

ირინა კლიმიაშვილი

ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის მდგრადობის
რღვევისა და მოსალოდნელი ხარჯის პროგნოზი

დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
2016 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი, ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ირინა კლიმიაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს სახელწოდებით: „ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის მდგრადობის რღვევისა და მოსალოდნელი ხარჯის პროგნოზი“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად მის განხილვას.

2016 წელი

ხელმძღვანელი: პროფესორი ნიკოლოზ ნაცვლიშვილი

თანახელმძღვანელი: პროფესორი ირმა ინაშვილი

რეცენზენტი: პროფესორი დავით კერესელიძე

რეცენზენტი: ასოცირებული პროფესორი ზურაბ ლობჯანიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2016 წელი

ავტორი: ირინა კლიმიაშვილი

დასახელება: „ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის მდგრადობის რღვევისა და მოსალოდნელი ხარჯის პროგნოზი“

ფაკულტეტი: სამშენებლო

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალურ პირთა ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და როგორც მთლიანი ნაშრომის, ისევე მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც საჭიროებენ მხოლოდ სპეციფიკურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

ნაშრომში წარმოდგენილი თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგების კრიტიკული ანალიზის საფუძველზე ნაშრომში მიღებულია:

- ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიში დამოკიდებულებები. კვლევის შედეგებმა დაადასტურა, რომ თეორიულად და ექსპერიმენტული მასალის საფუძველზე მიღებულ K-ს მნიშვნელობებს შორის განსხვავება არ აღემატება 10%-ს.
- არასტაციონარულობის საფუძველზე მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები. მიღებული დამოკიდებულებების საფუძველზე, შესაძლებელია განისაზღვროს მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერება ღვარცოფის ტალღის გავრცელების ზონაში და შეირჩეს შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.
- ჩატარებული კვლევების საფუძველზე და ბმული ღვარცოფის რეოლოგიური ბუნებიდან გამომდინარე მიღებულია დამყარებული მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება. მიღებულ განტოლებიდან, შესაბამისი დაშვების საფუძველზე, გამოყვანილია ბმული ღვარცოფის არათანაბარი მოძრაობის სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება, რომლის სიდიდე წყლის ნაკადის სიჩქარეზე ნაკლებია და რეოლოგიური პარამეტრების გავლენით არის გამოწვეული.

Abstract

On the base of critical analysis of theoretical and experimental research presented in the work it's possible to draw the following conclusions:

- Using the degree functions, obtained the calculated dependences for determination of the debris flow mass' height in the debris flow's original site, debris flow discharge and moving velocity. The study results confirmed that the difference between values K , obtained on the basis of theoretical and experimental research, does not exceed 10%.
- On the basis of non stationarity there are received the calculated dependences of the debris flow original sites mass height, discharge and speed of movement. On the basis of the obtained equations, we can define the regularity of changes in the zone of the wave propagation, and choose the appropriate construction against debris flow.
- Description of motion conditions of debris-flow and excretion of the relevant equations is a function of many factors. Based on the carried out researches and rheological nature of debris-flow, we obtained differential equation of steady motion. Given appropriate assumptions we obtained calculated dependence of the velocity of non-uniform motion of debris-flow, which value is less then water flow velocity and caused by the influence of rheological parameters.

შინაარსი

| | |
|--|-----------|
| შესავალი | 10 |
| თავი I. ღვარცოფული მოვლენების შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა და ლიტერატურული მიმოხილვა | 16 |
| 1.1. ღვარცოფული მოვლენები და მათი კლასიფიკაცია | 16 |
| 1.1.1. ღვარცოფების წარმოქმნა და ღვარცოფული კერების კლასიფიკაცია | 19 |
| 1.1.2. ღვარცოფული ნაკადების გაჯერება მყარი მასალით და კლასიფიკაცია გრანულომეტრული შემადგენლობის მიხედვით | 25 |
| 1.1.3. ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობის მექანიზმი | 28 |
| 1.2. ღვარცოფული აუზები | 30 |
| 1.2.1 მსოფლიოს ძირითადი ღვარცოფული აუზები | 31 |
| 1.2.2. ღვარცოფული აუზები სამხრეთ კავკასიასა და საქართველოში | 41 |
| 1.3. ღვარცოფების მოძრაობის აღმწერი ძირითადი საანგარიშო დამოკიდებულებები | 51 |
| თავი II. ბმული ღვარცოფების ჩამოყალიბებისა და მოძრაობის თეორიული კვლევა | 58 |
| 2.1. ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის წონასწორობის რღვევის კვლევა და მათი საანგარიშო დამოკიდებულებებით აღწერის მეთოდების დამუშავება ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით | 58 |
| 2.2. არასტაციონარობის საფუძველზე ღვარცოფსაცავის მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერების განსაზღვრა | 67 |
| 2.3. ბმული ღვარცოფის მოძრაობის მათემატიკური მოდელი | 75 |
| 2.4. ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადის ენერჯის მახასიათებლები | 79 |
| თავი III ღვარცოფული მოვლენების მოდელირება და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების შემუშავება | 87 |

| | |
|---|-----|
| 3.1. არსებული ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების ანალიზი და შეფასება | 87 |
| 3.2. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერების გამოყენების სფერო, პროექტირება და ექსპლუატაცია | 90 |
| 3.3. მდინარე დურუჯის ღვარცოფული აუზის დახასიათება და ანალიზი | 94 |
| 3.4. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერების კომპიუტერული მოდელირება | 101 |
| ზოგადი დასკვნები | 106 |
| გამოყენებული ლიტერატურა | 108 |
| დანართი | 116 |

ცხრილების ნუსხა

| | | |
|----|---|-----|
| 1. | ღვარცოფის წარმოქმნის ძირითადი ტიპები | 21 |
| 2. | ღვარცოფული ნაკადების ტიპები | 26 |
| 3. | ღვარცოფული გამონატანის გრანულომეტრული შემადგენლობა (მ. მ. აიზენბერგისა და ვოლფცუნის მიხედვით) | 27 |
| 4. | შავი ზღვის აუზის მდინარეები | 45 |
| 5. | კასპიის ზღვის აუზის მდინარეები | 45 |
| 6. | საქართველოს ღვარცოფული რაიონები (n-ღვარცოფული აუზების რაოდენობა) | 46 |
| 7. | ღვარცოფულ აუზებში მელიორაციის ძირითადი სახეები და მათი დანიშნულება | 87 |
| 8. | ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობები | 88 |
| 9. | კალაპოტის და ბარიერის პარამეტრები | 104 |

ნახაზების ნუსხა

1. გრაფიკი დამოკიდებულება $\omega = f(H)$, როცა $\gamma = 2$ (ტ/მ³) და
1. $\varphi = 35^\circ$; 2. $\varphi = 25^\circ$; 3. $\varphi = 15^\circ$; 4. $\varphi = 5^\circ$. 65
2. გრაფიკი-დამოკიდებულება $H_{(t)} = f(t)$ და $q_{(t)} = f(t)$,
როცა $H_0 = 5\text{მ}$, $\rho = 15^\circ$ და $h_0 = 0,5\text{ მ}$. 66
3. გრაფიკი-დამოკიდებულება $V_{(t)} = f(t)$,
როცა $H_0 = 5\text{მ}$, $\rho = 15^\circ$ და $h_0 = 0,5\text{ მ}$. 67
4. $m = f\left(\varphi \frac{h_0}{H_0}\right)$ გრაფიკული დამოკიდებულება 70
5. $H_{(t)} = f(t)$ და $q_{(t)} = f(t)$ დამოკიდებულების გრაფიკები 74
6. $V_{(t)} = f(t)$ დამოკიდებულების გრაფიკი 74
7. გრაფიკული დამოკიდებულება $\frac{V}{V_6} = f\left(\frac{h_0}{h}\right)$, როცა $\varphi = 1$ 78
8. $h_{\text{კრ}} = f\left[\frac{\omega_{\text{კრ}}^3}{B_{\text{კრ}}}\left(1 - \frac{h_0}{h_{\text{კრ}}}\right)\varphi\right]$ დამოკიდებულების გრაფიკი. 83
9. VX ტიპის ბარიერი. 103
10. UX ტიპის ბარიერი. 104

შესავალი

თემის აქტუალურობა. დედამიწაზე მიმდინარე კლიმატის ცვლილებამ ადამიანთა ყურადღება მიაპყრო გარემოს მდგომარეობაზე, ვინაიდან ბუნება მყისვე რეაგირებს მიმდინარე პროცესებზე. როგორც ცნობილია, კლიმატის ცვლილების ფონზე მიმდინარე გლობალური დათბობა, უპირველეს ყოვლისა, იწვევს ყინულოვანი საფრის ინტენსიურ დნობას და შესაბამისად ისეთი სტიქიურ-დამანგრეველი პროცესების აქტივაციას, როგორც არის წყალდიდობები, ზვავები და კატასტროფული ღვარცოფები.

ღვარცოფის შესწავლის პრობლემა ძირითადად უკანასკნელ ასწლეულში წარმოიშვა მთაგორიანი რელიეფის მქონე ქვეყნებში. ბოლო 10 წლის მონაცემებით, საქართველოში ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესების ექსტრემალურ გააქტიურებას დასაშვებ ფონს ზემოთ ადგილი ჰქონდა რაჭა-ლეჩხუმში, სამეგრელოს მთისწინეთში, აჭარაში, ზემო იმერეთსა და კახეთში, მცხეთა-მთიანეთში, ნაწილობრივ ბორჯომის, ახალციხე-ასპინძის, მესტიის რაიონებში და თბილისის ტერიტორიაზე.

საქართველოს გარემოს დაცვის სამინისტროს მონაცემებით, 1995-2009 წლებში საქართველოში ფიქსირებულია ღვარცოფული მოვლენების 1494 შემთხვევა, მისგან მიყენებული მიახლოებითი ზარალი 1189 მლნ. ლარს შეადგენს. ამასთან, სამწუხაროდ დაფიქსირებულია ადამიანთა მსხვერპლიც (49 ადამიანი). აქედან გამომდინარე ეროზიულ-ღვარცოფულ მოვლენებთან ბრძოლა უმნიშველოვანეს პრობლემას წარმოადგენს.

საქართველოს კლასიკური ღვარცოფსადინარის მაგალითს მდინარე დურუჯის აუზი წარმოადგენს, რომლის ვიდეო-ვიზუალური აგეგმვა მიუთითებს, რომ ერთ ჰექტარ ფართობზე ეროზიის ინტენსივობამ განსაკუთრებულ შემთხვევებში შეიძლება 50 ტონემდე მიაღწიოს, რაც დასაშვებ ნორმაზე 25-ჯერ მეტია და იგი სატრანზიტო ადგილებში 20 მეტრიანი ღვარცოფის ტალღის გავლის მიზეზიც შეიძლება გახდეს.

დღევანდელი მონაცემებით, გარემოს დაცვითი ღონისძიებების გამოყენების დონე არის დაბალი და ადგილი აქვს წყლისა და მიწის რესურსების საკმაოდ დიდ დანაკარგს. მოსალოდნელი ანომალიების გაუთვალისწინებლად ხდება გარემოს დაცვითი ღონისძიებების პროექტირება-მშენებლობა. ექსპლუატაციაში მყოფი მათი უმრავლესობა მოძველებულია, საექსპლუატაციოდ უვარგისია, სისტემისა და გარემოს დაცვითი ღონისძიებების კონსტრუქციული მდგრადობის რესურსი სავალალო მდგომარეობაშია. ეროზიული მოვლენების შედეგად შევსებულია ღვარცოფწარმომქმნელი კერების ქვაბულების დიდი ნაწილი, მძიმე მდგომარეობაშია და რეგულირებას მოითხოვს ღვარცოფსადინართა კალაპოტები, სავალალო მდგომარეობაშია ან არ არსებობს ღვარცოფსარეგულაციო ნაგებობები.

თუ გავითვალისწინებთ იმ გარემოებას, რომ ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესები პერიოდულ ცვალებადობას (გააქტიურება და დროებითი სტაბილიზაცია) განიცდის, ამიტომ შეუძლებელია მათი საშიშროების რისკის ალბათობის შესახებ საიმედო ინფორმაციის მიწოდება პერიოდულად სიტუაციის შეფასების, მოსალოდნელი სტიქიის იდენტიფიკაციის და მათი შესაძლო გააქტიურების მიზეზ-შედეგობრივი ფაქტორების ფუნდამენტალური შესწავლის გარეშე, რომელიც საფუძვლად უნდა დაედოს რისკების საშიშროების შეფასებას, მათი სივრცობრივი საზღვრების და განვითარების დადგენას.

ღვარცოფების ჩამოყალიბება, მათი დინამიკისა და გამოტანის კონუსებზე მოძრაობის პირობების განსაკუთრებულობა, სხვა მოვლენებისაგან განსხვავებულობა, პროცესების საანგარიშო მოდელების შერჩევა-ადაპტირება, განსაკუთრებულ მიდგომებს, ცალკეული ამოცანების გადაწყვეტის საანგარიშო სქემების სწორად შერჩევას მოითხოვს.

აქედან გამომდინარე, ღვარცოფსაცავებში მიმდინარე პროცესები, მათი საანგარიშო მახასიათებლების ცვლილების პროგნოზირება, სატრანზიტო უბნებზე და გამოტანის კონუსებზე მოძრაობის პირობების

შეფასება, შესაბამისი საიმედო ღვარცოფსაწინააღმდეგო საინჟინრო ნაგებობებისა და კონსტრუქციების შესარჩევად გამოყენებული მეთოდების გაღრმავება-დაზუსტება გარემოს დაცვისა და უსაფრთხოების აქტუალურ პრობლემად რჩება.

სამუშაოს მიზანი. სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია - ღვარცოფული პროცესების კვლევა, მათი საანგარიშო მახასიათებლების დადგენა-დაზუსტება და შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების შერჩევა. კერძოდ, ღვარცოფსაცავების პარამეტრების ცვლილების კანონზომიერებებისა და ღვარცოფსადინარებში მიმდინარე პროცესებს შეფასების თეორიული მეთოდების სრულყოფა; ღვარცოფწარმომქმნელ კერებში დაგროვილი მასის დეფორმაციების, ღვარცოფსადინართა კალაპოტების დეფორმაციების გამომწვევი ფაქტორების, ნაკადის მოძრაობის პირობების ანალიზი და მათი საანგარიშო დამოკიდებულებების შემუშავება; მიღებული შედეგებისა და კომპიუტერული მოდელირების გამოყენებით დრეკადი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების საპროექტო პარამეტრების გაანგარიშება კონსტრუქციის მახასიათებლების, მასზე მოსული დატვირთვის, სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტისა და ღვარცოფული კერიდან დაძრული მასის მახასიათებლების დროსთან კავშირში გათვალისწინებით.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენდა საქართველოს მთისა და მთისწინა ზონების წყალშემკრები აუზების ღვარცოფსაცავები და ღვარცოფსადინარები, კერძოდ მდ. დურუჯის წყალშემკრები აუზი.

კვლევის პერიოდში ჩატარებული მათემატიკური, თეორიული და რიცხვითი ექსპერიმენტების დროს გამოყენებულ იქნა საინჟინრო ჰიდროლოგიაში, ჰიდრაულიკაში, გეოდეზიაში, გრუნტების მექანიკაში და

ჰოდროტექნიკურ მელიორაციაში, საყოველთაოდ აღიარებული სამეცნიერო-ტექნიკური მიდგომები და მეთოდები. ჰიდრავლიკური მოდელირება განხორციელებულ იქნა კომპიუტერული პროგრამა GIS-ისა და DEBFLOW-ის გამოყენებით.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე:

- ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის წონასწორობის რღვევის თეორიული კვლევის შედეგად დაგენილია, რომ ღვარცოფის ხარჯის, სიღრმის და სიჩქარის დროსთან კავშირი პარაბოლური ხასიათისაა და რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილებით ისინი ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავებულია. როცა ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე იზრდება, ადგილი აქვს ამ პარამეტრების სიდიდეთა მნიშვნელოვნად შემცირებას, ხოლო შინაგანი ხახუნის კუთხის ზრდით მოვლენის სურათს შებრუნებული სახე გააჩნია;
- თეორიული კვლევების შედეგად, არასტაციონალურობის საფუძველზე, მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები.
- ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით მიღებულია ღვარცოფულ კერაში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები. კვლევის შედეგებმა დაადასტურა, რომ თეორიულად და ექსპერიმენტული მასალის საფუძველზე მიღებულ K-ს მნიშვნელობებს შორის განსხვავება არ აღემატება 10%-ს.
- მიღებული დამოკიდებულებების საფუძველზე, კონკრეტული პარამეტრებისთვის, ღვარცოფის მოძრაობის დროში ცვლილების კანონზომიერება ტალღის გავრცელების ზონაში, საშუალებას იძლევა შეირჩეულ იქნას შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.

- კალაპოტის სწორკუთხა კვეთის შემთხვევაში, ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით, სრული ენერგიის ცვლილების საფუძველზე და რეალური რეოლოგიური მახასიათებლების გათვალისწინებით მიღებულია ბმული ღვარცოფის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის განტოლება; ნაკადის თანაბარი მოძრაობის რეჟიმისათვის გამოყენილია მოძრაობის სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება;
- რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილების გათვალისწინებით, დადგენილია, რომ როცა ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე ნაკადის სიღრმის ტოლია, მაშინ ღვარცოფული მასის მოძრაობას ადგილი არ აქვს, ხოლო შინაგანი ხახუნის კუთხის ცვლილებით, ანუ მისი გაზრდით, ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე მცირდება.
- დადგენილია, რომ ბმული ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირის მკვეთრი ნახტომისებრი ცვლილებები ხდება არა მხოლოდ ღვარცოფსაცავებისა და ღვარცოფის მასის მიერ წარმოქმნილი კაშხლების გარღვევის შემთხვევაში, არამედ ყოველთვის, როდესაც ნაკადი მძაფრიდან წყნარ რეჟიმში გადადის.
- დამოკიდებულებებით მიღებული შედეგებისა და კომპიუტერული პროგრამა DEBFLOW-ს გამოყენებით მდ. არაგვის ღვარცოფული ასუზისთვის გაანგარიშებულია დრეკადი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების საპროექტო პარამეტრები კონსტრუქციის მახასიათებლების, მასზე მოსული დატვირთვის, სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტისა და ღვარცოფული კერიდან დაძრული მასის მახასიათებლების დროსთან კავშირში გათვალისწინებით.

შედეგების გამოყენების სფერო. ნაშრომში შემუშავებული ცალკეული კონკრეტული ამოცანების შედეგები დიდ დახმარებას გაუწევს ღვარცოფმცოდნეობაში, გარემოს დაცვაში, საინჟინრო ეკოლოგიაში, ჰიდრაულიკაში, ჰიდროგეოლოგიაში, ჰიდროტექნიკურ მელიორაციაში, და

სხვა მომიჯნავე დარგებში მოღვაწე მეცნიერებს სამომავლო კვლევების განხორციელებაში და პრაქტიკოს ინჟინრებს ღვარცოდსაწინააღმდეგო ღონისძიებების შერჩევაში. მიღებული შედეგები საფუძვლად დაედება ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესების სარეგულაციო დამცავი ღონისძიებების საპროექტო ნორმებს და საინჟინრო ამოცანების ოპტიმალურ გადაწყვეტას.

დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, 3 თავისა და ძირითადი დასკვნებისაგან. იგი მოიცავს 138 ნაბეჭდ გვერდს, მათ შორის 10 ნახაზს და 9 ცხრილს; გამოყენებულია 84 დასახელების ლიტერატურა.

I თავი

ღვარცოფული მოვლენების შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა და ლიტერატურული მიმოხილვა

1.1. ღვარცოფული მოვლენები და მათი კლასიფიკაცია

დედამიწის ცივილიზაციის განვითარების ისტორია პირდაპირკავშირშია სტიქიურ უბედურებებთან ავარიებთან და კატასტროფებთან.

სხვადასხვა ფაქტორებითა და მოვლენებით შექმნილი საგანგებო სიტუაციები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ადამიანსა და გარემოზე, იწვევენ ადამიანთა დაზარალება-დაღუპვას და დიდ მატერიალურ ზარალს.

სტატისტიკური მონაცემებით, სტიქიური უბედურებებით, ავარიებითა და კატასტროფებით მიყენებული ზარალი დღითიდღე იზრდება, და განსაკუთრებული გამოვლინება ჰპოვა XX საუკუნის მეორე ნახევარში.

უკანასკნელ პერიოდში მიმდინარე კლიმატის ცვლილებამ კიდევ ერთხელ მიაპყრო ადამიანთა ყურადღება გარემოს მდგომარეობაზე. როგორც ცნობილია, კლიმატის ცვლილების ფონზე მიმდინარე გლობალური დათბობა, უპირველეს ყოვლისა, იწვევს ყინულოვანი საფრის ინტენსიურ დნობას და შესაბამისად ისეთი სტიქიურ-დამანგრეველი პროცესების აქტივაციას, როგორც არის წყალდიდობები, ზვავები და კატასტროფული ღვარცოფები.

კატასტროფული ღვარცოფები, განსაკუთრებით მთიან და მთისწინა რეგიონებში, ხშირად იწვევენ ქალაქებისა და სხვა ტიპის დასახლებული პუნქტების, სარკინიგზო და სამანქანო გზების, ელექტროენერჯისა და კავშირგაბმულობის გადამცემების, არხების, მილსადენების, სასოფლო-

სამეურნეო სავარგულების, სარეკრეაციო და სხვა ინფრასტრუქტურული ობიექტების მწყობრიდან გამოსვლას და ნგრევას.

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, ღვარცოფს, ანომალიათა შორის, განსაკუთრებული ადგილი უკავია და მისი გავლენის სფეროებში მოქცეული ობიექტების მწყობრიდან გამოსვლის, მიყენებული ეკონომიკური ზარალისა და ადამიანთა მსხვერპლის მიხედვით იგი საშიშროების უმაღლესი რისკის კატეგორიას შეიძლება მივაკუთვნოთ.

იმისათვის, რომ შევასუსტოთ ღვარცოფების დამანგრეველი ზემოქმედება, ან სრულად შევაჩეროთ ღვარცოფული ნაკადის მოძრაობა, აგრეთვე, დროულად გავატაროთ გამოწვეული შედეგების სალიკვიდაციო ღონისძიებები, აუცილებელია ამ ბუნებრივი მოვლენის წარმოქმნის მიზეზებისა და ხასიათის ცოდნა.

ღვარცოფული ნაკადები (ღვარცოფები) წარმოადგენენ ღვარცოფულ აუზებში უცაბედად წარმოქმნილ, დროებით მოქმედ ქვატალახიან ნაკადებს, რომლებიც სტრუქტურისა და დინამიკის მიხედვით იყოფა ბმულ (ჰიპერკონცენტრირებული, სტრუქტურული) და არაბმულ (ტურბულენტური) ღვარცოფებად.

ვ. ფ. პეროვის მიხედვით, არაბმული ღვარცოფი, მოძრაობის სტრუქტურულ-რეოლოგიური მოდელის მიხედვით, ღვარცოფული ნაკადების ორი ტიპიდან წარმოადგენს ერთ-ერთს, რომლის მყარ შედგენლობაში დომინირებს უხემ-მონატეხი მასალა, ხოლო მტვრიან-თიხნარი ფრაქციები უმნიშვნელოდ არის წარმოდგენილი. არაბმული ღვარცოფის ძირითადი თავისებურებებია:

1. წყლის ძირითადი მასა იმყოფება თავისუფალ მდგომარეობაში და წარმოადგენს ღვარცოფის მყარი შემადგენლის მატრანსპორტირებელ საშუალებას;
2. ღვარცოფული მასა წარმოდგენილია კომპონენტების მექანიკური ნარევით 1100-1600 კგ/მ³ სიმკვრივით;

3. ღვარცოფის დაგროვების შემთხვევაში ხდება მისი ნაწილობრივი დახარისხება სიმსხოს მიხედვით. ღვარცოფული მასის შედგენილობის მიხედვით არაბმული ღვარცოფი, უპირატესად, ქვაწყლიანია.

ხოლო, ბმული ღვარცოფი, მოძრაობის სტრუქტურულ-რეოლოგიური მოდელის მიხედვით განეკუთვნება ღვარცოფული ნაკადების მეორე ტიპს, რომლის მყარ შემადგენლობაში მნიშვნელოვან ნაწილს (>12%) იკავებს მტვრისებრ-თიხნარი ფრაქციები. ბმული ღვარცოფის ძირითადი თავისებურებებია:

1. თავისუფალი წყლის არსებობა პრაქტიკულად გამორიცხულია;
2. მყარი მასა და წყალი ერთობლივად, გრავიტაციულად მოძრაობს და ქმნის ერთიან ბლანტ-პლასტიკურ სხეულს 1700–2400 კგ/მ³ სიმკვრივით;
3. ღვარცოფის გამოტანის შემდეგ მასა სიმსხოს მიხედვით არ ხარისხდება. ბმული ღვარცოფული მასა შემადგენლობის მიხედვით არის ტალახიანი და ქვატალახიანი [1].

ღვარცოფების მოძრაობის რეჟიმის მნიშვნელოვან თვისებას, ხარისხობრივი განსხვავებულობის შემდეგ, მისი ტალღური ან პულსაციური ხასიათი წარმოადგენს. ღვარცოფული ნაკადი, ჰიდრომექანიკური თვალსაზრისით, შეიძლება განხილულ იქნას როგორც ერთჯერადი ან მრავალჯერადი ტალღა, რომელიც პირობითად მშრალ კალაპოტში მოძრაობს.

ღვარცოფული ტალღები ახასიათებთ ტალახიან და ქვატალახიან ბმულ ღვარცოფებს. ღვარცოფის მოძრაობის დროს ტალღების რაოდენობა მერყეობს 1-დან 100-200-მდე. ტალღებს შორის ინტერვალი უმრავლეს შემთხვევაში 2-3-დან 20-30 წუთამდე მერყეობს. ტალღის შუბლის სიმაღლე 0,5-1,5-დან 11-12 მეტრამდეა და იგი 1,5 ჯერ აღემატება ღვარცოფის ტანის სიმაღლეს. ტალღის შუბლის ფორმირებაში ძირითადად მსხვილი მონატეხი მონაწილეობს.

აღსანიშნავია, რომ ღვარცოფების მოძრაობის კლასიფიკაციის ჩამოყალიბებაზე, მრავალი მეცნიერი მუშაობდა, რომელთა შორის აღსანიშნავია: მ. მ. აიზენბერგი [2], ა. ნ. ოლიფეროვი [2], კ. რ. ბეგიშვილი [3, 4], ი. ბ. ვინოგრადოვი [5], მ. ს. გაგოშიძე [6], ი. ვ. ეგიაზაროვი [7], ბ. ნ. ივანოვი [8], ვ.ფ. პეროვი [9], ს. მ. ფლეიშმანი [10, 11], ა. ი. შეკო [12, 13] და სხვ.

დღეისათვის შემუშავებულია ღვარცოფების კლასიფიკაცია შემდეგი კრიტერიუმებით: მოძრაობის რეჟიმის მიხედვით, გამოტანილი მყარი მასის ანუ სიმძლავრის მიხედვით, ნაგებობებზე მათი ზემოქმედების სიმძლავრის ხასიათით; ღვარცოფული აუზების კლასიფიკაცია: მორფოლოგიური სხვაობის მიხედვით, მათი სათავის სიმაღლის მიხედვით, ღვარცოფების განმეორადობის მიხედვით, რომელიც ხასიათდება ღვარცოფების წარმოქმნის ინტენსივობით ან ღვარცოფაქტივობით და ა.შ.

აღსანიშნავია, რომ სხვადასხვა ავტორების განსხვავებული მოსაზრებების გამო დღემდე არ არის ჩამოყალიბებული ერთიანად მიღებული სტანდარტები, რომელთა მიხედვითაც შესაძლებელია ზუსტად იყოს გამოიჯნული ღვარცოფების წარმოქმნა-ჩამოყალიბების, შედგენილობის, მათი მოძრაობის, კერებისა და ა.შ. კლასიფიკაცია.

1.1.1. ღვარცოფების წარმოქმნა და ღვარცოფული კერების კლასიფიკაცია

როგორც ცნობილია, ღვარცოფული ნაკადების წარმოქმნის პროცესი მრავალფეროვანია და ერთის მხრივ დამოკიდებულია ღვარცოფების მრავალფაქტორულ ბუნებასა, ხოლო მეორეს მხრივ, ნაკადის შემადგენლობაზე. მოძრაობის დაწყების ინიცირება შეიძლება მოხდეს ნაკადის როგორც თხიერი, აგრეთვე მყარი შემადგენლის მიერ.

გამომდინარე აქედან, ღვარცოფული ნაკადების გამომწვევი პირობების სისტემატიზაციის, მოძრაობის პირობების მოდელირებისა და მახასიათებლების გაანგარიშებისთვის აუცილებელია ღვარცოფების წარმოქმნის ტიპიზაცია.

ა. ი. შეკოს მიერ, მყარი ფაზის ძვრის დაწყების ხასიათის მიხედვით, გამოყოფილია ღვარცოფების წარმოქმნის ორი ტიპი: ეროზიული და მეწყერული. ეროზიულის შემთხვევაში, მყარი ნაწილაკების დაძვრა და გადაადგილება ხორციელდება წყლის ან სუსპენზიის მეშვეობით, ხოლო მეწყერულის შემთხვევაში კი, წარმოებს ფხვიერ-მონატეხი მასის დაძვრა მეწყერული ნაკადის სახით, რის შემდგომ ხდება მისი სტრუქტურის რღვევა და ღვარცოფულ ნაკადად გარდაქმნა. აღნიშნული ტიპოლოგია განკუთვნილია საინჟინრო გეოლოგიაში გამოსაყენებლად [14].

ი. ბ. ვინოგრადოვის მიხედვით გამიჯნულია ღვარცოფული პროცესების სამი ტიპი: მატრანსპორტირებელი, დამძვრელი, და გარდამავალი ანუ მატრანსპორტირებელ-დამძვრელი. აღნიშნულ შემთხვევაში ღვარცოფული პროცესი მოიცავს როგორც ღვარცოფის წარმოქმნას, აგრეთვე მის მოძრაობას. აღნიშნული ტიპების მიხედვით ხორციელდება ღვარცოფული ნაკადების მოდელირება და გაანგარიშება [15].

ი. ა. ბოიარსკისა და ვ. ფ. პეროვის მიერ შემოთავაზებულ იქნა ღვარცოფების წარმოქმნის ტიპიზაციისათვის გამოყენებულ იქნას ღვარცოფის ძირითადი მახასიათებლები - ღვარცოფული ნაკადის მაღალი გაჯერება მონატეხი მასალით და მისი მოძრაობის ტალღური ხასიათი. ავტორების მიერ გამოყოფილია ღვარცოფის წარმოქმნის სამი ძირითადი ტიპი: ეროზიული, გამრღვევი და ზვავ-მეწყერული (ცხრილი 1.1.) [16].

უმეტეს შემთხვევაში, როდესაც ადგილი აქვს ღვარცოფის წარმოქმნის ეროზიულ ტიპს, ღვარცოფულ მასას გააჩნია მცირე მოცულობითი წონა და შესაბამისად ტრანზიტულ ზონაში ნაკადის მოძრაობა კონტროლირდება კალაპოტით. ამ შემთხვევაში გამორეცხვის

სიჩქარე და ნაკადის გაჯერება მონატეხი მასალით დამოკიდებულია ქანების გრანულომეტრიულ შედგენილობასა და ნაკადის სიჩქარეზე.

ღვარცოფის წარმოქმნის ძირითადი ტიპები

ცხრილი 1.1.

| ტიპი | საწყისი პროცესები (მოვლენები) | წარმოქმნის პროცესის ეტაპები | ტრანზიტულ ზონაში ნაკადისა და კალაპოტის ურთიერთქმედების ხასიათი |
|-----------------------|---|---|--|
| ეროზიული | თავსხმა წვიმების შედეგად წარმოქმნილი ინტენსიური ზედაპირული ჩამონადენი და წყალმოვარდნა | სიბრტყითი და ფერდობების ჩამორეცხვა → წყლის ნაკადის ხარჯისა და გაჯერების გაზრდა; → მოწყვეტა; → ღვარცოფული ტალღა. | ნაკადის მოძრაობა კონტროლირდება კალაპოტით |
| გამრღვევი | კაშხლების, ტბებისა და წყალსაცავების გარღვევა | წყლის ტალღა; → კაშხლისა და კალაპოტის გამორეცხვა და ნაკადის გაჯერების გაზრდა; → ღვარცოფული ტალღა. | კალაპოტის დამუშავება ხარჯის, ჩვეულებრივთან შედარებით მნიშვნელოვნად აღმატების შედეგად |
| ზვავ-მეწყერული | წყალგაჯერებული მთის ქანების ან თოვლისა და ყინულის მასივების მოწყვეტა | ღვარცოფული ტალღა მასივის გაწყლოვანება და სტრუქტურული კავშირების შესუსტება; → მოწყვეტა სტრუქტურის რღვევით და დინება; → ღვარცოფული ტალღა. | დამახასიათებელია ნაკადის გაშლა (დიდი სიგანე) კალაპოტის უმნიშვნელო დეფორმაციის დროს |

ღვარცოფის წარმოქმნის გამრღვევი ტიპის შემთხვევაში ადგილი აქვს ბუნებრივი ტბებისა და წყალსაცავების გარღვევას. გამრღვევი ტიპის ღვარცოფების წარმოქმნის საწინდარს ექსტრემალური ატმოსფერული ნალექები და მიწისძვრები წარმოადგენენ. წყალსაცავის სწრაფი დაცლა წარმოშობს წყლის ტალრას რომელის ზემოქმედებიდაც ხდება ნატეხი მასალის ტრანსპორტირება და ღვარცოფული ნაკადის ჩამოყალიბება. მორენული ან მეწყერული მასალის კაშხლები, ხშირად, ღვარცოფულ ნაკადს წარმოქმნიან, ხოლო ყინულის კაშხლები კი, წყალმოვარდნებს [17].

ღვარცოფის წარმოქმნის ზვავ-მეწყერული ტიპი დაკავშირებულია ფერდობებზე ან მნიშვნელოვანი ქანობის მქონე წყალსადინარის კალაპოტში მთის ქანების მასივის მდგრადობის შესუსტებასთან. მასივის გაწყლოვანების დროს დგება მომენტი, როდესაც ძვრის ძალბი აღემატება წინაღობის ძალებს. მასის მოწყვეტისა და დაძრის დროს ხდება ქანის სტრუქტურის რღვევა და მისი სიბლანტის შემცირება, რის შედეგადაც მეწყერული მოძრაობა (დაურღვევი სტრუქტურის ბირთვით) გადადის ღვარცოფულში (ბლანტკლასტიკურში). ღვარცოფის წარმოქმნის ზვავ-მეწყერული ტიპის შემთხვევაში დამახასიათებელია ნაკადის გამლა (დიდი სიგანე) კალაპოტის უმნიშვნელო დეფორმაციის პირობებში [18].

აღსანიშნავია, რომ ღვარცოფების წარმოქმნის შემოთავაზებული რანჟირება მოიცავს პროცესის თითქმის ყველა ტიპს, თუმცაღა არასრულად.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე აუცილებელია ორი ცნების, „ღვარცოფის წარმოქმნა“ და „ღვარცოფის ფორმირება“, გამიჯვნა. როგორც წესი, ღვარცოფული აუზის სათავეში (ღვარცოფულ კერაში) წარმოქმნილი ღვარცოფი აგრძელებს ფორმირებას ტრანზიტულ ზონაში. გარდა ამისა, ღვარცოფული კერიდან გამოყოფილ უნდა იქნას ე.წ. ღვარცოფების მყარი შემადგენლით მკვებავი კერა, რომელშიც იგულისხმება ის მთის ქანების მასივი, რომელიც შეიძლება ჩართული იქნას ღვარცოფულ ნაკადში, და რომლის მეშვეობითაც ხდება ღვარცოფის მყარი შემადგენლის მოცულობის გაზრდა.

ღვარცოფული კერის კვლევის პირველ ეტაპზე ღვარცოფულ კერებს უკავშირებდნენ რელიეფის ელემენტარულ ფორმებს და ხშირად არ ანსხვავებდნენ ღვარცოფულ კერას და ღვარცოფების მყარი შემადგენლით მკვებავი კერას.

მ. ს. გაგოშიძემ გამოყო შემდეგი ღვარცოფული კერები [19]:

1. ღვარცოფული კერები, რომლებიც ხდება ნაშალი მთის ქანების დაგროვება და ღვარცოფების წარმოქმნა;
2. ე.წ. მარტივი კერები, რომლებიც ამდიდრებენ ღვარცოფს წინამორბედი ღვარცოფების ან წყალმოვარდნების მიერ გამოტანილი მონატეხი მასალით.

პირველი შემთხვევა წარმოადგენს ღვარცოფულ კერას, ხოლო მეორე - ღვარცოფების მყარი შემადგენლით მკვებავ კერას.

საქართველოში ჩატარებული კვლევების საფუძველზე მან გამოყო ღვარცოფული კერების შემდეგი ტიპები:

1. ეროზიული ღრანტები;
2. მორენული დანალექი;
3. ციცაბო ფერდობების მოშიშვლებული ზედაპირი;
4. ჩახერგილი კალაპოტები და ტბები.

ა. ი. შეკოს კლასიფიკაციის მიხედვით, გამოყოფილია ღვარცოფების წარმოქმნილი ოთხი ტიპის კერა [14]:

1. კერები, რომლებიც კავშირშია მცირე და დროებით წყალსადინარებში დაგროვილ მასალასთან;
2. კერები, რომლებიც კავშირშია მდინარეების ჩახერგვასთან;
3. კერები, რომლებიც კავშირშია თანამედროვე მყინვარების გააქტიურებასთან;
4. კერები, რომლებიც კავშირშია ვულკანების გააქტიურებასთან.

აღნიშნულ შემთხვევაში, საქმე გვაქვს არა იმდენად ღვარცოფის წარმოქმნის კერების კლასიფიკაციასთან, რამდენადაც ღვარცოფების წარმოქმნისა და ფორმირების პროცესების ტიპიზაციის მცდელობასთან.

ი.ი. ხერხეულიძე ღვარცოფულ კერებს მიაკუთვნის: მოშიშვლებულ მეწყერულ უბნებს, ხეობების ფსკერზე დაგროვილ ქვათაცვენის უბნებს, დაშლილ ქანებს ფერდობებსა და ტერასებზე და აგრეთვე, ალუვიურ კალაპოტურ დანალექს. იგი აღნიშნავს, რომ, ღვარცოფული და მყარი შემადგენლით მკვებავი კერების სართო ფართობი შეადგენს აუზის სართო ფართობის 1-4%-ს. გაანგარიშებებისთვის ავტორი ღვარცოფულ აუზებს ეროზიულობის მიხედვით 5 ტიპად ყოფს [20].

ღვარცოფების გაანგარიშებისა და მოდელირებისათვის ღვარცოფული კერების ტიპოლოგიის სხვა მიდგომა წარმოდგენილია ნაშრომში „ღვარცოფული ნაკადების შესწავლის სახელმძღვანელო“. ტიპოლოგია მოიცავს ღვარცოფწარმოქმნის კერების ორ ტიპს: ლოკალურს და გამლილს. ლოკალური ტიპის შემთხვევაში კერა წარმოდგენილია როგორც ინდივიდუალური ობიექტი, ხოლო გამლილის შემთხვევაში, როგორც ფართობი, რომლის საზღვრებში მოქცეულია მრავალი ლოკალური მიკროკერა. ლოკალური კერების ჯგუფი მოიცავს: ღვარცოფულ ღრანტეებს, ღვარცოფულ ორმოებსა და კლდის ღვარცოფულ კორიდორებს [21].

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, ღვარცოფულ კერებს უნდა მივაკუთვნოთ ღვარცოფული აუზის ის მონაკვეთები, როლის ფარგლებშიც ხდება ღვარცოფის წარმოქმნა. ჩვეულებრივ, ისინი განთავსებულია ღვარცოფსადინარის სათავეში, თუმცადა შესაძლებელია მათი ლოკალიზაცია ღვარცოფსადინარების შუა და ქვედა მონაკვეთებზეც კი.

ღვარცოფების მყარი შემადგენლით მკვებავ კერებს მიეკუთვნება ღვარცოფული აუზის მონაკვეთები წარმოქმნისა და ტრანზიტის ზონებში, სადაც განთავსებულია ისეთი მთის მასივები, რომლებიც მიდრეკილნი არიან წყლის ზემოქმედებით ძვრისა და გადარეცხვის მიმართ და შესაძლებელია მათი ჩართვა ღვარცოფულ ნაკადში.

განხილული ღვარცოფული კერებისა და ღვარცოფების მყარი შემადგენლით მკვებავი კერების ბუნების მიხედვით ხდება ღვარცოფული ნაკადების გაჯერება მყარი მასალით და მისი გრანულომეტრული

შემაღენლობის ჩამოყალიბება. აღნიშნული მახასიათებლები ფართოდ გამოიყენება ნაკადების გასაანგარიშებლად, მოდელირებისათვის და შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიები შესამუშავებლად.

1.1.2. ღვარცოფული ნაკადების გაჯერება მყარი მასალით და კლასიფიკაცია გრანულომეტრული შემაღენლობის მიხედვით

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ღვარცოფის კიდევ ერთ მნიშვნელოვან თვისებას წარმოადგენს ნაკადის გაჯერება მყარი მასალით.

ღვარცოფულ მასაში მთის ქანების ნატეხების მოცულობა 10-დან 75%-მდეა. ღვარცოფულ ნაკადს გააჩნია აგრეთვე დიდი სიმკვრივე 1,2-დან 2,0 გრ/სმ³-მდე და ზოგიერთ შემთხვევაში უფრო მეტიც. ასეთი „მძიმე“ ნაკადი უფრო ძლიერად მოქმედებს მდინარის კალაპოტზე და ანგრევს გზაზე შემხვედრ წინააღმდეგობებს [22].

ღვარცოფების კლასიფიკაცია გამოტანილი მყარი მასის ანუ სიმძლავრის მიხედვით შეიძლება შემდეგნაირად იქნას ჩამოყალიბებული:

- მძლავრი ღვარცოფები გამოაქვთ 100 ათსი მ³ მყარი მასა;
- საშუალო სიმძლავრის ღვარცოფები - გამოაქვთ 10-დან 100 ათასამდე მ³ მყარი მასა;
- მცირე სიმძლავრის ღვარცოფები - გამოაქვთ არაუმეტეს 10 ათასი მ³ მყარი მასა;

გენეზისის მიუხედავად ღვარცოფული ნაკადები იყოფა სამ ტიპად: ტალახიანი, ქვატალახიანი და ნატანწყლიანი (ცხრილი 1.2.) [24].

სხვადასხვა წარმოშობის ნატანწყლიანი ნაკადების სიმკვრივე მერყეობს 1300-1600 კგ/მ³-ის ფარგლებში. მათ მიერ ტრანსპორტირებულ ნატანში ჭარბობს 0,1 მეტრამდე ზომის მქონე ნაწილაკები, ხოლო ყველაზე მსხვილი ფრაქციების ზომები 0,2-0,3 მეტრს აღწევს. ღვარცოფულ ნარევი წყლის შემცველობა 70-80%-ია.

ღვარცოფული ნაკადების ტიპები

ცხრილი 1.2.

| მყარი მასის მოცულობის ფარდობა ნარევის საერთო მოცულობასთან | ღვარცოფული ნაკადების კლასიფიკაცია მთის ქანების მონატეხების ზომების მიხედვით (მყარი შემადგენლის საერთო მოცულობის 50%-ზე მეტის შემთხვევაში) | |
|---|---|-----------------|
| | 1 მმ-ზე მეტი | 1 მმ-ზე ნაკლები |
| 0,5-ზე მეტი | ქვატალახიანი | ტალახიანი |
| 0,5-ზე ნაკლები | ნატანწყლიანი | |

ტალახიან ნაკადებში ღვარცოფული მასის გრანულომეტრული შემადგენლობა ისეთივე ფრაქციებით არის წარმოდგენილი, როგორც ნატანწყლიანს ახასიათებს, მაგრამ მასში მტვრისა და თიხის ნაწილაკები ჭარბობს, ხოლო წყლის შემცველობა 40-50%-ს არ აჭარბებს. ასეთი ნაკადების სიმკვრივე 2000 კგ/მ³-ს აღწევს.

ქვატალახიანი ნაკადები ხასიათდებიან გრანულომეტრული შემადგენლობის ფართო დიაპაზონით, რომელშიც ყველაზე მსხვილი ფრაქციები 0,5-0,6 მეტრი ზომის ქვებით არის წარმოდგენილი. ღვარცოფულ მასაში ცალკეული ლოდები შეიძლება 2-3 მეტრს აღწევდეს. ქვატალახიანი ღვარცოფული ნაკადის სიმკვრივე 2000-2300 კგ/მ³-ს შეადგენს, ხოლო ცალკეულ შემთხვევებში შეიძლება 2400 კგ/მ³-ს აღწევდეს. ასეთი ტიპის ღვარცოფულ ნაკადებში წყალი ბმულ მდგომარეობაშია და 30-40%-ს არ აჭარბებს [25].

ვ. ნ. ვარდუგინის სპეციალურად ჩატარებული კვლევების მიხედვით, ღვარცოფული ნარევის გრანულომეტრული შემადგენლობა არ არის მიდმივი მისი წარმოქმნის კერიდან გამოტანის კონუსამდე. მიმდინარე ცვლილებები ხარისხობრივად განსხვავებულია ღვარცოფების ორი ძირითადი ტიპისთვის - ქვატალახიანისთვის (მაღალი სიმკვრივის მქონე) და ნატანწყლიანისთვის (დაბალი სიმკვრივის).

ქვატალახიანი ღვარცოფების გამონატანში მტვრიან-თიხნარი ფრაქციების (< 0,05 მმ) შემადგენლობა 1,6-2,4-ჯერ იზრდება ღვარცოფულ კერებთან შედარებით, რაც განპირობებულია მცირე ნაწილაკების დაშლით

მსხვილი ნაწილაკების ზემოქმედებითა და ნაკადის ტურბულენტური რეჟიმის ზეგავლენით. შესაბამისად, რაც უფრო ტურბულენტურია ნაკადი და გრძელია ნაკადის სატრანზიტო უბანი, მით მეტია წვრილმარცვლოვანი ნაწილაკების პროცენტული შემადგენლობა.

ნატანწყლიან ნაკადებში, ქვატალახიანთან შედარებით, გამოტანის კონუსზე მტვრიან-თიხნარი ნაწილაკების შემადგენლობა მცირდება ღვარცოფულ კერებთან შედარებით. აღნიშნული განპირობებულია წყლის ნაკადის ზემოქმედების შედეგად წვრილმარცვლოვანი ნაწილაკების შეტივნარებულ მდგომარეობაში გამოტანით, რაც თავის მხრივ იწვევს ნაწილაკების სიმსხოს მიხედვით დახარისხებას და დალექვას გამოტანის კონუსზე [26].

ღვარცოფული გამონატანის გრანულომეტრული შემადგენლობა მეტად მრავალფეროვანია: ერთ შემთხვევაში ჭარბობს ლოდ-კენჭოვანი ფრაქციები, ხოლო მეორეში კი მტვრიან-თიხნარი. თუმცადა უმრავლეს შემთხვევაში ისინი ხასიათდებიან როგორც მსხვილმონატეხი გრუნტები.

ღვარცოფული გამონატანის გრანულომეტრული შემადგენლობა სხვადასხვა ტიპის ღვარცოფებში მოცემულია ცხრილში 1.3 [27].

ღვარცოფული გამონატანის გრანულომეტრული შემადგენლობა
(მ. მ. აიზენბერგისა და ვოლფცუნის მიხედვით)

ცხრილი 1.3.

| ღვარცოფების ჯგუფები შემადგენლობის მიხედვით | ფრაქციების ჯგუფები, % | | | | |
|---|-----------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------|
| | ლოდები >100 მმ | კენჭები 10-100 მმ | ხრეში 1,0-10 მმ | ქვიშა 0,1-1,0 მმ | ალევიტი, პელიტი <0,1 მმ |
| ქვაწყლიანი | 22 | 51 | 17 | 5 | 5 |
| ქვატალახიანი | 9 | 41 | 28 | 13 | 9 |
| ტალახიანი | 2 | 31 | 27 | 13 | 27 |

ღვარცოფული ნაკადების გრანულომეტრიული შედეგენილობის ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია დავასკვნათ, რომ ღვარცოფების

მყარი მასის შედგენილობა გავლენას ახდენს ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობის მექანიზმზე.

1.1.3. ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობის მექანიზმი

როგორც ცნობილია, ფორმირების, ნატანდატვირთულობისა და ფრაქციული შემადგენლობის მიხედვით ღვარცოფული ნაკადები იყოფა ორ დინამიკურ კატეგორიად - არაბმული (ტურბულენტური) და ბმული (ჰიპერკონცენტრირებული, სტრუქტურული).

არაბმული (ტურბულენტური) ღვარცოფული ნაკადები, რომლის ნატანი წარმოდგენილია წყალში გრუნტის სუსპენზიის სახით, ექვემდებარებიან ჰიდრომექანიკის საერთო კანონებს: მთის აუზების კალაპოტებში მყარი ნაწილაკების ტრანსპორტირება ხორციელდება ტურბულენტური აღრევისა და ჰიდროდინამიკური წნევის ზემოქმედებით.

არაბმულ ღვარცოფულ ნაკადში წყლის ხარჯი შედარებით მუდმივია, ხოლო მყარი შემადგენლის რაოდენობა იცვლება და დამოკიდებულია კალაპოტის ქანობზე, მოხვეულობაზე, მისი ცოცხალი კვეთის გაფართოება-შევიწროებაზე. გამომდინარე აქედან, ხდება მყარი ნატანის ჩამორეცხვა-გადატანა ან დალექვა. გამოტანის კონუსებზე ხება მყარი ნატანის ერთგვარი დახარისხება სიმსხოს მიხედვით.

ბმული (სტრუქტურული) ღვარცოფული ნაკადები არ ხასიათდებიან ტურბულენტური აღრევით, რაც განპირობებულია ნაკადის წვრილმარცვლოვანი ფრაქციებით გაჯერებით და წყლის ბმულობით. ამ შემთხვევაში წყალი არ წარმოადგენს მატრანსპორტირებელ გარემოს და აქტიური როლი თვით ნაკადს ენიჭება, რომელსაც თავისი სიბლანტის გამო შეუძლია შეტივნარებულ მდგომარეობაში არა მხოლოდ კენჭისა და ქვის, არამედ 10 ტონიანი ლოდების ტრანსპორტირებაც კი.

ღვარცოფული ნაკადის ფორმირება, ზოგადად, შემდეგნაირად ხდება: მთის ქანების დაშლის მასალა გარდაიქმნება წვრილდისპერსიულ

თიხის ფრაქციებად; ასეთი მასების დასველების დროს შინაგანი ხახუნის კუთხე მცირდება და მასა იწყებს დაცურებას. მოძრავი მასის სტრუქტურული კავშირები ირღვევა რის შედეგადაც იზრდება დენადობა.

როგორც კი ნაკადი მიაღწევს კალაპოტს, მასა ფორმირდება და იწყებს მოძრაობას კალაპოტური (ტალახიან ან ქვატალახიან მასის) ნაკადის სახით. ღვარცოფული ნაკადი გაჩერებისას ქვავდება ლავისებურად, მყარი შემადგენლის სიმსხოს მიხედვით დახარაისხების გარეშე [28].

ღვარცოფული ნაკადების წარმოქმნისთვის დიდი ქანობების გარდა საჭიროა ორი ფაქტორი: აუზის ფერდობებზე ფხვიერმონატები მასალის არსებობა და ინტენსიური ზედაპირული ჩამონადენი.

ღვარცოფული ნაკადები ძირითადად წარმოიქმნება თავსხმა წვიმების შემდეგ და ხასიათდებიან წარმოქმნის უცაბედობით და მცირე ხანგრძლივობით, თუმცა მცირე სიმძლავრის სტრუქტურული ღვარცოფული ნაკადების წარმოქმნა შესაძლებელია ატმოსფერული ნალექების მოსვლის გარეშეც ეროზიულ ღრანტებში მყარი მასის ჩამომეწყრის ან მიწისძვრის შედეგად [19].

სატრანზიტო უბნებზე ღვარცოფული პროცესები განსაკუთრებული ბუნებით ხასიათდება. იმ შემთხვევაში, როდესაც სატრანზიტო უბნის ქანობი ღვარცოფის ძვრის ზედაპირის გასაშუალებელი ქანობის მნიშვნელობის ტოლი ან მასზე ნაკლებია, ნაკადი წყვეტს მოძრაობას [22].

ბმული ღვარცოფები სატრანზიტო უბნის მცირე ქანობის მქონე მონაკვეთებზე მოძრაობას წყვეტს შექმნილი ფორმის დაურღვევლად. პროფ. მ. გაგოშიძის მიერ მოყვანილი მაგალითით, სიღმით 3,5 და სიგანით 35 მ ღვარცოფი ხევიდან გამოსვლის მომენტში 100-150 მ სიგანის ჭალაში 13 კმ მანძილზე სტრუქტურის დაურღვევლად განაგრძობდა მოძრაობას. მოყვანილ მაგალითში ნაკადის მდგომარეობასა და მოძრაობის შეწყვეტის მომენტს დამრტყმელი (სიმძიმის ძალა) და წინააღმდეგობების ძალების განსაზღვრული მნიშვნელობები შეესაბამებოდა [19].

ვინაიდან ნაკადის სატრანზიტო უბნის ცალკეულ მონაკვეთზე ხდება მორფომეტრული მახასიათებლების ისეთი ცვლილებები, რომლებიც ხშირად არ ექვემდებარება შეფასებას, ღვარცოფთა ჰიდრაულიკის ამოცანების ანალიზური გადაწყვეტა თანამედროვე პირობებში არ კარგავს აქტუალობას და მრავალი მეცნიერის კვლევის ობიექტს წარმოადგენს.

ღვარცოფული მოვლენების ბუნებიდან გამომდინარე, ისინი გვხვდება მსოფლიოს ყველა მთათა სისტემებზე (ანტარქტიდის გარდა). განსაკუთრებით აღსანიშნავია ალპებზე, ცენტრალურ აზიაში, ჰიმალაიზე, ანდებში და კავკასიონზე განლაგებული ღვარცოფული აუზები, რომლებიც დიდი სიმძლავრითა და დამანგრეველი ძალით გამოირჩევიან.

1.2. ღვარცოფული აუზები

მოსახლეობის მდგრადი განვითარების კონტექსტში სტიქიური მოვლენებით გამოწვეული ზარალი მსოფლო მასშტაბის პრობლემას წარმოადგენს. ბუნებრივი კატასტროფების მსოფლიო კონფერენციის მონაცემების მიხედვით, დიდი ეკონომიკური ზარალის (რაც წარმოადგენს ქვეყნის მთლიანი შიდა პროდუქტის (მშპ) 1 % და მეტს) გამომწვევი კატასტროფების რაოდენობა 1962-1992 წლებში მსოფლიოს მასშტაბით გაიზარდა 4,1-ჯერ, დაზარალებულთა რაოდენობა 3,5-ჯერ, ხოლო დაღუპულთა 2,1-ჯერ [29].

ადამიანთა სიცოცხლისთვის და ინფრასტრუქტურული ობიექტებისთვის ღვარცოფები საშიშროებას წარმოადგენენ რამდენიმე მიზეზის გამო:

- ღვარცოფები, მათი ბუნებიდან გამომდინარე, რთულად პროგნოზირებადი მოვლენებია და შესაბამისად, ახასიათებთ უცაბედი წარმოქმნა, ამასთან არაიშვიათია ღვარცოფული ნაკადების ღამის პერიოდში გავლა;
- ნაკადებს გააჩნიათ მნიშვნელოვანი სიჩქარე და სიღრმე;

- აღსანიშნავია მათი დარტყმითი ზემოქმედება, რაც იწვევს შენობების, ხიდებისა და ნაგებობების ნგრევას;
- კალაპოტის სიღრმითი და გვერითი ეროზია, რის შედეგადაც ხდება ნაპირზე განლაგებული საავტომობილო და სარკინიგზო გზების, ხიდებისა და ბაგებობების ნგრევა;
- ნატანის დაღეჟვა აკუმულაციის ზონაში რომელიც შეიძლება წარმოდგენილ იყოს გზების, დასახლებული პუნქტების, სასოფლო-სამეურნეო სავარგულების და ა.შ. სახით.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, კატასტროფული ღვარცოფების ძლიერ ზეგავლენას, მსოფლო მასშტაბით, პერიოდულად განიცდის მრავალი დასახლებული პუნქტი, სასოფლო-სამეურნეო სავარგულები, გზები, ნავთობ და გაზსადენების ტრასები, ჰიდროტექნიკურ-სამელიორაციო ობიექტები, სამთო-ტურისტული კომპლექსები და სხვ. სტიქიის საშიშროების არეალში მოქცეულია მთისა და მთისწინა რეგიონებში განთავსებული დასახლებული პუნქტები, სადაც გეოეკოლოგიური სიტუაცია გართულებულია. ღვარცოფებული ნაკადების ზემოქმედებით გამოწვეული უარყოფითი სოციალურ-ეკონომიკური, დემოგრაფიული და ეკოლოგიური შედეგები მოიცავენ ადამიანის საქმიანობის ყველა სფეროს.

1.2.1. მსოფლიოს ძირითადი ღვარცოფული აუზები

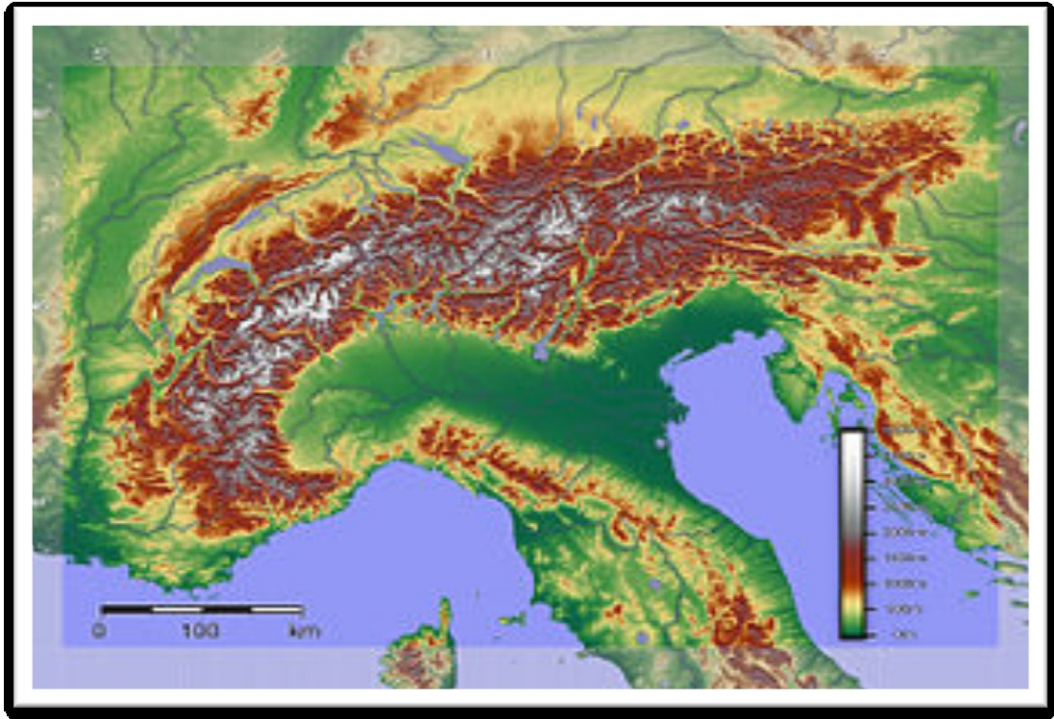
ღვარცოფსაშიშ რეგიონებს შორის ევროპაში აღსანიშნავია ალპური ზონის ღვარცოფული აუზები, სადაც ღვარცოფწარმოქმნისთვის შექმნილია ყველა ხელსაყრელი ბუნებრივი პირობა. კერძოდ, მაღალმთიანი რელიეფი, მნიშვნელოვანი თანამედროვე მყინვარის საფარი, უხვი ატმოსფერული ნალექები, თოვლის დნობა და ტერიტორიის ათვისებით გამოწვეული ლანდშაფტების ცვლილება.

ალპები წარმოადგენს ევროპის ყველაზე ექსტენსიურ და მაღალ მთათა სისტემას, რომლის სიგანე 260 კილომეტრს აღწევს, ხოლო სიგრძით გადაჭიმულია 1200 კილომეტრზე (რკალის შედა მხრიდან დაახლოებით 750 კმ.) ცხრა ქვეყნის ტერიტორიაზე (ავსტრია, საფრანგეთი, გერმანია, იტალია, ლიხტენშტეინი, მონაკო, სლოვენია და შვეიცარია) [30].

ალპების მთათა სისტემაში გაერთიანებულია 100 მწვერვალი, რომელთა სიმაღლეც 4000 მეტრს აღემატება. უმაღლესი წერტილის სიმაღლეა ზღვის დონიდან 4808 მეტრი.

ალპების სხვადასხვა რეგიონის კლიმატი დამოკიდებულია განლაგების სიმაღლესა და მდებარეობაზე, აგრეთვე ქარის მიმართულებაზე. ზაფხულის პერიოდში ალპებში ცხელი დღეებია, ხოლო ღამეები კი ცივია. ზამთარი გამოირჩევა ხშირი ატმოსფერული ნალექებით უხვი თოვლის სახით და ცივი ტემპერატურის ხანგრძლივი პერიოდით. ალპების ჩრდილოეთ მხარეს კლიმატი შედარებით ცივი და ტენიანია, ხოლო სამხრეთის - თბილი და მშრალი. ივლისის საშუალო ტემპერატურა $+14^{\circ}\text{C}$ -ზე ნაკლებია, იანვარის -15°C -მდე. წელიწადში 1000 მმ ატმოსფერული ნალექი მოდის.

ალპების გეოგრაფიული მდებარეობისა და კლიმატური პირობებიდან გამომდინარე, იგი საერთაშორისო მასშტაბის ტურისტული ზონაა, სადაც განვითარებულია სამთო-სათხილამურო სპორტი და ალპინიზმი. ყოველწლიურად ახალი სათხილამურო ტრასებისა და დასასვენებელი ბაზების მშენებლობისთვის ალპების ტერიტორიებზე ჩეხავენ ტყის დიდ საფარს, რაც მთებში ეკოლოგიური წონასწორობის რღვევას იწვევს. მეცნიერთა მონაცემებით, დღეისათვის განადგურებულია ალპური ტყეების დაახლოებით 60-80%.



სურ. 1. ალპების მთათა სისტემა.

მიმდინარე ანთროპოგენური ზემოქმედების გარდა, გლობალური დათბობის ფონზე, ალპებში მიმდინარეობს მყინვარების ინტენსიური დნობა. მეცნიერთა მონაცემებით 150 წელიწადში ალპებში სერიოზული ეკოლოგიური ცვლილებები მოხდა, კერძოდ, 1850-2000 წლებში მყინვარების ფართობი 50%-ით შენცირდა. მონიტორინგის შედეგად გამოვლინდა, რომ დნობის პროცესი უკვე მრავალწლიან მყინვარებსაც შეეხო [31, 32].

ადამიანის მიერ ალპები იმდენად არის ათვისებული, რომ მცირე ღვარცოფების გავლაც კი იწვევს მნიშვნელოვან ზარალს, ხოლო კატასტოფული ღვარცოფები - ეროვნულ ტრაგედიის კატეგორიას განეკუთვნება. საფრანგეთის, შვეიცარიის, იტალიისა ავსტრიის ალპებში გამუდმებით ისმის ქვატალახიანი ნაკადების გრუხუნი.

დღეისათვის, ალპებში 10 ათასამდე ღვარცოფული აუზია გამოვლენილი, სადაც გენეზისის მიხედვით გავრცელებულია ალპური ტიპის ღვარცოფები, რომლებიც გამოწვეულია თოვლის სეზონური სწრაფი დნობით. ჯერ მხოლოდ ავსტრიის ალპებში 4135 ღვარცოფული აუზია

განლაგებული, რაც ქვეყნის ტერიტორიაზე განლაგებული მთების ფართობის დაახლოებით 10%- შეადგენს. მდინარის ხშირი ქსელის გამო ღვარცოფული აუზების ფართობი აქ დიდი არ არის, და შესაბამისად ღვარცოფული გამონატანიც მცირეა. უმრავლეს შემთხვევაში იგი 500-600 მ³-ს შეადგენს, გამონაკლისის სახით შეიძლება 1,5 მლნ. მ³-ს მიაღწიოს. აქ დიდი ღვარცოფული კატასტროფების განმეორადობა 20-30 წელს შეადგენს, ხოლო ორი უმსხვილესი 1882 და 1965-1966 წლებშია ფიქსირებული [33].

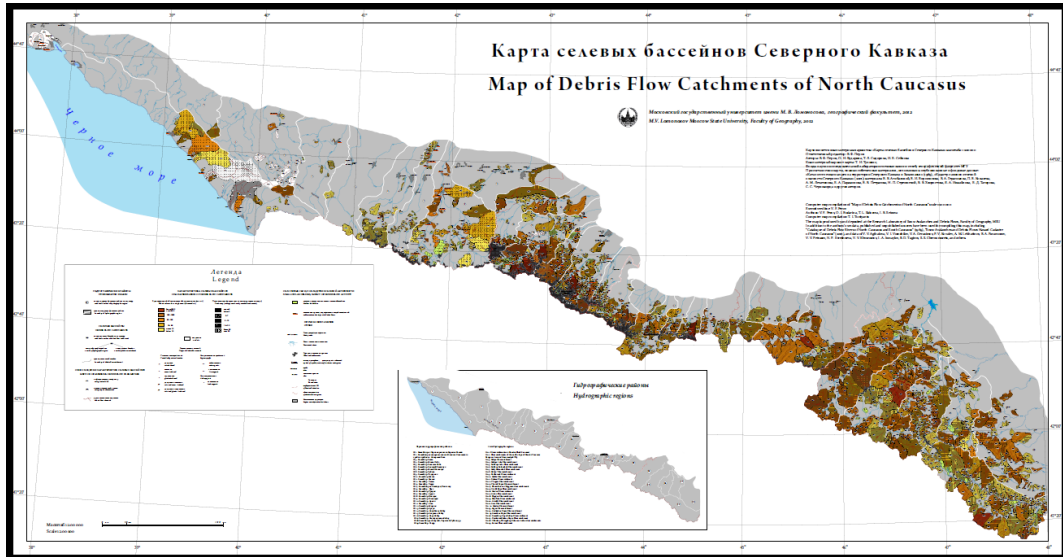
2005 წლის აგვისტოში, ცენტრალურ ევროპაში, კერძოდ ალპების რეგიონში დაფიქსირებულ იქნა კიდევ ერთი სერიოზული კლიმატური კატასტროფა, რომელიც უკანასკნელ 100 წელიწადში ყველზე დიდ და დამანგრეველად იყო აღიარებული [34, 35, 36].

ევროპაში მოსულმა თავსხმა წვიმებმა გამოიწვია წყალდიდობა. უხვი ატმოსფერული ნალექების შედეგად გაიზარდა მდინარის ჩამონადენი, რომელთა სიჩქარემ მნიშვნელოვნად გადააჭარბა მდინარეთა ბუნებრივ სიჩქარეს. დინებამ წამოიღო უამრავი ნატანი - დანალექი ქანები, ორგანიკა, ნაგავი და ა.შ. მდინარეებმა შეიცვალეს კალაპოტი და ნაპირებზე დაგროვდა დიდი რაოდენობის ნატანი. ჯერ მხოლოდ ტიროლში ნატანის მოცულობამ 64 ათას მ³-ს მიაღწია. ავსტრიაში გაიარა 115 ღვარცოფულმა ნაკადმა და ჩამოწვა 111 მეწყერი. 2005 წელს ამ სტიქიური მეველენებით გამოწვეულმა ზარალმა 555 მლნ. ევრო შეადგინა [37, 38, 39].

ევროპა-აზიაში აგრეთვე აღსანიშნავია რუსეთის მთათა სისტემებზე განლაგებული ღვარცოფული აუზები.

რუსეთის მთილანი ტერიტორიის 25% ღვარცოფსაშიმ ტერიტორიებს წარმოადგენს. აქ ღვარცოფსაშიმი ტერიტორიები შემდეგნაირადაა დაყოფილი: 2 ზონა - ცივი და თბილი; 6 რეგიონი - ევროპული, სამხრეთ ციმბირის, წყნარი ოკეანის, დასავლეთის, აღმოსავლეთის და არქტიკული; 14 ღვარცოფული რაიონი - ჩრდილეთ კავკასიის, სამხრეთ ურალის, ალტაის, ბაიკალის, ამურის, სახალინის,

კამჩატკის, კოლის, ჩრდილოეთ ურალის, პუტორანული, ვერხოიანული, ჩუკოტკის, ტაიმირის და პოლარულ კუნძულების [40].



სურ.2. ჩრდილოეთ კავკასიონის დვარცოფული აუზების რუკა¹

აღნიშნულიდან ყველაზე დვარცოფსაშიშად მიჩნეულია ჩრდილოეთ კავკასიის რეგიონი, რომელიც განლაგებულია დიდი კავკასიონის ჩრდილოეთ მაკროფერდობზე.

მთლიანად კავკასიის ფართობი დაახლოებით 440 ათასი კვ. კმ-ია, სადაც 30 მლნ ადამიანი ცხოვრობს. კავკასიონის მთავარი წყალგამყოფი ქედი კავკასიონს ჩრდილოეთ კავკასიად (იმიერკავკასიად; ფართობი 250 ათ. კმ²) და ამიერკავკასიად (ფართობი 190 ათ. კმ²).

იმიერკავკასიის ვაკეში გამოიყოფა 3 ნაწილი: დასავლეთ იმიერკავკასიის დაბლობი, სტავროპოლის მაღლობი და აღმოსავლეთ იმიერკავკასიის დაბლობი.

იმიერკავკასიის ბაქანს ჩრდილოეთ-დასავლეთ ნაწილში საფუძვლად უდევს უკრაინის კამბრიულისწინა კრისტალური მასივის

¹ Map of Debris Flow Catchments of North Caucasus. M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2012.

შვერილი, დანარჩენ უდიდეს ნაწილში - შუაოალეოზოური ნაოჭა ფილაქანი. ბაქანზე დანალექი საფრის დაგროვება შუაიურული ეპოქიდან მიოცენის ბოლომდე გრძელდებოდა.

კავკასიონი მნიშვნელოვანი კლიმატგამყოფია. იგი აბრკოლებს ჩრდილოეთის ცივი ჰაერის მასების გავრცელებას სამხრეთისკენ, ხოლო სამხრეთის თბილი ჰაერისას - ჩრდილოეთისკენ და მკვეთრ კლიმატურ კონტრასტს ქმნის ჩრდილოეთ კავკასიასა და ამიერკავკასიას შორის.

იანვრის საშუალო ტემპერატურა ჩრდილოეთ კავკასიაში 2-5 °C. დასავლეთ იმერკავკასიის ჰავა ზომიერი კონტინენტურია (სტეპური), აღმოსავლეთ იმერკავკასიისა - უფრო კონტინენტური და მშრალი (ნახევარუდაბნოსი).

მთიანი რელიეფის გამო კავკასიას სიმაღლებრივი კლიმატის ზონალურობა ახასიათებს. შავი ზღვის ჩრდილოეთ სანაპიროზე (ნოვოროსიის - გელენჯიკის რაიონში) ხმელთაშუა ზღვის ჰავაა, იცის ნოტიო ზამთარი და მშრალი ზაფხული. ნალექები დიდი რაოდენობით (2500 მმ-მდე, ზოგან 4000 მმ-მდე) მოდის დასავლეთ და ცენტრალურ კავკასიონის სამხრეთ და სამხრეთ-დასავლეთ კალთებზე.

კავკასიონზე 2200-მდე მყინვარია (ჩრდილოეთ კალთაზე დაახლოებით 70%), რომელთა ფართობი 1430კმ². ჩრდილოეთი კალთის ძლიერი გამყინვარება განაპირობა ექსპოზიციამ, ოროგრაფიულმა პირობებმა და სამხრეთ კალთიდან ჩრდილოეთ კალთაზე თოვლის გადახვეტამ ქარბუქის დროს. ცენტრალურ და დასავლეთ კავკასიონზე გამყინვარება უფრო მძლავრია, ვიდრე აღმოსავლეთ კავკასიონზე, რაც გამოწვეულია აღმოსავლეთისკენ ჰავის კონტინენტურობის ზრდით [41].

ჩრდილოეთ კავკასიის ბუნებრივი და კლიმატური პირობებიდან გამომდინარე იგი ღვარცოფული საშიშროების რისკის მარალ კატეგორიას მიეკუთვნება და მრავალი მეცნიერის შესწავლის საგანს წარმოადგენს, შესაბამისად იგი სხვა ღვარცოფულ აუზებთან შედარებით უკეთ არის შესწავლილი [42].

სადღეისო მონაცემებით ჩრდილოეთ კავკასიონი მთლიანად, ამა თუ იმ ხარისხით, ღვარცოფსაშიშია. აქ ძირითადად გავრცელებულია წვიმის გენეზისისა და ყინულის დნობით გამოწვეული ღვარცოფები. რეგიონში 925 ღვარცოფული აუზია განლაგებული, რომელთა პარამეტრების მნიშვნელობები შემდეგ დიაპაზონში მერყეობს: ფართობი 15-35 კმ², სადინარის სიგრძე - 6-8 კმ, სადინარის საშუალო ქანობი 110-280 ‰. მყარი გამონატანის მოცულობა ათია თასობით კუბურ მეტრს აღწევს.

ცენტრალურ კავკასიონზე დიდ მოცულობის აუზები, რომელთა გამონატანი 100 ათას მ³-ს აღემატება, საერთო რაოდენობის 10%-ს შეადგენს; აღმოსავლეთით გავრცელებულია საშულო და მცირე ღვარცოფული ნაკადები. აქ დიდ მოცულობის აუზები, რომელთა გამონატანი 100 ათას მ³-ს აღემატება, საერთო რაოდენობის 5%-ზე ნაკლებია. დასავლეთით მცირე ღვარცოფები ჭარბობს რომელთა გამონატანი ათასობით კუბური მეტრია. აქ ისეთი მოცულობის აუზები, რომელთა გამონატანი 10 ათას მ³-ს აღემატება, საერთო რაოდენობის დაახლოებით 5%-ს შეადგენს და ღვარცოფული ნაკადები მყინვარული გენეზისისაა [1].

რეგიონის მასშტაბით განასხვავებენ ორი ტიპის ღვარცოფულ აუზს 3-5 და 10-12 აწელიწადში აერთხელ განმეორადობით. თოვლის დნობით გამოწვეული ღვარცოფების გააქტიურება ივლის-აგვისტოზე მოდის, თუმცა ღვარცოფსაშიშ პერიო მთლიანად იანვრიდან ოქტომბრის ჩათვლით გრძელდება. ღვარცოფების უმეტესობა, 90% მაისი-სექტემბერზე მოდის, ხოლო ყველაზე დიდი საშიშროება (შემთხვევების 72%) ივლის-აგვისტოშია მოსალოდნელი. წვიმით გამოწვეული ღვარცოფებს შორის ინტერვალი საშუალოდ 8 წელია.

ჩრდილოეთ კავკასიონის ღვარცოფები აყენებენ ზარალს გზებს, ქალაქებსა და დასახლებულ პუნქტებს, სარეკრეაციო ობიექტებს, ვინაიდან ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებები აქ შეზღუდული მასშტაბითაა წარმოდგენილი.

წლების მანძილზე, ამ რეგიონში, ამა თუ იმ კატეგორიის ღვარცოფმა არა ერთი დასახლებული პუნქტი დააზარალა. გავლილ ღვარცოფთა შორის აღსანიშნავია ორი ულტრაღვარცოფული მოვლენა, რომელიც ჩრდილოეთ ოსეთის ტერიტორიაზე მდ. გენლდონის აუზში განვითარდა. პირველი შემთხვევა - 1902 წლის 3 ივლისს ღვარცოფულმა ნაკადმა გამოიტანა 65 მლნ. მ³ ყინული და მთის ქაზნები, გარდაივალა 32 ადამიანი. იგივე ღვარცოფულ აუზში უკვე 2002 წლის 20 სექტემბერს ყინულ-წყალის ნაკადმა, რომელმაც დინების შედეგად ტრანსფორმაცია განიცადა და ქვაწყლიანში გადავიდა, 115 მლნ. მ³ მყარი გამონატანი გამოიტანა, რამაც 135 ადამიანის სიცოცხლე იმსხვერპლა. აღნიშნული ბუნებრივი კატასტროფა უმსხვილესია ჩრდილოეთ კავკასიაში დღეისათვის აღრიცხულ ღვარცოფულ მოვლენებს შორის.

არანაკლებ ღვარცოფსაშიშ რეგიონს წარმოადგენს ყაზახეთის ტერიტორიაზე განთავსებული ღვარცოფული აუზები, რომელთა მთათა სისტემები მოიცავენ წიან-შანის, ჯუნგარის ალატაუს ქედებს, ტარბაგატაის, საურსა და სამხრეთ-დასავლეთ ალტაის.

ყაზახეთში ღვარცოფული მოვლენები ცნობილია 1841 წლიდან და დღემდე აქტუალურ თემად რჩება. ღვარცოფებზე ჩატარებული დაკვირვებების და კვლევების მონაცემები, ღვარცოფების შეფასების მეთოდები და ღვარცოფების მახასიათებლები ფართოდაა განხილული მრავალ სამეცნიერო შრომაში [44, 45, 46, 47, 48].

არასრული მონაცემებით, 1941-1990 წლებში ყაზახეთში დარეგისტრირებულია 788 ღვარცოფის შემთხვევა 300 ღვარცოფულ აუზში. აღნიშნულიდან ნახევარზე მეტი მოდის ზაილიის ალატაუს მთათა სისტემაზე სადაც გენუზისის მიხედვით შემდეგი ტიპის ღვარცოფები წარმოიშვება: 1. თავსხმა წვიმებითა და წვიმებით გამოწვეული (ზოგჯერ ინტენსიურ თოვლის დნობასთან ერთად) 70%; 2. მყინვარების - 20%; 3. სეისმოგენური, გამრღვევი ხასიათის - 10%.

ზაილის ალატაუს ჩრდილოეთის ფერდობის უმრავლესი მდინარე ღვარცოფაქტიურია და აღვარცოფების აქტივაცია მაისიდან ივლისის ჩათვლით ვლინდება. შედგენილობის მიხედვით ღვარცოფული ნაკადები ქვატალახიანია. ერთჯერადი მაქსიმალური გამონატანი გამონატანის კონუსზე ასობით ათას კუბურ მეტრს შეადგენს და ზოგ შემთხვევაში 1,2-3,4 მლნ. მ³-ს აღწევს.

ყველაზე დიდი კატასტროფები დაფიქსირებულია 1921 და 1973 წლებში მდ. მცირე ალმატინკას, 1963 წელს მდ. ისსიკის, 1959 წელს მდ. თეკელის აუზებში.

1921 წლის 8 ივლისს მდ. მცირე ალმატინკას აუზში თავსხმა წვიმებმა გამოიწვია ღვარცოფი, რომელმაც დაანგრია ალმა-ათას ნაწილია 500-ზე მეტი ადამიანი იმსხვერპლა. გამონატანის მოცულობამ 2-3 მლნ.მ³ შეადგინა 1973 წლის 15 ივლისის მყინვარული გენეზისი ღვარცოფი შეჩერებულ იქნა მედეოს კაშხლით. ღვარცოფსაცავში 3,4 მლნ მ³ ნატანი შეკვდა.

მდ. ისსიკზე, 1963 წლის 7 ივლისს გამოყალიბდა მორენული ტიპის ღვარცოფი 6 მლნ მ³ მყარი გამონატანით. 4,3 მლნ. მ³ ნატეხი მასა მდინარის ველზე დაილექა, დაახლოებით 1,5 მლნ მ³ გამონატანილ იქნა ისსიკის ტბაში.

1959 წლის 8 აპრილს თავსხმა წვიმებისა და თოვლის დნობის შედეგად მდ. თეკელზე წარმოიქმნა ღვარცოფი რომელმაც გაანდგურა გზები, ხიდები, სახლები და სხვ.

ხშირი და დამანგრეველი ძალის სტეიურ მოვლენებთან საბრძოლველად, ყაზახეთის 7 ღვარცოფულ აუზში, 1990 წლამდე, აგებულ იქნა 11 სხვადასხვა ტიპის კაშხალი, რომელთა სიმაღლე 6÷150 მეტრია, ხოლო ღვარცოფსაცავის მოცულობა 0,035-დან 12,6 მლნ მ³-ს აღწევს.

აზიის კონტინენტზე, აგრეთვე აღსანიშნავია აღმოსავლეთ აზიის რეგიონი, სადაც ღვარცოფული პროცესების ინტენსიობა ზოგადად დაბალია, მაგრამ ცალკელ მთის ფერდობებზე, სადაც ინტენსიურად მიმდინარეობს ტერიტორიების ათვისება, ღვარცოფულ მოვლენების

გავითარებას, ანთროპოგენური ზემოქმედების გარდა, ხელს უწყობს ინტენსიური ატმოსფერული ნალექები.

ასე, მაგალითად, საშუალო სიმაღლის პეკინის მთებში (ჩრდილო-აღმოსავლეთი ჩინეთი), 17 ათას კმ² ტერიტორიაზე აღრიცხულია 705 ღვარცოფული აუზი [49].

ცალკე განსახილველი საკითხია იაპონიის კუნძულები, ვინაიდან აქ წვიმით და თოვლის დნობით გამოწვეულ ღვარცოფებთან ერთად, მძლავრ ღვარცოფებს ვულკანოგენური გენეზისი გააჩნიათ. ღვარცოფული ნაკადის მაქსიმალური პარამეტრები, რომელიცაა აქ დაფიქსირებული შემდეგია: სიგრძე 80 კმ; მყარი გამონატანი - 6-7 მლნ. მ³; კალაპოტის სიგანე ქვედა დინებაში - 2 კმ-მდე.

მიუხედავად აღნიშნულისა, აღნიშნულ რეგიონში, მაინც წვიმით გამოწვეული ღვარცოფები დომინირებს. ასეთი ტიპის ღვარცოფების გავრცელება განპირობებულია ადვილად ეროზირებადი მთის ქანებით, მეწყერაბითა და მაღალი სეისმურობით. ხშირია ღვარცოფების წარმოქმნა მოქმედი ვულკანების ზონებშიც (იაპონიის ალპები კუნძულ ჰონსიუზე). სულ იაპონიაში 108 აქტიური ვულკანია [50, 51].

ამერიკის კონტინენტზე ღვარცოფული მოვლენები ხშირია მექსიკაში, კოლუმბიაში, ეკვადორსა და ჩილეში. ღვარცოფები აშშ-ში, ძირითადად, გავრცელებულია შემდეგ შტატებში: კალიფორნია, იუტა, ნევადა, ვაიომინგი, კოლორადო, ვირჯინია, ვაშინგტონი, აიდაჰო, ორეგონი და ალიასკა. ქვეყნის ტერიტორიის 1/3 განეკუთვნება ღვარცოფსაშიშს და ძირითადად მთიან დასავლეთს მოიცავს. აქ კატასტროფების სიმძლავრის მიხედვით ყველაზე ცნობილია ქალაქი ლოს-ანჯელესი.

აშშ-ში ძირითადად გავრცელებულია ალპური და უდაბნოს ტიპის ღვარცოფები, რომლებიც წარმოიქმნება არიდულ და ნაევრად არიდულ რეგიონებში (არიზონა, ნევადა, კალიფორნია) უცაბედი უხვი ატმოსფერული ნალექების დროს.

ამერიკის კონტინენტებისა და ევრაზიისა გარდა, ღვარცოფული მოვლენები ფიქსირებულია აფრიკაში, ავსტრალიაში; წყნარი, ატლანტიკისა და ინდოეთის ოკეანეების კუნძულების მთიან რეგიონებში.

ჩვენს მიერ განხილულ რეგიონებში ღვარცოფული მოვლენების განვითარებას, ბუნების ზემოქმედებასთან ერთად, ხელი შეუწყო ადამიანის ჩარევამ, რაც ძირითადად გამოიხატება აუთვისებელი ტერიტორიების ათვისებით და შესაბამისად ტყის საფრის გაჩევივით, რის შედეგადაც მოხდა ეკოლოგიური წონასწორობის რღვევა, ფერდობებზე შეიქმნა ნიადაგის ჩამორეცხვისა და, შესაბამისად, წყლისმიერი ეროზიული პროცესების განვითარების ხელსაყრელი პირობები.

მაგალითისთვის, სწორედ ანთროპოგენური ზემოქმედების გამო ღვარცოფული მოვლენებისგან ზარალდება იტალიის, ავსტრიის, საფრანგეთისა და შვეიცარიის მთისწინა რეგიონები. დღეისათვის, აღნიშნულ ქვეყნებში მთავრობის მიერ მიღებულია კანონი, რომლის მიხედვითაც ხდება ღვარცოფსაშიში ფერდობების კერძო საკუთრებიდან გამოთავისუფლება და მათზე ტყის გაშენება. ამასთან, ინტენსიურად მიმდინარეობს ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების გატარება.

1.2.2. ღვარცოფული აუზები სამხრეთ კავკასიასა და საქართველოში

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ღვარცოფული მოვლენები ფართოდაა გავრცელებული კავკასიაში, სადაც ღვარცოფული მოვლენების გააქტიურება, ხშირად, გამოწვეულია ინტენსიური ატმოსფერული ნალექებითა და წყალმოვარდნებით, ზოგჯერ კი, თოვლისა და ყინულის დნობით, ჯებირების გარღვევით, მყინვარების ჩამოშლითა და მეწყერების ჩამოწოლით.

კავკასიონზე განვითარებული ღვარცოფული მოვლენების შესწავლა XIX საუკუნის მეორე ნახევრიდან დაიწყო და დღეისათვის, დაგროვილია

კვლევების მასალები და დიდი გამოცდილება, განსაკუთრებით გავლილი ღვარცოფების პარამეტრების განსაზღვრისა და ღვარცოფებისგან დაცვის ღონისძიებების შემუშავება-გატარების კუთხით.

კავკასიონის ღვარცოფების შესწავლის ისტორიაში შეიძლება გამოყოფილ იქნას 2 პერიოდი: ეპიზოდური კვლევების პერიოდი, რომელიც იწყება XIX საუკუნის შუა პერიოდიდან და გრძელდება XX საუკუნის 50-60 იან წლებამდე; სისტემატიური კვლევების თანამედროვე პერიოდი, რომელიც XX საუკუნის შუა პერიოდიდან დაიწყო.

პირველი სამეცნიერო პუბლიკაციები კავკასიონზე გავრცელებული ღვარცოფების შესახებ, დაკავშირებული იყო ღვარცოფებისაგან დაცვის ღონისძიებების გატარების აუცილებლობასთან, საქართველოს სახმხედრო გზატკეცილის პროექტირების დროს (ინჟინერი სტატკოვსკი ბ.ი), ხოლო XIX – XX საუკუნეებში პირველად იქნა აღწერილი ღვარცოფული ნაკადები და მათი დამანგრეველი შედეგები (პსარევი მ.პ., 1885; პილცოვი ნ.ნ., 1904).

კავკასიონის ღვარცოფების შესწავლის მომდევნო ეტაპი მოიცავს ღვარცოფული ნაკადების ძირითადი თვისებების, ფორმირების, მოძრაობის თავისებურებებისა და გამოტანის კონუსების აღწერას. აგრეთვე შემოთავაზებულია ღვარცოფების კლასიფიკაცია (პეტროვი ნ., 1910,1913).

XX საუკუნის 30-იან წლებში გამოიცა ა.ლ. ბრილინსკის (1936) კავკასიონზე ჩატერბული კვლევების შედეგები და ღვარცოფებთან ბრძოლის მეთოდები.

1983-1999 წლებში ღვარცოფული მოვლენების სავსე კვლევების ჩატარებამ საგრძნობლად იკლო, და ამ პერიოდში გამოქვეყნებული სამეცნიერო ლიტერატურა ძირითადად ასახავს ადრე შეგროვილი მონაცემების ანალიზს [52].

კვლევების შემდგომ პერიოდში, კავკასიონის ღვარცოფული აუზების შესწავლას მრავალი მეცნიერის შრომაა მიძღვნილი, რომელთა შორის აღსანიშნავია მ. გაგომიძის, ი. ხერხეულიძის, გ. ხერხეულიძის, გ. ხმალაძის, ე. წერეთელის, დ. წერეთელის, ო. ნათიშვილის, ვ. თევზაძის, გ.

ბერუჩაშვილის, ზ. იორდანიშვილის, ლ. სულაკველიძის ზ. ამილახვარის, ი. კვიციანი და სხვ.

როგორც ლიტერატურული წყაროების ანალიზი ადასტურებს, კავკასიონის ღვარცოფული აუზების შესწავლა უკვე სამი საუკუნეა რაც მიმდინარეობს და დღესაც არ კარგავს აქტუალურობას.

გეოგრაფიულად, დიდი კავკასიონი იყოფა ორ ნაწილად - ჩრდილოეთი კავკასია და სამხრეთი კავკასია. ჩრდილოეთ კავკასიის უდიდესი ნაწილი რუსეთის ტერიტორიაზეა განლაგებული და მისი ღვარცოფული აუზები ჩვენს მიერ განხილულ იქნა როგორც ევროპის ნაწილი (იხ. 1.2.1). ამიტომ, წინამდებარე პარაგრაფში, ჩვენ მხოლოდ სამხრეთ კავკასიის (ამიერკავკასია) ღვარცოფული აუზების აღწერით შემოვიფარგლებით.

სამხრეთი კავკასიას განეკუთვნება კავკასიონის სამხრეთი კალთის უმეტესი ნაწილი, კოლხეთისა და მტკვრის მთავარშორისო ბარი, სამხრეთი კავკასიის მთიანეთი, თალიშის მთები და ლენქორანის დაბლობი. მისი ფართობი 190 ათასი კმ². სამხრეთ კავკასიის ტერიტორიაზე მდებარეობს 3 სუვერენული სახელმწიფო: აზერბაიჯანი (უმეტესი ნაწილი), საქართველო, სომხეთი [53].

კავკასიის ზედაპირის აბსოლუტური სიმაღლე ცვალებადობს 28 მ-დან 5642 მ-მდე. კავკასიის ტერიტორიის ნახევარზე მეტი უჭირავს მაღალ მთებსა და ზეგნებს. ამიერკავკასიის ბარი ვრცელდება შავი ზღვიდან კასპიის ზღვამდე. მისი სიგანე აზერბაიჯანში 160 კმ აღწევს, დასავლეთ საქართველოში - 90კმ. იგი შემდეგ ნაწილებად იყოფა: კოლხეთის დაბლობი ირგვლივ მდებარე გორაკ-ბორცვებით, იმერეთის მაღლობი (ძირულის მასივი), შიდა ქართლის ვაკე, იორ-აჯინოურის ზეგანი, ალაზან-აგრიჩაის ვაკე, მტკვარ-არაქსის დაბლობი და მისი მომიჯნავე გორაკ-ბორცვიანი რეგიონები.

კავკასია მდებარეობს ზომიერი და სუბტროპიკული ჰავის სარტყლებსი საზღვარზე. იანვრის საშუალო ტემპერატურა დასავლეთ

ამიერკავკასიაში (კოლხეთის დაბლობი) 4,5-6°C, აღმოსავლეთ ამიერკავკასიაში (მტკვარი-არაქსისა და ლენქორანის დაბლობები) 1-3,3°C. ყველაზე ცივი თვე იანვარია, ხოლო ყველაზე ცხელი - დასავლეთში აგვისტოა, აღმოსავლეთში კი ივლისი.

კოლხეთში ნოტიო სუბტროპიკული ჰავაა, იცის რბილი ზამთარი და უხვი ნალექი (1200-1800 მმ და მეტი წელიწადში). ნოტიო სუბტროპიკული ჰავაა ლენქორანის დაბლობზეც (ნალექები დაახლოებით 1200 მმ-მდე წელიწადში), თუმცა ზაფხულის დასაწყისი აქ მშრალი იცის. მტკვარ-არაქსის დაბლობის ჰავა მშრალი სუბტროპიკულია (ნალექები 200-400 მმ წელიწადში, აღმოსავლეთ ნაწილში 200 მმ-ზე ნაკლებიც), ზამთარი რბილია, ზაფხული ცხელი, მსგავსი ჰავაა არაქსის შუა დინების ქვაბულსა და სამხრეთ კავკასიის ვულკანურ მთიანეთშიც.

კავკასიონზე არის მყინვარული (თებერდა, ტობავარჩხილი, ადუედა ამიჟი, ყვარაში), კარსტული (ცერიქოლი, ერწო), ნგრევით შეგუბებული (რიწა, ამტყელი, ქვედი), ვულკანური (ყელის ზეგნის ტბები) და სხვა გენეზისის ტბები.

კავკასიონზე მდინარეული ჩამონადენი მაღალია. მაღალმთიანი ზოლის დასავლეთი ნაწილის სამხრეთ ფერდობზე (აღმოსავლეთი აფხაზეთი, დასავლეთ სვანეთი და მთიანი სამეგრელო) ჩამონადენის მოდული 80-100 ლ/წმ-ს ტოლია ერთ კმ²-ზე. ჩრდილოეთ ფერდობზე და აღმოსავლეთ ნაწილში იგი ეცემა 30-40 ლ/წმ-მდე და მხოლოდ კახეთში აღწევს 70 ლ/წმ-ს. მაღალმთიანი ზოლის მდინარეები - ენგური, რიონი, კოდორი, თერგი საზრდოობენ მნიშვნელოვან წილად მყინვარებით. მაქსიმალური ხარჯი მათ ზაფხულობით აქვს დაწინარჩენ მდინარეებს წყალდიდობა გაზაფხულზე აქვთ [41].

ამიერკავკასიის ძირითადი მდინარეების მორფოლოგიური მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილების სახით (ცხრილი N 1.4 და 1.5) [19].

შავი ზღვის აუზის მდინარეები

ცხრილი № 1.4.

| № | მდინარე | მდინარის სიგრძე, კმ | წყალშემკრები აუზის ფართობი, კმ ² | აბსოლუტური სიმაღლე, მ | |
|---|--------------------|---------------------|---|-----------------------|-----------|
| | | | | სათავე | შესართავი |
| 1 | ბზიფი | 105 | 1517 | 2306 | 0 |
| 2 | კოდორი | 73 | 2051 | 740 | 0 |
| 3 | ენგური | 188 | 4054 | 2613 | 0 |
| 4 | რიონი | 327 | 13486 | 2987 | 0 |
| 5 | სუფსა | 93 | 1125 | 95 | 0 |
| 6 | ნატანები | 52 | 640 | - | 0 |
| 7 | ჭოროხი (საზღვრიდან | 21 | 1910 | - | 0 |

კასპიის ზღვის აუზის მდინარეები

ცხრილი № 1.5.

| № | მდინარე | მდინარის სიგრძე, კმ | წყალშემკრები აუზის ფართობი, კმ ² | აბსოლუტური სიმაღლე, მ | |
|---|-------------|---------------------|---|-----------------------|-----------|
| | | | | სათავე | შესართავი |
| 1 | კუსარჩაი | 101 | 1106 | - | -26 |
| 2 | სუმგაითი | 75 | 1720 | - | -26 |
| 3 | ჩიკილჩაი | 56 | 566 | - | -26 |
| 4 | კოზლუჩაი | 70 | 503 | - | -26 |
| 5 | პირსაგატჩაი | 221 | 3183 | - | -26 |
| 6 | მტკვარი | 1523 | 180300 | 2742 | -26 |
| 7 | ლანკორანჩაი | 67 | 1093 | - | -26 |

ამ მდინარეების ღვარცოფულ აუზებს წარმოადგენს მხოლოდ მათი შენაკადების აუზები, რომელშიც მთის ნაკადებსა და მდინარეებს წარმოადგენენ.

ამიერკავკასიის ყველაზე მსხვილ ღვარცოფულ რაიონს წარმოადგენს ტერიტორია, რომელიც განლაგებულია მდ. ალაზნის სათავიდან ვანჩამჩაიამდე, საერთო სიგრძით 250 კმ. ფართობის მიხედვით მას მოსდევს მდ. თერგის, მდ. არაგვის, მდ. რიონის და სხვა ღვარცოფული რაიონები. საერთო ჯამში, საქართველოში ღვარცოფული აუზების რაოდენობა, 1000 აჭარბებს და ქვეყნის ტერიტორიის 70%-ზე მეტი და 3000-მდე დასახლებული პუნქტი მოქცეულია სტიქიური გეოლოგიური

პროცესების განვითარების რისკის ზონაში. საქართველოს ძირითადი ღვარცოფული ღვარცოფული რაიონები მუცემული ცხრილი [54].

აღსანიშნავია, რომ ღვარცოფული ნაკადები საქართველოში ცნობილია XVIII საუკუნის ბოლოდან, ხოლო შესწავლა დაიწყო XX საუკუნის 30-იანი წლებიდან. ღვარცოფული ნაკადების გეოგრაფიის ამსახველი პუბლიკაციები კი XX საუკუნის 60-80-იან წლებს ეკუთვნის, რომელთა შორის აღსანიშნავია მ.ს გაგოშიძის [19], გ.ნ. ხმაღაძის [55], გ.ი. ხერხეულიძის [56], ე.დ. წერეთელის, დ.დ. წერეთელის [57] და სხვა შრომები.

**საქართველოს ღვარცოფული რაიონები
(n-ღვარცოფული აუზების რაოდენობა)**

ცხრილი № 1.6.

| № | ინდექსი | რაიონის დასახელება | n |
|------------|---------|---|------------|
| 1 | (07.29) | კოდორი-ბზიფის | 109 |
| 2 | (07.30) | ენგური-ხობის | 56 |
| 3 | (07.31) | რიონის | 122 |
| 4 | (08.2) | ყვირილა-ძირულას | 29 |
| 5 | (08.1) | აჭარა-გურიის (ჭოროხი-სუფსა) | 40 |
| 6 | (07.24) | თერგი-არღუნის | 99 |
| 7 | (07.32) | ლიხვისა და არაგვის | 106 |
| 8 | (07.34) | ცივ-გომბორის (იორის) | 44 |
| 9 | (07.33) | ალაზნის | 80 |
| 10 | (08-3) | ჯავახეთისა და მესხეთის (მტკვრის-ზედა ბორჯომამდე) | 160 |
| 11 | (08-4) | შიდა ქართლის (მტკვრის მარჯვენა ნაპირი თბილისამდე) | 53 |
| 12 | (08-5) | ლოქის (ალგეთი-ხრამის) | 29 |
| სულ | | | 920 |

კვლევების შედეგად დადგენილია, რომ საქართველოში, ყველაზე მეტად გავრცელებულია წვიმის გენეზისის მქონე ღვარცოფები. თხიერი შემადგენლით შევსების მიხედვით, ღვარცოფული ნაკადების წარმოშობა შემდეგნაირადაა გადანაწილებული: წვიმები და თავსხმა წვიმები - 79%, მდნარი წყალი - 9%, მყინვარები და მორენები - 6%, ბუნებრივი წყალსაცავების წყალი - 6%. ღვარცოფული მასის შემადგენლობის მიხედვით

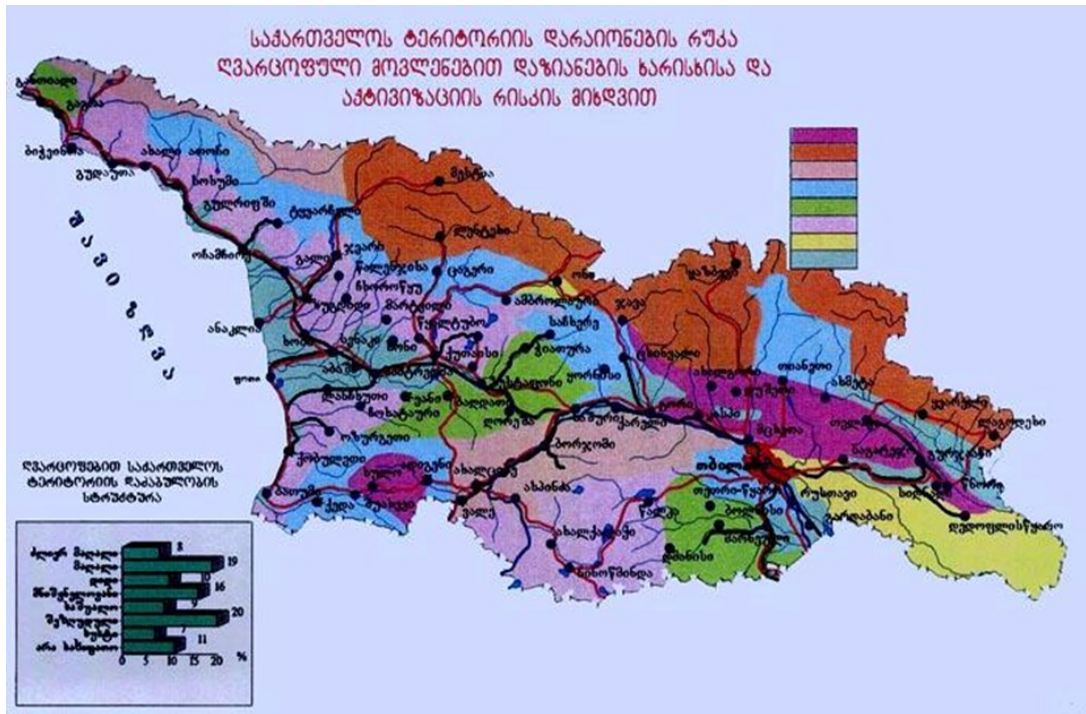
ჭარბობს ქვატალახიანი და ტალახიანი ღვარცოფები (73%), დანარჩენი ქვაწყლიანია. მოძრაობის მიხედვით არაბმული ღვარცოფები დომინირებს.

ღვარცოფსაშიში პერიოდი საქართველოში აპრილიდან ოქტომბრის ჩათვლით გრძელდება, თუმცაღა, ღვარცოფული მოვლენების აქტივაცია რამდენჯერმე დაფიქსირებულ იქნა თებერვალშიც. ღვარცოფებული მოვლენების 97% ფიქსირებულია მაისიდან-სექტემბრის ჩათვლით, ხოლო ყველაზე საშიშ პერიოდს ივლისი-აგვისტო წარმოადგენს (61%). რაც შეეხება ღვარცოფების განმეორადობას, ის დამოკიდებულია მთის ქანების ლითოლოგიურ კომპლექსზე და შესაძლებელია 3-5 წელიწადში ან 5-10 წელიწადში ერთხელ გამოვლინდეს.

მაღალი ღვარცოფული აქტივობის ღვარცოფული კერების გამონატანი ასი ათასობით კუბურ მეტრს შეადგენს (1,2 მლნ. მ³-მდე), ხოლო საშუალო და სუსტის შემთხვევაში კი, ათი ათასობით კუბურ მეტრს.

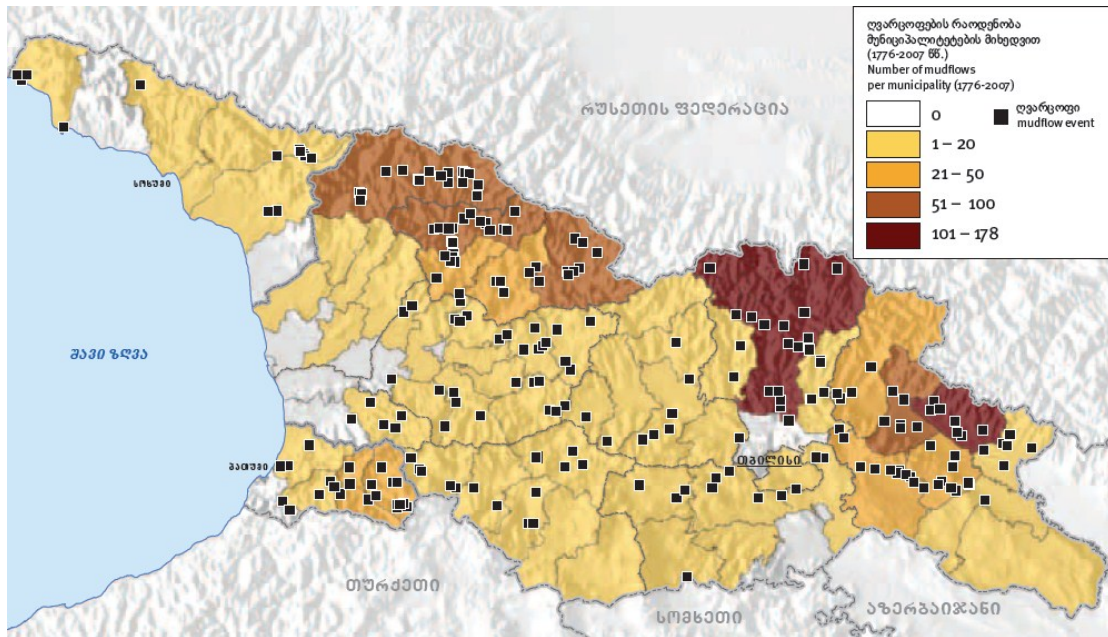
მ. გაგოშიძის მიხედვით, ღვარცოფული ხასითვის მთის ნაკადების აუზების ფართობების პროცენტული განაწილება შემდეგნაირადაა ჩამოყალიბებული [19]:

1. 3000 მეტრზე მაღლა (უწყვეტი მცენარეული საფრის გავრცელების ზემოთ) განლაგებული აუზების სათავეების ფართობები, როგორც მდ. მტკვრისთვის, აგრეთვე მდ. არაგვისთვის 6,4%-ს შეადგენს;
2. აუზების სათავეების ფართობები, რომლებიც განლაგებულია მხოლოდ ბალახის გავრცელების ზონაში, საშუალოდ 13,5-ს შეადგენს;
3. საშუალო ზონის აუზების ფართობი, რომლებიც განთავსებულია 1500-და 2400 მეტრამდე (ტყის გავრცელების ზონა), დაახლოებით 40,6%-ს შეადგენს;
4. 1500 მეტრზე ქვემოთ, სადაც განვითარებულია სოფლის მეურნეობა და განთავსებულია საცხოვრებელი სახლები, განლაგებული აუზების ფართობი საშუალოდ 40%-ს შეადგენს.



სურ. 3. საქართველოს ტერიტორიის დარაიონების რუკა ღვარცოფული მოვლენების დაზიანების ხარისხისა და აქტივაციის რისკის მიხედვით.

საქართველოს მთიან ტერიტორიაზე ღვარცოფული პროცესები თითქმის ყველგან არის გავრცელებული და შემდეგ რეგიონებს მოიცავს: სამეგრელო-ზემო სვანეთის, გურიის, აჭარის, იმერეთის, რაჭა-ლეჩხუმ-ქვემო სვანეთის, სამცხე-ჯავახეთის, შიდა ქართლის, ქვემო ქართლის და კახეთის. სურათზე № 3 მოცემულია საქართველოს ტერიტორიის დარაიონების რუკა ღვარცოფული მოვლენების დაზიანების ხარისხისა და აქტივაციის რისკის მიხედვით, ხოლო სურათზე № 4 ღვარცოფების რაოდენობა მუნიციპალიტეტების მიხედვით 1776-2007 წლებისთვის.



სურ. 4. ღვარცოფების რაოდენობა მუნიციპალიტეტების მიხედვით 1776-2007 წლებსთვის.

როგორც სხვადასხვა წყაროების ანალიზის საფუძველზე ირკვევა, საქართველოში ბოლო პერიოდში სტიქიური პროცესების მასშტაბური გააქტიურება და მათი განმეორებადობის ინტერვალების გახშირება განპირობებულია ექსტრემალური მეტეოროლოგიური მოვლენების გახშირებით, ასევე გარემოზე ადამიანის ანთროპოგენული ზემოქმედებით, კერძოდ ტყის ჭრით, ინერტული მასალების მოპოვებით, პირუტყვის ჭარბი მოვებით, უსისტემო ურბანიზაციით (მშენებლობები მაღალი რისკის ზონებში) [58, 59, 60, 61].

გარემოს ეროვნული სააგენტოს მონაცემების თანახმად 1995-2012 წლებში სტიქიური მოვლენებით და მათ შორის ღვარცოფებით გამოწვეულმა ზარალმა სულ შეადგინა 2708,25 მლნ. ლარი. გეოლოგიური სტიქიის საშიშროების ზონაში მოექცა 20 776 საცხოვრებელი სახლი, დაზიანდა 42781,7 ჰა სასოფლო-სამეურნეო იმსხვერპლა 179 ადამიანი.

1995-2012 წლებში მხოლოდ ღვარცოფებით გამოწვეულმა ზარალმა შეადგინა 358 მლნ. ლარი და იმსხვერპლა 35 ადამიანი. ღვარცოფების მუდმივი საშიშროების ქვეშაა მოქცეული კახეთის კავკასიონის ქედის ძირში

განლაგებული დასახლებული პუნქტების მოსახლეობა და პირველ რიგში ქ. ყვარელი, ასევე რაჭისა და ზემო სვანეთის დასახლებული პუნქტები. ბოლო 100 წლის მანძილზე მდ. დურუჯის ხეობაში ღვარცოფების შედეგად 150- ზე მეტი ადამიანი დაიღუპა და უზარმაზარი ზარალი მიადგა ქ. ყვარელის მოსახლეობას.

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ქ. თბილისიც ღვარცოფული კატასტროფების მაღალი რისკის ზონაშია მოქცეული. ასე, მაგალითად, 2012 წლის მაისში უხვი ნალექის შედეგად ქ. თბილისში ტრანსფორმირებული ღვარცოფების შედეგად დაიღუპა 5 ადამიანი და დაინგრა რამდენიმე სახლი. მიყენებულმა ზარალმა 20 მლნ. აშშ დოლარს გადააჭარბა.

აქვე უნდა აღინიშნოს 2015 წლის 13 ივნისს მდ. ვერეს ხეობაში განვითარებული სტიქიური მოვლენა, რომელიც უკავშირდება მთელს აუზში (190 კმ²) განვითარებულ ძლიერ თავსხმა, ინტენსიურ წვიმას 4-5 საათის განმავლობაში, რომელიც შეადგენდა არანაკლებ 180 მმ-ს, იგი თბილისის ნალექების საშუალო მრავალწლიური რაოდენობის 35%-მდეა, რომლის შედეგად მოხდა მდინარის სწრაფად ადიდება და კალაპოტში ღვარცოფული ნაკადის ჩამოყალიბება. ქ. თბილისის ფარგლებში კატასტროფული მოვლენა არ განვითარდებოდა იმ შემთხვევაში, თუ არ მოხდებოდა წყალმოვარდნისა და ღვარცოფის ზედდება [62].

ზოგადად, ბუნებრივი კატასტროფების მძიმე შედეგები ძირითადად გამოწვეულია ხარჯ-ეფექტური პრევენციული ღონისძიებების დაგეგმვის და მათი განხორციელების ცოდნისა და გამოცდილების ნაკლებობით, მოსახლეობისა და ადგილობრივი მმართველობის დაბალი ცნობიერებით კატასტროფების რისკების მართვის საკითხებში, შეზღუდული რესურსების არაპრიორიტიზირებული განაწილებით [63].

აღსანიშნავია ისიც, რომ საქართველოში ჯერ კიდევ არ მოქმედებს სრულყოფილად სტიქიური მოვლენების შესახებ ადრეული შეტყობინების თანამედროვე სისტემა, ხოლო ფინანსური რესურსები ძირითადად

მიმართულია სტიქიური მოვლენების შედეგების აღმოფხვრაზე და ძალიან მცირედ პრევენციული ღონისძიებების განხორციელებაზე.

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, მეტად მნიშვნელოვანია ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობის მეცნიერული შესწავლა და შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირება-მშენებლობის დროს იმ საანგარიშო დამოკიდებულებების გათვალისწინება, რომელთა საშუალებითაც შესაძლებელია ღვარცოფების წარმოქმნის, ჩამოყალიბებისა და მოძრაობის პროცესის ყველაზე ზუსტად აღწერა.

1.4. ღვარცოფების მოძრაობის აღმწერი ძირითადი საანგარიშო დამოკიდებულებები

ღვარცოფულ მოვლენებთან ბრძოლა შრომატევადი და ეკონომიკურად ძვირი პროცესია. ღვარცოფული ნაკადების სტრუქტურის, ფორმირებისა და მოძრაობის პირობების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია ღვარცოფსაშიში აუზისთვის ღვარცოფისაგან დაცვის ეფექტური კომპლექსის შემუშავება, რომელიც უნდა მოიცავდეს როგორც ჰიდროტექნიკური ნაგებობებს, აგრეთვე ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებებს.

აღნიშნულ საკითხებზე მიძღვნილ მრავალრიცხოვან შრომათა შორის აღსანიშნავია ისეთი მეცნიერების თეორიულ-ექსპერიმენტული კვლევები როგორებიცაა მ. ა. ველიკანოვი, მ. ა. გაგოშიძე, ი. ვ. ეგიაზაროვი, ს. მ. ფლეიშმანი, ი. ი. ხერხეულიძე, ი. ბ. ვინოგრადოვი, ბ. ფ. პეროვი, მ. ჩ. ზალიხანოვი, ჟ. ბ. ბაინატოვი, ბ. მ. გოლდინი, ე. ვ. ზაპოროჟჩენკო, ო. გ. ნათიშვილი, კ. ნ. ნოსოვი, ა. ნ. ოლიფეროვი, ვ. ი. თევზაძე, გ. ი. ხერხეულიძე, დ. დ. წერეთელი, გ. ნ. ხმალაძე, ი. გ. ყრუაშვილი, ე. გ. კუხალაშვილი, ა. ი. შეკო, რ. ლ. შუსტერი, დ. რიკენმენი, მ. ზაპა, ტ. ტაკაჰაში და სხვ.

შრომებში მოცემულია იმ ძირითადი პარამეტრებისა მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდები, რომლების გათვალისწინება აუცილებელია როგორც ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირების, აგრეთვე ღვარცოფების პროგნეზირების დროს. შემუშავებული და შემოთავაზებულია შემდეგი სიდიდეების საანგარიშო დამოკიდებულებები: ღვარცოფების საშუალო სიმკვრივე და მათი მყარი შემადგენლით ზღვრული გაჯერება; სხვადასხვა სტრუქტურულ-რეოლოგიური ტიპის ღვარცოფის მაქსიმალური და საშუალო სიჩქარე; ღვარცოფებული ნაკადისა და გამონატანის მოცულობა; ღვარცოფული კალაპოტის დეფორმაციისადმი წინაღობა; ღვარცოფული ნაკადის წინააღმდეგობაზე დარტყმის ძალა და ა.შ.

ამასთან ერთად, სხვადასხვა ავტორის მიერ შემოთავაზებულია ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების გაანგარიშებისა და პროექტირების მეთოდები.

ღვარცოფების მოძრაობის სიჩქარე წარმოადგენს მისი დინამიკის განმსაზღვრელ უმნიშვნელოვანეს პარამეტრს. ღვარცოფული ნაკადის სიჩქარის განსაზღვრის გარეშე შეუძლებელია უმრავლესი საინჟინრო ამოცანის ამოხსნა, რომლებიც დაკავშირებულია ღვარცოფების რეგულირებასა და მათთან დაცვასთან.

ღვარცოფების მოძრაობის სიჩქარის განსაზღვრა ერთ-ერთ რთულ ამოცანას წარმოადგენს. საიმედო მეთოდებისა და დამოკიდებულებების შემუშავება სახვადასხვა სტრუქტურულ-რეოლოგიური ტიპისთვის შესაძლებელია მხოლოდ მრავალი ექსპერიმენტული მასალის დამუშავების საფუძველზე. მიუხედავად ამისა, პრაქტიკის მოთხოვნებიდან გამომდინარე, აუცილებელია, მიახლოებით მაინც, განსაზღვრულ იქნას ღვარცოფული ნაკადების სიჩქარეები.

რიგი მკვლევარის მიერ იყო მცდელობა მიეღოთ ღვარცოფული ნაკადების საშუალო სიჩქარეების საანგარიშო დამოკიდებულებები. როგორც წესი, ამ დამოკიდებულებების სტრუქტურა დაყრდნობილია შეზის

ფორმულაზე, რომელიც მიღებულია წყლის ნაკადის თანაბარი, დამყარებული მოძრაობისთვის. აღნიშნული დამოკიდებულების კორექტირებითა და სხვადასხვა პარამეტრების შეყვანით, რომლებიც ძირითადად ითვალისწინებენ ღვარცოფული ნაკადის მოძრაობისადმი წინააღმდეგობას, ავტორები ეცადნენ მიიღოთ ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობის ამსახველი მოდელები.

ღვარცოფული ნაკადის საშუალო სიჩქარის ამსახველი დამოკიდებულებებიდან ქვემოთ მოყვანილია ისინი, რომლებიც დიდ ყურადღებას იმსახურებენ.

ს. ფლეიშმანის მიერ შემოთავაზებულია ბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება, რომელიც ტალახოვანი შემადგენლის სიბლანტის ფუნქციას წარმოადგენს, ხოლო მნიშვნელობები ღვარცოფის ნარევის სიბლანტის მნიშვნელობებთან შედარებით გაცილებით ნაკლებია [18]:

$$\bar{V} = V_0(1 - a), \quad (1.4.1.)$$

სადაც $a = 0.09\sqrt{\eta - \eta_0} - \tan(3\eta) (\delta - 1)$;

- \bar{V} არის ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე;
- V_0 - ღვარცოფის გეომეტრიული ზომებით იდენტური წყლის ნაკადის სიჩქარე;
- η - საანგარიშო ეფექტური სიბლანტე;
- δ - ღვარცოფის მოცულობითი მასა.

$\frac{\bar{V}}{V} = f(\eta)$ -ის ანალიზით ავტორი ადასტურებს, რომ საანგარიშო დამოკიდებულების (1.4.1.) გამოყენების საზღვრები შეზღუდულია, მასში შემავალი სიბლანტის რეალურ მნიშვნელობებთან შედარებით ნაკლები სიდიდეების გამო.

მ. მოსტკოვის მიერ თეორიულად მიღებული იქნა ბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება დეფორმაციასა და დამაბულობას შორის კავშირის ამსახველი

რეოლოგიური განტოლების გამოყენების საფუძველზე. წარმოდგენილ დამოკიდებულებაში რეოლოგიური თვისებების ამსახველი ძირითადი პარამეტრი i^* წინააღმდეგობის ქანობის სახით ფუნქციონირებს, რომლის ჭეშმარიტი მნიშვნელობის დადგენა შესაბამისი მეთოდის დამუშავებით უნდა განხორციელდეს [64]:

$$\bar{V} = \frac{2}{\sqrt{3e}} \sqrt{\frac{(1-e)^3}{1-\frac{e}{2}}} \sqrt{g(i-i^*)}, \quad (1.4.2.)$$

სადაც e არის კოეფიციენტი, რომელიც გამოხატავს ნაკადში ქვის ჩანართისა და ნაკადის სიღრმის

ურთიერთთანაფარდობას. $e = d/h$;

i - კალაპოტის ძირის ქანობი;

i^* - მოძრაობის წინააღმდეგობის ქანობი;

g - სიმძიმის ძალის აჩქარება.

ი. ბ. ვინოგრადოვის მიერ მოძრაობის გამარტივებული მოდელის საფუძველზე, რომელშიც მოქმედი რეოლოგიური თვისებების განმსაზღვრელი პარამეტრები გასაშუალებული მნიშვნელობებითაა მიღებული, შემოთავაზებულ იქნა ბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის საანგარიშო შემდეგი სახის დამოკიდებულება [15]:

$$\bar{V} = \frac{2H^2}{3S} \left(\frac{F^2}{H^4} + \frac{S}{H} \right)^{3/2} - \frac{4H^3}{15S^2} \left[\left(\frac{F^4}{H^4} + \frac{S}{H} \right)^{5/2} - \frac{F^5}{H^{10}} \right] - \frac{F}{2H}, \quad (1.4.3.)$$

სადაც $F = \frac{\mu}{2\alpha\beta}$; $S = \frac{g \sin \alpha - \cos \alpha \tan \varphi}{\beta^3}$;

H არის ნაკადის სიღრმე;

φ - დინამიკური შინაგანი ხახუნის კუთხე;

g - სიმძიმის ძალის აჩქარება;

μ - სიბლანტის კოეფიციენტი;

α - ღვარცოფის მასის დახრის კუთხე;

β - სიმქისეზე დამოკიდებული კოეფიციენტი.

ი. ი. ხერხეულიძის მიერ ნატურული მონაცემების საფუძველზე მიღებული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება წარმოდგენილია შემდეგი სახით [20]:

$$\bar{V} = K \cdot L^{0.25} \cdot i^{0.42} \cdot Q^{0.125}, \quad (1.4.4.)$$

სადაც K არის კოეფიციენტი და იცვლება საზღვრებში $K = 1.5 \div 2.0$;

i - საშუალო საჰაერო ქანობი ღვარცოფის წარმოქმნის კერის ცენტრიდან საანგარიშო კვეთამდე;

Q - ღვარცოფის ძირითადი ტალღის საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯი;

L - ტალღის გარბენის სიგრძე.

მიუხედავად იმისა, რომ საანგარიშო დამოკიდებულება (1.4.4.) მიღებულია ნატურული მონაცემების საფუძველზე და ძირითადად სინამდვილეს შეესაბამება, მისი გამოყენების საზღვრები შეზღუდულია ბუნებაში ფიქსირებული ღვარცოფების უამრავი სახეობის გამო.

ო.გ. ნათიშვილის მიერ შემოთავაზებულია როგორც ბმული, აგრეთვე არამბმული ღვარცოფების საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები. ავტორი აღნიშნავს, რომ არამბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე კვეთში არის სიჩქარე, რომლითაც მოძრაობენ ნაკადის როგორც მყარი, აგრეთვე თხიერი ნაწილაკები და უზრუნველყოფენ მოცემულ ხარჯს განსაზღვრული საანგარიშო კუთრი წონის შემთხვევაში [65, 66].

ავტორი აღნიშნავს, რომ თუ ცნობილია ნაკადის ცალკეული ფაზების მოძრაობის სიჩქარე კვეთში, მაშინ არამბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე კვეთში გამოითვლება დამოკიდებულებით :

$$V_{საშ} = \frac{V_{საშ}^{მყ} S \rho_{მყ} - V_{საშ}^{თხ} (1 - S) \rho_{თხ}}{S \rho_{მყ} + (1 - S) \rho_{თხ}}, \quad (1.4.5.)$$

სადაც $V_{საშ}$ არის ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე კვეთში;

$V_{საშ}^{მყ}$ - ღვარცოფის მყარი შემადგენელის საშუალო

- სიჩქარე კვეთში;
- $V_{საშ.}^{თბ.}$ - ღვარცოფის თხიერი შემადგენელის საშუალო სიჩქარე კვეთში;
- $\rho_{მყ.}$ - ღვარცოფის მყარი შემადგენელის სიმკვრივე;
- $\rho_{თბ.}$ - ღვარცოფის თხიერი შემადგენელის სიმკვრივე.

აგრეთვე, ო. გ. ნათიშვილის მიერ, ბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის საანგარიშოდ, თანაბარი რეჟიმით მოძრაობის დროს კალაპოტის სწორკუთხოვანი განივი კვეთის შემთხვევაში, შემოთავაზებულია შემდეგი სახის დამოკიდებულება:

$$V = \frac{giH^2}{\nu} f(\beta), \quad (1.4.6.)$$

$$f(\beta) = \frac{\beta}{2}(\beta^2 - 1) + \frac{1}{3}(1 - \beta^3), \quad (1.4.7.)$$

- სადაც $\beta = \frac{h}{H}$ - ფარდობითი სიღრმე;
- h - ბმულ ღვარცოფში გულის (სტრუქტურული ნაწილის) სიმაღლე;
- H - ნაკადის სრული სიმაღლე;
- ν - ღვარცოფის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი;
- i - კალაპოტის ფსკერის ქანობი;
- $f(\beta)$ - კონკრეტული მნიშვნელობა. აიღება ცხრილი № 4-დან.

მიღებული განტოლებიდან ჩანს, რომ ბმული ღვარცოფის დაძვრა ეროზიის კერიდან მოხდება როდესაც:

$$\frac{H}{3} \left(1 - \frac{h^3}{H^3}\right) > \frac{h}{2} \left(1 - \frac{h^2}{H^2}\right), \quad (1.4.8.)$$

ანუ, $h < 0.9H$.

ძალთა დინამიკური წონასწორობის პირობიდან გამომდინარე და ბუნებაში აღებული ღვარცოფის მასის ნიმუშებზე ჩატარებული ექსპერიმენტების საფუძველზე, ზ. ს. იორდანიშვილის მიერ

შემოთავაზებულ საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს [67]:

$$\bar{V} = (14,6i \cdot h/B^4 - 0.346\sqrt{K/B})^{1,7}, \quad (1.4.9.)$$

- სადაც \bar{V} არის ნაკადის საშუალო სიჩქარე;
- δ - ღვარცოფის მოცულობითი მასა;
- h - ნაკადის სიღრმე;
- i - კალაპოტის ქანობი;
- K - ღვარცოფის კოლოიდური ნაწილის წონის შეფარდება მყარი ტანის წონასთან;
- B - წყლისა და მყარი ნაწილის წონების თანაფარდობა.

მიუხედავად იმისა, რომ კალაპოტურ პროცესებზე არსებობს მრავალგვარი სამეცნიერო ინფორმაცია, ღვარცოფთა ჰიდრაულიკური ამოცანების გადაწყვეტისას აუცილებელია ღვარცოფსაწინააღმდეგო ჰიდროტექნიკა დაფუძნებული იყოს ისეთი გაანგარიშების მეთოდებზე, რომელიც სრულად ასახავს მათ ბუნებას.

II თავი

ბმული ღვარცოფების ჩამოყალიბებისა და მოძრაობის თეორიული კვლევა

2.1. ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის წონასწორობის რღვევის კვლევა და მათი საანგარიშო დამოკიდებულებებით აღწერის მეთოდების დამუშავება ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით

ღვარცოფული კერა წარმოადგენს ღვარცოფული კალაპოტის ან აუზის მონაკვეთს სადაც ხდება ფხვიერმონატეხი გრუნტის დაგროვება და წყლით გაჯერების დროს წარმოიქმნება ღვარცოფები.

ღვარცოფული კერების პარამეტრების ცვლილების კანონზომიერების დადგენა და გაანგარიშების მეთოდების სრულყოფა ისეთ ოპერატიულ საშუალებებს მოითხოვს, რომლის გამოყენებით სრულყოფილად აღწერილი იქნება მასში განთავსებული ღვარცოფული მასის მდგრადობის ღვევისა და დაძვრის პროცესის მექანიზმი.

ამასთან ერთად, კერიდან ღვარცოფის დაძვრა მრავალი ურთიერთმართვადი ფაქტორების ფუნქციას წარმოადგენს და პროცესის მექანიზმის სრულად წარმოდგენა გარკვეული კატეგორიის შუალედური ამოცანების გადაწყვეტის აუცილებლობას საჭიროებს.

შუალედურ ამოცანათა შორის განსაკუთრებული ადგილი წონასწორობის რღვევის კვლევას და მათი მათემატიკური მოდელირების საკითხების საზუსტებას უკავია. ღვარცოფული ტანის წონასწორობის რღვევის შეფასების დროს პირველი მიახლოებით შეიძლება გამოყენებულ იქნას ხარისხობრივი ფუნქციები. კვლევის ძირითად მიზანს ღვარცოფულ კერაში დაგროვილი ღვარცოფწარმოქმნელი მასის მოძრაობის დაწყების

სიჩქარის, სიმაღლის და ხარჯის დროსთან კავშირში ცვლილების კანონზომიერების დაზუსტება წარმოადგენს.

როგორც ბუნებაში ჩატარებული კვლევის მონიტორინგის მასალები ადასტურებს, კერებში ჩამოყალიბებული ღვარცოფწარმომქმნელი მასის ზღვრული წონასწორულ მდგომარეობის შესაძლო დარღვევის დროს ჩამომეწყრილ და ნარჩენ მასას შორის გამავალი ზედაპირების წირი არის არაწრფივი და მისი მრუდწირულობა ფიზიკურ-მექანიკურ და რეოლოგიურ მახასიათებლებთან არის დაკავშირებული.

ზემოთ აღნიშნული და კვლევის არსებული მასალები, სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით, ადასტურებს, რომ ღვარცოფის მასის დაძრვა, მისი მახასიათებლების ცვლილების პროგნოზირების შესწავლის დონე, მიუხედავად პრობლემისადმი მიძღვნილი უამრავი სამეცნიერო შრომებისა, იმდენად დაბალია, რომ საპროექტო დაწესებულებები და სამშენებლო ორგანიზაციები დღესაც განიცდიან საიმედო რეკომენდაციების დეფიციტს ღვარცოფსაწინააღმდეგო პროექტების გადაწყვეტის დროს.

ღვარცოფულ კერებში, ეროზიულ ღრანტებში, გამოტანის კონუსებზე განთავსებული ღვარცოფული მასის ბმული მდგომარეობის შესწავლის სურათიდან გამოვლინდა ზღვრულ წონასწორობაში მყოფი ღვარცოფის ზედაპირზე გამავალი წირის მრუდის ფორმა. აღმოჩნდა, რომ ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიღრმესა და გავრცელების ზონის სიგრძეს შორის კავშირი მრუდწირულია და მისი ფორმის ნათლად წარმოჩენის მიზნით ეს კავშირი შეიძლება აღწერილ იქნას ხარისხობრივი დამოკიდებულებით, რომელსაც შემდეგი სახე აქვს [68, 69]:

$$Y = ax^b, \quad (2.1.1.)$$

სადაც: a და b არის კოეფიციენტი და ხარისხის მაჩვენებელი, რომელთა სიდიდე ღვარცოფთა რეოლოგიურ და ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებთანაა უშუალოდ

დაკავშირებული;

Y - ჩამომეწყვრის სიღრმის ცვლილების კოორდინატი (მ);

x წონასწორული ზედაპირის გავრცელების ზონის სიგრძე (მ).

ჩამომეწყვრილი ფართობის სიდიდე, როცა $a > 0, b > 0$ და $x = L$ შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$S = LaL^b - \int_0^L ax^b dx = aL^{1+b} - \frac{aL^{1+b}}{1+b}. \quad (2.1.2.)$$

დამოკიდებულებაში 2.1.1., როცა $Y = H, x = L$ და $H = aL^b$, და (2.1.2.)-ში L -ის სიდიდეს თუ გამოვსახავთ ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიღრმით H -ით, გვექნება:

$$S = \frac{ab}{1+b} \left(\frac{H}{a} \right)^{\frac{1+b}{b}} = \frac{b}{(1+b)a^{\frac{1}{b}}} H^{\frac{1+b}{b}}. \quad (2.1.3.)$$

როცა კერის სიგანე 1-ის ტოლია, W ჩამომეწყვრის მოცულობა შეიძლება გაანგარიშებულ იქნას ფორმულით:

$$W = \frac{b}{(1+b)a^{\frac{1}{b}}} H^{\frac{1+b}{b}}. \quad (2.1.4.)$$

თეორიული კვლევებით მიღებულია, რომ როცა ტალღის სიმაღლე უმნიშვნელოა, ღვარცოფული კერიდან დაძრული მასის საანგარიშო დამოკიდებულებას ბრტყელი ნაკადის შემთხვევაში შემდეგი სახე აქვს:

$$q = H^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \phi g}. \quad (2.1.5.)$$

შესაბამისად, დაძრული მასის მოცულობის სიდიდეს t დროის გათვალისწინებით იქნება:

$$W = tH^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \rho g}. \quad (2.1.6.)$$

თუ (2.1.6.)-ს გავუტოლებთ (2.1.4.)-ს, გვექნება:

$$\frac{b}{a^{\frac{1}{b}}(1+b)} H^{\frac{1+b}{b}} = tH^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \rho g}. \quad (2.1.7.)$$

ტოლობაში (2.1.7), როცა $t = t_0$, შეიძლება განსაზღვრულ იქნას დაძვრის t_0 -ის, სიდიდე:

$$t_0 = \frac{b}{a^{\frac{1}{b}}(1+b) \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \rho g}}. \quad (2.1.8.)$$

დამოკიდებულებაში (2.1.8.) t_0 დროის განსაზღვრა სპეციალური კვლევების ან ექსპერიმენტების ჩატარებას საჭიროებს.

აღსანიშნავია, რომ ღვარცოდწარმოქმნელ კერებში მასის წონასწორობის მდგომარეობის განმსაზღვრელი ფაქტორები განსაკუთრებულ გავლენას ახდენს მოძრაობის დაწყებაზე და დაძვრული მასის მახასიათებლების დროში ცვლილების კანონზომიერებებზე.

კვლევის არსებული სტატისტიკური მასალების საფუძველზე ღვარცოფსაცავებში ჩამოყალიბებული ღვარცოფის მასის გარღვევის შემთხვევაში მისი მახასიათებლების ცვლილება, კერძოდ, მოცულობის დროსთან კავშირი შეიძლება აღწერილ იქნას დიფერენციალური განტოლებით, ე.ი., მოცულობის ცვლილების პროგნოზირების დროს სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით აღნიშნული პროცესის საანგარიშოდ შერჩეულ მოდელს აქვს სახე:

$$\frac{dW}{dt} = -q, \quad (2.1.9.)$$

სადაც: q არის ღვარცფოდსაცავთან დაძვრული ნაკადის ხარჯი ($m^3/წმ$);

t - ღვარცოფსაცავის დაცლის დრო (წმ).

რადგან ღვარცოფსაცავიდან დაძრული მასის მოცულობა დროისა და ხარჯის ნამრავლის ფუნქციას წარმოადგენს, ე.ი.;

$$dw = d(qt) = qdt + tdq. \quad (2.1.10.)$$

(2.1.10.) დამოკიდებულების ინტეგრირების საფუძველზე გვექნება:

$$-2\ln t = \ln q + c. \quad (2.1.11.)$$

განტოლებაში (2.1.11.), როცა: $t = t_0$, $W = W_0$, $q = q_0$, $c = 2\ln t_0 + \ln q_0$, მივიღებთ:

$$\left(\frac{t}{t_0}\right)^2 = \frac{q}{q_0}. \quad (2.1.12.)$$

როგორც განტოლება (2.1.4.) გვიჩვენებს, ღვარცოფსაცავიდან ჩამომეწყრილი მყარი მასის მოცულობას სიღრმესთან ხარისხობრივი დამოკიდებულება გააჩნია. თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას $\frac{b}{(1+b)a^{\frac{1}{b}}} = A$ და

$\frac{1+b}{b} = K - 1$, მივიღებთ:

$$W = AH^K. \quad (2.1.13.)$$

განტოლებაში (2.1.13.), როცა $t = t_0$, მაშინ $W = W_0$, $H = H_0$ და $q = q_0$; როცა დრო t -ს ტოლია, მაშინ $W = W_t$, $H = H_t$ და $q = q_t$.

დაშვების შესაბამისად, ღვარცოფწარმომქმნელი მასის მოცულობის ცვლილება სიღრმესთან კავშირში მიიღებს სახეს:

$$W_0 = AH_0^K, \quad (2.1.14.)$$

$$W_t = AH_t^K. \quad (2.1.15.)$$

შესაბამისად, დაძრული მასის ხარჯების საანგარიშო დამოკიდებულებებს ექნება სახე:

$$q_0 = \frac{AH_0^K}{t_0}, \quad (2.1.16.)$$

$$q_t = \frac{AH_t^K}{t}. \quad (2.1.17.)$$

(2.1.16.)-ისა და (2.1.17.)-ის გათვალისწინებით (2.1.12.)-ში, გვექნება:

$$t = t_0 \left(\frac{H_0}{H_t} \right)^K. \quad (2.1.18.)$$

ღვარცოფულ მასაში წნევის სიღრმეზე განაწილების თავისებურებიდან გამომდინარე მიღებულია, რომ:

$$P = \frac{\gamma H^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H} \right)^2 \varphi. \quad (2.1.19.)$$

(2.1.19.) განტოლების ორივე მხარეს თუ გავყოფთ γ -ზე, მივიღებთ ზღვრული წონასწორული მდგომარეობის შესაბამის ღვარცოფის მოცულობას:

$$W = \frac{H_0^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)^2 \varphi. \quad (2.1.20.)$$

საწყის მომენტში, როცა $t = t_0$, ღვარცოფის დაძრული მასის შესაბამისი ხარჯის სიდიდეს ექნება სახე:

$$q_0 = \frac{H_0^2}{2t_0} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)^2 \varphi. \quad (2.1.21.)$$

ხოლო t მომენტისათვის უწყვეტობის საფუძველზე, ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$q_t = \frac{H_t^2}{2t} \left(1 - \frac{h_0}{H_t} \right)^2 \varphi. \quad (2.1.22.)$$

განტოლებას (2.1.21.) თუ გავუტოლებთ (2.1.5.)-ს, მივიღებთ:

$$H_0^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right) \phi g} = \frac{H_0^2}{2t_0} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^2 \phi. \quad (2.1.23.)$$

(2.1.23.) განტოლებიდან t_0 დრო, რომელიც დაძვრის საწყის მომენტს შეესაბამება, ტოლი იქნება:

$$t_0 = \frac{1}{2} H_0^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right) \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right) \frac{\phi}{g}}. \quad (2.1.24.)$$

განტოლებიდან (2.1.18.) t დროის შესაბამისი H_t ღვარცოვის სიღრმის საანგარიშო დამოკიდებულებას ენება სახე:

$$H_t = H_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{1}{K}}. \quad (2.1.25.)$$

(2.1.24.)-ის გათვალისწინებით (2.1.25.)-ში, გვექნება:

$$H_t = \left(\frac{1}{2t}\right)^{\frac{1}{K}} H_0^{\frac{1+2K}{2K}} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^{\frac{3}{2K}} \left(\frac{\phi}{g}\right)^{\frac{1}{2K}}. \quad (2.1.26.)$$

დაძვრული მასის ხარჯის დროსთან კავშირი გამოისახება ფორმულით:

$$q_t = \left(\frac{1}{t}\right)^2 \frac{\phi}{2} H_0^{\frac{1+2K}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^7 \frac{\phi}{g}}. \quad (2.1.27.)$$

ხოლო დაძვრული მასის სიჩქარის დროსთან კავშირს ექნება სახე:

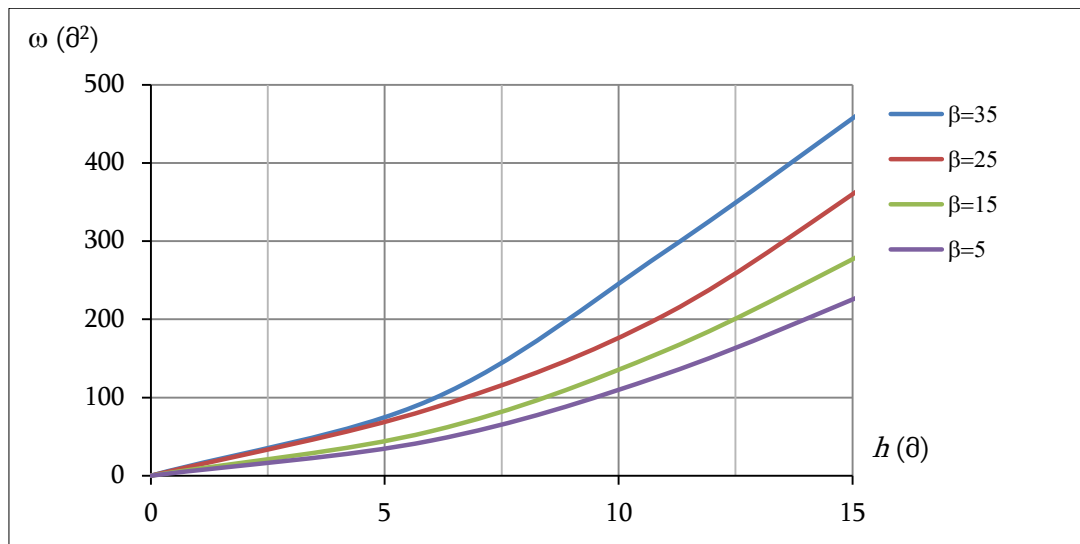
$$V_t = \left(\frac{1}{2t}\right)^{\frac{2K-1}{K}} \phi H_0^{\frac{2K^2-K-1}{2K}} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^{\frac{7K-3}{2K}} \left(\frac{\phi}{g}\right)^{\frac{K-1}{K}}. \quad (2.1.27.)$$

თეორიულად A -ს მნიშვნელობა $A = \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^2 \phi$ -ს, ხოლო $K = 2$ -ს.

A -სა და K -ს მიღებული მნიშვნელობების სიზუსტის შემოწმების მიზნით

მიზანშეწონილად მივიჩნიეთ გვესარგებლა საველე ექსპერიმენტული კვლევის მასალებით.

ექსპერიმენტული კვლევის მასალად გამოყენებულ იქნა მდ. არაგვის ღვარცოფული ხასიათის შენაკადებზე ნაკადის გავლის შედეგად გამოტანილი მყარი მასალის მონაცემები, რადგან ეს შენაკადები ღვარცოფების შესწავლის თვალსაზრისით კლასიკურ ხასიათს ატარებს. მათ მიერ ღვარცოფული გამოტანის მასის ფორმები, ე.ი., ჩამომეწყრილი ფართობების კავშირის სახე მის შინაგანი ხახუნის კუთხესთან გრაფიკების სახით მოცემულია ნახაზზე 2.1.



ნახ. 2.1. გრაფიკი დამოკიდებულება $\omega = f(H)$, როცა $\gamma = 2$ (ტ/მ³) და

1. $\varphi = 35^\circ$; 2. $\varphi = 25^\circ$; 3. $\varphi = 15^\circ$; 4. $\varphi = 5^\circ$.

უმცირეს კვადრატთა მეთოდის გამოყენებით β შინაგანი ხახუნის კუთხის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის ჩამომეწყვერვის ფართობის სიმაღლესთან კავშირი გამოისახება დამოკიდებულებებით:

$$S_1 = 1.68H^{1.82}, \quad \text{როცა } \beta = 35^\circ; \quad (2.1.29.)$$

$$S_1 = 2.04H^{1.82}, \quad \text{როცა } \beta = 25^\circ; \quad (2.1.30.)$$

$$S_1 = 2.61H^{1.82}, \quad \text{როცა } \beta = 15^\circ; \quad (2.1.31.)$$

$$S_1 = 3.37H^{1.82}, \quad \text{როცა } \beta = 5^\circ. \quad (2.1.32.)$$

მიღებული განტოლებების საფუძველზე, შესაბამისად, K -ს მნიშვნელობა $K = 1.81$, ხოლო A -ს საანგარიშო დამოკიდებულებას აქვს სახე:

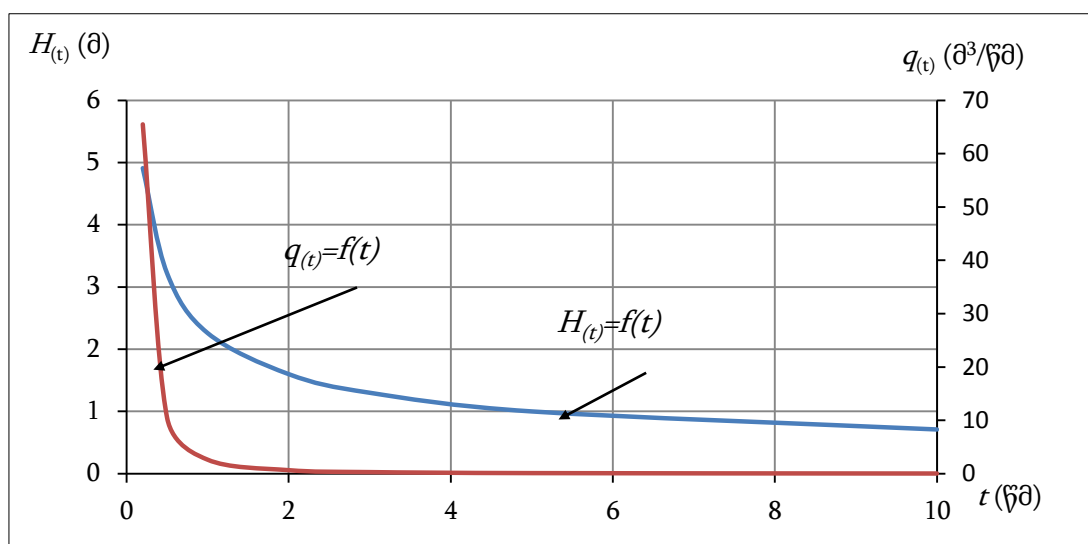
$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + 0,625tg\beta}{0,08 + 0,55tg\beta} \right)^{0,64} \quad (2.1.33.)$$

კვლევის შედეგებმა დაადასტურა, რომ თეორიულად და ექსპერიმენტული მასალის საფუძველზე მიღებულ K -ს მნიშვნელობებს შორის განსხვავება არ აღემატება 10%-ს, ე.ი., თუ თეორიულად მიღებულ A -სა და K -ს მნიშვნელობებს გავითვალისწინებთ (2.1.26.), (2.1.27.) და (2.1.28.) განტოლებებში, მივიღებთ:

$$H_t = \sqrt{\frac{1}{2t}} H_0^{1,25} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)^{0,75} \left(\frac{\varphi}{g} \right)^{0,25}, \quad (2.1.34.)$$

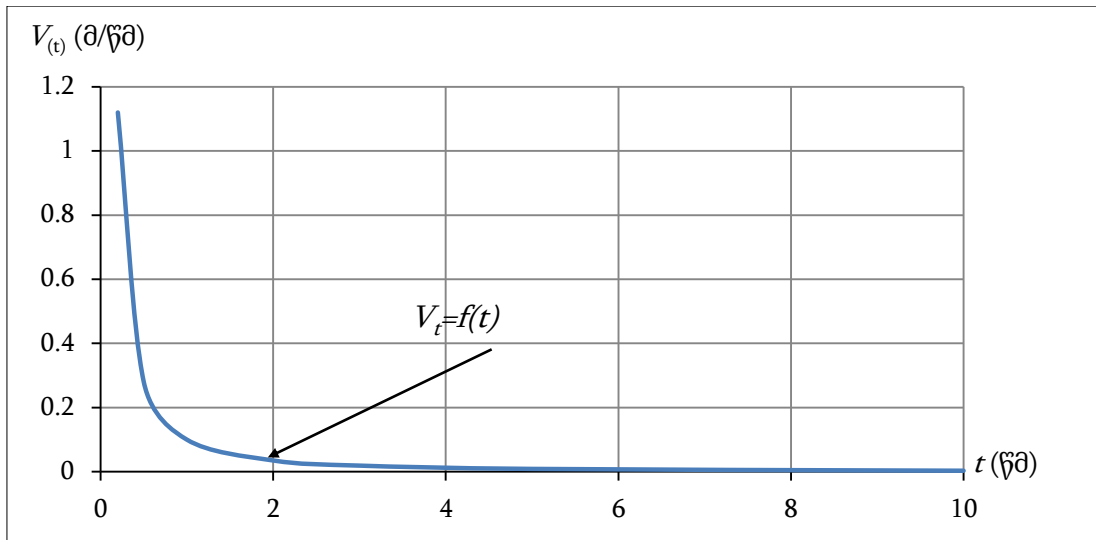
$$q_t = \left(\frac{1}{2t} \right)^2 H_0^{2,5} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)^{3,5} \sqrt{\frac{\varphi}{g}}, \quad (2.1.35.)$$

$$V_t = \frac{\varphi}{(2t)^{1,5}} H_0^{0,25} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)^{2,75} \left(\frac{\varphi}{g} \right)^{0,25}. \quad (2.1.36.)$$



ნახ. 2.2. გრაფიკი-დამოკიდებულება $H(t) = f(t)$ და $q(t) = f(t)$,

როცა $H_0 = 5\text{ მ}$, $\rho = 15^\circ$ და $h_0 = 0,5\text{ მ}$.



ნახ. 2.3. გრაფიკი-დამოკიდებულება $V(t) = f(t)$,

როცა $H_0 = 5\text{მ}$, $\rho = 15^\circ$ და $h_0 = 0,5\text{მ}$.

თვალსაჩინოების მიზნით ქვემოთ მოცემულია გრაფიკული დამოკიდებულებები $H = f(t)$, $q = f(t)$ და $V = f(t)$ (იხ. ნახ. 2.2, 2.3).

წარმოდგენილი გრაფიკული ილუსტრაციები გვიჩვენებს, რომ ღვარცოფის ხარჯის, სიღრმის და სიჩქარის დროსთან კავშირი პარაბოლური ხასიათისაა და რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილებით ისინი ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავებულია. როცა, ბმულობის ექვივალენტური სიღრმე იზრდება, ადგილი აქვს ამ პარამეტრების სიდიდეთა მნიშვნელოვან შემცირებას, ხოლო შინაგანი ხახუნის კუთხის ზრდით მოვლენის სურათს შებრუნებული სახე გააჩნია [70].

2.2. არასტაციონარობის საფუძველზე ღვარცოფული კერის მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერების განსაზღვრა

ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინართა სათავის ზემო ნაწილში განლაგებულია ღვარცოფწარმომქმნელი კერები, რომელიც ეროზიული დრატების ჩადაბლებულ ადგილს წარმოადგენს. მისი ციცაბო ფერდობზე მიმდინარე გამოფიტვის მოვლენებისა და ეროზიული პროცესებით ერთმანეთზე ფენების დადებით, გროვდება კერებში ღვარცოფის მასა.

ბმული ღვარცოფის ტალღური სახით მოძრაობის მოდელი შეიძლება დახასიათდეს იმისდა მიხედვით, ტალღის ფრონტი უძრავია, თუ მისი გავრცელების სიჩქარე მეტია ან ნაკლებია ნაკადის მოძრაობის სიჩქარეზე. ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, ტალღის გავრცელების სიჩქარის მიხედვით შეიძლება შეფასდეს ღვარცოფული მასის კრიტიკული მძაფრი და წყნარი მდგომარეობა.

ღვარცოფებთან ბრძოლის კვლევის სადღეისო მონაცემები და არსებული სტატისტიკური მასალების ანალიზი ადასტურებს, რომ ღვარცოფწარმოქმნელი კერებიდან ფორმირებული მაღალი სიმკვრივის ნაკადების და თვით კერის მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერება, კერძოდ, კერის სიღრმის, დაძრული მასის ხარჯის და სიჩქარის დროში ცვლილების პროგნოზი, დაცვითი ღონისძიებების შერჩევასა და კატასტროფებისაგან გაუვნებელყოფის ერთ-ერთ განმსაზღვრელ პირობას წარმოადგენს [69, 71].

ღვარცოფსაცავის ტალღურად გარღვევის შემთხვევაში, ქვედა ბიეფში ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობის კანონზომიერების შეფასების დროს, შეიძლება გამოყენებულ იქნას სენ-ვენანის ერთგანზომილებიანი დიფერენციალური განტოლებები, რომელთა ამოხსნის დროს დაკმაყოფილებული უნდა იყოს შემდეგი პირობები:

1. სიჩქარის გრძივ მდგენელთან შედარებით, ვერტიკალურის უმნიშვნელობის გამო მათი პროცესებზე გავლენა მხედველობაში არ მიიღება;
2. ღვარცოფის სიღრმის გრძივ ტალღასთან შედარებით, არცთუ ისე დიდი მნიშვნელობის გამო, წნევის ცვლილება ემორჩილება ჰიდროსტატიკის კანონებს;
3. სადაწნეო ფრონტის გარღვევის შემთხვევაში ენერგიის დანაკარგი წინააღმდეგობების გათვალისწინებით თანაბარი მოძრაობის ადეკვატურად შეიძლება იქნას მიღებული.

ღვარცოფსაცავის უეცარი გარღვევის შემთხვევაში, გადმოდინებული ხარჯის განგარიშების დროს მართებულია შემდეგი სახის განტოლების გამოყენება:

$$\frac{dW}{dt} = -q, \quad (2.2.1.)$$

სადაც: q არის ღვარცოფსაცავიდან გადმოდინებული ხარჯის სიდიდე ($\text{მ}^3/\text{წმ}$);

W - ღვარცოფსაცავის მოცულობა (მ^3);

t - ღვარცოფსაცავის დონის დაწვევის ხანგრძლივობა (წმ).

ღვარცოფსაცავის უეცარი გარღვევის მომენტში პროცესი შემდეგნაირად შეიძლება დახასიათდეს: როცა $t = 0$, დაძრული მოცულობა W -ის, ხოლო გარღვევის შემდეგ მისი მნიშვნელობა $W(t)$ -ს ტოლია.

გარღვეულ კვეთში ღვარცოფის ღვარცოფსაცავიდან გადმოდინებას თუ წარმოვიდგენთ, როგორც ანალოგს ფართე ზღურბლიან წყალსაშვზე წყლის გადადინებისა, მაშინ დაძვრის პროცესის დროის მცირე dt მონაკვეთში ღვარცოფსაცავის სიღრმე მცირდება dH სიდიდით. ასეთ პირობებში გარღვეულ კვეთში გადმოდინებული ღვარცოფის მოცულობა ΩdH -ის, ხოლო ღვარსაშვზე H_0 -ის ტოლი იქნება. სტაციონარული პროცესის შესაბამისად, ღვარცოფის ხარჯის საანგარიშოდ შეიძლება გამოყენებულ იქნას ფორმულა:

$$q = mb\sqrt{2gH_0^{3/2}}, \quad (2.2.2.)$$

სადაც: b არის ღვარცოფის გარღვეული ნაწილის სიგანე (მ);

m - ხარჯის კოეფიციენტი;

H_0 - ჩამოყალიბებული ღვარცოფის მასის სიმაღლე კერის დასაწყისში (მ);

g - სიმძიმის ძალის აჩქარება ($\text{მ}/\text{წმ}^2$).

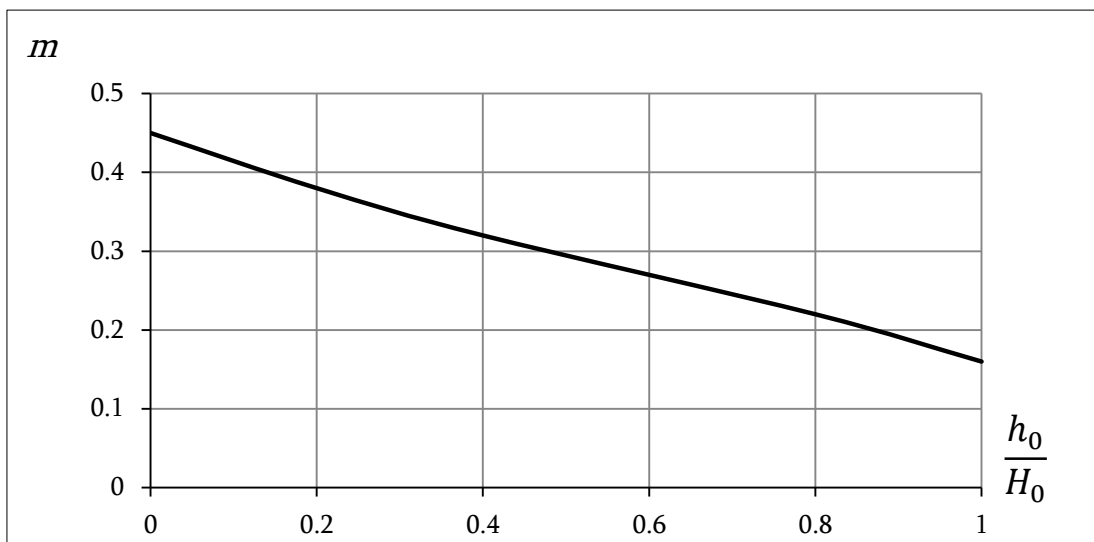
ჩატარებული კვლევების საფუძველზე, ღვარცოფის ხარჯის კოეფიციენტის საანგარიშოდ სიჩქარის Ψ კოეფიციენტის ბმულობის ექვივალენტური h_0 სიღრმისა და შინაგანი ხახუნის β კუთხესთან კავშირში, მიღებულია შემდეგი სახის დამოკიდებულება:

$$m = \Psi \frac{2\Psi^2 - \varphi \frac{h_0}{H_0}}{2\Psi^2 + \varphi} \sqrt{\frac{1 - \varphi \frac{h_0}{H_0}}{2\Psi^2 + \varphi}}. \quad (2.2.3.)$$

არასტაციონარული პროცესების დროს ტალღის გავრცელების ხარჯის საანგარიშო ფორმულის მიხედვით, ხარჯის კოეფიციენტის საანგარიშო დამოკიდებულებებს, როცა კერის დახრის კუთხე არის 0, შემდეგი სახე აქვს:

$$m = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)} \varphi \cos \theta. \quad (2.2.4.)$$

რადგან, m წარმოდგენილია რთული ფუნქციის სახით, სტაციონარული პროცესის შემთხვევაში, როცა $\varphi = 1$, m -ის $\frac{h_0}{H_0}$ -თან დამოკიდებულება მათი სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს მოცემულია გრაფიკის სახით (ნახ. 2.4.).



ნახ. 2.4. $m = f\left(\varphi \frac{h_0}{H_0}\right)$ გრაფიკული დამოკიდებულება

იმ შემთხვევაში, როცა ღვარცოფწარმოქმნილი კერა ოთხკუთხა პრიზმის სახით არის წარმოდგენილი, (2.2.1.) განტოლება შემდეგნაირად შეიძლება წარმოვადგინოთ:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dH} \frac{dH}{dt} = \Omega \frac{dH}{dt}, \quad (2.2.5.)$$

სადაც: Ω არის ღვარცოფსაცავის ხარჯის ზედაპირის ფართობი და

$$\omega(H) = \Omega.$$

განგარიშების გაადვილების მიზნით, თუ ვაწარმოებთ აპროქსიმაციას ღვარცოფსაცავისას გეომეტრიულად ოთხკუთხა პარალელებიპედთან, როცა $\Omega = const$, შეიძლება დავწეროთ შემდეგი სახის დამოკიდებულება:

$$W(H) = \Omega H. \quad (2.2.6.)$$

(2.2.6.) დამოკიდებულებიდან გამომდინარე, (2.2.1.) განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\Omega \frac{dH}{dt} = -q. \quad (2.2.7.)$$

ღვარცოფსაცავიდან ჩამომეწყრილი ღვარცოფული მასის ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულება, როცა ტალღის სიმაღლე H -ის ტოლია:

$$q = bH \sqrt{H \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)} \rho g \cos \theta, \quad (2.2.8.)$$

- სადაც: b არის ღვარცოფსაცავის გარღვეული ნაწილის სიგანე(მ.);
 H - ღვარცოფსაცავიდან წარმოქმნილი ნაკადის სიმაღლე (მ.);
 h_0 - ბმულობის შინაგანი ხახუნის კუთხე;
 φ - კოეფიციენტი და შინაგანი ხახუნის კუთხის ფუნქციას წარმოადგენს;

- g - სიმძიმის ძალის აჩქარება (მ/წმ².);
 $\cos\theta$ - ღვარცოფსაცავის ფუძესთან დახრის კუთხე.

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას $K = \frac{h_0}{H}$, გავამარტივებთ და გარდაავქმნით (2.2.8.) განტოლებას, მივიღებთ:

$$q = \sqrt{\frac{1-K}{2}} \varphi \cos\theta b \sqrt{2gH}^{3/2}. \quad (2.2.9.)$$

(2.2.9.)-ის გათვალისწინებით (2.2.7.)-ში, გვექნება:

$$\Omega \frac{dH}{dt} = -\sqrt{\frac{(1-K)}{2}} \varphi \cos\theta b \sqrt{2gH}^{3/2}. \quad (2.2.10.)$$

ცვლადთა განცალგებით და გარდაქმნებით (2.2.10.) განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\frac{dH}{H^{3/2}} = -\frac{\sqrt{\frac{(1-K)}{2}} \varphi \cos\theta b \sqrt{g} dt}{\Omega}. \quad (2.2.11.)$$

(2.2.11.) განტოლების ინტეგრირების საფუძველზე გვექნება:

$$H = \left(\frac{\sqrt{(1-K)\varphi \cos\theta g b t}}{2\Omega} + c \right)^2. \quad (2.2.12.)$$

ინტეგრირების მუდმივა განისაზღვრება განტოლებით:

$$\frac{1}{\sqrt{H}} = \left(\frac{\sqrt{(1-K)\varphi g b t}}{2\Omega} + c \right), \quad (2.2.13.)$$

როცა $t = 0$, $W = W_0$, $H = H_0$ და $c = \frac{1}{\sqrt{H_0}}$.

ინტეგრირების მუდმივას განსაზღვრის შემდეგ, (2.2.13.) განტოლება, სიღრმის ცვლილების კანონზომიერება $H = f[H(t)]$ ღვარცოფსაცავის დაცლისა დროში, მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$H_{(t)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{H_0}} + \frac{\sqrt{(1-K)\varphi g \cos\theta b t}}{2\Omega} \right)^2} \quad (2.2.14.)$$

შესაბამისად, ღვარცოფის ხარჯი იქნება:

$$q_{(t)} = \sqrt{(1-K)\rho g \cos\theta} b \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{H_0}} + \frac{\sqrt{(1-K)\rho g \cos\theta} b t}{2\Omega}\right)^3}. \quad (2.2.15.)$$

ხოლო საშუალო სიჩქარის დროში ცვლილებას ექნება შემდეგი სახე:

$$V_{(t)} = \frac{q_{(t)}}{H_{(t)}} = \frac{\sqrt{(1-K)\rho g \cos\theta}}{b \left(\frac{1}{\sqrt{H_0}} + \frac{\sqrt{(1-K)\rho g \cos\theta} b t}{2\Omega}\right)}. \quad (2.2.16.)$$

მიღებული (2.2.14.), (2.2.15.) და (2.2.16.) დამოკიდებულებები წარმოადგენს ღვარცოფსაცავის შესაძლო გარღვევის შემთხვევაში მისი მახასიათებლების დროში ცვლილების პარამეტრებს.

პარამეტრების $H_{(t)} = f(t)$, $q_{(t)} = f(t)$ და $V_{(t)} = f(t)$ ცვლილებების კანონზომიერების სურათი, როცა ღვარცოფსაცავში დაგროვილი მასის სიმაღლე $H = 3.0$ მ-ს, $b = 100$ მ-ს, სარკის ზედაპირის ფართობი $\Omega = 6000$ მ²-ს, კერის სიგრძე $L = 60$ მ-ს, $\theta = 0^\circ$ -ს, $K = 0.5$, $\beta = 30^\circ$, $\varphi = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{3}{2}\right) = 0.33$, ღვარცოფსაცავის მოცულობა $W = 18000$ მ³-ს, ღვარცოფის ფუძის დახრის კუთხე $\theta = 0^\circ$ -ს და $\cos\theta = 1.1$, შინაგანი ხახუნის კუთხე $\varphi = 30^\circ$ -ს, შესაბამისად $\varphi = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{3}{2}\right) = 0.33$ და

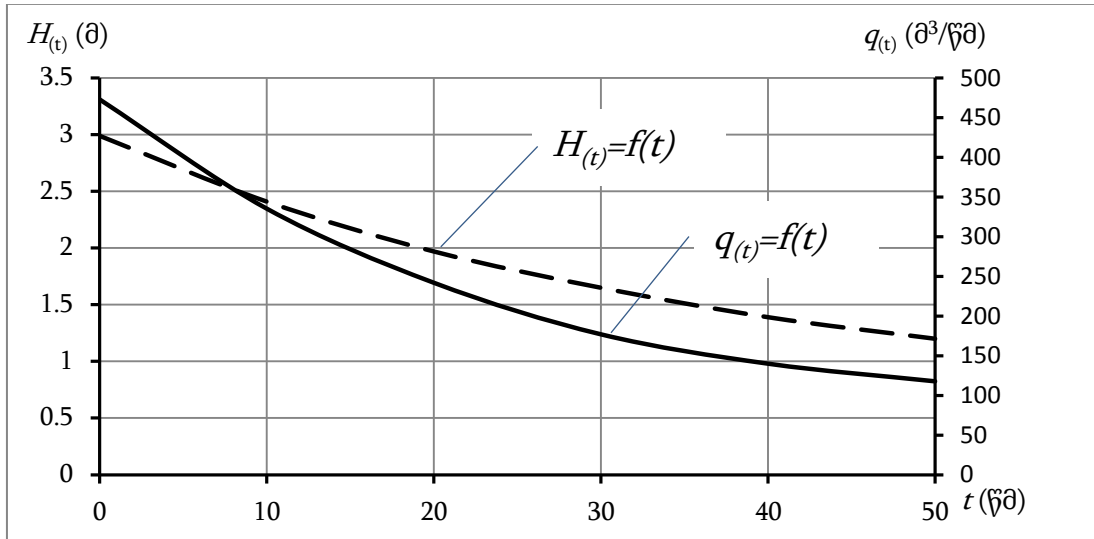
$$K = \frac{\sqrt{\varphi} - 1}{\sqrt{\varphi} = 0.75}.$$

მოცემული მნიშვნელობების (2.2.14.), (2.2.15.) და (2.2.16.) ფორმულებში შეტანით, პარამეტრების ცვლილების სურათი წარმოდგენილია ქვემოთ მოყვანილ განტოლებებში, რომელთა გრაფიკული ილუსტრაცია მოცემულია ნახაზებზე 2.5 და 2.6.

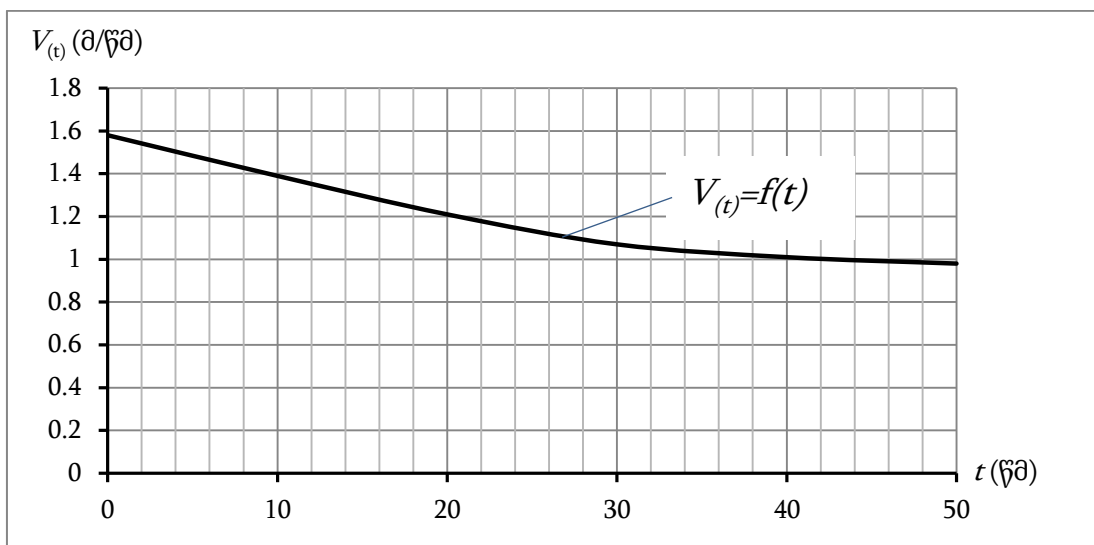
$$H_{(t)} = \frac{1}{(0.578 + 0.0067t)^2}; \quad (2.2.17.)$$

$$q_{(t)} = 89.9 \left(\frac{1}{0.578 + 0.0067t} \right)^3; \quad (2.2.18.)$$

$$V_{(t)} = \frac{q_{(t)}}{H_{(t)}}. \quad (2.2.19.)$$



ნახ. 2.5. $H_{(t)} = f(t)$ და $q_{(t)} = f(t)$ დამოკიდებულების გრაფიკები



ნახ. 2.6. $V_{(t)} = f(t)$ დამოკიდებულების გრაფიკი

თეორიული კვლევების შედეგად, არასტაციონარობის საფუძველზე, მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული

მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები [72].

მიღებული (2.2.17.), (2.2.18.) და (2.2.19.) დამოკიდებულებების საფუძველზე, ზემოთ მოცემული პარამეტრების შემთხვევაში, 2.5 და 2.6 ნახაზებზე გრაფიკულად მოცემული ღვარცოფის მოძრაობის დროში ცვლილების კანონზომიერება ტალღის გავრცელების ზონაში, საშუალებას იძლევა შეირჩეულ იქნას შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.

2.3. ბმული ღვარცოფის მოძრაობის მათემატიკური მოდელი

ღვარცოფების მოძრაობის პირობებისა და სხვა მოვლენებისაგან განსხვავებულობის გამო, საანგარიშო მოდე ლების შერჩევა-ადაპტირება განსაკუთრებულ მიდგომებს საჭიროებს. მოქმედ მრავალრიცხოვან სტატისტიკურ ფაქტორთა გათვალისწინებით ღვარცოფთა მოძრაობის პირობების აღწერა და ერთგანზომილებიანი დიფერენციალური განტოლებების გამოყვანით შესაძლებელი იქნება გადავწყვიტოთ რიგი პრაქტიკული ამოცანა. იგი იქნება ის ოპერატიული საშუალება, რომლის საფუძველზე შესაძლებელი გახდება ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების კონსტრუირება, დაგეგმარება და გაანგარიშების მეთოდების სრულყოფა.

ღვარცოფთა მრავალწლიური შესწავლის ისტორია სადღეისო მონაცემებით საშუალებას იძლევა საინჟინრო პრაქტიკისათვის დასაშვები სიზუსტით გამოყვანილი იქნას მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება, რომლის ინტეგრირებით შესაძლებელი გახდება როგორც ნაკადის მოძრაობის მიმართუ ლებით სიღრმის ცვალებადობის, ასევე კალაპოტის ნებისმიერ უბანზე ნაკადის მოძრაობის რეჟიმის პროგრამირება. აქედან გამომდინარე, მიმდინარეობს მცდელობა, რათა ღვარცოფის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობა

აღწერილი იქნას დიფერენციალური განტოლებით. კვლევის ობიექტს ჰიპერკონცენტრირებული მაღალი სიმკვრივის ნაკადები წარმოადგენს.

როგორც ცნობილია, რეალურად, ნაკადის მოძრაობის პირობების შეცვლა, მაგალითად, ნებისმიერი წინააღმდეგობის გადალახვა, კალაპოტის შევიწროება ან გაფართოება და კალაპოტის ფუძის ქანობის ცვლილება იწვევს ცოცხალი კვეთის ცვლილებას და ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმის შეცვლას.

ამოცანის ქვეშ განიხილება ისეთი შემთხვევა, როდესაც თავისუფალი ზედაპირის სიმრუდის ცვალებადობა ისეთი დონით ხდება, რომ ნაწილაკთა სიჩქარე ცოცხალი კვეთის მართობულია. აღნიშნული შემთხვევა შემადგენელ სიჩქარეთა უგულებელყოფის საშუალებას იძლევა, როცა ცოცხალი კვეთის ფართობი სიგანისა და სიღრმის ფუნქციას წარმოადგენს.

როგორც ცნობილია, ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით სრული ენერგიის ცვლილება როგორც ნაკადის, ისე რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილებების ფუნქციას წარმოადგენს. მისი სიდიდე დინების მიმართულებით ყოველთვის ნაკადის მოძრაობის ხარჯზე ხდება. ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე შეიძლება დავწეროთ:

$$E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}. \quad (2.3.1.)$$

პირველი განტოლების დიფერენცირებით მივიღებთ:

$$\frac{dE}{dl} = \frac{dZ}{dl} + \frac{d\left(\frac{P}{\gamma}\right)}{dl} + \frac{d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{dl}, \quad (2.3.2.)$$

- სადაც: E არის ნაკადის სრული ენერგია;
- Z – ღვარცოფის ფუძის დაცილება საფარდ სიბრტყესთან;
- $\frac{P}{\gamma}$ – პიეზომეტრული დაწნევა;
- $\frac{\alpha V^2}{2g}$ ან $\frac{P}{\gamma} = h_{\alpha}$ – სიჩქარითი დაწნევა.

რადგან, მეორე განტოლებაში, $\frac{dE}{dl}$ წარმოადგენს ნაკადის მოძრაობის წინააღმდეგობის i_f ქანობს, ხოლო $\frac{dz}{dl}$ კალაპოტის ფუძის i ქანობს, ზემოთ აღნიშნულიდან შეგვიძლია დავწეროთ:

$$-i_f = -i + \frac{dh_{\omega}}{dl} + \frac{d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{dl}. \quad (2.3.3.)$$

რადგან, ბმულ ღვარცოფში, დაწნევასა და ნაკადის სიღრმეს შორის არსებობს დამოკიდებულება:

$$\frac{dh_{\omega}}{dl} = \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \frac{dh}{dl}, \quad (2.3.4.)$$

ხოლო, როცა $\alpha = 1$, შესაბამისად $\frac{\alpha V^2}{2g} = \frac{V^2}{2g}$ და სიჩქარის დაწნევის დიფერენცირებით გვექნება:

$$\frac{d\left(\frac{V^2}{2g}\right)}{dl} = -\frac{Q^2}{g\omega^3} B \frac{dh}{dl} - \frac{Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial l}. \quad (2.3.5.)$$

თუ (2.3.4.) და (2.3.5.) განტოლებებს გავითვალისწინებთ (2.3.3.)-ში, მივიღებთ:

$$-i_f = -i + \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \frac{dh}{dl} - \frac{Q^2}{g\omega^3} B \frac{dh}{dl} - \frac{Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial l}. \quad (2.3.6.)$$

(3.1.6.) განტოლების გარდაქმნით და გამარტივებით, როცა $\omega_{\omega} = K\omega$, მივიღებთ:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - i_f - \frac{Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial l}}{\varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) - \frac{Q^2}{g\omega^3} B}. \quad (2.3.7.)$$

რადგან, წინააღმდეგობის ქანობი $i_f = \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 C^2 R}$, განტოლება (2.3.7.)

მიიღებს სახეს:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 C^2 R} \left(1 - \frac{K^2 C^2 R}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial l}\right)}{\varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) - \frac{Q^2}{g\omega^3} B}. \quad (2.3.8.)$$

მიღებული (2.3.8.) განტოლება წარმოადგენს ნებისმიერი სწორკუთხა ფორმის კალაპოტში მოძრავი ბმული ღვარცოფის

დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას. ანალოგიური სახის ამოცანის გადაწყვეტა მოცემულია სხვადასხვა სამეცნიერო პუბლიკაციებში [66, 68, 73, 74, 75].

როგორც განტოლების ანალიზი გვიჩვენებს, განტოლების მნიშვნელის 0-თან ტოლობა მიუთითებს კრიტიკული მდგომარეობის რეჟიმზე და ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის პარალელურობაზე დვარცოფული კალაპოტის ფუძესთან. როცა მრიცხველი 0-ის ტოლია, ე.ი. როცა $\frac{dh}{dl} = 0$, ადგილი აქვს ნაკადის თანაბარი მოძრაობის რეჟიმს. ჩვენს შემთხვევაში, როცა $\frac{dh}{dl} = 0$:

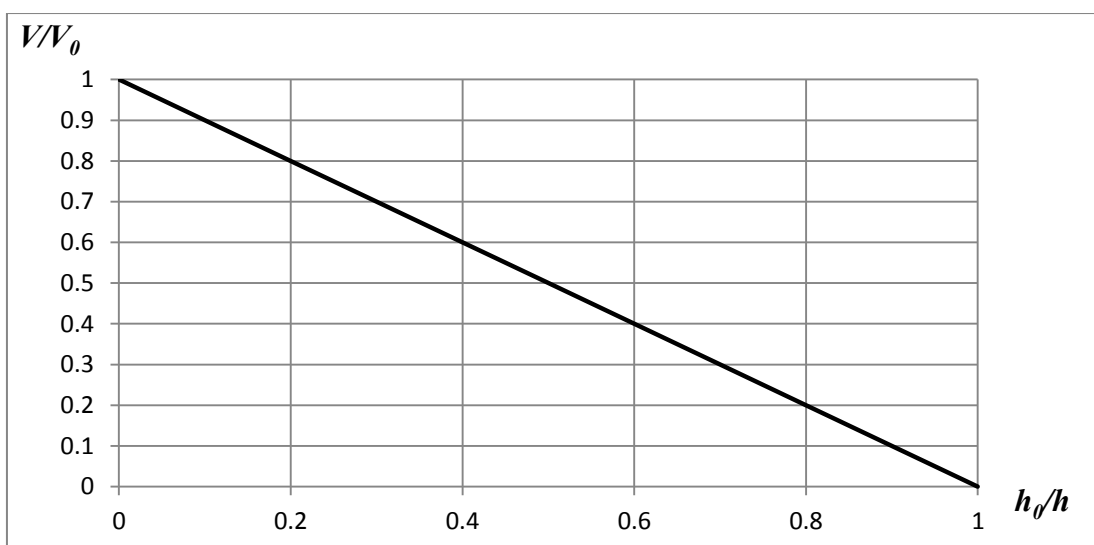
$$i = \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 C^2 R}. \quad (2.3.9.)$$

თუ შევიტანთ ხარჯის მნიშვნელობას $Q = \omega V$ (2.3.9.) განტოლებაში, მოძრაობის სიჩქარის გამოსახულება ბრტყელი ნაკადის შემთხვევაში, ე.ი. როცა $h = R$, მივიღებთ:

$$V = KC\sqrt{hi} = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \varphi C\sqrt{hi}. \quad (2.3.10.)$$

როცა, ნაკადის V სიჩქარე ნიუტონური სითხეების სიჩქარის ტოლია, მაშინ:

$$\frac{V}{V_0} = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \varphi. \quad (2.3.11.)$$



ნახ. 2.7. გრაფიკული დამოკიდებულება $\frac{V}{V_0} = f\left(\frac{h_0}{h}\right)$, როცა $\varphi = 1$.

(2.3.11.) განტოლების გრაფიკული ილუსტრაცია, როცა $\varphi = 1$, ე.ი. შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტი $\beta = 0$, მოცემულია ნახაზზე 2.7.

ზემოთაღნიშნულიდან გამომდინარე შეიძლება დავასკვნათ, რომ კალაპოტის სწორკუთხა კვეთის შემთხვევაში ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით, სრული ენერგიის ცვლილების საფუძველზე და რეალური რეოლოგიური მახასიათებლების გათვალისწინებით მიღებულია ბმული ღვარცოფის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის განტოლება; ნაკადის თანაბარი მოძრაობის რეჟიმისათვის გამოყვნილია მოძრაობის სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება [76].

რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილების გათვალისწინებით, გრფიკული ილუსტრაციის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ როცა ბმულობის ექვივალენტური სიღრმე ნაკადის სიღრმის ტოლია, მაშინ ღვარცოფული მასის მოძრაობას ადგილი არ აქვს, ხოლო შინაგანი ხახუნის კუთხის ცვლილებით, ანუ მისი გაზრდით, ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე მცირდება.

3.4. ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადის ენერგიის მახასიათებლები

როგორც საინჟინრო ამოცანათა გადაწყვეტის პრაქტიკა ადასტურებს, საანგარიშო დამოკიდებულებებში პარამეტრთა შორის განსაკუთრებულ ადგილს კრიტიკული სიღრმე იკავებს, ამიტომ მისი გაანგარიშებისათვის, როცა ღვარცოფული ნაკადის რეალური სიღრმე H -ის ტოლია, ვსარგებლობთ კვეთის ენერგიის საანგარიშო დამოკიდებულებით:

$$\varepsilon = h \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \varphi + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (3.4.1)$$

ან

$$\varepsilon = h + \frac{\alpha V^2}{2g} - h(1 - \varphi) - h_0 \varphi. \quad (3.4.2)$$

(3.4.2)-ე დამოკიდებულებაში h_0 სიდიდის განსაზღვრა ბრტყელი ზედაპირების ცოცვადობის მეთოდისგან გამომდინარეობს, ე.ი. ძვრის ძალის საანგარიშო დამოკიდებულებას აქვს სახე:

$$P = \frac{\gamma h^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^2 \varphi. \quad (3.4.3)$$

რადგან, წნევის ძალის სიდიდე $P = \gamma h_{ს.გ.} \omega$ და შესაბამისად, $h_{ს.გ.} = h/2$. ამ შემთხვევაში, როცა $B = 1$, $\omega = h$, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\frac{\gamma h^2}{2} = \frac{\gamma h^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^2 \varphi. \quad (3.4.4)$$

(3.4.4) განტოლების გამარტივებითა და h_0 -ის მიმართ კვადრატული განტოლების ამოხსნით გვექნება:

$$h_0 = h \frac{\sqrt{\varphi} - 1}{\sqrt{\varphi}}. \quad (3.4.5)$$

h_0 -ის მნიშვნელობას თუ გავითვალისწინებთ (3.4.2)-ში, მივიღებთ:

$$\varepsilon = h - h(1 - \varphi) - h\varphi \frac{\sqrt{\varphi} - 1}{\sqrt{\varphi}} + \frac{\alpha V^2}{\varphi}. \quad (3.4.6)$$

(3.4.6) დამოკიდებულების დიფერენცირებით გვექნება:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = d \left(h + \frac{\alpha V^2}{2g} \right) - \frac{1 - \varphi}{\varphi} \frac{dh}{dh} - \frac{\sqrt{\varphi - 1}}{\sqrt{\varphi}} \frac{dh}{dh}. \quad (3.4.7)$$

და ბოლოს მივიღებთ:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = -\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B + \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right). \quad (3.4.8)$$

როცა კვეთის ენერგია არის მინიმალური, ანუ $\frac{d\varepsilon}{dh} = 0$, მაშინ:

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B = \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right). \quad (3.4.9)$$

(3.4.9) საანგარიშო დამოკიდებულება ემთხვევა წყლის ნაკადის საანგარიშო დამოკიდებულებას.

(3.4.9) დამოკიდებულების გარდაქმნებითა და გამარტივებით მივიღებთ კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო განტოლებას:

$$h_{კრ.}^3 - h_0 h_{კრ.}^2 - \frac{\alpha q^2}{g\varphi} = 0. \quad (3.4.10)$$

კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო განტოლება წარმოდგენილი სახით შეიძლება მივიღოთ მოძრაობის რაოდენობის განტოლებით, რაც მოდელის გამოყენების სიზუსტეზე მიუთითებს.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, როდესაც ტალღის სიჩქარე ნაკადის გადაადგილების სიჩქარის ტოლია პროცესი შეიძლება განიხილოს როგორც ნახტომის მოვლენა. მძაფრი მოძრაობის გადასვლა წყნარ რეჟიმში ან, პირიქით, მიმდინარეობს ჰიდრავლიკური ნახტომით. ღვარცოფთა ღია სადინარებში მოძრაობის დროს, როგორც სუფთა ჰიდრავლიკაში, ისე აქაც ვხვდებით ნაკადის სხვადასხვა მდგომარეობას: მძაფრი, წყნარი და კრიტიკული.

ანალოგიური მოვლენა შეიძლება მოხდეს ბმულ ღვარცოფულ პროცესებში. ასეთი დაყოფა არ ატარებს ფორმალურ ხასიათს და გარკვეული სიზუსტით განსაზღვრავს სასაზღვრო პირობების დანიშვნის შესაძლებლობას. ასეთი ამოცანების გადაწყვეტის დროს, აუცილებელი არის ნაკადის მოძრაობის თავისუფალი ზედაპირის აგება და ანალიზი, ენერჯის ჩამქრობი ნაგებობის გაანგარიშება, ნაკადის მოძრაობის რეჟიმების შეფასება, ღვარცოფსაცავის ან მეწყრით შექმნილი კაშხლების გარღვევის შედეგად წარმოქმნილი ნაკადის მახასიათებლების დადგენა, კრიტიკული სიმაღლის, სიჩქარის, ხარჯისა და სხვა პარამეტრების განსაზღვრა.

ბმული ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევაში ნაკადის მდგომარეობა შეიძლება განიხილოს უტოლობით:

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B \cong T. \quad (3.4.11)$$

სადაც: T არის უგანზომილებო პარამეტრი და წლის შემთხვევაში იგი 1-ის ტოლია.

ჩვენს შემთხვევაში T -ს აქვს ქვემოთ მოყვანილი სახე:

$$T = \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h} \right). \quad (3.4.12)$$

| | | | |
|--------|-------------|------|--|
| სადაც: | φ | არის | კოეფიციენტი და ღვარცოფის შინაგანი ხახუნის კუთხეზეა დამოკიდებული; |
| | h_0 | – | ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე; |
| | α | – | კორიოლისის კოეფიციენტი; |
| | Q | – | ბმული ღვარცოფის ხარჯი; |
| | B, ω | – | სიგანე თავისუფალ ზედაპირზე და ცოცხალი კვეთის ფართობი; |
| | g | – | სიმძიმის ძალის აჩქარება. |

ქვემოთ მოყვანილია ბმული ღვარცოფის კრიტიკული მახასიათებლების განსაზღვრა.

ბმული ღვარცოფის ერთგანზომილებიანი დაუმყარებელი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება განიცდის წყვეტას იმ შემთხვევაში, როცა წარმოებული $\frac{dh}{dl} = \infty$ და მნიშვნელი 0-ის ტოლია. ამ შემთხვევაში ნაკადის წყვეტადობას შეესაბამება დამოკიდებულება:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{კრ.}^3}{B} \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h_{კრ.}} \right). \quad (3.4.13)$$

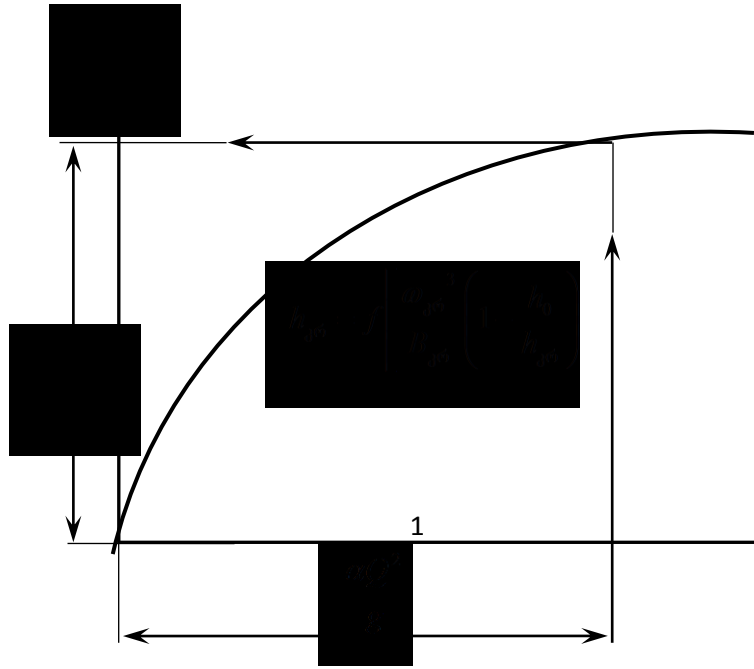
ნიუტონური სითხეების ჰიდრაულიკის ანალოგიურად, კრიტიკული მდგომარეობის შემთხვევაში კრიტიკული სიღრმის განსაზღვრის პირობა წარმოდგენილია (3.4.13) განტოლებით, რომელიც ასევე შეიძლება წარმოვადგინოთ გრაფიკულად (ნახაზი 2.8. $h_{კრ.} = f \left[\frac{\omega_{კრ.}^3}{B} \left(1 - \frac{h_0}{h_{კრ.}} \right) \varphi \right]$).

(3.4.13) განტოლებაში, როცა $h = h_{კრ.}$ და მარჯვენა ნაწილი 1-ის ტოლია, ე.ი.:

$$\varphi \left(1 - \frac{h_0}{h_{კრ.}} \right) = 1, \quad (3.4.14)$$

ხოლო ამონახსნს h_0 სიღრმის მიმართ ექნება შემდეგი სახე:

$$h_0 = -h_{კრ.} \frac{1 - \varphi}{\varphi}. \quad (3.4.15)$$



ნახაზი 2.8. $h_{კრ} = f \left[\frac{\omega_{კრ}^3}{B_{კრ}} \left(1 - \frac{h_0}{h_{კრ}} \right) \varphi \right]$ დამოკიდებულების გრაფიკი.

(3.4.15) განტოლებიდან ნათლად ჩანს, რომ ბმულობის ეკვივალენტურ სიღრმეს აქვს მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულება. მისი სიდიდე რეოლოგიური მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს, რადგან ბმულ ღვარცოფში როცა შეჭიდულობა არის c , შინაგანი ხახუნის კუთხე φ და მოცულობითი წონა γ , მაშინ კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო ფორმულას ექნება სახე:

$$h_{კრ} = -\frac{2c}{\gamma} \frac{\sqrt{\varphi}}{1 - \varphi}. \quad (3.4.16)$$

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, (3.4.13) განტოლე-ბაში, როცა მარცხენა ნაწილი 1-ის ტოლია, კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$h_{კრ} = \frac{1}{\varphi} \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} + h_0 \quad (3.4.17)$$

(3.4.17) განტოლების გათვალისწინებით (3.4.15)-ში, ნაკადის გავლის სიმაღლის საანგარიშო დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$h_0 = -\sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g} \frac{1-\varphi}{\varphi}}. \quad (3.4.18)$$

სატრანზიტო უბნებზე ღვარცოვის მოძრაობის პირობების შეფასების დროს, მისი კრიტიკული მახასიათებლები იძენენ განსაკუთრებულ მნიშვნელობას. კრიტიკული მახასიათებლების შეფასების მიზნით, კერძოდ, კრიტიკული სიღრმის განსაზღვრის დროს შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ნაკადის კვეთის ენერგიის განტოლება, რომლის საანგარიშო დამოკიდებულებას (3.4.10) განტოლების სახე აქვს. კარდანოს ფორმულების გამოყენებით (3.4.10) განტოლების მიახლოებით ამონახსნს შემდეგი სახე აქვს:

$$h_{კრ} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{2g\varphi} \left[1 + \frac{2g\varphi}{\alpha q^2} \left(\frac{h_0}{3}\right)^3 + \sqrt{1 + \frac{4g\varphi}{\alpha q^2} \left(\frac{h_0}{3}\right)^3} \right] \left(1 + \frac{\sqrt[3]{1 + \frac{2g\varphi}{\alpha q^2} \left(\frac{h_0}{3}\right)^3 - \sqrt{1 + \frac{4g\varphi}{\alpha q^2} \left(\frac{h_0}{3}\right)^3}}}{\sqrt[3]{1 + \frac{2g\varphi}{\alpha q^2} \left(\frac{h_0}{3}\right)^3 + \sqrt{1 + \frac{4g\varphi}{\alpha q^2} \left(\frac{h_0}{3}\right)^3}} \right)}. \quad (3.4.19)$$

(3.4.19) განტოლებაში, როდესაც $\varphi=1$, $\beta=0$ და $h_0=0$, იგი ემთხვევა წყლის კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო დამოკიდებულებას:

$$h_{კრ} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}. \quad (3.4.20)$$

წყლისა და ღვარცოვის თანაბარი ხარჯების შემთხვევაში, როცა $q_{ღ} = q_{წ}$, განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\frac{h_{კრ,ღ}}{h_{კრ,წ}} = \sqrt[3]{\frac{1}{2\varphi} \left[1 + \frac{2}{27} \left(\frac{h_0}{h_{კრ,წ}}\right)^3 + \sqrt{1 + \frac{4\varphi}{27} \left(\frac{h_0}{h_{კრ,წ}}\right)^3} \right] \left(1 + \frac{\sqrt[3]{1 + \frac{2}{27} \left(\frac{h_0}{h_{კრ,წ}}\right)^3 - \sqrt{1 + \frac{4\varphi}{27} \left(\frac{h_0}{h_{კრ,წ}}\right)^3}}}{\sqrt[3]{1 + \frac{2}{27} \left(\frac{h_0}{h_{კრ,წ}}\right)^3 + \sqrt{1 + \frac{4\varphi}{27} \left(\frac{h_0}{h_{კრ,წ}}\right)^3}} \right)}. \quad (3.4.21)$$

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას:

$$K = \frac{2}{27} \left(\frac{h_0}{h_{კრ,წ}}\right)^3, \quad (3.4.22)$$

კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$h_{კრ.ღ.} = h_{კრ.წ.} \sqrt[3]{\frac{1}{2\varphi} (1 + K + \sqrt{1 + 2K})} \left(1 + \sqrt[3]{\frac{(1 + K - \sqrt{1 + 2K})}{(1 + K + \sqrt{1 + 2K})}} \right). \quad (3.4.23)$$

წარმოდგენილ განტოლებაში წევრი $\left(1 + \sqrt[3]{\frac{(1+K-\sqrt{1+2K})}{(1+K+\sqrt{1+2K})}} \right)$ მცირე სიდიდეა და მისი უგულებელყოფის შემთხვევაში კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$h_{კრ.ღ.} = K \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (3.4.24)$$

სადაც:

$$K = \sqrt[3]{\frac{1}{2\varphi} \left[1 + \frac{2g\varphi}{\alpha q^2} \left(\frac{h_0}{3} \right)^3 \right]} + \sqrt[3]{1 + \frac{4g\varphi}{\alpha q^2} \left(\frac{h_0}{3} \right)^3}. \quad (3.4.25)$$

ბმული ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირის მკვეთრი ნახტომისებრი ცვლილებები ხდება არა მხოლოდ ღვარცოფსაცავებისა და ღვარცოფის მასის მიერ წარმოქმნილი კაშხლების გარღვევის შემთხვევაში, არამედ ყოველთვის, როდესაც ნაკადი მძაფრიდან წყნარ რეჟიმში გადადის.

III თავი

ღვარცოფული მოვლენების მოდელირება და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების შემუშავება

3.1. არსებული ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების ანალიზი და შეფასება

ღვარცოფებთან ბრძოლა უხსოვარი დროიდან მიმდინარეობს, თუმცაღა, ქვეყნის მასშტაბით მეცნიერულად დასაბუთებული და ორგანიზებული სახე მხოლოდ XIX საუკუნეში მიიღო. პირველი კანონები ღვარცოფულ და მეწყერსაშიშ რაინებში მთის ტყეების დაცვის შესახებ მიღებულ იქნა საფრანგეთში 1860 წელს და ავსტრიაში 1972 წელს.

ამავე პერიოდში დაიწყო თანამედროვე ღვარცოფსაწინააღმდეგო სისტემების მშენებლობა და ძირითადი აქცენტი კეთდებოდა ღვარცოფსაშიშ ფერდობების დატერასებასა და ტყის გაშენებაზე.

დღეისათვის არსებული მრავალრიცხოვანი სამეცნიერო შრომებიდან, რომლებიც მიძღვნილია ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების განგარიშეაბ-პროექტირების საკითხებს, უნდა აღინიშნოს ი. ი. ხერხეულიძის, გ. ი. ხერხეულიძის, ო. გ. ნათიშვილის, ვ. ი. თევზაძის, ზ. ს. იორდანიშვილის, ლ. ა. სულაქველიძის, ე. ს. ავალიანის, გ. ვ. აბელიშვილის, პ. ი. აკსიონოვის, ა. ი. ვლასოვის, ი. ს. კოფმანის და სხვათა ფუნდამენტური შრომები.

მიუხედავად იმისა, რომ ღვარცოფთა პრობლემას როგორც ჩვენთან, ისე საზღვარგარეთ მრავალი სამეცნიერო ნაშრომი მიემდვნა, დღეისათვის მათთან ბრძოლის ღონისძიებების მრავალი საკითხი და დეტალი საჭიროებს დაზუსტებას.

ზემოაღნიშნული და სხვა შრომების შესწავლისა და ანალიზის საფუძველზე, გამოვლინდა, რომ ღვარცოფებთან ბრძოლის ღონისძიებები

დანიშნულების, რეალიზაციის ხერხისა და ღვარცოფულ პროცესზე ზემოქმედების ეფექტის მიხედვით შეიძლება სამ კატეგორიად დაიყოს: ორგანიზაციულ-სამეურნეო, მელიორაციული და ჰიდროტექნიკური.

თავის მხრივ, ორგანიზაციულ-სამეურნეო მოიცავს: 1) მცენარეული საფრის მახსიმალური შენარჩუნება და აღდგენა, დაცვა მავნებლებისგან და ხანძრებისგან; 2) ტყეების დაცვა; 3) მიწის სარგებლობის საზღვრების რეგულირება; 4) ეროზიის საწინააღმდეგო აგროტექნიკის დაცვა და პირუტყვის მოვების რეგულირება.

მელიორაციული ღონისძიებები მოიცავს ზედაპირული ჩამონადენის, ანუ ღვარცოფების მთავარი მაფორმირებელის რეგულირებას, რაც შესაძლებელია მიღწეულ იქნას როგორც პირდაპირი (წყალსაცავების აგება და ა.შ) აგრეთვე ირიბი გზით (ტყის გაშენება, ტერასირება და ა.შ.). ეს უკანასკნელი საგრძნობლად ამცირებს ზედაპირულ ჩამონადენს და შესაბამისად მინიმუმამდე დაჰყავს ფერდობების ეროზია. ღვარცოფული აუზების მელიორაციის სახეები მოცემულია ცხრილში 3.1 [77].

ღვარცოფულ აუზებში მელიორაციის ძირითადი სახეები და მათი დანიშნულება

ცხრილი 3.1.

| მელიორაციის სახეები | დანიშნულება |
|---|---|
| ტყის გაშენება, ბუჩქების დარგვა, ფერდობების ტერასირება | ზედაპირული მყარი და თხიერი ჩამონადენის შემცირება |
| ფერდობების არხები, თავსხმა წვიმების ამცილებლები, დრენაჟი | ზედაპირული და გრუნტის თხიერი ჩამონადენის რეგულირება |
| წყალმოვარდნების სარეგულაციო კაშხლები, მარეგულირებელი ღვარცოფსაცავები, ტბების დონის დაწვეა ან პროფილაქტიკური დაცლა | ღვარცოფული ნაკადის წარმოქმნისა და ფორმირების შეჩერება |

ღვარცოფულ აუზებში ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობა წარმოებს ღვარცოფულ ნაკადზე პირდაპირი ზემოქმედებით მის გასაჩერებლად.

შეიძლება გამოვყოთ ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ოთხი ტიპი: ღვარცოფშემკავებელი, ღვარცოფგამტარი, ღვარცოფმიმართველი და მასტაბილიზებელი (ცხრილი 3.2.).

აღნიშნული ნაგებობების პროექტირება და მშენებლობა ხორციელდება ღვარცოფული ნაკადის ზედა ბიეფში შესაკავებლად და ღვარცოფსაცავების შესაქმნელად, ნაკადების ობიექტში ან მისი შემოვლით გატარებისათვის, ნაკადის ღვარცოფგამტარში მისამართად, მოძრაობის გასაჩერებლად ან შესასუსტებლად [22].

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობები

ცხრილი 3.2.

| ნაგებობის ტიპი | ნაგებობის დანიშნულება და მისი გამოყენების პირობები |
|---|--|
| I ღვარცოფშემკავებელი | |
| ბეტონის, რკინა-ბეტონის, ქვანაყარი და გრუნტის ყრუ კაშხლები | ღვარცოფული ნაკადის შეკავება ზედა ბიეფში. ღვარცოფსაცავების შექმნა |
| II ღვარცოფგამტარი | |
| არხები, ღვარცოფსაგდები | ღვარცოფული ნაკადების გატარება ობიექტში ან შემოვლით |
| III ღვარცოფმიმართველი | |
| მიმართველი და გადამღობი დამბები, დეზები | ღვარცოფული ნაკადის მიმართვა ღვარცოფგამტარ ნაგებობაში |
| IV მასტაბილიზირებელი | |
| ჯებირების კასკადი, შემკავებელი კედლები, ფერდობების ტერასები, აგროსატყეომელიორაცია | ღვარცოფული ნაკადის მოძრაობის შეჩერება ან მისი დინამიკური მახასიათებლების შესუსტება |

იმისდა მიხედვით, თუ რა მიზნით ხდება ამა თუ იმ სახის ობიექტების ღვარცოფებისაგან დაცვა, ნაგებობათა გეგმაში განლაგება შეიძლება სხვადასხვა სქემით განხორციელდეს: 1) ნაგებობანი, რომელიც გარს ერტყმის დასაცავ ობიექტს ან სანაპირო გამრეცხ მონაკვეთს; 2) ნაგებობანი, რომელიც გარს უვლის დასაცავ ობიექტს დეზების ან ბარაჟების სახით და ნაკადის მიმართულებასთან სხვადასხვა დახრის კუთხით არის წარმოდგენილი.

მუდმივი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობები კაპიტალურობის მიხედვით იყოფა 5 კლასად:

- I კლასი - განსაკუთრებულად მაღალი კაპიტალურობა, მომსახურეობის ვადა 50 წელი და მეტი;
- II კლასი - განსაკუთრებულად მაღალი კაპიტალურობა, მომსახურეობის ვადა 40- დან 50 წლამდე;
- III კლასი - ჩვეულებრივი კაპიტალურობა, მომსახურეობის ვადა 30- დან 40 წლამდე;
- IV კლასი - მსუბუქი ნაგებობები, მომსახურეობის ვადა 20- დან 30 წლამდე;
- V კლასი - განსაკუთრებულად მსუბუქი ნაგებობები, მომსახურეობის ვადა 10- დან 20 წლამდე.

დროებითი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობები კაპიტალურობის მიხედვით მიეკუთვნებიან IV და V კლასს, მომსახურეობის ვადით არა უმეტეს 4-5 წლისა [78].

ღვარცოფული პროცესების საინჟინრო ღონისძიებებით რეგულირების არსებული მიდგომების ანალიზმა გარკვეული წარმოდგენა შექმნა მათი მუშაობის ეფექტზე, რაც საფუძვლად დაედო ახალი განივი ნაგებობების შექმნას, რომელთა უპირატესობა არსებულთან შედარებით მათი ელასტიკურობით, მუშაობის ხანგრძლივობის საიმედოობით, ეკონომიურობით, გარემოსთან შერწყმითა და ქვედა ბიეფში მოსალოდნელი გართულებების თავიდან აცილებით გამოიხატება.

3.2. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერების გამოყენების სფერო, პროექტირება და ექსპლუატაცია

უკანასკნელ პერიოდში ინტენსიურად მიმდინარე მთისა და მთისწინა რეგიონების ათვისების ფონზე, პირველ საკიდხად დადგა შედარებით მცირე (მოცულობით პირველი ათობის ათასი კუბური მეტრი) ღვარცოფული ნაკადებისგან საინჟინრო დაცვის ღონისძიებების შემუშავება-სრულყოფა.

აღნიშნულთან დაკავშირებით, მნიშვნელოვანია ისეთი მცირე ტერიტორიების მქონე მთიანი ქვეყნების გამოცდილების გაზიარება როგორებიცაა შვეიცარია, ავსტრია და ა.შ., ვინაიდან მათ გააჩნიათ დიდი ისტორია ამდაგვარი ამოცანების გადაწყვეტაში.

ღვარცოფული ნაკადებისგან ტერიტორიების დასაცავად ელასტიკური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების გამოყენება საშუალებას იძლევა ისეთი ტერიტორიების ეკონომიურ დაცვას, სადაც ეს ითვლებოდა შეუძლებელი ან ძალიან ძვირი. გარდა ამისა, ბარიერების პროექტირება და გამოყენება შესაძლებელია ყოველი კონკრეტული შემთხვევისთვის ღვარცოფული ნაკადები პარამეტრების, რელიეფისა და ა.შ. გათვალისწინებით.

ტრადიციული ღვარცოფსაწინააღმდეგო კონსტრუქციები (დამბები, ბარაჟები და ა.შ) კარგად ახდენენ წყლისა და მყარი ნატანის განცალკევებას, მაგრამ მათ არ გააჩნიათ დრეკადობა და შესაძლებელია ისინი დაზიანებულ იქნან დიდი ზომის ლოდების ზემოქმედებით. ასეთი ტიპის კონსტრუქციების დამაგრება კალაპოტის ფერდებზე დაკავშირებულია დიდ ფინანსურ და შრომით დანახარჯებთან, ამასთან მძიმე მასიური ბეტონის კონსტრუქციები მოითხოვენ მასიური ფუნდამენტის მშენებლობას, რაც თავის მხრივ ზრდის მშენებლობის ხარჯებს.

მაღალი სიმტკიცის მქონე მავთულის ბადეების დრეკადი ბარიერები უძლებენ მაღალ სტატიკურ და დინამიკურ დატვირთვებს. ისინი შესაძლებელია დამაგრებულ იქნან მინიმალური სამუშაოთა მოცულობის ჩატარების შედეგად, რაც არსებითად ამცირებს შრომით და დროით დანახარჯებს.

მოქნილი ბარიერების გამოყენების არელია – ღვარცოფული სადინარები, სადაც შესაძლებელია ათასი და ათი ათასობით კუბური მატრი ღვარცოფული მასის ფორმირება. ასეთი მოთხოვნილება ხშირად წარმოიქმნება მთის პირობებში საავტომობილო და სარკინიგზო გზების, მილსადებისა და ა.შ. მშენებლობის დროს.

მოქნილი ბარიერების ძირითადი დანიშნულებაა ღვარცოფული მასის განცალკევება თხიერ და მყარ შემადგენლებად და უკანასკნელის შესაჩერებლად. მოქნილი ბარიერი ასრულებს როგორც ღვარცოფშემაკავებელ, აგრეთვე მასტაბილიზირებელ ფუნქციას. მყარი ნატანის მცირე მოცულობის შემთხვევაში ბარიერი მთლიანად აკავებს მას, რის შედეგადაც ღვარცოფული ნაკადი ჩერდება მყარი ნატანის დიდი მოცულობის შემთხვევაში, ბარიერი ნაწილობრივ აკავებს მას, რითაც ამცირებს ღვარცოფული ნაკადის ენერგიას, მაგრამ სრულად ვერ აჩერებს. ასეთი ტიპის ღვარცოფებისთვის გამოიყენება დამცავი ბარიერების მრავალსაფეხურიანი სისტემები.



სურათი 5. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერები.

როგორც წესი, ბარიერები მონტაჟდება 15-25 მეტრი სიგანის მქონე მკვეთრად გამოხატულ კალაპოტებში. მონტაჟისა და ექსპლუატაციის წესებიდან გამომდინარე დრეკადი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერები ასრულებენ შემდეგ ფუნქციებს: ღვარცოფული ნაკადებისგან დაცვა, ღვარცოფების ენერჯის შემცირება, ეროზიისაგან დაცვა, ჰიდროტექნიკური ნაგებობების დაცვა და ა.შ.

აღსანიშნავია, რომ ღვარცოფები ისეთ ბუნებრივი მოვლენების კატეგორიას განეკუთვნება რომლის მახასათებლების სამეცნიერო მეთოდებით გამოთვლა 100%-იანი სიზუსტით შეუძლებელია. ამიტომ, მეტად მნიშვნელოვანია ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირების დროს პროფესიონალური მიდგომების გამოყენება.

იმისად მიუხედავად, რომ ელასტიკური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების შექმნის იდეა 70-იან წლებში საქართველოში დაიბადა, მან განვრცობა ვერ მოიპოვა [19].

XX საუკუნის ბოლოს შვეიცარიაში კომპანია Geobrugg AG -მა დაიწყო ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების წარმოება და დღეისათვის იგი მსოფლიოს ლიდერია ამ სფეროში.

კომპანიის მიერ ჩატარებული იქნა მრავალრიცხოვანი სავლე კვლევები, რომლებმაც დაამტკიცეს, რომ ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების მეშვეობით შესაძლებელია 1000-დან 10000-მდე მ³ ღვარცოფული მასის შეკავება [79].

არსებობს ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერების ექსპლუატაციის ორი ძირითადი ხერხი:

- ბარიერები, რომელთა გაწმენდაც წარმოებს ყოველი ღვარცოფის გავლის შემდეგ, რის შედეგადაც ახლდება მისი ღვარცოფდამჭერი ფუნქცია;
- ბარიერები, რომლებიც ივსებიან ღვარცოფული მასით და რჩებიან ასეთ მდგომარეობაში. ამ შემთხვევაში ისინი მასტაბილიზირებელ ფუნქციას იძენენ.

აღნიშნულ ორივე შემთხვევაში აუცილებელია სისტემების მუდმივი მონიტორინგის გატარება ღვარცოფული მოვლენების სიხშირიდან გამომდინარე. პირველ შემთხვევაში კი, უნდა გათვალისწინებულ იქნას ბარიერების გაწმენდის ხერხებიც.

ღვარცოფულ კალაპოტში ბარიერების მონტაჟი ხდება ისე, რომ მისი ელემენტები არ განიცდიდნენ დამატებით დატვირთვებს, რათა მათი ფუნქციონირება იყოს გრძელვადიანი.

იმისათვის, რომ ბარიერებმა არ დაკარგონ მზიდი ფუნქციები ზედა მზიდ ბაგირზე გადადინების შემთხვევაში, ის უნდა დაცული იქნას სპეცილური ფოლადის დამცავებით, რომელთა შეცვლა, საჭიროების შემთხვევაში, არ წარმოადგენს სირთულეს. თუ ბარიერები, დიდი ხნის მანძილზე, შევსებულ მდგომარეობაში იმყოფება, აუცილებელია პრიოდული მონიტორინგის ჩატარება.

ღვარცოფის გავლის შემდეგ აუცილებელია ბარიერების, დათვალიერება, აუცილებლობის შემთხვევაში გაწმენა და მისი სრული ფუნქციონირების აღდგენა. ძირითადი ძალები იხარჯება დაგროვილი ნატანის ექსკავაციასა და გატანაზე. ბარიერის გაწმენდა შესაძლებელია ბარიერის დემონტაჟის გარეშე, თუმცა, ხანდახან საჭირო ხდება მისი ნაწილობრივი დემონტაჟი.

აღსანიშნავია, რომ ელასტიკური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერები ეტაპობრივად იძენენ საინჟინრო დაცვის სტანდარტულ სატატუსს და მათი გამოყენება აქტუალურია რეგიონებში, სადაც მოსალოდნელია 100-10000 მ³ და მეტი ღვარცოფული ნაკადების წარმოშობა.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერების პროექტირებისთვის, აუცილებელია ისეთი მონაცემების ცოდნა, როგორცაა: მოსალოდნელი ღვარცოფის ტიპი და სიმკვრივე, საერთო მოცულობა, მოსალოდნელი ტალღების რაოდენობა, მოსალოდნელი მაქსიმალური ხარჯი ან ემპირიულად გამოთვლილი მაქსიმალური ხარჯი და მარაგის კოეფიციენტი.

აღნიშნულთან ერთად, პროექტირების დროს, უნდა გათვალისწინებული იყოს ბარიერის გეომეტრია და იმ უბნების მონაცემები, სადაც უნდა განთავსდეს ბარიერი (ქანობი, ნაკადის სიმაღლე, საანგარიშო ან მოსალოდნელი სიჩქარე).

პროექტირების შემდეგ აუცილებელია გადამოწმებულ იქნას დინამიკური და სტატიკური დატვირთვები და აგრეთვე კონსტრუქციის გეომეტრიული პარამეტრები.

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, იმისათვის, რომ მოხდეს ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის პროექტირება, აუცილებელია იმ ღვარცოფული აუზის დეტალური შესწავლა, რის საფუძველზეც შესაძლებელია კონსტრუქციის ოპტიმალური პარამეტრების დადგენა-დაზუსტება.

3.3. მდინარე დურუჯის ღვარცოფული აუზის დახასიათება და ანალიზი

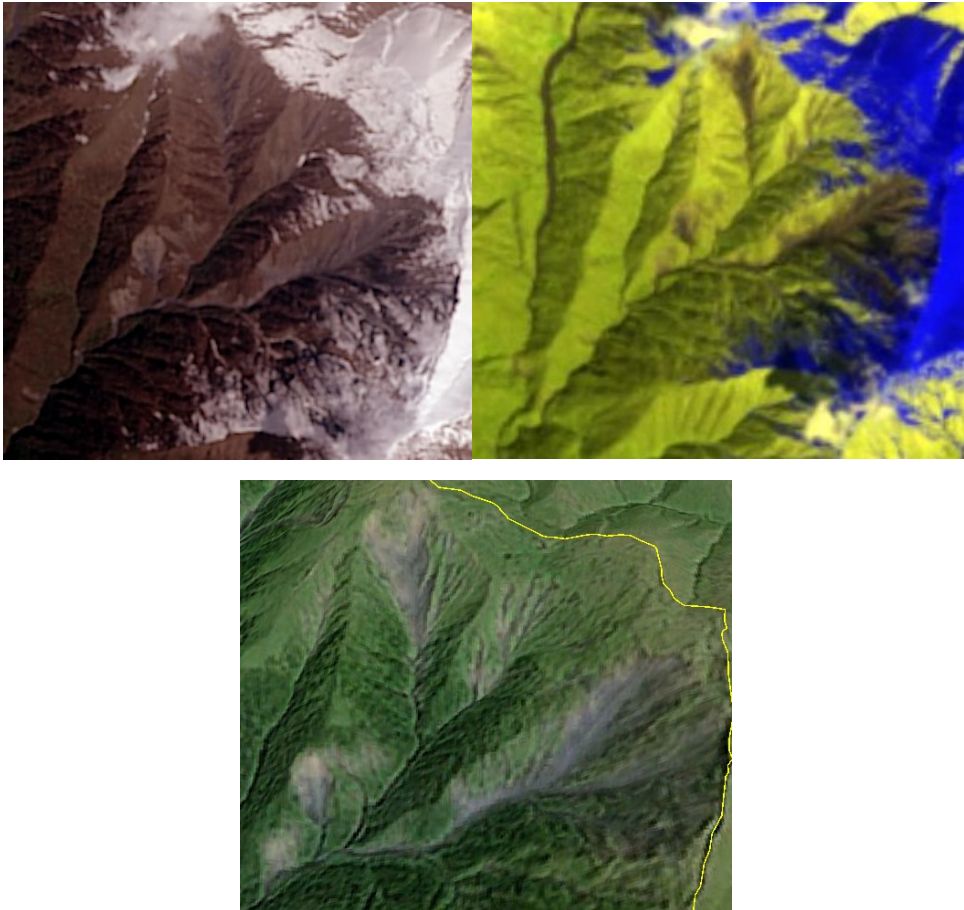
მდინარე დურუჯი, მდინარე ალაზნის მარცხენა შენაკადი, გაედინება ქ. ყვარელზე. იგი იქმნება შავი და თეთრი დურუჯის შეერთებით კავკასიონის სამხრეთ კალთაზე. შავი დურუჯი იწყება მთა შავი კლდიდან, თეთრი დურუჯი - მთანიანიკასციხის სამხრეთ კალთაზე.

მდ. დურუჯის მთლიანი სიგრძე 27 კმ, ხოლო წყალშემკრები აუზის ფართობი 103 კმ². იგი დინებაში მარაოსებრია. ხეობის ძლიერ დახრილი ფერდობების ქვედა ნაწილი და ფსკერი მოგებულია თიხაფიქლების დაქუცმაცებული პროდუქტების სქელი ნაყარით, კალაპოტი ნაყარშია ჩაჭრილი. შუაწელში ხეობა ყუთის ფორმის ვიწრობს წარმოადგენს და ტყით არის შემოსილი. კალაპოტი კლდოვანი, ჩანჩქერიანი და ჭორომიანი აქვს.

ქვემო დინებაში წყალშემკრები აუზი შედარებით ფართოა. ქალაქ ყვარლის მიდამოებში ხეობის ფსკერი მთლიანად უკავია გამოტანის კონუსს,

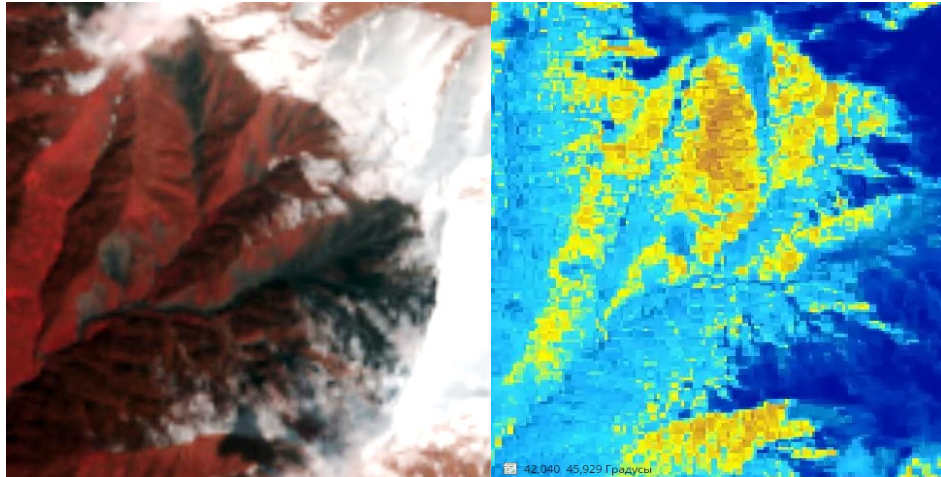
რაზედაც მდინარე იტოტება ყვარელს ქვემოთ და რამდენიმე ღელის სახით მიემართება ალაზნისკენ.

მდ. დურუჯი ძირითადად საზრდოობს თოვლის და წვიმის წყლით, წყალმცირეა საშუალო წლიური ხარჯი შეადგენს 1,06 მ³/ წმ. ხასიათდება წყალმოვარდნის რეჟიმით. დურუჯის ზემო დინებაში პერიოდულად იქმნება ტიპური სტრუქტურული ღვარცოფი, რომლის დროს ხარჯმა შეიძლება 200 მ³/წმ და მეტს მიაღწიოს. მთებიდან გამოაქვს კოლოსალური რაოდენობით ტალახად ქცეული მყარი მასალა და დიდ საფრთხეს უქმნის ქალაქ ყვარელს.



სურათი 6. მდ. დურუჯის ღვარცოფული კერა
(ფოტო:TIRS (Thermal Infrared Sensor), 20.04.2016).

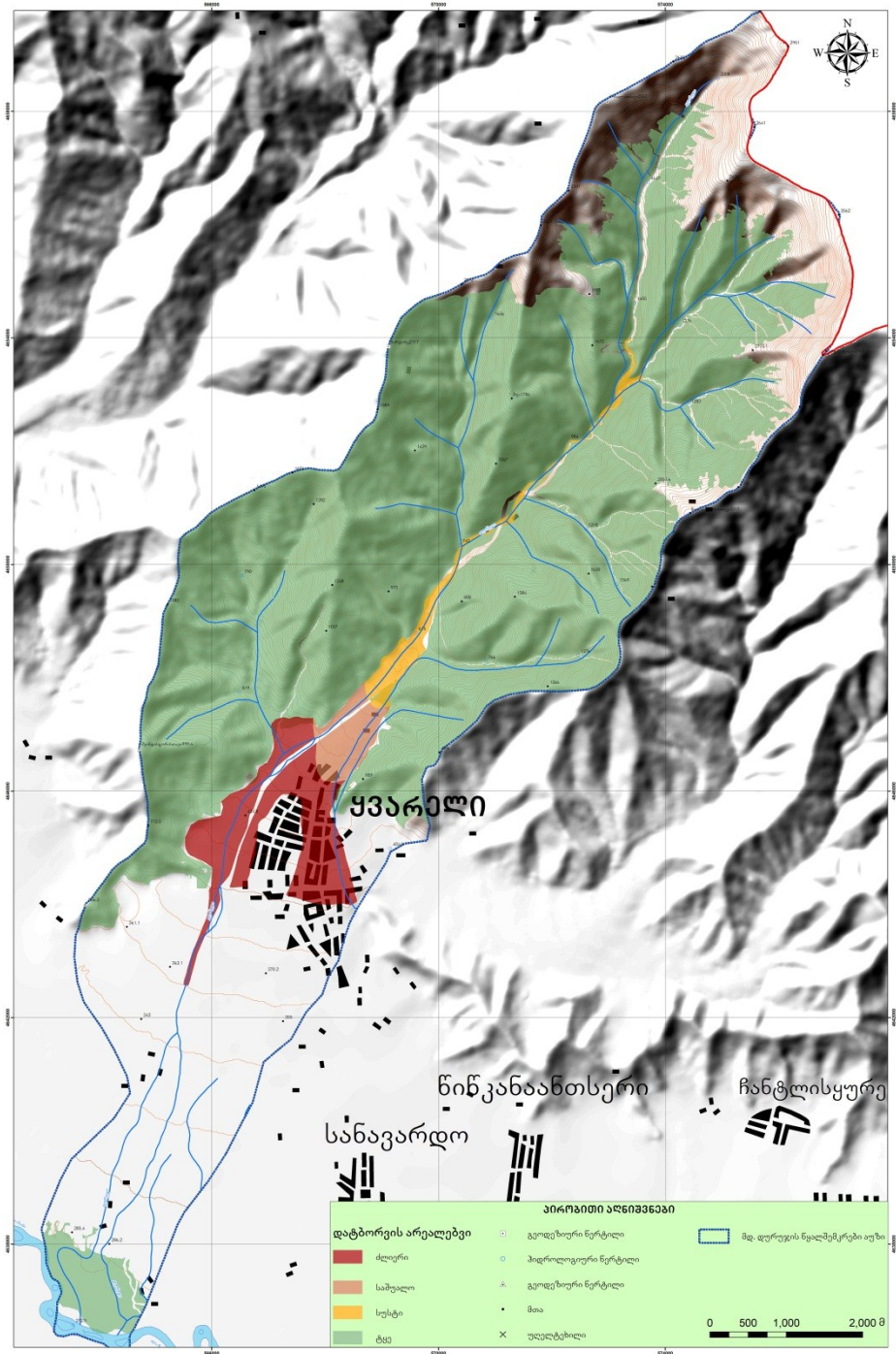
მდ. დურუჯის ღვარცოფული კერის შესასწავლად, ჩვენს მიერ გამოყენებულ იქნა აშშ-ს გეოლოგიური სამსახურის (USGS) მიერ Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) და TIRS (Thermal Infrared Sensor) მეშვეობით მიღებული კოსმოდური ფოტოები, რომლებიც ნაჩვენებია სურათებზე 6 და 7.



სურათი 7. მდ. დურუჯის ღვარცოფულ კერასთან არსებული მწვანე საფარი ინფრაწითელი დასხივების ქვეშ და ღვარცოფული კერის დატენიანების ინდექსი (ფოტო:TIRS (Thermal Infrared Sensor), 20.04.2016).

კოსმოსური გადაღებით მიღებული ფოტო მასალის ანალიზისა და მათი GIS პროგრამით დამუშავების შედეგად, შესაძლებელია რისკის ზონების განსაზღვრა და შესაბამისი პრევენციული ღონისძიებების დაგეგმვა. სურათზე # 8 მოყვანილია ჩვენს მიერ დამუშავებული მდ. დურუჯის წყალშემკები აუზი და ღვარცოფის გამოტანის კონუსის შესაძლო გავრცელების ზონა.

მდ. დურუჯის აუზის სათავეებში ღვარცოფმაფორმირებელ კერებში დაგროვილი მასალის საერთო მოცულობა 500 მლნ.მ³-ს შეადგენს, მათ შორის განსაკუთრებით საშიშ კერებისა 150 მლნ. მ³-ზე მეტია, საიდანაც ყოველწლიურად დურუჯის ხეობას მიეწოდება 1 მლნ.მ³ მყარი მასალა. მდ. დურუჯის ენერგეტიკული პოტენციალი იმდენად დიდია, რომ ცალკეული ჩამოტანილი ლოდების მოცულობა 100 მ³-ს აღემატება.



სურათი 8. დატბორვის ზონა.

1888-დან 1998 წლებში დურუჯის აუზში 26-მა დვარცოფულმა ნაკადმა გაიარა გამოტანის კონუსზე დალექვით. მათგან 5 იყო კატასტროფული ხასიათის, რამაც 200ზე მეტი ადამიანი იმსხვერპლა და ამასთან ერთად, მრავალი შენობა-ნაგებობა გაანდგურა.

აღნიშნული ღვარცოფული ნაკადები ძირითადად ქვატალახიანი ტიპისაა 1800-2300 კგ/მ³ მოცულობითი წონით. მაქსიმალური მოცულობა გამოტანის კონუსზე 300000-დან 640000 მ³-მდეა, ხოლო მაქსიმალური ხარჯი კი 1200-2000 მ³/წმ.

უნდა აღინიშნოს, რომ ღვარცოფდამცავი 7 კმ სიგრძის დამბის მოწყობის შემდეგ, ღვარცოფული ნაკადების მრავალჯერ გავლის მიუხედავად, ქალაქის ტერიტორიაზე ნაკადები არ გადასულა. ვინაიდან კალაპოტში აკუმულირებული მასალა რეგულარულად იწმინდებოდა.

ამჟამად მწირი ფინანსური და მატერიალური შესაძლებლობებიდან გამომდინარე, კალაპოტის გაწმენდის პროცესი არარეგულარულ ხასიათს ატარებს, ამიტომ დღეისათვის კალაპოტი ჰიფსომეტრულად უფრო მაღლა მდებარეობს, ვიდრე ქალაქის ზედაპირი.

გამომდინარე აქედან, კალაპოტი, ღვარცოფული მასალის არათანაბარი აკუმულაციის გამო, დეფორმირებული და დატოტვილია, ამასთან ყველაზე წყალუხვი ტოტი რამოდენიმე უბანზე გადანაცვლებულია მარცხენა მხარეს და დაბალი სიმკვრივის წყალნატანი ღვარცოფული ნაკადების გავლის პირობებშიც კი მიმდინარეობს დამცავი დამბის ძირის ინტენსიური გარეცხვა და დეფორმაცია.

ქვემოთ მოყვანილია დამბის ძირის გარეცხვის ადგილმდებარეობის კოორდინატები უბნების მიხედვით [81]:

I უბანი 1. X - 569225, Y-4648038; ამ წერტილიდან დამბის ძირი გამორეცხილია მის ღერძულ ნაწილამდე. გამორეცხვის სიგანე 26 მ-მდე. აქვე არსებული 3 მ-მდე სიმაღლის ნაკადმიმმართველი დეზის ძირი გარეცხილია და არსებობს მისი დანგრევის რეალური საშიშროება.

II უბანი 15მ-ის სიმაღლის დამცავი დამბის ძირის გარეცხვის უბნის კოორდინატები 1. X-568737, Y-4647615; 2. X-568546, Y-4647455;

III უბანი 1. X-567899, Y-4646961; 2. X-567705, Y-4646795;

IV უბანი 1. X-567668, Y-4646770; 2. X-567651, Y-4646767; IV უბანზე დამბის ძირის დამცავი ბეტონის ფილები მორეცხილი ან დეფორმირებულია.

V უბანი 1. X-567629, Y-4646752; 2. X-567608, Y-4646735.

VI უბანი 1. X-567584, Y-4646719; 2. X-567501, Y-4646658; VI უბანზე ნაპირსამაგრი დამბა დაზიანებულია და დეფორმირებულია 5-6 მ-დე სიგანის ზოლში მორეცხილია 2 მ-დე სიმაღლის ბეტონის ფილებიანი მიწაყრილი. ირეცხება 7 მ-დე სიმაღლის დამბის ძირი.

VII უბანი 1. X-567501, Y-4646658 ლოკალური უბნის სიგრძე 5 მ-ია.

VIII უბანი 1. X-567479, Y-4646644; 2. X-567378, Y-4646572;

IX უბანი ლოკალური გარეცხვის უბანი 1. X-566784, Y-4645860;

X უბანი 1. X-566500, Y-4645000 წერტილიდან დინების მიმართულებით ხიდამდე ირეცხება დამბის ძირი.

აღსანიშნავია, რომ დამცავი დამბის ფარგლებში რამოდენიმე უბანზე ადგილი აქვს დახრამვით პროცესებს, ქვემოთ მოგვყავს დახრამვის უბნების ადგილმდებარეობის კოორდინატები:

I კერა - X-567284, Y-4646441;

II კერა - X-567263, Y-4646423;

III კერა - X-567142, Y-4646289;

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მდ. დურუჯის მარცხენა შენაკადის მდ. სალმისხევის და საავტომობილო გრუნტის გზის გადაკვეთის უბანზე არსებული ბეტონის ნაკადგამტარი (კოორდინატები: X-569725; Y-4648480) წყალმოვარდნების და ღვარცოფული ნაკადების გავლის პირობებში ვერ უზრუნველყოფს მათ შეუფერხებლივ გატარებას, ამიტომ ხშირად ადგილი აქვს ნაკადის შეტბორვა-შეგუბებას და ნაკადების დამცავი დამბის მიმართულებით გადადინებას და მისი ძირის გამორეცხვას.

ამასთან, მდ. დურუჯის აუზში ბოლო 30 წელზე მეტია, აღარ ჩატარებულა ხეობის ტოპოგრაფიული და საინჟინრო-გეოდინამიური სიტუაციის აგეგმვა. დღეისათვის დაუზუსტებელია,

ღვარცოფმაფორმირებელი მასის პოტენციური და უშუალოდ ჩართვადი მინერალური მასის მოცულობა. ამისათვის აუცილებელია ახალი გეოდინამიური რუკის შექმნა და შემდეგ ყოველწლიური მონიტორინგის წარმოება, მდინარის მთელი აუზის ფარგლებში. ადრეული შეტყობინების სისტემის ინსტალაცია, მიღებული ახალი ინფორმაციის ანალიზის საფუძველზე ქალაქ ყვარელის დაცვის ღონისძიებების ტექნოლოგიების ახლებურად შემუშავება, ასევე არსებული დამბების დაზიანებული მონაკვეთების აღდგენა.

კატასტროფული შედეგების თავიდან ასაცილებლად აუცილებელია შემდეგი ღონისძიებების გატარება:

- მდ. დურუჯის კალაპოტის რეგულარულად გაწმენდა-ჩაღრმავება, გაფართოება, გასწორხაზოვნება და მისი ცენტრალურ ნაწილში (ღერძულ) განთავსება;
- კალაპოტში აკუმულირებული მყარი ნატანის გამოყენებით ნაპირსამაგრი დამბის დეფორმირებულ-გამორეცხილი უბნების აღდგენა და გამაგრება ბეტონის ფილებით;
- ნაპირსამაგრი დამბის სათავის დასაცავად მდ. სალმისხევის და გრუნტის გზის გადაკვეთის უბანზე მაღალგამტარუნარიანობის ერთმალისანი ხიდის მოწყობა;
- დამბის სათავეში დაზიანებული და დეფორმირებული დეზების აღდგენა;
- ნაპირსამაგრი დამბის დახრამვის უბნებზე ზრუდარების (ბარაჟი) რიგის მოწყობა.

მდ. კაბალსა და დურუჯზე დამონტაჟდა 4 ერთეული მდინარეში წყლის დონის და ატმოსფერული ნალექების რაოდენობის მზომი ხელსაწყო მიზანი:

- გარემოს ეროვნული სააგენტოს შესაძლებლობების გაძლიერება ჰიდროლოგიური მოვლენების მონიტორინგის კუთხით;

- ჰიდროლოგიურ პროგნოზირებისა და ადრეული შეტყობინების ტექნოლოგიური სისტემის გაუმჯობესება.

უნდა აღინიშნოს, რომ ზემოაღნიშნული რეკომენდაციები ვერ მოგვცემენ სასურველ შედეგს, თუ არ მოხდა ახალი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობებისა და კონსტრუქციების აგება.

3.4. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერების კომპიუტერული მოდელირება

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერები მძლავრი კონსტრუქციებია რომელებსაც შეუძლიათ წინააღმდეგობა გაუწიონ ღვარცოფული ნაკადების დიდ წნევას. სწორად დაპროექტებულ ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერები ქმნიან ეფექტურ და მრავალფუნქციურ დამცავ სისტემას.

კომპანია Geobrugg-სა და WSL-ის მიერ შემუშავებლ იქნა ორი კომპიუტერული პროგრამა DEBFLOW და FARO, რომელთა მეშვეობითაც შესაძლებელია ბარიერების საპროექტო პარამეტრების გაანგარიშება ღვარცოფული ნაკადისა მახასიათებლებისა და რელიეფის გათვალისწინებით.

პროგრამა DEBFLOW საშუალებას იძლევა შერჩეულ იქნას ელასტიკური ბარიერის კონსტრუქცია შესაბამისი კონკრეტული კვეთისთვის. აღნიშნული პროგრამა შემუშავებულია ათობით ფართომასშტაბიან კვლებსა და ლაბორატორიულ კვლების შედეგებზე დაყრდნობით. პროგრამის სამედოობა არაერთხელ აპრობირებულია პრაქტიკაში.

კომპიუტერული პროგრამა FARO შემუშავებულია სასრული ელემენტების მოდელზე დაყრდნობით და მოდელირების საიმედო ხერხს წარმოადგენს. მისი მეშვეობით შესაძლებელია არა მხოლოდ ღვარცოფების,

არამედ ქვათაცვენის, თოვლის ზვავებისა და მეწყერების ელასტიკურ ბარიერზე ზემოქმედების მოდელირება [80].

მდ. დუდუჯის ღვარცოფული აუზის შესწავლის საფუძველზე, პროგრამა DEBFLOW გამოყენებით ჩვენს მიერ განხილულ იქნა 4 ძირითადი სიტუაცია.

სიტუაცია I : ღვარცოფის პირველი ტალღა ზემოქმედებს ბარიერზე ქვედა დიობის ნაწილში. ღვარცოფის შუბლი აღწევს ბადეს. ჰიდროსტატიკური წნევა ($P_{hyd.}$) და დინამიკური კომპონენტა ახდენენ ნაკადის სიმაღლეზე გაფანტულ ზემოქმედებას (h_{fl}) ქვედა მზიდ ბაგირზე. მისი ძალა დამოკიდებულია ღვარცოფული ნაკადის ტიპზე, სიჩქარესა და სიმკვრივეზე.

სიტუაცია II: ღვარცოფული ნაკადის h_{fl} სიმაღლის მქონე მეორე ტალღა გადაფარავს ბარიერის მიერ შეკავებულ პირველ ტალღას. ამ შემთხვევაში ჰიდროსტატიკური წნევა მოქმედებს $2h_{fl}$ სიმაღლით აკუმულირებული დანალექის მეშვეობით. მეორე ტალღის მყარი მასის წნევა დაგროვილ დანალექზე ახდენს დრენირების ეფექტს.

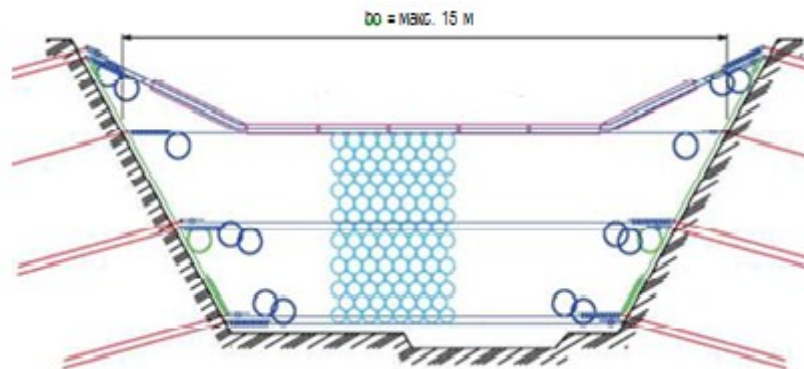
სიტუაცია III: ბარიერი აკავებს მომდევნო ტალღებს. შეკავებული ღვარცოფული ტალღების ჯამური რაოდენობა განისაზღვრება ნაკადისა და ბარიერის სიმაღლით. მიმდევრობა პირველი და მეორე სიტუაციების ანალოგიურია. ყოველი მომდევნო ტალღა გადაფარავს წინამორბედს. ჰიდროსტატიკური წნევა ($P_{hyd.}$) დამოკიდებულია ბარიერის მყარი მასით შევსების სიმაღლეზე, ხოლო დინამიკური ზემოქმედება - მესამე ტალღის სიმაღლეზე (h_{fl}). ჰიდროსტატიკური წნევა ნელნელა მცირდება რაც დამოკიდებულია მყარი მასის მახასიათებლებზე, მის ფილტრაციურ თვისებებსა და შევსების დროზე. საბოლოო ჯამში ჰიდროსტატიკურ წნევა დადის გრუნტის აქტიურ გვერდით წნევამდე.

სიტუაცია IV, გადადინება: მომდევნო ტალღა გადაედინება შევსებულ ბადეზე. იგი ბადეზე ზემოქმედებს ღვარცოფული მასით გამოწვეული დამატებითი დატვირთვით σ და დამძვრელ T ზემოქმედებას

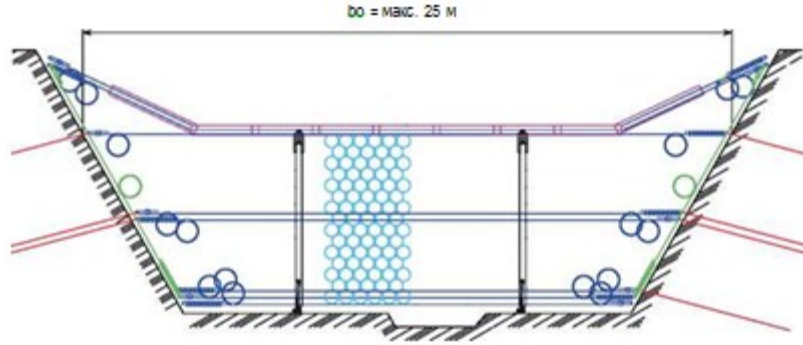
ახდენს. გადადინების დაწყების შემდეგ დატვირთვები არ იზრდება. დაგროვილ მასაზე მოქმედებს გადადინებული მასა და მხები ძაბვები, რომლებიც ზრდის ბარიერზე ჰიდროსტატიკურ წნევას ($\sigma + P_{hyd}$). ჰიდროსტატიკური წნევა მცირდება ღვარცოფული დანალექის ფილტრაციული მახასიათებლებისა და ბარიერის შევსების დროის მიხედვით.

შემუშავებული მოდელები საშუალებას იძლევა გაანგარიშებულ იქნას ელასტიკური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების პარამეტრები კონსტრუქციის მახასიათებლების, დატვირთვებისა და საჭირო სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტების გათვალისწინებით. აღსანიშნავია, რომ ბარიერების მოდელები და კონსტრუქციები გამოცდილია პრაქტიკაში, რაც კიდევ ერთხელ მიუთითებს გამოთვლების სიზუსტესა და კონსტრუქციის საიმედოობაზე [82].

ღვარცოფული ბარიერების ტიპებიდან შევარჩიეთ შემდეგი ორი ტიპი: 1. VX ტიპის ბარიერები, რომლებიც განკუთვნილია ვიწრო, V-ს მაგვარი განვი კვეთის მქონე ეროზიული ღრანტებისთვის (სქემა მოცემულია ნახაზზე 3.1); 2. UX ტიპის ბარიერები, რომლებიც განკუთვნილია განიერი U-ს მაგვარი განვი კვეთის მქონე სადინარებისთვის (სქემა მოცემულია ნახაზზე 3.2). ასეთი ტიპის კონსტრუქციის სიგანე 25 მეტრამდეა, ხოლო სიმაღლე 6 მეტრამდე.



ნახაზი 3.1. VX ტიპის ბარიერი.



ნახაზი 3.1. UX ტიპის ბარიერი.

ღვარცოფული ბარიერების საანგარიშოდ, ჩვენს მიერ აღებულ იქნა შემდეგი საწყისი მონაცემები: მოსალოდნელი ღვარცოფის სიმკვრივე, მოცულობა, ტალღების რაოდენობა, პირველი ტალღის მოცულობა და მაქსიმალური ხარჯი.

განგარიშების საიმედოობისთვის, სტატისტიკური მონაცემების საფუძველზე, განხილულ იქნა სამი სხვადასხვა ვარიანტი. ყოველი საანგარიშო შემთხვევისთვის ხარჯის გამოთვლა წარმოებდა ემპირიულად რიკმანის მიერ შემოთავაზებული დამოკიდებულებით [83]. ბარიერების განლაგების გეომეტრია მოცემულია ცხრილში 3.3.

კალაპოტის და ბარიერის პარამეტრები

ცხრილი 3.3.

| პარამეტრები | მინიმალური მნიშვნელობა | მაქსიმალური მნიშვნელობა |
|---|------------------------|-------------------------|
| სისტემის სიმაღლე (მ) | 2 | 6 |
| ნაკადის სიგანე ქვედა ნაწილში (მ) | 4 | 12 |
| ნაკადის სიმაღლე ზედა ნაწილში (მ) | 6 | 25 |
| მანძილი დინების ზედა ნაწილში განთავსებულ ბარიერამდე (მ) | 5 | 500 |
| კალაპოტის ქანობი (%) | 5 | 80 |
| შემავსებელი მასის ზედაპირის ქანობი (%) | 0 | 80 |

აგრეთვე, გათვალისწინებულ იქნა სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტის, რომელიც 1,0-1,5-ის ფარგლებში მერყეობს და დაოკიდებულია რისკის ფაქტორზე [84].

დანართის სახით მოგვყავს გაანგარიშების შედეგად მიღებული ბარიერების გეომეტრიული ზომები, განლაგების სქემა და მახასიათებლები.

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, შეიძლება დავასკვნათ, რომ, ჩვენს მიერ შემუშავებული მოდელის, GIS სისტემებისა და პროგრამა DEBFLOW-ს გამოყენებით, შესაძლებელია ოპტიმალური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერის საპროექტო პარამეტრების გაანგარიშება კონსტრუქციის მახასიათებლების, მასზე მოსული დატვირთვის, სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტისა და ღვარცოფული კერიდან დაძრული მასის მახასიათებლების დროსთან კავშირში გათვალისწინებით.

ზოგადი დასკვნები

ნაშრომში წარმოდგენილი თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგების კრიტიკული ანალიზის საფუძველზე გამოტანილია დასკვნები:

- ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიში დამოკიდებულებები. კვლევის შედეგებმა დაადასტურა, რომ თეორიულად და ექსპერიმენტული მასალის საფუძველზე მიღებულ K-ს მნიშვნელობებს შორის განსხვავება არ აღემატება 10%-ს.
- არასტაციონარულობის საფუძველზე მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები. მიღებული დამოკიდებულებების საფუძველზე, შესაძლებელია განისაზღვროს მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერება ღვარცოფის ტალღის გავრცელების ზონაში და შეირჩეს შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.
- ჩატარებული კვლევების საფუძველზე და ბმული ღვარცოფის რეოლოგიური ბუნებიდან გამომდინარე მიღებულია დამყარებული მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება. მიღებულ განტოლებიდან, შესაბამისი დაშვების საფუძველზე, გამოყვანილია ბმული ღვარცოფის არათანაბარი მოძრაობის სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება, რომლის სიდიდე წყლის ნაკადის სიჩქარეზე ნაკლებია და რეოლოგიური პარამეტრების გავლენით არის გამოწვეული.
- ჩვენს მიერ შემუშავებული მოდელის, GIS სისტემებისა და პროგრამა DEBFLOW-ს გამოყენებით, შესაძლებელია ოპტიმალური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერის საპროექტო პარამეტრების განგარიშება კონსტრუქციის მახასიათებლების, მასზე მოსული

დატვირთვის, სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტისა და ღვარცოფული კერიდან დაძრული მასის მახასიათებლების დროსთან კავშირში გათვალისწინებით.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. **Перов В.Ф.** Селевые явления. Терминологический словарь. Изд.-во Московского Университета, 1996, 34 с.
2. **Айзенберг М.М., Олиферов А.Н.** О формализации селевых классификаций. Труды УкрРНИИ, 1985, вып.201, с.115-125.
3. **Бегишвили К.Р.** Типы и виды селей. – XV Всесоюзная научно-техническая конференция по противоселевым мероприятиям. Тезисы докладов. Вып.1. М., ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1978, с.180-182.
4. **Бегишвили К.Р.** Классификация селевых бассейнов для разработки противоселевых мероприятий. - Тезисы докладов Всесоюзного совещания „Состояние и пути развития научных исследований по селевой проблеме и проектирования противоселевых сооружений“. М., ЦБНТИ, 1974, с.32-33.
5. **Виноградов Ю.Б.** Классификация селевых явлений. Селевые потоки. Сб.4.М., Гидрометеиздат, 1980, с.46-51.
6. **Гагошидзе М.С.** Природа грязекаменных (селевых) потоков. - XVI Всесоюзная научно-техническая конференция по методам расчета и прогноза селевых потоков. Тезисы докладов. М., Гидрометеиздат, 1981, с.58-61.
7. **Егиазаров И.В.** Горный русловой и селевой процесс. Классификация и расчет. В сб.: Селевые потоки и горные русловые процессы. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1968, с. 121-125.
8. **Иванов Б.Н.** [Дискуссия]. – В сб.: Проблемы противоселевых мероприятий. Алма-Ата, Казахстан, 1979, с.106-107.
9. **Перов В.Ф.** Классификация экзогенных процессов горных стран. Геоморфология», 1981, N 1, с.3-7.
10. **Флейшман С.М., Сейнова И.Б.** Разработка классификации селей для целей инженерной защиты.- В сб.: Проблемы классифицирования склоновых гравитационных процессов. М., Наука, 1985, с.168-170.
11. **Флейшман С.М., Сейнова И.Б.** Предложения по созданию инженерной классификации селей – В сб.: Проблемы противоселевых мероприятий. Алма-Ата, Казахстан, 1984, с.7-24.

12. **Шеко А.И.** Классификация селевых потоков по гранулометрическому составу твердой составляющей. – В сб.: Изучение и прогноз экзогенных геологических процессов. Труды ВСЕГИНГЕО, вып.134. М., 1980, с.4-8.
13. **Шеко А.И.** Глава 1. Классификация селей и очагов их зарождения. – В сб.: Методическое руководство по комплексному изучению селей. М., „Недра“, 1971, с.5-13
14. **Шеко А.И.** Закономерности формирования и прогноз селей. Москва: Недра, 1980, 296 с.
15. **Виноградов Ю.Б.** Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометиздат, 1980.
16. **Боярский И.Я., Перов В.Ф.** Основные типы динамических механизмов формирования селевых потоков. Вестник МГУ. Сер. геогр, 1974, №5, с.
17. **Schuster R.L.** Outburst debris-flows from failure of natural dams, in G.F. Wieczorek and N.D. Naeser (eds.), Debris-flow Hazards Mitigation, Proc., 2nd Int'l. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, Taipei, 16-18 August, 2000, pp. 29-42.
18. **Флейшман С.М.** Сели. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 312 с.
19. **Гагошидзе М.С.** Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси, «Сабчота Сакартвело», 1970. 385 с.
20. **Херхеулидзе И.И.** Эмпирические формулы для приближенного определения расчетных параметров структурных селевых потоков. Материалы V Всесоюзного совещания по изучению селевых потоков и меры борьбы с ними. Баку, 1962, с. 178-183.
21. Руководство по изучению селевых потоков. СССР, Главное управление гидрометеорологической службы, Гидрометеиздат, 1976, 142 с.
22. **ყრუაშვილი ი., ჯვარცოფები და მათთან ბრძოლის მეთოდები.** სტუ-ს გამომცემლობა, თბილისი, 2014, 340 გვ.
23. **Медеуов А.Р., Нурланов М.Т.** Селевые явления сейсмоактивных территорий Казахстана (Проблемы управления). Алматы: Қаржы-Қаражат, 1996, 201 с.
24. Руководство по изучению селевых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1976, 29 с.
25. **Тасболат Б., Кожобекова З., Кенжебай Р.Н., Аманбаева М.А.** Источники риска негативного воздействия селей. Южно-Казахстанский

государственный университет им. М. Ауезова, Шымкент, Казахстан, 2015, 3 с.

26. **Вардугин В.Н.** Гранулометрический состав рыхло обломочных пород в селевых очагах. В кн.: Селевые потоки. М.: Гидрометеиздат, 1977, сб.2, с.94-106.
27. **Айзенберг М.М. и Вольфцун.** Гранулометрический состав селевых отложений на реках Украинских Карпат. Труды УкрНИГМИ, 1971, вып. 107, с. 133–138.
28. **Боголюбова И.В.** Селевые потоки и их распространение на территории СССР. Л., 1957, 152 с.
29. Yokohama Strategy and Plan of Action for a Safer World: Guidelines for natural disaster prevention, preparedness and mitigation. World Conference on Natural Disaster, Yokohama, Japan, 23-27 may, 1994, 19 p.
30. Alpine Convention. Alpine Conferences. Retrieved August 3, 2012.
31. **Arattano, M., Deganutti, A.M., and Marchi, L.** Debris flow monitoring activities in an instrumented watershed on the Italian Alps. In Proceedings of the 1st International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, San Francisco, Calif. Edited by C.-L. Chen. American Society of Civil Engineers (ASCE). 1997. pp. 506–515.
32. **Wanner, H., Grosjean, M., Röthlisberger, R. & Xoplaki, E.** Climate variability, predictability and climate risks: a European perspective. *Clim. Change* 79, 2006. 1–7.
33. **Baggi, S. & Schweizer, J.** Characteristics of wet-snow avalanche activity: 20 years of observations from a high alpine valley (Dischma, Switzerland). *Nat. Haz.* 50, 2009. pp. 97–108.
34. **Rickenmann, D., and Zimmermann, M.** The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8: 1993. pp. 175–189.
35. **Harris, C., Vonder Muhll, D., Isaksen, K., Haeberli, W., Sollid, J. L., King, L., Holmlund, P., Dramis, F., Guglielmin, M. & Palacios, D.** Warming permafrost in European mountains. *Global Planet. Change* 39, 2003. pp. 215–225.
36. **Zappa, M. & Kan, C.** Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* 7, 2007. pp. 375–389.

37. **Rickenmann, D., Hunzinger, L. & Koschni, A.** Flood events and sediment transport during the rainstorm of August 2005 in Switzerland. In *Interpraevent 2008 Conf. Proc.*, vol. 1, 2008. pp. 465–476.
38. **Beniston, M.** August 2005 intense rainfall event in Switzerland: not necessarily an analog for strong convective events in a greenhouse climate. *Geophys. Res. Lett.* 2006 pp. 33.
39. **Hilker, N., Hegg, C. & Zappa, M.** Flood and landslide caused damage in Switzerland 1972–2007: with special consideration of the flood in August 2005. In *Interpraevent 2008 Conf. Proc.*, vol. 1, 2008. pp. 99–110.
40. Экологический атлас России. Министерство природных ресурсов РФ, Федеральный экологический фонд РФ, Географический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, ЗАО Карта, 2002.
41. <https://ka.wikipedia.org/wiki/კავკასია> - უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.04.2016.
42. Кадастр лавинно-селевой опасности Северного Кавказа. Отв. ред. – М.Ч. Залиханов. Санкт- Петербург: Гидрометеоиздат, 2001, 112 с.
43. **Лопатин Г.В.** Сели в СССР и меры борьбы с ними. Институт географии (Академия наук СССР), Академия наук СССР. Комиссия по изучению селевых потоков. Изд-во "Наука", 1964. 280 с.
44. **Медеуов А., Колотилин Н.Ф., Керемкулов В.А.** Сели Казахстана. Нац. акад. наук респ. Казахстан. Ин-т географии. - Алматы: Гылым, 1993. 159 с.
45. **Таланов Е.А.** Методика оценки и картографирование эколого-экономического риска на территории, подверженной водной эрозии и селям. *Вестн. КазНУ. Сер. Географическая.* 2007. № 1 (24). С. 53–61.
46. **Таланов Е.А.** Эколого-экономическое обоснование шкалы разрушительной силы эрозионных процессов. *География Казахстана: содержание, проблемы, перспективы: Матер. Междунар. науч. практ. конф. 20–22 апреля 2006 г. Алматы, 2006. С. 258–265.*
47. **Алимбаев А.К., Джанпеисов Р., Науменко А.А.** Эрозия почв Заилийского Алатау (на примере бассейна р. Малая Алматинка). Алматы: Казак университет, 1998. 115 с.

48. Ландшафтное и биологическое разнообразие Республики Казахстан. Информационно-аналитический обзор Программы Развития ООН. Под ред. канд. биол. наук И. Мирхашимова. Алматы: OST-XXI век, 2005. 242 с.
49. **Zhong Dunlun a. oth.** Map of debris flow Distribution and Danger degree division in Sichuan and Chongqing. Sc. 1:1 000 000. Chengdu, 1997.
50. **Nakagawa, H., Takahashi, T., and Satofuka, Y.** A debris-flow disaster on the fan of the Harihara River, Japan. In Proceedings of the 2nd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Taipei, Taiwan. Edited by G.F. Wiecek and N.D. Naeser. A.A. Balkema, Rotterdam. pp. 2000. 193–201.
51. **Suwa, H.** Field observation of debris flow. In Proceedings of the Japan–China (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, Kyoto, Japan, 1989. pp. 343–352.
52. **Черноморец С.С.** Особенности морфолитодинамики селевых очагов Центрального Кавказа после катастрофических селей. Москва, 2003 г. 26 с.
53. https://ka.wikipedia.org/wiki/სამხრეთი_კავკასია, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 01.04.2016.
54. **ბასილაშვილი ც., სალუქვაძე მ., ცომაია ვ., ხერხეულიძე გ.** კატასტროფული წყალდიდობები, ღვარცოფები და თოვლის ზვავები საქართველოში და მათი უსაფრთხოება. სტუ-ის გამომცემლობა, თბილისი, 2012, 248 გვ.
55. **Хмаладзе, Г.Н.** Средний сток рек Закавказья и влияние на него физико-географических факторов, Труды Тбилисского научно-исследовательского гидрометеорологического института, вып. 8. 1961. стр.42-62.
56. **Херхеулидзе Г.И., Церетели Э.Д., Татошвили С.Г.** Селевые явления и селеопасные районы Грузинской ССР, Тр. Закавказ. регион НИИ Госгидромета, 1984 - Вып. 83 (90) с. 10-27.
57. **Церетели Э.Д., Церетели Д.Д.** Геологические условия развития селей в Грузии. Тбилиси: Мецниереба, 1985. 186 с.
58. საინფორმაციო ბიულეტენი: საქართველოში 2012 წლის სტიქიური გეოლოგიური პროცესების განვითარების შედეგები და პროგნოზი

2013 წლისათვის, გარემოს ეროვნული სააგენტო, გეოლოგიის დეპარტამენტი. 2013. 466 გვ.

59. საინფორმაციო ბიულეტენი: საქართველოში 2013 წლის სტიქიური გეოლოგიური პროცესების განვითარების შედეგები და პროგნოზი 2014 წლისათვის, გარემოს ეროვნული სააგენტო, გეოლოგიის დეპარტამენტი. 2014. 232 გვ.
60. საინფორმაციო ბიულეტენი: საქართველოში 2014 წლის სტიქიური გეოლოგიური პროცესების განვითარების შედეგები და პროგნოზი 2015 წლისათვის, გარემოს ეროვნული სააგენტო, გეოლოგიის დეპარტამენტი. 2013. 388 გვ.
61. საქართველოს ბუნებრივი რესურსები და გარემოს დაცვა. საქართველოს სტატისტიკის ეროვნული სამსახური, თბილისი, 2012, 81 გვ.
62. კერესელიძე დ., ალავერდაშვილი მ., ცინცაძე თ., ტრაპაიძე ვ., ბრეგვაძე გ., რა მოხდა 2015 წლის 13 ივნისს მდინარე ვერეს წყალშემკრებ აუზში. ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი, თბილისი, 2015, 40 გვ.
63. კლიმატის ცვლილების მიმართ მოწყვლადობის შეფასება, საქართველოს ანგარიში. საქართველოს წითელი ჯვრის საზოგადოება. სამუშაო ვერსია თებერვალი, 2014, 65 გვ.
64. **Мостков М.А.** Очерки теории руслового потока. Изд-во АН СССР, М.: 1959, с. 246.
65. **ნატიშვილი ო. გ., ტევზაძე ვ.ი.,** Гидравлические закономерности связанных селей. Мецниереба, 1996 г. 156 с.
66. **ნატიშვილი ო. გ., ტევზაძე ვ.ი.,** Основы динамики селей. Национальная Академия Наук Грузии Институт водного хозяйства, Издательство: Мецниереба, Тбилиси, 2007, 214 с.
67. **Иорданишвили З.С.,** Движение структурных селей на прямолинейные участки русла. В кн.: Защита железных дорог от селевых потоков. М.: Трансжелдориздат, 1962, с. 188-196.
68. **ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე.** ღვარცოფული ნაკადების დინამიკის ზოგიერთი საკითხები. საუს-სამეცნიერო შრომები, “საინჟინრო ეკოლოგიის საკითხები ჰიდროტექნიკურ მელიორაციაში”. 1996, გვ. 55-63.

69. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე. ღვარცოფების შემფოთებული ზონის საანგარიშო მახასიათებლები. აგრარული მეცნიერების პრობლემები. სამეცნიერო შრომათა კრებული. თბილისი. ტ. #1. 1997, გვ. 229-235.
70. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., კლიმიაშვილი ი. ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის წონასწორობის რღვევის განსაზღვრა ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "ჰიდროინჟინერია", სტუ, საქართველოს საინჟინრო აკადემია. # 1-2 (17-18), 2014.
71. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., სიჭინავა ნ. ღვარცოფული ნაკადების დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება. სასოფლო-სამეურნეო წარმოების, მექანიზაციისა და ელექტრიფიკაციის ტექნიკური საშუალებების სრულყოფის საკითხები. ნა-წილი 2, 1993, გვ. 75-87.
72. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., კლიმიაშვილი ი. არასტაციონარულობის საფუძველზე ღვარცოფსაცავის მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერების განსაზღვრა. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "ჰიდროინჟინერია", სტუ, საქართველოს საინჟინრო აკადემია. # 1-2 (17-18), 2014.
73. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., კირტავა ვ. ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების ჰიდრავლიკური მახასიათებლების გაანგარიშება ღვარსაშვზე გადადინების შემთხვევაში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია "კლიმატის ცვლილება და მისი გავლენა სოფლის მეურნეობის მდგრად და უსაფრთხო განვითარებაზე". თბილისი, 2014, გვ. 345-348.
74. Coussot P. Mudflow Rheology and Dynamics, IAHR Monograph Series, A.A. Balkema: Rotterdam, 1997.
75. Takahashi T. Debris flow. Taylor & Francis Group, London, UK. 2007. 465 p.
76. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., კლიმიაშვილი ი. ბმული ღვარცოფის არათანაბარი მოძრაობის მათემატიკური მოდელი. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "ჰიდროინჟინერია", სტუ, საქართველოს საინჟინრო აკადემია. # 1-2 (17-18), 2014.
77. Перов В.Ф. Селеведение. М., Географический факультет МГУ. 2012 г, 274 с.

78. ნათიშვილი ო., ყრუაშვილი ი., გავარდაშვილი გ., ინაშვილი ი. მათოდური რეკომენდაციები ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირებისათვის (ჰიდრაულიკური გაანგარიშებები). საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემია, თბილისი, 2016, 48 გვ.
79. **Wendeler C., B.W. McArdell, D. Rickenmann, A. Volkwein, A. Roth & M. Denk.** Testing and numerical modeling of flexible debris flow barriers, in Ng, Zhang & Wang (Eds), Physical Modeling in Geotechnics – 6th ICPMG '06, Balkema, 2005.
80. **Volkwein A.** Numerical Simulation of flexible rockfall protection systems, Proc. Computing in Civil Engineering. Cancun: ASCE, 2005.
81. საქართველოს 2014 წლის სტიქიური გეოლოგიური პროცესების განვითარების შედეგები და პროგნოზი 2015 წლისთვის. საინფორმაციო ბიულეტენი. საქართველოს გარემოსა და ბუნებრივი რესურსების სამინისტრო, გარემოს ეროვნული სააგენტო, გეოლოგიის დეპარტამენტი, თბილისი, 2015, 388 გვ.
82. ი. ყრუაშვილი, ი. ინაშვილი, ი. კლიმიაშვილი, ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების საპროექტო პარამეტრების კომპიუტერული მოდელირება. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია “გლობალური დათბობა და აგრობიომრავალფეროვნება”. საქართველოს სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა აკადემია. გვ. 334-337. 2015.
83. **Rickenmann, D.** Empirical relationships for debris flows, Natural Hazards, 19(1), 1999, pp. 47-77.
84. **Wendeler, C.** Loading approach for flexible debris flow barriers, in preparation, 2009.

ഇടയാക്കുന്നു

Dimensioning of the flexible Debris Flow Protection System GEOBRUGG VX/UX - DEBFLOW

Input Parameters

Type and density of the debris flow

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|
| Type of debris flow (granular or mud flow) | Type | mud flow | granular | granular | |
| Density of the debris flow material | $\rho =$ | 1600 | 2000 | 2300 | [kg/m ³] |
| Specific weight of the debris flow material | $\gamma =$ | 15.7 | 19.6 | 22.6 | [kN/m ³] |
| Water content | $\omega =$ | 0.64 | 0.39 | 0.21 | - |

Debris flow volume and number of surges

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| Total debris flow volume (incl. water) | $V_{tot} =$ | 1000 | 5500 | 10000 | [m ³] |
| Number of surges | $N =$ | 3 | 2 | 3 | - |
| Volume per surge (average) | $V_N =$ | 333 | 2750 | 3333 | [m ³] |
| Volume of first surge (recommended) | $V_{N1,rec} =$ | 500 | 4125 | 5000 | [m ³] |
| Volume of first surge (chosen) | $V_{N1} =$ | 1000 | 750 | 3000 | [m ³] |

Peak discharge

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|-------------------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|
| Peak discharge (acc. to Rickenmann) | $Q_{p,rec} =$ | 29.5 | 23.6 | 69.6 | [m ³ /s] |
| Peak discharge (chosen) | $Q_p =$ | 30 | 24 | 104 | [m ³ /s] |

Safety factor

| | | | | | |
|----------------------|------|-----|--|--|--|
| Global safety factor | SF = | 1.5 | | | |
|----------------------|------|-----|--|--|--|

Summary of Results

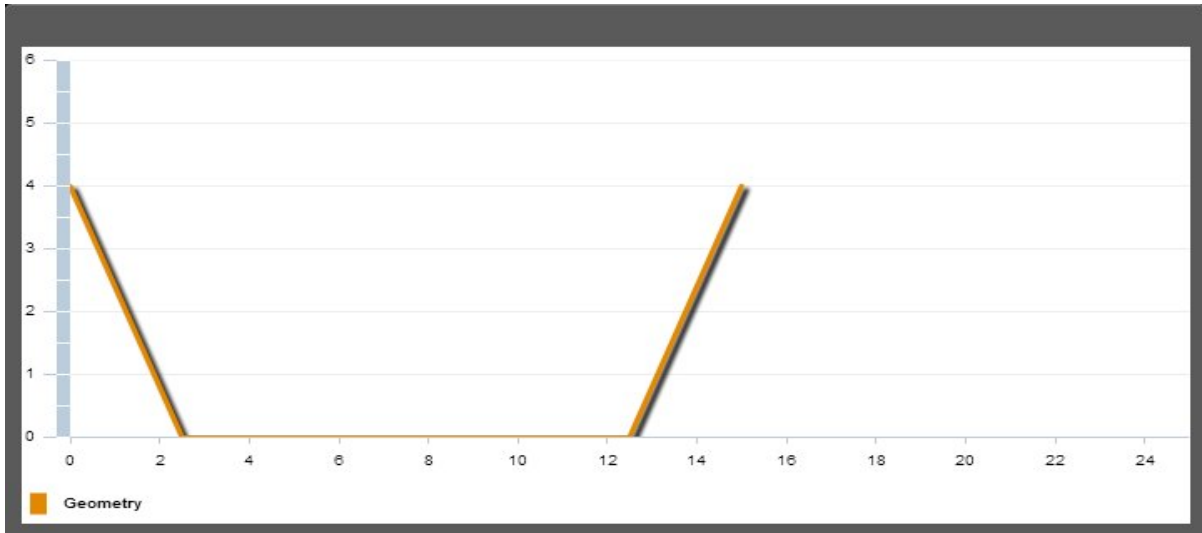
| Summary of Results | | | | |
|---|---------------------|---------------|--------------------|-----------------------|
| Multi-level debris flow protection system | No. | Safety Factor | Proof | Retention volume |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 1 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 2 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 3 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 4 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 5 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 6 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 7 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 8 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 9 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| GEOBRUGG UX180-H6 | No. 10 | 1.89 | fulfilled ! | 955 [m ³] |
| Minimal safety factor of the overall system | SF _{min} = | 1.89 | fulfilled ! | |

| Retention volume | | | | |
|---------------------------|-------------------|------|--------------------|-------------------|
| Total retention volume | $V_{r,tot} =$ | 9550 | | [m ³] |
| Required retention volume | $V_{tot,max} =$ | 100 | | [m ³] |
| Reserve | $V_{r,reserve} =$ | 9450 | | [m ³] |
| Proof of retention volume | | | fulfilled ! | |
| Proof of overall system | | | fulfilled ! | |

Barrier Location No. 1

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,1} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,1} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,1} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,1} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,1} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,1} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,1,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,1} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_1 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,1} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{1,base} =$ | 4.7 | 4.4 | 7.2 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_1 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,1} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,1} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_1 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{Dyn,1} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,1} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,1} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

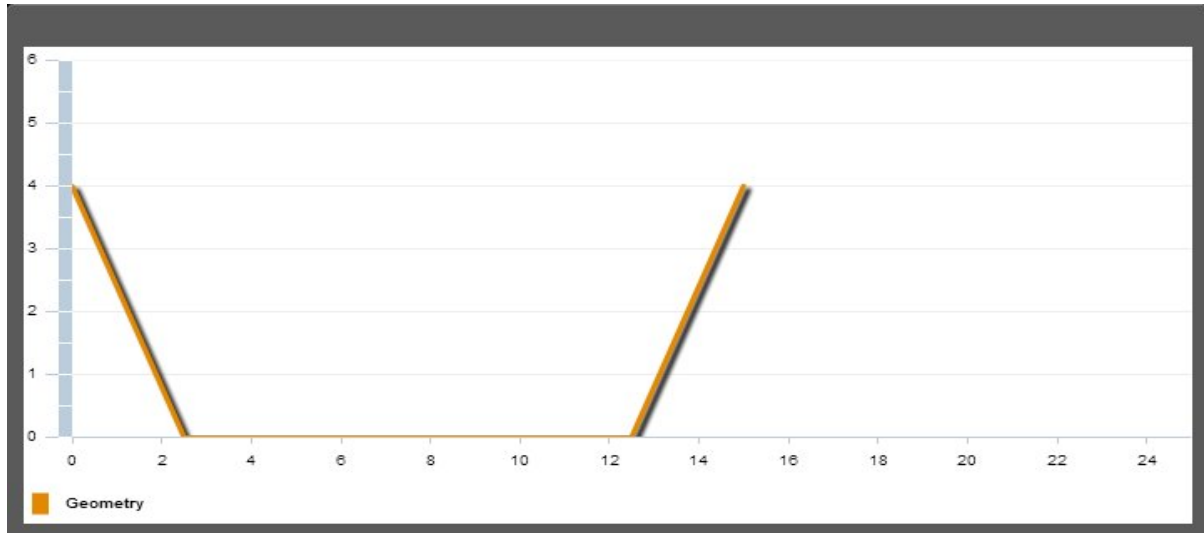
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,1} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,1} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,1} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 2

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,2} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,2} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,2} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,2} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,2} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,2} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,2,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,2} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_2 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,2} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{2,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_2 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,2} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,2} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_2 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{dyn,2} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m*h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,2} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m*h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,2} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

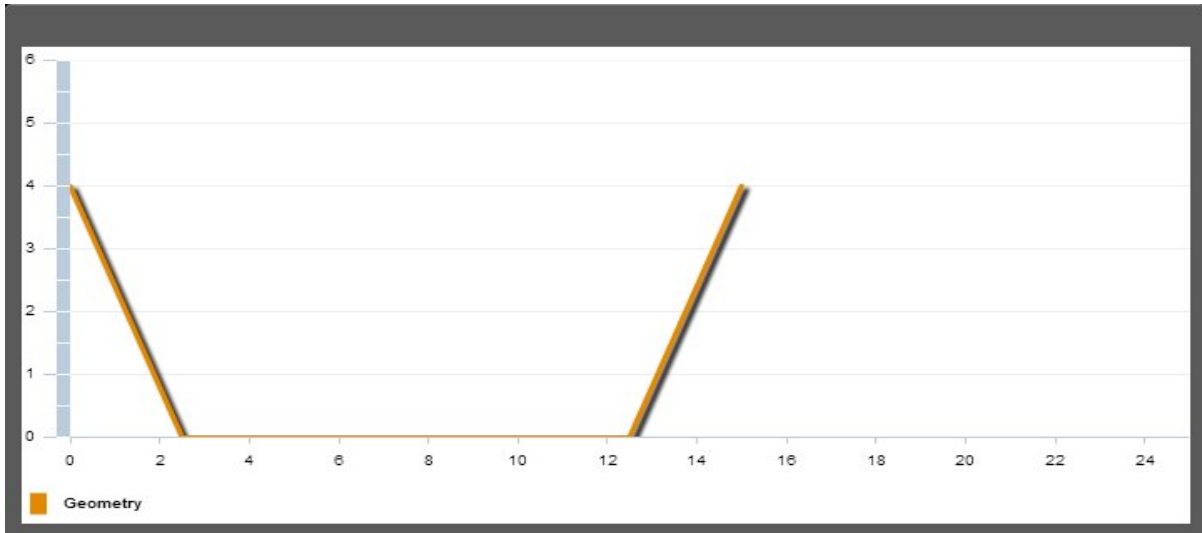
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,2} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,2} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,2} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 3

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,3} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,3} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,3} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,3} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,3} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,3} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,3,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,3} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_3 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,3} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{3,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_3 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,3} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,3} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_3 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{dyn,3} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m ³ h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,3} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m ³ h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,3} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

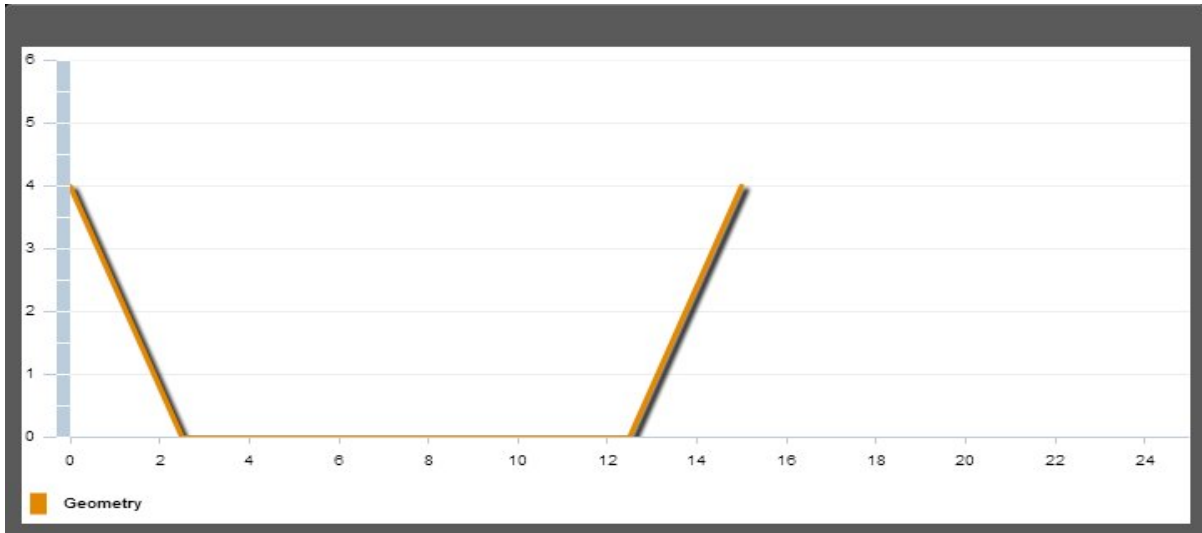
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,3} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,3} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,3} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 4

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,4} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,4} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,4} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,4} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,4} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,4} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,4,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,4} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_4 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,4} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{4,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_4 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,4} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,4} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_4 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{Dyn,4} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,4} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,4} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

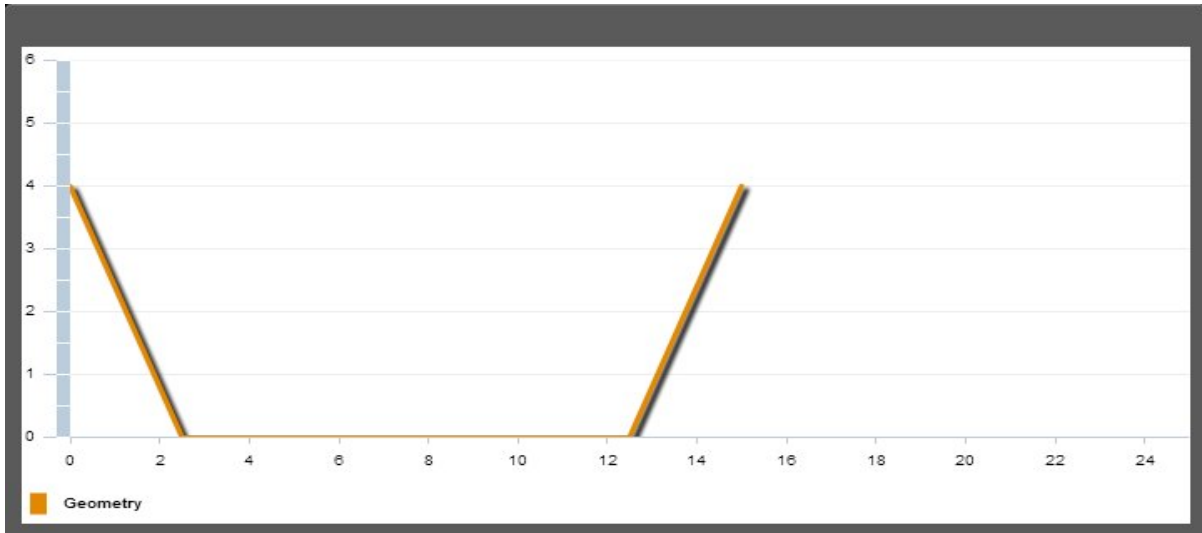
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,4} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,4} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,4} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 5

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,5} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,5} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,5} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,5} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,5} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,5} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,5,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,5} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_5 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,5} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{5,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_5 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,5} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,5} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_5 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{Dyn,5} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m*h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,5} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m*h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,5} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

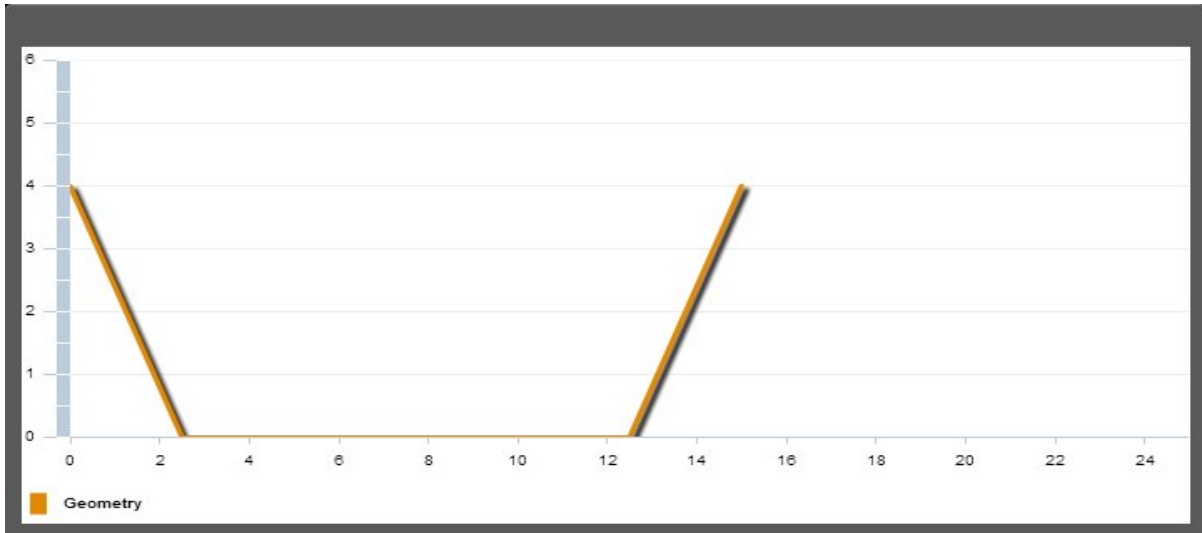
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,5} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,5} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,5} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 6

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,6} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,6} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,6} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,6} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,6} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,6} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,6,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,6} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_6 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,6} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{6,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_6 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,6} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,6} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_6 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{Dyn,6} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m*h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,6} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m*h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,6} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

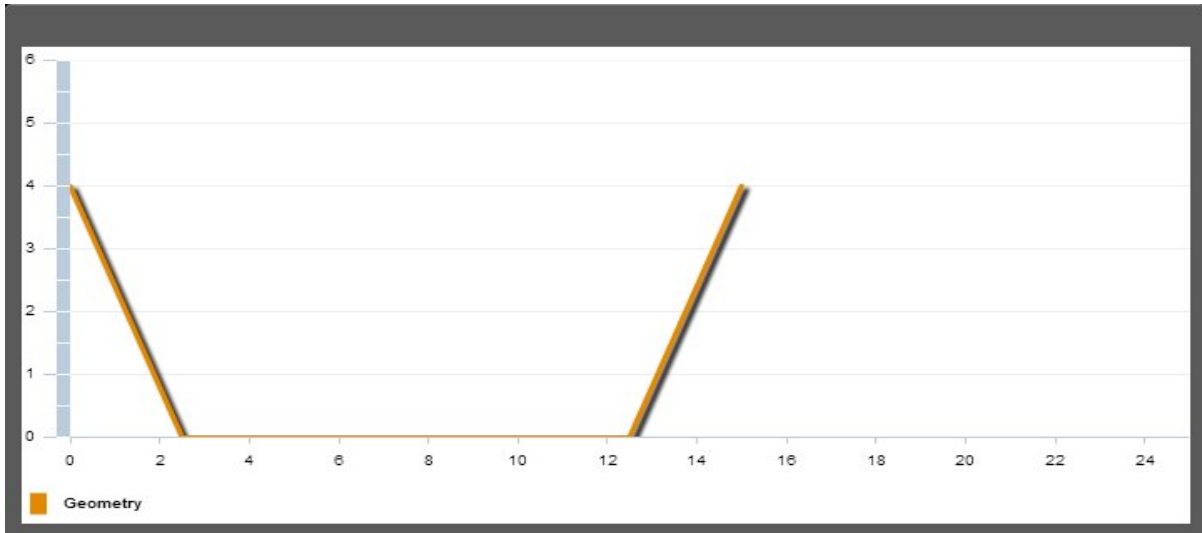
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,6} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,6} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,6} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 7

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,7} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,7} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,7} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,7} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,7} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,7} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,7,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,7} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_7 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,7} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{7,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_7 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fi,7} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,7} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_7 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{Dyn,7} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,7} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,7} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

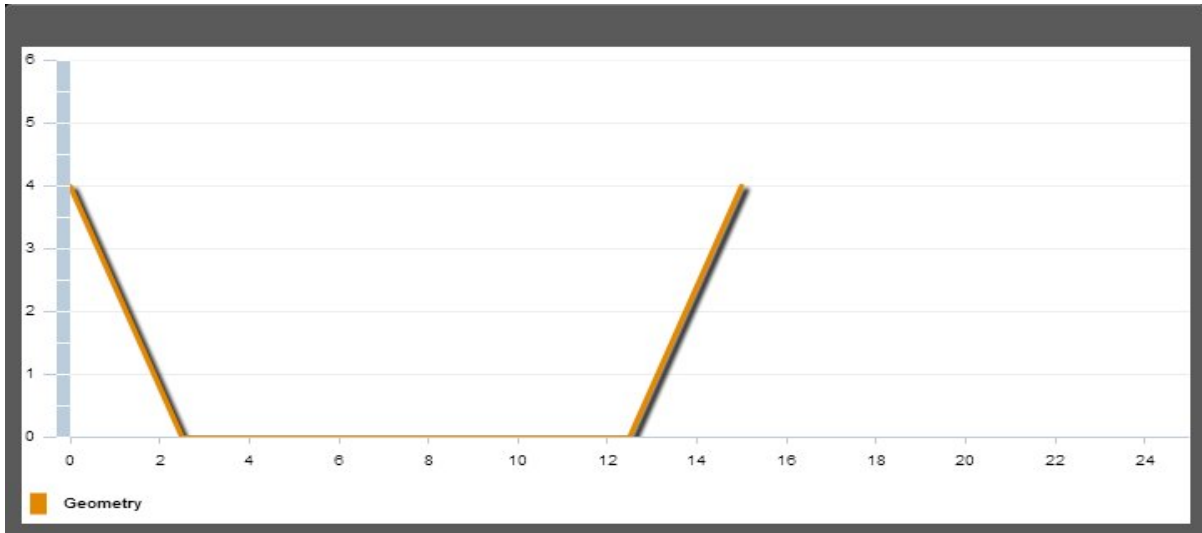
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,7} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,7} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,7} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 8

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,8} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,8} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,8} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,8} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,8} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,8} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,8,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,8} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_8 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,8} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{8,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_8 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,8} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,8} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_8 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{Dyn,8} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,8} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,8} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

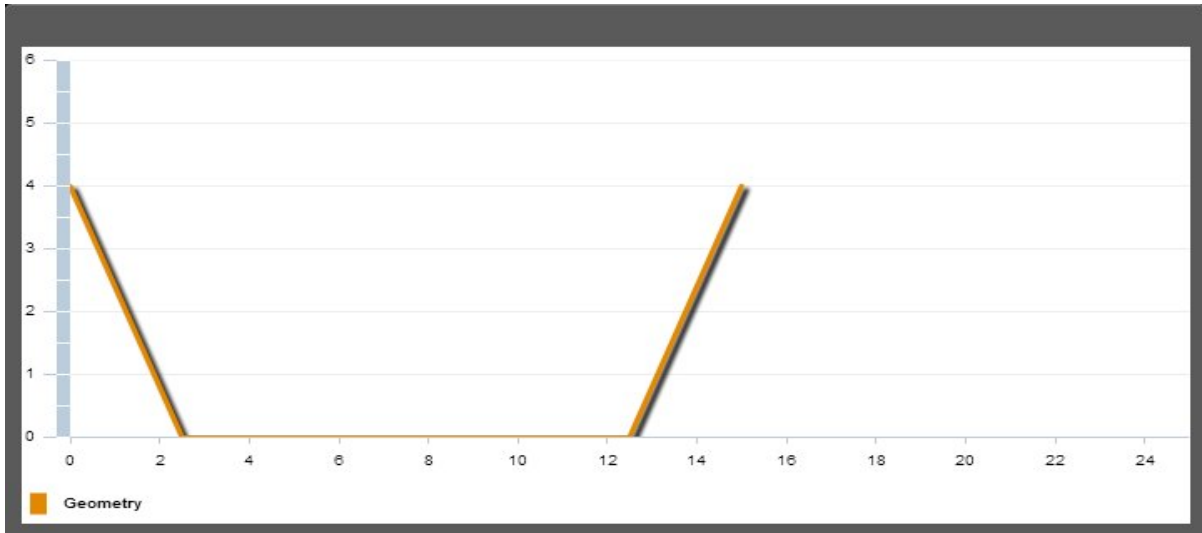
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,8} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,8} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,8} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 9

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|-------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,9} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,9} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,9} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,9} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,9} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,9} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,9,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,9} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_9 =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,9} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{9,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_9 =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,9} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,9} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_9 =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{Dyn,9} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,9} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m ² h _{fl})] |
| Safety factor | $SF_{dyn,9} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

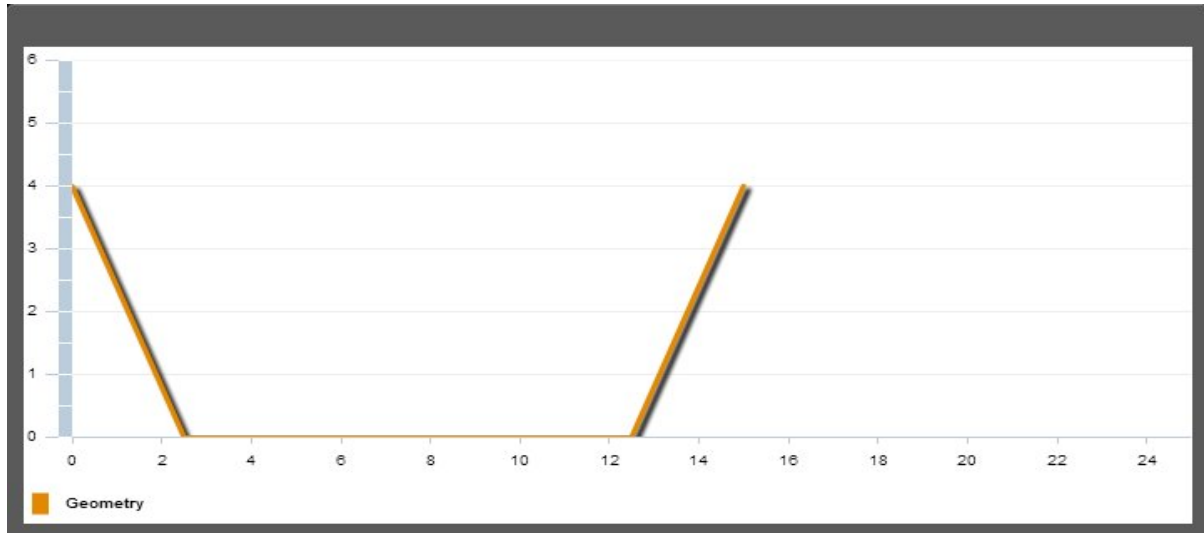
Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,9} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,9} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,9} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |

Barrier Location No. 10

Geometry of barrier location

| | | | |
|---|--------------|-----|-----|
| System height | $H_{0,10} =$ | 4 | [m] |
| Width of torrent on the level of the bottom support ropes | $b_{u,10} =$ | 10 | [m] |
| Width of torrent on the level of the top support ropes | $b_{o,10} =$ | 15 | [m] |
| Distance to the next barrier upstream | $L_{0,10} =$ | 500 | [m] |



Torrent inclination and retention volume

| | | | |
|---|-------------------|------|-------------------|
| System height of the filled barrier | $H_{1,10} =$ | 3.0 | [m] |
| Average torrent inclination upstream of the barrier | $i_{s,10} =$ | 18 | [%] 10° |
| Deposition inclination of filled barrier (acc. to Rickenmann) | $i'_{s,10,rec} =$ | 12.0 | [%] 7° |
| Deposition inclination of filled barrier (chosen) | $i'_{s,10} =$ | 12 | [%] |
| Angle between ring net and river bed | $\xi =$ | 84.8 | [°] |
| Length of deposited material behind barrier | $L_{10} =$ | 51.1 | [m] |
| Retention volume | $V_{r,10} =$ | 955 | [m ³] |

Front velocity and flow height

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Front velocity (acc. to Rickenmann) | $V_{10,base} =$ | 4.7 | 4.7 | 4.7 | [m/s] |
| Front velocity according to Strickler ($v_1 > v_{str}$) | $v_{str} =$ | 3.9 | 3.6 | 6.4 | [m/s] |
| Impact velocity at barrier location (chosen, max. v-value) | $V_{10} =$ | 3 | 3 | 3 | [m/s] |
| Flow height | $h_{fl,10} =$ | 1.0 | 0.8 | 3.5 | [m] |
| Recommended max. basal opening height (acc. to Wendeler) | $h_{d,10} \leq$ | 0.5[m] | | | |

Flexible, permeable debris flow protection system

| | | |
|---|---------------|-------------------|
| System type | Type | GEOBRUGG UX180-H6 |
| Max. system height | $H_{o,max} =$ | 6 ['.m.'] |
| Max. system width above | $b_{o,max} =$ | 25 ['.m.'] |
| Max. system width below | $b_{u,max} =$ | 12 ['.m.'] |
| Proof of system height and system width | | fulfilled ! |

Proof of max. dynamic loading (stopping)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|--|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| Width factor (width at barrier location to standard width) | $BF_{10} =$ | 0.69 | | | |
| Dynamic loading (Pressure and impulse acc. to Wendeler) | $MD_{Dyn,10} =$ | 22 | 35 | 282 | [kN/(m*h _n)] |
| Resistance against dynamic loading | $RD_{dyn,10} =$ | 259 | 207 | 899 | [kN/(m*h _n)] |
| Safety factor | $SF_{dyn,10} =$ | 11.77 | 5.91 | 3.19 | - |
| Proof of max. dynamic loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |

Proof of max. static loading (overflowing)

| | | Load case 1 | Load case 2 | Load case 3 | |
|---|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Reduction factor hydrostat. pressure (Permeability) | $HF =$ | 1.0 | | | |
| Static loading (hydrostat. pressure acc. to Wendeler) | $MD_{stat,10} =$ | 56 | 56 | 137 | [kN/m ²] |
| Resistance against static loading | $RD_{stat,10} =$ | 259 | 259 | 259 | [kN/m ²] |
| Safety factor | $SF_{stat,10} =$ | 4.63 | 3.92 | 1.89 | - |
| Proof of max. static loading | | fulfilled ! | fulfilled ! | fulfilled ! | |
| Proof barrier | | fulfilled ! | | | |