. №47, М.: 1992, с.109.
11. Г ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. В., გ ვ ი შ ი ა ნ ი ჯ. გ.- Противоселевое устройство. Авт.св. СССР №1789589, Бюлл. №3, М.: 1993, с.123.
12. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ. , პ ა ს ი კ ა შ ვ ი ლ ი მ. გ.- მეწერული პროცესების ზოგადი ანალიზი კატასტროფების თეორიის მიხედვით. ჟურნ. "მეცნიერება და ტექნიკა", № 9-10, თბილისი, 1993, გვ. 18–20.
13. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ. , პ ა ს ი კ ა შ ვ ი ლ ი მ. გ. - ახალი ღვარცოფსაწინააღმდეგ ტრამპლინის ტიპის ნაგებობების

- შესაძლო ავარიების ანალიზი კატასტროფების თეორიის მიხედვით. ჟურნ. "მეცნიერება და ტექნიკა", №11-12, თბილისი, 1993, გვ. 31 – 34.
14. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ., პ ა ს ი კ ა შ ვ ი ლ ი მ. გ. - ღვარცოფული ხასიათის წყალდენებზე კალაპოტში დაგროვილი მყარი მასის ზღვრული წონასწორობის ინტერპრეტაცია კატასტროფების თეორიის მიხედვით. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის "მოამბე", ტ. 149, № 2, თბილისი, 1993, გვ. 259 – 262.
  15. G a v a r d a s h v i l i G. V. – The New Mud-Protective Structures and Their Calculation Methodology. Tbilisi, Georgia, 1995, 58 p.
  16. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის ზედა ბიეფში დაგროვილი მყარი ნარიყების ზედაპირის ნიშნულების დადგენა. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის "მოამბე", ტ. 151, №3, თბილისი, 1995, გვ. 448 - 451.
  17. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ.- ბმული ღვარცოფული ნაკადის სიჩქარის განსაზღვრა ჰაერის წინაღობის გათვალისწინებით. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის "მოამბე", ტ. 151, №3, თბილისი, 1995, გვ. 444 - 447.
  18. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ., პ ა ს ი კ ა შ ვ ი ლ ი მ. გ., ც ხ ო ვ რ ე ბ ა ძ ე ა. გ.- ზვავსაწინააღმდეგო ნაგებობა. საქართველოს პატენტი №278, ბიულ. №2 თბილისი 1996, გვ. 30.
  19. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ.- ღვარცოფული წყალსადინარებისათვის ძირითადი ჰიდრომორფომეტრიული მაჩვენებლების დადგენა. ჟურნ. მეცნიერება და ტექნიკა, № 7-9, თბილისი, 1998 გვ. 72 – 74.
  20. G a v a r d a s h v i l i G. V. -Calculation of New Spring Board Type Mud - Protective Construction. Bull. of The Georgian Academy of Sciences. Tbilisi, T. 159, № 3, 1998, 459 – 461.

21. G a v a r d a c h v i l i G. V. - Les Nouvelles Especies des Construction de Protection de la Nature. "Metsniereba", Tbilissi, 1999, 42 p.
22. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ. - ტრამპლინის ტიპის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების დაპროექტებისათვის გაანგარიშების მეთოდოლოგია. წგ. " წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის თანამედროვე პრობლემები ", მიძღვნილი საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის "ჰიდროეკოლოგიის" ინსტიტუტის დაარსების 70 წლისთავისადმი. თბილისი 1999, გვ. 22 - 28.
23. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ., ჩ ა ხ ა ი ა გ. გ. - "ფოტო ალბომი" (მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზის თანამედროვე ეკოლოგიური მდგომარეობა). საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის "ჰიდროეკოლოგიის" ინსტიტუტი, თბილისი, 2001, 35 გვ.
24. Г а в а р д а ш в и л и Г. В.- Разработка схем расположения противоселевых сооружений на горных реках. Труды международной конференции по селевым явлениям и некоторым смежным проблемам. Тбилиси 2001, с. 33-39.
25. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ., გ ა რ ს ე ნ ი შ ვ ი ლ ი გ. რ., კ უ პ რ ა ვ ი შ ვ ი ლ ი მ. ს. - მთის მდინარის კალაპოტის მარეგულირებელი ტრამპლინის ტიპის ნაგებობა. საქართველოს პატენტი №583, ბიულ. №1 თბილისი 1997, გვ. 130.
26. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ. ვ., ნ ყ რ უ ა შ ვ ი ლ ი ი. გ. , კ უ ხ ა ლ ა შ ვ ი ლ ი ე. გ.- ღვარცოფის ენერჯის ჩამხშობი ნაგებობა.ГФ საქართველოს პატენტი №740, ბიულ. №3 თბილისი 1997, გვ. 80.
27. Г а в а р д а ш в и л и Г. В. - Оценка надежности новых противоселевых сооружений трамплинного типа. Труды международной конференции по русловым процессам, гидравлике трубопроводного

- транспорта, гидротехнических сооружений и вопросам гидроэнергетики. Тбилиси, 2000, ст. 111-112.
28. Г а в а р д а ш в ი ლ ი    Г. В.- Новые природозащитные конструкции и вопросы их надежности. Труды международного симпозиума по проектированию гидротехнических сооружений и проблемы их эксплуатации. ГТУ , Тбилиси 2000 , ст. 152 – 156.
  29. G a v a r d a s h v i l i    G. V., C h a k h a i a    G. G.- Evaluation of Present Ecological    Situation of the River Duruji Drainage Basin. Bull. of The Georgian Academy of Sciences. Tbilisi, T. 166, № 1 , 2002, pp. 174 – 177.
  30. Г а г о შ ი დ ზ ე    მ . ს.- Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси, 1970, 385 с.
  31. Г в а з ა ვ ა    Г. Н., К в а რ ა ც ხ ე ლ ი ა    ლ. ლ., მ უ ჯ ა ე ვ    ი. ჯ. – Исследование трансформации волн прорыва в нижнем бьефе гидроузла с применением ЭВМ. Водные ресурсы, М.: 1981, № 3, с. 135-138.
  32. გ ვ ი შ ი ა ნ ი    ზ. ჰ. , გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი    გ. ვ. – სასოფლო სამეურნეო სავარგულების ნაყოფიერების გაზრდის ზოგიერთი ღონისძიება. საინჟინრო ეკოლოგიის საკითხები ჰიდროტექნიკურ მედიორაციაში. აგრარული უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომების კრებული. თბილისი, 1996, გვ. 70-72.
  33. Г и л м о р    Р. - Прикладная теория катастроф. В 2-х кн., М .: , Мир, 1980, 608 с. (пер. с англ.).
  34. Д а н и ლ о ვ ა    Е. М., Э გ ლ ი თ    მ. Э.- Движение снежных лавин в условиях предельного трения. Изв. АН СССР, « Механика жидкости и газа », № 5 , М., 1977.
  35. დურუჯი დმუის. (ინტერვიუ გ. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ თ ა ნ)- გაზ. “საქართველოს რესპუბლიკა”. №156, 28 ივნისი, 2001, გვ. 6.
  36. დურუჯის კალაპოტი კვლავ ინტენსიურად ივსება. ( ინტერვიუ გ. გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ თ ა ნ )- გაზ. “საქართველოს რესპუბლიკა”, № 174 , 19 ივლისი, 2002, გვ. 4.

37. Е в с е е в Е. Г., Ш о н и я В. В. – Разностные схемы расщепления вектора потока для уравнения мелкой воды. Математическое моделирование. т. 2, №3, 1990, с. 119-126.
38. И н с т р у к ц и я “По проектированию и строительству противоселевых защитных сооружений”. СН 518-796 М., 1981,14с.
39. И о р д а н и ш в и л и З. С., М а к а р а ш в и л и М. А. – Результаты лабораторных исследований воздействия селевого потока на селегаситель трамплинного типа. В кн.: “ Эрозионные и селевые процессы и борьба с ними ” . Тбилиси, 1978, вып. 6 , с. 55 - 59.
40. К у х а л а ш в и л и Э. Г., Г а в а р д а ш в и л и Г. В., П р у и д з е Д. К. – Противоселевое устройство. Авт.св. СССР №1191515, Бюлл. №42, М.: 1985, с. 111.
41. М и р ц х у л а в а Ц. Е. – Надежность гидромелиоративных сооружений. М.: Колос, 1974 , 279 с.
42. М и р ц х у л а в а Ц. Е.- Оценка риска повреждения противоэрозионных и противоселевых сооружений. Труды ВНИИГиМ, вып.4,М.:1975,с 48-62.
43. М и р ц х у л а в а Ц. Е. – Некоторые приложения математической теории катастроф к задачам гидротехники и мелиорации. Труды ГрузНИИГиМ, Тбилиси, 1988, с. 83 - 103.
44. М и р ц х у л а в а Ц. Е. - Экологические нарушения.Тбилиси,1993,433 с.
45. М и р ц х у л а в а Ц. Е. д- Оценка частоты появления селей катастрофического характера. ж. Гидротехническое строительство, №5, М .: 1998, с. 19-26.
46. M o r g a n R. P. C. , H a n n M. J. – Shah Deniz Gas Export Project: erosion risk assessment. Interim Report to BP Kvaerner. Cranfield University , Silsoe, 2001, 25 p.
47. ბ ა თ ი შ ვ ი ლ ი ო. გ., თ ე ვ ზ ა ძ ე ვ. ო., დ ა ნ ე ლ ი ა ზ. ნ. - ღვარცოფებისა და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ჰიდრაულიკა. თბილისი, 1995, 78 გვ. ~~საქწყინა~~

48. ნ ა თ ი შ ვ ი ლ ი ო . გ . , ტ ე ვ ჯ ა დ ჯ ე ვ . ი . - გ ი დ რ ა ვ ლ ი ჩ ე ს კ ი ე რ ნ ო მ რ ნ ო ს თ ი ს ვ ი ა ზ ნ ო ს ს ე ლ ე რ . ტ ბ ი ლ ი ს ი , მ ე ც ნ ი ე რ ე ბ ა , 1996 , 154 ს .
49. ნ ა თ ი შ ვ ი ლ ი ო . გ . , ტ ე ვ ჯ ა დ ჯ ე ვ . ი . - დ ვ ი ჯ ე ნ ი ე ს ე ლ ე რ ი ი ხ ვ ა ჯ ი მ ო დ ე რ ნ ო ს თ ი ს ს ო ო რ ო ჯ ე ნ ი ა მ ი . ტ ბ ი ლ ი ს ი 2001 , 148 ს .
50. ო რ ნ ა ტ ს კ ი ე ნ . ვ . – მ ე ხ ა ნ ი კ ა გ რ ო ნ ტ ო ვ . ი ჯ დ . მ გ უ , მ . : 1962 , 446 ს .
51. პ ო ს ტ ო ნ ტ . , ს ტ ი უ ა რ ტ ტ . - თ ე ო რ ი ა კ ა ტ ა ს ტ რ ო ფ . მ . : მ ი რ , 1980 , 608 ს .  
(პერ. ს ანგ ლ .)
52. ს ო ლ ა კ ვ ე ლ ი დ ჯ ე ლ . ა . , პ რ ო დ ჯ ე დ . კ . - ვ ო პ რ ს ი პ რ ო გნ ო ჯ ა გ რ ე ჯ კ ა მ ე ნ ო ს ( ს ე ლ ე ვ ო ს ) პ ო ტ ო კ ო ვ . მ . : 1974 , ს . 127 - 128 .
53. ს ტ ო ქ ო ე ბ ო ს დ ა მ ა ტ ყ ვ ე ვ ე ბ ე ლ ო . – გ ა ზ ო მ ო “ს ა ქ ა რ თ ვ ე ლ ო ს რ ე ს პ ო ბ ლ ი კ ა” , № 42 (3443) , 15 თ ე ბ ე რ ვ ა ლ ი , 2000 , გ ვ . 6 .
54. S t e g e r J. L. , W o r m i n g . – Flux vector Splitting of the invscid gasdynamic equations with application to the finite-difference methods. Journal of Comput. Phys. 1981-40. pp.263-293.
55. T a k a h a s h i T. - Mechanical characteristics of debris flow. Jours. Hydraulics Div. August 1978, pp.1153-1169.
56. ტ ე ვ ჯ ა დ ჯ ე ვ . ი . , კ ო ხ ა ლ ა შ ვ ი ლ ი ო . გ . , გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი გ . ვ . – პ რ ო ტ ი ვ ო ს ე ლ ე ვ ო ე ო ო ს ტ რ ო ე რ ნ ო ს . ავტ. სვ. СССР № 1101499 , ბ ი ლ ლ . № 25 , მ . : 1984 , ს . 86 .
57. თ ე ვ ზ ა ძ ე ვ . ი . , გ ა ვ ა რ დ ა შ ვ ი ლ ი ო . გ . - ა რ ა ბ მ უ ლ ი დ ვ ა რ ც ო ფ ო უ ლ ი ნ ა კ ა დ ე ბ ი ს ო თ ვ ი ს ხ ა რ ჯ ე ბ ი ს დ ა დ გ ე ნ ა მ დ ი ნ ა რ ი ს წყ ა ლ შ ე მ კ რ ე ბ ი ა უ ზ ი ს ჰ ი დ რ ო ლ ო გ ი ო უ რ ო მ ა ხ ვ ე ნ ე ბ ლ ე - ბ ი ს გ ა თ ვ ა წ ი ნ ე ბ ი თ . ს ა ქ ა რ თ ვ ე ლ ო ს მ ე ც ნ ი ე რ ე ბ ა თ ა ა კ ა დ ე მ ი ი ს “ მ ო ა მ ბ ე ” , ტ . 148 , № 1 , თ ბ ი ლ ს ი , 1993 , გ ვ . 77 - 79 .
58. T o m p s o n D ж . M . T . – Н е у с т о й ч и в о с т и и к а т а с т р о ф ы в н а у к е и т е х н и к е . М . : , М и რ , 1985 , 254 ს . (პერ. ს ანგ ლ .)
59. უ რ უ შ ა ძ ე თ . ფ . – ს ა ქ ა რ თ ვ ე ლ ო ს ტყ ე ე ბ ი ს ნ ი ა დ ა გ ე ბ ი . თ ბ ი ლ ს ი , 1977 .
60. Ф а б р и к а н т Н . Я . - А э р о д и н а м и კ ა . ი ჯ დ . - ვ ო ნ ა ო კ ა , მ . : 1964 , 814 ს .

61. Х е р х е у л и д з е И. И.- Сквозные защитные и регулирующие сооружения из сборного железобетона на горных реках. М.: , Гидрометеиздат, 1964, 220 с.
62. Х е р х е у л и д з е Г. И.- Селевые нагрузки и способы их определения.Труды ЗакНИГМИ, вып.83(90), Л.: Гидрометеиздат, 1984, с. 77 - 111.
63. Ц е р е т е л и Э. Д. , Ц е р е т е л и Д. Д. – Геологические условия развития селей в Грузии. Мецниереба,Тбилиси, 1985, 185 с.



*გიორგი გაგარდაშვილი*

დაიბადა 1958 წლის 15 იანვარს;

1981 წელს წარჩინებით დაამთავრა საქართველოს სასოფლო-სამეურნეო

ინსტიტუტი და მიენიჭა ინჟინერ-

ჰიდროტექნიკოსის კვალიფიკაცია. იყო ლენინის სახელობის სტიპენდიატი;

- ◆ 1981-1984 წლებში საქართველოს ჰიდროტექნიკისა და მელიორაციის

სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტის დასწრებული განყოფილების ასპირანტი;

- ◆ ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტში 1987 წ. დაიცვა საკანდიდატო დისერტაცია, ხოლო 1996 წ-ს კი სადოქტორო დისერტაცია და მიენიჭა ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორის სამეცნიერო ხარისხი;
- ◆ 1992-1997 წწ. საქართველოს სახელმწიფო აგრარული უნივერსიტეტის დოცენტი;
- ◆ 1998 წელს აირჩიეს პროფესორად საქართველოს სახელმწიფო აგრარული უნივერსიტეტის ჰიდრომელიორაციისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ფაკულტეტზე;
- ◆ საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტში 1981 წ-დან მან განვლო გზა: ასპირანტი, უმცროს მეცნიერ თანამშრომელი, უფროს მეცნიერ თანამშრომელი, ხოლო 1996 წ-დან დაინიშნა ინსტიტუტში ეროზიულ-დვარცოფული პრობლემების ლაბორატორიისა და დუშეთის რაიონში სამთო-ეკოლოგიური სადგურის ხელმძღვანელად;



- ◆ 1986-1996 წწ. არჩეული იყო საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტში ახალგაზრდა მეცნიერთა საბჭოს თავმჯდომარედ;
- ◆ გარემოს დაცვის მშენებლობაში თანამედროვე პრობლემების გაცნობის მიზნით 1998 წ. სტაჟირებით იმყოფებოდა ისრაელში, ხოლო 1999 წ-ს კი ამერიკის შეერთებულ შტატებში;
- ◆ 2000 წ-ს მუშაობდა გარემოს დაცვის ექსპერტად ბაქო-სუფსის ნავთობსადენის ტრასაზე, ხოლო 2001 წ-ს კი ეროზიის ექსპერტად ბაქო-თბილისი-ჯეიჰანის ნავთობსადენისა და შაჰდენიზის(ბაქო-თბილისი-ერზრუმის) გაზსადენის ტრასაზე;
- ◆ 2001 წ. იტალიელ მეცნიერებთან ერთად მუშაობდა ტიმოთეს ღვთისმშობლის ეკლესიის გარემოს დაცვის ექსპერტად;
- ◆ გარემოს დაცვის პრობლემებზე დამუშავებული აქვს 5 პროექტი, მათ შორის ორ ნაშრომში იყო პროექტის მთავარი ინჟინერი;
- ◆ გამოქვეყნებული აქვს 85 სამეცნიერო შრომა, მათ შორის 3 მონოგრაფია ინგლისურ, ფრანგულ და ქართულ ენებზე (მონოგრაფიებს გაეცნო მსოფლიოს 45 ქვეყნის მეცნიერ-სპეციალისტები), 4 მეთოდური დამუშავება, 2 დამხმარე სახელმძღვანელო, არის 17 გამოგონების ავტორი და 25 საგაზეთო სტატიის ავტორი.
- ◆ მისი ხელმძღვანელობით დაცულია ერთი საკანდიდატო დისერტაცია;
- ◆ 1998 წლიდან გ. გავარდაშვილი შეთავსებით ლექციებს კითხულობს საქართველოს რკინიგზის ინსტიტუტში, ხოლო 2001 წ.-დან არჩეულია ამავე ინსტიტუტში კათედრის გამგედ;
- ◆ მდინარე დურუჯის პრობლემებზე მუშაობს 1981 წლიდან.

## **Givi Gvardashvili**

**Givi Gavardashvili was born on January 15, 1958.**

**He successfully graduated from Georgian State Agriculture University in 1981 and acquired the qualification of an engineer- hydraulic. He was also the holder of Lenin's scholarship.**

**In 1981-1984 he was a post-graduate student of the attending department at Georgian Research Institute of Land-reclamation and hydraulic engineering.**

**He defended a Candidate dissertation in 1987 and Doctoral dissertation in 1996, at Tbilisi State University and was awarded the degree of Doctor of Technical Science.**

**In 1992-1997 Givi Gavardashvili was an assistant professor at Georgian Agriculture University where he was elected as a Professor of the faculty of Hydro- reclamation and Engineering Ecology in 1998.**

**At the Institute of Water Management and Engineering Ecology of Georgian Academy of Science he has passed the following way: a post-graduate student, a junior scientific worker, a senior scientific worker, and in 1996 he was appointed head of the laboratory of erosion and debris-flow problems and mountain – ecological station in the region of Dusheti.**

**In 1986 – 1996 he was elected chairman of the Board (Council) of Young Scientists at the Institute of Water Management and Engineering Ecology of Georgian Academy of Sciences.**

**In order to get acquainted with modern problems of environmental protection constructions he was sent to ISRAEL in 1998 and the USA in 1999.**

**In 2000 he worked as an environmental protection expert on Baku – Supsa oil pipeline and in 2001 as an erosion expert on Baku – Tbilisi – Giehan oil pipeline and Shah – Deniz ( Baku – Tbilisi - Erzurum) gas pipeline .**

**In 2001 together with ITALIAN scientist he worked as an environmental protection expert on Timote church of Virgin Mary.**

**He has made 5 projects on the environmental protection problems and was the chief engineer of the two of these projects.**

**He has published 85 scientific works among them 3 monographs in English, French and Georgian languages ( scientists from 45 different countries of the world got acquainted with the above monographs ), 4 methodical Instruction , 2 help manuals ( text-books). He is the author of 17 inventions and 25 newspaper articles.**

**One dissertation has been defended under his guidance.**

**Since 1998 Givi Gavardashvili has been giving lectures at Georgian Railway Institute where he was elected head of the faculty in 2001.**

**He has been working on the problems of the river Duruji since 1981 .**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННО-СЕЛЕВЫХ  
ПРОЦЕССОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ.. ДУРУДЖИ  
И НОВЫЕ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ  
МЕРОПРИЯТИЯ.**

( На грузинском языке )

**А в т о р:**

**ГИВИ ВАЛЕРИАНОВИЧ ГАВАРДАШВИЛИ**

Доктор технических наук,

профессор.

---

**The Forecast of Erosion–Debris Flow Processes in  
Catchment Basin of The River Duruji and New  
Engineer- Ecological Measures .**

( In Georgian ).

After:

**GIVI GAVARDASHVILI**

Doctor of Technical Science,

Professor.

*საკონტაქტო ტელეფონები:*

796-796 ( ბინა )

299 - 471 (სამსახური)

(877) 753-216 (მობილური)

ელექტრო ფოსტა:

E-mail: [givi.gavardashvili@rambler.ru](mailto:givi.gavardashvili@rambler.ru)

---

ნაბეჭდი თაბახი 6,65; ტირაჟი 200 ეგზ.

თბილისი, დ. აღმაშენებლის 138

ფასი სახელშეკრულებო.