

მთარ ნათიშვილი დავით გუგელაძე  
ნილო შულონი

სითსეეის დ  
ღვარსოვლი

ნეკადეის ჰიდროლოიკა

**მთარ ნათიშვილი ღაპით გუგელაქა  
ნინო გუგონია**

**სითხეების ღა ღვაკსოფული  
ნაკადების ჰიდრაპლიქა**

**სახელმქოვენლო**

**2020 წ.**

## UDC (უკ) 551.311.21 6 -194

სახელმძღვანელო განკუთვნილია საინჟინრო დარგის სპეციალობების სტუდენტებისათვის. მისი დანიშნულებაა სტუდენტს გააცნოს გარემოზე ზემოქმედების შედეგად წარმოქმნილი სტიქიური მოვლენები, ბუნებრივი საფრთხეების გამომწვევი მიზეზები, მისი წარმოქმნის განმსაზღვრელი ფაქტორები და დაცვის საინჟინრო ღონისძიებები. სახელმძღვანელოში წარმოდგენილი საკითხები დაკავშირებულია ჰიდრავლიკის ძირითად კანონებთან, სითხეების და ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობასთან, კერძოდ განიხილება: ჰიდროსტატიკისა და ჰიდროდინამიკის ძირითადი კანონები; დაწნევიანი და უდაწნეო მოძრაობის რეჟიმები; ნაკადის (მათ შორის ბლანტი სითხეების) კინემატიკა; კალაპოტის მორფომეტრული მახასიათებლები; არაბმული და ბმული ღვარცოფული ნაკადების სახეები; ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობის კანონზომიერებანი; განხილულია სითხეების და ღვარცოფული ნაკადების საინჟინრო ნაგებობებზე ზემოქმედების ამოცანები და სხვ.

სახელმძღვანელო განხილულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის აგრარულ მეცნიერებების და ბიოსისტემების ინჟინერინგის ფაკულტეტის აგროსაინჟინრო დეპარტამენტის სხდომაზე, ოქმი 11. 16. 06. 2020წ. რეკომენდირებულია აგროინჟინერიის, ბუნებრივი საფრთხეები, მდგრადი გარემო და დაცვის სპეციალობების ბაკალავრების, მაგისტრებისა და დოქტორანტებისათვის.

### **რედაქტორი:**

**დავით კერესელიძე** - ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

### **რეცენზენტები:**

**ირაკლი ყრუაშვილი** - ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

**რობერტ დიაკონიძე** - გეოგრაფიის დოქტორი, პროფესორი

© **ოთარ ნათიშვილი** დავით გუბელაძე **ნინო მეზონია** 2020 წ.

**ISBN 978-9941-8-2357-2**

## ავტორებისგან

წინამდებარე სახელმძღვანელო ძირითადად პასუხობს საინჟინრო დარგის უმაღლეს საგანმანათლებლო პროგრამების მოთხოვნებს აგროინჟინერიის, ბუნებრივი საფრთხეები, მდგრადი გარემო და დაცვის სპეციალობებს.

სახელმძღვანელოში განხილულია, ჰიდრავლიკის ძირითადი კანონები, სითხეებისა და ლვარცოფული ნაკადების მოძრაობის კანონზომიერებანი და დაცვის ღონისძიებები. საკითხები წარმოდგენილია ბუნებრივი პროცესების მიმდინარეობის დროს, ნაკადის გარემოზე ზემოქმედებისას პრაქტიკული ამოცანების გათვალისწინებით. ყოველი თავი აგებულია იმ პრინციპით, რომ სტუდენტმა დამოუკიდებლად შეძლოს ჰიდრავლიკის ძირითადი კანონების გამოყენება, რისი ცოდნაც აუცილებელია სპეციალობით მუშაობის დროს.

სახელმძღვანელო შედგენილია მონათესავე დისციპლინების: ფიზიკის, მათემატიკისა და თეორიული მექანიკის იმ საკითხების გათვალისწინებით, რომელთა შესწავლა უმაღლესი საგანმანათლებლო პროგრამით არის გათვალისწინებული.

სახელმძღვანელოს შედგენისას ავტორებმა იხელმძღვანელებს პრაქტიკული გამოცდილებით, რაც განპირობებულია ბუნებრივ პროცესებთან კონტექსტში საკითხების განხილვით, რათა სტუდენტმა ძირითადი თემების შესწავლის დროს დამოუკიდებლად შეძლოს მასალის სრულფასოვანი აღქმა.

სახელმძღვანელო ბაკალავრების, მაგისტრებისა და დოქტორანტების გარდა დახმარებას გაუწევს მონათესავე დარგის სპეციალობების სტუდენტებს.

## სარჩევი

შესავალ.....	16
თავი I. ბუნებრივი მოვლენები და მისი წარმოქმნის მიზეზები.....	22
1.1. ჰიდროვლვის განვითარების ისტორია .....	22
1.2. კლმატის გავლენა სტრატოსფერულ სფეროებზე .....	25
1.3. მდნარის მოძრაობის თავისებურებანი.....	28
1.4. მთის ფერდობზე ნაკადების წარმოქმნა .....	31
1.5. ლარვოვანი აუზები.....	35
თავი 2. სითხეების ჰიდროვლვა .....	45
2.1. სითხის ფიზიკური თვისებები .....	45
2.2 სითხის კუთრი წონა .....	46
2.3. სითხის სიმკვრივე, სიბლნტე (შინაგანი ხახუნი), სიბლნტის დნამიკური და კინემატიკური კოეფიციენტები.....	47
2.4 სითხის კუმულაცია და ტემპერატურული გაფართოება.....	49
2.5. სითხის დნამიკური სიბლნტე .....	50
2.6. ნიუტონისეული და არანიუტონისეული სითხეების კლასიფიკაცია .....	54
2.7. კაპილარობა, ნაკადის აერაცია, ნაკადის გაჯერება ნატანით წყალში ყინულის კრისტალების წარმოქმნა, კავიტაცია .....	57
2.8. სითხეზე მოქმედ ძალები.....	61

2.9. იტალიური და რუსული სიბუხეები .....	62
თავი 3. სიბუხეების ჰიდროსტატკა .....	64
3.1. სიბუხის წინასწორი დიფერენციალური განტოლება (ეილერის განტოლება) .....	64
3.2. ჰიდროსტატკის ძირითად განტოლება .....	70
3.3. პასკალის კანონი და მისი გამოყენება პრაქტიკაში .....	72
3.4. მანომეტრული წნევა, პიეზომეტრული სიმაღლე .....	81
3.5. წნევის ძალის განსაზღვრა სიბუხეში ბრტყელად მრუდწირვან ზედაპირზე .....	83
3.6. ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურა .....	86
თავი 4. ამოცანები ჰიდროსტატკაში .....	87
4.1. სიბუხის თავისუფალ ზედაპირიდან წერტილის ჩაღმავების განსაზღვრა .....	87
4.2. ლა ჭურჭლის ფაკერზე აბსოლუტური და ჭარბი ჰიდროსტატკური წნევის განსაზღვრა .....	88
4.3. ვაკუუმის შესაბამისი სიბუხის სვეტის სიმაღლის განსაზღვრა .....	89
4.4. დნმულჭურჭელში (პიეზომეტრულიში) წყლის აწევის სიმაღლის განსაზღვრა .....	90
4.5. ვაკუუმის სიმაღლის განსაზღვრა .....	90
4.6. ჰიდროსტატკურწნეხში მკუმშავი ძალის განსაზღვრა ..	91
4.7. რეზერვუარის ფაკერზე მანომეტრული წნევის განსაზღვრა .....	91
4.8. სიბუხის წნევის ზემოქმედების განსაზღვრა ვერტიკალურ დგანთავსებულბრტყელურზე .....	92

4.9. კაშხლს ფაკერზე სწორეუხიდან ფრზე მოქმედ ძალს განსაზღვრ	93
4.10. კაშხლს საკეჭზე მოქმედ წნევის ძალს სიღრმისა და მიმართულების განსაზღვრ	95
თავი 5. სითხეების ჰიდროდინამიკა	97
5.1. მოძრაობის რეჟიმების განსაზღვრ (დწნევიანი და უდწნეომობა)	97
5.2. გრეგალური და არგრეგალური მოძრაობა	102
5.3. იდეალური და რეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება (ეილერის და ეილერ-გრომიკოს განტოლება) გრიგალური მოძრაობისას	105
5.4. ბერნულის განტოლება იდეალური სითხის ელემენტარული ჰავლსათვის დმყარებულ მოძრაობისას	107
5.5. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ელემენტარული ჰავლსათვის დმყარებულ მოძრაობის დრს	113
თავი 6. სითხის მოძრაობის რეჟიმები და ჰიდრავლიკური წინაღობათა სახეები	118
6.1. სითხის მოძრაობის რეჟიმები (ლმინარული და ტრბუენტური მოძრაობა), რინოლდის რიცხვის დდენა	120
6.2. თანაბარი მოძრაობის განტოლება	125
6.3. სითხის ლმინარული მოძრაობა წრიულმილსადენებში	126
6.4. სითხის ტრბუენტური მოძრაობა, სიჩქარის პულსაცია	128
თავი 7. კალპოტების სახეობები	130
7.1. გლუვი და ხორღლანი კალპოტები	130
7.2 ადლილბრივი ხასიათს ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობანი	139
თავი 8. ამოგანები სითხის მოძრაობის რეჟიმებზე	143

8.1. კონსტრუქციული ფორმის მილსადენში ხარჯის განსაზღვრა ...	143
8.2 წყლის მიწოდებისათვის საჭიროდ წნევის განსაზღვრა .....	145
8.3. მილსადენის სისტემისათვის წყლის გამოღების სიჩქარის, ხარჯის და წნევის განსაზღვრა იდეალური სითხისთვის.....	146
თავი 9. სითხის გამოღება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან	154
9.1. სითხის გამოღება მცირე ხვრეტადან მუდმივი და წნევის დროს.....	154
9.2. სითხის გამოღება ხვრეტებიდან ცვლად და წნევის დროს .....	161
9.3. სითხის დაწვევიანი მოძრაობა მილსადენებში მარტივი მილსადენის ჰიდრაულიკური გაანგარიშება .....	165
9.4. სხვადასხვა ფორმის მილსადენების ჰიდრაულიკური ანგარიში.....	170
9.5. ლა კალპოტებში დამყარებულ და დაშყარებელ მოძრაობა.....	176
თავი 10. სითხის გამოღება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან (ამოცანები) .....	180
10.2. რეზერვუარის ფაქერიდან გამოღებულ წყლის ხარჯის განსაზღვრა .....	181
10.3. ცილნდრული ფორმის რეზერვუარის დცლის დროს განსაზღვრა .....	182
თავი. 11. ლარკოფული ნაკადების ჰიდრაულიკა .....	183
11.1. ლარკოფული ნაკადების მოძრაობის თავისებურებანი	183
11.2. ლარკოფული ხასიათის წყალსადენების ძირითად კალპოტური მახასიათებლები.....	188



11.3. ლარცოფულ ნარევებისა და ლარცოფულ ნაკადების ძირითად რეოლოგიური მოდელები.....	194
თავი 12. ლარცოფის ძირითად ფიზიკომექანიკური და რეოლოგიური მახასიათებლები.....	198
12.1. ლარცოფის გრანულმეტრულ შემადგენლობა .....	198
12.2. ლარცოფულნაკადებში წყლს შემცველობის დაღენა .....	205
12.3. ლარცოფულ ნაკადს სიმკვრივის განსაზღვრა .....	208
12.4. ლარცოფის სიბლენტს დნამიკური კოეფიციენტის განსაზღვრა .....	215
12.5. ლარცოფულვერებში საწყისი წინაღობა ძვრზე.....	218
12.6. დრეკადობის მოდელები.....	220
12.7. ჰიდრავლიკური სიმსხო თიხოვან კოლოიდურ სუსპენზიებში .....	225
თავი 13. არბმულ ლარცოფულ ნაკადების დნამიკა .....	228
13.1. ორგომპონენტანი ნაკადს მოძრაობის ერთგანზომილებიანი განტლებები.....	228
13.2. დმყარებულ ართანაბარი მოძრაობა .....	233
13.3. ნატანდატვირთულ ნაკადს წარმოქმნის კრიტერიალური პირობები.....	235
13.4. ნატანდატვირთული ნაკადის კრიტიკული მახასიათებლები .....	237
13.5 ნატანდატვირთული ნაკადის მდგრადობის .....	243
კრიტერიალური პირობები.....	243
თავი 14. ბმულ ლარცოფის დნამიკა .....	245
14.1 ლარცოფის ეროზიულ ღრნტადნ მოწყვეტ .....	245
და მისი შემდეგში მოძრაობა .....	245

14.2. ნაკადს თანაბარი მოძრაობა .....	248
14.3. ნაკადის არათანაბარი მოძრაობა.....	250
თავი 15. ლარჯონების ნაგებობებთან ურთიერთქმედება...252	
15.1. არბმულ ლარჯონსათვის პერიოდულ მოქმედების საღებარს ( ქვაბულის) სიგრძის დღენა .....	252
15.2. კალპოტური საგზარის (წყალსაცავის) .....	254
დღევის გაანგარიშება .....	254
15.3. არბმულ ლარჯონს ჰიდრავლიკური.....	255
ნახტომის გაანგარიშება .....	255
15.4. არბმულ ლარჯონს შეტვტვებულ ნატნის კალპოტნი დრყვის სიგრძის პრუნორიება .....	257
15.5. ბმულ ლარჯონს ჰიდრავლიკური .....	260
ნახტომის გაანგარიშება .....	260
15.6. ბმულ ლარჯონს დრყმიით უმქმედება განივად განღებულნაგებობებზე.....	261
15.7. ლარჯონს მოძრაობა არპრონიულკალპოტნი .....	263
თავი 16. რკონდციები ლარჯონსაშიმ ზონებში ლარჯონსაწინააღმღგონისძიებების გატრების დრს	268
16.1 ლარჯონულ ნაკადების სახეები .....	268
16.2. ლარჯონულ აუტების ბუნებრივი პირობების საინჟინროკვლევა .....	278
16.3. ღვარცოფსაწინააღმღგო ნაგებობების პროექტირება... 282	
16. 4. ლარჯონქმეკავებელ დმცავი საინჟინრო ნაგებობები.....	288
16.5. ლარჯონკამტრი ნაგებობები .....	291
16.6. ლარჯონქმმარუელ ნაგებობები .....	293

16.7. მასტბილიზებერი ნაგებობები .....	294
16.8. ბმულ ღვარჯილ ნაკადს დმრქმელ ძაღს განსაზღვრ ყრუდ გამქოღღვარჯილდმქერნაგებობაჟე..	299
თავი 17. წყაღხადნარის გამოჭნის ზონა .....	302
17.1. ბმულ ღვარჯილს გამოჭნის კონჟჟე გაფრთობა დ გაჩერება .....	302
17.2. ღვარჯილ ნაკადს ამმაღებელ ჟუჟაღღს სიმაღღს განსაზღვრ განივ ყრუღღღ რქე .....	304
17.3. ბმულ ღვარჯილ ნაკადს ჟღწნეომძობობა გაღრეაში .....	307
თავი 18. წყღს ნაკადს ძაღრი ჟემოქმეღება .....	309
18.1 ნაკადს ჟემოქმეღება კაღპოტის ფკერქე მყოფ კღღგან სხეღრქე .....	309
18.2. მსხვიღება რტანი კღღგანი სხეღღს ბმულ ღვარჯილ ნაკადთგადაღღღება .....	310
18.3. ზგავისებრი ბმული ღვარჯოფული ნაკადის დინამიკური მახასიათებლები .....	313
18.4. დღღქანღბის კაღპოტებში ბმულ ღვარჯილს გადაღღღება .....	319
18.5. საშუღღდ მცირე დწნევიანი მიწის კაშხლების გამრღვევი ტღღს სიმაღღს დღღენა .....	322
თავი 19. წყაღღღებობისა დ წყაღღოგარღღების დრღს გასატრებელ ზოგიერთ ღწისძიებების ფრწები დ მიოღღები .....	324
19.1. წყაღღღობისაგან მღღნარის გარწემო ინფრასტრუქტურის დღვა .....	324

19.2. კალპოჭის გასწვრივ ფრღებზე არმდრფრტანი – მეწყერულ – მონაკვეთების დაცვა.....	325
19.3. ბუნებრივი ნაპირამაგრი დაცვა ნაგებობები და გასატრებელ ღრისძიებები.....	327
19.4. წყალცავეების დცვა მდნაროს ნატნისაგან .....	328
განმარტებები- ტქნიკური ტრმინლღია .....	331
გამოყენებულ ლტრ ტრ .....	342
ელქტრნული ლტრ ტრ.....	350
დნარუბი.....	352

## **შესავალი**

მიწის რესურსების რაციონალური გამოყენება და გარემოს ეკოლოგიური წონასწორობის შენარჩუნება მოითხოვს გარემოს დაცვის საინჟინრო ნაგებობების დაპროექტების, მშენებლობისა და ექსპლოატაციის ეფექტური და საიმედო მეთოდების შემუშავებას. ეს მეთოდები უმთავრესად განსაზღვრავს ბუნებრივი სტიქიური პროცესების ექსპერიმენტული, თეორიული და ლაბორატორიული კვლევების შედეგებით დასაბუთებული ფიზიკური მოვლენების ამსახველი საანგარიშო დამოკიდებულებების პრაქტიკულ გამოყენებას.

საქართველოს მდინარეების ჯამური წლიური ჩამონადენი 65800 მლნ.მ<sup>3</sup>-ს შეადგენს, მათ შორის

საქართველოს ტერიტორიაზე ფორმირებული ჩამონადენი – 56500 მლნ.მ<sup>3</sup>-ს. სულ საქართველოში 26060 მდინარეა, მათ შორის 99.4% – მცირე მდინარეებია (სიგრძე 25 კმ-ზე ნაკლები). ჰიდროლოგიურად შესწავლილია 555 მდინარე შავი ზღვის აუზში და 528 მდინარე კასპიის ზღვის აუზში. ქვეყნის მტკნარი მიწისქვეშა წყლების ბუნებრივი მარაგი დაახლოებით 18000 მლნ.მ<sup>3</sup>-ს შეადგენს. საერთო საპროგნოზო-საექსპლუატაციო მარაგები დაახლოებით 10600 მლნ. მ<sup>3</sup>-ია.

წყლის რესურსები არათანაბრადაა განაწილებული და ძირითადად ქვეყნის დასავლეთ ნაწილშია თავმოყრილი. საქართველოს მდინარეები ორ ძირითად აუზს მიეკუთვნება, რომლებსაც ლიხის ქედი ყოფს. შავი ზღვის აუზს დაახლოებით 18109 მდინარე მიეკუთვნება, ეს საქართველოს მდინარეთა საერთო რაოდენობის 70 %-ია, ხოლო კასპიის ზღვის აუზს 7951 მდინარე (30%) მიეკუთვნება.

მთიან რეგიონებში წყალმოვარდნებისა და წყალდიდობების დროს სტიქიური პროცესების კვლევის ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა მდინარეებში ნაკადის სტრუქტურის შესწავლა ფსკერულ და მის მიმდებარე შრეში, რადგანაც ძირითადად ის განაპირობებს მდინარეში კალაპოტის დეფორმაციას, სიჩქარის ველის ტრანსფორმაციასა და ტურბულენტური აღრევის ინტენსივობას. ნაკადის ტურბულენტურობა მნიშვნელოვან როლს ასრულებს კალაპოტური პროცესების ფორმირებასა და განვითარებაში.

ცნობილია, რომ ღვარცოფული ნაკადები, რომლებიც საკმაოდ გავრცელებული არის საქართველოს მთაგორიან რეგიონებში, გამოირჩევა მოულოდნელობითა და დამანგრეველი ძალით, რასაც მკვეთრი დისონანსი შეაქვს გარემოს ინფრასტრუქტურის არსებული ეკოლოგიური წონასწორობის სტაბილიზაციის პროცესებში. ეს ნაკადები, განსხვავებით კალაპოტებში და ფერდობებზე მიმდინარე სხვა პროცესებისაგან, როგორცაა წყალდიდობები, წყალმოვარდნები, მეწყერები და ა. შ., გამოირჩევა განსაზღვრული ანომალიური მოვლენებით და ამიტომ მისი ბუნებრივი წარმოშობისა და მოძრაობის მექანიზმის შესწავლა მნიშვნელოვანია გარემოზე ზემოქმედებისა და შეფასების მიზნით. ამ მხრივ საფრთხის თავიდან აცილების მიზნით აუცილებელ პირობას წარმოადგენს სტიქიური მოვლენების წინააღმდეგ პრევენციული ღონისძიებების გატარება და დაცვის მიზნით სხადასხვა სამუშაოების ჩატარება სტიქიასთან ბრძოლის საწარმოებლად. ამ მიმართულებით ცოდნის გაფართოვება სითხეებისა და ღვარცოფული ნაკადების ჰიდრაულიკის კურსის შესწავლა დიდ დახმარებას გაუწევს ბუნებრივი საფრთხეებისაგან გარემოს დაცვის თეორიულ და პრაქტიკულ საქმიანობაზე ორიენტირებული სპეციალისტის მომზადებას, რომელიც შესძლებს:

- მთიან გარემოში მდგრადობის შესანარჩუნებლად შესაბამისი ღონისძიებების გატარებას; მიღებული

ცოდნის ფარგლებში საინჟინრო სისტემების ტექნიკური მდგომარეობის შეფასებას;

- მთაში ბუნებრივი რისკების გათვალისწინებას, თოვლის ზვავის გამომწვევი მიზეზების დადგენას; წყლისმიერი ეროზიული პროცესების დარეგულირებას; ბუნებრივი ტექნოგენური კატასტროფების დროს, მთის ლანდშაფტის შენარჩუნებასა და დაცვას; უსაფრთხო ღონისძიებების გატარებას; კატასტროფების ფორმირების დროს რისკების განსაზღვრას; ტყის ხანძრების პროგნოზირებას და მასთან ბრძოლას;
- წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების დროს მდინარეებზე კალაპოტური პროცესების გამომწვევი მიზეზების განსაზღვრას; სტიქიური მოვლენებისაგან დამცავი ტიპის საინჟინრო ნაგებობების დაგეგმარებას;

მიუხედავად იმისა, რომ აღნიშნული მიმართულებით ჩართულია პრაქტიკული გამოცდილების სპეციალისტები, არის საჭიროება იმის, რომ მომავალმა ინჟინრებმა და გარემოს დამცველებმა ჯერ კიდევ უმაღლეს სასწავლებლებში შეიძინონ საინჟინრო ეკოლოგიური განათლება, რაც მათ მომავალში საგრძნობლად გაუადვილებთ სხვადასხვა სახის ბუნების დაცვასთან დაკავშირებული ღონისძიებების გატარებას.

ღვარცოფული ნაკადების შესწავლისა და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისათვის პირველად არის შემოთავაზებული საბუნებისმეტყველო საგნის დარგობრივი კუთხით შესწავლა. ამ სტრუქტურით აგებული სახელმძღვანელო არ

იქნება მოკლებული განსაზღვრულ ხარვეზებს, ამიტომ ყოველგვარი შენიშვნები და სურვილები მისი შემდგომი გაუმჯობესების მიზნით ავტორების მიერ მაღლიერების გრძნობით იქნება მიღებული.

ბევრ ქვეყანაში შემუშავებულია მათემატიკური მოდელები, ბუნებრივი პროცესების ამსახველი პროგრამები, რომლებიც ითვალისწინებენ გარემოს დაცვას მოსალოდნელი ბუნებრივი საფრთხეებისაგან, საშიში გეოლოგიური, მეტეოროლოგიური და სხვა ბუნებრივ მოვლენებისაგან. მათ შორის იმ რაიონებში, სადაც განლაგებულია სამოქალაქო, სასოფლო-სამეურნეო და სხვა დანიშნულების ობიექტები. ამ პროგრამების რეალიზაცია მთელ რიგ შემთხვევებში უკავშირდება აგრეთვე ბუნებრივი რესურსების დაცვისა და მათი რაციონალური გამოყენების საფუძვლების შემუშავებას.

ამ მიზნების რეალიზაციაში განსაკუთრებული ადგილი უკავია ბუნებრივი კატასტროფების, მათ შორის ეროზიულ-ღვარცოფული მოვლენების წინააღმდეგ ბრძოლის ღონისძიებების შემუშავებას.

საკოველთაოდ ცნობილია, თუ რა ზიანს აყენებენ ღვარცოფები მთიან ადგილებში განლაგებულ სხვადასხვა დანიშნულების ობიექტებს. ამიტომ ის დიდი ხანია იქცა სპეციალისტების განსაკუთრებული ყურადღების საგნად. როგორც პრაქტიკამ აჩვენა, არ არსებობს მთაგორიანი ქვეყანა, რომელიც არ განიცდის ღვარცოფების დამანგრეველ



ზემოქმედებას. ხშირად ბუნების ეს საშიში მოვლენა კაცობრიობას აყენებს მნიშვნელოვან, აუნაზღაურებელ ზიანს და არც ისე იშვიათად იწვევს ადამიანთა მსხვერპლსაც.

მთიანი ტერიტორიების ინტენსიურ ურბანიზაციასთან დაკავშირებით ღვარცოფების საშიშროება ხშირად გამოდის მატერიალური სფეროდან და უკავშირდება სოციალურ პრობლემებს, რადგანაც დგება ცალკეული ოჯახებისა ან მთელი დასახლებული პუნქტების, მათი მუდმივი საცხოვრებელი ადგილიდან გადასახლების საკითხი.

ღვარცოფები წარმოქმნება ლიტოსფეროში მიმდინარე გეოლოგიური, ჰიდრომეტეოროლოგიური, ტექნიკური და სხვა პროცესების განსაზღვრული პირობების შემთხვევებში. უკანასკნელი ათწლეულების დროს მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ანტროპოგენურ ფაქტორს იმასთან დაკავშირებით, რომ ადამიანის ზემოქმედება გარემოზე სულ უფრო ძლიერი ხდება, მიუხედავად იმისა, რომ ერთი შეხედვით ეს ზემოქმედება თითქოს ემსახურება მის ინტერესებს. ბუნებაზე მოსალოდნელ უარყოფით გავლენასა და გაუთვალისწინებელი ზემოქმედების შედეგებს ხშირად მივყავართ ისეთ ცვლილებებთან, რომელთა ლიკვიდაციის, ან თუნდაც მინიმუმამდე დაყვანისათვის საჭიროა გაცილებით მეტი ღონისძიებების გატარება, ძლიერი საფინანსო ინსტიტუტების ჩართვა და დიდი ფინანსების მოზიდვა, ვიდრე მათი დროულად თავიდან აცილებისათვის.

ამჟამად ღვარცოფების პრობლემების გადაწყვეტით დაკავებულია სახელმწიფო დაქვემდებარების მრავალი კვლევითი და სასწავლო ინსტიტუტები, ასევე კერძო სტრუქტურები, რომლებიც ატარებენ მრავალმხრივ საძიებო, კვლევით, საპროექტო, სამშენებლო და საექსპლოატაციო სამუშაოებს: ჰიდრომეტეოროლოგიის, გეოლოგიის, ენერგეტიკის, წყლის მეურნეობის, სარკინიგზო, ავტოსაგზაო და სხვა დანიშნულებით. დროთა განმავლობაში პრობლემის სიმძაფრის გაზრდასთან დაკავშირებით ამ უწყებებისა და სახელმწიფოს დაინტერესება ღვარცოფების პრობლემით იზრდება, ღვარცოფ-საწინააღმდეგო სამუშაოები კი ფართოვდება, რაც კაპიტალდაბანდების გაზრდას მოითხოვს და დამატებით თანხების მოზიდვას უკავშირდება.

## **თავი I. ბუნებრივი მოვლენები და მისი წარმოქმნის მიზეზები**

### **1.1. ჰიდრაულიკის განვითარების ისტორია**

წყალი კაცობრიობის განვითარებისათვის ერთერთი აუცილებელი საარსებო პირობაა და მასზე არის დამოკიდებული ყველა საქმიანობა, რასაც ადამიანი ეწევა არსებობისთვის. წყლის დეფიციტი და მისი არათანაბარი განაწილება ხმელეთის ზედაპირზე ყოველთვის წარმოადგენდა მნიშვნელოვან პრობლემას სტიქიური პროცესებისაგან გარემოს დაცვის საკითხში. უხსოვარი

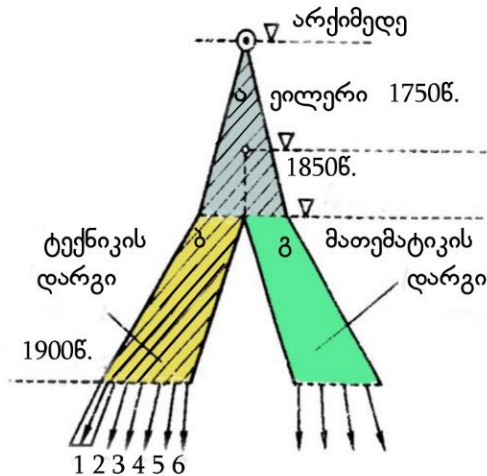
დროიდან წყლის გამოყენებამ განაპირობა ჰიდრავლიკის, როგორც მეცნიერების ჩამოყალიბება. სიტყვა ჰიდრავლიკა ძველი ბერძნული წარმოშობის სიტყვაა და ასოცირდება წყალთან და მილთან. ბუნებრივ სტიქიურ მოვლენებთან ბრძოლაში ადამიანს ყოველთვის უხდებოდა წყალთან ურთიერთობა. მტკნარი წყლის ბუნებრივი რესურსების ოპტიმალური გამოყენების მიზნით ოდითგანვე ტარდებოდა სხვადასხვა წყალსამეურნეო დანიშნულების ღონისძიებები.

მართალია, წყლის ხარჯი, როგორც ცოცხალი კვეთის ფართობისა და კვეთში ნაკადის საშუალო სიჩქარის ნამრავლის სახით, ამ პერიოდში ჯერ უცნობი იყო, მაგრამ მისი რაოდენობის დადგენა ხდებოდა მორწყვის ხანგრძლივობის მიხედვით, დროის განსაზღვრულ პერიოდში. ჯერ კიდევ პირველყოფილი წყობილების დროს ადამიანები მდინარეებს და ტბებს იყენებდნენ სანაოსნოდ და ა. შ.. აღნიშნული მიგვანიშნებს იმაზე, რომ ბუნებაზე დაკვირვების საფუძველზე გათვითცნობიერებული იყო სითხის წონასწორობისა და მოძრაობის ზოგადი კანონები. ჰიდროსტატიკის ზოგიერთი პრინციპები დადგენილი იქნა არქიმედეს მიერ ჩვენს წელთ აღრიცხვამდე 250 წ.. ჰიდროდინამიკის, როგორც მეცნიერების ჩამოყალიბების დროს.

1.1.1. ნახაზზე წარმოდგენილია ჰიდრავლიკის, როგორც ტექნიკური დარგის განვითარების ევოლუცია.

ჰიდრავლიკა არის გამოყენებითი საინჟინრო მეცნიერების, მექანიკის ერთ-ერთი დარგი, რომელიც

შეისწავლის სითხეების წონაწილობის, უძრავობის და მოძრაობის კანონებს და ადგენს კანონზომიერებებს ამ კანონების პრაქტიკაში გამოყენებისათვის. ჰიდრავლიკა ეს არის მეცნიერება სითხეების შესახებ. ის იყოფა ორ ნაწილად: ჰიდროსტატიკა და ჰიდროდინამიკა.



ნახ. 1.1.1 ა) სითხეების მექანიკა; ბ) სითხეების მათემატიკური მექანიკა; გ) სითხეების ტექნიკური მექანიკა, ჰიდრავლიკა;

1-ჰიდროტექნიკა, 2. ჰიდრომანქანები, 3-საზღვაო ტრანსპორტი, 4-წყალმომარაგება და წყალარინება, 5.ჰიდრომელიორაცია; 6. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები და სხვ.

ჰიდროსტატიკა შეისწავლის სითხის უძრაობის, წონაწილის პირობებს და მის ურთიერთქმედებას მყარ სხეულებთან, ჰიდროდინამიკა შეისწავლის სითხეების მოძრაობის კანონებს.

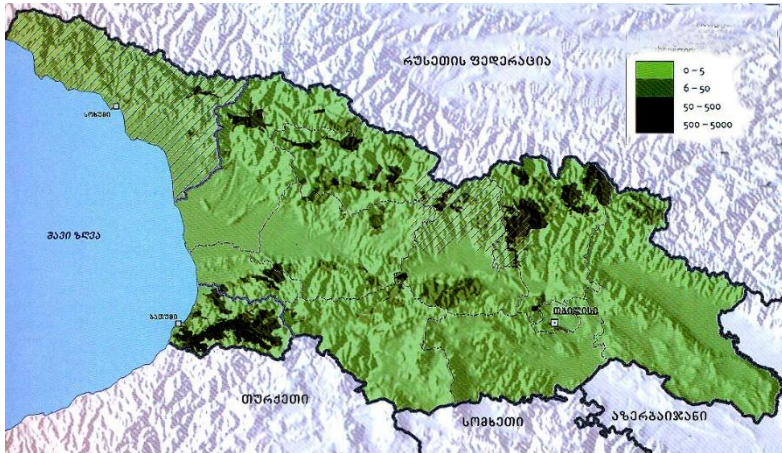
ხშირად ჰიდროდინამიკა განიხილავს სითხის მოძრაობის შესაძლო სახეებსა და ფორმებს ამ მოძრაობის გამომწვევი მიზეზების გარეშე.

ჰიდრაულიკის ეს კანონები გამოყენებულია სახალხო მეურნეობის ისეთ მნიშვნელოვან დარგებში, როგორცაა: სასოფლო - სამეურნეო ჰიდრომელიორაცია, ჰიდროტექნიკა, წყლის ტრანსპორტი, საზღვაო ტრანსპორტი, წყალმომარაგება და წყალარინება, მიწების მორწყვა და დაშრობა და სხვა.

## **1.2. კლიმატის გავლენა სტიქიურ პროცესებზე**

საქართველოში ტერიტორიის მიწის ზედაპირზე წარმოქმნილი ყველა სახის სტიქიური მოვლენის საერთო რიცხვის 60%-მდე პროვოცირებულია კლიმატური პირობებით. ბოლო პერიოდში სტიქიური მოვლენების გახშირება განპირობებულია გლობალური კლიმატური ცვლილებების, გლობალური დათბობის საერთო ფონზე, კატასტროფული პროცესების მაპროვოცირებელი უარყოფითი მეტეოროლოგიური მოვლენების (ატმოსფერული ნალექები, ჰაერის ტემპერატურა, ტენიანობა და ა.შ) ზღვრული სიდიდეების ცვლილებით საშუალო მრავალწლიური ნორმიდან. მეტეოროლოგიური

პირობების ცვლილების ზემოქმედების შედეგები დასტურდება გეომონიტორინგული კვლევებით მიღებული ინფორმაციის ანალიზით.



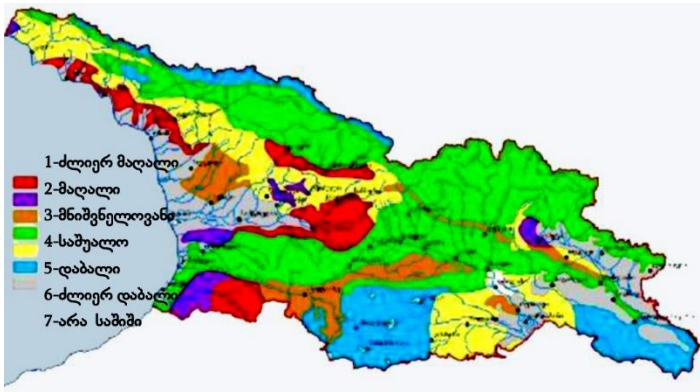
ნახ. 1.2.1. მაღალი რისკის დასახლებული ზონები საქართველოში

საქართველოს ტერიტორია იყოფა შემდეგ ზონებად: ძლიერ მაღალი; მაღალი; მნიშვნელოვანი; დაბალი; ძლიერ დაბალი; არა საშიში.

ამის გამოვლინებაა ღვარცოფული პროცესები, რომელიც გააქტიურებულია საქართველოს ტერიტორიაზე. გარემოს ეროვნული სააგენტოს მონაცემებით 1.2.2. ნახაზზე მოცემულია საქართველოს ტერიტორიული დარაიონების რუკა მეწყერსაშიში ზონების მიხედვით.

აღსანიშნავია, რომ ბუნებრივი სტიქიური პროცესები ორი ერთმანეთისგან სრულიად განსხვავებული მოვლენებითა და შედეგებით ხასიათდება:

1. ატმოსფეროში მიმდინარე საშიში მეტეოროლოგიური მოვლენები;
2. დედამიწის ზედაპირზე და მის ქერქში წარმოქმნილი სტიქიური გეოლოგიური პროცესები. სტიქიური გეოლოგიური პროცესებით გამოწვეული უარყოფითი შედეგებით განსაკუთრებით რთული სიტუაციაა შეიქმნილი მთიან რეგიონებში.



ნახ.1.2.2. საქართველოს ტერიტორიული დარაიონების რუკა მეწყერსაშიში ზონების მიხედვით

სტიქიის ძლიერ ზეგავლენას ხშირად კატასტროფული შედეგები მოყვება პერიოდულად განიცდის ზემოქმედებას სტიქიური მოვლენების არეალში მიმდებარე გარემო ინფრასტრუქტურა. მიწის სავარგულები, გზები, ჰიდროტექნიკურ-სამელიორაციო ობიექტები, სამთო ტურისტული კომპლექსები და სხვა.

### 1.3. მდინარის მოძრაობის თავისებურებანი

ყველა მდინარის ნაკადი, რომელიც მიედინება გარკვეული ტერიტორიის საზღვრებში, ქმნის მდინარეთა სისტემას. ეს სისტემა ელემენტია ჰიდროგრაფიული ქსელის, რომელიც, მდინარეების გარდა, მოიცავს: მცინვარებს, ნაკადულებს, ტბებს, ჭაობებს, წყალსაცავებს და სხვა.

მდინარის სათავედ ითვლება ის ადგილი, საიდანაც იწყებს დინებას ძირითადი ნაკადი. დიდი მდინარეები იქმნება პატარა მდინარეების და ნაკადულების შერწყმით. მის სათავედ ითვლება მათი შეერთების ადგილი, ხოლო ჰიდროლოგიურ სიგრძედ აიღება - მდინარის ის მონაკვეთი, რომელიც მოიცავს პატარა მდინარეების შეერთებისა და დასრულების ადგილებს.

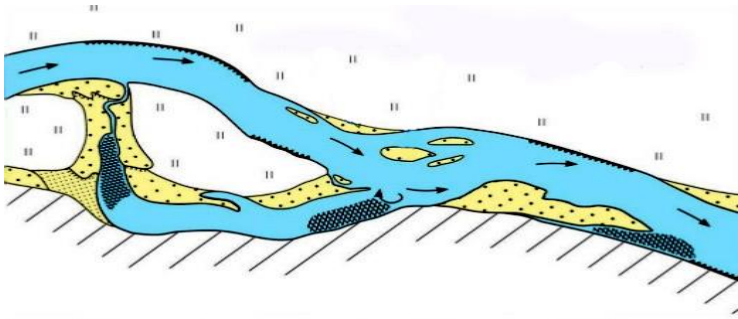
მდინარე თავისი ჰიდრომორფოლოგიური მახასიათებლით პირობითად შეიძლება დაიყოს სამ უბნად, რომელთაც აქვს საერთო ნიშნები.

1. **ზედა უბანს** ახასიათებს დიდი ქანობი და დინების დიდი სიჩქარეები. მდინარე ამ უბანზე ენერგიულად ქმნის კალაპოტს და გარეცხვის პროდუქტი გამოაქვს ნატანის სახით.
2. მდინარის **შუა უბანზე** ნაკადის ზემოქმედება ფსკერზე სუსტდება, კალაპოტის ზედაპირი ხასიათდება საშუალო ქანობით, სადაც გარეცხვის შედეგად ნაკადში მიწოდებულ და წატაცებულ ნატანს შორის მყარდება წონასწორობა.



3. მდინარის ქვედა უბანზე ხდება ფსკერული ნაკადის მიერ კალაპოტის ზედაპირიდან გარეცხილი ქვიშის აკუმულაცია ნატანის სახით, რომელიც შეტივტივებული ფორმით მოედინება ძირითად ნაკადთან ერთად ზედა უბნებიდან. ნატანის მოძრაობისას კალაპოტში წარმოიქმნება სხვადასხვა ზედაპირული ფორმები, რაც განსაზღვრავს მდინარის დინების სტრუქტურასა და კალაპოტის ფორმას.

მდინარის ქანობი ამ უბანზე არ არის დიდი, ნაკადის დინება სუსტია და ნაკლებად გამრეცხი. ნაპირი ვაკიანი და მდგრადი.



ნახ. 1.3.1. მდინარის კლაკნილობის ფორმები

მდინარის კალაპოტის ფორმირებასა და ნაკადის მოძრაობის რეჟიმზე, ჩამონადენის გარდა, დიდ გავლენას ახდენს ხეობის რელიეფი და მისი გეოლოგიური აგებულება. ამიტომ მდინარეში ძირითადი ნაკადის კვლევასთან ერთად უნდა მოხდეს მდინარის ხეობის

შესწავლა და კალაპოტის მორფოლოგიური მახასიათებლების დადგენა.

მდინარის ქვედა უბანი, სადაც წარმოიქმნება ხეობა შემოსაზღვრულია ფერდობებით. ეს უბანი არის ხეობის ძირი, რომელიც ივსება ალუვიონით<sup>1</sup>. მდინარე დინების პროცესში ამ უბანზე ამუშავებს კალაპოტის ზედაპირს, სადაც ნაკადის ზემოქმედებით ხდება ნატანის გარეცხვა, შეტივტივება და გადაადგილება.

ქვედა უბანზე ნაკადის ზემოქმედების შედეგად შექმნილი კალაპოტი, საშუალო დონის კალაპოტია. მდინარის ზედა უბანს, რომელიც პერიოდულად ივსება მდინარეში გაზრდილი ხარჯის შედეგად წარმოქმნილი ნატანის დალექვით შექმნილი ტერასებით, ნარწყული ან ნარწყულის ტერასა ეწოდება. კალაპოტური პროცესების დროს მდინარის ნაპირზე დინების ზემოქმედების შედეგად ჩვეულებრივ იქმნება რამდენიმე ტერასა, რომლთა ფორმა და გეომეტრიული მახასიათებლები დამოკიდებულია დინების ზემოქმედების ფაქტორსა და მოძრაობის რეჟიმზე.

---

<sup>1</sup> ალუვიონი - მდინარეული ნალექი, რომელიც შედგება გამოფიტვით და უშუალოდ მდინარეული წყლის მოქმედებით დაშლილი ქანების სახვადასხვაგვარად დამუშავებული და დახარისხებული მასალისაგან, რომელიც გრანულომეტრიული შედგენილობით შეიძლება იყოს კაჟარი, რიყის ქვა, ხვინჭკა, ქვიშა, თიხნარი და თიხა. მდინარეების ჭალა და ტერასები უმეტესად ამ ნალექებითაა აგებული. ალუვიონისთვის დამახასიათებელია ირიბი შრობრივობა. ძველ დანალექ წყებებში იგი, ჩვეულებრივ, შეცემენტებულია და წარმოდგენილია მკვრივი ნამსხვრები ქანებით (კონგლომერატებით, ქვიშაქვებით და სხვა). ალუვიონი ზოგჯერ ძვირფას მინერალთა (პლატინა, ოქრო და სხვა) ქვიშრობია

წყალდიდობის დროს მდინარის ნაკადში ჩამონადენის გაზრდის გამო მდინარის კალაპოტის სიგანე რამდენიმე მეტრამდე იზრდება, ასევე იზრდება სიღრმეც, რაც იწვევს მდინარის გრძივი პროფილის გეომეტრიული და მორფოლოგიური მახასიათებლების ცვლილებას. უნდა აღინიშნოს, რომ მდინარეში ნაკადის სიღრმის ზრდა უფრო ნელა მიმდინარეობს, ვიდრე სიგანეში გაზრდა, ეს განპირობებულია კალაპოტის გეოლოგიური შემადგენლობით და მასზე ნაკადის მხრიდან მოქმედი ფაქტორებით.

#### **1.4. მთის ფერდობზე ნაკადების წარმოქმნა**

დედამიწის ზედაპირზე მოსული ატმოსფერული ნალექები გროვდება დადაბლებულ ადგილებში და იქიდან ხმელეთის ზედაპირის ქანობის შესაბამისად მოედინება ჯერ მცირე ნაკადულების სახით, შემდეგ კი უერთდება ანალოგიური სახის მოძრავ ნაკადებს და წარმოქმნის მდინარეს.

ყველა ასეთი ნაკადი გადის ზედაპირის ჩაღრმავებულ ადგილებში, რომელთაც ხეობა ეწოდება და უმთავრესად კლავნილობა ახასიათებს. ხეობების ეს რიგი, რომელიც ჩამონადენის საერთო მიმართულებით ხასიათება, წარმოქმნის წყალშემკრებ აუზს, რომელიც კვებავს ერთ მდინარის სისტემას, ეს უკანასკნელი კი აერთიანებს მთავარ მდინარეს. მდინარეები მათი

წყალშემკრები აუზის მიხედვით შეიძლება იყოს მცირე, საშუალო და დიდი.

საქართველოს ტერიტორიაზე მრავალი მდინარეა, რომლის მთიანი რელიეფი განაპირობებს ღვარცოფებისა და თხიერი ჩამონადენის რთულ რეჟიმს, რომელიც საჭიროს ხდის მის რეგულირებას დამცავი ჰიდროტექნიკური ნაგებობით.

მდინარეები ქანობის მიხედვით იყოფა ორ ძირითად ჯგუფად: **ბარის (ვაკის) მდინარეები** წყნარი დინებით და **მთის მდინარეები** მძაფრი დინებით. მდინარეებს, რომლებსაც შუალედური ადგილი უჭირავს, **მთისძირა მდინარეები** ეწოდება.

მთის მდინარეების ძირითადი თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ მათ აქვთ ციცაბო ფერდობები, შედარებით მცირე განი და დიდი სიღრმე; მდინარის ქანობი მკვეთრად იცვლება სიგრძეზე. ხეობის ძლიერი დაქანების გამო ღვარცოფი (ჩამონადენი) ავითარებს დიდ სიჩქარეს, წყლის გადაადგილების დრო მცირეა, ტალღები მოძრაობენ სწრაფად, გამოხატული მკვეთრი აწევითა და ვარდნით.

გრძივი პროფილის მკვეთრ ტეხილებს შეესაბამება მდინარის მკვეთრი მოხაზულობა გეგმაში. დიდ სიჩქარიანი ნაკადი ერთი ნაპირიდან ეხეთქება მეორეს და წარმოშობს დინამიკური ღერძის ტეხილებს. ამის გამო სიჩქარეების განაწილება, როგორც გრძივი, ისე განივი მიმართულებით არათანაბარია. მდინარის ფსკერი ჩვეულებრივ მოფენილია წყალდიდობის დროს ნაკადის

მიერ მოტანილი ქვებით, რაც ადიდებს კალაპოტის ხაოიანობას და იწვევს წყლის ტალღისებურ მოძრაობას.

მთისა და ვაკის მდინარეებს თავისი დინების სხვადასხვა უბნებზე სხვადასხვანაირი ხასიოთი აქვს. როგორც წესი, ხშირად მდინარე მთის რელიეფის შესაბამისი ნაკადის დინების სტრუქტურისაა ზემო წელში; ქვემო წელში კი მდორედ და წყნარად მიედინება. მაგრამ არის ისეთი მდინარეებიც, რომლებიც სათავიდან შესართავამდე ინარჩუნებს მთის რელიეფისათვის დამახასიათებელ ნაკადის მოძრაობის სტრუქტურას.



ნახ. 1.4.1. ნაკადების წარმოქმნა დედამიწის ზედაპირზე

მდინარე შეიძლება იკვებებოდეს წვიმის წყლით, თოვლით, მყინვარებითა და შერეული ჩამონადენით. ამის მიხედვით ისინი სამ მთავარ ჯგუფად იყოფა:

1. მდინარეები, რომელთა კვების წყაროს გამდნარი თოვლი (ყინული) წარმოადგენს. ამ ჯგუფის მდინარეებში წყლის ჰორიზონტის მაქსიმალური დონეები (წყალდიდობის პერიოდი) აღინიშნება ზაფხულში, რადგან ამ დროს იწყება თოვლის და ყინულის დნობა მაღალი ტემპერატურის შედეგად.
2. მდინარეები, რომლებიც მხოლოდ წვიმის წყლით იკვებებიან. მასში წყლის მაქსიმალური დონეები აპრილ-მაისის თვეშია, რადგან ყველაზე მეტი ნალექები ამ დროსაა.
3. მდინარეები, რომლებიც იკვებებიან როგორც გამდნარი თოვლით (ყინულით), ასევე წვიმის წყლით.

მთის მდინარეებისათვის ჩამონადენის წლიური ციკლი შეიძლება გავყოთ სამ ძირითად პერიოდად: **პირველი** - საშუალო დონის პერიოდი, როდესაც მდინარის კვება წარმოებს მიწისქვეშა წყლებით და ხარჯები თანდათან მცირდება; **მეორე** - წყლის ადიდების პერიოდი, როდესაც სიციხეების გამო ძირითად წყალშემკრებ აუზებში თოვლი დნობას იწყებს; **მესამე** - თოვლ-ყინულოვანი კვების პერიოდი, რაც უმთავრესად მაღალმთიური თოვლისა და ყინულის დნობის ხარჯზე მიმდინარეობს. გაზაფხულისა და შემოდგომის წვიმები პიკს წარმოშობენ და ემატებიან წყალდიდობას.

ხანმოკლე წყალდიდობების დროს მთის მდინარეს მოაქვს ნატანის დიდი რაოდენობა, უფრო ინტენსიურია კალაპოტის ფორმირების პროცესი და ამის გამო დამცავი ნაგებობები განიცდიან უეცარ

ზემოქმედებას, ვიდრე წყალდიდობის დროს ბარის მდინარეებზე. ჰიდროტექნიკურ ღონისძიებათა სწორი განხორციელება შესაძლებელი იქნება მხოლოდ კალაპოტშიგა პროცესებისა და ჰიდრავლიკური ელემენტების სწორი კომპლექსური საფუძვლიანი შესწავლის შედეგად, რაშიც სითხეებისა და ღვარცოფული მოძრაობის ჰიდრავლიკის შესწავლა დაგვეხმარება.

### 1.5. ღვარცოფული აუზები

ღვარცოფული ნაკადები წარმოიქმნება მთის მდინარეების აუზებში ინტენსიური წვიმების, თოვლის დნობისა და მორენების<sup>2</sup> გარღვევის შედეგად.

მორენები შედგება მყარი ქანებისგან, წვრილი ხრეშის, ქვიშის, თიხის, მსხვილი ქვებისა და ლოდების, აგრეთვე ყინულისა და თოვლისგან. მორენების წყლით გაჟღენთვის შედეგად უეცრად

---

<sup>2</sup> მორენა — მყინვარის მიერ გადატანილი ან დაფენილი ნივთიერებები და გამოფიტვის პროცესებით წარმოქმნილი ნგრევის დაუხარისხებელი, დაკუთხული პროდუქტი (კაჭარი, თიხნარი, ქვიშნარი). არსებობს მოძრავი და დანალექი (ძველი) მორენები. განვითარებულია ვაკე და მთის რაიონებში. საფარული გამყინვარების არეებში მორენა წარმოდგენილია არაშრეული, დაუხარისხებელი თიხნარით, თიხებით, ქვიშნარით, სხვადასხვა ზომებისა და მომრგვალებულობის ნატეხების არსებობით (ხვინჭიდან და ღორღიდან დაწყებული კაჭართა და ლოდებით დამთავრებული), რომლის შემადგენლობაშია ადგილობრივი მკვიდრი ქანები და მყინვარების მიერ კვების არედან მოტანილი ერატიკული ლოდები. კაჭარზე დამახასიათებელია ნალარი ან ნაკაწრი და კაჭარის გრძელი ღერძის გაგნება მყინვარის მოძრაობის მიმართულებით.

ხდება მათი საზღვრების გარღვევა, აღნიშნული მასა დიდი სიჩქარით იწყებს დინებას ციცაბო ქედზე და მოგვევლინება ღვარცოფის სახით.

ღვარცოფი გამოირჩევა მცირე ხანგრძლივობით და ხშირ შემთხვევაში დინება წყდება რამდენიმე ათეულ წუთში, თუმცაღა შესაძლებელია იგი გაგრძელდეს რამოდენიმე საათის განმავლობაშიც.

ღვარცოფული დინების თავისებურებას წარმოადგენს ნაკადის დონის მკვეთრი აწევა, რომელიც დაკავშირებულია ღვარცოფის ჩამოყალიბების ტალღურ ბუნებასთან. ღვარცოფული ტალღის ციცაბო წინა ნაწილი, რომლის სიმაღლე ძირითადად საქართველოს პირობებისათვის ლანდშაფტის გათვალისწინებით საშუალოდ 10 მ. ფარგლებში მერყეობს, აყალიბებს ღვარცოფის „თავს“, რომელიც მოძრაობს ტალახის, ქვებისა და წყლისგან ჩამოყალიბებული მყარი მასის სახით. ერთი მორიგი ღვარცოფის დროს ასეთი ტალღების რაოდენობა შეიძლება რამდენიმე ათეულს აღწევდეს.

ღვარცოფის კიდევ ერთ თვისებას წარმოადგენს ნაკადის გაჯერება მყარი მასალით. ღვარცოფულ მასაში მთის ქანების ნატეხების მოცულობა 10-დან 75%-მდეა. ღვარცოფულ ნაკადს გააჩნია აგრეთვე დიდი სიმკვრივე -  $1,2 \div 2,0$  გრ/სმ<sup>3</sup>-მდე და ზოგიერთ შემთხვევაში უფრო მეტიც. ასეთი



შემადგენლობის კოლოიდური მასა ძლიერად მოქმედებს მდინარის კალაპოტზე და დამანგრეველად მოქმედებს გადაადგიების დროს გზაზე შემხვედრ წინააღმდეგობაზე.

ღვარცოფულ ნაკადებს ახასიათებს ეროზი-რებისა და ტრანსპორტირების დიდი უნარი და შესაბამისად გამოაქვს მთის ქანების ნაშალის დიდი მასები. ყველაზე მძლავრ ღვარცოფებს შეუძლიათ გამოიტანონ  $2\div 4$  მლნ მ<sup>3</sup> მყარი მასალა. ღვარცოფულ ნაკადს რამდენიმე საათში გამოაქვს იმდენი ნატანი, რამდენსაც მდინარის ნაკადი  $20\div 130$  წელიწადს ანდომებს.

ღვარცოფების კლასიფიკაცია გამოტანილი მყარი მასის ანუ სიმძლავრის მიხედვით შემდეგნაირადაა ჩამოყალიბებული:

- მძლავრი ღვარცოფები - გამოაქვთ 100 ათასი მ<sup>3</sup> მყარი მასა;
- საშუალო სიმძლავრის ღვარცოფები - გამოაქვთ  $10 \div 100$  ათასამდე მ<sup>3</sup> მყარი მასა;
- მცირე სიმძლავრის ღვარცოფები - გამოაქვთ არაუმეტეს 10 ათასი მ<sup>3</sup> მყარი მასა;

მძლავრი ღვარცოფული ნაკადების ზემოქმედების ზონაში მუდმივადაა გზაზე არსებული ინფრასტრუქტურის დანგვეის საშიშროება. ღვარცოფების პირობითად გარემოზე

ზემოქმედების სიმძლავრის მიხედვით ხასიათდება შემდეგნაირად:

- მცირე სიმძლავრის ღვარცოფული ნაკადი - რომელსაც ახასიათებს მცირე გარეცხვა, წყალგამტარი ნაგებობების ხვრეტების ნაწილობრივი დაცობა;
- საშუალო სიმძლავრის ღვარცოფული ნაკადი - რომელსაც ახასიათებს ძლიერი გარეცხვა, წყალგამტარი ნაგებობების ხვრეტების სრული დაცობა, უფუნდამენტო ნაგებობების დაზიანება და ნგრევა;
- მძლავრი ღვარცოფული ნაკადი - რომელსაც ახასიათებს დიდი დამანგრეველი ძალა, ხიდების, ქვის ნაგებობებისა და გზების ნგრევა;
- კატასტროფული ღვარცოფული ნაკადი - რომელსაც ახასიათებს ნაგებობებისა და გზების სრული ნგრევა, ნაგებობების ნატანის ქვეშ მოყოლა.

როგორც ცნობილია, ღვარცოფული ნაკადები ძირითადად ფორმირდება მთის მდინარეების აუზებსა და დროებით წყალსატარებში. წყალშემკრებ აუზს, რომლის ფარგლებშიც ხდება ღვარცოფების ფორმირება, ეწოდება ღვარცოფული აუზი. ღვარცოფულ აუზებს გააჩნიათ შეზღუდული არეალი და კალაპოტის მნიშვნელოვანი ქანობი.

სქემატურად ღვარცოფული აუზი შეიძლება დაიყოს პირობითად სამ ძირითად ზონად:

1. **ღვარცოფული ნაკადის წარმოქმნის ზონა** (ღვარცოფსაცავი) - აუზის ზედა ნაწილი, სადაც ყალიბდება ღვარცოფი. ეს არის ციცაბო ფერდობებისა და ქანების აქტიური ნგრევის ზონა.
2. **სატრანზიტო ზონა** - მოიცავს აუზის შუა და ქვედა ნაწილს. ამ ზონაში ხორციელდება ღვარცოფული ნაკადის ტრანსპორტირება კალაპოტში, თუმცა იშვიათად ხდება ღვარცოფული ნაკადის დამატებითი „კვება“ ნაშალი მასით და მისი ნაწილობრივი დალექვა.
3. **დალექვის ანუ განტვირთვის ზონა** - ჩვეულებრივ აუზის იმ ზონაშია განლაგებული, სადაც ქანობი და ნაკადის ენერგია მცირდება. აქ ნაშალი მასალა გროვდება ტერასებისა და გამოტანის კონუსების სახით.



ნახ. 1.5.1. ღვარცოფული აუზი

აღწერილი სქემა ბუნებაში ხშირად ირღვევა. ასე მაგალითად, მრავალ ახალწარმოქმნილ ღვარცოფულ აუზს, რომლებიც განლაგებულნი არიან ციცაბო და მოკლე ქედებზე, თითქმის არ გააჩნიათ ტრანზიტული ზონა – ღვარცოფსაცავი, რომელშიც დაგროვილი ღვარცოფული მასა პირდაპირ გადადის ფართო გამოტანის კონუსში ქედების ძირთან.

ხშირად, ღვარცოფული აუზების ზედა ნაწილი წარმოადგენს მხოლოდ წყალშემკრებს, ხოლო ღვარცოფის ფორმირება ხდება ღვარცოფსადინარის შუა და ხანდახან ქვედა ნაწილშიც კი კალაპოტის ნაპირებისა და ფსკერის გარეცხვის შედეგად.

მორფოლოგიურად განსხვავებული ღვარცოფული აუზები გავლენას ახდენს ღვარცოფების მოძრაობის რეჟიმზე. თავსხმა წვიმების შედეგად წარმოქმნილი ღვარცოფული ნაკადები ხშირად გვხვდება მცირე ფართობის მქონე აუზებში, მათგან ზოგიერთი მცირეპერიოდის და გამონატანის მოცულობით უმნიშვნელოა. შედარებით მდინარეების დიდ აუზებში წარმოიქმნება მძლავრი და ხანგრძლივი ღვარცოფული ნაკადები, მაგრამ მათი გავლა უფრო იშვიათობაა. მორფოლოგიური სხვაობის მიხედვით ღვარცოფული აუზები იყოფა ორ ნაწილად:

- **კალაპოტური ღვარცოფების** ფორმირება ხდება დიდი და საშუალო ფართობის მქონე ღვარცოფულ აუზებში. ჩვეულებრივ, ეს არის ჩამოყალიბებული გრძივი პროფილისა და კალაპოტების მქონე მდინარეთა ველები. აქ ფორმირდება სხვადასხვა გენეზისის მქონე ღვარცოფები: თავსხმა წვიმებით, თოვლის ინტენსიური დნობით, ტბების გარღვევით, მეწყერების ჩამოცურებით ან მათი ერთობლიობით;
- **ფერდობების ღვარცოფები**, წარმოიქმნება მთების ფერდობების ეროზიულ ღრანტეებში<sup>3</sup>. ასეთი ტიპის ღვარცოფებისათვის დამახასიათებელია უმნიშვნელო ფართის აუზები, ციცაბო ქანობები, მუდმივი წყალგამტარობის შედეგად გამომუშავებული კალაპოტები. ამ შემთხვევაში ღვარცოფები წარმოიქმნება ფერდობის შუა და ქვედა ნაწილში

---

<sup>3</sup> ღრანტე - ღრმა და ვიწრო ხევი, ხრამი.

ფხვიერი საფრის გარეცხვის შედეგად თავსხმა წვიმებისა და ინტენსიური თოვლის დნობის ზეგავლენით. ფერდობების ღვარცოფის გამოტანის ზონა ფართობით დიდი არ არის და ახასიათებს ადგილმდებარეობის ცვლილებას.

სათავეს სიმაღლის მიხედვით ღვარცოფული აუზები კლასიფიცირდება შემდეგნაირად:

- **მაღალმთიანი** - სათავე განლაგებულია 2500 მ-ზე მაღლა. გამოტანილი მასის მოცულობა 1 კმ<sup>2</sup>-დან შეადგენს 15÷25 ათას მ<sup>3</sup>-ს ერთი ღვარცოფის გავლის დროს;
- **საშუალომთიანი** - სათავე განლაგებულია 1000-2500 მ-ზე. გამოტანილი მასის მოცულობა 1 კმ<sup>2</sup>-დან შეადგენს 5÷15 ათას მ<sup>3</sup>-ს ერთი ღვარცოფის გავლის დროს;
- **დაბალმთიანი** - სათავე განლაგებულია 1000 მ-ზე ქვევით. გამოტანილი მასის მოცულობა 1 კმ<sup>2</sup>-დან შეადგენს 5 ათას მ<sup>3</sup>-ზე ნაკლებს ერთი ღვარცოფის გავლის დროს.

ღვარცოფული აუზების კლასიფიკაცია ღვარცოფების განმეორადობის მიხედვით ხასიათდება მათი წარმოქმნის ინტენსივობით ან ღვარცოფაქტივობით. ღვარცოფების სიხშირის მიხედვით შეიძლება გამოიყოს სამი ჯგუფი:

1. მაღალი ღვარცოფული აქტივობა (განმეორადობა 3-5 წელიწადში ერთხელ და უფრო ხშირად);

2. საშუალო ღვარცოფული აქტივობა (განმეორებადობა 6-15 წელიწადში ერთხელ);
3. მცირე ღვარცოფული აქტივობა (განმეორებადობა 16 წელიწადში ერთხელ და უფრო იშვიათად).

ღვარცოფული აუზის ფერდობების ქანობი განაპირობებს ზედაპირული ჩამონადენის სიჩქარეს და ეგზოგენური პროცესების აქტიურობას, რომლის შედეგადაც ხდება მასალის დაგროვება ღვარცოფის კალაპოტში. წყლის ნაკადის სიჩქარის 2-ჯერ გაზრდა ზრდის მის გამრეცხ ძალას 4-ჯერ, ხოლო ტრანსპორტირების ძალას - 32-ჯერ. გამომდინარე აქედან, სწორედ რომ მთის რელიეფი ქმნის ღვარცოფის წარმოქმნისათვის აუცილებელ ხელშემწყობ ოროგრაფიულ<sup>4</sup> პირობებს.

ღვარცოფული მასის მოძრაობასა და აკუმულაციაზე გავლენას ახდენს, აგრეთვე, აუზის გეოლოგიური აგებულება. სტრუქტურისა და დინამიკის მიხედვით განასხვავებენ ბმულ და არაბმულ ღვარცოფებს.

არაბმულ ღვარცოფში ჭარბობს მსხვილი ნამსხვრევი მასალა, ხოლო მტვრისებრი ნაწილაკები იმყოფება თავისუფალ მდგომარეობაში; ბმულში ჭარბობს წვრილი ნაწილაკების რაოდენობა. ისინი

---

<sup>4</sup> ოროგრაფია— გეომორფოლოგიის დარგი, რომელიც აღწერს დედამიწის რელიეფის ფორმებს (ქედებს, მაღლობებს, ქვაბულებს და სხვა) და ახდენს მათ კლასიფიკაციას გარეგანი ნიშნების მიხედვით.

კრავენ წყლის ძირითად მასას მოლეკულური მიზიდულობის ძალით. ასეთი ღვარცოფი მოძრაობს როგორც ერთიანი გრავიტაციული ნაკადი.

ღვარცოფების წარმოქმნის აუცილებელ პირობებს ქმნის: მდინარეთა კალაპოტებისა და დროებითი წყალსადენების ქანობები, ინტენსიური ჩამონადენი და ფხვიერი, ადვილად ეროზირებადი მთის ქანები.

გარდა აღნიშნული პირდაპირმოქმედი ფაქტორებისა, არსებობს ღვარცოფების წარმოქმნის სხვა პირობებიც, რომელთა შორის აღსანიშნავია: მთის გამყინვარების მდგომარეობა, ვულკანიზმი, მცენარეული საფრის ხასიათი, ადამიანის არასწორი ჩარევა ბუნებრივი პირობების ცვლილებაში და სხვა.



ნახ 1.5.2. ღვარცოფული კერები



ქვემოთ თავებში განვიხილავთ ჰიდრავლიკის იმ ძირითად კანონებს, რომელიც პრაქტიკულად გამოიყენება სითხეებისა და ბმული და არაბმული ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობის აღწერის დროს კანონზომიერებების დადგენის მიზნით. ასევე განვიხილავთ ამოცანები კონკრეტული შემთხვევისათვის და წარმოდგენილია დასკვნები და წინადადებები პროექტირებისათვის.

## **თავი 2. სითხეების ჰიდრავლიკა**

### **2.1. სითხის ფიზიკური თვისებები**

ფიზიკური სხეული შეიძლება იმყოფებოდეს მყარ, თხევად და აირად მდგომარეობაში.

სითხე არის ფიზიკური სხეული, რომელსაც შუალედური აგრეგატული მდგომარეობა უკავია აირისებრ და მყარ სხეულებს შორის. წნევის ან ტემპერატურის ცვლილებით ის შეიძლება გადავიდეს აირად ან მყარ მდგომარეობაში. სითხე ხასიათდება სამი ძირითადი თვისებით:

1. მცირედით იცვლის მოცულობას წნევისა და ტემპერატურის ცვლილებით.
2. არ გააჩნია საკუთარი ფორმა და ღებულობს იმ ჭურჭლის ფორმას, რომელშიც არის მოთავსებული. მცირე სიდიდის ძალას შეუძლია თხევადი სხეულის მნიშვნელოვანი დეფორმაცია.

3. სითხე ხასიათდება დენადობით, რომლის ხარისხი დამოკიდებულია სითხის ნაწილაკთა შორის არსებულ ურთიერთშეჭიდულობაზე და იმ უნარზე, რომლითაც იგი მოძრაობას ეწინააღმდეგება.

აირიც ასევე ხასიათდება დენადობით, მაგრამ სითხისაგან განსხვავებით კუმშვადია, არ გააჩნია თავისუფალი ზედაპირი და მთლიანად ავსებს მისთვის განკუთვნილ მოცულობას. სითხისა და აირის დენადობის საერთო თვისება მათ აერთიანებს "სითხის" საერთო სახელწოდებით. ამიტომ, ხშირად აირს აირისებრ სითხეს უწოდებენ, ხოლო თვით სითხეს - წვეთოვან სითხეს. ჰიდრაულიკის კვლევის ობიექტია წვეთოვანი სითხე; შემდგომ სითხეში უმეტეს შემთხვევაში წყალს ვიგულისხმებთ.

## 2.2 სითხის კუთრი წონა

სითხის კუთრი წონა ეწოდება აღებული ერთგვაროვანი სითხის წონის (G) შეფარდებას მის მიერ დაკავებულ მოცულობასთან (W) და აღინიშნება  $\gamma$  (გამა) ასოთი:

$$\gamma = \frac{G}{W} \quad (2.2.1.)$$

კუთრი წონის განზომილებაა: SI სისტემაში - ნ/მ<sup>3</sup> . მტკნარი წყლის კუთრი წონა +4°C ტემპერატურის დროს 9810 ნ/მ<sup>3</sup>.

### 2.3. სითხის სიმკვრივე, სიბლანტე (შინაგანი ხახუნი), სიბლანტის დინამიკური და კინემატიკური კოეფიციენტები

ერთგვაროვანი სითხის სიმკვრივე ეწოდება სითხის მასის ( $m$ ) შეფარდებას მის მიერ დაკავებულ მოცულობასთან ( $W$ ). აღინიშნება  $\rho$  (რო) ასოთი:

$$\rho = \frac{m}{W} \quad (2.3.1.)$$

სიმკვრივის განზომილებაა: SI სისტემაში კგ/მ<sup>3</sup>  
მტკნარი წყლის სიმკვრივე +40°C ტემპერატურის დროს  $\rho = 1000$  კგ/მ<sup>3</sup>.

კუთრ წონასა და სიმკვრივეს შორის არის მარტივი დამოკიდებულება:

$$\gamma = \rho g \quad (2.3.2.)$$

სითხე ისევე როგორც ნებისმიერი ფიზიკური სხეული, ეწინააღმდეგება გამჭიმავ ძალას, სითხის ამ თვისებას **წებოვნება** ეწოდება.

მომრავი სითხის თვისებას, რომლის დროსაც სითხის შიგნით ჩაისახება მხეები ძაბვა **სიბლანტე** ეწოდება.

განასხვავებენ სიბლანტის დინამიკურ და სიბლანტის კინემატიკურ კოეფიციენტებს. **სიბლანტის დინამიკური** კოეფიციენტი აღინიშნება  $\mu$  (მიუ) ასოთი

(შიდა ხახუნის კოეფიციენტი) და ის დამოკიდებულია მხოლოდ მის ტემპერატურაზე. დინამიკური კოეფიციენტის განზომილებაა: პა·წმ (პასკალი·წამი), მპა წმ, კგ/მ წმ.

ჰიდრავლიკურ გაანგარიშებებში ხშირად სარგებლობენ  $\nu$  (ნიუ) სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტით, რომელიც გამოითვლება სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტის შეფარდებით სითხის სიმკვრივესთან.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ მ}^2/\text{წმ} \quad (2.3.3)$$

სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტის განზომილებაა: ნ წმ/მ<sup>2</sup>. მ<sup>2</sup>/წმ.

სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი მოცემული სითხისათვის დამოკიდებულია მხოლოდ მის ტემპერატურაზე და, ჩვეულებრივ პირობებში, პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული წნევისა და სიჩქარის გრადიენტზე.

როგორც ავლნიშნეთ, მოძრავი სითხის თვისებას, რომლის დროსაც სითხის შიგნით წარმოიქმნება მხები ძაბვები, **სიბლანტეს, ანუ შინაგან ხახუნს ვუწოდებთ.** სიბლანტე სითხის ერთ-ერთი დამახასიათებელი თვისებაა, რომელსაც ახასიათებს სითხის მოძრაობისადმი წინააღმდეგობა.

## 2.4 სითხის კუმშადობა და ტემპერატურული გაფართოება

სითხის მოცულობის ფარდობით ცვლილებას ტემპერატურის  $1^{\circ}\text{C}$ -ით შეცვლისას **ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი** ეწოდება და აღინიშნება  $\beta_t$  ექსპერიმენტი გვიჩვენებს, რომ სითხე დიდ წინააღმდეგობას უწევს თანაბარ და ყოველმხრივ კუმშვას. სითხის კუმშადობა ხასიათდება მოცულობითი კუმშვის კოეფიციენტით  $\beta_p$ , რომელიც გამოსახავს  $W$  სითხის მოცულობის ფარდობით ცვლილებას მასზე წნევის ერთი ერთეულით ცვლილების შემთხვევაში

$$\beta_t = -\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} \quad (2.4.1.)$$

ნიშანი ”-” გამოსახულებაში მიუთითებს იმაზე, რომ წნევის გაზრდით სითხის მოცულობა მცირდება.

სითხის მოცულობის ფარდობით ცვლას წნევის ერთი ერთეულით შეცვლისას ეწოდება სითხის მოცულობითი კუმშადობის კოეფიციენტი

$$\beta_p = \frac{1}{W} \frac{dW}{dp} \quad (2.4.2.)$$

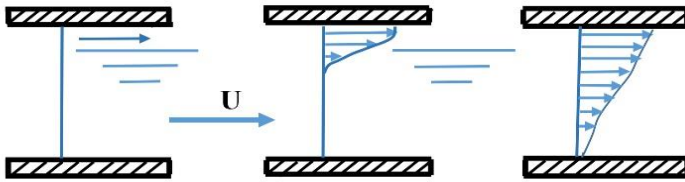
მოცულობითი კუმშადობის კოეფიციენტის შებრუნებულ სიდიდეს სითხის დრეკადობის მოდული ეწოდება.

## 2.5. სითხის დინამიკური სიბლანტე

ნიუტონური სითხის დინამიკური სიბლანტე  $\mu$  დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე და წნევაზე და არაა დამოკიდებული მოძრაობის სიჩქარეზე, ხოლო ძაბვისა და სიჩქარის დამოკიდებულების გრაფიკი ე.წ. დინების მრუდი წარმოადგენს სწორ ხაზს დახრის კუთხის ტანგენტით  $\mu$ , და ეს ერთადერთი მუდმივი სრულად ახასიათებს სითხეს. არანიუტონისეული სითხეებისთვის „დინების მრუდი“ უკვე აღარაა წრფივი, ე.წ. სიბლანტე არანიუტონისეული სითხეებისა დამოკიდებულია არა მხოლოდ ტემპერატურასა და წნევაზე, არამედ ისეთ ფაქტორებზე, როგორცაა: ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე, გარემო ფაქტორები, რომელშიც იმყოფება დენადი სითხე.

როგორც ავღნიშნეთ, სითხის თვისებას, წინააღმდეგობა გაუწიოს თავისივე ნაწილაკების ფარდობით ძვრას მოძრაობის შემთხვევაში, სიბლანტე ან შიგა ხახუნი ეწოდება.

საკითხის ფიზიკური არსის გასარკვევად დავუშვათ, რომ სითხეს უკავია სივრცე ორ ჰორიზონტალურ ფირფიტას შორის, რომელთაგან ქვედა უძრავია ( $U_2=0$ ), ხოლო ზედა მოძრაობს ქვედას პარალელურად მუდმივი  $U_0$  სიჩქარით



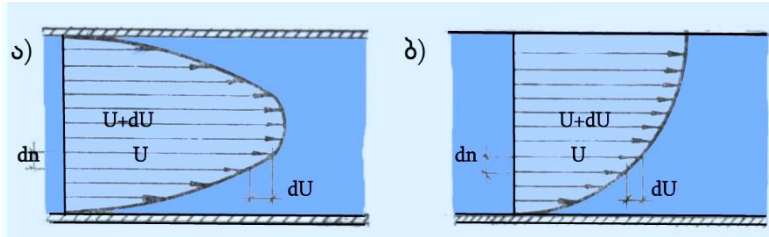
ნახ. 2.5.1. ფირფიტებს შორის სითხის მოძრაობის ეპირა

2.5.1. ნახაზზე ზედა ფირფიტა, მოძრაობის დაწყებიდან გარკვეული დროის შემდეგ, წარიტაცებს სითხის იმ ნაწილაკებს, რომლებიც უშუალოდ ეხება მის ზედაპირს და მიანიჭებს საკუთარ  $U_g$  სიჩქარეს. ეს ადასტურებს სითხის ნაწილაკებსა და ფირფიტას შორის ურთიერთქმედების ფაქტს. ასეთი სახის ურთიერთქმედებას სითხის **გარე ხახუნი** ეწოდება.

ფირფიტის მიმდებარე ნაწილაკები, თავის მხრივ, მოძრაობაში მოიყვანს მახლობლად მდებარე ნაწილაკებს და წარიტაცებს რამდენადმე ნაკლები სიჩქარით და ა.შ. ეს იმას მოწმობს, რომ თვით სითხის ნაწილაკებს შორისაც აღიძვრება მხები ურთიერთქმედება მათი შეხების სიბრტყის გასწვრივ. მსგავს ურთიერთქმედებას **შიგა ხახუნი** ეწოდება.

შეიძლება წარმოვიდგინოთ, რომ ფირფიტებს შორის მოთავსებული სითხის მთელი მასა შედგება უსასრულო რაოდენობის მცირე სისქის შრეებისაგან, რომელთა საზღვრებიც 2.5.2. ნახაზზე ნაჩვენებია წყვეტილით. შრეების მოძრაობის სიჩქარე  $n$ - $n$  ნორმალის

გასწორივ იცვლება უწყვეტად  $U=U_1=0$ -დან  $U=U_0$ -მდე (სიჩქარეთა ეპიურა მოცემულია 2.5.2. ნახაზზე). ნაკადის ასეთმა მოძრაობამ მიიღო ლამინარული (შრეებრივი) მოძრაობის სახელწოდება.



ნახ. 2.5.2. ნაკადის სიჩქარეთა განაწილების ვერტიკალური ეპიურა სითხის ა) დაწნევიანი და ბ) უდაწნეო მოძრაობის დროს.

განვიხილოთ სითხის ორი მეზობელი a და b შრე. მანძილი მათ ღერძებს შორის აღვნიშნოთ  $dn$ -ით. ხოლო სიჩქარეები, შესაბამისად,  $v$ -თი და  $(v+dv)$ -თი, a შრე, რომელიც უფრო მეტი სიჩქარით მოძრაობს, ცდილობს წარიტაცოს b შრე, ეს უკანასკნელი კი ამუხრუჭებს a შრის მოძრაობას. შემდეგ აღნიშნულ შრეებს შორის წარმოიქმნება ხახუნის ძალები ( $T_a$  და  $T_b$ ), რომელთაც თითოეული შრის მიმართ შესაბამისი მიმართულება ექნება.

ნიუტონის ჰიპოთეზის თანახმად, ხახუნის ძალა ( $T$ ) ორ მეზობელ შრეს შორის, წრიული კვეთის მილსადენებში, ლამინარული მოძრაობის დროს გამოითვლება ფორმულით:

$$T = \pm \mu \frac{du}{dn} s \quad (2.5.1.)$$



ხოლო ხახუნის ძალა ერთეულ ფართობზე (მხები ძაბვა) იქნება:

$$\tau = \frac{T}{S} = \pm \mu \frac{du}{dn} \quad (2.5.2.)$$

სადაც  $S$  - არის შრეების შეხების ზედაპირის ფართობი;  
 $\tau$  - ხახუნის ძალა ერთეულ ფართობზე (მხები ძაბვა),  
 $\text{ნ/მ}^2$ ;

$\mu$  - სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი,  $\text{ნ.წმ/მ}^2$ ;

$\frac{du}{dn}$  – სიჩქარის გრადიენტი ნორმალის  $n$  -  $n$  გასწვრივ.

“+” ან “-” ნიშანი გამოსახულებაში აიღება  $\frac{du}{dn}$  სიჩქარის გრადიენტის ნიშნის გათვალისწინებით ისე, რომ  $\tau$  ყოველთვის იყოს დადებითი (2.5.2 ბ. ნახაზზე  $\frac{du}{dn} < 0$ , ხოლო 4.2.3 ა. ნახაზზე  $\frac{du}{dn} > 0$ ).

აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ მხები ძაბვის გამოსათვლელ გამოსახულებას ( $\tau = \pm \mu \frac{du}{dn}$ ) კოლოიდური ხსნარებისა და ”პლასტიკური” სითხეებისათვის უნდა დაემატოს  $\tau_0$  წევრი, რომელსაც ”ძვრის ძაბვას” უწოდებენ

$$\tau = \tau_0 \pm \mu \frac{du}{dn} \quad (2.5.3.)$$

$\tau_0$  - არის მხები ძაბვის ის ზღვრული მნიშვნელობა, რომლის გადალახვის შემდეგაც განსახილველი სითხე მოვა მოძრაობაში შესაბამისი სიჩქარის გრადიენტით.

## 2.6. ნიუტონისეული და არანიუტონისეული სითხეების კლასიფიკაცია

სითხეს, რომელიც ( $\tau = \pm \mu \frac{du}{dn}$ ) კანონს ემორჩილება ნიუტონური სითხეები ეწოდება, ხოლო მას, რომლისთვისაც მართებულია ( $\tau = \tau_0 \pm \mu \frac{du}{dn}$ ) დამოკიდებულება – არანიუტონური (ბინგამისეული) სითხეები ეწოდება.

ნიუტონურ სითხეებს მიეკუთვნება წყალი, დაბალმოლეკულური ორგანული შენაერთები და სხვა. არანიუტონურ სითხეების ჯგუფს მიეკუთვნებიან სუსპენზიები (ორი ან მეტი ნივთიერების ნარევი, რომელთაგან ერთ-ერთი (მკვრივი) უმცირესი ნაწილაკების სახით შეწონილ მდგომარეობაშია განაწილებულია მეორეში (სითხეში). მაგ., მღვრიე წყალი, რომელშიც შეწონილ მდგომარეობაშია თიხის, ლამის და სხვ. უმცირესი ნაწილაკები.), ემულსიები (სითხე, რომელშიც შეწონილ მდგომარეობაშია სხვა სითხის მიკროსკოპული წვეთები (მაგ., რძე)), მაღალმოლეკულური ორგანული შენაერთები (მაგალითად სისხლი) და სხვა.

ნიუტონისეული სითხის სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი  $\mu$  დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე და წნევაზე და არაა დამოკიდებული მოძრაობის სიჩქარეზე, ხოლო ძაბვისა და სიჩქარის დამოკიდებულების გრაფიკი ე.წ. დინების მრუდი

წარმოადგენს სწორ ხაზს დახრის კუთხის ტანგენტით და ეს ერთადერთი მუდმივი ( $\mu$ ) სრულად ახასიათებს სითხეს. არანიუტონისეული სითხეებისთვის „დინების მრუდი“ უკვე აღარაა წრფივი, ე.წ. სიბლანტე არანიუტონისეული სითხეებისა დამოკიდებულია არა მხოლოდ ტემპერატურასა და წნევაზე, არამედ ისეთ ფაქტორებზე, როგორებიცაა: მოძრაობის დეფორმაციის სიჩქარე, გარემოს კონსტრუქციული თავისებურებები, რომელშიც იმყოფება სითხე და სითხის დინების წინაისტორია.

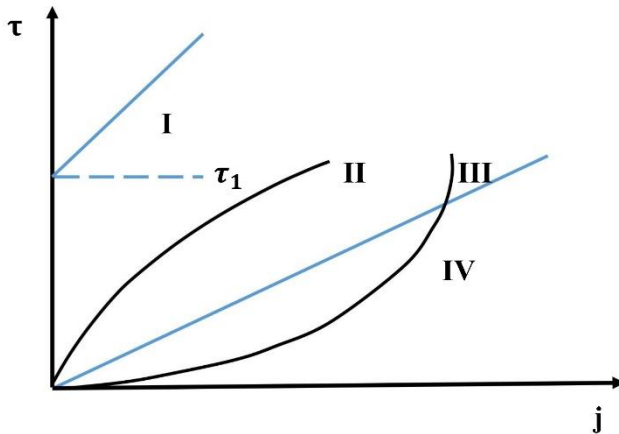
ნიუტონისეული და არანიუტონისეული სითხეები კლასიფიკაციის მიხედვით იყოფა:

- I. ბინგამისეული პლასტიკური (ბლანტპლასტიკური)
- II. ფსევდოპლასტიკური ( $n < 1$ )
- III. ნიუტონური
- IV. დილატანტური ( $n > 1$ ).

ძვრის ძაბვასა და მის სიჩქარეს შორის დამოკიდებულებს აქვს სახე:

$$\tau = k\tau^n \quad (2.6.1.)$$

სადაც  $k$  და  $n$  -არის მუდმივა ( $n < 1$ ) ფსევდოპლასტიკური გარემოსათვის:  $k$  - სითხის კონსისტენციის ზომაა, რაც დიდია სითხის სიბლანტე, მით მეტია  $k$ ;  $n$  - ახასიათებს მასალის არანიუტონისეულობის ხარისხს და რაც უფრო მეტად განსხვავდება  $n$  ერთიგან, მით უფრო მკაფიოდ ვლინდება მისი არანიუტონისეული ხასიათი.



ნახ. 2.6.1. ნიუტონისეული და არანიუტონისეული სითხეები დამოკიდებულების სქემა: I - ბინგამისეული პლასტიკური (ბლანტპლასტიკური); II – ფსევდოპლასტიკური ( $n < 1$ ) III – ნიუტონური; IV – დილატანტური ( $n > 1$ ).

**ბინგამისეული** გარემოს დინების მრუდი წარმოადგენს წრფეს, რომელიც კვეთს ძაბვის ღერძს მისი სათავიდან  $\tau_y$  დაშორებით;

**ფსევდოპლასტიკურ** გარემოს არ გააჩნია გადინების ზღვარი და ამიტომ დინების მრუდი გვიჩვენებს ძვრის ძაბვასა და ძვრის სიჩქარეს შორის დამოკიდებულებას, ე.ი. მიმხები სიბლანტე  $\mu$  ძვრის სიჩქარის ზრდისას თანდათან მცირდება. დინების მრუდი წრფივი ხდება მხოლოდ

ძვრის სიჩქარის სიდიდის ძალიან დიდი მნიშვნელობებისას;

**ნიუტონური** სითხის დინამიკური სიბლანტე  $\mu$  დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე და წნევაზე, და არაა დამოკიდებული მოძრაობის სიჩქარეზე, ხოლო ძაბვისა და სიჩქარის დამოკიდებულების გრაფიკი ე.წ. დინების მრუდი წარმოადგენს სწორ ხაზს დახრის კუთხის ტანგენსით  $\mu$ , და ეს ერთადერთი მუდმივი სრულად ახასიათებს სითხეს;

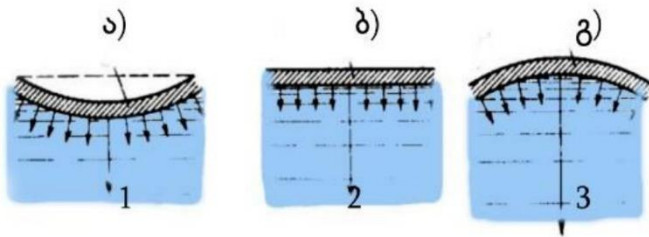
**დილატანტური** გარემო იმით ჰგავს ფსევდოპლასტიკურს, რომ არც მას გააჩნია გადინების ზღვარი, მხოლოდ მათი მიმხები სიბლანტე იზრდება ძვრის სიჩქარის გაზრდისას. ამ შემთხვევაში ხარისხოვანი კანონი ხანდახან გამოსადეგია, მაგრამ ხარისხის მჩვენებელი  $n$  ხანდახან აჭარბებს ერთს ( $n > 1$ ).

## **2.7. კაპილარობა, ნაკადის აერაცია, ნაკადის გაჯერება ნატანით, წყალში ცინულის კრისტალების წარმოქმნა, კავიტაცია**

სითხის თვისებას, ამოიზნიქოს ან ჩაიზნიქოს მცირე დიამეტრის მილაკებში (კაპილარებში) ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების გავლენით, კაპილარობა ეწოდება.

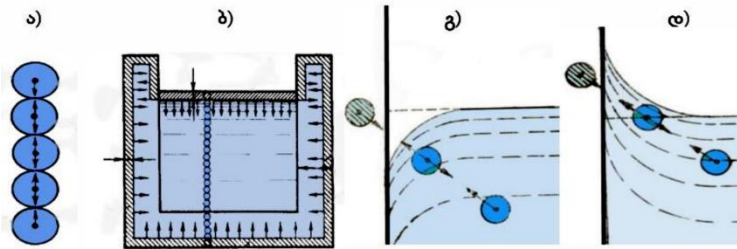
თუ კაპილარის მილს მოვათავსებთ სითხეში, შეიძლება ორ შემთხვევს ჰქონდეს ადგილი: 1. სითხის დონე კაპილარებში იყოს მაღალი ვიდრე სითხის თავისუფალი ზედაპირი ჭურჭელში და 2. სითხის დონე უფრო დაბალი იყოს სითხის თავისუფალ ზედაპირზე.

პირველ შემთხვევაში კაპილარული აწევა იქნება დადებითი, ე.ი. სითხის მენისკი კაპილარში იქნება ჩაზნექილი, მეორე შემთხვევაში კაპილარული აწევა იქნება უარყოფითი, ე.ი. სითხის მენისკი კაპილარში იქნება ამოზნექილი, მეორეში ჩაზნექილი. წყლის კაპილარული აწევა მით მეტი იქნება, რაც უფრო შემცირდება კაპილარის დიამეტრი.



ნახ. 2.7.1. მოლეკულარული წნევის ზემოქმედება წყლის ზედაპირზე, ჭურჭლის კედლების ზეგავლენის დროს: როდესაც  $P_1 < P_2 < P_3$ ; ა) 1.- ჩაზნექილობა; ბ) 2- გაწონასწორებული; გ) 3.- ამოზნექილობა;

ჰიდროტექნიკური მშენებლობის პრაქტიკაში ხშირად ვხვდებით შემთხვევებს, როდესაც სითხე (წყალი) იძენს განსაკუთრებულ მდგომარეობას: მოძრაობისას მას შეიძლება მიუერთდეს აირისებრი ან მყარი სხეული ან თვითონ გადავიდეს მყარ მდგომარეობაში. განვიხილოთ ეს შემთხვევები წყლის მაგალითზე.



ნახ.2.7.2. ა) წყლის მოლეკულების ურთიერთმიზიდულობის პირობითი სქემა ; ბ) მოლეკულური წნევა სითხესა და კედელს შორის; გ) კაპილარული მილში წყლის აწევა; დ) კაპილარულ მილში წყლის დაწევა,

1. **ნაკადის აერაცია.** ჰაერთან შეხებაში მყოფი დიდი სიჩქარით მოძრავი წყლის ნაკადი შეიძლება გაჯერდეს ჰაერის ბუშტუკებით და მივიღოთ წყლისა და ჰაერის ნარევი (ე.წ. ორფაზა სისტემა). ამ მოვლენას ნაკადის აერაცია ეწოდება.

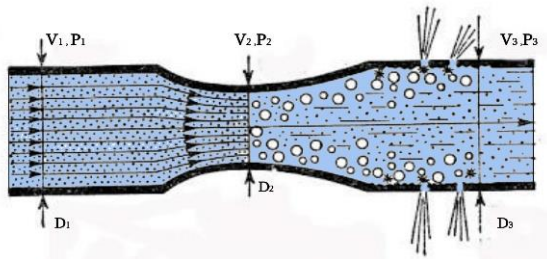
2. **ნაკადის გაჯერება ნატანით.** თუ წყლის ნაკადი წარეცხვად კალაპოტში მოძრაობს, მაშინ საკმარისად დიდი სიჩქარეების დროს ხდება ნაკადის თანდათანობით გაჯერება კალაპოტის გრუნტის ნაწილაკებით, რომლებიც წყალთან ერთად მოძრაობს შეწონილ მდგომარეობაში. ამ შემთხვევაში მიიღება ორფაზა სისტემა. ჩვეულებრივ, შეწონილ ნაწილაკებთან ერთად გრუნტის ნაწილაკების

გარკვეული ნაწილი გადაადგილდება უშუალოდ კალაპოტის ფსკერზე.

3. წყალში ყინულის კრისტალების წარმოქმნა. წნევის გაზრდით ან ტემპერატურის შემცირებით წყალში შეიძლება წარმოიქმნას ყინულის კრისტალები; ერთგვაროვანი თხევადი გარემოს ნაცვლად მიიღება ორფაზა სისტემა.

4. კავიტაცია. ბუნებრივ პირობებში წყალი შეიცავს გახსნილ ჰაერს (წყლის მოცულობის დაახლოებით 2%-ს). წნევის (P) შემცირებისას ხდება მისი გამოყოფა მცირე ბუშტუკების სახით, რაც იწვევს ნაკადის მთლიანობის რღვევას; მივიღებთ ორფაზა სისტემას. თუ წნევა შემცირდება წყლის ნაჯერი ორთქლის წნევამდე, მაშინ დაიწყება წყლის ორთქლის და ნაწილობრივ ჰაერით გაჯერებული ბუშტუკების გამოყოფა. ამ უკანასკნელის ნაჯერი ორთქლის წნევაზე მეტი წნევის ზონაში ( $P > P_{\text{ნ.წ.}}$ ) მოხვედრისას ბუშტუკები მკვეთრად შეიკუმშება და მოხდება ორთქლის კონდენსაცია. შედეგად ბუშტუკები ქრება და მათ ადგილს დიდი სიჩქარით ავსებს გარემომცველი სითხე; ხდება ადგილობრივი ჰიდრაულიკური დარტყმები და წნევის ადგილობრივი ზრდა (1000 და მეტი ატმოსფერომდე).





ნახ.2.7.3. წყლის ორთქლად გარდაქმნის ზონები

აღნიშნული მოვლენა ცნობილია **კავიტაციის** სახელწოდებით. გაზრდილი წნევის მექანიკური მოქმედება იწვევს კონსტრუქციის მასალის რღვევას კავიტაციის არეში. კავიტაციას ახლავს დამახასიათებელი ხმა და დანადგარის ვიბრაცია.

## 2.8. სითხეზე მოქმედი ძალები

სითხეზე მოქმედებს ორი სახის გარე ძალა: მასური და ზედაპირული. მასური ძალა მოდის განსახილველი სითხის მოცულობის თითოეულ ნაწილაკზე და ამ სითხის მასის პროპორციულია. ერთგვაროვანი სითხის ( $\rho = const$ ) შემთხვევაში მასური ძალა პროპორციული იქნება სითხის მოცულობისა; ამიტომ, როცა ( $\rho = const$ ) (შემდგომში მხედველობაში გვექნება ერთგვაროვანი სითხე), მასურ ძალას შეიძლება ვუწოდოთ მოცულობითი ძალაც. მოცულობითის მიეკუთვნება, მაგალითად, სითხის საკუთარი

სიმძიმის ძალა ინერციის და მაგნიტოჰიდროდინამიკური ძალები.

ზედაპირული ძალები მოქმედებს უძრავ ან მოძრავ სითხეში გამოყოფილი მოცულობის შემომფარგვლელ ზედაპირზე. ზოგად შემთხვევაში (ზედაპირზე ამ ძალების თანაბრად განაწილებისას) ზედაპირული ძალის სიდიდე იმ ფართობის პროპორციულია, რომელზედაც ის მოქმედებს. ზედაპირულს მიეკუთვნება ზედაპირისადმი ნორმალური (ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევის ძალები) და მხები ძალები (ხახუნის ძალები) განასხვავებენ გარე და შიგა მოცულობით და ზედაპირულ ძალებს. გარე ძალები სითხის მასაზე და მის შემომსაზღვრელ ზედაპირზე მოქმედებს გარედან. შიგა ძალები სითხის ნაწილაკების ურთიერთქმედების ძალებია. ისინი წყვილძალებს წარმოადგენს და მათი ჯამი სითხის აღებულ მოცულობაში ყოველთვის ნულის ტოლია.

## **2.9. იდეალური და რეალური სითხეები**

მრავალი პრაქტიკული გაანგარიშების ჩატარებისას, შესაძლებელია ისეთი ფიზიკური თვისებების უგულებელყოფა, როგორც არის კუმშვადობა, ტემპერატურული დეფორმაცია, წებოვნება და სხვა. ექსპერიმენტი გვიჩვენებს, რომ წნევისა და ტემპერატურის ჩვეულებრივი ცვლილებისას რეალური სითხე იმდენად მცირედ იცვლის თავის მოცულობას, რომ ეს ცვლილება

პრაქტიკულად შეიძლება უგულვებელყოფით. ამიტომ, ჰიდრაავლიკაში სითხე განიხილება, როგორც უკუმშველი სხეული. უძრავ სითხეში მხები ძაბვები არ არსებობს, მოძრავი სითხის ნაკადში კი ისინი წარმოიქმნება შრეების ურთიერთშეხების ზედაპირებზე (სითხის სიბლანტე).

პრაქტიკაში გვხვდება კერძო შემთხვევა, როდესაც სიბლანტით გამოწვეული ხახუნის ძალები იმდენად მცირეა სითხეზე მოქმედ სხვა ძალებთან შედარებით, რომ ისინი შეიძლება უგულვებელყოფით (როგორც უძრავ სითხეში).

ანალიზურ გამოკვლევებში ხშირად სარგებლობენ იდეალური სითხის ცნებით. იდეალური სითხე არის წარმოსახვითი სითხე, რომელიც აბსოლუტურად უკუმშველია და რომელშიც მოძრაობის დროს არ წარმოიქმნება ხახუნის ძალები. ცხადია, რომ იდეალური სითხე ბუნებაში არ არსებობს და ის მხოლოდ ჩვენს წარმოდგენაში შექმნილი აბსტრაქტული მოდულია. ბუნებაში არსებული ყველა სითხე რეალურია (ბლანტია). აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ უძრაობაში მყოფი სითხის შესწავლისას არ არსებობს იდეალური და რეალური სითხეების განსხვავების აუცილებლობა, ხოლო რეალური სითხის მოძრაობისას დამატებით უნდა იქნეს გათვალისწინებული ხახუნის ძალები, ე.ი. სიბლანტე.

### თავი 3. სითხეების ჰიდროსტატიკა

#### 3.1. სითხის წონასწორობის დიფერენციალური განტოლება (ეილერის განტოლება)

ჰიდროსტატიკა ჰიდრავლიკის ის ნაწილია, რომელიც შეისწავლის წონასწორობაში მყოფი სითხის კანონებს.

ჰიდროსტატიკის ერთ-ერთ ძირითად ცნებად ითვლება წნევა. წნევას ეწოდება ჰიდროსტატიკური, თუ სითხე წონასწორობაშია და ჰიდროდინამიკური - თუ სითხე მოძრაობაშია. წნევა აღინიშნება  $P$  ასოთი.

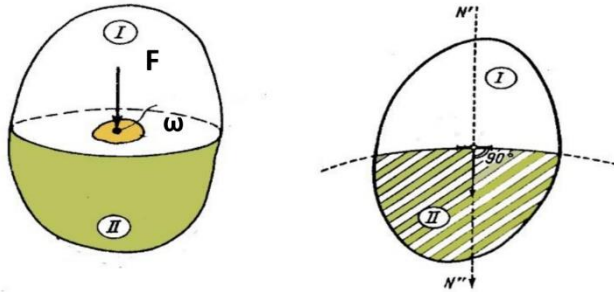
წნევა  $P$  განისაზღვრება როგორც, ზედაპირის მართობულად მოქმედი ძალის  $F$  მოდულის ფარდობა ამ ზედაპირის ფართობთან  $S$  :

$$P = \frac{F}{S}; \quad (3.1.1.)$$

SI სისტემაში წნევა იზომება **პასკალებში (პა)**:  
 $1 \text{ პა} = 1 \text{ ნ/მ}^2$ .

ჰიდროსტატიკურ წნევას აქვს სამი დამახასიათებელი ძირითადი თვისება:

1. ჰიდროსტატიკური წნევა ყოველთვის მიმართულია სითხის შიგნით განხილული ზედაპირის მართობულად, ე. ი. მის მიერ განვითარებული წნევის ძალა გვევლინება ზედაპირული მკუმშავი ნორმალური ძალის სახით. მოქმედების ზედაპირისადმი შიგა ნორმალის გასწვრივ.



ნახ. 3.1.1. წონაწონრობაში მყოფი სითხეში წნევის მიმართულების სქემა

2. ჰიდროსტატიკური წნევა სითხის ნებისმიერ წერტილში არ არის დამოკიდებული ზედაპირის ორიენტაციაზე, ე.ი. ჰიდროსტატიკური წნევა მოცემულ წერტილში ყველა მიმართულებით თანაბარი სიდიდით მოქმედებს.

$$P_x = P_y = P_z = P_n \quad (3.1.2.)$$

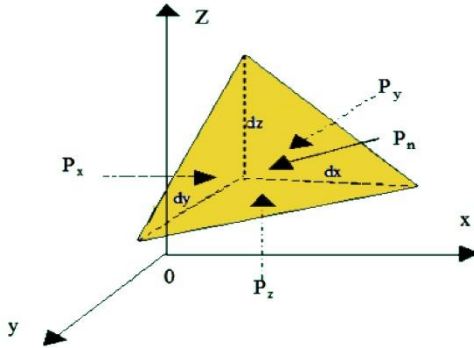
ეს ტოლობა გამოსახავს ჰიდროსტატიკური წნევის მეორე თვისებას.

3. ჰიდროსტატიკური წნევის მნიშვნელობა ნებისმიერ წერტილში დამოკიდებულია თვით ამ წერტილის მდებარეობაზე სითხეში, ანუ მის კოორდინატებზე.

$$P = f(x, y, z) \quad (3.1.3.)$$

ჰიდროსტატიკური წნევის განაწილების კანონის დასადგენად წონასწორობაში მყოფ სითხეში გამოვეყთ ელემენტარული პარალელეპიპედი  $dx$ ,  $dy$  და  $dz$  წიბოებით და სიმძიმის ცენტრით  $K$  წერტილში

(თვალსაჩინოებისთვის ნახ. 3.1.2.-ზე წარმოდგენილია განსახილველი პარალელეპიპედის კვეთი ნაწილი)



ნახ. 3.1.2 სითხეში ჰიდროსტატიკური წნევის განაწილების სქემა

განსახილველ მოცულობაზე იმოქმედებს ორი სახის ძალა: ზედაპირული და მოცულობითი. ზედაპირული ძალები არის პარალელეპიპედის გარემომცველი სითხის წნევის ძალები და, ჰიდროსტატიკური წნევის პირველი თვისების თანახმად, მიმართულია პარალელეპიპედის წახნაგების მართობულად, შიგა ნორმალის გასწვრივ. რაც შეეხება მოცულობით ძალებს, ზოგად შემთხვევაში შეიძლება მოქმედებდეს სიმძიმის, ინერციის, ცენტრიდანული და სხვა ძალები.

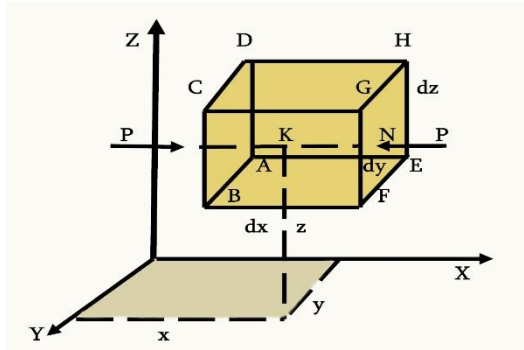
ზედაპირული ძალების სიდიდის დასადგენად დაეუშვათ, რომ  $K$  წერტილში (რომლის კოორდინატებია  $x$ ,  $y$  და  $z$ ) ჰიდროსტატიკური წნევა არის  $p$ . თუ გავიხსენებთ,

რომ  $p$  წნევა არის კოორდინატების უწყვეტი ფუნქცია  $p=f(x, y, z)$ , და აგრეთვე იმას, რომ  $K$  წერტილში გადაკვეთილი ყველა პარალელური წახნაგისათვის იცვლება მხოლოდ ერთი კოორდინატი (ე.ი  $x$  გახდება  $x+dx$ ,  $y$  გახდება  $y+dy$  და  $z$  გახდება  $z+dz$ . საშუალო ჰიდროსტატიკური წნევის მნიშვნელობები ტოლი იქნება:

$$\begin{aligned}
 P + \frac{\partial p}{\partial x} dx; \\
 P + \frac{\partial p}{\partial y} dy \\
 P + \frac{\partial p}{\partial z} dz
 \end{aligned}
 \tag{3.1.4.}$$

ცალკეულ წახნაგზე მოქმედი წნევის ძალის მისაღებად ამ წახნაგზე მოქმედი წნევის მნიშვნელობა უნდა გამრავლდეს სათანადო წახნაგის ფართობზე.

აგრეთვე სითხის ერთეულ მასაზე მოქმედი ყველა მოცულობითი ძალის ტოლქმედის აჩქარების მდგენელი ავლნიშნოთ საკოორდინატო ღერძზე  $X$ ,  $Y$  და  $Z$ -ით.



ნახ.3.1.3. სითხეში მოქმედი ძალები

მაშინ პარალელეპიპედის მთელს  $\rho dx dy dz$  მასაზე მოქმედი ყველა მოცულობითი ძალის ტოლქმედის მდგენელები იქნება:

$$X \rho dx dy dz; Y \rho dx dy dz; Z \rho dx dy dz; \quad (3.1.5.)$$

სადაც  $\rho$  - არის სითხის სიმკვრივე და  $dx dy dz$  - პარალელეპიპედის მოცულობა.

პარალელეპიპედის უსასრულოდ მცირე მოცულობის გამო მხედველობაში არაა მიღებული მოცულობითი ძალებისა და სითხის მასის უმნიშვნელო ცვლილება.

წონასწორობის პირობის შესანარჩუნებლად სითხეში გამოყოფილ ელემენტარულ პარალელეპიპედზე მოქმედი ყველა ძალის გეგმილების ჯამი ტოლი უნდა



იყოს ნული. ამის შესაბამისად წონასწორობის პირობა ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$pdydz - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz - X\rho dx dy dz = 0 \quad (3.1.6.)$$

მარტივი გარდაქმნებისა და გამარტივების შედეგად მივიღებთ:

$$\begin{cases} \rho X - \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \rho Y - \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ \rho Z - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \end{cases} ; \quad (3.1.7.)$$

მიღებულ განტოლებას სითხის წონასწორობის ეილერის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა წოდება.

ზედაპირული ძალების გარდა განსახილველ პარალელეპიპედზე მოქმედებს მოცულობითი ძალებიც. ერთეულ მასაზე მოსული მოცულობითი ძალების ტოლქმედი აღვნიშნოთ  $F$ -ით, ხოლო გეგმილები კოორდინატთა ღერძებზე -  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ -ით, მაშინ პარალელეპიპედზე მოქმედი მოცულობითი ძალის სიდიდე  $F=(\rho dx dy dz)$  ნამრავლის ტოლი იქნება. აქ  $dx dy dz$  არის პარალელეპიპედის მასა.

პარალელეპიპედის წონასწორობის პირობიდან გამომდინარეობს, რომ მასზე მოქმედი ზედაპირული და მოცულობითი ძალების გეგმილების ჯამი თითოეულ ღერძზე ნულის ტოლია. თუ განვიხილავთ თითოეული ღერძისთვის შესაბამის განტოლებებს მივიღებთ სითხის წონასწორობის ეილერის დიფერენციალურ განტოლებათა

სისტემის განსხვავებულ სახეს, ჩაწერილს სითხის ერთეული მასისთვის:

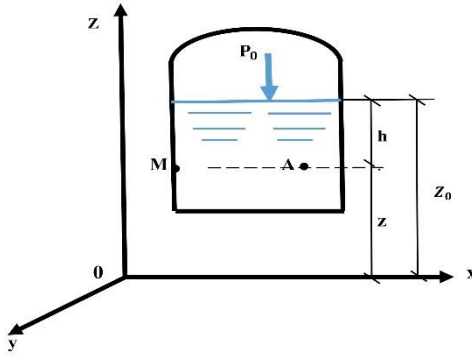
$$\begin{cases} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = 0 \\ F_y - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} = 0 \\ F_z - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} = 0 \end{cases} ; \quad (3.1.8.)$$

ამ სისტემაში მოცემული განტოლებები გამოსახავს სითხეში ჰიდროსტატიკური წნევის განაწილების კანონს დიფერენციალური ფორმით.

### 3.2. ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება

განვიხილოთ კერძო შემთხვევა, როდესაც წონასწორობაში მყოფ სითხეზე მოცულობითი ძალებიდან მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა. ამასთან, ვიგულისხმობთ, რომ სითხე მოთავსებულია დახურულ ჭურჭელში და მის თვისუფალ ზედაპირზე მოქმედებს ატმოსფერულის ტოლი ან მისგან განსხვავებული  $P_0$  წნევა (ნახ. 3.2.1.), მაშინ მოცულობითი ძალის (განსახილველ შემთხვევაში სიმძიმის ძალის) აჩქარების გეგმილები კოორდინატთა ღერძებზე ტოლი იქნება:

$$F_x = 0; \quad F_y = 0; \quad F_z = -g ; \quad (3.2.1.)$$



ნახ 3.2.1 ჭურჭელში A მოქმედი წნევის განსაზღვრის სქემა

თუ  $F_x$ ;  $F_y$  და  $F_z$  - ის ამ მნიშვნელობებს შევიტანთ ( $dU = F_x dx + F_y dy + F_z dz$ ) გამოსახულებაში, ინტეგრების შედეგად მივიღებთ:

$$U = -gz + C \quad (3.2.2.)$$

სადაც  $C$  - არის ინტეგრების მუდმივა. მცირედი გარდაქმნებით მივიღებთ

$$p = p_0 + \rho g(z_0 - z) \quad (3.2.3.)$$

რადგან  $\gamma = \rho g$  მივითებთ  $p = p_0 + \gamma(z_0 - z)$  ეს გამოსახულება შეიძლება გადავწეროთ შემდეგნაირად:

$$Z_0 + \frac{P_0}{\gamma} = Z + \frac{P}{\gamma} ; \quad (3.2.4.)$$

მიღებულ განტოლებას უწოდებენ ჰიდროსტატიკის ძირითად განტოლებას. 3.2.1. ნახაზიდან ჩანს, რომ

$$Z_0 - Z = h; \quad (3.2.5.)$$

ამიტომ ბოლო განტოლება შეიძლება გადავწეროთ შემდეგნაირად:

$$P_{\Sigma\Sigma} = p_0 + \gamma h ; \quad (3.2.6.)$$

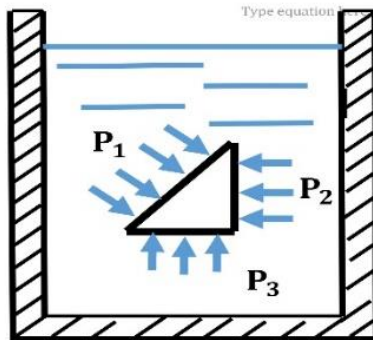
სადაც  $P_{\Sigma\Sigma}$  - არის სრული წნევა სითხის განსახილველ A წერტილში;  $h$  - A წერტილის ჩაძირვის სიღრმეა სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან.

$P_{\Sigma\Sigma} = p_0 + \gamma h$  განტოლებიდან ჩანს, რომ სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი  $P_0$  წნევა ერთნაირი ინტენსიურობით გადაეცემა ყველა მიმართულებით, რაც კიდევ ერთხელ ადასტურებს პასკალის კანონის მართებულობას (პასკალის კანონის თანახმად, უძრავი სითხის რაიმე წერტილში წნევის ყოველგვარი ცვლილება, რომელიც სითხის წონასწორობას არ არღვევს, უცვლელად გადაეცემა დანარჩენ წერტილებში). მაშასადამე, ამ განტოლებასაც ასევე შეიძლება ეწოდოს ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება.

### 3.3. პასკალის კანონი და მისი გამოყენება პრაქტიკაში

პასკალის კანონის საილუსტრაციოდ ნახ. 3.3.1-ზე სითხეში ჩაძირული პატარა სამკუთხა პრიზმაა

გამოსახული. თუ დავუშვებთ, რომ პრიზმის მასალის სიმკვრივე სითხის სიმკვრივის ტოლია, მაშინ პრიზმა სითხეში განურჩეველი წონასწორობის მდგომარეობაში უნდა იმყოფებოდეს. ეს იმას ნიშნავს, რომ პრიზმის წახნაგებზე მოქმედი წნევის ძალები გაწონასწორებული უნდა იყვნენ. ეს მხოლოდ იმ შემთხვევაში მოხდება, თუ წნევა, ე.ი. ძალები, პრიზმის ყოველი წახნაგის ფართობის ერთეულზე, ერთნაირია:  $p_1 = p_2 = p_3 = p$ .



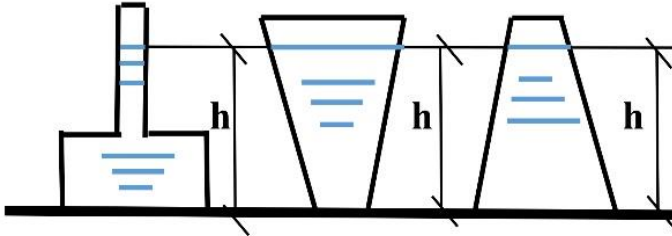
ნახ. 3.3.1. ჩაძირულ სხეულზე მოქმედი წნევა

$$p_1 = p_2 = p_3 = p$$

წნევა სითხეში ჭურჭლის ფსკერზე და კედლებზე სითხის სვეტის სიმაღლეზეა დამოკიდებული. სითხის წნევა,  $h$  სიმაღლისა და ფსკერის  $S$  ფართობის მქონე ცილინდრული ჭურჭლის ფსკერზე, სითხის  $mg$  სვეტის წონის ტოლია, სადაც  $m = \rho ghS$  –

ჭურჭელში არსებული სითხის მასაა,  $\rho$  – სითხის სიმკვრივე. შესაბამისად

$$P = \frac{\rho h S g}{S} = \rho g h ; \quad (3.3.1.)$$

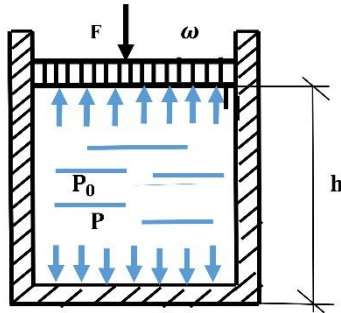


ნახ. 3.3.2. ზიარი ჭურჭლის თვისება

პასკალის კანონის მიხედვით სითხე  $h$  სიმაღლეზე ჭურჭლის გვერდით კედლებზე ასეთივე წნევას ქმნის. სითხის  $\rho g h$  სვეტის წნევას **ჰიდროსტატიკურ წნევას** უწოდებენ. თუ სითხე იმყოფება დეგუმბიან ცილინდრში (ნახ 3.3.3.), მაშინ დეგუმზე რაღაც გარე ძალით მოქმედებისას, სითხეში შეიძლება დამატებითი წნევა შეიქმნას  $P_0 = F / S$ , სადაც  $S$  – დეგუმის ფართობია. ამგვარად, სრული წნევა სითხეში  $h$  სიღრმეზე შეიძლება შემდეგი სახით ჩაიწეროს:

$$P = P_0 + \rho g h ; \quad (3.3.2.)$$

თუ ნახ. 3.3.3.-ს დგუშს მოვაცილებთ, მაშინ სითხის ზედაპირზე წნევა ატმოსფერული წნევის ტოლი იქნება:  $P_0 = P_{ატმ}$ .



ნახ.3.3.3. დგუშის კედელზე მოქმედი ძალები

სითხის სხვადასხვა დონეზე წნევების განსხვავების გამო აღიძვრება ამომგდები ანუ არქიმედეს  $F_a$  ძალა.

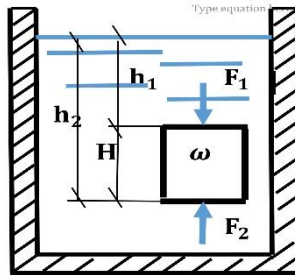
ვთქვათ სითხეში,  $h$  სიღრმეზე  $S$  ფართობის მქონე, მართკუთხა პარალელეპიპედის ფორმის სხეულია ჩაშვებული. ზედა და ქვედა წახნაგებზე წნევათა სხვაობა ტოლია:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \rho gh; \quad (3.3.3.)$$

ამიტომ ამომგდები ძალა ზევითაა მიმართული და სიდიდით ტოლია:

$$F_{\square} = F_2 - F_1 = S\Delta P = \rho gSh = \rho gV ; \quad (3.3.4.)$$

სადაც  $V$  – სხეულის მიერ გამოდევნილი სითხის მოცულობაა, ხოლო  $\rho V$  – მისი მასა. სითხეში (ან აირში) ჩაშვებულ სხეულზე მოქმედი არქიმედეს ძალა სხეულის მიერ გამოდევნილი სითხის (ან აირის) წონის ტოლია.



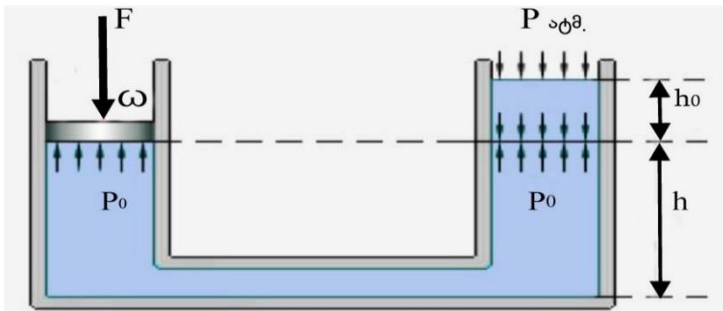
#### ნახ.3.3.4. სითხეში ჩაძირულ სხეულზე მოქმედი ძალები

არქიმედეს კანონად წოდებული ეს მტკიცება ნებისმიერი ფორმის სხეულისათვისაა სამართლიანი.

არქიმედეს კანონიდან გამომდინარეობს, რომ თუ სხეულის საშუალო სიმკვრივე  $\rho_{\text{სხ}}$  სითხის (აირის)  $\rho$  სიმკვრივეზე მეტია, მაშინ სხეული ფსკერზე ჩაიძირება. თუ  $\rho_{\text{სხ}} < \rho$ , სხეული სითხის ზედაპირზე იცურებს. სხეულის სითხეში ჩაძირული ნაწილის მოცულობა იქნება ისეთი, რომ გამოდევნილი სითხის წონა ტოლი იქნება სხეულის წონისა. საჰაერო ბუმბუტის ჰაერში ასაფრენად მისი წონა ნაკლები უნდა იყოს გამოდევნილი ჰაერის წონისა. ამიტომაც, საჰაერო ბუმბუტებს მსუბუქი აირით



(წყალბადითა, ჰელიუმით) ან გამთბარი ჰაერით ბერავენ. სითხეში სრული წნევის გამოსახულებიდან  $p = p_0 + \rho gh$  გამომდინარეობს, რომ ნებისმიერი ფორმის, ერთგვაროვანი სითხით სავსე ზიარჭურჭელის ერთიდაიგივე დონის ნებისმიერ წერტილში წნევა ერთნაირია.



ნახ. 3.3.5. დგუმის კედლებზე ძალის მოქმედების სქემა.

მარჯვენა მხარეს სითხის ზედაპირი ღიაა. ორივე მხარეს  $h$  დონეზე წნევა ერთნაირია და ტოლია  $p_0 = F / \omega = \rho gh_0 + p_{atm}$ . ფსკერზე წნევა ტოლია  $p = p_0 + \rho gh$ .

თუ ზიარჭურჭლის ორივე ვერტიკალურად განლაგებულ ცილინდრილ ნაწილს დგუმებით დავხურავთ, დგუმებზე მოდებული გარე ძალებით სითხეში შეიძლება ისეთი დიდი  $p$  წნევის შექმნა, რომელიც სისტემის ნებისმიერ წერტილში ბევრად მეტი იქნება ჰიდროდინამიკური  $\rho gh$  წნევაზე. მაშინ შეიძლება

ჩაითვალოს, რომ მთელ სისტემაში ერთნაერი  $p$  წნევა დამყარდა.

თუ დგუშებს სხვადასხვა  $S_1$  და  $S_2$  ფართობები გააჩნიათ, მაშინ სითხის მხრიდან მათზე სხვადასხვა ძალა მოქმედებს  $F_1 = p\omega_1$  და  $F_2 = p\omega_2$ . სისტემაში წონასწორობის შესანარჩუნებლად დგუშებზე მოდულით ასეთივე, მაგრამ საწინააღმდეგოდ მიმართული გარე ძალები უნდა იქნეს მოდებული. ამგვარად:

$$\frac{F_1}{\omega_1} = \frac{F_2}{\omega_2}; \quad (3.3.5.)$$

თუ  $\omega_2 \gg \omega_1$ , მაშინ  $F_2 \gg F_1$ .

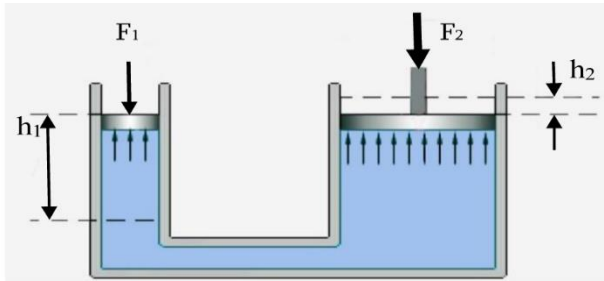
ასეთ ხელსაწყოებს **ჰიდრაულიკურ წნებს** უწოდებენ (ნახ. 3.3.5). ისინი ძალაში მნიშვნელოვანი მოგების საშუალებას იძლევიან. თუ ვიწრო ცილინრის დგუშს ძალის მოქმედებით  $h_1$  მანძილზე გადავაადგილებთ. მაშინ დგუში ფართო ცილინდრში მძიმე ტვირთს  $h_2$  მანძილზე გადაადგილებს:

$$h_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2} h_1; \quad (3.3.6.)$$

ამგვარად, ამასთან, ძალისა და მანძილის ნამრავლი უცვლევია:

$$F_1 h_1 = F_2 h_2; \quad (3.3.7.)$$

ეს წესი სრულდება ნებისმიერი იდეალური მანქანისთვის, სადაც ხახუნის ძალები არ მოქმედებს. მას „მექანიკის ოქროს წესი“ ეწოდება.



ნახ. 3.3.6. ჰიდრავლიკური წნეხის მუშაობის პრინციპი

$$P = \frac{F_1}{\omega_1} = \frac{F_2}{\omega_2}; \quad (3.3.8.)$$

ჰიდრავლიკურ მანქანებს, რომლებსაც ტვირთის აწევისათვის იყენებენ, დომკრატებს უწოდებენ. მათ ფართოდ იყენებენ ჰიდრავლიკურ პრესადაც. სითხედ, ჩვეულებრივ, მინერალურ ზეთს იყენებენ.

ჰიდრავლიკური წნეხი შედგება ორი სხვადასხვა განივკვეთიანი ცილინდრისაგან, რომლებზეც მჭიდროდაა

მორგებული დიდ განივკვეთიანი ( $\omega_2$ ) და პატარა განივკვეთიანი ( $\omega_1$ ) ფართობის მქონე დგუშები. ცილინდრები ერთმანეთთან შეერთებულია მილსადენით და შიგ ასხია წვეთოვანი სითხე. მცირე დიამეტრიან დგუშზე მომქმედი  $F_1$  ძალა სითხის ზედაპირზე შეხების ფართობის სიმცირის გამო იწვევს დიდ  $P_1 = \frac{F_1}{S_1}$  წნევას, რომელიც პასკალის კანონის საფუძველზე იმავე სიდიდით გადაეცემა დიდ ფართობიან დგუშს, რაზედაც დიდი ფართობის გამო ვითარდება მნიშვნელოვანი წნევის ძალა, რაც იწვევს დიდი დგუშის ვერტიკალური მიმართულებით გადაადგილებას.

წნევის ძალა, რომელიც ვითარდება დიდი ფართობის მქონე დგუშზე იანგარიშება ფორმულით

$$F_2 = \frac{F_1 \omega_2}{\omega_1}; \quad (3.3.9.)$$

როგორც მიღებული დამოკიდებულებიდან სჩანს, წნევის ძალის მნიშვნელობა, რომელიც ვითარდება დიდ დგუშზე, იმდენად მეტია იმ წნევის ძალაზე, რომელსაც ავითარებს პატარა დგუში, რამდენადაც მეტია დიდი დგუშის ფართობი პატარა დგუშის ფართობზე.

თუ ცილინდრის ფართობებს გამოვსახავთ შესაბამისი დიამეტრების საშუალებით (ნახ. 3.3.6.) ( $a$  დიდი მხარი (დაშორება ბერკეტიდან  $c_1$  ცენტრამდე  $c$ ) და  $b$  პატარა მხარი (დაშორება ბერკეტიდან  $c_2$  ცენტრამდე  $c$ )) მივიღებთ:

$$F_2 = \eta \frac{F_1 a}{b} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2; \quad (3.3.10.)$$

სადაც  $\eta$  არის ჰიდრავლიკური წნეხის მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქკ);  $d_1$  და  $d_2$  შესაბამისად არის პატარა და დიდი დგუმების დიამეტრები.

ზოგადად მარგი ქმედების კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა არის 0,85.

### 3.4. მანომეტრული წნევა, პიეზომეტრული სიმაღლე

რაც უფრო ფსკერთან ახლოს იმყოფება განსახილველი წერტილი სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან, მით უფრო დიდი წნევა მოქმედებს მასზე. სითხის მოცემულ წერტილში წნევას ( $P=\gamma h$ ) ხალას, ჭარბ ან მანომეტრულ წნევას უწოდებენ.

$$P_{\text{მმ}} = \gamma h; \quad (3.4.1.)$$

სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი წნევისა და ხალასი წნევის ჯამი არის სრული ჰიდროსტატიკური ანუ აბსოლუტური წნევა

$$P = P_{\text{მმ}} + P_{\text{აბ}}; \quad (3.4.2.)$$

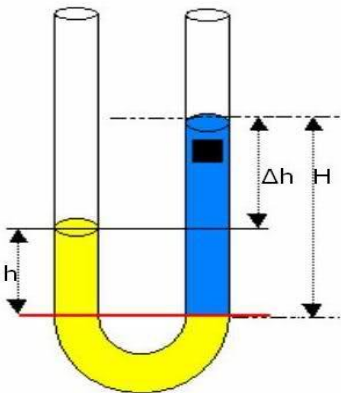
ხალასი წნევა იზომება მანომეტრით. როცა  $P < P_{\text{აბ}}$ , მაშინ ამბობენ, რომ ადგილი აქვს ვაკუუმს, ანუ ვაკუუმი არის წნევის დანაკლისი ატმოსფერულ წნევამდე. ე.ი.

$$P_{\text{შპ}} = P_{\text{შპ}} - P_{\text{შპ}}; \quad (3.4.3.)$$

სხვადასხვა სახის ჰიდროსტატიკური წნევის გასაზომად გამოიყენება სითხიანი და ლითონის მანომეტრები და ვაკუმეტრები.

სითხიან მანომეტრებს მიეკუთვნება პიეზომეტრები.

პიეზომეტრი წარმოადგენს ვერტიკალურ მინის მილს, რომელიც ჭარბ წნევას ( $P_{\text{ას}} = \gamma h$ ) ზომავს ჭურჭელთან მიერთების სიბრტყეში.  $h = p/\gamma$  სიდიდეს პიეზომეტრული სიმაღლე ანუ პიეზომეტრული დაწნევა ეწოდება (მილის დიამეტრი არ უნდა იყოს 5 მმ-ზე ნაკლები).



ნახ 3.4.1. მანომეტრის მუშაობის პრინციპი

გასაზომი, მაშინ ვერცხლისწყლის თავისუფალ ზედაპირზე თანაბარი წნევა მოქმედებს და სითხე ორივე მუხლში ერთ დონეზე დგება. როდესაც დიფერენციალური

დიფერენციალური (ორსითხიანი) მანომეტრი შედგება მოხრილი შუშის მილისაგან, რომელშიც ვერცხლისწყალი ასხია. როდესაც ხელსაწყო არ არის მიერთებული იმ რეზერვუართან, რომელთა შორის წნევათა სხვაობაა

მანომეტრის ორივე ბოლოს მივუერთებთ იმ რეზერვუარებს, რომლებშიც წნევები ერთმანეთის ტოლი არ არის, მაშინ ვერცხლისწყალი მუხლებში სხვადასვა სიმაღლეზე დადგება.

$$P_1 + \gamma h_1 = P_2 + \gamma h_2 + \gamma_{\text{წყ.}} \Delta h; \quad (3.4.4.)$$

მცირედი გარდაქმნებით მივიღებთ

$$\Delta P = \Delta h(\gamma_{\text{წყ.}} - \gamma); \quad (3.4.5.)$$

სადაც  $\gamma$  და  $\gamma_{\text{წყ.}}$  სითხისა და ვერცხლისწყლის კუთრი წონა.

### **3.5. წნევის ძალის განსაზღვრა სითხეში ბრტყელ და მრუდწიროვან ზედაპირზე**

ბრტყელ კედლებზე წნევის ძალის სიდიდე განისაზღვრება ელემენტარულ  $da$  ფართობებზე მოქმედი ელემენტარული  $dP$  ძალების შეჯამებით. ამასთან, სხვადასხვა ელემენტარული ძალა, მათი პარალელობისა და ერთნაირი მიმართულების გამო, დაიყვანება ერთ ტოლქმედზე.

წნავის ძალა ნებისმიერ ბრტყელ ზედაპირზე ტოლია განსახილველი ზედაპირის (ფართობის) სიმძიმის

ცენტრში მოქმედი წნევისა და მოცემული ზედაპირის ფართობის სიდიდის ნამრავლის:

$$P = \gamma h_{\text{ს.გ.}} \omega; \quad (3.5.1.)$$

სადაც  $\gamma$  - არის ხვედრითი (კუთრი) წონა,  $h_{\text{ს.გ.}}$  - სიმძიმის ცენტრის ჩაღრმავება (დაშორება თავისუფალი ზედაპირიდან) და  $\omega$  ზედაპირის ფართობი.

1) თარაზულ ბრტყელ ზედაპირზე (ანუ ჭურჭლის ფსკერზე) წნევის ძალის მნიშვნელობა იქნება  $P = \gamma h \omega$ .

2) ვერტიკალური ბრტყელი კედლის შემთხვევაში იქნება  $P = \gamma \frac{h}{2} \omega$ ;

3) წნევის ძალის მნიშვნელობა  $\alpha$  კუთხით ჰორიზონტთან დახრილ ბრტყელ ზედაპირზე ტოლი იქნება  $P = \frac{\gamma h^2}{2 \sin \alpha}$

წნევის ცენტრის (წნევის ძალის, წნევის ტოლქმედის მოდების წერტილის) მდებარეობა განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით

$$l_{\text{გ}} = l_{\text{ს.გ.}} + \frac{J_0}{l_{\text{ს.გ.}} \omega}; \quad (3.5.2.)$$

სადაც  $l_{\text{გ}}$  არის  $P$  ძალის მოდების წერტილი,  $l_{\text{ს.გ.}}$  ფიგურის სიმძიმის ცენტრი,  $J_0$  ფართობის ინერციის მომენტი ხოლო  $\omega$  ბრტყელი ზედაპირის ფართობი.

ნებისმიერი ფორმის მრუდწირული ზედაპირის შემთხვევაში სითხის წნევის ელემენტარული ძალები, რომლებიც ზედაპირის შესაბამის წერტილებში



მართობულად მოქმედებს, ერთმანეთის პარალელური არ არის. ზოგად შემთხვევაში, ისინი სივრცეში ადგენს ნებისმიერად ორიენტირებულ ძალთა სისტემას და შეიძლება არ გადაიკვეთოს ერთ წერტილში, ე.ი. არ ჰქონდეს ტოლქმედი.

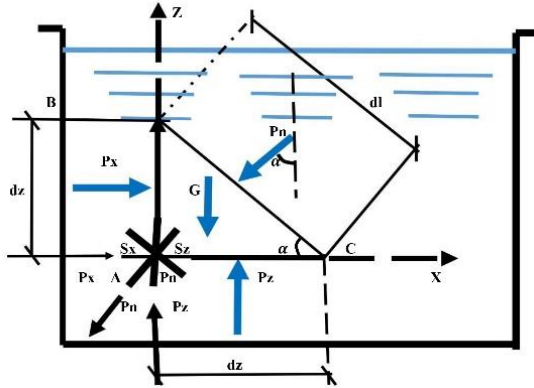
1. მრუდწიროვან ზედაპირზე წნევის ძალის თარაზული მდგენელი უდრის წნევის ძალას განსახილველი მრუდე ზედაპირის ვერტიკალურ გეგმილზე

$$P_x = \gamma h_{ს.ვ.} \omega_x$$

2. წნევის ძალის ვერტიკალური მდგენელი ტოლია იმ სითხის წონისა, რომელიც მოთავსებულია მრუდე კედლის ზედაპირსა და სითხის თავისუფალ ზედაპირებს შორის  $P_y = \gamma W = G$  სადაც  $W$  არის განსახილველი მრუდე კედლის ზევით მდებარე სითხის მოცულობა;  $G$  - სითხის წონა.

### 3.6. ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურა

დავუშვათ სითხე ასხია 2 ჭურჭელში. პირველ შემთხვევაში ჭურჭლის კედელი ვერტიკალურია, ხოლო მეორე შემთხვევაში ჰორიზონტისადმი  $\alpha$  კუთხით დახრილი, რომლისათვისაც  $h=ls\sin\alpha$ .



ნახ. 3.5.1. ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურა ვერიკალური და დახრილი კუთხის შემთხვევაში სითხეში

ხალასი (ანუ მანომეტრული) წნევა გამოი-  
სახება დამოკიდებულებით

$$P_{\text{მან}} = \gamma h; \quad (3.6.1.)$$

იგი წარმოადგენს სწორი ხაზის განტოლებას, სადაც  $h$  განსახილველი წერტილის ჩაღრმავებაა სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან. სითხის თავისუფალ ზედაპირზე, რადგანაც  $h=0$ , ხალასი წნევაც ნულის ტოლია. ხალასი წნევა თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს ყველაზე ღრმა წერტილში.

თუ AB კედლის მართობულად გადავზომავთ წნევის შესაბამის მნიშვნელობებს (B წერტილში  $P_{ბან}=0$ ; A წერტილში კი  $P_{ბან}=P_{ბკ}=γh$ ). მაშინ მივიღებთ სიღრმის მიხედვით წნევის ცვლილების ABC დიაგრამას, რომელიც გამოხატავს ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურას AB კედლის მიმართ. ვერტიკალური კედლის შემთხვევაში ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურის (სამკუთხედის) ფართობი ტოლია  $γ \frac{h^2}{2}$ , ხოლო დახრილი კედლის შემთხვევაში -  $γ \frac{h^2}{2 \sin \alpha}$ . სრული, ანუ აბსოლუტური წნევის ეპიურის ასაგებად საჭიროა ვისარგებლოთ დამოკიდებულებით

$$P = P_{\text{მარტ}} + \gamma h.$$

#### თავი 4. ამოცანები ჰიდროსტატიკაში

##### 4.1. სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან წერტილის ჩაღრმავების განსაზღვრა

**ამოცანა 1:** განვსაზღვროთ ჭურჭელში სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან A წერტილის ჩაღრმავება h, თუ ამ წერტილში ჭარბი წნევა ტოლია 1 კგმ/სმ<sup>2</sup>. წყლის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედებს ატმოსფერული წნევა.

**ამოხსნა:** ვსარგებლობთ წერტილში სრული, ანუ აბსოლუტური ჰიდროსტატიკური წნევის გამოსათვლელი გამოსახულებით, იმ შემთხვევისათვის, როცა სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი წნევა ატმოსფერულის ტოლია:

$$P = P_{atm} + \gamma h = 1 \frac{kg}{m^2} + 1 \frac{kg}{m^2} = 2 \frac{kg}{m^2} = 200 \frac{kg}{m^2}$$

საიდანაც

$$h = \frac{P - P_{atm}}{\gamma} = \frac{2 \frac{kg}{m^2} - 1 \frac{kg}{m^2}}{0,001 \frac{kg}{m^3}} = 1000 \frac{m}{1} = 10 \text{ m}$$

#### 4.2. ღია ჭურჭლის ფსკერზე აბსოლუტური და ჭარბი ჰიდროსტატიკური წნევის განსაზღვრა.

**ამოცანა 2:** განვსაზღვროთ აბსოლუტური და ჭარბი ჰიდროსტატიკური წნევების სიდიდეები ღია ჭურჭლის ფსკერზე მდებარე წერტილში, თუ ამ ჭურჭელში წყლის დგომის სიღრმეა 200 სმ.

**ამოხსნა:** ჭურჭლის ფსკერზე აბსოლუტური ჰიდროსტატიკური წნევის გასაგებად ვსარგებლობთ დამოკიდებულებით:

$$P = P_{atm} + \gamma h = 1 \frac{kg}{m^2} + 0.001 \frac{kg}{m^3} 200 \frac{m}{1} = 1,2 \frac{kg}{m^2} = 120 \frac{kg}{m^2}$$



#### 4.4. დახშულ ჭურჭელში (პიეზომეტრულ მილში) წყლის აწევის სიმაღლის განსაზღვრა

**ამოცანა 4:** დახშულ ჭურჭელში, რომელშიც წყალია ჩასხმული წნევა თავისუფალ ზედაპირზე ტოლია  $P_0 = 1,25 \frac{\text{მმმ}}{\text{მმ}^2}$ , რა  $h_0$  სიმაღლეზე აიწევს წყალი ღია მილში, რომელიც მიერთებულია ჭურჭელთან, თუ ამ წერტილის ჩაღრმავება წყლის თავისუფალი ზედაპირიდან 3 მეტრია. მინის ღია მილში წყლის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედებს ატმოსფერული წნევა.

**ამოხსნა:** მოცემულ წერტილზე მარჯვენა და მარცხენა მხრიდან მოქმედი წნევების სიდიდეები ტოლი უნდა იყოს. თუ ამ წერტილის ჩაღრმავებას ავღნიშნავთ  $h_1$ -ით, მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ:

$$P_{\text{მმმ}} + \gamma h_0 = P_0 + \gamma h_1$$

საიდანაც:

$$h_0 = \frac{(P_0 - P_{\text{მმმ}}) + \gamma h_1}{\gamma}$$

$$= \frac{\left(1,25 \frac{\text{მმმ}}{\text{მმ}^2} - 1 \frac{\text{მმმ}}{\text{მმ}^2}\right) + 0,001 \frac{\text{მმმ}}{\text{მმ}^3} 300\text{მმ}}{0,001 \frac{\text{მმმ}}{\text{მმ}^3}} = 550\text{მმ} = 5,5\text{მ}$$

#### 4.5. ვაკუუმის სიმაღლის განსაზღვრა

**ამოცანა 5:** განვსაზღვროთ ვაკუუმის სიმაღლე  $h_{\text{მზმ}}$ , თუ აბსოლუტური ჰიდროსტატიკური წნევა  $m$  წერტილში, რომელშიც მიერთებულია ვაკუუმმეტრი, ტოლია  $0,3 \frac{\text{მზმ}}{\text{მზ}^2}$   
**ამოხსნა:** ვსარგებლობთ ვაკუუმის სიმაღლის საანგარიშო დამოკიდებულებით

$$h_{\text{მზმ}} = \frac{P_{\text{მზმ}} + P}{\gamma} = \frac{1,0 \frac{\text{მზმ}}{\text{მზ}^2} - 0,3 \frac{\text{მზმ}}{\text{მზ}^2}}{0,001 \frac{\text{მზმ}}{\text{მზ}^2}} = 700 \text{ მზ} = 7 \text{ მ}$$

#### 4.6. ჰიდროსტატიკურ წნეხში მკუმშავი ძალის განსაზღვრა

**ამოცანა 6:** განვსაზღვროთ მკუმშავი ძალა  $F_2$ , რომელიც წარმოიქმნება ჰიდრაულიკურ წნეხში (ნახ. 3.3.6.) თუ ბერკეტის დიდი მხარი  $a=1$  მ, ხოლო პატარა  $b=0,1$  მ, წნეხის დიდი დგუმის (ფართობით  $a_2$ ) დიამეტრი  $D=250$  მმ. პატარა დგუმის (ფართობით  $a_1$ ) დიამეტრი  $d=25$  მმ. პატარა დგუმზე მოქმედი ძალა  $F_1=20$  კგ.ძ, წნეხის მქკ  $\eta=0,85$ .

**ამოხსნა:** დიდი ფართობის მქონე დგუმზე მომქმედი წნევის ძალა იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$F_2 = \eta \frac{F_1 a}{b} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 = 0,85 \frac{20 \text{ მზ. მ} \cdot 1 \text{ მ}}{0,1 \text{ მ}} \left( \frac{0,25 \text{ მ}}{0,025 \text{ მ}} \right)^2 = 17000 \text{ მ. მ}$$

$$= 170 \text{ მზმმმმმმმმმმმმმ}$$

#### 4.7. რეზერვუარის ფსკერზე მანომეტრული წნევის განსაზღვრა.

**ამოცანა 7:** განვსაზღვროთ მანომეტრული წნევის ძალა რეზერვუარის ფსკერზე, რომლის ფართობია  $S=3 \text{ მ}^2$ , ხოლო წყლის სიღრმე  $h_{\text{სიღრმე}}=2 \text{ მ}$ . სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედებს ატმოსფერული წნევა.

**ამოხსნა:** მანომეტრულ წნევის ძალას ვპოულობთ შემდეგი ფორმულით:

$$P_{\text{მმმ}} = \gamma h_{\text{მმმმმმ}} \cdot S = 1 \frac{\text{მმ}}{\text{მ}^3} \cdot 2 \text{მ} \cdot 3 \text{მ}^2 = 6 \text{მმ}$$

$$= 60 \text{მმმმმმმმმმმმმმმმ}$$

#### 4.8. სითხის წნევის ზემოქმედების განსაზღვრა ვერტიკალურად განთავსებულ ბრტყელ ფარზე

**მოცანა 8:** განვსაზღვროთ წყლის მიერ განვითარებული წნევის ძალა ვერტიკალურ ბრტყელ ფარზე, რომლითაც გადაკეტილია სწორკუთხა განივკვეთიანი არხი, თუ არხის სიგანე  $b=1,8 \text{ მ}$  და წყლის სიღრმე  $h=2,2 \text{ მ}$ .

**ამოხსნა:** ფარის ერთეულ სიგანეზე წნევის ძალის საანგარიშოდ ვსარგებლობთ შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$P = \gamma \frac{h^2}{2} = 1000 \frac{\text{მმმ}}{\text{მ}^3} \left( \frac{2,2^2}{2} \right) \text{მ}^2 = 2420 \frac{\text{მმმ}}{\text{მ}}$$

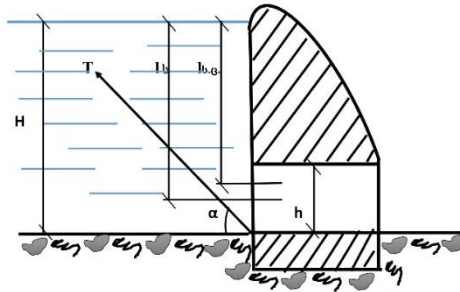
ვერტიკალური ბრტყელი ფარის მთელ სიგანეზე მოქმედი ჯამური წნევის ძალა იქნება:

$$P_1 = P_b = 2420 \frac{\text{მმმ}}{\text{მ}} \cdot 1,8 \text{მ} = 4356 \text{მმმ} = 43,56 \text{მმმმმმმმმმმმმმმმ}$$



#### 4.9. კაშხლის ფსკერზე სწორკუთხოვან ფარზე მოქმედი ძალის განსაზღვრა.

**ამოცანა 9:** კაშხლის ფსკერული ხვრეტი გადაკეტილია ბრტყელი სწორკუთხოვანი ფარით, რომელიც ზემო წიბოთი სახსრულადაა მიმაგრებული კაშხლის ტანთან. განვსაზღვროთ რა  $T$  ძალით უნდა ვიმოქმედოთ ბაგირზე ფარის გასახსნელად, თუ ფარის ქვედა წიბოს ჩაძირვის სიღრმე  $H=3$  მ; ფარის სიმაღლე  $h=1$  მ; ფარის სიგანე  $b=1,5$  მ; კუთხე ბაგირსა და ჰორიზონტს შორის  $\alpha=45^\circ$ .



ნახ. 4.9.1 კაშხლის ფსკერზე სწორკუთხოვან ფარზე მოქმედების სქემა

**ამოხსნა :** 1) განვსაზღვროთ წყლის წნევის ძალა, რომელიც ფარზე მოქმედებს

$$P = \gamma h_{\text{ს.ვ.}} \omega = \gamma \left( H - \frac{h}{2} \right) hb = 1 \frac{\text{ტმ}}{\text{მ}^3} \left( 3 \text{ მ} - \frac{1}{2} \text{ მ} \right) 1 \text{ მ} \cdot 1,5 \text{ მ} \\ = 3,75 \text{ ტმ}$$

2) გავიგოთ ძალის მოდების წერტილის მდებარეობა; ვისარგებლოთ შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\ell = \ell_{\text{ს.ვ.}} + \frac{J_0}{\ell \omega}$$

სადაც

$$\ell = H - \frac{h}{2} = 3 \text{ მ} - \frac{1}{2} \text{ მ} = 2,5 \text{ მ}$$

$$J_0 = \frac{bh^3}{12} = \frac{1,5 \text{ მ}(1^3)\text{მ}^3}{12} = 0,125 \text{ მ}^4$$

მაშინ

$$\ell = 2,5 \text{ მ} + \frac{0,125 \text{ მ}^4}{1,5 \text{ მ}^2 \cdot 2,5 \text{ მ}} = 2,53 \text{ მ.}$$

3. გავიგოთ ფარის გასახსნელად საჭირო T ძალა. დავწეროთ სახსრის მიმართ ფარზე მოქმედი ძალების მომენტების განტოლება

$$T \cdot h \cos \alpha - P[\ell_{\text{მ}} - (H - h)] = 0$$

საიდანაც

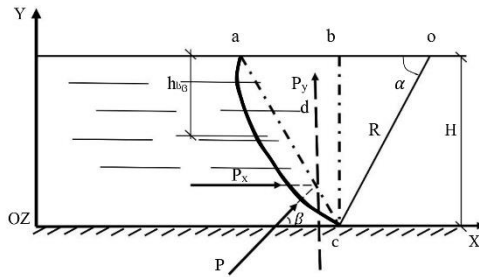
$$T = \frac{P[\ell - (H - h)]}{h \cos \alpha} = \frac{3,75 \text{ ტ.მ.} [2,53 \text{ მ} - (3 \text{ მ} - 1 \text{ მ})]}{1 \text{ მ} \cdot 0,71} \\ = 2,8 \text{ ტმ} = 28 \text{ კილონიუტონს}$$

---

<sup>5</sup> ს.ვ. – სიმძიმის ცენტრი

#### 4.10. კაშხლის საკეტზე მოქმედი წნევის ძალის სიდიდისა და მიმართულების განსაზღვრა

**ამოცანა 10:** კაშხლის სექტორულ საკეტს  $\alpha=60^\circ$  ცენტრალური კუთხით აქვს ბრუნვის  $O$  ღერძი, რომელიც მდებარეობს წყლის თავისუფალი ზედაპირის სიბრტყეში (ნახ. 4.10.1.). განვსაზღვროთ საკეტზე მოქმედი წნევის ძალის სიდიდე და მისი მიმართულება, თუ საკეტის რადიუსი  $R=2$  მ და სიგანე  $b=6$  მ.



ნახ. 4.10.1. კაშხლის საკეტზე წნევის ძალის ზემოქმედების სქემა

**ამოხსნა:** 1) გამოვიანგარიშოთ წნევის ძალის ჰორიზონტალური მდგენელი  $P_x$  შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$P_x = \gamma h_{\text{ს.გ.}} \omega_x$$

სადაც

$$h_{\text{ს.გ.}} = \frac{H}{2} = \frac{R \sin 60^\circ}{2} = \frac{2 \text{ მ} \cdot 0,87}{2} = 0,87 \text{ მ}$$

$$\omega_x - Hb = 1,74 \text{ მ} \cdot 6 \text{ მ} = 10,4 \text{ მ}^2$$

მაშინ

$$P_x = 1 \frac{\text{ტმ}}{\text{მ}^3} 0,87 \text{ მ} \cdot 10,1 \text{ მ}^2 = 9 \text{ ტ. მ.} = 90 \text{ კილონიუტონი}$$

2) განვსაზღვროთ ჰიდროსტატიკური წნევის ძალის ვერტიკალური მდგენელი. ვისარგებლოთ ფორმულით:

$$P_y = \gamma W = G$$

სადაც სხეულის მოცულობა  $W = S_{abcd}b$ .

Abcd ფიგურის ფართობი ტოლია  $\Delta abc$  ფართობს მიმატებული  $acd$  სეგმენტის ფართობი:

$$S_{abcd} = S_{\Delta abc} + S_{acd} = \frac{1}{2} abH + \frac{1}{2} R^2 \left( \frac{\pi \alpha}{180^\circ} - \sin \alpha \right)$$

$$= \frac{\frac{R}{2} R \sin 60^\circ}{2} + \frac{R^2}{2} \left( \frac{3,14 \cdot 60^\circ}{180^\circ} - \sin 60^\circ \right)$$

$$= \frac{1 \cdot 1,74}{2} + \frac{2^2}{2} \left( \frac{3,14 \cdot 60^\circ}{180^\circ} - 0,87 \right) 0,89 \text{ მ}^2$$

და

$$W = 0,89 \text{ მ}^2 \cdot 6 \text{ მ} = 5,34 \text{ მ}^3$$

მაშინ  $P_y = 1 \text{ ტმ/მ}^3 \cdot 5,34 \text{ მ}^3 = 5,34 \text{ ტმ} = 53,4 \text{ კილონიუტონს.}$  იგი მიმართულია ქვევიდან ზევით და მოდებულია წნევის ძალის სიმძიმის ცენტრში.

3). განსაზღვროთ წყლის ჯამური წნევის ძალა. ვისარგებლოთ შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} = \sqrt{9^2 + 5,34^2} = 10,3 \text{ ტ ძ}$$
$$= 103 \text{ კილონიუტონი}$$

ამ ძალის მიმართულება  $X$  ღერძთან შეადგენს კუთხეს, რომელიც გამოითვლებს გამოსახულებით

$$\cos \beta = \frac{P_x}{P} = \frac{9}{10,3} 0,87 \quad \text{ე.ი.} \quad \beta = 30^\circ$$

## **თავი 5. სითხეების ჰიდროდინამიკა**

### **5.1. მოძრაობის რეჟიმების განსაზღვრა (დაწნევიანი და უდაწნეო მოძრაობა)**

ნაკადის მიერ დაკავებული სივრცის ნებისმიერ წერტილში, სიჩქარისა და წნევის დროში ცვლილების მიხედვით, არჩევენ დამყარებულ (სტაციონალურ) და დაუმყარებელ (არასტაციონალურ) მოძრაობებს.

**დაუმყარებელი მოძრაობა** ეწოდება სითხის ისეთ მოძრაობას, როდესაც ნაკადით დაკავებული სივრცის ნებისმიერ წერტილში წნევა და სითხის ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარე როგორც სიდიდით, ასევე მიმართულებით, იცვლება დროში. ე.ი. ნაწილაკის სიჩქარე და წნევა წერტილის კოორდინატების გარდა დამოკიდებულია დროზე

$$v = f_1(X, Y, Z, t); \quad P = f_2(X, Y, Z, t) \quad (5.1.1)$$

სითხის გამოდინება რეზერვუარიდან, როდესაც რეზერვუარის სითხით შევსება არ ხდება არის დაუმყარებელი მოძრაობის ერთ-ერთი უმარტივესი მაგალითი.

**დამყარებული მოძრაობის** დროს სითხის ნებისმიერ მოცემულ წერტილში წნევა და ნაწილაკის სიჩქარე როგორც სიდიდით, ასევე მიმართულებით, დროში უცვლელი რჩება. ე.ი. აღნიშნული ჰიდროდინამიკური მახასიათებლები მხოლოდ წერტილის მდებარეობაზეა დამოკიდებული

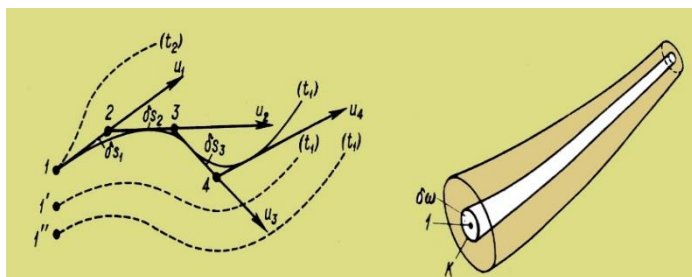
$$v = f_3(X, Y, Z); \quad P = f_4(X, Y, Z) \quad (5.1.2)$$

აღნიშნული სახის დამყარებული მოძრაობა ბუნებაში იშვიათად გვხვდება. თუ არის დამყარებული (სტაციონარული) დინება ყოველი მომდევნო ნაწილაკი, რომელიც გაივლის მოცემულ წერტილში, მიჰყვება ერთსა და იგივე ტრაექტორიას.

ცალკეული ნაწილაკის მოძრაობის კვალს სივრცეში **ნაწილაკის მოძრაობის ტრაექტორია** ეწოდება, ხოლო წერტილთა იმ ერთობლიობას, რომლის ყოველ წერტილში სიჩქარის ვექტორი მხებია **დენის წირი** ეწოდება.

თუ მოძრაობა დამყარებულია დენის წირი დროის ერთეულში უცვლელია და პირიქით

დაუმყარებელი მოძრაობისას დროის ერთეულში დენის წირი იცვლის ფორმას.



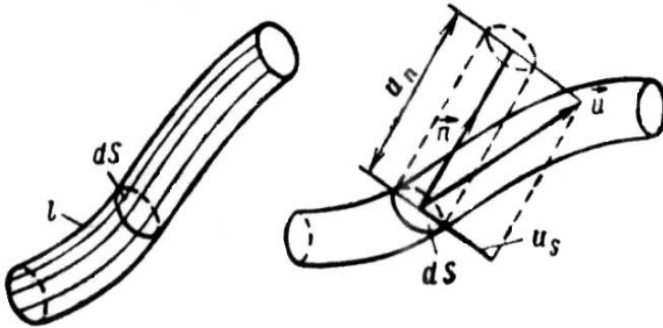
ნახ. 5.1.1. ა) დენის წირი; ბ) დენის ტრაექტორია;

გავარკვიოთ ურთიერთდამოკიდებულება დენის წირებისა და სითხის ნაწილაკის ტრაექტორიებს შორის. დამყარებული მოძრაობისას ნაწილაკის სიჩქარის დროზე დამოუკიდებლობის გამო, ტრაექტორია და დენის წირი ემთხვევიან. დაუმყარებელი მოძრაობისას ტრაექტორია და დენის წირი არ დაემთხვევიან.

ჰიდრავლიკაში ნაკადის მცნებაში იგულისხმება სითხის განსაზღვრული მასის მოძრაობა მიმართველი მყარი კედლის ფარგლებში (მილსადენი, არხი, მდინარის კალაპოტი) ან აიროვან გარემოში, შესაბამისი საკონტაქტო ზადაპირით სხვა გარემოსთან (შადრევანი, სახანძრო ან დასაწვიმი აპარატიდან გამოტყორცნილი სითხის ჭავლი).

შემოვიღოთ კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი ცნება. სითხეში გამოვყოთ შემოფარგლული კონტური და მის ყოველ წერტილში გავავლოთ დენის წირი.  $ds$  ზედაპირს,

რომელიც კვეთს ყველა მოცემულ დენის წირს მართობულად, ცოცხალ კვეთს უწოდებენ.



ნახ . 5.1.2. დენის წირების კვეთის სქემა

დენის წირებს, რომლებითაც შემოსაზღვრულია სითხის ნაწილაკთა ერთობლიობა, ელემენტარული ჭავლს უწოდებენ, ხოლო ელემენტარული ჭავლების ერთობლიობას განიხილავენ როგორც სითხის ნაკადს.

სითხის ნაკადი არის ელემენტარული ჭავლების უსასრულოდ დიდი რაოდენობის ერთობლიობა. ნაკადის განივკვეთს, რომელიც გატარებულია თითოეული დენის წირის მართობულად და ნაკადის შიგნით ძევს, ცოცხალი კვეთი ეწოდება, ხოლო ამ კვეთის ფართობს – ცოცხალი კვეთის ფართობი და აღინიშნება  $\omega$ -თი. დენის წირების პარალელურობის შემთხვევაში ცოცხალი კვეთი ბრტყელია. თუ დენის წირები ერთმანეთის პარალელური არ არიან, მაშინ ცოცხალი კვეთი ბრტყელი არ იქნება. სითხის მოცულობას, რომელიც დროის ერთეულში



ნაკადის ცოცხალ კვეთში გაედინება, სითხის ხარჯი (ნაკადის ხარჯი) ეწოდება და  $Q$ -თი აღინიშნება.

$$Q = \omega v \quad (5.1.3)$$

იგი ელემენტარული ჭავლების ხარჯების ჯამის ტოლია.

იმის გამო, რომ ცალკეული ელემენტარული ჭავლებისათვის ადგილობრივი სიჩქარეები, ზოგად შემთხვევაში, სხვადასხვაა, ამიტომ ნაკადის ცოცხალი კვეთის სხვადასხვა წერტილში სიჩქარე სხვადასხვა იქნება. ნაკადის ცოცხალ კვეთში ან მის გარკვეულ ვერტიკალზე ადგილობრივი სიჩქარის განაწილების კანონის გრაფიკულ გამოსახულებას სიჩქარეთა ეპიურა ეწოდება.

**სველი პერიმეტრი** ( $\chi = \chi_i$ ) ეწოდება კალაპოტის განივკვეთის იმ ნაწილის პერიმეტრს, რომელიც სითხის ნაკადით სველდება. **ჰიდრავლიკური რადიუსი** ( $R$ ) ეწოდება ცოცხალი კვეთის ფართობის ( $\omega$ ) ფარდობას სველ პერიმეტრთან:

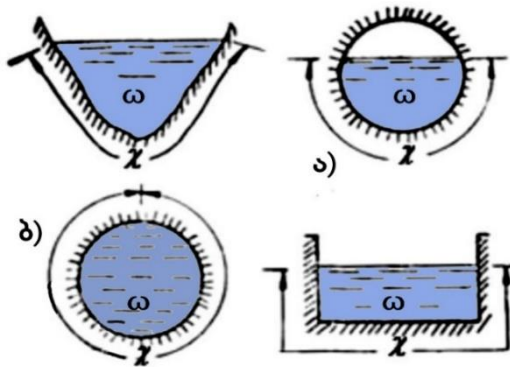
$$R = \frac{\omega}{\chi} \quad (5.1.4)$$

ჰიდრავლიკური რადიუსი მიახლოებით ახასიათებს ნაკადის ცოცხალი კვეთის ფორმას და მას რაიმე განსაკუთრებული ფიზიკური აზრი არ გააჩნია.

თუ ცოცხალი კვეთი ყოველი მხრიდან შემოსაზღვრულია კედლებით, მაშინ სველი პერიმეტრი ტოლია მიმმართველი კედლების გეომეტრიული პერიმეტრის. ამ შემთხვევაში ნაკადი მთლიანად ავსებს

განივკვეთს და ამ ტიპის მოძრაობას დაწნევიანი მოძრაობა ეწოდება.

თუ ნაკადი ასველებს მიმართველი (შემომსაზღვრელი) კედლების პერიმეტრის ნაწილს და მას აქვს ზედაპირი, რომლითაც იგი კონტაქტში იმყოფება ატმოსფეროსთან (თავისუფალი ზედაპირი). მაშინ მოძრაობას უდაწნეოს უწოდებენ.



ნახ. 5.1.3 ნაკადის სველი პერიმეტრის ფართი ა) უდაწნეო და ბ) დაწნევიანი მოძრაობების დროს

## 5.2. გრიგალური და არაგრიგალური მოძრაობა

გრიგალური ეწოდება ისეთ მოძრაობას, რომლის დროსაც სითხის ნაწილაკები ბრუნავს თავიანთი მყისი ღერძების გარშემო რაიმე  $\omega$  კუთხური სიჩქარით; ე.ი. გრიგალური მოძრაობისას  $\omega \neq 0$ , იმის გასარკვევად, არის თუ არა მოძრაობა გრიგალური, საჭიროა განტოლებებით გამოვთვალოთ გრიგალის კომპონენტები ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) და

თუ ერთი მათგანიც კი ნულისაგან განსხვავებული აღმოჩნდება, მაშინ მოძრაობა იქნება გრიგალური.

სითხის ნაწილაკების ბრუნვის კუთხური სიჩქარე წარმოადგენს მდგენელების გეომეტრიულ ჯამს. ე. ი.

$$\omega = \sqrt[3]{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \quad (5.2.1)$$

ა სიდიდეს გრიგალი ეწოდება. დენის წირის მსგავსად, რომელიც წრფივ სიჩქარეთა ველს ახასიათებს, გრიგალური წირი (გრიგალწირი) ახასიათებს კუთხურ სიჩქარეთა ველს. გრიგალური ეწოდება ისეთ წირს, რომლის ყოველ წერტილში, დროის მოცემულ მომენტში სითხის ნაწილაკის კუთხური სიჩქარის ა ვექტორს ამ წერტილში გავლებული მხების მიმართულება აქვს (ნახ. 5.2.1.ა). გრიგალური წირის დიფერენციალური განტოლება დენის წირის განტოლების ანალოგიურია

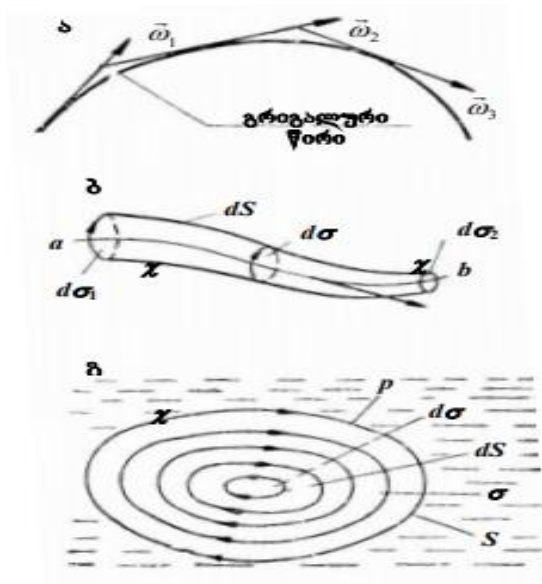
$$\frac{d_x}{\omega_x(x,y,z,t)} = \frac{d_y}{\omega_y(x,y,z,t)} = \frac{d_z}{\omega_z(x,y,z,t)} \quad (5.2.2)$$

მცირე  $d\sigma$  ფართობის შემომსაზღვრელი ჩაკეტილი კონტურის წერტილებზე გამავალი გრიგალური წირების სისტემით შექმნილ მილისებრ ზედაპირს ეწოდება **ელემენტარული გრიგალური მილაკი**, ხოლო მის შიგნით მოთავსებული სითხის ნაწილაკთა ერთობლიობას, რომელიც „საერთო ღერძის“ (გრიგალური  $ab$  წირის) ირგვლივ ბრუნავს, **ელემენტარული გრიგალური ზონარი** ეწოდება (5.2.1. ბ).

თუ გრიგალური მოძრაობის არეში ავიღებთ სასრული სიდიდის კონტურს და მისი ყველა

წერტილიდან კონტურის შემოსაზღვრული ფართობის მართობულად გავატარებთ გრიგალურ წირებს, მაშინ მივიღებთ მილისებრ ზედაპირს, რომელსაც **სასრული სიდიდის გრიგალური მილი** ეწოდება. მის მიერ შემოსაზღვრული შიგა არე წარმოადგენს **სასრული ზომის გრიგალურ ზონარს** (ნახ. 5.2.1.გ.)

**პოტენციური (არაგრიგალური)** ეწოდება ისეთ მოძრაობას, რომლის დროსაც ნაწილაკის ბრუნვის კუთხური სიჩქარე  $\omega=0$ -ს, ეს მოითხოვს გრიგალის სამივე კომპონენტის ცალ-ცალკე ნულთან ტოლობას -  $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$ .



ნახ. 5.2.1. გრიგალური და არაგრიგალური მოძრაობის სახეები

ზედაპირს, რომლის ყოველი წერტილისათვის სიჩქარის პოტენციალის მნიშვნელობა მუდმივია, თანაბარი პოტენციალის ზედაპირი ანუ ეკვიპოტენციური ზედაპირი ეწოდება.

### 5.3. იდეალური და რეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება (ეილერის და ეილერ-გრომიკოს განტოლება) გრიგალური მოძრაობისას

ჰიდროდინამიკის ერთ-ერთ ძირითად ამოცანას წარმოადგენს მოძრაობის ძირითად მახასიათებლებს შორის თანაფარდობის დადგენა. როგორც წესი, სითხეზე მოქმედი გარე ძალები წინასწარ ცნობილია; საძიებელია ჰიდრომექანიკური წნევა (ჰიდროსტატიკურ და ჰიდროდინამიკურ წნევებს ზოგადად ჰიდრომექანიკურ წნევას უწოდებენ)  $P$  და სითხის ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარე  $v$  ( $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ), რომლებიც, ზოგად შემთხვევაში, კოორდინატებისა და დროის უწყვეტი ფუნქციებია. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად საჭიროა ისეთი განტოლებები, რომლებიც კავშირს დაამყარებს სითხის ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარეს, აჩქარებასა და მასზე მოქმედ ძალებს შორის. ასეთ განტოლებებს ჰიდრაულიკაში წარმოადგენს იდეალური სითხის მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლებები

$$\begin{cases} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dv_x}{dt} \\ F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{dv_y}{dt} \\ F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{dv_z}{dt} \end{cases} \quad (5.3.1)$$

ეს არის იდეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები (ეილერის განტოლებები), რომლებიც ამყარებს კავშირს მოცემული ძალებისა და სიჩქარეების გეგმილებს შორის, ჰიდროდინამიკურ წნევასა და სითხის სიმკვრივეს შორის.

ეილერის განტოლებები მართებულია სითხის როგორც არაგრივალური (პოტენციური), ისე გრივალური მოძრაობისათვის. მაგრამ ეს განტოლებები გარეგნული ფორმით ვერ ასახავს მათი გამოყენების შესაძლებლობას გრივალური მოძრაობის შემთხვევისათვის. ამიტომ მიზანშეწონილია მათი ისე გარდაქმნა, რომ განტოლებებში გამოჩნდეს სითხის ნაწილაკების ბრუნვითი მოძრაობის კუთხური სიჩქარის კომპონენტები.

ეილერის განტოლებათა სისტემა მართებულია იდეალური სითხეებისათვის. რეალური სითხის შემთხვევაში, თუ სითხეზე მომქმედი მოცულობითი ძალების მნიშვნელობები იგივეა. იდეალური სითხის შემთხვევაში (ეს არ ითქმის ზედაპირულ ძალებზე, რადგანაც ნაკადში წნევის ძალებთან ერთად იმოქმედებს ხახუნის ძალები ძალებიც), ჰიდროდინამიკური წნევის დახასიათების მიზნით, შემოღებულია საშუალო ჰიდროდინამიკური წნევის ცნება, რომელიც ტოლია

$$P = \frac{1}{3}(P_x + P_y + P_z) \quad (5.3.2)$$

თუ ხახუნის ძალების დასახასიათებლად ვისარგებლებთ ნიუტონის ჰიპოთეზით ( $\tau = \pm \mu \frac{dv}{dn}$ ), მაშინ რეალური სითხისათვის მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა იქნება შემდეგი სახის:

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) = \frac{dv_x}{dt} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) = \frac{dv_y}{dt} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) = \frac{dv_z}{dt} \end{cases} \quad (5.3.3)$$

#### 5.4. ბერნულის განტოლება იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის დამყარებული მოძრაობისას

ბერნულის განტოლება წარმოადგენს იდეალური სითხის მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლების ინტეგრალს და ამყარებს ურთიერთკავშირს სიჩქარესა და ჰიდროდინამიკურ დაწნევას შორის დამყარებული მოძრაობის დროს.

განვიხილოთ სითხის ნაწილაკის მოძრაობა ჭავლის გასწვრივ. როგორც ვიცით, ეილერის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას იდეალური სითხისათვის აქვს შემდეგი სახე

$$\begin{cases} F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dv_x}{dt} \\ F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{dv_y}{dt} \\ F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{dv_z}{dt} \end{cases} \quad (5.4.1)$$

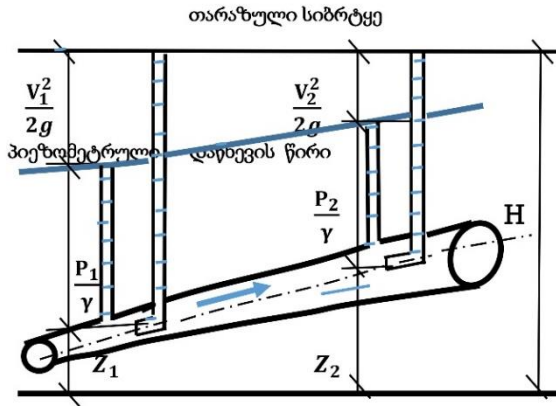
ამ სისტემის ცალკეულ განტოლებათა გამრავლებით სათანადოდ  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ -ზე, შეკრებით და მცირედი გარდაქმნებით საბოლოოდ მივიღებთ:

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{const} \quad (5.4.2)$$

ეს დამოკიდებულება **ბერნულის განტოლების** სახელწოდებით არის ცნობილი. იგი ითვლება ჰიდრაულიკის ერთ-ერთ ძირითად განტოლებად.

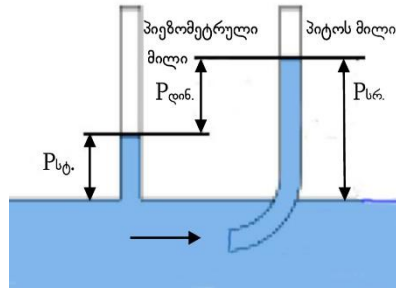
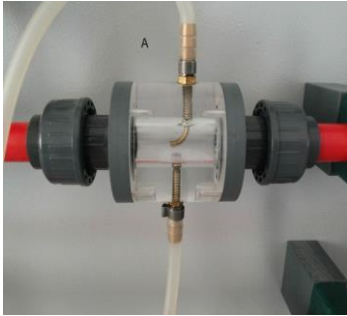
ბერნულის განტოლებიდან ირკვევა, რომ უკუმშვადი იდეალური სითხის დამყარებული მოძრაობის დროს ელემენტარული ჭავლის გასწვრივ (ამ ჭავლზე მდებარე სითხის ყველა ნაწილაკისათვის) ზემოთ მოყვანილი სამი წევრის ჯამი ინარჩუნებს მუდმივ მნიშვნელობას.





ნახ. 5.4.1. სითხის მოძრაობა დაუმყარებელი რეჟიმის დროს

ბერნულის განტოლებაში შემავალი  $Z$  სიდიდე არის საფარდი ზიბრტყიდან დაშორება.  $\frac{P}{\gamma}$  არის პიეზომეტრული სიმაღლე (პიეზომეტრული დაწნევა). რაც გამოხატავს იმ სიმაღლეს, რომელზედაც აიწევს სითხის დონე პიეზომეტრულ მილში, თუ მას განსახილველ წერტილში მოვათავსებთ.  $\frac{V^2}{2g}$  არის სიჩქარით დაწნევა, რომელიც იზომება პიტოს მილის გამოყენებით. პიტოს მილი წარმოადგენს დინების სიჩქარის საზომს, ის არის მოხრილი მილი, რომელიც მიმართულია დინების საწინააღმდეგოდ.



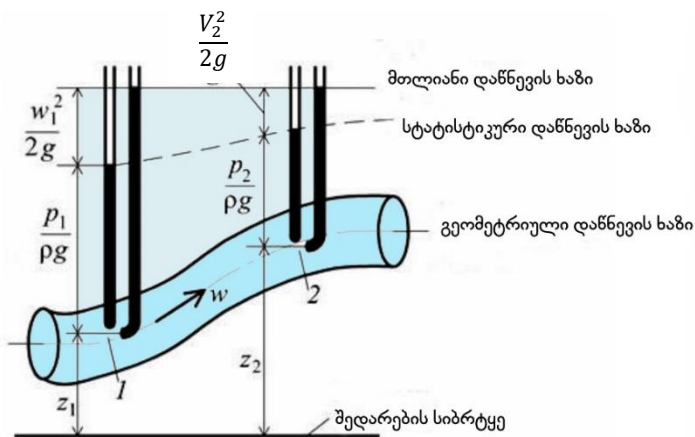
ნახ. 5.4.2. პიტოს მილის მუშაობის სქემა

როგორც ნახაზიდან ჩანს, პიტოს მილში  $P_{სრული}$  სითხის დონე  $P_{დინ}$  -ით მაღლა დგას ვიდრე პიეზომეტრულ მილში  $P_{სტატიკ}$ . პიტოს მილის საშუალებით შეგვიძლია განვსაზღვროთ წერტილში სითხის სიჩქარე  $v = \sqrt{2gh_{\text{მზ}}$  (სადაც  $h_{\text{მზ}} = \frac{v^2}{2g}$ ).

მიღებული ფორმულა ცდომილებას იძლევა. ამიტომ პრაქტიკული გაანგარიშებისას სარგებლობენ დამოკიდებულებით:

$$v = \varphi \sqrt{2gh_{\text{მზ}}} \quad (5.4.3)$$

სადაც  $\varphi$  არის შემასწორებელი კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება ტარირების მეშვეობით.



ნახ. 5.4.3. ბერნულის განტოლების გრაფიკული ინტერპრეტაცია

დამყარებული მოძრაობის დროს წვეთოვანი იდეალური სითხის ჭავლის გასწვრივ სრული ჰიდროდინამიკური დაწნევა, რომელიც შედგება გეომეტრიული, პიეზომეტრული და სიჩქარით დაწნევების ჯამისაგან, ინარჩუნებს მუდმივ მნიშვნელობას

$$H = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (5.4.4)$$

ბერნულის განტოლება ენერგეტიკული თვალსაზრისით არსებითად გამოხატავს ენერჯის მუდმივობის კანონს სითხეებისათვის. ამ განტოლების თითოეული წევრი ენერგეტიკული გაგებით შეიძლება შემდეგნაირად დახასიათდეს:  $Z$  გამოხატავს ერთეული წონის მქონე სითხის (ხვედრითი) მდებარეობის ენერჯიას

პირობით აღებული თარაზული საფარდი სიბრტყის მიმართ.  $\frac{P}{\gamma}$  გამოხატავს ჰიდროსტატიკური დაწნევის კუთრ ენერგიას ერთეული წონის მქონე სითხისათვის.  $Z + \frac{P}{\gamma}$  ჯამი წარმოადგენს ერთეული წონის მქონე სითხის პოტენციური (ხვედრითი) ენერგიის მარაგს.  $\frac{V^2}{2g}$  გამოხატავს ერთეული წონის მქონე სითხის კინეტიკურ ენერგიას.

ენერგეტიკული თვალსაზრისით ბერნულის განტოლების განმარტება შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგნაირად: სითხის დამყარებული რეჟიმით მოძრაობის დროს იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლის სრული კუთრი ენერგია შემდგარი მდებარეობის და წნევის პოტენციური და კინეტიკური ხვედრითი ენერგიების ჯამისაგან ინარჩუნებს მუდმივ მნიშვნელობას.

თუ ჭავლის გასწვრივ იდეალური სითხის დამყარებული რეჟიმით მოძრაობის დროს ადგილი აქვს ენერგიის რომელიმე შემადგენელი ნაწილის ცვლილებას, მაშინ მას უნდა მოჰყვეს დანარჩენი სიდიდეების ისეთი ოდენობით ცვლილება, რომ ენერგიის ჯამი დარჩეს უცვლელი. ე.ი. მოძრაობის დროს ადგილი ექნება ენერგიის გადასვლას პოტენციურიდან კინეტიკურში და პირიქით.

ბერნულის განტოლების ყველა წევრს სიგრძის განზომილება აქვს.  $Z$  სიდიდე წარმოადგენს ელემენტარული ჭავლის კვეთის სიმძიმის ცენტრის მდებარეობის გეომეტრიულ სიმაღლეს საფარდი სიბრტყის მიმართ და მას გეომეტრიულ სიმაღლეს ანუ

გეომეტრიულ დაწნევას უწოდებენ. მეორე წევრი  $\frac{P}{\gamma}$  არის სიმაღლე, რომელიც იზომება პიეზომეტრით და შეესაბამება P ჰიდროდინამიკურ წნევას კვეთის სიმძიმის ცენტრში; მას პიეზომეტრულ სიმაღლეს ან პიეზომეტრულ დაწნევას უწოდებენ. მესამე წევრსაც  $\frac{V^2}{2g}$  ასევე სიგრძის განზომილება აქვს და წარმოადგენს ე.წ. სიჩქარით სიმაღლეს ან სიჩქარით დაწნევას.

ბერნულის განტოლებიდან გამომდინარეობს მოძრავი სითხის ფრიად მნიშვნელოვანი თვისება: სიჩქარის გაზრდით წნევა მცირდება, ხოლო სიჩქარის შემცირებით წნევა იზრდება.

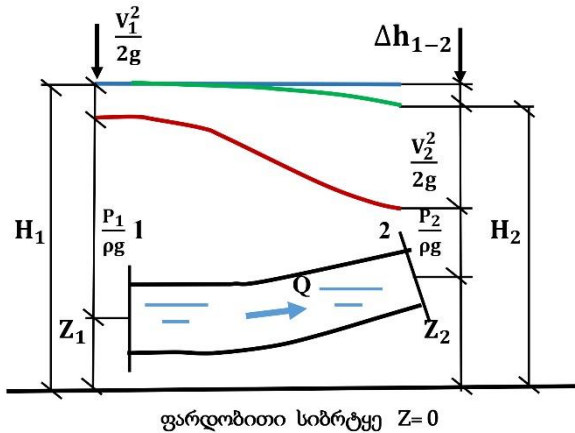
### **5.5. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის დამყარებული მოძრაობის დროს**

რეალური სითხის შემთხვევაში სიბლანტის გამო სითხის შიგნით ჩაისახება წინააღმდეგობის ძალები, რომელთა გადალახვისთვის მან უნდა დახარჯოს სრული ენერგიის განსაზღვრული ნაწილი, რის გამოც ჭავლის გასწვრივ კუთრი ენერგია დაიწყებს შემცირებას, ე. ი. ჭავლის წინა კვეთის სრული კუთრი ენერგია უნდა ჭარბობდეს შემდეგ კვეთში სრულ კუთრ ენერგიას. თუ ორ განსახილველ კვეთს შორის ყველა სახის წინააღმდეგობათა გადალახვაზე დახარჯულ კუთრ ენერგიას პირობითად ავლნიშნავთ  $h_{დან-ით}$ -ით, მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{\text{შეკ}} \quad (5.5.1)$$

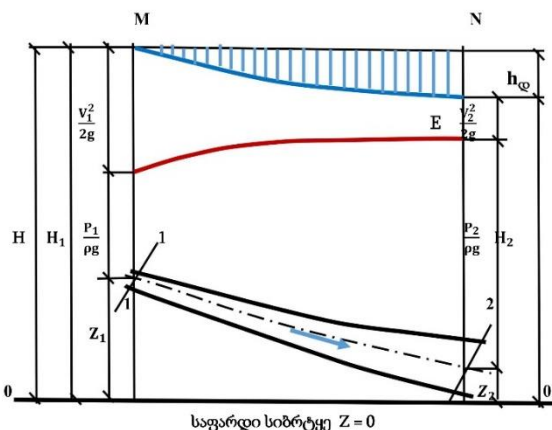
მიღებული განტოლება არის **ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ჭავლისათვის**

თუ შევადარებთ მოცემულ გრაფიკს იდეალური სითხის ჭავლისათვის ბერნულის განტოლების ანალოგიურ ინერპერტაციას ადვილი შესამჩნევია, რომ ჰიდროდინამიკური დაწნევის წირი არაა თარაზული. მას ახასიათებს ვარდნა მოძრაობის მიმართულებით.



ნახ. 5.5.1. ბერნულის განტოლების გეომეტრიული ინტერპრეტაცია რეალური სითხის ჭავლისათვის

მონაკვეთები რომლებიც მოთავსებულია ჰიდროდინამიკური დაწნების წირსა და თარაზულ სიბრტყეს შორის, შეესაბამება დაკარგული კუთრი ენერჯის სიდიდეებს.



ნახ. 5.5.2. ბერნულის განტოლების გეომეტრიული ინტერპრეტაცია რეალური სითხის ჭავლისათვის

სითხის ნაკადი კალაპოტში შეიძლება მოძრაობდეს როგორც თანაბარი, ასევე არათანაბარი მოძრაობის რეჟიმებით.

სითხის თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში ნაკადის სიჩქარე, ხარჯი, ცოცხალი კვეთის ფართობი როგორც სიდიდით, ასევე ნაკვეთის ფორმით, მოძრაობის მიმართულებით დროში არ იცვლება.

სითხის არათანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში ნაკადის სიჩქარე, ცოცხალი კვეთის ფართობი და სხვა მახასიათებლები, მოძრაობის მიმართულებით ცვალებადია.

ნაკადის კუთრი ენერჯიის მისაღებად საჭიროა გამოვიყენოთ დამოკიდებულება:

$$H_{\text{კუთრი ენერჯია}} = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (5.5.2)$$

ეს ტოლობა არის ბერნულის განტოლება განზოგადებული მთელს ნაკადზე.

ორი ცოცხალი კვეთისთვის ბერნულის განტოლება რეალური სითხის მოძრაობის შემთხვევაში იღებს შემდეგ სახეს:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{შ}} \quad (5.5.3)$$

ამ დამოკიდებულებაში  $Z$  გამოხატავს განსახილველი ცოცხალი კვეთის სიმძიმის ცენტრის დამორებას პირობითად აღებულ საფარდი სიბრტყიდან;  $\frac{P}{\gamma}$  - პიეზომეტრული დაწნევა განსახილველი ცოცხალი კვეთის სიმძიმის ცენტრში;  $\alpha$  გამოხატავს ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გასული სითხის ნამდვილი სიჩქარეებით გამოთვლილი კინეტიკური ენერჯიის შეფარდებას საშუალო სიჩქარით გამოთვლილ კინეტიკურ ენერჯიასთან. მას კინეტიკური



ენერგიის კორიოლისის კოეფიციენტს უწოდებენ;<sup>6</sup>  $\frac{\alpha v^2}{2g}$  საშუალო სიჩქარით დაწნევას უწოდებენ;  $h_{\text{წნევა}}$  დაწნევის დანაკარგების ჯამია ან ბერნულის განტოლების დამატებით წვევრადაც მოიხსენიება.

დაწნევის დანაკარგი, ანუ კუთრი ენერგიის ნაწილი, რომელიც იხარჯება სხვადასხვა სახის წინააღმდეგობათა გადალავაზე, შეიძლება იყოს ორი სახის: სიგრძივი, ანუ ხახუნზე დანაკარგები და ადგილობრივი ხასიათის დანაკარგები.

სიგრძივი, ანუ ხახუნის დანაკარგები სითხის თანაბარი მოძრაობის დროს განაწილებულია სადინარის მთელს სიგრძეზე თანაბრად. არათანაბარი მოძრაობის დროს - არათანაბრად. ამ სახის დანაკარგი გამოწვეულია სითხის შიგნით შრეებისა და სითხის კალაპოტის კედლებთან ხახუნის შედეგად. ამის გამო ის კალაპოტის სიგრძის პროპორციულია.

თუ დაწნევის დანაკარგები გამოწვეულია კალაპოტის ცალკეულ უბნებზე ნაკადის საშუალო სიჩქარის სიდიდის ტალღისებრი ან მისი მიმართულების ცვლით, რაც იწვევს ნაკადის მკვეთრ დეფორმაციას, **ადგილობრივი ხასიათის დანაკარგებს უწოდებენ**. ორივე სახის დანაკარგის დროს სითხის მექანიკური ენერგია გადადის სითხურ ენერგიაში და იგი სამუდამოდ აუნაზღაურებლად დაკარგულია ნაკადისათვის.

---

<sup>6</sup> თანაბარი მოძრაობის დროს  $\alpha \approx 1,1 \div 1,15$

## თავი 6. სითხის მოძრაობის რეჟიმები და ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობათა სახეები

კუთრი მექანიკური ენერჯის (დაწნევის) დანაკარგი ანუ, როგორც მას ხშირად უწოდებენ, ჰიდრავლიკური დანაკარგი დამოკიდებულია კალაპოტის ფორმაზე, გეომეტრიულ ზომებზე, დინების სიჩქარეზე, სითხის სიბლანტესა და სხვა მრავალ ფაქტორზე. დაწნევის კარგის მიზეზია სხვადასხვა სახის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა, რომელთა მექანიზმი იმდენად რთულია, რომ ბევრ შემთხვევაში შეუძლებელი ხდება დაწნევის დანაკარგის გამოსათვლელი თეორიული დამოკიდებულების მიღება. ამიტომ, დაწნევის დანაკარგის სიდიდის განსაზღვრისას ხშირად სარგებლობენ ემპირიული და ნახევრად ემპირიული ფორმულებით. გამოთქმა – ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის გულისხმობს სიბლანტით განპირობებულ ხახუნის ძალებს, რომლებიც თავს იჩენს მხოლოდ რეალური სითხის მოძრაობის დროს. რაც მეტია ხახუნის ძალები, მით მეტია დაწნევის დანაკარგები (h-დან). ბუნებრივია ვგულისხმობთ, რომ ხახუნის ძალებსა და დაწნევის დანაკარგებს შორის არსებობს გარკვეული დამოკიდებულება.

ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა ხასიათდება სიბლანტის ან ინერციული ძალებით. მათგან პირველი დამოკიდებულია მოძრავი სითხის ნაწილაკებს შორის არსებულ შიგა ხახუნზე, ხოლო მეორე – სითხის თვისებაზე

წინააღმდეგობა გაუწიოს თავისი მოძრაობის ცვლილებას. ჩვეულებრივ მოქმედებს ორივე მიზეზი, მხოლოდ ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში შეიძლება სჭარბობდეს ერთ-ერთი.

როგორც ვიცით, განასხვავებენ ჰიდრავლიკური წინაღობის ორ სახეს: სიგრძეზე წინაღობას და ადგილობრივ წინაღობას. სიგრძეზე წინაღობა მჟღავნდება თანაბრად ან დაახლოებით თანაბრად ნაკადის მთელ სიგრძეზე, ადგილობრივი წინაღობა კი – მოკლე უბანზე, ნაკადის კონფიგურაციის მკვეთრი ცვლილების ადგილებში. შესაბამისად, დაწნევის დანაკარგსაც ყოფენ დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგად და დაწნევის ადგილობრივ დანაკარგად. ზოგად შემთხვევაში, ნაკადში ადგილი აქვს დაწნევის ორივე სახის დანაკარგს და მთლიანი დანაკარგის გამოსათვლელად ისინი უნდა შევკრიბოთ:

$$h_{\text{შეკრიბ}} = \sum h_{\text{სიგრძე}} + \sum h_{\text{ადგილობრივი}} ;$$

სადაც  $\sum h_{\text{სიგრძე}}$  არის დაწნევის სიგრძეზე სრული დანაკარგი ნაკადის განსახილველი უბნისათვის;  $\sum h_{\text{ადგილობრივი}}$  - ყველა ადგილობრივი დანაკარგის ჯამი.

დასასრულ, თუ საკითხს ენერგეტიკული თვალსაზრისით მივუდგებით, შეიძლება ითქვას, რომ კუთრი მექანიკური ენერგიის ნაწილი ( $h$ -დან), წინაღობის ძალების მოქმედების შედეგად, გადადის თბურ ენერგიაში, სითხე თბება, ხოლო სითბო გარემოში გაიფანტება, ე.ი. ნაკადის კუთრი ენერგიის ეს ნაწილი უკანდაუბრუნებლად იკარგება.

განვიხილოთ სითხის ნაკადის დამყარებული თანაბარი მოძრაობა – დაწნეითი (მოძრაობა მილსადენებში) ან უდაწნეო (ღია კალაპოტებში). ასეთ შემთხვევაში ყველა განივკვეთში საშუალო სიჩქარე ერთნაირია, ადგილობრივი წინაღობები არ არსებობს და, მაშასადამე, არ არსებობს არც დაწნევის ადგილობრივი კარგვები; გვაქვს მხოლოდ სიგრძეზე წინაღობით გამოწვეული დაწნევის დანაკარგი.

### **6.1. სითხის მოძრაობის რეჟიმები (ლამინარული და ტურბულენტური მოძრაობა), რეინოლდსის რიცხვის დადგენა**

მრავალრიცხოვანმა ექსპერიმენტმა ცხადყო, რომ არსებობს სითხის მოძრაობის ორი რეჟიმი: ლამინარული და ტურბულენტური. რეინოლდსმა გამოაქვეყნა თავისი კვლევის შედეგები, რომლებშიც განზომილების ანალიზისა და ცდის მონაცემების განზოგადების საფუძველზე დაასაბუთა ბუნებაში სითხის მოძრაობის აღნიშნული რეჟიმების არსებობა.

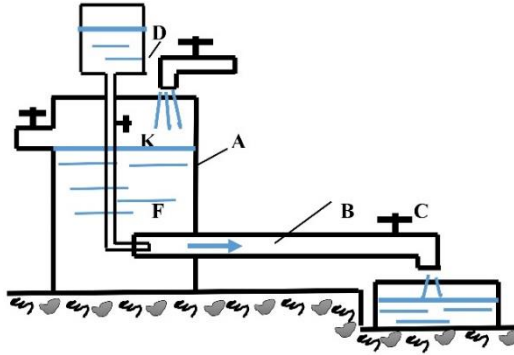
ექსპერიმენტული კვლევა ო. რეინოლდსმა ჩაატარა სპეციალურ დანადგარზე, რომლის სქემა მოცემულია 6.1.1. ნახაზზე. დანადგარი შედგება გამოსაცდელი (მუშა) სითხით შევსებული A ავზისაგან, რომელთანაც მიერთებულია ჰორიზონტალური d დიამეტრის B მინის მილი. ეს უკანასკნელი, ხარჯის (სიჩქარის) რეგულირების მიზნით, აღჭურვილია C

ონკანით. ავზის ზემოთ მოთავსებულია D ჭურჭელი შეფერილი სითხით (საღებავით), რომლის კუთრი წონა დაახლოებით მუშა სითხის კუთრი წონის ტოლია. შეფერილი სითხე მცირე დიამეტრის E მილაკით მიეწოდება B მინის მილში. A ავზში სითხის მუდმივი დონე შენარჩუნებულია F სარინის<sup>7</sup> შემწეობით. თუ C ონკანს მცირედ გავაღებთ (B მილში სითხე მცირე სიჩქარით დაიწყებს მოძრაობას), ხოლო შემდეგ K ონკანით შევუშვებთ საღებავს მუშა სითხის ნაკადში, შევნიშნავთ, რომ საღებავი მოძრაობას დაიწყებს მილსადენის კედლების პარალელური, მკაფიოდ გამოკვეთილი წვრილი ჭავლის სახით: საღებავის ნაწილაკები არ შეერევა მუშა სითხის დანარჩენ მასას და გვექნება სითხის მოძრაობა ცალკეული წვრილი ჭავლების სახით, რაც მიუთითებს სითხის დინების შრეებრივ ხასიათზე. B მილთან მიერთებული პიეზომეტრი ან პიტოს მილაკი გვიჩვენებს, რომ არ ხდება წნევისა და სიჩქარის ცვლილება (პულსაცია) დროის მიხედვით.

თუ B მილში მუშა სითხის სიჩქარეს თანდათანობით გავზრდით C ონკანის შემდგომი გაღებით, ზემოთ აღწერილი სურათი დასაწყისში არ შეიცვლება. მაგრამ შემდეგ, სითხის დინების სიჩქარის გარკვეული მნიშვნელობისას, საღებავის ჭავლი იწყებს პულსირებას,

---

<sup>7</sup> სარინი - მოხრილი, მუხლიანი მილი



ნახ.6.1.1. რეინოლდსის რიცხვის განმსაზღვრელი  
 ლაბორატორიული დანადგარი

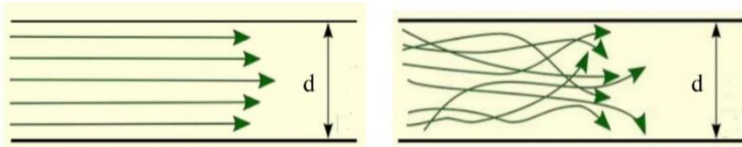
ღებულობს ტალღისებრ ფორმას, ხდება მისი რღვევა – საღებავის ნაწილაკები მთლიანად შეერევა მუშა სითხეს. საერთო გადატანით მოძრაობასთან ერთად სითხის ნაწილაკები გადაადგილდება მილის განივი მიმართულებითაც;

სითხის მოძრაობის შრეებრივი სტრუქტურა ირღვევა, იწყება გრიგალთწარმოქმნა. მოძრაობა ღებულობს მოუწესრიგებელ, ქაოსურ ხასიათს. პიეზომეტრი და პიტოს მილაკი გვიჩვენებს მუშა სითხის ნაკადში წნევისა და სიჩქარის უწყვეტ პულსაციას.

ცდის შებრუნებული თანამიმდევრობით ჩატარებისას, ე.ი. ონკანის თანდათანობითი ჩაკეტვისას, აღწერილი მოვლენები განმეორდება შებრუნებული

თანამიმდევრობით, მხოლოდ სიჩქარეთა რამდენადმე განსხვავებული მნიშვნელობებისათვის.

მოძრაობას, რომლის დროსაც სითხის ნაწილაკები გადაადგილდება ნაკადის ღერძის პარალელურად სიჩქარისა და წნევის პულსაციის გარეშე, ლამინარული (შრეებრივი) მოძრაობა ეწოდება. ლამინარული მოძრაობა შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც სითხის ცალკეული შრეების მოძრაობა, რომელშიც ნაწილაკების განივი შერევა არ ხდება.



ა)

ბ)

ნახ.6.1.2.სითხის მოძრაობის რეჟიმები

ა) ლამინარული  
მოძრაობის რეჟიმი

ბ) ტურბულენტური  
მოძრაობის რეჟიმი

მოძრაობას, რომლის დროსაც ხდება სითხის ნაწილაკების ინტენსიური შერევა, წნევისა და სიჩქარის პულსაცია, ტურბულენტური (მოუწესრიგებელი) მოძრაობა ეწოდება. ტურბულენტური მოძრაობისას სითხის ნაწილაკები გადაადგილდება გაურკვეველი სივრცითი ფორმის მრუდწირული ტრაექტორიით. ამასთან, სივრცის უძრავ წერტილში გამავალი ნაწილაკების ტრაექტორიებს დროის სხვადასხვა მომენტში სხვადასხვა ფორმა აქვს.

რეინოლდსმა, რომელმაც განაზოგადა კვლევის შედეგები, დაადგინა ამა თუ იმ რეჟიმის არსებობისა და ერთი რეჟიმიდან მეორეზე გადასვლის პირობები. აღმოჩნდა, რომ რეჟიმის ხასიათის განმსაზღვრელი ძირითადი ფაქტორებია: სითხის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე ( $V$ ), მილსადენის დიამეტრი ( $d$ ), სითხის სიბლანტე ( $\mu$ ) და სითხის სიმკვრივე ( $\rho$ ). ამ ოთხი სიდიდისაგან შედგენილი უგანზომილებო პარამეტრი ( $Re$ ), რომელსაც რეინოლდსის რიცხვს (რეინოლდსის კრიტერიუმს) უწოდებენ, ახასიათებს სწორედ სითხის მოძრაობის რეჟიმს:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

სადაც  $\nu$  - არის სიბლანდის კინემატიკური კოეფიციენტი.

სიჩქარეს, რომლის დროსაც მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი გადადის ტურბულენტურში ეწოდება ზედა კრიტიკული სიჩქარე ( $v_{\text{კ.კ}}$ ). ხოლო სიჩქარეს, რომლის დროსაც ტურბულენტური რეჟიმი გადადის ლამინარულში – ქვედა კრიტიკული სიჩქარე ( $v_{\text{ქ.კ}}$ ).

რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობას, რომელიც  $v=v_{\text{კ.კ}}$  სიჩქარეს შეესაბამება, რეინოლდსის რიცხვის ქვედა კრიტიკულ მნიშვნელობას ( $Re_{\text{ქ.კ}}$ ) უწოდებენ, ხოლო  $v=v_{\text{ქ.კ}}$  სიჩქარის შემთხვევაში – რეინოლდსის რიცხვის ზედა კრიტიკულ მნიშვნელობას ( $Re_{\text{კ.კ}}$ ).

რეინოლდსის რიცხვის რიცხვითი მნიშვნელობა ყველა სითხისათვის 2320-ის ტოლია, ე.ი.  $Re_{\text{კრ}} = Re_{\text{ქკრ}} = 2320$ . როცა  $Re < 2320$ , მოძრაობის რეჟიმს თვლიან



ყოველთვის ლამინარულად, ხოლო როცა  $Re > 2320$  - ყოველთვის ტურბულენტურად.

ხშირად რეინოლდსის რიცხვს ჰიდრაულიკური რადიუსით გამოსახავენ:

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (6.1.1)$$

## 6.2. თანაბარი მოძრაობის განტოლება

ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ნაკადისათვის დამყარებული მოძრაობის დროს შეიცავს  $h_{სრ}$  დამატებით წევრს. იგი გამოხატავს დაწნევის დანაკარგს მთელ სიგრძეზე, რაც დაიხარჯება წინააღმდეგობის გადალახვაზე პირველი კვეთიდან სითხის მეორე კვეთამდე გადაადგილებისას. წინააღმდეგობა შეიძლება იყოს ორი სახის: ხახუნის (ანუ სიგრძივი) და ადგილობრივი ხასიათის ( $h_{სრ} = h_{ხახ} + h_{ადგ}$ ).

როდესაც სითხის მოძრაობისას ადგილი აქვს მხოლოდ ხახუნზე (სიგრძივი) დაწნევის დანაკარგს, მაშინ იგი ნაკადის უსასრულო მცირე სიგრძის უბანზე ჰიდროდინამიკური დაწნევის დიფერენციალის ტოლია.

სრული ჰიდროდინამიკური დაწნევის დიფერენციალის ფარდობას შესაბამის ელემენტარულ სიგრძესთან ჰიდრაულიკური ქანობი  $J$  ეწოდება და იანგარიშება ფორმულით:

$$J = -\frac{d}{dl} \left( z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} \right) = -\frac{dH}{dl} \quad (6.2.1)$$

განვიხილოთ სითხის თანაბარი მოძრაობა ღია კალაპოტში ნებისმიერ  $l$  სიგრძის უბანზე. გამოყოფილ მოცულობაზე იმოქმედებს სიმძიმის ძალა  $G=\gamma l$ , ერთმანეთის საწინააღმდეგოდ მიმართული წნევის ძალები  $P_1$  და  $P_2$ , ხახუნის ძალა  $T = \tau \chi l$  (სადაც  $\chi$  - სველი პერიმეტრია). მომქმედი ძალების დაგეგმარებით და მცირედი გამარტივება-გარდაქმნით საბოლოოდ მივიღებთ

$$P_{\text{წნევა}} = \frac{\tau l}{\gamma R} \quad (6.2.2)$$

სადაც  $R$  არის ჰიდრავლიკური რადიუსი.

მიღებული განტოლება **თანაბარი მოძრაობის მთავარი განტოლებაა**. იგი გამოსახავს დაწნევის დანაკარგს ნაკადის სიგრძეზე და მართებულია როგორც დაწნევიანი ისე უდაწნევო მოძრაობის შემთხვევაშიც.

თანაბარი მოძრაობის დროს ძალა, რომელიც იწვევს სითხის გადაადგილებას, მთლიანად უნდა იხარჯებოდეს იმ ხახუნის წინააღმდეგობათა დაძლევაზე, რომელსაც ადგილი აქვს მოძრაობის გასწვრივ.

### 6.3. სითხის ლამინარული მოძრაობა წრიულ მილსადენებში

ლამინარული მოძრაობის დროს ცოცხალ კვეთში სითხის ჭავლები ერთმანეთის გასწვრივ მოძრაობს. თუ სითხე წრიულ მილსადენში გადაადგილდება, მაშინ შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ, რომ, სითხე მასში მოძრაობს

უსასრულოდ მცირე ცილინდრული შრეების სახით, რომლებიც ერთმანეთის მიმართ სხვადასხვა სიჩქარით გადაადგილდება. სითხის შრე რომელიც მეტი სისწრაფით გადაადგილდება ცდილობს წარიტაცოს ის შრე რომელიც მის მეზობლად ნაკლები სიჩქარით მოძრაობს და პირიქით, დაბალი სიჩქარით მოძრავი შრე ცდილობს დაამუხრუჭოს მის მეზობლად მაღალი სიჩქარით მოძრავი შრე. ამრიგად, ცილინდრული შრეები ურთიერთმიმართ სრიალებს, რის გამოც ამ საკონტაქტო ზედაპირზე წარმოიშობა მხები ძაბვები ( $\tau$ ), რომელიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\tau = \tau_0 \frac{r_0 - y}{r_0} = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{r_0}\right) \quad (6.3.1)$$

სადაც  $y$  არის მანძილი მილსადენის კედლიდან გამოყოფილი ცილინდრის ზედაპირამდე, ხოლო  $r_0$ - მილსადენის რადიუსი.

ე.ი. მხები ძაბვა მილსადენის განივკვეთში იცვლება წრფივი კანონით. მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტის საფუძველზე დადგინდა, რომ  $\frac{\tau_0}{\gamma}$  სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია  $\left(\frac{1}{e}\right)^2$ . გარდაქმნების შედეგად საბოლოოდ სითხის მოძრაობის ძირითადი განტოლება სხვა ფორმით **შეზის ფორმულის** სახით მოიცემა შემდეგნაირად:

$$V = c\sqrt{RI} \quad (6.3.2)$$

სადაც  $I$  არის ჰიდრავლიკური ქანობი, ხოლო  $c =$  კოეფიციენტს შეზის კოეფიციენტს უწოდებენ. რომელსაც ხშირად ასეთი ფორმით გამოსახავენ:

$$c = \sqrt{8g/\lambda} \quad (6.3.3)$$

სადაც  $\lambda$  არის უგანზომილებო სიდიდე, რომელსაც ჰიდრავლიკურ ხახუნს უწოდებენ. ის გამოითვლება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (6.3.4)$$

მიღებული დამოკიდებულებების გამარტივებით მივიღებთ დაწნევის დანაკარგის ფორმულას ლამინარული მოძრაობისას

$$h_{\text{სიგრ}} = \lambda \frac{1}{d} \frac{V^2}{2d} \quad (6.3.5)$$

ეს დამოკიდებულება დარს-ვაისბახის ფორმულით არის ცნობილი.

#### **6.4. სითხის ტურბულენტური მოძრაობა, სიჩქარის პულსაცია**

ტურბულენტური მოძრაობის მექანიზმი გაცილებით რთულია, ვიდრე ლამინარულის. ტურბულენტური რეჟიმისას სითხის ნაწილაკები ნაკადის ღერძის მიმართულებით გადატანით მოძრაობასთან ერთად გადაადგილდება აგრეთვე განივი მიმართულებითაც და ამიტომ ტურბულენტური ნაკადი ხასიათდება სითხის ნაწილაკების განუწყვეტელი, ინტენსიური და მოუწესრიგებელი შერევის პროცესით. აღნიშნულის გამო, ნაკადის ნებისმიერ წერტილში სითხის ნაწილაკების სიჩქარის ვექტორის სიდიდე და მიმართულება მცისიერად იცვლება. მაშასადამე, შეიძლება

ითქვას, რომ ტურბულენტური მოძრაობა თავისი არსით დაუმყარებელი მოძრაობაა. ტურბულენტური ნაკადის აღებულ წერტილში სიჩქარის სიდიდისა და მიმართულების მყისიერ ცვლილებას სიჩქარის ჰულსაცია ეწოდება. სიჩქარეს ტურბულენტური ნაკადის მოცემულ წერტილში დროის მოცემულ მომენტში ადგილობრივი მყისი სიჩქარე (ან ნამდვილი მყისი სიჩქარე) ეწოდება. ადგილობრივი სიჩქარე  $V$  ასოთი აღინიშნება.

ყოველივე აღნიშნული ნათელს ხდის, თუ რატომ არის თითქმის შეუძლებელი ტურბულენტური ნაკადის ცალკეულ ნაწილაკთა ინდივიდუალური მოძრაობის შესწავლა. მაგრამ ეს არ ნიშნავს, რომ, სირთულის გამო, საკითხის შესწავლაზე ხელი ავიდოთ. ჰიდრავლიკის მრავალი პრაქტიკული საკითხის გადასაწყვეტად ხშირად არსებითი მნიშვნელობა აქვს სითხის ნაწილაკის არა მყისი მახასიათებლებს, არამედ ამ მახასიათებლების საშუალო სტატისტიკურ მნიშვნელობებს. ასე, მაგალითად, ადგილობრივი მყისი სიჩქარის ნაცვლად ჰიდრავლიკა განიხილავს დროის მიხედვით გასაშუალებულ სიჩქარეს ( $\bar{V}$ ) ნაკადის მოცემულ წერტილში. ამასთან, ფრიად მნიშვნელოვანია ის ფაქტი, რომ  $V$  ადგილობრივი მყისი სიჩქარე, მიუხედავად მისი მოჩვენებითი მოუწესრიგებელი ცვლილებისა, ირხევა სწორედ მოცემულ წერტილში დროის მიხედვით მუდმივი საშუალო მნიშვნელობის – ადგილობრივი გასაშუალებული სიჩქარის ( $\bar{V}$ ) ირგვლივ. შევნიშნავთ, რომ გასაშუალებული სიჩქარის ჰემმარიტი მნიშვნელობის საპოვნელად

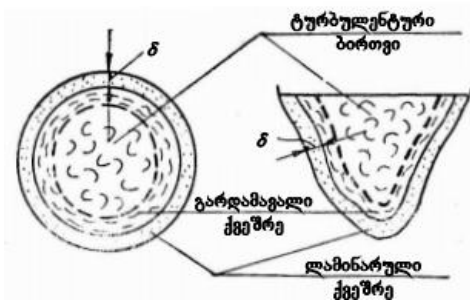
ადგილობრივი მყისი სიჩქარეების გაზომვისა და გასაშუალებლის დრო (ინტერვალი) უნდა იყოს საკმარისი ხანგრძლივობის.

ადგილობრივი მყისი და ადგილობრივი გასაშუალებული სიჩქარეების გრძივი შემდგენების სხვაობას გრძივი პულსაციური სიჩქარე ეწოდება.

## **თავი 7. კალაპოტების სახეობები**

### **7.1. გლუვი და ხორკლიანი კალაპოტები**

მრავალრიცხოვანმა გამოკვლევებმა გვიჩვენა, რომ ტურბულენტური ნაკადის ცოცხალ კვეთში სითხის ნაწილაკების ურთიერთშერევის ინტენსიურობა სხვადასხვაა. კალაპოტის (მილსადენის) კედელთან შერევის პროცესი წყდება, რადგანაც მყარი ზედაპირი შეუძლებელს ხდის ნაწილაკების განივ გადაადგილებას. ამიტომ, ტურბულენტურ ნაკადში კედლის უშუალო მახლობლობაში წარმოიქმნება ძალზე მცირე სისქის კედლისპირა ბლანტი ქვეშრე, რომელსაც ლამინარულ აფსკს (ქვეშრეს) უწოდებენ



ნახ.7.1.1 ტურბულენტურ ნაკადში უდაწნეო და დაწნევიანი მოძრაობის დროს ნაკადში წარმოქმნილი შრეები

ლამინარულ ქვეშრეს ესაზღვრება გარდამავალი ქვეშრე, რომელიც ლამინარულ ქვეშრესთან ერთად შეადგენს ე.წ. სასაზღვრო შრეს. ნაკადის დანარჩენ ნაწილს ტურბულენტური ბირთვი ეწოდება. მიღებულია, რომ ლამინარულ ქვეშრეში მისი მცირე სისქის გამო სიჩქარეები განაწილებულია წრფივი კანონით ნულიდან (კალაპოტის კედელთან) რაღაც სასრულ მნიშვნელობამდე (ლამინარული და გარდამავალი ქვეშრეების შეხების ზედაპირზე).

თვლიან, რომ ლამინარულ ქვეშრეში მოძრაობა ახლოს არის ლამინარულთან, სიჩქარის გრადიენტის მნიშვნელობა დიდია და მიახლოებით შეიძლება მუდმივ სიდიდედ ჩაითვალოს. სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტის ( $\mu$ ) მნიშვნელობა გაცილებით მეტია ვირტუალური სიბლანტის კოეფიციენტის ( $\epsilon$ )

მნიშვნელობაზე. გარდამავალ ქვეშრეში შეიმჩნევა მოძრაობის ორივე რეჟიმი – დროდადრო ლამინარული, დროდადრო ტურბულენტური. ამ ქვეშრისთვის  $\mu$  და  $\varepsilon$  კოეფიციენტების მნიშვნელობები ერთი რიგისაა. ტურბულენტურ ბირთვში სიჩქარის გრადიენტის მნიშვნელობები დიდი არ არის,  $\varepsilon$  კოეფიციენტის მნიშვნელობა გაცილებით მეტია  $\mu$  კოეფიციენტის მნიშვნელობაზე, ხოლო სიჩქარის განაწილების ხასიათი შეესაბამება ტურბულენტურ რეჟიმს, სადაც, სიჩქარეები იცვლება ლოგარითმული კანონით.

ტურბულენტური ნაკადის ცალკეული ზონის სისქე შეიძლება დადგენილ იქნეს შემდეგი თანაფარდობებიდან: ბლანტი (ლამინარული) ქვეშრისათვის. ლამინარული ქვეშრის სისქე ( $\delta$ ) წრიული კვეთის მილსადენისათვის გამოითვლება ფორმულით:

$$\delta \approx \frac{30d}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \quad (7.1.1)$$

მოცემული გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ ლამინარული ქვეშრის სისქე რეინოლდსის რიცხვის უკუპროპორციულია, ე.ი. ნაკადის მოძრაობის სიჩქარის და, მაშასადამე, რეინოლდსის რიცხვის გაზრდით ლამინარული ქვეშრის სისქე მცირდება.

როგორც აღვნიშნეთ, ლამინარული აფსკის სისქე ძალზე მცირეა და კალაპოტში ნაკადის სიღრმის ან მილსადენის დიამეტრის მეასედ და მეათასედ ნაწილს შეადგენს, მაგრამ ის არსებით გავლენას ახდენს



ჰიდრავლიკურ წინაღობათა და დაწნევის დანაკარგების ხასიათსა და სიდიდეზე.

ნაკადის შემომსაზღვრელი სადინარის კედლების შიგა ზედაპირი ხასიათდება ამა თუ იმ სახის და სიდიდის ხორკლიანობით, რომელიც დამოკიდებულია კედლის მასალაზე, მისი დამუშავების ხარისხსა და სადინარის ექსპლუატაციის პირობებზე.

ხორკლიანობის ძირითადი მახასიათებელია აბსოლუტური ხორკლიანობა ( $\Delta$ ), რომელიც ხორკლების (შვერილების) საშუალო სიმაღლეს წარმოადგენს. ასეთი იდეალიზებულ ხორკლიანობას თანაბარმარცვლოვანი ეწოდება.

აბსოლუტური ხორკლიანობისა ( $\Delta$ ) და ლამინარული ქვეშრის სისქის ( $\delta$ ) სიდიდეთა შორის თანაფარდობის მიხედვით შეიძლება განვასხვაოთ ტურბულენტური ნაკადის მოძრაობის სამი შემთხვევა:

1.  $\delta > \Delta$  ამ დროს ხორკლები მთლიანად დაფარულია ბლანტი ქვეშრით (ლამინარული აფსკით) და ტურბულენტური ბირთვი მისრიალებს ლამინარული აფსკის ზედაპირის გასწვრივ ისე, რომ ტურბულენტური ბირთვი სადინარის (კალაპოტის) კედელთან უშუალოდ შეხებაში არ არის და კედლის ხორკლიანობა გავლენას ვერ მოახდენს ნაკადის დაწნევის დანაკარგების სიდიდესა და ხასიათზე; სიგრძეზე წინაღობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე. ასეთ შემთხვევაში სადინარის კედელს ჰიდრავლიკურად გლუვს უწოდებენ.

2.  $\delta < \Delta$  ამ დროს ხორკლები მთლიანად ან ნაწილობრივ გამოდის ლამინარული ქვეშრის ზონიდან და ექცევა ტურბულენტური ბირთვის ზონაში. შედეგად მკვეთრად იზრდება როგორც ხახუნის ტურბულენტურ ბირთვისა და კალაპოტის კედლებს შორის, ისე ტურბულენტური განივი შერევისა და ცალკეული ხორკლების ზედაპირიდან გრიგალური წარმონაქმნების მოწყვეტის ინტენსიურობა. ყოველივე ამის გამო, კედლის ხორკლიანობა გავლენას ახდენს ნაკადის დაწნევის დანაკარგების სიდიდესა და ხასიათზე; სიგრძეზე წინაღობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ ხორკლიანობაზე. ასეთ შემთხვევაში კალაპოტის კედელს ჰიდრაულიკურად ხორკლიანს უწოდებენ.

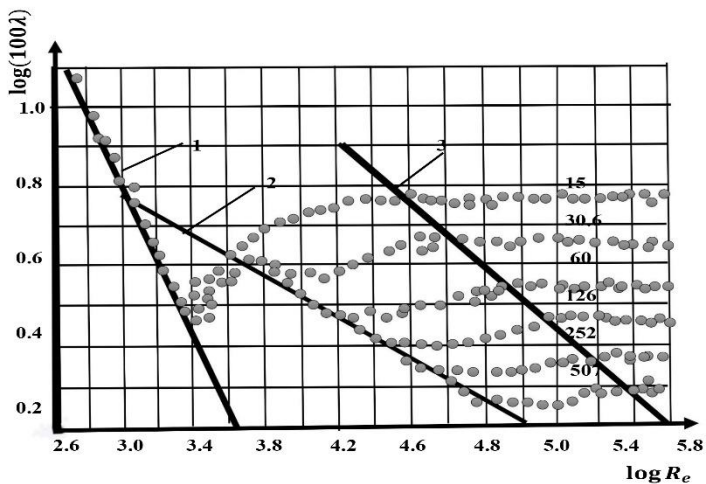
3. ლამინარული ქვეშრის სისქე და აბსოლუტური ხორკლიანობა ერთი რიგისაა. ამ შემთხვევაში სიგრძეზე წინაღობის კოეფიციენტის მნიშვნელობაზე გავლენას ახდენს როგორც რეინოლდსის რიცხვი, ისე კალაპოტის ხორკლიანობა.

მოძრაობის როგორც ლამინარული, ისე ტურბულენტური რეჟიმისათვის დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის ძირითად გამოსათვლელ ფორმულას წრიული კვეთის სადაწნეო ცილინდრული მილსადენისათვის წარმოადგენს დარსი-ვერსბახის ფორმულა ( $h_{\text{ფრ}} = \lambda \frac{\ell v^2}{d 2g}$ ), ხოლო ღია კალაპოტებისათვის – შეზის ფორმულა

$$V = c\sqrt{R\ell} \quad (7.1.2)$$

წინააღმდეგობის  $\lambda$  კოეფიციენტების (დარსის კოეფიციენტის) ცვლილების კანონზომიერების დასადგენად დიდი თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს ი. ნიკურამის მიერ ჩატარებულ კვლევებს, რომლის შედეგებიც გრაფიკის სახითაა მოცემული. გრაფიკის ანალიზიდან ჩანს, რომ სადაწნეო მილსადენში სითხის მოძრაობისას შეიძლება გამოვყოთ შემდეგი ზონები

- პირველი ზონა, რომელსაც 1-1 წრფე შეესაბამება, მიეკუთვნება სითხის მოძრაობის ლამინარულ რეჟიმს ( $Re < 2320$  ანუ  $lg Re < 3.36$ ). ამ ზონაში, კედლების ხორკლიანობის სხვადასხვაობის მიუხედავად, ყველა ექსპერიმენტული წერტილი წრფეზე დალაგდა. მაშასადამე, აქ  $\lambda$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე და არ არის დამოკიდებული კედლის ხორკლიანობაზე  $\lambda = f(Re)$ . დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი სითხის დინების საშუალო სიჩქარის პირველი ხარისხის პროპორციულია.



ნახ.7.1.2. ნიკურაძის გრაფიკი  $\lambda = f(Re_d)$  სხვადასხვა  $\Delta$  პირობებისათვის. 1.ლამინარული რეჟიმის არე;  
2. ტურბულენტური რეჟიმის არე;

➤ მეორე ზონა მოთავსებულია 1-1 და 2-2 წრფეებს შორის და შეესაბამება ნაკადის მოძრაობის ლამინარული რეჟიმიდან ტურბულენტურში გადასვლას ( $3,36 < \lg Re < 3,5$ ). ამ ზონაშიც  $\lambda$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე  $\lambda = f(Re)$ . რეჟიმების შეცვლის პროცესი ვითარდება ნაკადის ბირთვში და მილსადენის ხორკლიანობა გავლენას ვერ ახდენს წინააღობის კანონზე; მილის ხორკლები დაფარულია ლამინარული აფსკით ( $\delta > \Delta$ ).

- მესამე ზონა, რომელსაც 2-2 წრფე შეესაბამება, მიეკუთვნება სითხის მოძრაობის ტურბულენტურ რეჟიმს; ეს არის ჰიდრავლიკურად გლუვკედლიანი მილსადენების ზონა. აქაც მილის ხორკლები დაფარულია ლამინარული აფსკით ( $(\delta > \Delta)$ ).  $\lambda$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე და არ არის დამოკიდებული ფარდობით ხორკლიანობაზე; დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი სითხის დინების საშუალო სიჩქარის 1,75 ხარისხის პროპორციულია.
- მეოთხე ზონა მოთავსებულია 2-2 და 3-3 წრფეებს შორის და მას გარდამავალი წინაღობის ზონას უწოდებენ. ამ ზონაში ხორკლების სიმაღლე ( $\Delta$ ) და ლამინარული აფსკის სისქე ( $\delta$ ) ერთი რიგისაა; მილსადენის ხორკლიანობა გარკვეულ გავლენას ახდენს დაწნევის დანაკარგის და, მაშასადამე,  $\lambda$  კოეფიციენტის სიდიდეზე. წინაღობის გარდამავალ ზონაში  $\lambda$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია როგორც რეინოლდსის რიცხვზე, ისე ფარდობით ხორკლიანობაზე. დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი სითხის დინების 1,75-დან 2-მდე საშუალო სიჩქარის ხარისხის პროპორციულია.

განვიხილოთ  $\lambda$  კოეფიციენტის საანგარიშო ფორმულები და მათი გამოყენების საზღვრები მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმისათვის:

წინააღმდეგობის გლუვი მილსადენების ზონა ი. იდეალური მონაცემებით განისაზღვრება რეინოლდსის რიცხვის ცვალებადობის შემდეგი შუალედით:

$$2320 \leq Re \leq 46 \frac{r_0}{\Delta} \quad (7.1.3)$$

თუ რეინოლდსის რიცხვი  $Re < 10^5$ , მაშინ  $\lambda$  კოეფიციენტის მნიშვნელობათა გამოსათვლელად სარგებლობენ ბლაზიურის ცნობილი ფორმულით:

$$\lambda = 0.3164/Re^{0.25} \quad (7.1.4)$$

3. წინააღმდეგობის გარდამავალი ზონა განისაზღვრება რეინოლდსის რიცხვის ცვალებადობის შუალედში:

$$46 \frac{r_0}{\Delta} < Re \leq 1120 \frac{r_0}{\Delta} \quad (7.1.5)$$

ამ ზონისათვის  $\lambda$  კოეფიციენტის მნიშვნელობათა გამოსათვლელად შეიძლება ვისარგებლოთ ნ. ფრენკელის ფორმულით:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[ 0.14 \frac{\Delta}{r_0} + \left( \frac{6.81}{Re} \right)^{0.9} \right] \quad (7.1.6)$$

4. კვადრატული წინააღმდეგობის ზონა განისაზღვრება რეინოლდსის რიცხვის ცვალებადობის შუალედი T

$$Re > 1120 \frac{r_0}{\Delta} \quad (7.1.7)$$

ამ ზონისათვის  $\lambda$  კოეფიციენტის გამოსათვლელად სარგებლობენ ი. ნიკურაძის ცნობილი ფორმულით:

$$\lambda = \frac{1}{\left(21g \frac{r_0}{\Delta} + 1.74\right)^2} \quad (7.1.8)$$

როგორც გამოსახულებიდან ჩანს, წინაღობის კვადრატულ ზონაში  $\lambda$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ მილსადენის ფარდობით ხორკლიანობაზე . რეინოლდსის რიცხვი ამ ფორმულაში არ შედის, რის გამო დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი ამ ზონაში სითხის დინების საშუალო სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია.

## 7.2 ადგილობრივი ხასიათის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობანი

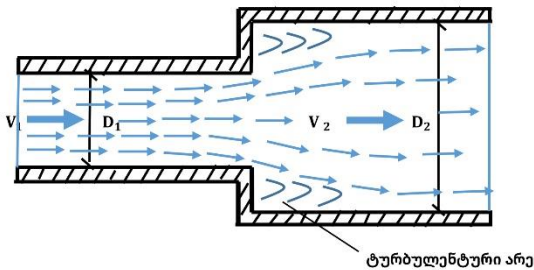
დაწნევის დანაკარგებს, გამოწვეულს კალაპოტის ცალკეულ უბნებზე ნაკადის საშუალო სიჩქარის სიდიდის ტალღისებრი ან მისი მიმართულების შეცვლით, რაც თავის მხრივ იწვევს ნაკადის მკვეთრ დეფორმაციას, ადგილობრივი ხასიათის დანაკარგებს უწოდებენ. როგორც ვიცით დაწნევის დანაკარგი, ტურბულენტური რეჟიმით მოძრაობის დროს, სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია

$$h = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (7.2.1)$$

სადაც  $\xi$  არის დაწნევის დანაკარგის კოეფიციენტი და დამოკიდებულია წინააღმდეგობის სახეზე.

განვიხილოთ ზოგიერთი ტიპური ადგილობრივი დაწნევის დანაკარგის კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობები.

დავუშვათ, სითხე მოძრაობს მცირედია-მეტრიანი მილიდან დიდდიამეტრიანი მილისკენ. როგორც ცდები გვიჩვენებს კალაპოტის უეცარი გაფართოების დროს სითხის ნაკადი ვერ ასწრებს სწრაფად გაფართოებას, ამის გამო, დიდდიამეტრიანი მილის განსაზღვრულ ნაწილზე ნაკადის გარშემო ჩნდება უმოქმედო არე, ანუ, ე.წ. მკვდარი ზონა, რომელიც არ მონაწილეობს ნაკადის გადატანით მოძრაობაში. (ნახ. 7.2.1.) აღნიშნულ არეში ნაკადი ასრულებს მხოლოდ ბრუნვით მოძრაობას, რითაც იწვევს დამატებით წინააღმდეგობას. ნაკადის გაფართოების დროს საშუალო სიჩქარის შემცირება უაღრესად ინტენსიურია. კინეტიკური ენერგიების სხვაობის ნაწილი გადადის პოტენციურ ენერგიაში, ხოლო ნაწილი იკარგება სითბურ ენერგიაში გადასვლის გამო.



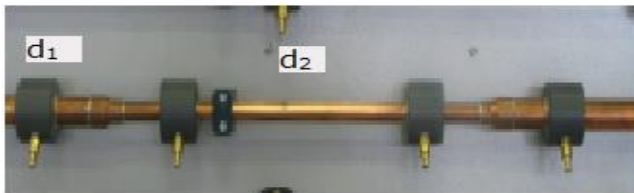


ნახ. 7.2.1 სითხის მოძრაობა უეცარი გაფართოების დროს

მყარი ტანების ურთიერთშეჯახებისას და ნაკადის უეცარი გაფართოების დროს დაკარგულ ენერჯიათა შორის ანალოგია გაატარა ბორდამ.

განვიხილოთ სითხის დაწნევიანი მოძრაობა მცირე განივკვეთის მქონე მილსადენიდან დიდი განივკვეთის მქონე მილსადენისაკენ (ნახ 7.2.2.)

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{შ.შ.}} \quad (7.2.2)$$



ნახ 7.2.2. მილის უეცარი შევიწროება და უეცარი გაფართოება

თუ დავუშვებთ რომ  $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$  ;  $z_1 = z_2 = 0$  და ჩავატარებთ მცირედ გარდაქმნებს, საბოლოოდ მივიღებთ

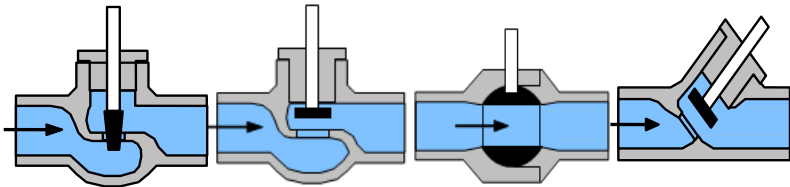
$$h_{\text{შ.შ.}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (7.2.3)$$

რადგან  $v_1 - v_2$  ორ კვეთს შორის სიჩქარეთა სხვაობა „დაკარგულ სიჩქარეს“ გამოხატავს, ამიტომ მიღებული გამოსახულების არსი შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგნაირად: დაწნევის დანაკარგი კალაპოტის უეცარი გაფართოებისას „დაკარგული სიჩქარის“ სიჩქარითი დაწნევის ტოლია.

დაწნევის დანაკარგის კოეფიციენტი კალაპოტის უეცარი გაფართოებისას იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\xi_{\text{შ.შ.}} = \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 \quad (7.2.4)$$

ადგილობრივი დანაკარგის კიდევ ერთ მაგალითად შეიძლება განვიხილოთ ურდულის შემთხვევა. ურდულში დაწნევის დანაკარგის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ურდულის სახესა და მისი გახსნის ხარისხზე (ნახ. 7.2.3).



ნახ. 7.2.3. სხვადასხვა სახის ურდულის ჩამკეტები.

დაწნევის დანაკარგის კოეფიციენტი ურდულის შემთხვევაშიც იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\xi = h_{\text{შ.შ.}} \frac{2g}{v^2} \quad (7.2.5)$$

სადაც  $\frac{v^2}{2g}$  არის სიჩქარის დაწნევა.

ჰიდრავლიკაში ფართოდ გამოიყენება ყველა მიმდევრობით ჩართული წინაღობებით გამოწვეული დაწნევის დანაკარგის შეჯამების პრინციპი. ბერნულის განტოლების დამატებითი წევრი ამ დროს უნდა შედგებოდეს სიგრძივი (ანუ ხახუნის) და ყველა

ადგილობრივი ხასიათის დაწნევის დანაკარგების ჯამისგან:

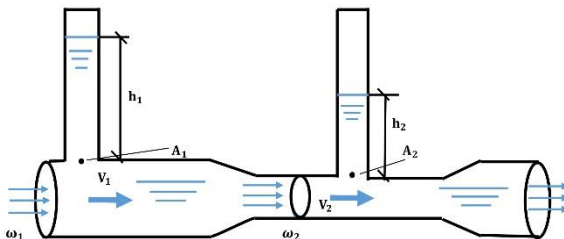
$$\sum h_{\text{მ}} = \sum h_{\text{მ}} + \sum h_{\text{მ}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{l_i v_i^2}{d_i 2g} + \sum_{i=1}^n \xi_i \frac{v_i^2}{2g} \quad (7.2.6)$$

სადაც  $\lambda_i, l_i, d_i, v_i$  არის შესაბამისად ხახუნის კოეფიციენტი, მილის სიგრძე, მილის დიამეტრი და ცოცხალ კვეთში სითხის საშუალო სიჩქარე, ხოლო  $\xi_i$  ცალკეული ადგილობრივი ხასიათის დაწნევის დანაკარგის კოეფიციენტები.

### თავი 8. ამოცანები სითხის მოძრაობის რეჟიმებზე

#### 8.1. კონუსური ფორმის მილსადენში ხარჯის განსაზღვრა

ამოცანა 1. განვსაზღვროთ ჰორიზონტალური კონუსურად შევიწროებული მილსადენისათვის  $Q$  ხარჯი შემდეგი მონაცემების მიხედვით:  $d_1=15$  სმ,  $d_2= 6$  სმ, პიეზომეტრული სიმაღლეები  $h_1 = \frac{p_1}{\gamma} = 1,2$  მ,  $h_2 = \frac{p_2}{\gamma} = 0,8$  მ, კვეთებში სიჩქარეთა არათანაბარ განაწილებას ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ) და დაწნევის დანაკარგს უგულვებულყოფთ.



ნახ. 8.1. ნაკადის მოძრაობის პიოზომეტრიული დაწნევა სხვადასხვა კვეთის შემთხვევისათვის

ამოხსნა: საფარდ სიბრტყედ მივიჩნიოთ მილსადენის ღერძზე გამავალი სიბრტყე. 1 და 2 კვეთებისთვის ვისარგებლოთ ბერნულის განტოლებით:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\text{შ.შ.}} \quad (8.1.1)$$

ამოცანის პირობის თანახმად კვეთებში სიჩქარეთა განაწილება ერთნაირია ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ , ასევე არ ვითვალისწინებთ დაწნევის დანაკარგებსაც  $h_{\text{შ.შ.}} = 0$ , რადგან საფარდი სიბრტყე არის მილსადენის ღერძზე გამავალი სიბრტყე, ამიტომ

$$z_1 = z_2 = 0 \quad (8.1.2)$$

მაშინ ბერნულის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (8.1.3)$$

სითხის უწყვეტობის განტოლებიდან  $Q = \omega v = \text{const}$

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 \quad \text{და} \quad \omega = \frac{\pi d}{4} \quad (8.1.4)$$

$$v_2 = v_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} = v_1 \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (8.1.5)$$

$V_2$ -ის ეს მნიშვნელობა შევიტანოთ ბერნულის განტოლებაში

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \frac{d_1^4}{d_2^4} \quad (8.1.6)$$

მიღებული გამოსახულებიდან განვსაზღვროთ  $v_1$ :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g \left( \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right)}{\left( \frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9.8 (1.2 - 0.8)}{\left( \frac{15}{6} \right)^4 - 1}} = 0.206 \text{ მ/წმ.}$$

გამოვთვალოთ ხარჯი:

$$Q = v_1 \omega_1 = v_1 \frac{\pi d_1^2}{4} = 0.206 * 0.785 * (0.15)^2 = 0.0036 \text{ მ}^3/\text{წმ}$$

## 8.2 წყლის მიწოდებისათვის საჭირო დაწნევის განსაზღვრა

**ამოცანა 2:** განვსაზღვროთ დაწნევა, რომელიც საჭიროა წყლის მისაწოდებლად  $d=10$  მმ დიამეტრისა და  $l=20$  მ სიგრძის მილით, თუ მასში ნაკადის მოძრაობის სიჩქარეა  $12$  სმ/წმ და წყლის ტემპერატურა  $t=10^\circ\text{C}$ .

**ამოხსნა:** 1) დავადგინოთ ნაკადის მოძრაობის რეჟიმი, რისთვისაც საჭიროა განვსაზღვროთ რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა. ვისარგებლოთ შემდეგი ფორმულით:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}$$

$t=10^\circ\text{C}$  დროს გვაქვს  $\nu=0,0131$  სმ<sup>2</sup>/წმ და შესაბამისად

$$Re = \frac{\frac{12\text{სმ}}{\text{წმ}} \cdot 2\text{სმ}}{0,0131 \text{ სმ}/\text{წმ}^2} = 1831$$

ე.ი.  $Re$  რიცხვი ნაკლებია  $2320$ -ზე, ანუ მოძრაობის რეჟიმი იქნება ლამინარული.

2) გამოვთვალოთ ხახუნის კოეფიციენტი  $\lambda$ , რადგანაც ლამინარული რეჟიმს აქვს ადგილი, ამიტომ ვისარგებლოთ შემდეგი ფორმულით

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1831} = 0,035$$

3) საანგარიშო დაწნევა, რომელიც უნდა განვითარდეს მილსადენის საწყის უბანზე განივი კვეთის სიმძიმის ცენტრში იქნება

$$h_{\text{ხახ}} = \lambda \frac{l}{d_0} \frac{V^2}{2g} = \frac{0,035 \cdot 2000 \cdot 12^2}{2 \cdot 2 \cdot 981} = 2,6 \text{ სმ}$$

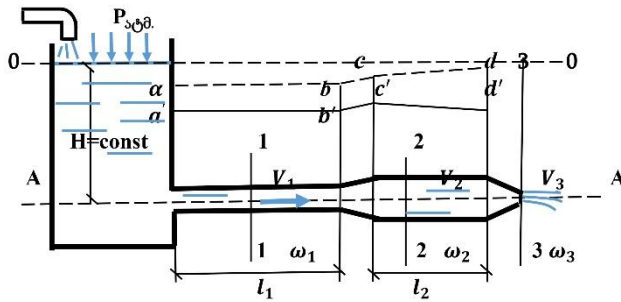
### 8.3. მილსადენის სისტემისათვის წყლის გამოდინების სიჩქარის, ხარჯის და დაწნევის განსაზღვრა იდეალური სითხისთვის

**ამოცანა 1: იდეალური სითხის შემთხვევაში;**

მილსადენთა სისტემისათვის განვსაზღვროთ წყლის გამოდინების სიჩქარე, ხარჯი და დაწნევების მნიშვნელობანი მოძრაობის მიმართულებით ორი შემთხვევისათვის:

2) რეალური სითხის შემთხვევაში.

მოცემულია: მილსადენის ცენტრის მიმართ წყლის დგომის სიმაღლე  $H=10$  მ, პირველი უბნის მილსადენის დიამეტრი  $d_1=100$  მმ (შესაბამისი ცოცხალი კვეთის ფართობი  $\omega_1=0,008$  მ<sup>2</sup>), ამავე უბნის სიგრძე  $l_1=150$  მ, მეორე უბნის მილსადენის დიამეტრი  $d_2=200$  მმ (შესაბამისად ცოცხალი კვეთის ფართობი  $\omega_2=0,03$  მ<sup>2</sup>), ამავე უბნის სიგრძე  $l_2=50$  მ და წყლის გამოდინების კვეთში მილსადენის დიამეტრი  $d_3=35$  მმ (შესაბამისად  $\omega_3=0,001$  მ<sup>2</sup>).



ნახ. 8.3.1. მილსადენის სისტემისათვის წყლის გამოდინების სქემა

**ამოხსნა:** 1. იდეალური სითხეების შემთხვევა:

1) განვიხილოთ სითხის გამოდინების სიჩქარე მილსადენის სისტემის ბოლოს, საფარდ სიბრტყედ ავირჩიოთ ჰორიზონტალური მილსადენის ღერძზე გამავალი სიბრტყე. დავწეროთ ბერნულის განტოლება 0-0 და 3-3 კვეთებისათვის

$$H + \frac{P_{ატმ}}{\gamma} + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = 0 + \frac{P_{ატმ}}{\gamma} + \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g}$$

თუ მივიჩნევთ, რომ  $\alpha_0 \approx \alpha_3 \approx 1$  და მოვახდენთ უბრალო გარდაქმნებს, მივიღებთ

$$H = \frac{V_3^2}{2g}$$

საიდანაც სითხის გამოდინების სიჩქარისათვის გვაქვს

$$V_3 = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 10} = 14 \text{ მ/წმ}$$

2) გამოვიანგარიშოთ მილსადენიდან გამოდინებული ხარჯი

$$Q = \omega_3 V_3 = 0,001 \text{ მ}^2 \cdot 14 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}} = 14 \text{ ლ/წმ}$$

3) გამოვიანგარიშოთ დაწნევის სიდიდეები.

ა) 0-0 კვეთში დაწნევებისათვის გვაქვს (ბერნულის განტოლების წევრთა მიხედვით)

$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} = H + 0 + 0 = 10 \text{ მ}$$

ბ) I უბანზე: გეომეტრიული დაწნევა -  $Z_1=0$  მ;

$$\text{სიჩქარით დაწნევა} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \frac{1 \left( \frac{Q}{\omega_1} \right)^2}{2g} = \frac{\left( \frac{0,014}{0,008} \right)^2}{2 \cdot 9,8} = 0,145 \text{ მ}$$

$$\text{პიეზომეტრული დაწნევა} - \frac{P_1}{\gamma} = H - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = 10 - 0,145 = 9,855 \text{ მ}$$

გ) II უბანზე: გეომეტრიული დაწნევა -  $Z_2=0$  მ;

$$\text{სიჩქარით დაწნევა} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = \frac{1 \left( \frac{Q}{\omega_2} \right)^2}{2g} = \frac{\left( \frac{0,014}{0,03} \right)^2}{2 \cdot 9,8} = 0,012 \text{ მ}$$

$$\text{პიეზომეტრული დაწნევა} - \frac{P_2}{\gamma} = H - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = 10 - 0,012 = 9,988 \text{ მ}$$

დ) 3-3 კვეთში: გეომეტრიული დაწნევა -  $Z_3=0$  მ;

$$\text{სიჩქარით დაწნევა} - \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} = H = 10 \text{ მ}$$

$$\text{პიეზომეტრული დაწნევა} - \frac{P_3}{\gamma} = H - \frac{\alpha_3 V_3^2}{2g} = 10 - 10 = 0 \text{ მ}$$



### ამოცანა 3-2: რეალური სითხის შემთხვევაში.

მილსადენთა სისტემისათვის განვსაზღვროთ წყლის გამოდინების სიჩქარე, ხარჯი და დაწნევების მნიშვნელობანი მოძრაობის მიმართულებით ორი შემთხვევისათვის:

მოცემულია: მილსადენის ცენტრის მიმართ წყლის დგომის სიმაღლე  $H=10$  მ, პირველი უბნის მილსადენის დიამეტრი  $d_1=100$  მმ (შესაბამისი ცოცხალი კვეთის ფართობი  $\omega_1=0,008$  მ<sup>2</sup>), ამავე უბნის სიგრძე  $l_1=150$  მ, მეორე უბნის მილსადენის დიამეტრი  $d_2=200$  მმ (შესაბამისად ცოცხალი კვეთის ფართობი  $\omega_2=0,03$  მ<sup>2</sup>), ამავე უბნის სიგრძე  $l_2=50$  მ და წყლის გამოდინების კვეთში მილსადენის დიამეტრი  $d_3=35$  მმ (შესაბამისად  $\omega_3=0,001$  მ<sup>2</sup>).

### ამოხსნა: 2. რეალური სითხეების შემთხვევა.

- 1) გამოვიანგარიშოთ სითხის გამოდინების სიჩქარე  $V_3$ . განსახილველი შემთხვევისათვის ბერნულის განტოლებას 0-0 და 3-3 კვეთებისათვის აქვს შემდეგი სახე

$$H = \frac{V_3^2}{1g} + \sum h_{სრ.}$$

გამოვთვალოთ ამ გამოსახულებაში შემავალი უცნობი წევრი  $\sum h_{სრ.}$  (გამოვსახოთ იგი  $V_3$ -ით). ვისარგებლოთ შემდეგი ფორმულით

$$\sum h_{სრ.} = \sum h_{ხაზ.} + \sum h_{ადგ.}$$

ა) გამოვთვალოთ დაწნევის დანაკარგები ხახუნზე  $\Sigma h_{b\alpha b} = h_1 + h_2$  (გამოვსახოთ ისინი  $V_3$ -ით). I უბანზე დაწნევის დანაკარგი ტოლია :

$$h_1 = \lambda_1 \frac{I_1}{d_1} \frac{V_1^2}{2g}$$

სადაც  $V_1$  უცნობი სიდიდეა, გამოვსახოთ იგი  $V_3$ -ით (სამიეხელი სიდიდით  $\omega_1 V_1 = \omega_3 V_3$ ).

$$V_1 = \frac{\omega_3}{\omega_1} V_3$$

გვექნება

$$h_1 = \lambda_1 \frac{I_1}{d_1} \left( \frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2 \frac{V_3^2}{2g} = 0,025 \cdot \frac{150}{0,1} \left( \frac{0,001}{0,008} \right)^2 \frac{V_3^2}{2g} = 0,605 \frac{V_3^2}{2g}$$

II უბანზე, ანალოგიურად I უბნის დაწნევის დანაკარგი იქნება

$$h_2 = \lambda_2 \frac{I_2}{d_2} \frac{V_2^2}{2g}$$

აქაც  $V_2$  უცნობია, გამოვსახოთ იგი  $V_3$ -ით, გვექნება

$$h_2 = \lambda_2 \frac{I_2}{d_2} \left( \frac{\omega_3}{\omega_2} \right)^2 \frac{V_3^2}{2g} = 0,022 \frac{50}{0,2} \left( \frac{0,001}{0,03} \right)^2 \frac{V_3^2}{2g} = 0,006 \frac{V_3^2}{2g}$$

საბოლოოდ, სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგებისთვის მივიღებთ

$$\Sigma h_{b\alpha b} = h_1 + h_2 = 0,605 \frac{V_3^2}{2g} + 0,006 \frac{V_3^2}{2g} = 0,611 \frac{V_3^2}{2g}$$

ბ) გამოვთვალოთ დაწნევის დანაკარგები ადგილობრივი წინააღმდეგობებზე

$$\sum h_{ადგ.} = h_{მილ.შეს} + h_{უ.გ.} + h_{უ.შ.}$$

გამოვსახოთ ისინი  $V_3$ -ით. ვისარგებლოთ შესაბამისი ფორმულით. მიღში შესვლაზე:

$$\begin{aligned} h_{მილ.შეს.} &= \xi_{შეს} \frac{V_1^2}{2g} = \xi_{შეს} \left( \frac{\omega_3}{\omega_1} \right)^2 \frac{V_3^2}{2g} = 0,5 \left( \frac{0,001}{0,008} \right)^2 \frac{V_3^2}{2g} \\ &= 0,01 \frac{V_3^2}{2g} \end{aligned}$$

უეცარ გაფართოებაზე:

$$h_{უ.გ.} = \xi_{უ.გ} \frac{V_2^2}{2g} = \xi_{შეს} \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2 \left( \frac{\omega_3}{\omega_2} \right)^2 \frac{V_3^2}{2g} = 0,009 \frac{V_3^2}{2g}$$

უეცარ შევიწროებაზე

$$h_{უ.შ.} = \xi_{უ.შ} \frac{V_3^2}{2g} = 0,5 \frac{V_3^2}{2g}$$

დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგების ჯამი

$$\begin{aligned} \sum h_{ადგ.} &= h_{მილ.შეს.} + h_{უ.გ.} + h_{უ.შ.} \\ &= 0,01 \frac{V_3^2}{2g} + 0,009 \frac{V_3^2}{2g} + 0,5 \frac{V_3^2}{2g} = 0,512 \frac{V_3^2}{2g} \end{aligned}$$

საბოლოოდ

$$\begin{aligned} \sum h_{სრ} &= \sum h_{სახ} += \sum h_{ადგ.} = 0,611 \frac{V_3^2}{2g} + 0,512 \frac{V_3^2}{2g} \\ &= 1,123 \frac{V_3^2}{2g} \end{aligned}$$

თუ ჩავსვამთ  $\sum h_{სრ}$ -ს მნიშვნელობას ბერნულის განტოლებაში, მივიღებთ

$$H = \frac{V_3^2}{2g} + \sum h_{სრ} = \frac{V_3^2}{2g} + 1,123 \frac{V_3^2}{2g} = 2,123 \frac{V_3^2}{2g}$$

საიდანაც

$$V_3 = \sqrt{\frac{1}{2,123} \sqrt{2gH}} = \sqrt{0,52} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 10} = 9,3 \text{ მ/წმ}$$

2) გამოვიანგარიშოთ გამოდინებული სითხის ხარჯი

$$Q = \omega_3 V_3 = 0,001 \cdot 9,3 = 0,0093 \frac{\text{მ}^3}{\text{წმ}} = 9,3 \text{ ლ/წმ}$$

3) გამოვიანგარიშოთ პიეზომეტრული დაწნევის სიდიდეები მილსადენის სისტემის მახასიათებელ წერტილებში (ბერნულის განტოლების მიხედვით)

$$\frac{P}{\gamma} = H - \frac{V^2}{2g} - \sum h_{სრ}$$

გამოვთვალოთ სიჩქარით დაწნევები და დაწნევის დანაკარგები გამოსასვლელ კვეთში

$$\frac{V_3^2}{2g} = \frac{H}{2,123} = \frac{10}{2,123} = 4,7 \text{ მ}$$

მეორე უბანში

$$\frac{V_2^2}{2g} = \left(\frac{\omega_3}{\omega_2}\right)^2 \frac{V_3^2}{2g} = \left(\frac{0,001}{0,03}\right)^2 \cdot 4,7 = 0,0047 \text{ მ}$$

პირველ უბანში

$$\frac{V_1^2}{2g} = \left(\frac{\omega_3}{\omega_1}\right)^2 \frac{V_3^2}{2g} = \left(\frac{0,001}{0,008}\right)^2 \cdot 4,7 = 0,08 \text{ მ}$$

მიღებული სიჩქარით დაწნევის მიხედვით ვითვლით დაწნევის დანაკარგებს როგორც ხახუნზე, ასევე ადგილობრივი წინაღობებისათვის.

ა) დაწნევის დანაკარგი პირველ მისადენში შესვლაზე

$$h_{\text{მილ.შეს.}} = \xi_{\text{შეს.}} \frac{V_1^2}{2g} = 0,5 \cdot 0,08 = 0,04 \text{ მ}$$

ხახუნის დანაკარგი I უბანზე

$$h_1 = \lambda_1 \frac{I_1 V_1^2}{d_1 2g} = 0,025 \frac{150}{0,1} \cdot 0,08 = 2,85 \text{ მ}$$

დანაკარგი უეცარ გაფართოებაზე

$$h_{\text{უ.გ.}} = \xi_{\text{უ.გ.}} \frac{V_2^2}{2g} = 9 \cdot 0,0047 = 0,042 \text{ მ}$$

ხახუნის დანაკარგი II უბანზე

$$h_2 = \lambda_2 \frac{I_2 V_2^2}{d_2 2g} = 0,022 \frac{50}{0,2} \cdot 0,0047 = 0,026 \text{ მ}$$

დანაკარგი უეცარ შევიწროებაზე

$$h_{\text{უ.შ.}} = \xi_{\text{უ.შ.}} \frac{V_3^2}{2g} = 0,5 \cdot 4,7 = 2,35 \text{ მ}$$

პიეზომეტრული დაწნევისათვის საბოლოოდ გვექნება

1. პირველ მისადენში შესვლის წერტილში

$$\frac{P_1}{\gamma} = H - \frac{V_1^2}{2g} - h_{\text{მოლ.შეს}} = 10 - 0,08 - 0,04 = 9,88 \text{ მ}$$

2. პირველი მილსადენის ბოლო წერტილში

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{\gamma} &= H - \frac{V_1^2}{2g} - (h_{\text{მოლ.შეს}} + h_1) = 10 - 0,08 - (0,04 + 2,85) \\ &= 7,03 \text{ მ} \end{aligned}$$

3. მეორე მილსადენის დასაწყის წერტილში

$$\begin{aligned} \frac{P_3}{\gamma} &= H - \frac{V_1^2}{2g} - (h_{\text{მოლ.შეს}} + h_1 + h_{\text{უ.გ.}}) \\ &= 10 - 0,0047 - (0,04 + 2,85 + 0,042) \\ &= 7,0653 \text{ მ} \end{aligned}$$

4. მეორე მილსადენის ბოლო (გამოდინებამდე) წერტილში

$$\begin{aligned} \frac{P_4}{\gamma} &= H - \frac{V_2^2}{2g} - (h_{\text{მოლ.შეს}} + h_1 + h_{\text{უ.გ.}} + h_2) \\ &= 10 - 0,0047 - (0,04 + 2,85 + 0,042 + 0,026) = 7,045 \text{ მ} \end{aligned}$$

5. გამოდინების (შევიწროებული 3-3 კვეთი) წერტილში

$$\begin{aligned} \frac{P_5}{\gamma} &= H - \frac{V_3^2}{2g} - (h_{\text{მოლ.შეს}} + h_1 + h_{\text{უ.გ.}} + h_2 + h_{\text{უ.შ.}}) \\ &= 10 - 4,7 \\ &\quad - (0,04 + 2,85 + 0,042 + 0,026 + 2,35) \\ &= 0,008 \text{ მ} \approx 0 \end{aligned}$$

**თავი 9. სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან**

### **9.1. სითხის გამოდინება მცირე ხვრეტიდან მუდმივი დაწნევის დროს**

ჰიდრავლიკაში ყველა პრაქტიკულ საკითხს ჰყოფენ სამ ჯგუფად: სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან,

სითხის მოძრაობა მილსადენებში და სითხის მოძრაობა ღია კალაპოტებში.

სითხის გამოდინებისას ხვრეტებიდან დაწნევის დანაკარგების დადგენა ექსპერიმენტის საშუალებით ხდება, რადგანაც ასეთ დანადგარებსა და კონსტრუქციებში ჭარბობს ადგილობრივი ხასიათის ჰიდრავლიკური წინაღობები.

ხვრეტებიდან სითხის გამოდინების სიჩქარე დამოკიდებულია სითხის დაწნევის სიდიდეზე და ტოლია იმ სიჩქარისა, რომელსაც განავითარებს  $H$  სიმაღლიდან ჩამოვარდმილი მყარი სხეული უჰაერო სივრცეში:

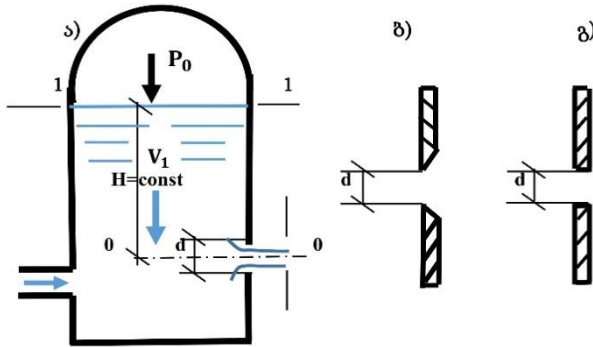
$$v = \sqrt{2gH} \quad (9.1.1)$$

მაგრამ პრაქტიკული შედეგები განსხვავდება ფორმულით მიღებული შედეგებისგან, რადგან ფორმულა არ ითვალისწინებს ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობებს, რასაც ადგილი აქვს ხვრეტებიდან გამოდინებისას.

ნაცმი ანუ მილყელი ეწოდება მოკლე მილსადენს, რომელიც ხვრეტებთან არის მიერთებული.

სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან მიეკუთვნება მოძრაობის იმ კატეგორიას, რომლის ფორმირებაშიც არსებით როლს ადგილობრივი ჰიდრავლიკური წინაღობა ასრულებს. ასეთი მოძრაობისას ბერნულის განტოლების ბოლო წევრი ( $h_{\text{დაწ}}$ ) გამოსახავს კუთრი ენერგიის (დაწნევის) იმ მნიშვნელობას, რომელიც იკარგება ადგილობრივ წინაღობათა დასაძლევად.

განასხვავებენ მცირე და დიდ ნახვრეტებს. ჩვეულებრივ, ნახვრეტებს, რომელთა სიმაღლე  $0,1H$ -ს არ



ნახ 9.1.1. სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან

აღმატება, უწოდებენ მცირეს. აქ  $H$  არის დაწნევა ხვრეტის ცენტრში (ნახ. 9.1.1. ა). მაგალითად,  $d$  დიამეტრის წრიული ხვრეტი და  $a$  სიმაღლის სწორკუთხა ხვრეტი იქნება მცირე, თუ  $d < 0,1H$  და  $a < 0,1H$ . ასეთ შემთხვევაში  $H$  გეომეტრიული დაწნევა ნახვრეტის ყველა წერტილისათვის შეიძლება მუდმივად ჩავთვალოთ. რაც ნიშნავს, რომ ნახვრეტის კვეთში ჭავლის ნაწილაკების სიჩქარე ერთმანეთისაგან პრაქტიკულად არ განსხვავდება და კინეტიკური ენერჯის კოეფიციენტი  $\alpha \approx 1$ -ს.

ხვრეტს უწოდებენ თხელკედლიანს თუ კედლის სისქე გავლენას არ ახდენს გამოდინების პირობებზე. ამ დროს ხვრეტი ხორკლიანია (ნახ.9.1.1. ბ) ან კედლის სისქე  $\delta \leq 0,5d$  (ნახ. 9.1.1.გ).

სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან შეიძლება იყოს **თავისუფალი** (ე.ი. დაუტბორავი გამოდინება ატმოსფეროში) და



**არათავისუფალი** (ე.ი. **დატბორილი** გამოდინება დონის ქვემოთ) როგორც მუდმივი, ისე ცვლადი დაწნევისას.

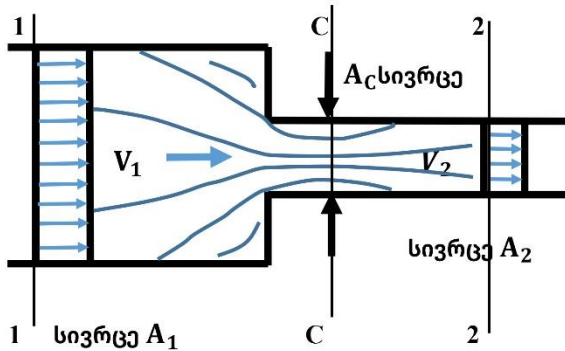
სითხის ხვრეტიდან გამოდინებისას განასხვავებენ ჭავლის სრულ და არასრულ კუმშვას. ჭავლი განიცდის **სრულ კუმშვს**, თუ იგი იკუმშება ნახვრეტის მთელ პერიმეტრზე. **არასრული კუმშვა** შეიმჩნევა მაშინ, როცა ნახვრეტის პერიმეტრის გარკვეულ ნაწილში ჭავლის კუმშვა არ ხდება იმის გამო, რომ პერიმეტრის ეს ნაწილი ჭურჭლის გრძივი კედლის მომიჯნავეა.

ჭავლის **სრული კუმშვა სრულყოფილია**, თუ ჭურჭლის კედლები ჭავლის კუმშვის ხარისხზე გავლენას არ ახდენს.

**არასრულყოფილი კუმშვის** შემთხვევაში ჭურჭლის ფსკერი და კედლები გავლენას ახდენს ჭავლის კუმშვაზე. არასრულყოფილი კუმშვისას დენის წირები ნაკლები სიმრუდისაა, რის გამოც ჭავლის კუმშვის ხარისხიც უფრო ნაკლებია, ვიდრე სრულყოფილი კუმშვისას.

შეკუმშული კვეთის ზონაში ნაკადი ვერ ასწრებს ნაცმის განივი კვეთის სრულ შევსებას. დროის მოკლე მონაკვეთში ჰაერის აქ დარჩენილ მასას თან წარიტაცებს სითხის ნაკადი, რის გამოც შეკუმშული კვეთის ზონაში წარმოიქმნება ვაკუუმი  $A_c$  (ნახ 9.1.2). ამ ზონაში წნევის დანაკლისმა, ანუ ვაკუუმმა თხელი კედლიდან სითხის გამოდინების შემთხვევასთან შედარებით უნდა გამოიწვიოს გამოდინებული სითხის სიჩქარის გაზრდა, მაგრამ მილყელის არსებობამ უნდა განაპირობოს დაწნევის

დანაკარგები - ხახუნზე (ნაცმის სიგრძეზე) და ნაკადის გაფართოებაზე.



ნახ 9.1.2. შეკუმშული კვეთის ზონაში ნაკადის გადაადგილების სქემა

თუ ნაცმის სიგრძე იქნება  $l \approx (3 \div 4)d$ -ს ტოლი, ხახუნისა და ნაკადის გაფართოების შედეგად დაწნევის დანაკარგის სიდიდე ბევრად უმნიშვნელო გამოდის ვაკუუმით გამოწვეული სიჩქარის გაზრდასთან შედარებით. ამიტომ ამ სახის ნაცმა უნდა გამოიწვიოს გამოდინებული ხარჯის მნიშვნელოვანი გაზრდა.

ვინაიდან ჭერჭელში (რეზერვუარში) სითხის ნაწილაკები ნახვრეტისაკენ მოძრაობს მრუდწირულ ტრაექტორიაზე, ამიტომ დენის წირები თვით ნახვრეტის სიბრტყეში არ არის ურთიერთპარალელური; აქ მოძრაობა

მკვეთრად ცვალებადია. ნახვრეტის კვეთიდან გარკვეულ მანძილზე (წრიული ნახვრეტებისათვის  $0,5d$  მანძილზე, სადაც  $d$  არის ნახვრეტის დიამეტრი) დენის წირების სიმრუდე მცირდება და თითქმის ერთმანეთის პარალელური ხდება. ნახვრეტიდან უმცირესი მანძილით დაშორებულ ჭავლის  $c$ - $c$  კვეთს (ნახ 9.1.1.ა), რომელშიც სითხის მოძრაობა უკვე განიხილება, როგორც პარალელურჭავლური, **შეკუმშული კვეთი ეწოდება**. ამ კვეთში მოძრაობა მდოვრედ ცვალებადია და მისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ ბერნულის განტოლება. შეკუმშულ კვეთში ჭავლის დიამეტრი  $d_c \approx 0,8d$ .

ნახვრეტის ფართობი აღვნიშნოთ  $\omega$ -თი, ხოლო ცოცხალი კვეთის ფართობი  $c$ - $c$  კვეთში  $\omega_c$ -თი.  $\omega_c$ -ს ფარდობა  $\omega$ -სთან აღინიშნება  $\varepsilon$ -ით და მას **ჭავლის კუმშვის კოეფიციენტს** უწოდებენ, ე.ი.

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega} \quad (9.1.2)$$

ხვრეტიდან სითხის გამოდინებისას ჭავლის განივკვეთის ფორმა გზადაგზა იცვლება და თვით ნახვრეტის ფორმისაგან განსხვავებული ხდება. ასე, მაგალითად, წრიული ხვრეტიდან გამოდინებული ჭავლის განივკვეთს ხვრეტიდან გარკვეულ მანძილზე აქვს ელიფსის ფორმა; კვადრატული ნახვრეტიდან გამოდინებისას – ჯვრისებრი, ხოლო სამკუთხა ნახვრეტიდან გამოდინებისას – სამქიმიანი ვარსკვლავის ფორმა და ა.შ.

ხვრეტიდან სითხის გამოდინებისას ჭავლის განივკვეთის ფორმის სიგრძეზე ცვლილებას **ჭავლის ინვერსია** ეწოდება.

იმ შემთხვევაში, როცა  $p_0 = p_{ატმ}$ , ე.ი., როცა რეზერვუარი ღიაა,  $H_{დაყ} = H$  გვექნება:

$$v_c = \varphi \sqrt{2gH} \quad (9.1.3)$$

ეს უკანასკნელი არის c-c კვეთში სითხის ჭავლის მოძრაობის საშუალო სიჩქარის გამოსათვლელი ფორმულა.

$v_c$  სიჩქარის საშუალებით ვიპოვოთ ხვრეტიდან გამოდინებული ხარჯის სიდიდე ( $p_0 = p_{ატმ}$ , შემთხვევისათვის)

$$Q = \mu a \sqrt{2gH} \quad (9.1.4)$$

სადაც  $\mu$  – არის **ე.წ. ხარჯის კოეფიციენტი**.

თხელკედლიანი დიდი ხვრეტიდან სითხის თავისუფალი გამოდინების შემთხვევისათვის ხარჯის ფორმულას ასეთი სახე აქვს:

$$Q = \mu_0 a \sqrt{2gH_{\text{შეშ}}} \quad (9.1.5)$$

სადაც  $a = ab$  არის თხელკედლიანი სწორკუთხა დიდი ნახვრეტის ფართობი. დიდი ნახვრეტიდან გამოდინებული სითხის ხარჯის გამოსათვლელად ვსარგებლობთ ისეთივე ფორმულით, როგორითაც თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან გამოდინებისას,

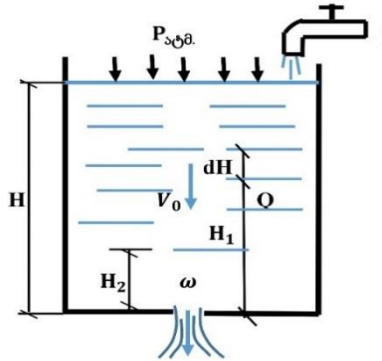
მხოლოდ ამ შემთხვევაში საჭიროა, წინასწარ დადგინდეს  $\mu_0$  ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობა.

## **9.2. სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან ცვლადი დაწნევის დროს**

პრაქტიკული ამოცანების გადაწყვეტის დროს ხშირად საჭიროა ვიცოდეთ რეზერვუარის ან წყალსაცავის სითხისაგან დაცლის დრო.

### ნახ. 9.2.1. სითხის გამოდინება ხვრეტიდან ცვლადი დაწნევის დროს

ანალოგიურ ამოცანას აქვს ადგილი გემთსავალი რაბების წყლით შევსების ან დაცლის პერიოდის დადგენისას. მსგავსი საკითხების გადაწყვეტა უნდა ჩატარდეს დაუმყარებელი მოძრაობის შესაბამისი ფორმულების გამოყენებით, რადგანაც ამ პეროდებში ხვრეტებიდან გამოდინებული სითხის სიჩქარე და წნევა იცვლება დროსთან ურთიერთკავშირში. როდესაც



სიჩქარის ცვლილება დროში ინერციის ძალების ცვლილების ხარჯზე უმნიშვნელოა, ასეთი ტიპის ამოცანების გადაწყვეტა, გაანგარიშების გამარტივების მიზნით პრაქტიკული სიზუსტის ფარგლებში, შესაძლებელია შესრულდეს დამყარებული მოძრაობის მახასიათებელი დამოკიდებულებებით.

განვიხილოთ სითხის გამოდინება პრიზმული (ან ცილინდრული)  $\Omega$  განივი კვეთის მქონე რეზერვუარიდან. დავუშვათ, რომ სითხის დაცლა  $\omega$  განივი

კვეთის მქონე ხვრეტის საშუალებით ხდება ისეთი სიჩქარით, რომ რეზერვუარში სითხის თავისუფალი ზედაპირის დაწნევის სიჩქარე უმნიშვნელოა, ამიტომ შეიძლება ჩავთვალოთ რომ

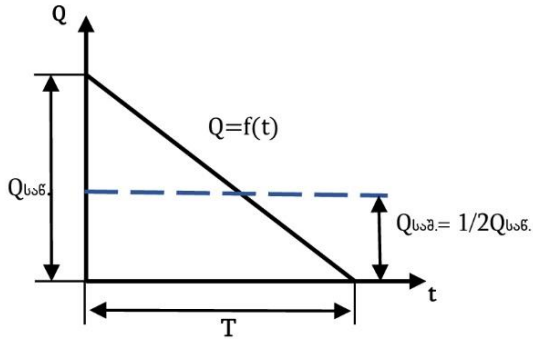
$$H \approx H_0 = H + \frac{V_0^2}{2g} \quad (9.2.1)$$

პირველ რიგში განვსაზღვროთ  $T'$  დრო, რომელიც საჭიროა  $W = \Omega H_1$  მოცულობის სითხის გამოდინებისთვის ხვრეტებიდან, იმ პირობით, რომ რეზერვუარში სითხის დონე არ იცვლებოდეს (ე.ი  $H = \text{const}$ ), მაშინ  $Q = \text{const}$  რეზერვუარში არსებული სითხე შეიცვლება დროში

$$T' = \frac{W}{Q} = \frac{\Omega H_1}{\mu \omega \sqrt{2gH_1}} = \frac{\Omega \sqrt{H_1}}{\mu \omega \sqrt{2g}} \quad (9.2.2)$$

სადაც  $Q$  არის ხვრეტიდან გამოდინებული სითხის ხარჯი.

დავუშვათ, რომ რეზერვუარი სითხით ივსება. მაშინ, ხვრეტიდან გამოდინების გამო, სითხის თავისუფალი ზედაპირი დაიწყებს დაბლა დაწევას  $H_1$ -დან  $H=0$ -მდე. რადგანაც ხვრეტზე მომქმედი დაწნევა მცირდება, ბუნებრივია, გამოდინებული ხარჯიც უნდა შემცირდეს. ცვლადი იქნება ხარჯის  $\mu$  კოეფიციენტიც. თუ ამ უკანასკნელის ცვლილებას მხედველობაში არ მივიღებთ, მაშინ რეზერვუარის დაცლის  $T$  დროის განსაზღვრისათვის საჭიროა რეზერვუარში არსებული სითხის მოცულობა გაიყოს ხვრეტიდან გამოდინებული ხარჯის საშუალო მნიშვნელობაზე



ნახ. 9.2.2. საანგარიშო დამოკიდებულების გრაფიკი

$$T = \frac{\Omega H_1}{Q_{\text{სამ.}}} \quad (9.2.3)$$

რადგანაც

$$Q_{\text{სამ.}} = \frac{1}{2} (\mu\omega\sqrt{2gH_1} + 0) \quad (9.2.4)$$

მაშინ

$$T = \frac{2\Omega\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}} \quad (9.2.5)$$

თუ შევადარებთ მიღებულ ბოლო ორ დამოკიდებულებებს, დავინახავთ, რომ ცვლადი დაწნევის შემთხვევაში სითხისაგან რეზერვუარის დაცლის დრო ორჯერ მეტია მუდმივი დაწნევის იმავე მოცულობის სითხის ხვრეტებიდან გამოდინების დროზე.



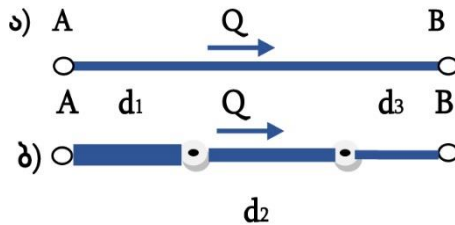
იმ შემთხვევაში, როდესაც საჭიროა განისაზღვროს რეზერვუარის ნაწილობრივი დაცლის დრო, ანალოგიური მსჯელობით მივიღებთ

$$T_{\text{მომ}} = \frac{2\Omega\sqrt{H_1 - \sqrt{H_2}}}{\mu\omega\sqrt{2g}} \quad (9.2.6)$$

სადაც  $H_1$  და  $H_2$  სათანადოდ ხვრეტის სიმძიმის ცენტრში მოქმედი საწყისი და საბოლოო დაწნევებია.

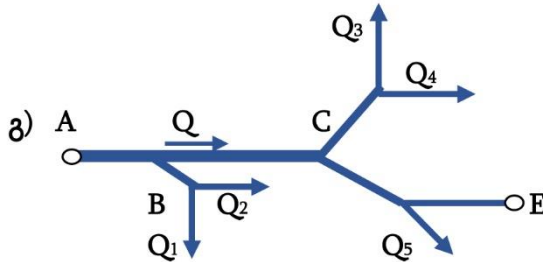
### 9.3. სითხის დაწნევიანი მოძრაობა მილსადენებში მარტივი მილსადენის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება

ჰიდრავლიკური სქემის მიხედვით არჩევენ 1. მარტივ მილსადენებს, ე.ი მილსადენებს, რომელთაც არ ახასიათებთ განშტოება



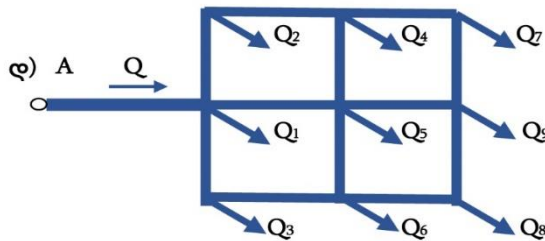
ნახ. 9.3.1. ა) ერთიდაიგივე დიამეტრის მქონე მარტივი მილსადენი; ბ) სხვადასხვა დიამეტრის მარტივი მილსადენი;

2. რთულ მილსადენებს, რომლებიც შედგება რამდენიმე მარტივი მილსადენის ხაზისგან, ე.წ. განშტოებული (ჩიხისებრი) ტიპის მილსადენებისაგან, სადაც სითხე ერთი მიმართულებიდან მიეწოდება



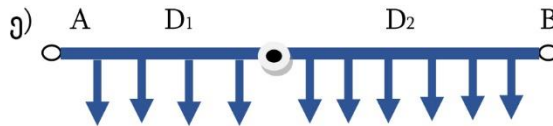
ნახ. 9.3.2. განშტოებული ჩიხისებრი რთული მილსადენი

3. რგოლისებრი (შეკრული) მილსადენისაგან. როდესაც მოხმარების ერთ წერტილში სითხე ორი ან მეტი ხაზის მეშვეობით მიეწოდება.



ნახ. 9.3.4. რგოლისებური შეკრული რთული მილსადენის სქემა

4. მილსადენი ცვლადი ხარჯით, სადაც წარმოებს სითხის გაცემა (ან მიღება) მოძრაობის გასწვრივ



ნახ. 9.3.4. მილსადენი ცვლადი ხარჯით

განვიხილოთ მარტივი წყალსადენი, რომელიც იკვებება რეზერვუარში მყოფი სითხით, რომლის დაწნევა იცვლება. ეს უკანასკნელი უზრუნველყოფს წყალსადენში სითხის დამყარებული რეჟიმით მოძრაობას. ასეთ წყალსადენებში მთელი დაწნევა  $H$ , რომელსაც ავითარებს რეზერვუარში მყოფი სითხე, იხარჯება მოძრაობის დროს წინააღმდეგობათა დაძლევაზე და ბოლო (გამოსავალ) კვეთში, მოთხოვნილების მიხედვით სითხის საჭირო სიჩქარის უზრუნველყოფაზე. ე.ი.

$$H = \frac{v^2}{2g} + h_{\text{შეღობა}} \quad (9.3.1)$$

თუ გავითვალისწინებთ შეზის ფორმულას და დაწნევის დანაკარგის მნიშვნელობას მივიღებთ

$$H = \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2 l}{c^2 R} = V^2 \left( \frac{1}{2g} + \frac{1}{c^2 R} \right) \quad (9.3.2)$$

სადაც  $l$  არის მილსადენის სიგრძე, ხოლო  $C$  - შეზის, ანუ სიჩქარის კოეფიციენტი.

წყალსადენებში  $\frac{1}{2g}$  ბევრად ნაკლებია  $\frac{1}{c^2 R}$  -თან შედარებით, ამიტომ შეგვიძლია დავწეროთ

$$H = \frac{v^2 l}{c^2 R} \approx h_{\text{ფრფფ}} \quad (9.3.3)$$

მიღებული მიახლოებითი ტოლობა მართებულია იმ დროს, როდესაც რეზერვუარში სითხის სრული დაწნევა იხარჯება ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის დაძლევაზე.

განსახილველ შემთხვევაში ხარჯი იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$Q = \omega V = \omega C \sqrt{RJ} \quad (9.3.4)$$

თუ შემოვიტანთ აღნიშვნას  $K = \omega C \sqrt{R}$  მაშინ მივიღებთ

$$Q = K \sqrt{J} \quad (9.3.5)$$

მიღებულ განტოლებაში  $J$  ჰიდრავლიკური ქანობი უგანზომილებო სიდიდეა, ამიტომ  $K$ -ს ექნება ხარჯის შესაბამისი განზომილება.

ამრიგად  $K$  არის განსახილველი მილსადენის ხარჯი იმ შემთხვევაში, როდესაც ჰიდრავლიკური ქანობი  $J=1$ . მას **ხარჯის მოდულს** უწოდებენ.

$$H = Q^2 \frac{e}{K^2} \quad (9.3.6)$$

მიღებული დამოკიდებულება გვიჩვენებს, თუ რა სიდიდის დაწნევა უნდა განვითარდეს რეზერვუარში, რომ მოცემულ მილსადენთა სისტემით მომხმარებელს მივაწოდოთ საანგარიშო  $Q$  ხარჯი.

$\frac{1}{K^2}$  სიდიდეს მილსადენის წინაღობა ეწოდება.  $E$  - სიმქისის კოეფიციენტი. როცა  $Q=1$ , იგი ახასიათებს დაწნევის იმ მნიშვნელობას, რაც უზრუნველყოფს წყალსადენის მთელ სიგრძეზე წინააღმდეგობების დაძლევას, ამიტომ  $A = \frac{1}{K^2}$  სიდიდე კუთრი წინაღობა იქნება.

ამრიგად, საშუალება გვძლევს გადავწყვიტოთ პრაქტიკის მიერ დასმული ამოცანები, ერთნაირი დიამეტრის მქონე მარტივი წყალსადენის გაანგარიშების დროს.

ეს ამოცანები, შეიძლება იყოს სამი სახის, კერძოდ დავადგინოთ:

1.  $Q$  ხარჯი, როდესაც წინასწარ ცნობილია მილსადენის  $d_0$  დიამეტრი  $l$  სიგრძე და რეზერვუარში სითხის  $H$  დაწნევა;

2. სითხის დაწნევა რეზერვუარში  $H$ , მოცემული  $Q$  ხარჯის გასატარებლად მოცემული მილსადენის ( $d_0$ ,  $l$ ) მეშვეობით;

3. მილსადენის  $d_0$  დიამეტრი, მოცემული  $Q$  ხარჯის, მილსადენის  $l$  სიგრძისა და მოქმედი  $H$  დაწნევის შემთხვევაში.

რადგანაც ხარჯის მოდული განისაზღვრება

$$K^2 = \omega^2 C^2 R = \left(\frac{\pi d_0^2}{4}\right)^2 C^2 \frac{d_0}{4} = \frac{\pi^2 C^2}{64} d_0^5 \quad (9.3.7)$$

იმის გამო, რომ ვიხილავთ სითხის ნაკადს ჩამოყალიბებული ტურბულენტური მოძრაობისას (ე.ი კვადრატული წინაღობის ზონას) ჰიდრავლიკური ხახუნის კოეფიციენტი  $\lambda$  ამ შემთხვევაში დამოკიდებული არ არის ნაკადის სიჩქარეზე, იგი ფარდობითი სიმქისის ფუნქციაა, ე.ი.

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = f\left(\frac{e}{d_0}\right) \quad (9.3.8)$$

როდესაც წყალსადენი შედგება სხვადასხვა დიამეტრის მქონე მილსადენთა სისტემისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან მიერთებულია თანმიმდევრობით, მაშინ დაწნევის სრული დანაკარგი ცალკეული უბნის დანაკარგების ჯამისაგან შედგება

$$\sum h_{\text{მომ}} = H = h_{\text{მომ}.1} + h_{\text{მომ}.2} + \dots + h_{\text{მომ}.n} \quad (9.3.9)$$

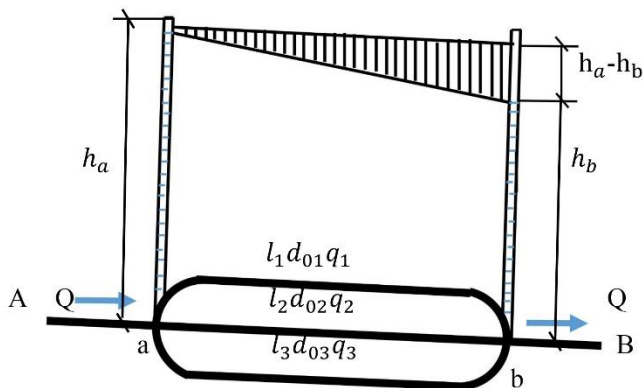
#### 9.4. სხვადასხვა ფორმის მილსადენების ჰიდრავლიკური ანგარიში

განვიხილოთ სხვადასხვა ფორმის მილსადენების შემთხვევები

1. პარალელურხაზიანი მილსადენების ჰიდრავლიკური გაანგარიშება

ვთქვათ, სითხე A პუნქტიდან B პუნქტში მიეწოდება. დავუშვათ რომ სითხე მილსადენების სიგრძეზე არ გაიცემა. a წერტილში მილსადენი იყოფა სამ

პარალელურ ხაზად, რომელთაგანაც თითოეულს აქვს შესაბამისი  $l$  სიგრძე და  $d_0$  დიამეტრი. დავუშვათ, რომ  $b$  წერტილში მილსადენის ხაზები ისევ ერთდება.



ნახ. 9.4.1. სხვადასხვა ფორმის მილსადენების  
საანგარიშო სქემა

გავარჩიოთ ასეთი ტიპის მილსადენების გაანგარიშების სამი შემთხვევა:

**შემთხვევა 1:** მოცემულია  $Q$  წყლის სრული ხარჯი, თითოეული პარალელური მილსადენის ხაზის სიგრძეები  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  და შესაბამისი დიამეტრები  $d_{01}$ ,  $d_{02}$ ,  $d_{03}$ . საჭიროა გამოვიანგარიშოთ, თუ რა სიდიდის იქნება  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  წყლის ხარჯი შესაბამისი პარალელური მილსადენების ხაზებში.

რადგანაც  $a$  განშტოების და  $b$  შეერთების წერტილებში სამივე მილსადენებისათვის წნევა ერთი და

იგივეა, ამიტომ ყოველი პარალელური მილსადენის ხაზებში დაწნევის დანაკარგი თანაბარი უნდა იყოს. მაშინ შეგვიძლია შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა

$$\begin{cases} q_1 = K_1 \sqrt{\frac{h_{a-b}}{l_1}} \\ q_2 = K_2 \sqrt{\frac{h_{a-b}}{2}} \\ q_3 = K_3 \sqrt{\frac{h_{a-b}}{l_3}} \end{cases} \quad (9.4.1)$$

სადაც  $K_1, K_2, K_3$  შესაბამისი პარალელური მილსადენების ხაზების ხარჯის მოდულებია.

რადგან  $Q = q_1 + q_2 + q_3$ , გვექნება

$$Q = \sqrt{h_{a-b}} \left( \frac{K_1}{\sqrt{l_1}} + \frac{K_2}{\sqrt{l_2}} + \frac{K_3}{\sqrt{l_3}} \right) \quad (9.4.2)$$

სადაც დაწნევის დანაკარგები ტოლი იქნება

$$h_{a-b} = \frac{Q^2}{\left( \frac{K_1}{\sqrt{l_1}} + \frac{K_2}{\sqrt{l_2}} + \frac{K_3}{\sqrt{l_3}} \right)^2} \quad (9.4.3)$$

**შემთხვევა 2:** მოცემულია  $Q, l_1, l_2, l_3$ . საჭიროა განისაზღვროს  $d_{01}, d_{02}, d_{03}$  იმ ვარაუდით, რომ მილსადენის თითოეულმა ხაზმა  $q_1 = q_2 = q_3 = Q/3$  თანაბარი ხარჯი გაატაროს.

ამ ამოცანის გადაწყვეტა წარმოებს შერჩევის მეთოდით, შემდეგი პირობის გამოყენებით



$$\frac{K_1}{\sqrt{l_1}} = \frac{K_2}{\sqrt{l_2}} = \frac{K_3}{\sqrt{l_3}} \quad (9.4.4)$$

$K_1, K_2, K_3$ -ს რიცხვითი მნიშვნელობების შერჩევის შემდეგ მოყვანილი ტოლობის დასაკმაყოფილებლად მისი შესაბამისი მილსადენის დიამეტრის შერჩევა სირთულეებთან უკვე არაა დაკავშირებული.

**შემთხვევა 3.** მოცემულია  $Q, l_1, l_2, l_3$  და ამავე დროს პერელეული მილსადენების დიამეტრები თანატოლია  $d_{01}=d_{02}=d_{03}=d_0$ . საჭიროა განისაზღვროს სრული ხარჯის დაშლა ცალკეულ ხაზებში. პირველი შემთხვევის ანალოგიურად გვექნება

$$h_{a-b} = \frac{Q^2}{K^2 \left( \frac{1}{\sqrt{l_1}} + \frac{1}{\sqrt{l_2}} + \frac{1}{\sqrt{l_3}} \right)^2} \quad (9.4.5)$$

სადაც  $K$  მოცემული დიამეტრის მქონე მილსადენების შესაბამისი ხარჯის მოდულია. თითოეულ მილსადენში გასული სითხის ხარჯი

$$q_1 = K_1 \sqrt{\frac{h_{a-b}}{l_1}}, \quad q_2 = K_2 \sqrt{\frac{h_{a-b}}{2}}, \quad q_3 = K_3 \sqrt{\frac{h_{a-b}}{l_3}}. \quad (9.4.6)$$

## 2. განშტოებული (ჩიხისებრი) მილსადენების ჰიდრაულიკური გაანგარიშება

მაგისტრალურ გამანაწილებელ მილსადენში სიგრძის მიხედვით ხარჯი მცირდება. ამიტომ იგი იანგარიშება, როგორც სხვადასხვა დიამეტრის თანმიმდევრობით შეერთებული მილსადენებისთვის მოცემული შესაბამისი  $Q_i$  ხარჯით, თითოეული  $l_i$  სიგრძის უბნის ფარგლებში.

განშტოებული მილსადენების გაანგარიშებისას არჩევენ ორ შემთხვევას: 1. როდესაც საჭიროა აშენდეს სრულიად ახალი წყალსადენი და 2. როდესაც მომქმედ წყალსადენის სისტემას უერთებენ დამატებით უბანს.

პირველ შემთხვევაში საჭიროა დადგინდეს რეზერვუარში წყლის დაწნევა, რომელიც უზრუნველყოფს სითხის მიწოდებას მოხმარების ყველა წერტილში და მოთხოვნილების მიხედვით - შესაბამის სითხის მოძრაობის სიჩქარე.

განშტოებული ქსელის გაანგარიშება დაიყვანება ხარჯების მიხედვით შესაბამისი დიამეტრების შერჩევამდე. თუ გვეცოდინება დიამეტრები, დაწნევის დანაკარგების გაანგარიშება უკვე რთული არ არის

$$h_{\text{შტ}} = \frac{Q_i^2 h_i}{K_i^2} \quad (9.4.7)$$

სადაც  $i$  ინდექსი შესაბამისი მილსადენის აღნიშვნაა. რეზერვუარში სითხის დონის დასადგენად საჭიროა შევაჯამოთ დაწნევის დანაკარგები

$$H = \sum h_{\text{შტ}} + h_{\text{შტშტ}} \quad (9.4.8)$$

სადაც  $h_{\text{შტშტ}}$  მილსადენის ბოლოს სითხის თავისუფალი დაწნევაა, რომელიც განისაზღვრება წყალსადენის დანიშნულების შესაბამისად სათანადო ნორმებით.

როდესაც განშტოების ან ახალი მაგისტრალური ხაზის ჩართვა ხდება უკვე არსებულ ქსელში, სადაც

მოქმედი საწყისი  $H$  დაწნევა წინასწარ ლიმიტირებულია, მაშინ იგი წინასწარ განსაზღვრავს მილსადენის გასწვრივ საშუალო ჰიდრავლიკურ ქანობს

$$J_{\text{შეშ}} = \frac{H-h_{\text{შეშ}}}{\Sigma l_i} \quad (9.4.9)$$

მაგისტრალის (განშტოების) თითოეულ მონაკვეთზე, ჰიდრავლიკური ქანობი ამ ფორმულით გამოთვლილის ტოლი იქნება, თუ შევურჩევთ ისეთი დიამეტრის მილსადენებს, რომელთა ხარჯის მოდულის რიცხვითი მნიშვნელობა დააკმაყოფილებს პირობას.

$$K_i^2 = \frac{Q_i^2}{J_{\text{შეშ}}} \quad (9.4.10)$$

მაგისტრალური მილსადენიდან განშტოების დაპროექტებისას განშტოების წერტილში, მაგისტრალურ მილსადენში მოქმედი დაწნევა არის ის საწყისი დაწნევა, რაზედაც უნდა გაანგარიშდეს მიერთებული განშტოება.

### 3. რგოლისებური (შეკრული) მილსადენის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება

რგოლისებრი მილსადენების საშუალებით წყალმომარაგება ხორციელდება იმ შემთხვევაში, როდესაც მოხმარების წერტილში სითხის შეუფერხებელი მიწოდებაა საჭირო.

განვიხილოთ ახლად დასაგეგმარებელი რგოლისებრი მილსადენების ქსელის გაანგარიშების შემთხვევა, როდესაც წინასწარ ცნობილია ცალკეული ხაზის სიგრძე, სითხის ხარჯი მოთხოვნილების თითოეულ

წერტილში და სითხის მოძრაობის მიმართულება, რაც დადგინდება ცალკეულ უბანზე სითხის ხარჯის თანაბრად განაწილების უზრუნველსაყოფად.

პირობითად ვუშვებთ საანგარიშო სითხის ხარჯის სიდიდეებს სხვადასხვა ხაზებში იმ ვარაუდით, რომ შეკრული ქსელის განსაზღვრულ რგოლში, რომელიც პირობითად შეგვიძლია მაგისტრალურ ხაზად ჩავთვალოთ, რეზერვუარიდან სითხე მიდიოდეს მხოლოდ ერთი მიმართულებით (მოპირდაპირე მხრიდან მომავალი სითხის შეხვედრის წერტილამდე). ამ შერჩეული უბნის მაგისტრალურ რგოლს გავიანგარიშებთ, როგორც განშტოებულ მილსადენს თავისი შესაბამისი ხარჯით. ეს გაანგარიშება საშუალებას მოგვცემს აღნიშნულ უბანზე დავადგინოთ პიეზომეტრული დაწნევები ჩვენთვის საინტერესო მოხმარების წერტილში.

## **9.5. ღია კალაპოტებში დამყარებული და დაუმყარებელი მოძრაობა**

სითხის დამყარებული მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლებები რომ შევადგინოთ და ამოვხსნათ ღია კალაპოტისათვის, საჭიროა ვიცოდეთ, რომ სითხემ შეიძლება იმოძრაოს არათანაბარი სიჩქარით ნულოვან ან უკუქანობის მქონე კალაპოტებში მხოლოდ შიგა ენერჯის ხარჯზე.

ღია კალაპოტებში ყოველგვარი წინააღმდეგობა, კალაპოტის ფსკერის ქანობის, კალაპოტის განივი კვეთის

ფორმის ან ზომის შეცვლა მოძრაობის მიმართულებით გამოიწვევს სითხის თავისუფალი ზედაპირის ფორმის, ანუ ცოცხალი კვეთის ფართობის შეცვლას.

განვიხილოთ კალაპოტის გასწვრივ ისეთი ცვლილებები, რომლებიც არ გამოიწვევენ ნაკადის მკვეთრ დეფორმაციას, რასაც ცალკეული ჭავლის მკვეთი გამრუდება მოჰყვება. განტოლებების გამოყვანის დროს ასეთი შეზღუდვა საშუალებას მოგვცემს მხედველობაში არ მივიღოთ სიჩქარის გეგმილის არსებობა ბრტყელი ფორმის ცოცხალი კვეთის სიბრტყეზე, რაც თავის მხრივ დაგვებმარება იმაში, რომ წნევის განაწილება კვეთში ავხსნათ ჰიდროსტატიკის კანონით, ე. ი. განვიხილოთ ნელცვლადი ანუ მდოვრედცვლადი დინება.

განვიხილოთ მდოვრედცვლადი უდაწნეო ნაკადის მოძრაობა სწორხაზოვანი მონაკვეთის ცოცხალი კვეთის იმ უბნებზე, სადაც კალაპოტის გასწვრივ მაქსიმალური სიღრმეები გვაქვს. შემოვიღოთ აღნიშვნები:  $i = \sin Q$  არის კალაპოტის ფსკერის ქანობი.  $P_{\alpha}$  - წნევა, რომელიც მოქმედებს სითხის თავისუფალ ზედაპირზე;  $\alpha$  - კორიოლიტის კოეფიციენტი;  $h$  - ნაკადის ყველაზე დიდი სიღრმე ცოცხალ კვეთში, ცვლადი მოძრაობის მიმართულებით;  $Q$  - ნაკადის ხარჯი მუდმივი მოძრაობის მიმართულებით;  $v = \frac{Q}{\omega}$  - ცოცხალ კვეთში ნაკადის საშუალო სიჩქარე ცვლადი მოძრაობის მიმართულებით;  $J$  - ჰიდრაულიკური ქანობი.

რადგან დაწნევის დანაკარგი სიგრძის ერთეულზე ჰიდრაულიკური ქანობის ტოლია, გვექნება

$$J = \frac{dh_{\text{მე}}}{dl} = - \frac{d\left(z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}\right)}{dl} \quad (9.5.1)$$

აქედან

$$\frac{d}{dl} \left( z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} \right) + J = 0 \quad (9.5.2)$$

საწყისი კვეთიდან 1 მანძილით დაშორებული სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მდებარე B წერტილის მდებარეობის დასახასიათებლად, რომელიც იმავე საწყისი კვეთიდან L მანძილზე მდებარეობს შეგვიძლია დავწეროთ:

$$z = h + (L - l)i \quad (9.5.3)$$

მიღებული ტოლობის გაწარმოება გვაძლევს:

$$\frac{dz}{dl} = \frac{dh}{dl} = -I \quad (9.5.4)$$

მცირედი გარდაქმნითა და იმის გათვალისწინებით რომ  $J = \frac{Q^2}{c^2 \omega^2 R}$  საბოლოოდ მივიღებთ

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{c^2 \omega^2 R} \left( 1 - \frac{\alpha c^2 R \partial \omega}{g \omega} \frac{\partial l}{\partial l} \right)}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} B} \quad (9.5.5)$$

მიღებული დამოკიდებულება არის სითხის დამყარებული ნელცვლადი მოძრაობის ზოგადი დიფერენციალური განტოლება არაპრიზმული ღია კალაპოტებისათვის.

ტრაპეციული განივკვეთიანი არხებისათვის დამოკიდებულება იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i \frac{Q^2}{c^2 \omega^2 R} \left( 1 - \frac{\alpha c^2 R \partial \omega \partial b}{g \omega} \frac{db}{dl} \right)}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} B} \quad (9.5.6)$$

სადაც  $b$  არხის ფსკერის სიგანეა.

იმ შემთხვევაში, როდესაც კალაპოტი პრიზმულია, ე.ი.  $\frac{\partial \omega}{\partial l} = 0$  ანუ  $\frac{db}{dl}$  და მივიღებთ შემდეგ დამოკიდებულებას:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i \frac{Q^2}{c^2 \omega^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} B} = \frac{i - J}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} B} \quad (9.5.7)$$

თუ კალაპოტის გასწვრივ პრიზმულ არხში სიღრმე უცვლელია, ე.ი.  $\frac{dh}{dl} = 0$ , მაშინ გვექნება

$$Q = \omega C \sqrt{Ri} \quad (9.5.8)$$

ე.ი. ვიღებთ თანაბარი მახასიათებელ შეზის განტოლებას, რისთვისაც  $v = \text{const}$ ;  $\omega = \text{constants}$

ნაკადის სიღრმეს, რომელიც თანაბარი მოძრაობის შესაბამისია ნორმალურ სიღრმეს ვუწოდებთ. ნორმალური სიღრმეების შემთხვევაში  $i = J$ , ე.ი. თავისუფალი ზედაპირის ქანობი და კალაპოტის ფსკერის ქანობი ერთმანეთის ტოლია.

ამრიგად, სითხის დამყარებული ნელცვლადი რეჟიმით მოძრაობისას ღია კალაპოტებში შეგვიძლია გამოვყოთ სამი შემთხვევა: 1) თანაბარი მოძრაობა; 2)

არათანაბარი მოძრაობა არაპრიზმულ კალაპოტებში და 3) არათანაბარი მოძრაობა არაპრიზმულ კალაპოტებში.

მიღებული დამოკიდებულებების გარდაქმნით მივიღებთ შემდეგ დამოკიდებულებას:

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B = \frac{\frac{2\alpha v^2}{2g}}{h_{\text{შეშ}}} \quad (9.5.9)$$

როგორც ამ დამოკიდებულებებიდან ჩანს  $\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B$  სიდიდე გამოსახავს ცოცხალ კვეთში კუთრი კინეტიკური ენერჯის ფარდობას ნაკადის საშუალო სიჩქარით გამოთვლილ კუთრ პოტენციურ ენერჯიასთან, ამრიგად მოყვანილი სიდიდე ახასიათებს ნაკადის ენერგეტიკულ აგებულებას. ამ უგანზომილებო სიდიდეს  $\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B = \frac{\alpha v^2}{gh_{\text{შეშ}}} = Fr$  ხშირად ფრუდის რიცხვს, ანუ ნაკადის კინეტიკურობის პარამეტრს უწოდებენ.

## თავი 10. სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან (ამოცანები)

### 10.1. წყლის ხარჯისა და გამოდინების სიჩქარის განსაზღვრა

**ამოცანა 1:** განვსაზღვროთ წყლის ხარჯი  $Q$  და გამოდინების სიჩქარე  $V$ , მცირე ზომის  $d=0,03$  მ დიამეტრის თხელკედლიანი წრიული ხვრეტიდან, რომელიც



მოწყობილია დიდი ზომის რეზერვუარის გვერდით კედელში. ხვრეტის ცენტრზე დაწნევა  $H=1$  მ.

**ამოხსნა:** წყლის გამოდინების სიჩქარე განვსაზღვროთ შემდეგი ფორმულით

$$V = \phi_0 \sqrt{2gH} = 0,97 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1} = 4,3 \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$$

სადაც სიჩქარის კოეფიციენტი  $\phi_0=0,97$ . ხვრეტიდან გამოდინებული ხარჯი გამოვიანგარიშოთ შემდეგი ფორმულით

$$\begin{aligned} Q &= \varepsilon_0 \phi_0 \omega \sqrt{2gH} = \mu_0 \omega \sqrt{2gH} = 0,62 \frac{3,14 \cdot 0,003^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1} \\ &= 0,00191 \frac{\text{მ}^3}{\text{წმ}} = 1,91 \text{ ლ/წმ} \end{aligned}$$

სადაც ხარჯის კოეფიციენტი  $\mu_0 = 0,62$ .

## 10.2. რეზერვუარის ფსკერიდან გამოდინებული წყლის ხარჯის განსაზღვრა

**ამოცანა 2:** განვსაზღვროთ რეზერვუარის ფსკერზე მოწყობილი კოლოიდური ნაცმიდან, რომლის დიამეტრია  $d=1$  სმ. გამოდინებული წყლის ხარჯი, თუ რეზერვუარში შენარჩუნებულია მუდმივი დაწნევა,  $H=4$  მ. და ხარჯის კოეფიციენტი  $\mu_0=0,98$ .

**ამოხსნა:** ნაცმიდან გამოდინებული წყლის ხარჯი განისაზღვრება ხვრეტიდან გამოდინებული ხარჯის ანალოგიურად, ე. ი. ვსარგებლობთ ფორმულით

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2gH} = 0,98 \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 4} = 0,0007 \frac{\text{მ}^3}{\text{წმ}}$$

$$= 0,7 \text{ ლ/წმ}$$

### 10.3. ცილინდრული ფორმის რეზერვუარის დაცლის დროის განსაზღვრა

**ამოცანა 1:** განვსაზღვროთ ცილინდრული ფორმის რეზერვუარის დაცლის დრო, თუ მისი ფსკერის ცენტრში მოწყობილია წრიული ხვრეტი, რომლის ფართობი  $\omega = 100 \text{ სმ}^2$ , რეზერვუარის დიამეტრი  $d=2,1 \text{ მ}$ , მასში წყლის დგომის სიმაღლე  $H_1=5 \text{ მ}$ .

**ამოხსნა:** ცვლადი დაწნევის შემთხვევაში ვისარგებლოთ ჭურჭლის დაცლისთვის საჭირო დროის გამოსათვლელი შემდეგი ფორმულით

$$T = \frac{2\Omega\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}}$$

სადაც რეზერვუარის ფსკერის ფართობი  $\Omega = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2,1^2}{4} = 3,46 \text{ მ}^2$

ხარჯის კოეფიციენტი მივიღოთ თხელკედლიანი ხვრეტებისათვის  $\mu=0,62$ . მაშინ

$$T = \frac{2 \cdot 3,46\sqrt{5}}{0,62 \cdot 0,01\sqrt{2 \cdot 9,8}} = 739 \text{ წმ.} \approx 12 \text{ წთ.}$$

## თავი. 11. ღვარცოფული ნაკადების ჰიდრაულიკა

### 11.1. ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობის თავისებურებანი

ღვარცოფული ნაკადები ძირითადად ფორმირდებიან ეროზიულ ღრანტეებში, რომლებიც წარმოადგენენ მთის წყალსადინრების კალაპოტების სისტემას. ბუნებრივ პირობებში თიხაწარმომქმნელი მთის ქანები განუწყვეტლივ იშლებიან სხვადასხვა მეტეოროლოგიური და კლიმატური ფაქტორების ზეგავლენით, განიცდიან მსხვრევას და დაქუცმაცებას. ამ პროცესების შედეგად წარმოქმნილი მასა ღვარცოფულ ნაკადში კალაპოტიდან იერთებს ღორღს, ავსებს ნამსხვრევებს შორის სიცარიელებებს. ეს პროცესი არც თუ ისე იშვიათად თავდება ღვარცოფული ნაკადის ერთ-ერთი ნაირსახეობის - **ბმული ღვარცოფის** წარმოქმნით, რომელიც შეიცავს მასით 80÷90 % მყარ მასალას (მათ შორის 3÷6% კოლოიდურ ნაწილაკებს) და 10÷20% წყალს. ასეთნაირად წარმოქმნილი ღვარცოფული ნარევი იმყოფება ბმულ (სტუქტურულ) და მდგრადობის თვალსაზრისით, კრიტიკულ მდგომარეობაში - საკმარისია თავსხმა წვიმა, თოვლის ინტენსიური დნობა, ქანების ჩამოქცევა ან სხვა რომელიმე ხელშემწყობი ფაქტორი, რომ ამ ნარევმა დაიწყოს ქვევით, დაბლობისაკენ გადაადგილება კლდის ნამსხვრევების და კალაპოტის ძველი ნალექების მიერთებით.

ბმულ ღვარცოფულ ნაკადად წოდებული მსგავსი ტალახოვან-ქვიანი ნარევის სიმკვრივე იცვლება  $1700 \div 2500$  კგ/მ<sup>3</sup> ფარგლებში; მასში ე.წ. „ცემენტის“ როლს ასრულებს ტალახოვანი კომპონენტი, რომელიც წარმოადგენს წვრილმარცვლოვანი კოლოიდურ-თიხაწარმომქმნლი მასალის ნარევის და შეიცავს წყლის მცირე რაოდენობას. აღნიშნულის გამო, ნარიყის კონუსზე გამოსვლის დროს მოძრაობის სიჩქარის შემცირებასთან ერთად არ ხდება ბმული ღვარცოფულ ნაკადიდან მსხვილი მინარევების განცალკევებული დარიყვა.

მსგავსი ნაკადების ფორმირება შესაძლებელია აგრეთვე შიშველ ციცაბო ფერდობებზე. მთის წყალსადინარების ზედა უბნებზე ხანგრძლივი გვალვების შემდეგ თავსხმა წვიმების დროს. გვალვის შედეგად ნიადაგის ზედაპირი იფარება წყალგაუმტარი მტვრის ფენით; ამის გამო ხდება წვიმის ნალექების ჩამოდინება ტალახიანი მასის სახით, რომელიც თავის მოძრაობისას იერთებს ნამსხვრევი მასალის დიდ რაოდენობას. ამგვარად ფორმირებულ მასას შეუძლია იმოძრაოს წყალსადინარის კალაპოტში არაბმული ღვარცოფული ნაკადის სახით (ცხრილი 11.1.1).

არაბმული (ტურბულენტური) ღვარცოფული ნაკადი წარმოადგენს მთის თხიერი ჩამონადენის ნაირსახეობას, რომელიც ახორციელებს ფართო სპექტრის გრანულომეტრიული შემადგენლობის მქონე მთის ქანების ნგრევის პროდუქტების ტრანსპორტირებას, ხასიათდება უეცარი წარმოქმნით. მოქმედების მცირე ხანგრძლივობით

და დიდი კინეტიკური ენერგიით; შეიცავს არა უმეტეს 20÷30% ნებისმიერ მინარევებს (მასის მიხედვით); წვრილი დისპერსიული თიხოვან-კოლოიდური ნაწილაკები უმნიშვნელო რაოდენობისა ან საერთოდ ნარევი არ არის; გაჩერებისას ნაკადი იშლება შემადგენელ ნაწილებად, მისი სიმკვრივე იცვლება 1100÷1700 კგ/მ<sup>3</sup> ფარგლებში.

სიმკვრივე წარმოადგენს ღვარცოფული ნაკადების ორ ძირითად ნაირსახეობად დაყოფის აუცილებელ, მაგრამ არასაკმარის პირობას. ბმული ღვარცოფული ნაკადისათვის დამატებითი (თუ ძირითადი არა) მახასიათებლებია მისი რეოლოგიური მაჩვენებლები - დინამიკური სიბლანტე, საწყისი ძვრის წინაღობა და ძვრის მოდული, რომლებიც მოიცავენ გარემოს, როგორც რეოლოგიური მთლიანობის, კონცენტრაციული და დამაბულ-დეფორმაციული მდგომარეობის პრაქტიკულად მთელ სპექტრს. ამგვარად, ბმული ღვარცოფული ნაკადების რეოლოგიური თვისებები ახდენენ ძირითადი კომპონენტების რაოდენობრივი შემცვლელობის იდენტიფიკაციას და აგრეთვე ითვალისწინებენ ქვიანი შემადგენლობის ფორმის გავლენასაც, რაც ასრულებს მნიშვნელოვან როლს ნაკადის მოძრაობისადმი წინააღმდეგობაში.

მოძრაობის რეჟიმებთან დაკავშირებით აღსანიშნავია, რომ ბმული ღვარცოფული ნაკადის მოძრაობის რეჟიმი შესაძლებელია იყოს სტრუქტურულ-ლამინარული, ლამინარული (შედარებით მაღალი კონცენტრაციებისა და დაბალი სიჩქარეების

შემთხვევაში) და ტურბულენტურიც კი (შედარებით დაბალი კონცენტრაციებისა და მაღალი სიჩქარეების

ცხრილი 11.1.1. დვარცოვმატარებელ აუზებში დროებით მოქმედი ნაკადების მახასიათებელი

ბმული ნაწილი დანიშნულება	მომრავი ნაკადის დახასიათება	მოძრაობის დაწყების მიზეზი	მოქმედების ხანგრძლივობა	მატრამსპორტირებული გარემო	წარმოქმნის ადგილი
ბმული	ტალახოვან ქვიან მასა შედგება კლდის ნაშბერეებისგან, ქვების, ხრშისა და დვარცოვების ტალახოვანი შემადგენლისგან. მყარი მასალა 80±90 %, წყალი 10±20 % ტალახოვან მასაში, ბმულ მდგომარეობაში. მოცულობითი წონა 1700±2500 კგ/მ <sup>3</sup> .	თავსებში, მიწისძვრები, ჩამოქცევები ღვარცოვის წარმოქმნის კერებში, მეცნარეების ქვეშ მყოფი მასები.	<2	ტალახოვანი-ქვიანი მასის კონგლომერატი	დასავლეთი ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი
არა ბმული	წყლის გარემო, გამდიდრებული კოლოიდებით, ნატანი 20±30 % ოდენობით (წონის მიხედვით) ხრშოვანი მასა შეწინილ მდგომარეობაში. ტრანპორტირდება ცალკეული დიდი ქვის ლოდები, ტალახოვანი ნაკადი, მოცულობითი წონა 1100±1700 კგ/მ <sup>3</sup>	თავსებში, თავსებები თოვის დნობასთან ერთად, მთის ტბების, კაშხლების, ჩახურბილი ღვარცოვული მასების გარღვევა, დვარცოვული ნალექების გარეგნება.	<6	წყალი, გამდიდრებული ჰიდროფილური მინერალებისგან შემდგარი კოლოიდური ნატანი	დასავლეთი ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი - დვარცოვის ნაწილი
თავსებური წყალდიდობა	მდვრე წყალი, ნატანი 3±4 % (წონის მიხედვით), ქვიანი წყლის ნაკადი. მოცულობითი წონა 1020±1050 კგ/მ <sup>3</sup>	თავსებში, თავსებები თოვის დნობასთან ერთად, ხერცილების გარღვევა და ა. შ.	-	წყალი	ხეობის მთის კალაპოტები

დროს), რაც მთლიანად განპირობებულია კონცენტრაციულ-სიჩქარული სტრუქტურით. მაშასადამე, მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმი არ არის მხოლოდ არაბმული ღვარცოფული ნაკადის პრეროგატივა.

## **11.2. ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინარების ძირითადი კალაპოტური მახასიათებლები**

თვისობრივი მაჩვენებლების მიხედვით ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინარები თითქმის არ განსხვავდებიან ჩვეულებრივი მთის მდინარეების კალაპოტებისაგან, მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ ღვარცოფული ნაკადების ფორმირების, მათი მოძრაობისა და ნარიყის კონუსზე გამოსვლის სპეციფიკას, აღნიშნული მსგავსება მხოლოდ მოჩვენებითია, ხოლო თუ მხედველობაში მივიღებთ რაოდენობრივი ხასიათის მაჩვენებლებს, მაშინ ეს განსხვავება კიდევ უფრო მეტად საგრძნობია, რაც ჰქმნის იმის აუცილებლობას, რომ ისინი სპეციალურად იქნან მინიშნებულნი.

უპირველესად უნდა აღინიშნოს ის, რომ მთის მდინარეები, რომელთაც არ ახასიათებთ ღვარცოფული ნაკადების გავლა, გამოირჩევიან ყოფითი და წყალმოვარდნებისათვის დამახასიათებელი წყლის ხარჯების საგრძნობლად ნაკლები მნიშვნელობებით. ასე მაგალითად, ნაკადების სიღრმეების შედარების შემთხვევაში, არაღვარცოფული ხასიათის



წყალსადინარებში თუ ნაკადის სიღრმე არ აღემატება 0,1÷0,5 მ. ღვარცოფული ნაკადის სიღრმე ხშირ შემთხვევაში აღწევს 5,0 მეტრამდეც კი. აქედან გამომდინარე, როგორც ამ ნაკადების კალაპოტში მოძრაობის დროს, ასევე მათი გავლის შემდეგ კალაპოტური მახასიათებლები საგრძნობ ცვლილებებს განიცდიან - ეს ეხება კალაპოტის ფიზიკო-მექანიკურ, მორფომეტრიულ და ჰიდრაულიკურ მახასიათებლებს.

ერთ-ერთი ნიშანდობლივი მაჩვენებელი, რითაც გამოირჩევიან ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინარები, ეს არის მკვეთრად გამოსახული ზედა უბანი, სადაც ხდება ძირითადად ღვარცოფული ნაკადების ფორმირება, სატრანზიტო ზონა - ამ უბანზე უპირატესად მოძრაობს უკვე ჩამოყალიბებული ამა თუ იმ სახით ნაკადი, რომლის შევსება კალაპოტური წარმოქმნებით ნაკლებად ხდება, და ნარიყის კონუსი, სადაც ნაკადი კარგავს თავის ძირითად ენერგიას, განიღვრება კალაპოტის გაფართოებულ უბანზე და რიყავს მყარი გამონატანის ძირითად ნაწილს. მყარი ჩამონადენის მხოლოდ ნაწილი აგრძელებს ტრანზიტულად გადაადგილებას მთავარი მდინარის კალაპოტამდე.

რაც შეეხება წყალსადინარის აღნიშნულ უბნებზე კალაპოტური წარმონაქმნების განაწილებას, უნდა აღინიშნოს, რომ ღვარცოფული ნაკადის სახეობის მიხედვით, იქნება იგი ბმული თუ არაბმული, პირველ შემთხვევაში ნაკადის გავლის შემდეგ ნატანების დიამეტრების მიხედვით დახარისხება კალაპოტის

გასწვრივ არ უნდა შეიმჩნეოდეს, ხოლო მეორე შემთხვევაში ამგვარ დახასიათებას მკვეთრად გამოხატული სახე აქვს და ნატანთა დიამეტრები სათავიდან ნარიყის კონუსისაკენ თანდათან მცირდება. აღსანიშნავია ისიც, რომ ბმულ ღვარცოფულ ნაკადებს ახასიათებთ ნარიყის კონუსზე განსაკუთრებით დიდი ზომის, 80 მ<sup>3</sup>-მდე მოცულობის ქვების გამოტანა, რაც აიხსნება ამ ნაკადების მაღალი ტრანსპორტუნარიანობით. ამგვარი ტრანსპორტუნარიანობა არაბმულ ნაკადებს არ გააჩნია.

სათავიდან ნარიყის კონუსისაკენ ღვარცოფული ხასიათის კალაპოტის მორფომეტრიული მახასიათებლებიც განიცდიან ერთგვარ ცვალებადობას. კერძოდ, ზემო წელის უბანზე განივკვეთებს უპირატესად პარაბოლური ფორმა აქვთ, პრაბოლის სიმრუდის რადიუსის შედარებით მცირე მნიშვნელობებით. ხოლო ქვემო წელში შეიმჩნევა სიმრუდის რადიუსის ზრდის ტენდენცია.

წყალსადინარის კალაპოტური წარმონაქმნებით (მყარი ნატანით) მომარაგება ხორციელდება ეროზიული ღრანტეებიდან მთის ქანებისა და აგრეთვე ნაპირის ფერდობების ნგრევის შედეგად წარმოშობილი პროდუქტების ხარჯზე.

მთის რეგიონებში განლაგებული ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინარების საკმაოდ დიდი რაოდენობაა საქართველოში. ისინი იყოფიან ორ ჯგუფად, რომელთაგან პირველს განეკუთვნებიან მთის მარტივი წყალსადინარები,

სუსტად განვითარებული ჰიდროგრაფიული ქსელითა და მხოლოდ ერთი ძირითადი ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინარით, ხოლო მეორეს - ე.წ. რთული წყალსადინარები, რომლებიც შედგებიან ორი ან მეტი რაოდენობის ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინარებისაგან. აღნიშნული ჯგუფის ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინარები განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან როგორც წყალშემკრები აუზების ფართობებით, ისე წყლისა და მყარი ჩამონადენის კვების ხასიათით, ნაკადთა დინამიკური მახასიათებლებით, კალაპოტის მორფომეტრიული მაჩვენებლებით და ა. შ.

ღვარცოფული ხასიათის წყალსადინარების კალაპოტური წარმონაქმნების ძირითადი რაოდენობრივი მახასიათებლები შემდეგია: შინაგანი ხახუნის კუთხე, საშუალო დიამეტრი, რომლის დადგენაც ხდება გრანულომეტრიული შემადგენლობის მრუდის მიხედვით და წვრილფრაქციული ნაწილაკების ჰიდრაულიკური სისხო.

კალაპოტური წარმოქმნების შინაგანი ხახუნის კუთხის დასადგენად ყველაზე მისაღებად შეიძლება ჩაითვალოს სიმსონის მიერ შემოთავაზებული ცხრილი, რომელიც ითვალისწინებს ცალკეული ნაწილაკების არა მარტო დიამეტრს, არამედ მათი ზედაპირის ფორმის ხასიათსაც (იხ. ცხ. 11.2.1).

ამ მახასიათებლის დადგენა შესაძლებელია უშუალო გაზომვების საშუალებითაც.

რაც შეეხება კალაპოტური წარმონაქმნების საშუალო დიამეტრის ანუ გრანულომეტრიული შემადგენლობის განსაზღვრას, იგი შესაძლებელია განხორციელებული იქნას (ნაწილაკების დიამეტრის სიდიდის მიხედვით) სხვადასხვა ზომის საცრების, საწვეთურის (პიპეტის) ან არეომეტრიული მეთოდის გამოყენებით.

განსაზღვრული დიამეტრის მქონე ნაწილაკების ერთობლიობის შინაგანი ხახუნის  $\phi^0$  კუთხის მნიშვნელობები ცხრილი 11.2.1.

ნაწილაკის საშუალო დიამეტრი		შინაგანი ხახუნის კუთხე $\phi^0$		
დიუმებში	მმ-ში	ნაწილაკები ზედაპირზე შვერილებით	ნაწილაკები კუთხოვანი ზედაპირებზე	ნაწილაკები გლუვი ზედაპირებზე
0,01	0,25	32	31,4	29,2
0,05	1,25	34,5	32,9	29,5
0,1	2,54	36,6	33,8	29,9
0,5	12,7	40	37,5	32,5
1	25,4	40,8	39,1	34,8
5	127	42	41,2	38,3
10	254	42,2	41,5	39,2

კალაპოტური წარმონაქმნების გრანულომეტრიული შემადგენლობის დასადგენად შესაძლებელია გამოყენებული იქნეს აგრეთვე შედარებით არაზუსტი,

მაგრამ ნაკლებად შრომატევადი ფოტონალიტიკური მეთოდი, რომელიც ემყარება ნატანის ზედაპირის ფოტოგამოსახულების ანალიტიკურ დამუშავებას. დიდი რაოდენობის მასალების დამუშავების აუცილებლობის შემთხვევაში იყენებენ მიკროსკოპის, სატელევიზიო კამერის, „დრონის“ გადამღების და კომპიუტერული სისტემის ერთობლიობას, რომელიც სათანადო შედეგებს წარმოადგენს ცხრილების სახით.

კალაპოტურ წარმონაქმნებში ნატანების (ნაწილაკების) საშუალო დიამეტრის დადგენა შესაძლებელია შემდეგი დამოკიდებულებით.

$$d_{\text{შუა}} = \frac{\sum d_1 P_1}{100}$$

სადაც  $d_1$  - ცალკეული ნატანის (ნაწილაკის) ან მათი ჯგუფის დიამეტრია;

$P_1$  - ცალკეული ფრაქციის პროცენტული წონითი შეცულობა ნიმუშში.

ზემოთ მოხსენებული მეთოდების გარდა გრანულომეტრიული შემადგენლობის დასადგენად იყენებენ აგრეთვე ე.წ. როზივალის მეთოდს, რომელიც ითვალისწინებს ექსპერიმენტულად დასაბუთებულ ფაქტს იმის შესახებ, რომ მოცულობის ერთეულში არსებული ცალკეული ნაწილაკების ერთიანი მოცულობის ფარდობა მთლიან მოცულობასთან ტოლია ფართობის ერთეულში მოთავსებულ იგივე ზომის ნაწილაკების ერთობლიობის ფართობისა ამ ფართობი განლაგებული ნაწილაკების მთლიან რაოდენობასთან.

ნატანების ერთ-ერთ ძირითად მაჩვენებელს წამოადგენს მათი ჰიდრავლიკური სისხო, რომელიც დგინდება სათანადო ცხრილების მიხედვით, მაგრამ წყლის თიხოვან-კოლოიდურ ხსნარებში ეს სიდიდე განსხვავებული მნიშვნელობისაა და დამოკიდებულია ხსნარის კონცენტრაციაზე.

### **11.3. ღვარცოფული ნარეგებისა და ღვარცოფული ნაკადების ძირითადი რეოლოგიური მოდელები**

რეოლოგია<sup>8</sup>, როგორც მეცნიერება, მოიცავს სხვადასხვა სხეულების ფიზიკური (მექანიკური) მდგომარეობის ფართო სპექტრს, დაწყებული მყარი და დამთავრებული თხევადი ნივთიერებებით. სხეულთა მექანიკური წარმოდგენისაგან განსხვავებით რეოლოგია არ თვლის მნიშვნელოვნად ფიზიკურ განსხვავებას თხევად და მყარ სხეულთა შორის. განსხვავებას იგი ხედავს მხოლოდ რელაქსაციის პერიოდში, ე. ი. დროში, რომელიც შეესაბამება გარდაუვალი დეფორმაციის დროს გარემოში ძაბვის შემცირებას. მაგალითად, სწრაფი დეფორმაციის დროს რელაქსაციის პერიოდით  $10^{-10}$  წმ წყალი მოქმედებს, როგორც მყარი სხეული და პირიქით, შენელებული დეფორმაციის დროს რელაქსაციის პერიოდით  $10^8$  წმ ბეტონი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც დინების თვისების მქონე სხეული. ეს გვიჩვენებს,

---

<sup>8</sup> რეოლოგია - მეცნიერება რეალურ სხეულთა დამაბულობისა, დეფორმაციისა და დენადობას შორის კანონზომიერების დადგენის შესახებ.

რომ ნებისმიერ სხეულს გააჩნია განსაზღვრული თვისებების სპექტრი. ამიტომ არ არის, უცნაური, რომ მთელი მისი დამაბულ-დეფორმაციული მდგომარეობის დიაპაზონში ღვარცოფული ნაკადები შეიძლება მოქმედებდნენ როგორც დრეკად-პლასტიკური, დრეკად-ბლანტი, პლასტიკურ-ბლანტი და ბლანტი სხეულები.

რეოლოგიური განტოლებების საფუძვლად სხეულთა რეოლოგიური თვისებები იყოფიან მარტივ (ფუნდამენტურ) და რთულ (კომბინირებულ) თვისებებად. მარტივი რეოლოგიური თვისებებია: დრეკადობა, პლასტიკურობა და სიბლანტე. მარტივი რეოლოგიური თვისებების კომბინირებით მიიღება რთული რეოლოგიური მოდელები.

დეფორმაციის და მარტივი რეოლოგიური თვისებების  
მახასიათებლები

ცხრილი 11.3.1.

N	მარტივი (ფუნდამენტური) რეოლოგიური თვისებები	ფიზიკური მუდმივა	დეფორმაციის კანონი	მექანიკური ანალოგის პირობითი აღნიშვნა
1	დრეკადობა	G - დრეკადობის მოდული	$\sigma = G\varepsilon$	სპირალური ზამბარა
2	სიბლანტე (ნიუტონის სხეული)	$\mu$ - სიბლანტის კოეფიციენტი	$\sigma = \mu\varepsilon$	დგუში ცილინდრით
3	პლასტიკურობა და სიხისტე	$\tau_0$ - დენადობის ზღვარი	$\tau > \tau_0$	მშრალი ხახუნი

უფრო ცხადი წარმოდგენისათვის რეოლოგიური სხეულის სხვადასხვა თვისებები მიზანშეწონილია განვიხილოთ მათი მექანიკური ანალოგების სახით. ჰუკის დრეკადობის მექანიკური ანალოგიაა ზამზარა, ნიუტონური სიბლანტისა - დგუში, ხოლო ხისტ-პლასტიკური სხეულისა (სენ-ვენანის სხეული) - ერთმანეთზე მოხახუნე ზედაპირები.

რთული რეოლოგიური თვისებების მახასიათებლები  
ცხრილი 11.3.2

#	რთული რეოლოგიური თვისებები (მარტივი, ე. ი. ფუნდამენტალური რეოლოგიური თვისებების კომბინაცია)	პირობითი აღნიშვნა
1	დრეკად-ბლანტი სხეული (მაქსველის სხეული)	სპირალური ზამზარის და დგუშიანი ცილინდრის კომბინაცია

ცხრილ 11.3.1-ში მოცემულია მარტივი რეოლოგიური მოდელების და მათი მექანიკური ანალოგების პირობითი აღნიშვნები, 11.3.2 ცხრილში კი - ერთ-ერთი კომბინირებული რეოლოგიური მოდელთაგანი (მაქსველის სხეული) მისი მექანიკური ანალოგის სახით, რომელიც წარმოადგენს იმიტაციას ბმული ღვარცოფის დახასიათებისათვის.

ცხრილი 11.3.2.-დან ჩანს, რომ მაქსველის სხეული (დრეკად-ბლანტი გარემო) წარმოადგენს დრეკადი და ბლანტი სხეულების მექანიკური ანალოგიების ელემენტარულ კომბინაციას. მაქსველის სხეულში ძალის მოდების შედეგად თავდაპირველად „მუშაობს“ დრეკადი



ელემენტი, განსაზღვრული ზღვრის მიღწევის შემდეგ კი ირთვება ჯერ პლასტიკური, შემდეგ კი სიბლანტის ან დენადობის ელემენტი.

დაკვირვებებმა გვიჩვენეს რომ ანალოგიური პროცესები მიმდინარეობს სხვადასხვა კონსიტენციის ღვარცოფულ ნაკადებშიც. მაქსველის რეოლოგიური მოდელით ბმული ღვარცოფის შესწავლისას დაიშვება გარკვეული ანალოგია რეოლოგიური ბუნების სხეულებთან. არსებობენ უფრო რთული რეოლოგიური მოდელებიც (დრეკად-ბლანტ-პლასტიკური, რთული დრეკად-ბლანტი მცოცავი, დრეკად პლასტიკური სხეულები და სხვა), რომლებიც თავიანთი ბუნებით უფრო ახლოს არიან ბმულ ღვარცოფებთან. მოცემულ კონკრეტულ შემთხვევაში ჩვენი მიზანია მოვძებნოთ შედარებით მარტივი რეოლოგიური მოდელი, რომელიც მოგვცემს ამოცანის მარტივად, მაგრამ პრაქტიკული თვალთახედვით ზუსტად გადაწყვეტის საშუალებას.

ცხადია კონკრეტული ამოცანის გადაწყვეტისას რეოლოგიური მოდელისაგან არ შეიძლება მოვითხოვოთ მოდელისა და ანალოგიის ზუსტი დამთხვევა. მოდელი საშუალებას გვაძლევს წარმოვაჩინოთ გარეგნული (ნაწილობრივ შინაგანიც) მსგავსება შესასწავლ სხეულსა და მსგავს ნატურალურ სხეულს შორის, რომლის თვისებები უცნობია.

ღვარცოფული ნაკადის დამაბულ-დეფორმაციული მდგომარეობის რეოლოგიური მოდელით (მაქსველის სხეული) წარმოდგენა საშუალებას გვაძლევს შესაბამისი

განტოლებით გამოვსახოთ დამოკიდებულება საკვლევი სხეულის ძაბვისა და დეფორმაციას შორის. ზოგადი სახით მდგომარეობის რეოლოგიური განტოლება გამოისახება შემდეგი ფორმით:

$$Rb(T_{\square}, T_{\square}) = 0 \quad (11.3.1)$$

სადაც  $Rb$  – რეოლოგიური ფუნქციაა;

$T_{\square}$  - ძაბვის ტენზორი;

$T_{\square}$  - ძაბვის დევიატორი.

უნდა ავღნიშნოთ რომ ღვარცოფებთან დაკავშირებული საკითხების ანალიზისას მკვლევართა უმრავლესობა, სიმარტივის გამო, იყენებს შვედოვ-ბინგამის რეოლოგიურ მოდელს. ეს მოდელი მაქსველის მოდელის კერძო შემთხვევას წარმოადგენს. ამიტომ, ცხადია, უპორატესობა ამ უკანასკნელს ენიჭება.

განსახილველი სხეულის სახისა და მისი დამაბუღ-დეფორმაციული მდგომარეობის თანახმად ხდება შესაბამისი მოძრაობის განტოლების წარმოდგენა, რაც მოცემულია შემდგომ პარაგრაფებში.

## **თავი 12. ღვარცოფის ძირითადი ფიზიკო-მექანიკური და რეოლოგიური მახასიათებლები**

### **12.1. ღვარცოფის გრანულომეტრული შემადგენლობა**

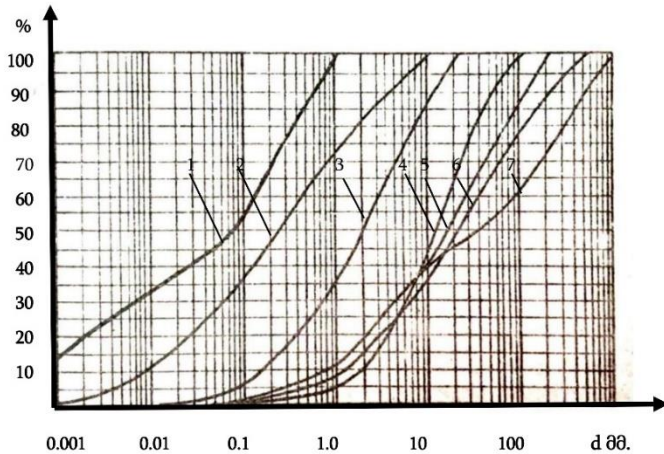
როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ღვარცოფული ნაკადი წარმოადგენს ორფაზიან სისტემას, რომელიც შედგება მყარი მინარევებისა და წყლის კომპონენტებისაგან. სწორედ ეს შემადგენელი ნაწილები,

უფრო ზუსტად კი მათი ფარდობითი შემაღეწეწლობა, განსაზღვრავენ ნაკადის სიმკვრივეს, რეოლოგიურ მუდმივებს - სიბლანტეს, ძვრის საწყის წინაღობას და ძვრის მოდულს. ღვარცოფული ნაკადის ამ მახასიათებლების შეფასებისას წყლის შემცვლელობასთან ერთად განმსაზღვრელ ფაქტორს წარმოადგენს ნარევის გრანულომეტრული შემაღეწეწლობა.

ღვარცოფული ნაკადის გრანულომეტრული შემაღეწეწლობა მისი წარმოშობის მიხედვით შეიძლება იყოს სხვადასხვანაირი. ამასთან ერთად გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს თიხოვან-კოლოიდურ ფრაქციას, რომელიც წყალთან ერთად განსაზღვრავს ნაკადის მოძრაობის ბუნებასა და ხასიათს.

ბმული ღვარცოფული ნაკადის გრანულომეტრული შემაღეწეწლობა წყალსადინარში მოძრაობის დროს, ფორმირების ადგილიდან ნარიყის კონუსამდე, არ იცვლება, რადგანაც მოძრაობისა და თვით სრული გაჩერების დროსაც კი იგი არ იშლება შემაღეწეწელ ნაწილებად. არაბმული ღვარცოფული ნაკადები კი, ბმული ღვარცოფისაგან განსხვავებით, წარმოადგენენ წყლისა და მყარი მასალის მექანიკურ ნარევეს, ღვარცოფის ამ სახეობის გრანულომეტრული შემაღეწეწლობა იცვლება მსხვილ-ფრაქციულიდან წვრილფრაქციულამდე მდინარის სათავიდან ნარიყის კონუსამდე, სადაც ნაკადი იშლება შემაღეწეწელ ნაწილებად. მყარი მასალა გამოიყოფა და ილექება კალაპოტის ფსკერზე. თხევადი ფრაქცია კი თიხოვან-კოლოიდურ ნატანთან ერთად აგრძელებს მოძრაობას.

ამჟამად ღვარცოფული ნაკადების გრანულო-მეტრული შემადგენლობის შეფასების და ანალიზისათვის დაგროვილია საკმარისი დიდი მოცულობის მასალა. 12.1.1. ცხრილში მაგალითის სახით მოცემულია ბმული ღვარცოფული ნარევის ყოველი ფრაქციის წონითი და მოცულობითი შემადგენლობა, წყლის კომპონენტის გათვალისწინებით.



ნახ. 12.1.1. ღვარცოფული ნაკადებისა და ღვარცოფული წარმონაქმნების გრანულომეტრიული შემადგენლობის მრუდები

ინტეგრალური მრუდების სახით წარმოდგენილი სხვადასხვა რეგიონების ღვარცოფების გრანულომეტრული შემადგენლობის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მაღალი

სიმკვრივის ღვარცოფისათვის ეს შემადგენლობები მცირედ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან.

12.1.1.-ნახაზე მოცემული გრანულომეტრიული მრუდების შეფასების შედეგად შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ პრაქტიკულად ყველა შემთხვევაში შეინიშნება წვრილ-დისპერსიული თიხოვან-კოლოიდური ნაწილაკების არსებობა, რომლებიც ღვარცოფულ ნაკადებს ანიჭებენ რეოლოგიური სისტემებისათვის დამახასიათებელ თვისებებს.

ამ ნაწილაკების შემცველობა 1 მმ-ზე ნაკლები სისხოს მქონე ფრაქციაში შეადგენს 10±35%-ს (მასით), ხოლო მთელ გრანულომეტრიულ შემადგენლობასთან შედარებით, თუ კი გავითვალისწინებთ, რომ წვრილდისპერსიულ კოლოიდურ ნაწილაკებს განეკუთვნებიან 0,001 მმ-ზე ნაკლები ფრაქციები - არაუმეტეს 10%.

უნდა აღინიშნოს რომ გრანულომეტრიული შემადგენლობის მიხედვით განსაზღვრული გრუნტების არსებული კლასიფიკაციები განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. მათში არ არის ერთსახოვანი, მკვეთრად განსაზღვრული ზღვარი (ცხრილი 12.1.2.). ეს გარკვეულწილად აძნელებს ამა თუ იმ ზომის ნაწილაკების მიკუთვნებას გრუნტის განსაზღვრულ ფრაქციებთან.

ასეთივე უზუსტობა არსებობს სხვა, შედარებით უფრო მსხვილი ნაწილაკების მიმართაც. ერთი შეხედვით ამ უმნიშვნელო განსხვავებებმა არ უნდა შეუქმნან განსაკუთრებული უხერხულობა გრუნტების სპეციალისტებს, მაგრამ ღვარცოფების შესწავლისას ეს

მნიშვნელოვანია, რადგანაც მოცემულ შემთხვევაში ყურადღება უნდა მიექცეს არა მარტო გრუნტის ფრაქციულ შემადგენლობას, ყოველი ფრაქციის რაოდენობრივი შემცვლელობის გათვალისწინებით, არამედ წყალთან მათ ურთიერთქმედებასაც, რადგანაც ამ დროს სხვადასხვა ფრაქციების თვისებები სხვადასხვანაირად ვლინდება.

ბმული ღვარცოფული ნაკადის გრანულომეტრული შემადგენლობა

ცხრილი 12.1.1.

ღვარცოფული ნარევის შემადგენლობა	მასის მიხედვით. %	მოცულობის მიხედვით. %
მყარი ჩანართები მთელ ღვარცოფულ ნარევთან შეფარდებით. მათ შორის:	80÷90	60,2÷77,4
- ქვები ზემოთ > 0,001÷1,0 მმ	30÷40	22,5÷34,4
- ხრეში, ღორღი, მსხვილი ქვიშა, 1÷30 მმ	20÷30	15,0÷25,8
- წვრილი ჩანართები 0,0001÷1,0 მმ	26,7÷16,5	20,0÷14,2
- კოლოიდური ნაწილაკები 0,001 მმ	3,3÷3,5	2,5÷3,0
- წყლის შემცვლელობა	10÷20	22,6÷39,8

უნდა აღინიშნოს, რომ მკვლევართა უმეტესობა ღვარცოფის გრანულომეტრიული შემადგენლობის მთელი სპექტრიდან განსაკუთრებულ ყურადღებას აქცევს 1 მმ-ზე ნაკლები სისხოს მქონე ფრაქციას. ეს იმით აიხსნება, რომ ამ ნაწილაკების არსებობა ანიჭებს ღვარცოფებს მაღალ ტრანსპორტუნარიანობას, მკვერად გამოხატულ რეოლოგიურ თვისებებს მოძრაობისა და გაჩერების დროს.

მაგრამ, ამ შემთხვევაში წარმოიშობა კითხვა იმის შესახებ, რომ არსებული კლასიფიკაციის შესაბამისად, 1 მმ-ზე ნაკლებ დიაპაზონში არსებობს ერთის მხრივ ქვიშის ნაწილაკები, რომლებიც წყალთან ურთიერთქმედების დროს წარმოქმნიან მხოლოდ არამდგრად მექანიკურ ნარევეს, ხოლო მეორეს მხრივ - კოლოიდური, თიხისებრი და მტვრის სახის ნაწილაკები, რომლებიც წყალთან ერთად ქმნიან რეოლოგიური თვისებების მქონე შედარებით მდგრად ნარევეს.

ცხრილი 12.1.2. ნაწილაკების გრადაცია სხვადასხვა კლასიფიკაციის მიხედვით (მმ)

კლასიფიკაცია	ნაწილაკების დასახელება						
	კოლოიდები	თხა	მტკვრი	ქვიშა	ხრეში	ღორღი	ლოდები, ქვები
ატერგურგი	-	0,002	0,002	2,0	2,0	-	-
ს. ვ. წერტილი	0,001	0,01	0,025	2,00	20,00	-	-
ვ. ვ. ოხოტინი	-	0,00025÷0,005	0,001÷0,1	0,05÷2,0	2,0÷40,0	40÷200	200÷800
ა. ვ. კარაშევი	-	0,001	0,01÷0,10	0,1÷1,0	10÷100	100	-
გრუნტების კლასიფიკაციის ბიურო. ა. შ. შ.	-	0,005	0,005	1,0	2,0	-	-
მასაჩუსეტის ტექნოლოგიური ინსტიტუტი, ა. შ. შ.	-	0,002	0,06	2,0	-	-	-



ეს ნაწილაკები სხვა ცალკეულ ნაწილაკებს მათთვის დამახასიათებელი მოლეკულური და ელექტრო-ქიმიური ძალების ზემოქმედების ორბიტაში, რომლებიც აღწევენ მნიშვნელოვან სიდიდეებს. მაგალითად, მონაცემების მიხედვით ორი სფეროსებრი ნაწილაკის ურთიერთქმედების ძალა მათი უშუალო შეხების დროს, როცა ნაწილაკთა დიამეტრია 5 მმ, აღწევს 0,6 კგ/მ, ხოლო 1 მმ დიამეტრის ნაწილაკებისათვის - 300კგ/მ-ს.

ზემოთაღნიშნულის გამო აუცილებელია 1 მმ-ზე ნაკლები ფრაქციის გამოყოფა ღვარცოფის გრანულომეტრული სპექტრიდან. სწორედ ამით აიხსნება, რომ ღვარცოფის სიბლანტის განმსაზღვრელი პირველივე ექსპერიმენტები განხორციელებული იყო 1 მმ-ზე ნაკლები სისხოს მქონე ფრაქციის სხვადასხვა კონსისტენციის წყალხსნარების საშუალებით.

## **12.2. ღვარცოფულ ნაკადებში წყლის შემცველობის დადგენა**

ღვარცოფული ნაკადების ძირითადი შემადგენელი ნაწილია წყლის კომპონენტი, რომლის გავლენა არაბმულ და ბმულ ღვარცოფებზე სხვადასხვანაირია.

პირველ შემთხვევაში, როგორც აღნიშნული იყო, წყალი წარმოადგენს მატრანსპორტირებელ გარემოს და თიხოვან-კოლოიდურ ფრაქციასთან ერთად უფრო მსხვილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკურ სისხოს შემცირების

გზით ქმნის მაღალი მატრანსპორტირებელი შესაძლებლობის მქონე სუსპენზიას.

მეორე შემთხვევაში, ბმულ ღვარცოფულ ნაკადში, წყლის კომპონენტსა და წვრილდისპერსიულ თიხოვან-კოლოიდურ ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედება უფრო რთულ სახეს ატარებს. გრუნტებში, კერძოდ კი ღვარცოფის წარმოქმნის კერებში და ბმულ ღვარცოფებში, განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ე. წ. ბმულ წყალს<sup>9</sup>, რომლის ფიზიკური მაჩვენებლები (სიმკვრივე, ელექტრო-ქიმიური თვისებები, თბოტევადობა და სხვა) იცვლება მისი რაოდენობრივი შემცვლელიდან დამოკიდებულებით. განსაკუთრებული ელექტრო მოლეკულური, ელექტროქიმიური და სხვა თვისებების გამო წყლის მოლეკულებს თავისუფალ წყალთან შედარებით აქვთ გაცილებით ნაკლები გადაადგილების საშუალება. ანსხვავებენ ბმული წყლის ორ ნაირსახეობას - მყარადბმული და ფხვიერადბმული - რომელთა შორის პირველს განსაკუთრებული ადგილი უკავია ბმული ღვარცოფული ნარევის მდგრადობის შენარჩუნებაში. სხვადასხვა მკვლევარების მიერ განსაზღვრულია, რომ მყარადბმული წყლის სიმკვრივე შეადგენს 1200÷2000კგ/მ<sup>3</sup> და ნაწილობრივ ამითაც აიხსნება ბმული ღვარცოფების სიმკვრივის მაღალი მნიშვნელობა, ამასთან, მყარადბმული წყალი ხასიათდება სიბლანტის, დრეკადობისა და ძვრაზე

---

<sup>9</sup> **ბმული წყალი** (ჰიგროსკოპული, აფსკური, კაპილარული და კრისტალიზაციური წყალი)- ეს არის მიწისქვეშა წყალი, რომელიც არის ქანებთან მოლეკულური ძალებით შეკავშირებული

წინააღმდეგობის გაცელებით მაღალი მნიშვნელობებით, ვიდრე თავისუფალი წყალი.

ის ფაქტი, რომ მყარადბმული წყლის არსებობა თიხოვან, დიოსისებრ და სხვა სახის ბმულ გრუნტებში არა თუ აქვეითებს, არამედ აძლიერებს კიდევაც მათ სიმტკიცეს, აიხსნება იმით, რომ ნაწილაკების გარშემო წყლის მთლიანი აფსკი კი არ წარმოიქმნება, როგორც ეს შეიძლება მოგვეჩვენოს პირველი შეხედვით, და რაც ასუსტებს ნაწილაკებს შორის შეჭიდულობის ძალებს, არამედ ეს მყარადბმული წყალი მოთავსებულია მხოლოდ ცალკეული ნაწილაკების კუთხეებთან და წიბოებთან, ე. ი. ენერგეტიკულად ყველაზე უფრო აქტიურ ადგილებთან, რაც აძლიერებს ნაწილაკებს შორის ურთიერთ შეჭიდულობას. ნაწილაკების ზედაპირების დანარჩენი ნაწილი ე.წ. ბაზალური ანუ წახნაგები წყლოვანი აფსკებიდან (მყარადბმული წყლიდან) თავისუფალნი არიან და მეზობელი ნაწილაკები ამ შემთხვევაში მშრალი წახნაგებით ურთიერთშეხებაში მოდიან ყოველგვარი ურთიერთშეჭიდულობის ძალების გარეშე.

თიხოვან (ან კოლოიდურ) ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების ასეთი მექანიზმი იძენს განსაკუთრებულ მნიშვნელობას, თუ გავითვალისწინებთ მათი ზედაპირების მრავალწახნაგოვან ფორმას. საკმარისია მსგავს გრუნტებში წყლის ისეთი რაოდენობის მოხვედრა, რომ დაიფაროს ნაწილაკების მთლიანი ზედაპირი, რათა მაშინვე დაირღვეს ნაწილაკებს შორის არსებული მყარი კავშირები და გარემო მაშინვე დაკარგავს

მისთვის დამახასიათებელ სიმტკიცეს. ალბათ სწორედ ასეთ მექანიზმს აქვს ადგილი ბმული ღვარცოფული ნარევის სტრუქტურის დარღვევისას, როდესაც წყლის შემცველობა აჭარბებს განსაზღვრულ კრიტიკულ მნიშვნელობას.

ბმულ ღვარცოფებში წყლის რაოდენობის შემცველობის ზღვრები, რომლებიც შეადგენენ მასით 10÷20 %-ს, იცვლებიან წვრილფრაქციული, უფრო ზუსად კი 1 მმ-ზე ნაკლები, ნაწილაკების რაოდენობრივი შემცველობისაგან დამოკიდებულებით: რაც მეტია ეს უკანასკნელი, მით მეტი წყალია საჭირო ღვარცოფული ნარევის ბმული მდგომარეობის შესანარჩუნებლად და პირიქით.

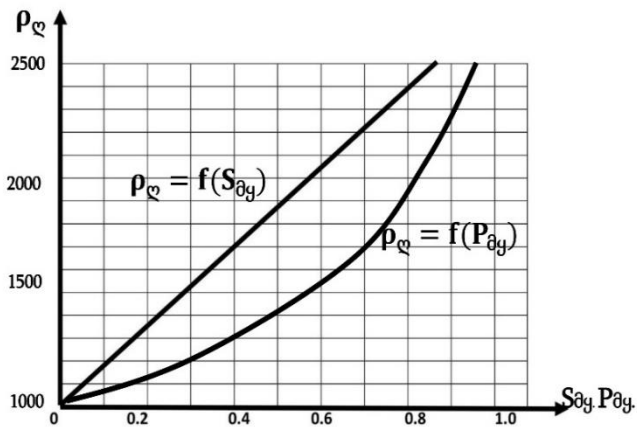
სწორედ წყლის კომპონენტის მყარ კომპონენტთან ურთიერთქმედების ამგვარი მექანიზმიტაა განპირობებული ღვარცოფული ნაკადების ძირითადი ფიზიკური და რეოლოგიური თვისებები - სიმკვრივე, სიბლანტე, ძვრის საწყისი წინაღობა, დრეკადობის მოდული და ა. შ.

### **12.3. ღვარცოფული ნაკადის სიმკვრივის განსაზღვრა**

ღვარცოფული ნაკადის სიმკვრივის განსაზღვრა შესაძლებელია სხვადასხვა მეთოდებით. არსებობს ამ სიდიდის განსაზღვრის რიგი საშუალებები - სინჯის აღება უშუალოდ მოძრავი ახლადგაჩერებული ნაკადიდან,

გაზომვის უკონტაქტო მეთოდი და არსებული საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყენება.

ღვარცოფული ნარევის სიმკვრივის განსაზღვრა მოცულობითი  $S_{მყ}$  ან მასის მიხედვით  $P_{მყ}$  კონცენტრაციის საშუალებით, ზოგ შემთხვევაში უფრო მოსახერხებელია 12.3.1. ნახაზზე წარმოდგენილი გრაფიკის გამოყენებით. ეს გრაფიკი საშუალებას გვაძლევს ღვარცოფული ნაკადებისათვის დამახასიათებელი კონცენტრაციების მთელ დიაპაზონში დავადგინოთ მოცულობითი კონცენტრაცია მასური კონცენტრაციის მიხედვით და პირიქით.



ნახ. 12.3.1. ღვარცოფული ნარევის სიმკვრივე მყარი შემავსებლის მასური  $P_{მყ}$  და მოცულობითი  $S_{მყ}$  კოეფიციენტების მიხედვით

ღვარცოფული ნარევის მინერალოგიური<sup>10</sup> სტრუქტურისა და პოლიფრაქციური შემადგენლობის გათვალისწინების მიზნით შემოთავაზებულია ინფორმაციული მატრიცების მეთოდი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ღვარცოფის სიმკვრივის განსაზღვრისას გავითვალისწინოთ ნარევის არა მხოლოდ ფაზური და გრანულომეტრიული, არამედ მინერალოგიური შემადგენლობაც. ამ მეთოდის თანახმად ღვარცოფის სიმკვრივე წარმოადგენს ფაზურ-გრანულომეტრიული მატრიცისა და სიმკვრივის ფაზურ-გრანულომეტრიული ელემენტების ნამრავლს:

$$\rho_{\square} = DF = \sum_{i=1}^n \rho(i)\varphi(i) \quad (12.3.1)$$

სადაც  $\rho(i)$  - ფიზიკურ-გრანულომეტრიული ელემენტების სიმკვრივეა;

$\varphi(i)$  - ფიზიკურ-გრანულომეტრიული მატრიცის ელემენტები.

რეალური ღვარცოფის მყარი კომპონენტი, როგორც გვიჩვენა გრანულომეტრიული მრუდების ანალიზმა, შედგება მყარი ნატანის ორი სხვადასხვა მინერალური სახისაგან. მათ შორის უნდა გამოვყოთ 0,005 მმ-ზე ნაკლები სისხოს მქონე ნაწილაკები, ე.ი. თიხოვან-კოლოიდური ნაწილაკები, რომელთა სიმკვრივე მინერალური შემადგენლობის მიხედვით იცვლება 1300÷2500 კგ/მ<sup>3</sup> ფარგლებში და 0,005 მმ-ზე მსხვილი

---

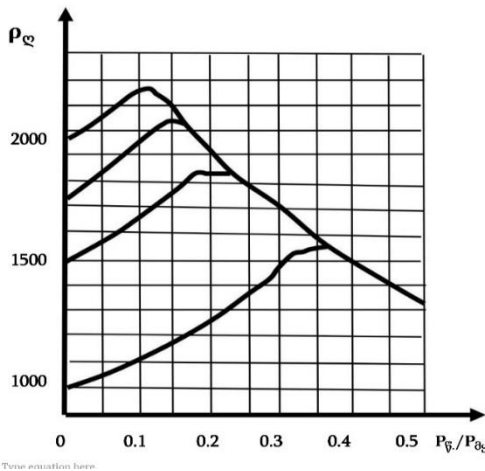
<sup>10</sup> მინერალოგია — მეცნიერება მინერალთა შესახებ. შეისწავლის ბუნებაში მინერალთა წარმოქმნისა და გარდაქმნის პირობებს, მათ შედგენილობას, სტრუქტურასა და თვისებებს.

ნაწილაკები, რომელთა სიმკვრივეა 2650 კგ/მ<sup>3</sup>. ექსპერიმენტული მონაცემების მიხედვით ღვარცოფულ წყალსადინარებში უფრო მეტად გავრცელებულ 1 მმ-ზე ნაკლები სისხოს მქონე ფრაქციებისა და თიხოვანი მინერალების სიმკვრივეა 2200 კგ/მ<sup>3</sup>. ე.ი უფრო ნაკლები ვიდრე 1 მმ-ზე მეტი სისხოს მქონე ნაწილაკებისა. ღვარცოფების მყარი კომპონენტების დაყოფა ორ აღნიშნულ ნაწილაკად მიზანშეწონილია როგორც ფიზიკო-მექანიკური, ისე რეოლოგიური პოზიციიდან. ეს დადასტურებულია საველე დაკვირვებებითაც.

ამ დებულების დასაბუთებისათვის ჩატარებული იყო ცდები, რომელთა დროსაც სხვადასხვა კონცენტრაციის მქონე ღვარცოფების სიმკვრივეები იზომებოდა 254,7 და 32 სმ<sup>3</sup> მოცულობის მქონე ცილინდრული ჭურჭლებით.

ნიმუშების ექსპერიმენტისათვის მომზადებისა და ყოველი მათგანის სიმკვრივის წინასწარი განსაზღვრის დროს დაფიქსირებული იყო, რომ ფუნქცია  $\rho = \rho(P_{\text{წყ}})$  არ იყო ყოველთვის მონოტონური, ე.ი. წყლის კომპონენტის მცირე შემცველობის დროს იგი იზრდებოდა.  $\frac{d\rho_{\text{ღ}}}{dP_{\text{წყ}}} > 0$  და მაქსიმალური მნიშვნელობის მიღწევის შემდეგ ( $\frac{d\rho_{\text{ღ}}}{dP_{\text{წყ}}} = 0$ ) წყლის კომპონენტის ზრდასთან ერთად კლებულობდა (ნახ.12.3.2.). ამგვარი მოვლენა აიხსნება იმით, რომ წყლის პირველი პორციები, რომლებიც ემატებოდა მყარ კომპონენტს (1 მმ-ზე ნაკლები და მეტი სისხოს მქონე ფრაქციებს), არ იყო საკმარისი ღვარცოფული გარემოს

შექმნისათვის და ამიტომ წყლის პროცენტული შემცვლელობის გაზრდა იწვევდა სინჯის გამკვრივებას, ე.ი. სიმკვრივის ზრდას;  $\rho_{\text{ლ}} = f(P_{\text{წყ}})$  ფუნქციის მაქსიმუმი  $\frac{d\rho_{\text{ლ}}}{dP_{\text{წყ}}} = 0$  შეესაბამებოდა მოცემული გრანულომეტრის მქონე სინჯის მაქსიმალურ სიმკვრივეს, რის შემდეგაც სიმკვრივის მნიშვნელობა მცირდებოდა წყლის კომპონენტის შემცვლელობის 20 %-ის (მასით) შესაბამის წერტილამდე. ამ ზღვრის მიღწევის შემდეგ სინჯი იშლებოდა ცალკეულ ნაწილებად - ბმული ღვარცოფული ნარევი როგორც ასეთი, სწყვეტდა თავის არსებობას.



ნახ. 12.3.2.  $\rho_{\text{ლ}} = f(P_{\text{წყ}}, P_{\text{მყ}})$  დამოკიდებულება  $P_{\text{წყ}}/P_{\text{მყ}}$  შეფარდების შემდეგი მნიშვნელობისათვის: 1-0,270; 2-0,340; 3-0,500; 4-1,00



საიმედო შედეგების მიღების მიზნით გათვალისწინებული იყო მხოლოდ ის მონაცემები, რომლებიც შეესაბამებოდა უწყვეტ გარემოს მქონე ნიმუშებს, ე.ი. იმ უბანს, სადაც  $\frac{d\rho_L}{dP_{\text{ფყ}}} < 0$ .

ღვარცოფული ნარევის ამგვარი ბუნების, მისი პოლიფრაქციული შემადგენლობის და სხვადასხვა სიმკვრივის მქონე ჩანართების არსებობის რეალობის გათვალისწინებით სიმკვრივის დასადგენად შემოთავაზებულია შემდეგი ზოგადი გამოსახულება:

$$\rho_{\text{შ}} = \sum_{i=1}^n \prod_{i=1}^n \rho_1 S_1 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n P_1 / \rho_1} \quad (12.3.2)$$

რომელსაც სამ კომპონენტთან სქემისთვის ექნება შემდეგი სახე:

$$\rho_{\text{შ}} = \rho_{\text{შშ}} S_{\text{შშ}} + \rho_{\text{შ}} S_{\text{შ}} + \rho_{\text{შშ}} S_{\text{შშ}} \quad (12.3.3)$$

ანუ

$$\rho_{\text{შ}} = \frac{1}{P_{\text{შშ}}/\rho_{\text{შშ}} + P_{\text{შ}}/\rho_{\text{შ}} + P_{\text{შშ}}/\rho_{\text{შშ}}}$$

(12.3.4)

აქ  $\rho_{\text{შშ}}$ ,  $\rho_{\text{შ}}$ ,  $\rho_{\text{შშ}}$ ,  $P_{\text{შშ}}$ ,  $P_{\text{შ}}$ ,  $P_{\text{შშ}}$  და  $S_{\text{შშ}}$ ,  $S_{\text{შ}}$ ,  $S_{\text{შშ}}$  არის სიმკვრივე, მასური და მოცულობითი კონცენტრაციები შესაბამისად წყლის კომპონენტის, ქვიანი ჩანართებისა და 1 მმ-ზე ნაკლები სისხოს მქონე ფრაქციებისათვის.

ამ დამოკიდებულებების საშუალებით შესაძლებელია სიმკვრივის განსაზღვრა ნიმუშის მასის ან მოცულობის მიხედვით კონცენტრაციისაგან დამოკიდებულებით:

$$\rho_{\text{მე}} = \frac{\rho_{\text{მ}} - \rho_{\text{მმ}} S_{\text{მმ}} - \rho_{\text{მ}} S_{\text{მ}}}{S_{\text{მმ}}} \quad (12.3.5)$$

$$\rho_{\text{მ}} = \frac{\rho_{\text{მ}} - \rho_{\text{მმ}} S_{\text{მმ}} - \rho_{\text{მმ}} S_{\text{მმ}}}{S_{\text{მმ}}} \quad (12.3.6)$$

$$\rho_{\text{მმ}} = \frac{\rho_{\text{მ}} P_{\text{მმ}}}{1 - \rho_{\text{მ}} \left( \frac{P_{\text{მმ}}}{\rho_{\text{მმ}}} + \rho_{\text{მ}} \right)} \quad (12.3.7)$$

$$\rho_{\text{ქ}} = \frac{\rho_{\text{ლ}} P_{\text{ქ}}}{1 - \rho_{\text{ლ}} \left( \frac{P_{\text{ქ}}}{\rho_{\text{ქ}}} + P_{\text{მმ}} / \rho_{\text{მმ}} \right)} \quad (12.3.8)$$

პრაქტიკული გაანგარიშებისათვის ხშირად მიზანშეწონილია აგრეთვე მყარი კომპონენტების მასიური ( $P_{\text{მყ}}$ ) და მოცულობითი ( $S_{\text{მყ}}$ ) კონცენტრაციების განსაზღვრა სხვა მაჩვენებლების მიხედვით:

$$S_{\text{მყ}} = \frac{\frac{P_{\text{მმ}} + P_{\text{ქ}} / \rho_{\text{ქ}}}{\rho_{\text{მმ}}}}{P_{\text{ქ}} / \rho_{\text{ქ}} + \frac{P_{\text{ქ}}}{\rho_{\text{ქ}}} + P_{\text{მმ}} / \rho_{\text{მმ}}} \quad (12.3.9)$$

$$P_{\text{მყ}} = \frac{\rho_{\text{მმ}} S_{\text{მმ}} + \rho_{\text{ქ}} S_{\text{ქ}}}{\rho_{\text{ქ}} S_{\text{ქ}} + \rho_{\text{ქ}} S_{\text{ქ}} + \rho_{\text{მმ}} S_{\text{მმ}}} \quad (12.3.10)$$

ღვარცოფული ნარევის კუთრი (მოცულობითი) წონა სიმკვრივის საშუალებით განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\gamma_{\text{ღ}} = \rho_{\text{ღ}} \quad (12.3.11)$$

რომლის განზომილების ერთეული SI სისტემაში არის ნ/მ<sup>3</sup>.

აღსანიშნავია, რომ მოცულობითი წონის, სიმკვრივის, მასური და მოცულობითი კონცენტრაციების მნიშვნელობების დადგენის შემოთავაზებული მეთოდი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს აგრეთვე წყლისა და მყარი (მათ შორის წვრილფრაქციული) კომპონენტებისაგან

შედგენილი სხვა ისეთი სახის ნარევებისათვის, როგორცაა ბეტონის ნარევი (გამკვრივებამდე), ჭაბურღილების თიხოვანი ხსნარები მყარი ჩანართებით, მადარობში გამომუშავებული სივრცის ამოსავლები ხსნარები, გრუნტების ჰიდრავლიკური მეთოდებით დამუშავების შედეგად მიღებული ნარევები და ა.შ.

#### **12.4. ღვარცოფის სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტის განსაზღვრა**

ღვარცოფული ნარევის რეოლოგიურ ბუნებას და მათ შორის სიბლანტეს სრულად წარმოაჩენენ დროის მიხედვით დეფორმაციის განვითარების კინეტიკის მრუდები, რომლებიც საშუალებას გვაძლევენ მივიღოთ საჭირო ინფორმაცია აღნიშნული გარემოს სიმტკიცესა და დეფორმაციულ მახასიათებლებზე, მათ შორის დრეკადობაზე, სიბლანტესა და მათ კომბინირებულ მახასიათებლებზე. აგრეთვე ავაგოთ გრაფიკები, რომლებიც განსაზღვრავენ დამოკიდებულებას დამაბულობისა და დეფორმაციის სიჩქარეებს შორის სხვადასხვა შემადგენლობის ნარევებისათვის.

ღვარცოფების რეოლოგიური მახასიათებლები ზოგად შემთხვევაში შეიძლება იყვნენ ან არ იყვნენ დამოკიდებულნი დროზე. პირველ შემთხვევაში ღვარცოფულ ნარევს გააჩნია ტიქსოტროპული<sup>11</sup> და

---

<sup>11</sup> ტიქსოტროპია - კომპოზიციური გარემოს სტრუქტურის თანდათანობითი ნარევის პროცესი, რომლის მდგომარეობაც დამოკიდებულია ძვრის სიჩქარის

რეოპექტიური<sup>12</sup> თვისებები, ხოლო მეორე შემთხვევაში ადგილი აქვს დაძაბულობასა და ძვრის სიჩქარეს შორის პროპორციულ დამოკიდებულებას.

ცნობილია, რომ ღვარცოფების რეოდინამიკაში უდიდესი მნიშვნელობა აქვს წვრილ-დისპერსიური, თიხოვან-კოლოიდური ნაწილაკების თუნდაც უმნიშვნელო რაოდენობას მსხვილ-დისპერსიულ ქვიშის მარცვლებსა და მსხვილ ნამსხვრევებთან შედარებით.

რეოლოგიის პოზიციებიდან ღვარცოფების დეფორმაციული თვისებების შესწავლამ გვიჩვენა, რომ ტალახოვანი მდგენელის დეფორმაციის განვითარების კინეტიკის მიღებული მრუდის თანახმად, ძალზე მცირე დაბრუნების შემთხვევაში, ე. ი. დრეკადი დეფორმაციების ზონაში, სიბლანტეს აქვს მაღალი ზღვრული მნიშვნელობა, ხოლო უფრო დიდი დაბრუნების შემთხვევაში იგი მისწრაფვის მუდმივი მნიშვნელობისაკენ, რომელიც განისაზღვრება ნიმუშში მყარი მასალის კონცენტრაციით. ამასთან, დაფიქსირებული იყო, რომ ტალახოვან მდგენელში 1 მმ-ზე მეტი ფრაქციის, მათ შორის ქვების, შემცველობის გაზრდა იწვევს ნარევის სიბლანტის შემცირებას.

ექსპერიმენტების შედეგებისა და სავლელ დაკვირვებების ერთობლივი დამუშავება საშუალებას იძლევა მივიღოთ ემპირიული დამოკიდებულება,

---

სიდიდესა და ხანგრძლივობაზე და აგრეთვე ამ გარემოს უნარზე იზოთერმულ პირობებში აღინიშნოს მექანიკური ზემოქმედებით დარღვეული სტრუქტურა.

<sup>12</sup> რეოპექტია - კომპოზიციური გარემოს უნარი თანდათანობით შექმნას სტრუქტურები ძვრის დროს (ტიქსოტროპიის შებრუნებული პროცესი)

რომლითაც განისაზღვრება დინამიკური სიბლანტე წყლის კომპონენტების, 1 მმ-ზე ნაკლები და 1 მმ-ზე მეტი ფრაქციის მასური კონცენტრაციისა და ქვისებრი ჩანართების საშუალო დიამეტრის  $d_{\square}$  მიხედვით:

$$\mu_{\square} = d_{\square} \exp 35 (P_{\square} - P_{\square}^{0,11}), \text{ ნ. წ/მ}^2 \quad (12.4.1)$$

უნდა აღინიშნოს, რომ ბმული ღვარცოფის დინამიკური სიბლანტის მნიშვნელობა, როდესაც მყარი მასალის მასის მიხედვით კონცენტრაცია  $0,6 \div 0,8$ ,  $P_{\square}$  იცვლება  $0.1 \div 0,8$  ფარგლებში.

დინამიური სიბლანტე ნაკადის ტალახოვანი მდგენელისათვის, როდესაც 1 მმ-ზე ნაკლები ფრაქციის კონცენტრაცია მასის მიხედვით შეადგენს  $0,6 \div 0,8$ , განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\mu_{\square\square} = 10^5 \exp 35 (P_{\square\square} - 0,733), \text{ მ. მ/მ}^2 \quad (12.4.2)$$

როგორც გვიჩვენა ექსპერიმენტული მასალის დამუშავებამ, ღვარცოფებში ქვისებრი მინარევების მასის მიხედვით კონცენტრაციის  $P_{\square}$  გაზრდასთან ერთად. ე.ი. ტალახოვანი მდგენელის კონცენტრაციის შემცირებასთან ერთად, ნარევის სიბლანტე მცირდება. მაგრამ როდესაც ქვისებრი მინარევების კონცენტრაცია ახლოსაა მთელი მასალის კონცენტრაციასთან, ე.ი. როცა  $P_{\square} \rightarrow P_{\square}$  და  $P_{\square\square} \rightarrow 0$ . ცალკეული ქვები ტალახოვანი მდგენელის ნაკლებობის გამო უშუალოდ შედის ერთმანეთთან კონტაქტში და ჰიდროდინამიკური (ნიუტონის) ხახუნის ნაცვლად ადგილი აქვს მშრალ (კულონის) ხახუნს.

ამგვარად ქვისებრი ნატანის კონცენტრაციის ამ ზღვრული ექსტრემალური მნიშვნელობის მიღწევის

შემდეგ ბმული ღვარცოფის დინამიკური სიბლანტე იწყებს მკვეთრ ზრდას.

## 12.5. ღვარცოფულ კერებში საწყისი წინაღობა ძვრაზე

ჩვეულებრივად ღვარცოფული კერების შემადგენელი გრუნტებისაგან მომზადებული ღვარცოფული ნარევი წყალსადინარების ზედა უბნებზე ე.წ. ეროზიულ ღრანტებში, მოწყვეტის მომენტამდე იმყოფება წონასწორობის ზღვრულ მდგომარეობაში, ხოლო ნარიყის კონუსზე გამოსული ღვარცოფული ნაკადები ჩერდებიან ნულზე გაცილებით მეტი დახრის მქონე ქანობზე. ეს ფაქტები ადასტურებენ, რომ ღვარცოფულ ნარევეს გააჩნიათ საწყისი წინაღობა ძვრაზე  $\tau_0$ , რომლის არსებობა განპირობებულია მათი ფიზიკო-მექანიკური სტრუქტურებით, ე.ი. გარკვეული თანაფარდობით თიხოვან კოლოიდური სტრუქტურის, ქვისებრი ჩანართისა და წყლის კომპონენტის არსებობით. ამ კომპონენტების რაოდენობრივი შეფარდებები და წყალსადინარის მორფომეტრული მახასიათებლები განსაზღვრავენ ღვარცოფების მოწყვეტისა და ნაკადის მოძრაობის პირობებს სატრანზიტო ზონაში და ნარიყის კონუსზე.

ბმული ღვარცოფების ძვრაზე საწყისი წინაღობის შესახებ არსებული მონაცემები, ისევე როგორც მონაცემები დინამიკური სიბლანტის შესახებ საჭიროებენ ცდების ჩატარებას მყარი მასალის კონცენტრაციის დიაპაზონის

გაფართოებით, რათა შესაძლებელი იყოს მათი გამოყენება პრაქტიკული გაანგარიშებებისათვის.

ძვრაზე საწყისი წინაღობების მნიშვნელობები, რომლებიც შეესაბამებიან გამოსაკვლევი ღვარცოფების სინჯების ძირითადი კომპონენტების სხვადასხვა შემცვლელობებს (წყლის კომპონენტის, 1 მმ-ზე მეტი და ნაკლები სისხოს მქონე ნაწილაკების ფრაქციების კონცენტრაციები), ვისკოზიმეტრზე განისაზღვრება F ძალის ჩვენების შესაბამისად, რომელიც აიღება დეფორმაციის განვითარების კინეტიკის მრუდებიდან.

ჩატარებული ცდებით ვისკოზიმეტრის მონაცემები შევსებული იყო  $d_p=4$  მმ დიამეტრის მქონე დახრილ ღარზე. ამ ექსპერიმენტებში  $\tau_0$  განისაზღვრებოდა შემდეგი გამოსახულებით:

$$\tau_0 = \gamma_{\square} IR \quad (12.5.1)$$

სადაც ღარის I დახრილობა ფიქსირდებოდა იმ მომენტში, როდესაც ღვარცოფული ნარევის კომპონენტების მოცემული კონცენტრაციების მქონე სინჯი იწყებდა მოძრაობას, ე. ი. როცა ირღვეოდა მისი ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობა.

საველე დაკვირვებისა და ჩატარებული ექსპერიმენტების საფუძველზე მიღებული იქნა დამოკიდებულება, რომლის საშუალებითაც ძირითადი კომპონენტების კონცენტრაციებისა და ქვისებრი ჩანართების დიამეტრის საშუალებით განისაზღვრება ბმული ღვარცოფის საწყისი წინაღობა ძვრაზე:

$$\tau_0 = 5 \cdot 10^6 d_{\text{შ}} \exp 23(P_{\text{შ}} - 0,8P_q^{0,1}), \quad \text{შ}/\text{შ}^2 \quad (12.5.2)$$

ეს ფორმულა მართებულია  $P_{\text{აყ}}=0,6 \div 0,8$  და  $P_{\text{კ}}=0,1 \div 0,8$  მნიშვნელობების დიაპაზონში.

ქვიანი ჩანართების მასის მიხედვით კონცენტრაციის გაზრდა 0,8 - მდე იწვევს  $\tau_0$ -ის შემცირებას, როლო 0,8-ზე მეტად გაზრდა - მის გაზრდას.

## 12.6. დრეკადობის მოდული

ღვარცოფების ამ რეოლოგიურ მახასიათებელს დიდი მნიშვნელობა აქვს, განსაკუთრებით მათი ფორმირების მომენტში, აგრეთვე სატრანზიტო ზონაში და ნარიყის კონუსზე მოძრაობის პროგნოზირებისათვის.

ცნობილია, რომ ღვარცოფების რეოლოგიური ბუნება დეფორმაციის განვითარების განსაზღვრულ ფაზაზე ხასიათდება დრეკადობით, პლასტიკურობითა და სიბლანტით, აგრეთვე ამ თვისებების კომბინაციებით - დრეკად-პლასტიკურობითა და ბლანტ-პლასტიკურობით. სასურველია ყოველივე ამის გათვალისწინება ბმული ღვარცოფების მოძრაობის სხვადასხვა მოდელების აგებისას.

ექსპერიმენტები ღვარცოფების სინჯების დრეკადობის მოდულის  $G$  განსაზღვრისათვის



ჩატარებული იყო კოაქსიალურ<sup>13</sup> ვისკოზიმეტრზე: დრეკადობის მოდულის მონაცემები აღებული იყო იმავე ცდებიდან, რომლებიც ჩატარებული იყო სიბლანტისა და ძვრაზე საწყისი წინააღობის განსაზღვრისათვის.



ნახ. 12.6.1. კოაქსიალური ცილინდრის ვისკოზიმეტრი

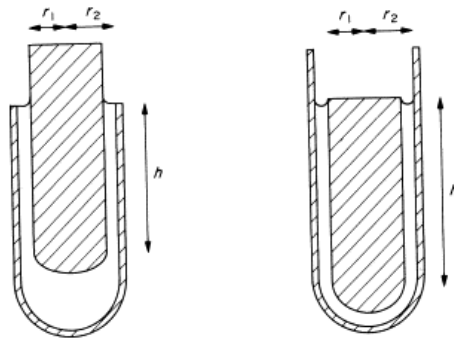
კოაქსიალური ცილინდრის ვისკომეტრი გამოიყენება ნიუტონის და არა-ნიუტონის სითხეების გამოსაკვლევად. როდესაც დინება არანიუტონურია, ურთიერთდამოკიდებულების სიჩქარეს, ბრუნვის სიჩქარესა და გეომეტრიულ ფაქტორებს შორის ურთიერთობა არ არის მარტივი და გამოთვლები გარკვეულწილად გართულებულია. კოაქსიალური ცილინდრის მეთოდის შეზღუდვები, მათ შორის საბოლოო ეფექტების, სრიალის, ტემპერატურის

---

<sup>13</sup> კოაქსიალური ნიშნავს, რომ ორ ან მეტ სამგანზომილებიან ხაზოვან ფორმას საერთო ღერძი აქვს. ამრიგად, იგი კონცენტრულია სამგანზომილებიანი ხაზოვანი ფორმებით.

ცვალებადობისა და ტურბულენტობის შესწორებები, განხილულია სხვაგან.

კოაქსიალური ცილინდრის ვისკომეტრის უმარტივესი ფორმა შედგება გარე ცილინდრისაგან, რომელიც მოქმედებს როგორც შესასწავლი სითხის კონტეინერი და შიდა ცილინდრისაგან, რომელიც ნაწილობრივ ან მთლიანად ჩაფლულია სითხეში და კოაქსიალურად განლაგებულია გარე ცილინდრთან



ნახ. 12.6.2. სქემატური დიაგრამები, რომლებიც აჩვენებს შიდა ცილინდრის რეკომენდებულ პოზიციებს ვისკომეტრში

ერთი ცილინდრი იწყებს ბრუნვას, ხოლო მეორე ფიქსირდება. ნიუტონის სითხის ლამინური ნაკადისთვის, მბრუნავი ცილინდრის კუთხოვანი სიჩქარე უკავშირდება  $G$  ბრუნვას, რომელიც მიღებულია მარგულის განტოლებით

$$\Omega = \frac{G(r_2^2 - r_1^2)}{4\pi h r_1^2 r_2^2} \quad (12.6.1)$$

სადაც  $r_1$  და  $r_2$  არის შესაბამისად შიდა და გარე ცილინდრების რადიუსები და  $h$  არის შიდა ცილინდრის ჩაძირვის სიღრმე. განტოლება მიიღება იმ პირობით, რომ ფიქსირებულ ცილინდრთან სითხე უძრავია, ხოლო მბრუნავ ცილინდრთან ის მოძრაობს  $\Omega$  კუთხოვანი სიჩქარით. ცილინდრის ვისკოზიმეტრი გამოიყენება ბლანტი (პოლიმერული) ხსნარების შესწავლისას და იყენებს მბრუნავ შიდა ცილინდრს, რომელიც თავისუფლად მოძრაობს სითხეში. ეს ცილინდრი ორიენტირებულია რგოლის მენისკის მოქმედებით და აღწევს ჩაძირვის სიღრმეს, რაც დამოკიდებულია მის მასაზე და სითხის სიმკვრივეზე (ნახ. 12.6.2.). მუდმივი ბრუნვა მიიღება გარე მბრუნავი მაგნიტის გამოყენებით, რომელიც მოქმედებს შიდა ცილინდრის შიგნით დაფიქსირებულ ფოლადის ნაჭერზე.

ლაბორატორიული და საველე კვლევების საფუძველზე  $\mu_e$  და  $\tau_0$ -ის ანალოგიურად მიღებულია შემდეგი ემპირიული დამოკიდებულება:

$$G = 2 \cdot 10^5 d_{\square} \exp 35(P_{\square} - P_{\square}^{0,11}), \quad \square/\square^2 \quad (12.6.2)$$

ფორმულა მართებულია როდესაც კონცენტრაციები  $P_{\text{aq}}=0,7 \div 0,9$  და  $P_{\text{f}}=0,3 \div 0,8$ . ამ ფორმულით განსაზღვრული  $G$  იცვლება  $0,1 \div 30$  ნ/მ<sup>2</sup> ფარგლებში. თვალსაჩინოებისათვის ბმული ღვარცოფის სინჯებისათვის მიღებული დრეკადობის მოდული შედარებულია სხვა მასალების დრეკადობის მოდულებთან (ცხრილი 12.6.1.).

საიდანაც ჩანს, რომ ღვარცოფული ნარევის დრეკადობის  $G$  მოდული, რომელიც საკმაოდ დიდ დიაპაზონში იცვლება, ძალზე ახლოსაა თიხის პასტის და სხვადასხვა კონსისტენციების პლასტიკური საცხებების დრეკადობის მოდულებთან.

დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობები სხვადასხვა მასალებისათვის

ცხრილი 12.6.1.

#	მასალის დასახელება	დრეკადობის მოდული $G$ , ნ/მ <sup>2</sup>
1	ნახშირბადიანი ფოლადი	$8,1 \cdot 10^6$
2	თუჯი	$4,0 \cdot 10^6$
3	ტყვია	$0,7 \cdot 10^6$
4	ხე (დეფორმაცია ბოჭკოების გასწვრივ)	$10^5$
5	ბენტონიტური თიხის პასტა	$10,0 \div 35,0$
6	ბმული ღვარცოფის სინჯი	$10^{-4} \div 30$
7	სხვადასხვა კონსისტენციის პლასტიკური საცხები	$5 \cdot 10^{-3} \div 1,5 \cdot 10^{-2}$

## 12.7. ჰიდრავლიკური სიმსხო თიხოვან კოლოიდურ სუსპენზიებში<sup>14</sup>

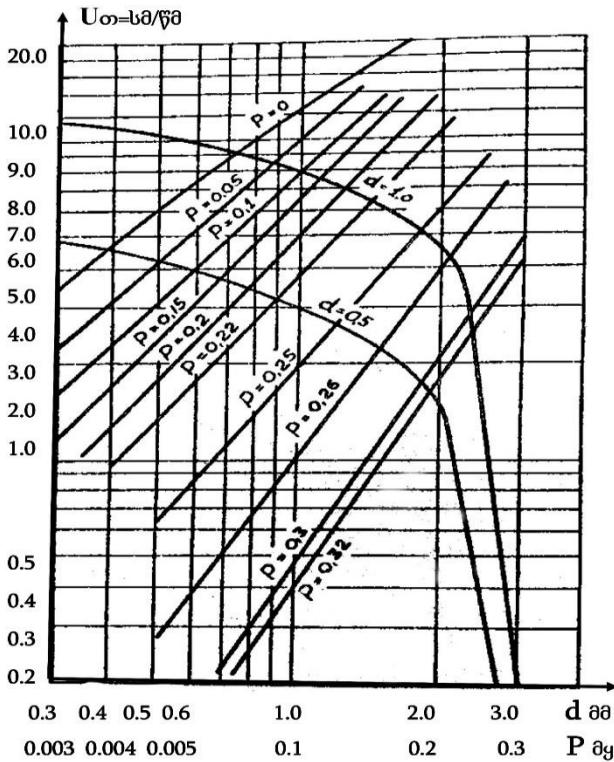
ბუნებრივ პირობებში ბმული ღვარცოფების მოძრაობისას ადგილი აქვს შემთხვევებს, როდესაც ღვარცოფულ ნაკადს უერთდება წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების შედეგად წარმოქმნილი ნაკადი, რომელიც ათხევადებს ღვარცოფულ ნარევს და აქცევს მას სუსპენზიურ ხსნარად. ცნობილია, რომ ღვარცოფებს მათში თიხოვანი და წვრილ დისპერსიული კოლოიდური ნაწილაკების არსებობის გამო ახასიათებთ მაღალი მატრანსპორტირებელი თვისებები, რითაც აიხსნება მათ მიერ სათავეებიდან ნარიყის კონუსზე დიდი რაოდენობის მყარი მასალის გადატანა, ამასთან, ტრანსპორტირებული მყარი მასალის რაოდენობის დადგენისას უნდა გავითვალისწინოთ ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხო.

თიხოვან კოლოიდურ სუსპენზიებში მყარი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს განსაზღვრისათვის ჩატარებული იყო სპეციალური ცდები მოდელოური ხსნარების გამოყენებით, რომელთა საშუალებითაც

---

<sup>14</sup> ნარევი ორი ნივთიერებისა, რომელთაგან ერთი (მყარი) ნივთიერება შეტივტივებულია მეორეში (სითხეში) უმცირესი ნაწილაკების სახით.

ვიზუალურად ხდებოდა სითხეში ნაწილაკების ვარდნის



სიჩქარის დადგენა.

ნახ. 12.7.1.  $u=f(dP)$  დამოკიდებულების მრუდები სხვადასხვა კონცენტრაციის მქონე თიხოვან-კოლოიდური წყალხსნარებისათვის

ტემპერატურული ფაქტორებისა და კონცენტრაციების ვარირებით იყო გლიცერინის წყალხსნარსა და თიხოვან-კოლოიდურ ხსნარს შორის

სიმკვრივის და სიბლანტის სრული იდენტიფიკაცია; მათი კონცენტრაცია მასის მიხედვით იცვლებოდა  $0,08 \pm 0,166$  ფარგლებში.

ექსპერიმენტების შედეგად მიღებულ იქნა ამ ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს  $u=f(d,P)$  საანგარიშო დამოკიდებულებები (ნახ. 12.7.1), მათი თიხოვან-კოლოიდური სუსპენზიის სხვადასხვა კონცენტრაციის წყალხსნარებში დალექვისათვის ( $P=0,19 \pm 0,32$ ).

12.7.1. ნახაზზე მოყვანილი მრუდეებიდან ჩანს, რომ თიხოვან-კოლოიდური სუსპენზიის ფიქსირებული კონცენტრაციის შემთხვევაში ნაწილაკების დიამეტრის გაზრდასთან ერთად მათი ჰიდრავლიკური სისხო იზრდება, ხოლო ნაწილაკების ფიქსირებული დიამეტრებისა და სუსპენზიის მზარდი კონცენტრაციის შემთხვევაში, შესაბამისი მრუდეები მკვეთრად ეშვებიან ქვევით, რაც ნიშნავს ნაწილაკების ვარდნის სიჩქრის საბოლოოდ ნულამდე დაცემას, რასაც შეესაბამება მყარი ჩანართის ბმულ ღვარცოფულ ნაკადში შეტივტივებულ მდგომარეობაში ყოფნა.

სხვადასხვა კონცენტრაციის მქონე თიხოვან-კოლოიდურ ნარევეში ჩამირული ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს მიღებული სკალა საშუალებას გვაძლევს გადავწყვიტოთ ღვარცოფის ტრანსპორტირების უნარის დადგენასთან დაკავშირებული ამოცანები.

## **თავი 13. არაბმული ღვარცოფული ნაკადების დინამიკა**

### **13.1. ორკომპონენტური ნაკადის მოძრაობის**

#### **ერთგანზომილებიანი განტოლებები**

ცნობილია, რომ არაბმულ ღვარცოფულ ნაკადებში საკმაოდ ფართო სპექტრითაა წარმოდგენილი მყარი ფრაქციის გრანულომეტრიული შემადგენლობა. მაგრამ, თიხოვან-კოლოიდური ფრაქციის წყლის ომპონენტთან ნარევი ჰქმნის მაღალი სიბლანტის გარემოს, რომელიც უფრო მსხვილი მინარევების მიმართ ხასიათდება გაზრდილი ტრანსპორტუნარიანობით. არაბმული ღვარცოფული ნაკადის ამ თვისებიდან გამომდინარე და აღნიშნული სქემის გათვალისწინებით განხილული იქნა ორკომპონენტური (წყალი და წვრილფრაქციული ნაწილაკები) გარემო ფაზური გარდაქმნების გათვალისწინების გარეშე. რომლის მოძრაობის აღსაწერად გამოყენებულ იქნა ჰიდროდინამიკის ცნობილი განტოლებები.

ტურბულენტობის ფენომენოლოგიური თეორიის ძირითადი დებულებისა და ჰიდროდინამიკაში ცნობილი ჰიპოთეზის გამოყენების საფუძველზე მიღებული იქნა ნატანდატვირთული გასაშუალებული ტურბულენტური რეჟიმის არასტაციონალური ნაკადის დინამიკის, მასის შენახვისა და უწყვეტობის განტოლებები. ამ განტოლებების გამოყვანის დროს მიღებული დაშვებები, მართალია, რამდენადმე ამცირებენ მათი სიზუსტის ხარისხს და მათ რეალურ მოვლენასთან განსაზღვრულად



მიახლოებულ მოდელს, მაგრამ აღსანიშნავია, რომ მიღებული ჰიპოთეზები და დაშვებები არ ეწინააღმდეგებიან შესაბამისი პროცესის ფიზიკურ არსს. თვისობრივად სწორედ აღწერენ მის ძირითად თვისებებს და, რაც მთავარია, საგრძნობლად იზრდება ამ განტოლებათა ოპერატიული გამოყენების შესაძლებლობები.

მიღებული განტოლებათა სისტემის ბრტყელი, ერთგვაროვანი, სტაციონალური რეჟიმის შესაბამისი ფორმით ჩაწერა, როცა  $OX$  ღეძი ორიენტირებულია მოძრაობის მიმართულებით და ემთხვევა ნაკადის ზედაპირს, ხოლო  $OY$  ღერძი პერპენდიკულარულია  $OX$  ღერძისა, მაშინ აღნიშნულ განტოლებათა ინტეგრირების შედეგად სათანადო საწყისი და სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით შესაძლებელია რიგი ამოცანების გადაწყვეტა და ნაკადის ზოგიერთი ძირითადი მახასიათებლების განსაზღვრა. კერძოდ, როცა  $Y=H$  და  $S=S_{\text{ფ}}$  შესაძლებელია დადგენილ იქნას ნაკადის სიღრმეზე კონცენტრაციის განაწილების კანონი შემდეგი სახით:

$$S = S_{\text{ფ}} \exp\left(\frac{2\eta_1 c w \cos\psi}{K_2 g v}\right) \quad (13.1.1)$$

ხოლო, როცა  $Y=0$  და  $P=P_0$ , ხოლო  $S=S_{\text{ფ}}$ , მაშინ ვლტებულობთ ჰიდროდინამიკური წნევის სიღრმეზე განაწილების კანონს:

$$P = P_0 + \gamma \cos \psi y + (S - S_0) \left[ \frac{(\gamma^* - \gamma) k_2 v}{W} + \frac{2}{3} \delta (\rho - \rho^*) - \left( \frac{2}{\alpha^*} - 1 \right) W^2 \right] \quad (13.1.2)$$

სადაც  $\eta_1 = \frac{\gamma}{H}$  - ფარდობითი სიღრმეა

$\check{H}$  - ნატანდატვირთული ნაკადის სიღრმე;

$C$  - შეზის კოეფიციენტი;

$S$  და  $S_{\Sigma}$  - ნატანდატვირთული ნაკადის მოცულობითი კონცენტრაცია შესაბამისად ზედაპირზე და ფსკერზე;

$\sigma$  - სიდიდე, რომელიც განისაზღვრება  $\sigma = (\rho^* - \rho) / \rho$  გამოსახულების საშუალებით;

$\gamma^* = \rho^* g$ ,  $\gamma = \rho g$  - შესაბამისად ნატანის ნაწილაკებისა და წყლის მოცულობითი წონები;

$P_0$  - ატმოსფერული წნევა;

$W$  - ნატანის ჰიდრაულიკური სისხო სუსპენზიურ გარემოში;

$V$  - წყლის ნაკადის საშუალო სიჩქარე კვეთში;

$K_2 = \alpha^* \frac{K}{K_1}$  - კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს განსხვავებას

მატრანსპორტილებელ და სატრანსპორტირებელი ფაზების ტურბულენტური შერევის

კოეფიციენტებს შორის; იგი დამოკიდებულია ფარდობით სიმკვრივეზე  $(\rho^* / \rho)$ ,

სატრანსფორტირებელი ფაზის ზომასა და ფორმაზე და ნატანის მოცულობით კონცენტრაციაზე.

ნატანდატვირთულ ნაკადში ჰიდროდინამიკური წნევის სიღრმეზე განაწილების მიღებული კანონის და გასაშუალებული სიჩქარის ვექტორის ვერტიკალური მდგენელის განსაზღვრული ფორმით წარმოდგენის შემთხვევაში ნაკადის მთელ ცოცხალ კვეთში ინტეგრირების შემდეგ, როდესაც ნარევის წყლის კომპონენტის სიჩქარე გამოიხატება მთლიანი ნარევის სიჩქარით, **დინამიკის განტოლება** იღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{g_e} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \frac{\tilde{v}(1-\bar{\alpha}_e)}{g_e \bar{\omega}} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \frac{\sigma \tilde{v}}{g_e(1+\sigma S_{\text{საშ}})} \frac{\partial S_{\text{საშ}}}{\partial t} + \frac{\tilde{v}}{g_e \beta} \frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{\bar{\alpha}_e \tilde{v}}{g_e \bar{\omega}} \bar{g} + \frac{\bar{\alpha}_e \tilde{v}}{g_e} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} + \\ & \frac{V^2}{g_e} \frac{\partial^2 \bar{\alpha}}{\partial x^2} + \left[ \frac{\bar{\alpha}_e \tilde{V}^2}{g_e(1+\sigma S_{\text{საშ}})} + \frac{K_z \sigma \nu}{\beta W_e(1+\sigma S_{\text{საშ}})} \right] \frac{\partial S_{\text{საშ}}}{\partial x} + \frac{\bar{\alpha}_e \tilde{V}^2}{g_e \beta} \frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{i_0}{\beta} + \\ & \frac{1}{\gamma \beta(1+\sigma S_{\text{საშ}})} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{K_z}{\beta(1+\sigma S_{\text{საშ}})} \frac{\partial \bar{H}}{\partial x} - \frac{\sigma k_z \nu}{W_0 \beta(1+\sigma S_{\text{საშ}})} \frac{\partial S_0}{\partial x} + \\ & \frac{\sigma k_z (S_{\text{საშ}} - S_0)}{W_0 \beta(1+\sigma S_{\text{საშ}})} \frac{\sigma \nu}{\sigma x} + \frac{\tilde{Y}_{\text{მპ}}^2 P}{\beta} = 0 \end{aligned} \quad (13.1.3)$$

ხოლო შესაბამისი **უწყვეტობის განტოლება**:

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} = \bar{q} \quad (13.1.4)$$

სადაც  $q$  არის ნარევის ხარჯის ცვლის ინტენსივობა, რომელიც განპირობებულია სიგრძეზე ფაზების შემოდინებით და გადინებით;

$\tilde{V}$  - საშუალო სიჩქარე ნარევის განივკვეთში;

$Q$  - ნარევის ხარჯი;

$\bar{\alpha}_e = \bar{\alpha}_0 \beta + \bar{\alpha}_g \beta_e / \beta$  - მოძრაობის

რაოდენობის სრული კორექტივი,

რომელიც ითვალისწინებს  
 გასაშუალებული სიჩქარეების  
 განაწილების უთანაბრობას და სიჩქარის  
 პულსაციას ნაკადის განივკვეთში;

$\tilde{\alpha}_0 = 1 + \frac{\int_{\tilde{\omega}} \varepsilon^2 d\tilde{\omega}}{\bar{V}^2 \tilde{\omega}}$  - მოძრაობის რაოდენობის  
 კორექტივი, რომელიც ითვალისწინებს  
 მხოლოდ გასაშუალებული სიჩქარეების  
 განაწილების უთანაბრობას;

$\tilde{\alpha}_g = \frac{2}{3} \left[ \int_{\tilde{\omega}} b d\tilde{\omega} / \bar{V}^2 \tilde{\omega} \right]$  - ე.წ. პულსაციური  
 წნევა;

$\tilde{Y}_{mp}$  - ყველა დისიპაციური<sup>15</sup> წევრების  
 ჯამი, რომელიც აისახება  
 ნატანდატვირთული ნაკადის  
 ჰიდრაულიკურ ქანობში.

გარდა ამისა, შემოღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$\tilde{\beta} = V/\bar{V} \quad (13.1.5)$$

$$\beta_z = \frac{1+\sigma S_0}{1+\sigma S_{საშ}} \quad (13.1.6)$$

$$g_e = g \cos\varphi \quad (13.1.7)$$

$$i_0 = tg\varphi \quad (13.1.8)$$

---

<sup>15</sup> დისიპაცია - პროცესი, რომელიც ახლავს მექანიკური ენერგიის ნაწილის  
 გარდაქმნას სითბურ ან ნაწილაკების ქაოტურ მოძრაობის ენერგიად.

$$K_z = 1 + \frac{\sigma K_2 v B (S_{\text{საშ}} - s_0)}{W_0 \bar{\omega}} \quad (13.1.9)$$

$$W_0 = W \cos \varphi$$

სადაც B - ნაკადის სიგანეა.

დინამიკისა და უწყვეტობის განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს ღვარცოფული ნაკადის წყლოვან წვრილფრაქციული ნაწილის დაუმყარებელ, გადაადგილების მიმართულებით ფაზების ცვალებადი მასით მოძრაობის ერთგანზომილებიან დიფერენციალურ განტოლებას. აღსანიშნავია, რომ მყარი კომპონენტის არსებობის შემთხვევაში, ე.ი. როცა  $S=0$ , მაშინ ეს განტოლებები გარდაქმნიებიან შესაბამისი წყლის ნაკადის მოძრაობის ერთგანზომილებიან განტოლებად.

### 13.2. დამყარებული არათანაბარი მოძრაობა

წყლოვან-თიხოვან-კოლოიდური ნაკადის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობისათვის ნაკადის ზედაპირზე წნევის ცვლილების მხედველობაში მიღების გარეშე მასის შენახვისა და უწყვეტობის განტოლებების არც თუ ისე რთული გარდაქმნების შედეგად მივიღებთ, რომ:

$$\frac{d\bar{H}}{dx} = \frac{\frac{i_0 - \bar{y}^* m p}{\beta} - \frac{2\bar{\alpha}_* \bar{v}}{g_* \bar{\omega}} \bar{q} - \frac{\bar{v}^2 d\bar{\alpha}_*}{g_* dx} - \frac{k_2 \sigma (s_{\text{საშ}} - s_0) dv}{w_* \beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}}) dx}}{\frac{K_3}{\beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}})}} - \frac{\frac{\bar{\alpha}_* \bar{v}^2 d\beta}{g \beta dx}}{\frac{d\bar{Q}^2}{g_0 \omega^2} B} - \frac{\left[ \frac{\bar{v}^2 \bar{\alpha}_* \sigma}{g_0 (1 + \sigma s_{\text{საშ}})} - \frac{\sigma k_2 v}{w_* \beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}})} \right] \frac{d\bar{s}_{\text{საშ}}}{dx} - \frac{k_2 \sigma v}{w_* \beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}})} \frac{d\bar{s}_0}{dx}}{\frac{k_2}{\beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}})} - \frac{\bar{\alpha}_* \bar{Q}^2}{g_* \omega^2} B} \quad (13.2.1)$$

$$\frac{d\tilde{Q}}{dx} = \tilde{q} \quad (13.2.2)$$

დამოკიდებულებას, სადაც პრაქტიკული ამოცანის გადაწყვეტისას მოძრაობის მიმართულებით სიგრძეზე,  $\tilde{\alpha}_e$  – მოძრაობის რაოდენობის სრული კორექტივის,  $\tilde{S}_0$  – ნატანდატვირთული ნაკადის მოცულობითი კონცენტრაციის შესაბამისად ზედაპირზე და ფსკერზე,  $\tilde{\beta}$ , ცვლილებები შეიძლება უგულვებელყოთ, მიღებული დამოკიდებულება მნიშვნელოვნად მარტივდება და არაპრიზმული კალაპოტებისათვის იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{d\tilde{H}}{dx} = \frac{1 - \tilde{Y}_{mp} + \frac{\alpha_0 C^2 \tilde{R} \tilde{Q}^2}{g \tilde{\omega} k^2} \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial x} \tilde{q} - \left[ \frac{\tilde{d}_0 \tilde{V}^2}{g} + \frac{k_z v}{W_0} \right] \frac{\sigma}{1 + \sigma S_{\tilde{S}0}} \frac{dS_{\tilde{S}0}}{dx}}{\frac{K_3}{1 + \sigma S_{\tilde{S}0}} \frac{\tilde{d} \tilde{Q}^2}{g_0 \omega^2} B} \quad (13.2.3)$$

სადაც  $k^2 = C^2 \omega^2 \tilde{R}$  არის ნატანდატვირთული ნაკადის ხარჯის მოდული.

ამ პარაგრაფში მოყვანილი განტოლება იძლევა ღვარცოფული ნაკადების ჰიდრავლიკის მრავალი პრაქტიკული ამოცანის გადაწყვეტის საშუალებას.

და ბოლოს, ვიდრე გადავალთ მიღებული დამოკიდებულებების პრაქტიკული ამოცანებისათვის გამოყენებაზე, უნდა ავღნიშნოთ, რომ მოსახერხებელია დინამიკის მიღებული განტოლებებისათვის შემოვიტანოთ შემდეგი სახის უგანზომილებო დამოკიდებულება:

$$\frac{k_z}{1 + \sigma S_{\tilde{S}0}} - \frac{W_0 \tilde{\omega} + \sigma k_z v B (S_{\tilde{S}0} - \tilde{S}_0)}{W_0 \tilde{\omega} (1 + \sigma S_{\tilde{S}0})} = N \quad (13.2.4)$$

რომელიც ზოგიერთ შემთხვევაში წარმოადგენს ნაკადის განსაზღვრულ უბანზე უცვლელი, ურთიერთშორის დამოკიდებულების მქონე პარამეტრების ერთობლიობის აღნიშვნას. ეს საგრძნობლად აადვილებს ცელკეულ ჰიდრავლიკურ გაანგარიშებებს.

### **13.3. ნატანდატვირთული ნაკადის წარმოქმნის კრიტერიალური პირობები**

მთის წყალსადინარის სათავეებთან ახლო-მდებარე უბნებზე და სატრანზიტო ზონაში ღვარცოფული ნაკადის წარმოქმნის ერთ-ერთ აუცილებელ პირობად უნდა იყოს მიჩნეული ქვების, ღორღის, კენჭებისა და უფრო წვრილი სახის კალაპოტური წარმონაქმნებისათვის წყლის ნაკადის საშუალო სიჩქარის სიჭარბე ამ წარმონაქმნებისათვის დასაშვებ არაგამრეცხ სიჩქარეებზე.

სიჩქარეების საანგარიშო ამგვარი დამოკიდებულება მრავალწლიური თეორიული, დიდი რაოდენობის საველე და ლაბორატორიული კვლევების შედეგად შემოთავაზებული იქნა აკად. ც. მირცხულავას მიერ; ეს ერთგვარად უნივერსალური დამოკიდებულება აღნიშნული პროცესისათვის დამახასიათებელ თითქმის ყველა უმთავრეს ფაქტორს ითვალისწინებს და საკმაოდ ზუსტ შედეგებს იძლევა. ამ დამოკიდებულებას კალაპოტური წარმონაქმნების სხვადასხვა დიამეტრებისა და პირობებისათვის აქვს შემდეგი სახე:

$$V_{\text{დას}} = \left[ \lg \frac{8,8 H}{d_{\text{ნატ}}} \right] \sqrt{\frac{2m_z}{0,44q^n} [g(\rho_{\text{გრ}} - \rho_0)D_{\text{მოკ}} + 2C_{\text{ნორ}}k]} \quad (13.3.1)$$

სადაც H - ნაკადის სიღრმეა;

$d_{\text{ნატ}}$  - ნატანის დიამეტრი, რომელზეც ნაკლები ზომის ნაწილაკების კალაპოტური წარმონაქმნი შეიცავს 95 %;

$m_z$  - კალაპოტური პროცესის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს კალაპოტისთვის დამახასიათებელ სხვდასხვა ფაქტორებს;

$\rho_0$  - წყლის სიმკვრივე

n - გადატვირთვის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ნაკადის წამრეცხუნარიანობას სიჩქარის პულსაციური ბუნების გათვალისწინებით;

$\rho_{\text{გრ}}$  - გრუნტის ნაკადის სიმკვრივე;

$D_{\text{მოკ}}$  - ბუნებრივად მოკირწლული კალაპოტური წარმონაქმნების საშუალო დიამეტრი;

$C_{\text{ნორ}}$  - მთლიანად დატენიანებული გრუნტის ნორმატიული კუთრი შეჭიდულობა;

K - გრუნტის შეჭიდულობის ძალების საშუალო მნიშვნელობიდან გადახრის ალბათობის დამახასიათებელი კოეფიციენტი.

ამ დამოკიდებულებით სარგებლობისათვის მასში შემავალი პარამეტრების დასადგენად არსებობს სპეციალურად დამუშავებული საანგარიშო ფორმულები, ცხრილები და გრაფიკები.



### 13.4. ნატანდატვირთული ნაკადის კრიტიკული

#### მახასიათებლები

წინა თავში მიღებულ გამოსახულებებში  $dH/dx$  - ის წარმოებული განიცდის წყვეტას, როდესაც მნიშვნელი ნულის ტოლია.  $d\bar{H}/dx$  წარმოებული უწყვეტობის პირობა

$$\frac{\bar{a}_0 \bar{Q}^2}{g_0} = \frac{\bar{\omega}_{\text{მმ}}^2}{B_{\text{მმ}}} N_{\text{მმ}} \quad (13.4.1)$$

ჩვეულებრივი სითხეების ჰიდრავლიკასთან ანალოგიით შეგვიძლია განვიხილოთ წყლოვან-თიხოვან-კოლოიდური ნაკადის ე.წ. „კრიტიკული სიღრმის“ განსაზღვრელი პირობა; ნაკადის კრიტიკული მდგომარეობა ხასიათდება მასში ხვედრითი ენერგიის მინიმუმის არსებობით.  $\bar{H} = h_{\text{კრ}}$  სიღრმეს,  $\bar{V} = V_{\text{კრ}}$  სიჩქარეს და ნაკადის სხვა ელემენტებს ეწოდება კრიტიკული. არათანაბარი მოძრაობის თეორიაში ნაკადის კრიტიკულ ელემენტებს დიდი მნიშვნელობა აქვთ, ამიტომ ქვევით განხილულია სხვადასხვა შემთხვევებისათვის მათი განსაზღვრის მეთოდები.

#### კრიტიკული $h_{\text{კრ}}$ სიღრმის განსაზღვრა

პირველ მიახლოებაში დავუშვათ, რომ  $\sigma K_z = 1$ ;  $1 \gg S_{\text{საშ}} \sigma = S \sigma$ ,  $S_{\text{საშ}} = S \gg S_0$ ; მარტივი გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ:

$$N = N_{\text{მმ}} \cong 1 + \frac{B_{\text{მმ}} \sigma_{\text{მმ}} S}{W \omega_{\text{მმ}}} \quad (13.4.2)$$

ბოლო ორ ტოლობის გამარტივებით მივიღებთ:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{3r}^2}{B_{3r}} + \frac{\omega_{3r}^2 \nu_{\text{მმ}} S}{W} \quad (13.4.3)$$

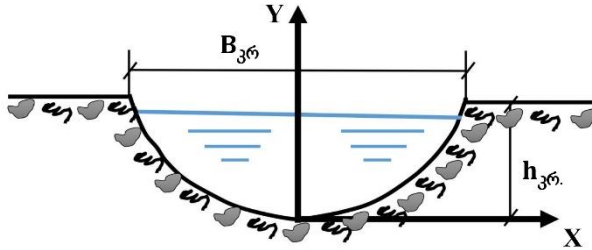
ნარევის ტურბელენტური შერევის კოეფიციენტი გამოვსახოთ ნატანების ტურბელენტური შერევის კოეფიციენტით. შესაბამისი კრიტიკული სიღმისათვის მივიღებთ:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{3r}^2}{B_{3r}} + \frac{\omega_{3r}^2 h_{\text{მმ}} S}{2nk_z} \quad (13.4.4)$$

კალაპოტის კვეთის სწორკუთხა ფორმის შემთხვევაში  $W_{3r} = B_{3r} h_{3r}$ . მაშინ მიღებული ბოლო განტოლებიდან განსაზღვრულ კრიტიკულ სიღრმეს აქვს შემდეგი სახე:

$$h_{3r} = \sqrt{\frac{\alpha q^2}{g(1+S/2nk_z)}} \quad (13.4.5)$$

სადაც  $q$  არის ხარჯი კალაპოტის სიგანე 1 მეტრზე



ნახ. 13.4.1 პარაბოლისებრი არხის განივი კვეთი

გამლილი პარაბოლისებრი ფორმის კალაპოტისათვის  $W_{პრ} = \frac{2}{3} B_{პრ} h_{პრ}$ . ამ შემთხვევაში მივიღებთ:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{8}{9} B_{პრ}^2 h_{პრ}^2 + \frac{2}{g} B_{პრ}^2 h_{პრ}^2 \frac{S}{nk_z} \quad (13.4.6)$$

კალაპოტის პარაბოლისებრი ფორმისათვის (ნახ. 13.4.1) სველი პერიმეტრის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$Y = Px^2 \quad (13.4.7)$$

საიდანაც  $h_{პრ} = \frac{P}{a} B_{პრ}^2$  და  $B_{პრ}^2 = \frac{4h_{პრ}}{P}$

$B_{პრ}$ -ის მნიშვნელობის განტოლებაში ჩასმით და მარტივი გარდაქმნების შედეგად მივიღებთ:

$$h_{პრ} = \sqrt[4]{\frac{27Pnk_z\alpha Q^2}{g(32nk_z+24S)}} \quad (13.4.8)$$

სამკუთხა ფორმის კალაპოტებისათვის ფერდის დახრის „m2” კოეფიციენტით გვაქვს:  $\omega_{3r} = m_2 h_{3r}^2$  და  $B_{\square\square} = 2m_z h_{\square\square}$ , მაშინ მივიღებთ:

$$h_{3r} = \sqrt[5]{\frac{2\alpha Q^2}{m_3^2 g(1+S/nk_z)}} \quad (13.4.9)$$

### კრიტიკული სიჩქარეების ( $V_{3r}$ ) განსაზღვრა

როდესაც სიჩქარე კრიტიკულის ტოლია, მაშინ ნაკადის დანარჩენი ელემენტებიც იქნება კრიტიკული.

ხარჯი გამოვსახოთ სიჩქარის საშუალებით და განვსაზღვროთ ეს უკანასკნელი:

$$V_{3r} = \sqrt{\frac{g(2\omega_{3r}nk_z + B_{3r}h_{3r}S)}{2\alpha B_{3r}nk_z}} \quad (13.4.10)$$

სწორკუთხა განიკვეთის მქონე კალაპოტებისათვის  $W_{\square\square} = B_{\square\square} h_{\square\square}$  ბოლო გამოსახულების ნაცვლად გვექნება

$$V_{3r} = \sqrt{\frac{gh_{3r}(2nk_z + S)}{2\alpha nk_z}} \quad (13.4.11)$$

კალაპოტის პარაბოლისებრი ფორმისათვის  $W_{3r} = \frac{2}{3} B_{3r} h_{3r}$  და შესაბამისად წინა განტოლების ნაცვლად გვექნება:

$$V_{3r} = \sqrt{\frac{gh_{3r}}{2\alpha nk_z} \left[ \frac{4}{3} nk_z + S \right]} \quad (13.4.12)$$

სამკუთხა ფორმის კალაპოტებისათვის  $W_{3r} = 2m_3 h_{3r}$  და მივიღებთ შემდეგი სახის გამოსახულებას:

$$V_{3\text{კ}} = \sqrt{\frac{gh_{3\text{კ}}(2nk_z + S)}{2\alpha nk_z}} \quad (13.4.13)$$

ტრაპეციის ფორმის მქონე კალაპოტებისათვის  $\omega_{3\text{კ}} = h_{3\text{კ}}(b+m_2h_{3\text{კ}})$ ;  $B_{3\text{კ}} = b+2m_3h_{3\text{კ}}$ ; სადაც  $b$  არის არხის სიგანე ფსკერზე.  $m_2$  - ფერდების დახრილობა.  $\omega_{3\text{კ}}$  და  $B_{3\text{კ}}$  - ს მნიშვნელობის ჩასმის შედეგად მივიღებთ:

$$V_{3\text{კ}} = \sqrt{\frac{gh_{3\text{კ}}[2(b+m_2h_{3\text{კ}})nk_z + (b+2m_3h_{3\text{კ}})S]}{\alpha(b+2m_3h_{3\text{კ}})2nk_z}} \quad (13.4.14)$$

თუ ამ უკანასკნელ განტოლებებში კონცენტრაციას მივიღებთ ნულის ტოლად, მაშინ ისინი გარდაიქმნებიან შესაბამის სუფთა წყლის ნაკადის მოძრაობის განტოლებებად.

### ნატანდატვირთული ნაკადის კრიტიკული ქანობის ( $i_{3\text{კ}}$ ) განსაზღვრა

თუ ცნობილია კრიტიკული სიჩქარე, იოლად განისაზღვრება ნაკადის კრიტიკული ქანობი.

თანაბარი რეჟიმის მოძრაობის შემთხვევაში შეზის ფორმულის თანახმად კრიტიკული სიჩქარე ტოლია

$$V_{3\text{კ}} = C_{3\text{კ}} \sqrt{R_{3\text{კ}} i_{3\text{კ}}} \quad (13.4.15)$$

ბოლო განტოლებების გარდაქმნით მივიღებთ

$$i_{3\text{კ}} = \frac{g(2\omega_{3\text{კ}}nk_z + B_{3\text{კ}}h_{3\text{კ}}S)}{2\alpha B_{3\text{კ}}nk_z C_{3\text{კ}}^2 R_{3\text{კ}}} \quad (13.4.16)$$

თვალსაჩონოებისათვის ამ განტოლების გამოყენებით შესაძლებელია განვსაზღვროთ კრიტიკული ქანობები ფართო სწორკუთხა კვეთის არსებისათვის

$$i_{კრ} = \sqrt{\frac{g(2nk_z + S)}{2\alpha C_{კრ}^2 nk_z}} \quad (13.4.17)$$

რამდენად სახეშეცვლილი გამოსახულება აქვთ ფართო პარაბოლური, სამკუთხოვანი, ტრაპეციული და სხვა განივი კვეთის ფორმის არსებებისათვის კანონის საანგარიშო ანალოგიურ დამოკიდებულებებს.

#### **ხარჯის კრიტიკული მოდულის ( $K_{კრ}$ ) განსაზღვრა**

კრიტიკული სიჩქარით ნაკადის თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში ხარჯის მოდულის მნიშვნელობაც კრიტიკული იქნება:

$$k_{კრ} = \frac{Q}{\sqrt{i_{კრ}}} \quad (13.4.18)$$

ხარჯის საშუალებით განსაზღვრული კრიტიკული სიჩქარის გამოსახულებაში  $i_{კრ}$ -ის ჩასმით მივიღებთ:

$$k_{კრ} = \frac{QC_{კრ} \sqrt{\alpha B_{კრ} 2nk_z R_{კრ}}}{\sqrt{(2W_{კრ} nk_z + B_{კრ} h_{კრ} S)g}} \quad (13.4.19)$$

ხარჯის მოდული სწორკუთხა კალაპოტებისათვის განისაზღვრება წინა მაგალითების ანალოგიურად.

$S=0$  შემთხვევაში ყველა მიღებული დამოკიდებულებები გარდაიქმნება შესაბამისად სუფთა წყლის მოძრაობის განტოლებებად.

როგორც ჩანს, ჩვეულებრივი სითხეების ჰიდრაულიკის მსგავსად ადგილი აქვს ნაკადის სამ განსხვავებულ მდგომარეობას: წყნარი, კრიტიკული და მძაფრი, რომლებიც შემდეგი უტოლობით განისაზღვრება:

$$\frac{\tilde{\alpha}_0 \tilde{\omega}^2}{g_0 \tilde{\omega}^2} B \leq N \quad (13.4.20)$$

ასეთ დაყოფას აქვს მხოლოდ ფორმალური მნიშვნელობა, რადგანაც ნაკადის აღნიშნული მახასიათებელი იძლევა საშუალებას დადგენილ იქნას ღვარცოფული ნაკადების ჰიდრაულიკის ამოცანებში სათანადო სასაზღვრო პირობები.

### 13.5 ნატანდატვირთული ნაკადის მდგრადობის კრიტერიალური პირობები

დინამიკის და უწყვეტობის განტოლებათა სისტემის საფუძველზე შესაძლებელია არაბმული ღვარცოფებისათვის განისაზღვროს ნაკადის მდგრადობისა და ტალღების წარმოქმნის კრიტერიალური პირობები დიდ დაქანებებზე და მოძრაობის დროს.

ამ განტოლებათა სისტემის გასწორხაზოვნებით მივიღებთ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial t^2} + 2\tilde{\alpha}_0 \tilde{V}_0 \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial t \partial x} + \left[ \tilde{\alpha}_0 \tilde{V}_0 - N \frac{g_0 \tilde{\omega}_0}{B_0} \right] \frac{\partial^2 \tilde{h}}{\partial x^2} + \frac{2i_0 g_0}{\tilde{V}_0 \beta} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial t} \\ + \frac{i_0 \chi g_0 \tilde{\omega}_0}{\tilde{H}_0 B_0 \beta} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (13.5.1)$$

ხარჯის კრიტიკელი მოდულის განტოლების იმ კერძო ამოსახსნების მონახვა, რომლებიც შეესაბამებინან ნაკადის მოძრაობის გასწვრის შემფოთების ანუ მდგრადობის დარღვევის წარმოშობას, საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ ნაკადის მდგრადობის კრიტერიალური პირობები. ტალღების წარმოქმნის პროგნოზირების შესაძლებლობებით შემდეგი უტოლობის საშუალებით:

$$\frac{1}{F_{r_0}} > \frac{1}{N} (\mu^2 - 2\tilde{\alpha}_0\mu + \tilde{\alpha}_0) \quad (13.5.2)$$

სადაც  $N$  არის უგანზომილებო პარამეტრი, რომელიც წინა პარაგრაფში განვიხილეთ;

$$\mu = \frac{\tilde{\omega}_0 \chi}{2B_0 H_0}; \quad F_{r_0} = \frac{\tilde{V}_0 B_0}{g_0 \tilde{\omega}_0} \quad (13.5.3)$$

ინდექსი „0“ აღნიშნავს, რომ ეს სიდიდეები განსაზღვრულია ნაკადის თანაბარი მოძრაობის დროს, მდგრადობის დაკარგვამდე.

მიღებული უტოლობის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ნატანის კონცენტრაციის, ჰიდრავლიკურ სისხოსა და სიმკვრივის შესაბამისად ნაკადი შეიძლება იყოს მეტად, ან იგივე ხარისხით მდგრადი ეკვივალენტურ წყლის ნაკადთან შედარებით.

აღსანიშნავია, რომ უტოლობის კრიტერიუმი არის მდგრადობის დაკარგვის აუცილებელი, მაგრამ არასაკმარისი პირობა, ტალღების წარმოქმნისათვის ამ უტოლობასთან ერთად უნდა შესრულდეს შემდეგი პირობა:



$$I_{\text{შემაჯობებელი}} > I_{\text{შემაჯობებელი}} \quad (13.5.4)$$

სადაც 1 სწრ. არის სწრაფდენის სრული სიგრძე;

$I_{\text{დაც.მრ}}$  - საანგარიშო ხარჯის შესაბამისი დაცემის მრუდის სიგრძე.

## თავი 14. ბმული ღვარცოფის დინამიკა

### 14.1 ღვარცოფის ეროზიული ღრანტიდან მოწყვეტა და მისი შემდგომი მოძრაობა

ცნობილი ანომალური თვისებების გამო ბმული ღვარცოფები გადაადგილების დროს ხასიათდებიან აგრეთვე უძრაობის, ანუ ე.წ. „მკვდარი“ ზონების არსებობით, რომლებიც ნაწილობრივ განპირობებულნი არიან კალაპოტის განივკვეთის გეომეტრიით. ამ ზონების პარამეტრების დადგენა იძლევა ეროზიული ღრანტიდან მზა ღვარცოფული ნარევის მოწყვეტის რეალური სიღრმის განსაზღვრის საშუალებას, რაც შესაძლებელს ხდის ღვარცოფის ფორმირების პროგნოზირებას.

ბლანტ-პლასტიკური მასის და მათ შორის ღვარცოფების მოძრაობის დროს უძრაობის ზონების არსებობა დასაბუთებულია თეორიულად და დამტკიცებულია ნატურალურ და ლაბორატორიულ პირობებში ჩატარებული ექსპერიმენტებითაც.

ბლანტ-პლასტიკური მასის მოძრაობის მკაცრ მათემატიკურ ჩარჩოებში განხილვასთან დაკავშირებულია განსაზღვრული სირთულეები, რაც განპირობებულია კერძო წარმოებულებიანი არაწრფივი დიფერენციალური

განტოლებების ამოხსნის აუცილებლობით პლასტიკური დინების უცნობი საზღვრების პირობებში. ჩვეულებრივ, ამ სირთულეებს გვერდს უვლიან კვლევის ვარიაციული მეთოდების გამოყენებით. სტაციონარული მოძრაობის შემთხვევაში ამოცანა გაცილებით მარტივდება და დაწნევის მუდმივი  $\gamma_{\square} i$  გრადიენტის შემთხვევაში ( $i = \sin \alpha$ )  $u|_{\square} = 0$  სასაზღვრო პირობებისათვის და ნაკადის კალაპოტის კედელზე მიკრობის პირობების გათვალისწინებით შესაბამისი ფუნქცია აღწევს თავის მინიმუმს. მაგალითად, სამკუთხა კვეთის მქონე არხისათვის (ნახ. 14.1.1.) მოძრაობის არე შედგება  $h$  სისქის მქონე საგრადიენტო შრით (AaDbB კონტურის გასწვრივ მდებარე ფენა) და AaDBA კონტურით შემოსაზღვრული  $h_0$  სისქის მქონე ბირთვისაგან. ამ შემთხვევაში დაწნევის გრადიენტი განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\gamma_{\square} i = \frac{\tau_0}{\sup \frac{mes\omega}{mes\chi}} \quad (14.1.1)$$

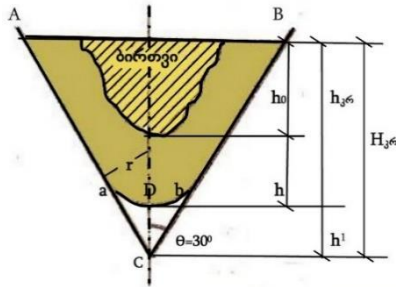
სადაც  $\omega$  არის ნაკადის ცოცხალი კვეთი;

$\chi$  - კალაპოტის სველი პერიმეტრი;

$mes\omega$  - AaDbB კონტურით შემოსაზღვრული ნაწილი, რომელიც უკავია მოძრავ მასას;

$mes\chi$  - AaDbB კონტური, რომლითაც შემოსაზღვრულია  $mes\omega$  ფართობი;

$\sup \frac{mes\omega}{mes\chi}$  - მოძრავი მასის მიერ დაკავებული ფართობის ამ ფართობის შემოსაზღვრულ კონტურთან შეფარდების ზღვრული მნიშვნელობა.



ნახ. 14.1.1. უძრავი ზონის ღვარცოფული ნაკადის კვეთი

მიღებული დამოკიდებულება, რომელიც გამოხატავს ბლანტ-პლასტიკურ გარემოსათვის დამახასიათებელი უძრაობის ზონისა და მისი შემომსაზღვრელი კონტურის ბუნებას, იძლევა  $h$  სიღრმისა,  $w$  ფართობის ( $acbDa$  ფართობის) (ნახ. 14.1.1). აგრეთვე  $mesh_{კრ}$ . ჰიდრავლიკური რადიუსისა და აღნიშნული გარემოსათვის ძვრაზე საწყისი წინაღობის განსაზღვრის საშუალებას, რაც საბოლოო ჯამში შესაძლებელს ხდის დადგინდეს ეროზიული ღრანტედან ღვარცოფის მოწყვეტის ფაქტიური  $h_{კბ}$  სიღრმე. ნაცვლად ფიქტიური  $H_{კრ}$  მოწყვეტის სიღრმისა, სადაც  $h_{კრ} = H_{კრ} - h$ .

დამკრის კონტურის რადიუსი დამოკიდებულია მხოლოდ ღვარცოფის ფიზიკო - მექანიკურ პირობებსა და წყალსადინარის ფსკერის ქანობზე; განიკვეთის ნებისმიერი ფორმის შემთხვევაში იგი განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$r = \frac{\tau_0}{\gamma_{ღ} i} = h_0 \quad (14.1.2)$$

ამ დებულების გათვალისწინებით იოლად შეიძლება განისაზღვროს განიკვეთის სხვადასხვა ფორმის მქონე კალაპოტებისათვის უძრაობის ზონის პარამეტრები.

#### 14.2. ნაკადის თანაბარი მოძრაობა

ბმული ღვარცოფის თანაბარი უდაწნეო მოძრაობა კალაპოტის სწორხაზოვან პრიზმატიულ უბნებზე განიხილება, როგორ ერთიანი სხეულის გადაადგილება ბირთვის ზონაში მეზობელ ფენებს შორის მოძრაობის გარეშე (ნახ. 14.2.1.). ფენებს შორის ძვრას სიჩქარის გრადიენტთან ერთად ადგილი აქვს მხოლოდ შედარებით მცირე სისქის მქონე ზოლში, რომელიც ესაზღვრება კალაპოტის განივი კვეთის პერიმეტრს.

ბმული ღვარცოფის თანაბარი უდაწნეო მოძრაობის აღწერისათვის, მისი ფიზიკო-მექანიკური და რეოლოგიური თვისებების გათვალისწინებით, ამოსავალ პირობად მიღებულია შვედოვ-ბინგამის მოდელი შემდეგი ტოლობის სახით:

$$\tau = \tau_0 \pm \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (14.2.1)$$

სადაც  $\tau$  არის მხევი ძაბვა:

$$\tau = \gamma_l i H \quad (14.2.2)$$

ნახ. 14.2.1. კალაპოტის სწორხაზოვან მონაკვეთზე ბმული ღვარცოფის თანაბარი უდაწნეო მოძრაობის სქემა  $h_0$  ბირთვისა და  $h$  ფსკერისპირა (კედლისპირა) საგრადიენტო შრის გათვალისწინებით.

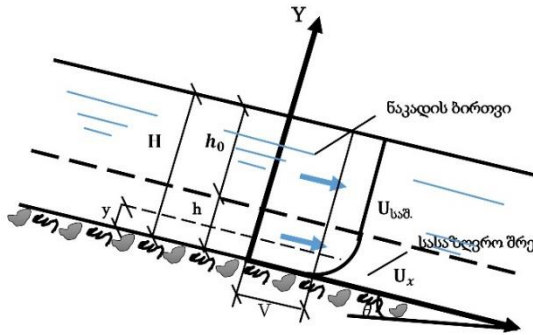
შვედოვ-ბინგამის განტოლების ამოხსნის (გამარტივების) შედეგად ნაკადის საშუალო სიჩქარე განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით

$$V = \frac{\gamma_{\text{ღ}} i H^2 k_i}{3\mu_{\text{ღ}}} \quad (14.2.3)$$

სადაც  $h$  არის საგრადიენტო შრის სიღრმე,  $h = H - h_0$ ;

$$\mu_{\text{ღ}} - \text{განისაზღვრება } \mu_{\text{ფ}} = d_{\text{ფ}} \exp 35 (P_{\text{ფ}y} - P_j^{0,11})$$

დამოკიდებულებით:



ნახ.14.2.1 კალაპოტის სწორხაზოვან მონაკვეთზე ბმული ღვარცოფის თანაბარი უდაწნეო მოძრაობის სქემა  $h_0$  ბირთვისა და  $h$  ფსკერისპირა (კედლისპირა) საგრადიენტო (სასაზღვრო) შრის გათვალისწინებით.

$$k_i = \left[ (h/H)^2 \left( 1,5 - \frac{0,5h}{H} \right) \right] \quad (14.2.4)$$

ნაკადის საშუალო სიჩქარის ფორმულას აქვს გამოყენების ზღვრები, რომლის კრიტერიუმსაც წარმოადგენს რეინოლდის რიცხვი

$$Re_{\text{ლ}} = \frac{VHk_z}{\nu_{\text{ლ}}} \leq 580 \quad (14.2.5)$$

სადაც

$$k_z = (h/H)^2 (1,5 - 0,5h/H) \quad (14.2.6)$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც რეინოლდის რიცხვის პირობა არ სრულდება, ე.ი.  $Re > 580$ , ანგარიში უნდა ვაწარმოოთ არაბმული ღვარცოფის მოძრაობის საშუალო სიჩქარის განმსაზღვრელი ერთ-ერთი აპრობირებული ფორმულით.

### 14.3. ნაკადის არათანაბარი მოძრაობა

ბმული ღვარცოფის ბუნებიდან გამომდინარე, განვიხილოთ პირველ მიახლოებაში მუდმივი სიღრმისა და სიჩქარის გრადიენტის მხოლოდ კალაპოტთან მოსაზღვრე შრის მქონე მასის მოძრაობა. ნაკადის მთელი მოცულობის დინამიკური წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$m \frac{dv}{dt} = G \sin \alpha - \tau \chi I \quad (14.3.1)$$

სადაც  $m$  არის ნაკადის მასა;

$G$  - ნაკადის წონა;

$\chi$  - კალაპოტის სველი პერიმეტრი;

$I$  - მოძრავი ნაკადის სიგრძე.

ბმული ღვარცოფებისათვის დამახასიათებელი სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით ბოლოს მიღებული განტოლების ინტეგრირების შედეგად მივიღებთ **ნაკადის საშუალო სიჩქარის** შემდეგ გამოსახულებას:

$$v = \sqrt{2g(i - i_{\varphi})x + v_0^2} \quad (14.3.2)$$

სადაც  $V_0$  არის საწყისი საშუალო სიჩქარე;

$i_{\varphi}$  - მოძრაობის წინაღობის ქანობი, რომელიც განისაზღვრება თანაბარი მოძრაობის

ფორმულების საშუალებით;

$X$  - საანგარიშო კვეთის საწყისი კვეთიდან დაშორების მანძილი.

როგორც ზემო იყო აღნიშნული, ნაკადის საშუალო სიჩქარის ანალოგიური დამოკიდებულება, როგორც ერთ-ერთი კერძო შემთხვევა, უფრო მოგვიანებით მიღებული იყო ს. ს. გრიგორიანის მიერ გრუნტის მოძრაობის განზოგადოებული კერძო წარმოებულის დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირების შედეგად.

ამ დამოკიდებულებიდან გამომდინარეობს, რომ ბმული ღვარცოფის გაჩერების სიგრძე ტოლია:

$$x = \frac{v_0^2}{2g(i - i_{\varphi})} \quad (14.3.3)$$

ბმული ღვარცოფის არათანაბარი მოძრაობის გაანგარიშების წინამდებარე მეთოდის ნაკლებად კორექტულია, მაგრამ იგი საშუალებას იძლევა პირველი

მიახლოებით გადაიჭრას ღვარცოფის დინამიკის ზოგიერთი მნიშვნელოვანი პრაქტიკული ამოცანა.

## **თავი 15. ღვარცოფების ნაგებობებთან ურთიერთქმედება**

### **15.1. არაბმული ღვარცოფისათვის პერიოდული მოქმედების სალექარის ( ქვაბულის) სიგრძის დადგენა**

ღვარცოფების ნაგებობებთან ურთიერთქმედება შედარებით ნაკლებად შესწავლილი საკითხია, მაგრამ განსაზღვრული გამოცდილება ამ მიმართულებით მაინც არსებობს. გარდა საველე და ექსპერიმენტული დაკვირვებების შედეგად მიღებული გამოცდილებისა, არსებობს აგრეთვე თეორიული ანალიზის შედეგად მიღებული დამოკიდებულებები, რომლებიც შესაძლებლობას იძლევიან განხორციელებულ იქნას კონკრეტული ობიექტის (სხვადასხვა სახის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის) ანგარიში. აღსანიშნავია ისიც, რომ ზოგიერთ შემთხვევაში ღვარცოფების მოძრაობა მდინარის კალაპოტის განსაზღვრულ უბანზე, ზემო წელში, სატრანზიტო მონაკვეთებზე და ნარიყის კონუსზე, იქ არსებული მორფომეტრიული და ჰიდრაულიკური სიტუაციების გათვალისწინებით, შესაძლებელია განხილულნი იქნან როგორც ამა თუ იმ სახის ღვარცოფდამჭერი, ღვარცოფმიმართველი, ღვარცოფგამტარი და სხვა სახის ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, როგორცაა ღვარცოფსაცავები (ანალოგიურად წყალსაცავისა). ყრუ ან გამჭოლი ტიპის ღვარცოფშემაკავებელი



კაშხალები ან საგუბრები განლაგებულნი კალაპოტის ღერძის მიმართ მართობულად ან განსაზღვრული კუთხით, ნაპირსამაგრი კედლები, მდინარის კალაპოტში მოწყობილი სალექრები, სწრაფდენები, ღვარცოფსაშვები ღარები და ა. შ.. აღნიშნული ტიპის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებების მაგალითები შედარებით სქემატურად მოყვანილია ქვემოთ.

ღვარცოფულ ნაკადებთან მიმართებაში სალექრები წარმოდგენილი უნდა იქნან არა როგორც კაპიტალური ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, არამედ როგორც ღვარცოფის მოძრაობის ტრასაზე მდინარის კალაპოტში, უპირატესად ნარიყის კონუსის მიდამოებში, მოწყობილი სხვადასხვა ზომის ( სიგრძის, სიმაღლისა და სიგანის) ქვაბულები, სადაც ხორციელდება ღვარცოფული ნაკადების მყარი კომპონენტის ნაწილის აკუმულირება.

ამ შემთხვევაში სალექარის (ქვაბულის) სიგრძის დასადგენად გავიხსენოთ გამოსახულება:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{\frac{i_0 - \bar{y}_{mp}}{\beta} - \frac{2\bar{\alpha}_* \bar{V}}{g_* \bar{\omega}} \bar{q} - \frac{\bar{V}^2 d\bar{\alpha}_*}{g_* dx} - \frac{k_2 \sigma (s_{\text{საშ}} - s_0) dv}{w_* \beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}}) dx}}{\frac{K_3}{\beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}})}} - \frac{\frac{d_* V^2 d\beta}{g\beta dx}}{\frac{dQ^2}{g_0 \omega^2} B}$$

$$\left[ \frac{\bar{V}^2 \bar{\alpha}_* \sigma}{g_0 (1 + \sigma s_{\text{საშ}})} - \frac{\sigma k_2 v}{w_* \beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}})} \right] \frac{d s_{\text{საშ}}}{dx} - \frac{k_2 \sigma v}{w_* \beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}})} \frac{d s_0}{dx}$$

$$\frac{k_2}{\beta (1 + \sigma s_{\text{საშ}})} \frac{\bar{\alpha}_* Q^2}{g_* \omega^3} B \tag{15.1.1}$$

ამ გამოსახულებაში უგულვებელვყოთ სხვა პარამეტრებთან შედარებით მცირე სიდიდეები და განვსაზღვროთ ნაკადის ერთეულ სიგრძეზე დალექილი ნატანის ხარჯი:

$$\tilde{q} = q_0 = WB\tilde{N}_{\text{ალ}} \frac{S-S_{\text{ტრ}}}{\tilde{N}_{\text{ალ}}-S_{\text{ტრ}}} \quad (15.1.2)$$

სადაც  $S_{\text{ალ}}$  არის წყლის ნაკადის მიერ ფსკერული ნატანების შემღვრევის (აღრევის) კონცენტრაცია.

$S_{\text{ტრ}}$  - ნაკადის ტრანსპორტირების უნარი.

აღნიშნულის გათვალისწინებით გამოსახულებიდან მივიღებთ:

$$dx = -A \frac{dx}{S-S_{\text{ტრ}}} \quad (15.1.3)$$

სადაც

$$A = \frac{\sigma \bar{\omega} (S_{\text{ალ}} - S_{\text{ტრ}}) (2\bar{\alpha}_0 V \bar{W} m c + k_z g_0^2 \bar{H})}{4\bar{\alpha}_0 V W^2 B m c \tilde{N}_{\text{ალ}}} \quad (15.1.4)$$

სასაზღვრო პირობების განთვალისწინებით (როცა  $x = 0, S = S_{\text{საწ}}$  და როცა  $x = 1, S = S_{\text{საბ}}$ ) გამოსახულების ინტეგრირების შედეგად მივიღებთ

$$I = AI_{\text{კრ}} \frac{S_{\text{საწ}} - S_{\text{ტრ}}}{S_{\text{საბ}} - S_{\text{ტრ}}} \quad (15.1.5)$$

ეს დამოკიდებულება საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ სალექარის სიგრძე მოცემული დიამეტრის მქონე ნატანის ისეთი კონცენტრაციისათვის, რომელიც უზრუნველყოფს დასაშვები კონცენტრაციით ქვაბულის გავლის შემდეგ ნაკადის შემდგომ მოძრაობას.

## 15.2. კალაპოტური საგუბარის (წყალსაცავის)

### დალექვის გაანგარიშება

თუ გავითვალისწინებთ, რომ კალაპოტურ საგუბარში (ღვარცოფსაცავში) ნაკადის ტრანსპორტირების

უნარი დაბალია, მაშინ ნატანდატვირთული ნაკადის მოძრაობის ზოგადი ერთგანზომილებიანი დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირებით მივიღებთ, რომ

$$S^x = S^{s\text{აწ}} - \frac{Q \ln \frac{H^x}{H^{s\text{აწ}}}}{2kBW\bar{A}} \quad (15.2.1)$$

სადაც  $H^x$  არის საწყისი წერტილიდან  $X$  მანძილზე ნაკადის სიღრმე;

$\hat{A}$  -, „ $A$ ” კოეფიციენტის საშუალო (ორ კვეთს შორის) მნიშვნელობა.

გათვალისწინებულია, რომ  $q \cong KWBS$ .

მიღებული დამოკიდებულება საშუალებას გვაძლევს ვიმსჯელოთ კალაპოტურ საგუბარში შენელებულ-არათანაბრად მოძრავი ნაკადის გასწვრივ ნატანის კონცენტრაციის ცვლილებების შესახებ.

### 15.3. არაბმული ღვარცოფის ჰიდრავლიკური ნახტომის გაანგარიშება

არაბმული ღვარცოფების, ისევე როგორც წყლის მოძრაობის შემთხვევაში, მძაფრი რეჟიმიდან წყნარ მდგომარეობაში გადასვლის დროს ადგილი აქვს ჰიდრავლიკურ ნახტომს.

ამ შემთხვევისათვის ამოსავალ განტოლებად გამოყენებულია სუფთა წყლის სწორკუთხა კალაპოტში მოძრაობის დროს შეუღლებული სიღრმეების

განსაზღვრელი ფორმულა. ამგვარი, რამდენადმე არაკორექტული მიდგომა, გარკვეულწილად ადაბლებს დასმული ამოცანის ამოხსნის სიზუსტეს. მაგრამ სამაგიეროდ ფართოვდება მიღებული დამკვიდრებულების ოპერატიული შესაძლებლობები.

როგორც ცნობილია, სწორკუთხა კალაპოტში შეუღლებული სიღრმეები განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$2h_{3r}^2 = h_1^2 h_2 + h_2^2 h_1 \quad (15.3.1)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ არაბმული ღვარცოფის სწორკუთხა კალაპოტში მოძრაობის დროს კრიტიკული სიღრმე განისაზღვრება  $h_{3r} = \sqrt{\frac{\alpha q^2}{g(1+S/2nk_z)}}$  ფორმულით, მივიღებთ:

$$2 \frac{\alpha q^2}{g \left[ 1 + \frac{S}{2nk_z} \right]} = h_1^2 h_2 + h_2^2 h_1 \quad (15.3.2)$$

მიღებული განტოლების ამოხსნა  $h_1$  და  $h_2$ -ის მიმართ გვაძლევს:

$$h_2 = 0,5h_1 \left[ \sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{gh_1(1+S/2nk_z)}} - 1 \right] \quad (15.3.3)$$

$$h_1 = 0,5h_2 \left[ \sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{gh_2(1+S/2nk_z)}} - 1 \right] \quad (15.3.4)$$

ამ ფორმულებით შესაძლებელია ურთიერთ-დამოკიდებული შეუღლებული სიღრმეების განსაზღვრა სწორკუთხა კალაპოტში ჰიდრავლიკური ნახტომის დროს. ანალიზი გვიჩვენებს, რომ რაც მეტია ნატანის კონცენტრაცია და ნაკლებია მისი ჰიდრავლიკური სისხო

(რაც თავის მხრივ გავლენას ახდენს  $n$ -ზე), მით მეტია ნატანდატვირთული და წყლის ნაკადების შეუღლებულ სიღრმეებს შორის სხვაობა.

ჰიდრავლიკური ნახტომის სიგრძის დადგენისათვის საჭიროა ჩატარდეს ექსპერიმენტული კვლევები  $S$ ,  $W$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის, ფრუდის რიცხვების სხვადასხვა შემთხვევაში. მოცემულ ეტაპზე, პირველ მიახლოებისათვის შეიძლება ვისარგებლოთ სუფთა წყლის ჰიდრავლიკური ნახტომის განმსაზღვრელი ფორმულით, მაგრამ ექსპერიმენტულ ფორმულებში უნდა ჩავსვათ მოცემული კონცენტრაციის მქონე ნატანდატვირთული ნაკადის შეუღლებული სიღრმეების ზემოთ მოყვანილი დამოკიდებულებები.

#### **15.4. არაბმული ღვარცოფის შეტივტივებული ნატანის კალაპოტში დარიყვის სიგრძის პროგნოზირება**

როგორც ცნობილია, ჰიდრავლიკური ნახტომის წინ ნაკადი იმყოფება მძაფრ მდგომარეობაში და შეუძლია ნატანის დიდი რაოდენობის გადაადგილება, ხოლო თავად ჰიდრავლიკური ნახტომის დროს ხდება ნატანების ინტენსიური აღრევა. ნაკადის მშვიდ მდგომარეობაში გადასვლის შემდეგ მისი ტრანსპორტირების უნარი მკვეთრად ეცემა და იწყება ნატანის კალაპოტში ინტენსიური დარიყვის პროცესი. ამ პროცესს ადგილი არ ექნება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ მშვიდი ნაკადის ტრანსპორტირების უნარის შესაბამისი კონცენტრაცია

მეტია ან ტოლი ნახტომის წინ ნაკადში ნატანის კონცენტრაციისა.

განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ჰიდრაულიკური ნახტომის შემდეგ მშვიდი ნაკადის ტრანსპორტირების უნარის შესაბამისი კონცენტრაცია ნაკლებია ნახტომის წინ ნაკადში ნატანის კონცენტრაციაზე, რასაც ადგილი აქვს არაბმული ღვარცოფების მოძრაობის უმეტეს შემთხვევაში. ამრიგად, ნახტომის შემდეგ გარკვეულ მანძილზე დაიწყება ნატანის კალაპოტში დარიყვა, ე.ი. ადგილი ექნება ცვალებადი ხარჯის მქონე ნატანდატვირთული ნაკადის მოძრაობას. ამასთან, ადგილი ექნება ხარჯის ცვლას მხოლოდ მყარი კომპონენტის დარიყვის ხარჯზე, რაც გამოიწვევს კალაპოტის დეფორმაციას (ნალექების სახით).

ნატანის კონცენტრაციის ცვლილებისა და ნატანის კალაპოტში დარიყვის სიგრძის პროგნოზირებისათვის ვიყენებთ ნატანდატვირთული ნაკადის ერთგანზომილებიანი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას, რომელიც მოცემული შემთხვევისათვის ( ე.ი.  $h=h_2 = \text{const}$  და  $dh/dx = 0$ ) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$-\frac{2\alpha_0 V_z}{g\omega_z} q_0 - \left[ \frac{\alpha_0 V_z^2}{g} + \frac{k_2 v_2}{W} \right] \frac{\sigma}{1+\sigma S} \frac{dS}{dx} = 0 \quad (15.4.1)$$

სადაც  $q_0 \cong \text{const}$  არის კალაპოტის ერთეულ სიგრძეზე დარიყული ნატანის ხარჯი:

ბოლო გამოსახულებიდან მივიღებთ, რომ

$$dx = - \left[ 1 + \frac{h_z g}{2\alpha_0 n V_0^2} \right] \frac{\sigma Q}{2q_0} \frac{dS}{1+\sigma S} \quad (15.4.2)$$

პირველ მიახლოებაში დავეშვათ  $\Pi_{საშ} = \Pi = \frac{\Pi_1 + \Pi_2}{2}$ , სადაც  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  არის შესაბამისად ნახტომის ბოლოს და ნახტომის შემდეგ დამყარებული ტრანსპორტირების უნარის შესაბამისი კონცენტრაციის მქონე ნაკადებში ნატანის ვერტიკალზე განაწილების მრუდეების ხარისხის მაჩვენებლები. მაშინ  $X=0$  და  $S = S^{საბ}$  სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$I_{კალაბ} = A \ln \frac{S^{საწ} - S_{ტრ}}{S^{საბ} - S_{ტრ}} \quad (15.4.3)$$

სადაც  $I_{კალაბ}$  არის კალაპოტის ნაწილის სიგრძე, სადაც ხდება ნატანის ინტენსიური დარიყვა:

$$A = \left( 1 + \frac{h_z g}{2\alpha_0 \pi_{საშ} V_2^2} \right) \frac{\sigma Q}{2q_0} \cong const \quad (15.4.4)$$

$q_0$  -ს დადგენისათვის შეიძლება ვისარგებლოთ ა.ვ კარაუშევის დამოკიდებულებით

$$q_0 = WBS_{აღ} \frac{S^{საწ} - S_{ტრ}}{S_{აღ} - S_{ტრ}} \quad (15.4.5)$$

ჰიდრავლიკური ნახტომის ბოლოდან ნებისმიერ  $X$  მანძილზე (რომლის ფარგლებშიც ხდება ინტენსიური დარიყვა) ნატანის მოცულობითი კონცენტრაცია განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$S_x = \frac{S^{საწ} - S_{ტრ}}{1^{x/A}} + S_{ტრ} \quad (15.4.6)$$

ცხადია, რომ ნახტომის შემდეგ ნატანის დაღეჟვა იწვევს ნაკადის ჰიდრავლიკური ელემენტების ცვლილებას, რომელთა განსაზღვრა შესაძლებელია კალაპოტების დეფორმაციების შეფასების არსებული ფორმულებით (დროისაგან დამოკიდებულებით).

### **15.5. ბმული ღვარცოფის ჰიდრავლიკური ნახტომის გაანგარიშება**

ხშირად სამთო წყალსადინრების ცალკეული უბნები, რომლებზეც გადაადგილდებიან ღვარცოფები. ხასიათდებიან მორფომეტრიული მაჩვენებლების მკვეთრი ცვლილებით, რაც ხელს უწყობს ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმის დამყარებას.

ამ შემთხვევაში ნაკადის განიკვეთში ჰიდროსტატიკური დაწნევის განსაზღვრისას გათვალისწინებული იქნა ის პირობა, რომ ბმული ღვარცოფული ნაკადი ერთდროულად ატარებს აგრეთვე ჭარბტენიანი გრუნტის თვისებებსაც.

ეს დაწნევა ორიენტირებულია ნაკადის ცოცხალი კვეთის ნორმალის გასწვრივ და განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$P = \gamma_l H \operatorname{tg}^x(45^\circ - \varphi/2) - 2 \operatorname{ctg}(45^\circ - \varphi/2) \quad (15.5.1)$$

მოდრაობის რაოდენობის განტოლებაში შესაბამისი ჩასმებისა და მარტივი გარდაქმნების განხორციელების შედეგად მივიღებთ შეუღლებული სიღრმეების შემდეგ საანგარიშო დამოკიდებულებებს:



$$H_1 = 0,5H_2 \left[ 1 + \frac{2h_0}{H_2} \right] \left[ \sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{gH_2^3 \left[ 1 - \frac{2h_0}{H_2} \right]^2 \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)}} - 1 \right] \quad (15.5.2)$$

(5.17)

$$H_2 = 0,5H_1 \left[ 1 + \frac{2h_0}{H_1} \right] \left[ \sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{gH_1^3 \left[ 1 - \frac{2h_0}{H_1} \right]^2 \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)}} - 1 \right] \quad (15.5.3)$$

სუფთა წყლის შემთხვევისაგან განსხვავებით, ნაკადის სიღრმესა და ნახტომის ფუნქციას შორის დამოკიდებულების გამომხატველი ერთი მრუდის ნაცვლად, როგორც ჰიდრავლიკიდანაა ცნობილი, გვექნება მრუდების ჯგუფი, რომელთაგან თითოეული შეესაბამება ბმული ღვარცოფის განსაზღვრულ კონცენტრაციას.

## 15.6. ბმული ღვარცოფის დარტყმითი ზემოქმედება განივად განლაგებულ ნაგებობებზე

საველე და ექსპერიმენტული დაკვირვების შედეგად დადგენილია, რომ ჩვეულებრივი წყლის ნაკადებისაგან განსხვავებით ღვარცოფები წინააღმდეგობის შეხვედრის დროს მათზე ზემოქმედებენ რამდენადმე ანომალურად, სახელდობრ, დარტყმის პროცესში მონაწილეობას ღებულობს მხოლოდ ნაკადის მთელი სიგრძის გარკვეული მონაკვეთი. ეს დებულება განსაკუთრებით შეეხება ბმულ ღვარცოფებს, რომელთა ფრონტალური ნაწილი ხასიათდება დიდი დამანგრეველი ძალითა და

გადიდებული სიმკვრივით, რაც არის მასში ქვისებრი ჩანართების დიდი დიამეტრებისა და დიდი კონცენტრაციების არსებობის შედეგი.

ბმული ღვარცოფის დარტყმითი ზემოქმედება განივად განლაგებულ ნაგებობაზე, რომლის ზედა წახნაგის დახრის კუთხე წყალსადინარის ფსკერისადმი შეადგებს  $\beta < 90^\circ$ , განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$F_{\text{ღ}} = k \frac{\gamma_{\text{ღ}} \omega V^2 (1 - \cos \beta)}{g \sin \beta} \quad (15.6.1)$$

**ბმული ღვარცოფის დარტყმის ძალის** განსაზღვრის შემდეგ იოლად შეიძლება დადგინდეს ნაგებობის მდგრადობის პირობა: ნაგებობა მდგრადია, თუ

$$fM \cos \alpha > F_{\text{ღ}} \sin \beta \quad (15.6.2)$$

და არამდგრადია, როდესაც

$$fM \cos \alpha < F_{\text{ღ}} \sin \beta \quad (15.6.3)$$

სადაც  $f$  არის ნაგებობის ფსკერის გრუნტთან ხახუნის კოეფიციენტი;

$M$  - ნაგებობის მასა;

$\alpha$  - კალაპოტის ფსკერის დახრის კუთხე.

ბმული ღვარცოფის დარტყმის ძალის ფორმულაში  $K$  კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის ღვარცოფულ დანადგარზე ჩატარებული სოციალური ექსპერიმენტების საფუძველზე დადგენილ იქნა მისი მნიშვნელობა, რომელიც ტოლია 4,5.

ნაგებობის ზედა წახნაგის ვერტიკალური მდგომარეობის შემთხვევაში, როდესაც  $\beta = 90^\circ$ , ბმული

ღვარცოფის დარტყმის ძალის გამოსახულება შესაბამისად მარტივდება.

### 15.7. ღვარცოფის მოძრაობა არაპრიზმულ კალაპოტში

ღვარცოფული ნაკადის (ბმულის ან არაბმულის) მოძრაობას არაპრიზმატულ (შევიწროებულ ან გაფართოებულ) კალაპოტში ადგლი აქვს როგორც ბუნებრივი, ასევე ღარული ტიპის ნაგებობის (ღვარცოფსაშვი ღარი) პირობებში. ამიტომ ამგვარი კვეთის ჰიდრაულიკურ გაანგარიშებას პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს. ასეთ შემთხვევაში საანგარიშო კვეთებს შორის მანძილის სიმცირისას ხახუნის ძალები შესაძლებელია იქნან უგულვებელყოფილნი. განსახილველი უბნის ფსკერის ნულოვანი ქანობის შემთხვევაში მიღებული შეზღუდვების და სათანადო საწყისი და სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით ვიყენებთ უწყვეტობის ერთგანზომილებიან განტოლებას

$$\begin{cases} \frac{1}{g_*} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g_*} \frac{\partial V}{\partial x} - i + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{V}{g_*} \frac{q}{\omega} + i_0 = 0 \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \end{cases} \quad (15.7.1)$$

სადაც  $V$  არის საშუალო სიჩქარე ცოცხალ კვეთში;

$i$  - წყალსადინარის ქანობი;

$i_0$  - მოძრაობის წინააღმდეგობის ქანობი;

$q$  - სიგრძის ერთეულზე ნაკადის გადინების

(ან მოდინების) ხარჯი;

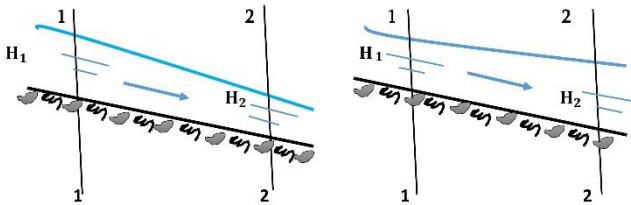
$Q$  - ნაკადის ხარჯი;

$g_* = g \cos \alpha$  - სადაც  $\alpha$  არის კალაპოტის ფსკერის ჰორიზონტისადმი დახრილობის კუთხე.

ამ განტოლების ინტეგრირების შედეგად, თუ ცნობილია საწყის კვეთში ნაკადის  $H_1$  სიღრმე, მაშინ საანგარიშო (მომდევნო) კვეთში ნაკადის  $H_2$  სიღრმის საანგარიშო ფორმულას ექნება შემდეგი სახე:

$$H_2 = H_1 + \frac{Q^2}{2g} \left[ \frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right] \quad (15.7.2)$$

ღვარცოფების მოძრაობის შესწავლისას განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს ნაკადის არაპრიზმულ კალაპოტში მოძრაობის შემთხვევა, როდესაც წყალსადინარის ფსკერის ქანობი  $i > 0$  (ნახ. 15.7.1.) და არ შეიძლება უგულვებელყოთ ხახუნის ძალები ერთმანეთთან  $\Delta l$  მანძილით დაშორებულ კვეთებს შორის.



ნახაზი 15.7.1. ბმული ღვარცოფის 1-1 და 2-2- კვეთების შორის მოძრაობის შემთხვევაში არაპრიზმატულ კალაპოტში მისი გაფართოების (ა) და შევიწროვების (ბ) შემთხვევები.

ამოცანის ამოხსნისათვის ამოსავალ განტოლებად შეიძლება გამოვიყენოთ ბერნულის განზოგადებული განტოლება:

$$H_1 + \Delta l + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = H_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \Delta H_b \quad (15.7.3)$$

სადაც  $\alpha_1$  და  $\alpha_2$  არის ღვარცოფის კინეტიკური ენერჯის კოეფიციენტები, რომლებიც წყლის ნაკადთან შედარებით უფრო მეტი ალბათობით შეგვიძლია გავუტოლოთ 1-ს.

$V_1, V_2$  - ღვარცოფის საშუალო სიჩქარეები შესაბამის კვეთებში;

$\Delta H_b$  -  $\Delta l$  სიგრძის მონაკვეთზე ჰიდრავლიკური დანაკარგები.

ჰიდრავლიკაში მიღებული სქემის შესაბამისად ბმული ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევაში შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ, სიგრძეზე დანაკარგები მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობისას შეიძლება განისაზღვროს უშუალოდ ნაკადის საშუალო სიჩქარის გამოსათვლელად მიღებული ფორმულით მოცემულ მონაკვეთზე საშუალო  $V_{საშ}$  და  $H_{საშ}$  სიდიდეების განსაზღვრის საშუალებით:

$$\Delta H_b = \frac{3\mu_b V_{საშ} \Delta l}{\gamma_L H_{საშ}^2 k_1} \quad (15.7.4)$$

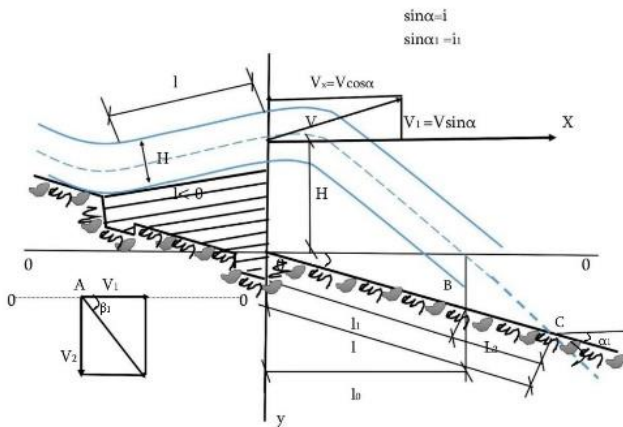
ამ გამოსახულებაში თუ შევიტანთ  $V-Q/W$   $H_2 - H_1 = \Delta H$  მნიშვნელობებს და თუ მივიღებთ, რომ  $\alpha_2 \cong \alpha_1 \cong 1,0$  მაშინ გვექნება

$$\Delta H - i\Delta l = \frac{0,55Q^2}{g} \left[ \frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2} - \frac{6g\mu_b \Delta l}{\gamma_L Q k_1 \omega_{საშ}^2 H_{საშ}} \right] \quad (15.7.5)$$

კალაპოტის არაპრიზმატულ უბნებზე ნაკადის სიღრმეების განსაზღვრა ძირითადად წარმოებს მიღებული გამოსახულების საშუალებით.

### 15.8. ღვარცოფული ნაკადის ჭავლის ვარდნის სიშორის განსაზღვრა ნაგებობის ქვედა ბიეფში

ღვარცოფული ნაკადის კალაპოტის ვარდნის უბნებზე ახლომდებარე ობიექტების დაცვის მიზნით აგებენ სხვადასხვა კონსტრუქციის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობებს, მათ შორის ტრამპლინის ტიპის ნაგებობებს, რომლებსაც ბოლო ნაწილში გააჩნია უარყოფითი ქანობი ( $i < 0$ ), რაც ხელს უწყობს ჭავლის მაქსიმალურ ტყორცნას და ნაკადის ენერჯის ჩაქრობას ქვედა ბიეფში.



ნახ. 15.8.1. ტრამპლინური ტიპის ნაგებობაზე ბმული ღვარცოფის ჭავლის ტრაექტორიისა და ქვედა ბიეფში მისი ვარდნის სემატური გამოსახულება

ასეთი ტიპის ნაგებობების ჰიდრავლიკური გათვლა გულისხმობს ქვედა ბიეფში ჭავლის ვარდნის ადგილის (სიშორის) განსაზღვრას. ამასთან, ნაკადის სიღრმე  $H$  და სიჩქარე  $V$  ნაგებობის  $0$  წერტილში წინასწარ განსაზღვრულია (ნახ. 15.8.1.).

კონსოლური ვარდნის ჰიდრავლიკური გათვლის ანალოგიურად ტრამპლინის ტიპის ნაგებობის  $0$  წერტილში გამავალი ღვარცოფული ნაკადის ჭავლისათვის, ქვედა ბიეფის ჰორიზონტალური ზედაპირის შემთხვევაში ( $i_1=0$ ), ვარდნის სიშორე განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$l_0 = \frac{V^2 \sqrt{1-i^2}}{g} \left[ 1 + \sqrt{i^2 + \frac{2g(H_{6\alpha\delta} + 0,5H_1)}{V^2}} \right] \quad (15.8.1)$$

სადაც  $H_{6\alpha\delta}$  არის ნაგებობის ზედაპირისა და ქვედა ბიეფის ნიშნულებს შორის სხვაობა. როდესაც  $i=0$ , გვექნება:

$$l_0 = V \sqrt{\frac{2H_{6\alpha\delta}}{g}} \quad (15.8.2)$$

ეს დამოკიდებულება საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ღვარცოფული ნაკადის ჭავლის ვარდნის სიშორე ნაგებობის ქვედა ბიეფში ნულოვანი ქანობის შემთხვევაში.

სინამდვილეში მთის წყალსადინრები ხასიათდებიან კალაპოტის მნიშვნელოვანი დახრით. მაშინ ღვარცოფული ნაკადის ჭავლის ვარდნის სიშორე  $l_2$ , როდესაც  $l < 0$  და  $l_1 > 0$ . წარმოდგენილი იქნება შემდეგი ჯამის სახით

$$l_0 = l_1 + l_2$$

სადაც

$$l_1 = \frac{v^2 \sqrt{i-i^2}}{g} \left[ i + \sqrt{i^2 + \frac{2g(H_{6\text{ატ}} + 0,5H_1)}{v^2}} \right] \sqrt{i + \frac{i_1^2}{i-i_1^2}} \quad (15.8.3)$$

$$l_2 = \frac{v^2 \sqrt{i-i^2}}{g} \left[ i + \sqrt{i^2 + \frac{2g(H_{6\text{ატ}} + 0,5H_1)}{v^2}} \right] \frac{i_1 \sin(90^\circ - \beta_1)}{\sqrt{i-i^2} \sin \beta_2} \quad (15.8.4)$$

როდესაც  $i=0$  და  $i_2>0$ , გვექნება

$$l_1 = v \sqrt{\frac{2H_{6\text{ატ}}}{g}} \sqrt{i + \frac{i_1^2}{i-i_1^2}} \quad (15.8.5)$$

$$l_2 = v \sqrt{\frac{2H_{6\text{ატ}}}{g}} \frac{i_1 \sin(90^\circ - \beta_1)}{\sqrt{i-i^2} \sin \beta_2} \quad (15.8.6)$$

ვარდნის ჭავლსა და ჰორიზონტალურ 0-0 სიბრტყის შორის შექმნილი კუთხე  $\beta_1$  ტოლია:

$$A_1 = \arccos \frac{v \cos \alpha}{\sqrt{v^2 \cos^2 \alpha + \left( \varphi \sqrt{2gH_{6\text{ატ}}} - v \sin \alpha \right)^2}} \quad (15.8.7)$$

ხოლო

$$\beta_0 \approx \beta_0 - \alpha_0 \quad (15.8.8)$$

## თავი 16. რეკომენდაციები ღვარცოფსაშიშ ზონებში ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების გატარების დროს

### 16.1 ღვარცოფული ნაკადების სახეები

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



ბმული (ჰიპერკონცენტრირებული) ღვარცოფი - მოძრაობის სტრუქტურულ-რეოლოგიური მოდელის მიხედვით განეკუთვნება ღვარცოფული ნაკადების ორი ტიპიდან ერთ-ერთს, რომლის მყარი შემადგენლობაში მნიშვნელოვან ნაწილს (>12%) იკავებს მტვრისებრ-თიხნარი ფრაქციები. ბმული ღვარცოფის ძირითადი თვისებებია: 1) თავისუფალი წყლის არსებობა პრაქტიკულად გამორიცხულია; 2) მყარი მასა და წყალი ერთობლივად, გრავიტაციულად მოძრაობს და ქმნის ერთიან ბლანტ-პლასტიკურ სხეულს (1700-2400 კგ/მ<sup>3</sup> სიმკვრივით; 3) ღვარცოფის გამოტანის შემდეგ მასა სიმსხოს მიხედვით არ ხარისხდება. ბმული ღვარცოფული მასა შემადგენლობის მიხედვით არის ტალახიანი და ქვატალახიანი.

**არაბმული ღვარცოფი (ტურბულენტური)** - მოძრაობის სტრუქტურულ-რეოლოგიური მოდელის მიხედვით ღვარცოფული ნაკადების ორი ტიპიდან წარმოადგენს ერთ-ერთს, რომლის მყარ შემადგენლობაში დომინირებს უხეშ-მონატეხი მასალა, ხოლო მტვრიან-თიხიანი ფრაქციები უმნიშვნელოდ არის წარმოდგენილი. არაბმული ღვარცოფის ძირითადი თვისებებია: 1) წყლის ძირითადი მასა იმყოფება თავისუფალ მდგომარეობაში და წარმოადგენს ღვარცოფის მყარი შემადგენლის მატრანსპორტილებელ საშუალებას; 2) ღვარცოფული მასა წარმოდგენილია კომპონენტების მექანიკური ნარევით 1100-1600 კგ/მ<sup>3</sup> სიმკვრივით; 3) ღვარცოფის დაგროვების შემთხვევაში ხდება მისი

შედგენილობის მიხედვით არაბმული ღვარცოფი, უპირატესად ქვაწყლიანია.

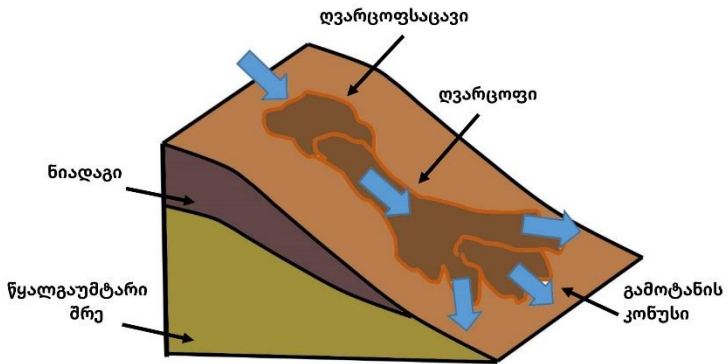
ბმული და არაბმული ღვარცოფული ნაკადები ხარისხობრივად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან ფორმირების პირობების, მოძრაობისა და დამანგრეველი მოქმედების მიხედვით.

ღვარცოფული აუზები წარმოადგენენ მთის წყალსადინარების შედარებით მცირე აუზებს ციცაბო ფერდობებით და კალაპოტით, ისინი გამოირჩევა მთის ქანებით, რომლებიც მდიდარია თიხაწარმოქმნელი ალუმოსილიკატებით, თიხოვანი მინერალებით და აგრეთვე ღვარცოფწარმოქმნელი და ღვარცოფმკვებავი კერებით.

ბმული ღვარცოფული ნაკადი, რომლის სიმაღლეც აჭარბებს საზღვრებს, რაც განპირობებულია ღვარცოფული მასის ფიზიკო-მექანიკური თავისებურებებით, ხეობიდან გამოტანის კონუსზე გამოსვლისას, იშლება 5 მეტრი სიმაღლით და შესაბამისი სიგანით ხარჯთან დამოკიდებულებაში. შემდგომ მუშაობს გაუშლელად, შედარებით ვიწრო ზოლით, ცდილობს შეინარჩუნოს წრფივი მიმართულება, წინააღმდეგობის დროს იხრება  $11^{\circ} \div 13^{\circ}$  -ით ნაკადის დინამიკური ღერძის მიმართ და ადვილად გადაედინება წინააღმდეგობაზე, რომელიც რამოდენიმეჯერ აღემატება ნაკადის სიღრმეს.

არაბმული ღვარცოფული ნაკადი ხეობიდან გამოტანის კონუსზე გამოსვლისას იშლება და ლექავს ნატანს გარკვეული დახარისხებით.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობები გამოიყენება უკვე ჩამოყალიბებულ ღვარცოფულ ნაკადებთან ბრძოლისათვის.



ნახ. 16.1.1. ღვარცოფული აუზის სქემა

მთიან რეგიონებში მდინარეთა კალაპოტებში ფორმირებული ნაკადების კლასიფიკაცია  
ცხრილი 16.1.1.

ნაკადის ტიპი	ნაკადის მოპოვების მასსიათბუღები	მოძრაობის მიზეზები	დაწყების	მტრანსპორტრე- ბელი გარემო	წარმოქმნის ადგილი	შენიშვნა
თავსხმა წვიმებით გამოწვეული წყალმოვარდნა	წყალი ამფერულა, ნატანი (წონით) 3%-დან 4%-მდე, ქვაწველიანი ნაკადი, სიმკვრივე 1,02±1,05 ტ/მ <sup>3</sup>	თავსხმა, წვიმები თოვლის დნობით, გუბურების და საგურების გარღვევა და ა. შ.		წყალი	მთის წყალსადინარებში, სადაც არის ღვარცოფული დანალექი	ჰიდრემატოგრაფიკი ასანინიდან დაიხსნება იდენტური რეგიონი რეგიონში იდენტური ასანინიდან იდენტური რეგიონი იდენტური რეგიონი
არამბული ტურნულენტური ღვარცოფული ნაკადი	წყლის გარემო, გამდიდრებული კოლიდური მუცხვარებული ნაწილაკებით, ნატანი (წონით) 20%-დან 30%-მდე, ლორღისებური მასა შეტემაზე მდებარეობაში, ხდება ტალკული მსხელი ქვის ლოდების ტრანსპორტირება, ქვატალახოვანია, სიმკვრივე 1,1 + 1,6 ტ/მ <sup>3</sup>	თავსხმა წვიმები თოვლის დნობით, მთის ტყების კაშლუბის და საგურების გარღვევა, ღვარცოფული დანალექის გარეგნება	წყალი, გამდიდრებული ჰიდროფილური მიწარღების კოლიდური ნატანი	წყალი, კალაპოტებში, სადაც არის ღვარცოფური მიმქმნილი კურები		
ნატანით პიბერკონტრირებული ღვარცოფული ნაკადი	ქვატალახიანი მასა შედგება კლდოვანი მონატეხისაგან, ღორღისაგან ტენარული ნარჩენისაგან. მყარი ნატანი 80-90%, წყალი 10-20% წონით ტალახიანი მასაში ბმული მდებარეობაში, სიმკვრივე 1,7±2,4 ტ/მ <sup>3</sup>	თავსხმა, წვიმები, მიწისძვრები, ფერდობების ჩამოშორება ღვარცოფური რეგიონული კურების ადგილებში, მცხვარების მასები	ქვატალახიანი მასის კონტრირირებული			

ჟ

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.

ღვარცოფული ჩამონადენის საანგარიშო უზრუნველყოფა (გადაჭარბების ყოველწლიური ალბათობა) მიიღება:

ა) მუდმივი ჰიდროტექნიკური ნაგებობებისათვის, რომლებიც იცავენ განსაკუთრებით მნიშვნელოვან ობიექტებსა და დასახლებულ პუნქტებს  $P=0,1\%$ ;

ბ) მუდმივი ჰიდროტექნიკური ნაგებობებისათვის, რომლებიც იცავენ ნაკლებად მნიშვნელოვან ობიექტებსა (მაგისტრალური არხები, საირიგაციო ქსელი, ნათესები და ა. შ)  $P=1\%$ .

გ) დროებითი ჰიდროტექნიკური ნაგებობებისათვის P=10%.

ღვარცოფსაშიში ტერიტორიების საზღვრები, რომელთა ზღვრებშიც საჭიროა ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების მშენებლობა და ღონისძიებების გატარება, უნდა დანიშნულ იქნას წინასწარ ჩატარებული სადაზვერვო (რეკოგნოსული) კვლევების მასალების მიხედვით და დაზუსტებულ იქნას შემდგომი საინჟინრო კვლევების შედეგების მიხედვით.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების დაყოფა სახეებად მოცემულია ცხრილში 16.1.2.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების ძირითადი სახეები

ცხრილი 16.1.2.

ნაგებობების განმასხვავებელი ნიშნები		ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების ძირითადი ტიპები
დანიშნულების მიხედვით	ადგილმდებარეობის მიხედვით	
ღვარცოფშემკავებელი	კალაპოტური	ბეტონის, რკინაბეტონის და ქვის კაშხლები; წყალსაგდებით; გამჭოლი. გრუნტის ყრუ კაშხლები
ღვარცოფგამტარი		არხები; ღვარსაშვები; ხიდები

ღვარცოფმიმართველი		მიმართველი და დამცავი დამზები; დეზები
		საგუბრები
მასტაბილიზირებელი	ფერდობების	ტერასები; ტერასები-არხები; მთისა და წყალსაგდები თხრილები; შემკავებელი კედლები; სადრენაჟო მოწყობილობები

ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების კლასის დანიშვნა უნდა ხდებოდეს სამშენებლო ნორმებისა და წესების მოთხოვნების შესაბამისად, მდინარის ჰიდროტექნიკური ნაგებობების პროექტირების ძირითადი დებულების მიხედვით, დასაცავი ობიექტების მნიშვნელოვნების, ნორმალური ფუნქციონირებისა და გარღვევის შედეგად მიღებული შესაძლო შედეგების გათვალისწინებით.

ღვარცოფგამტარი ნაგებობები, იმ შემთხვევაში, თუ ისინი კვეთენ განსაკუთრებულად მნიშვნელოვან ინფრასტრუქტურულ ობიექტებს ან შედიან ღვარცოფშემკავებელი ნაგებობების შემადგენლობაში, შესაძლოა მივაკუთვნოთ III ან IV კლასს შესაბამისი დასაბუთებით.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების პროექტირებისას აუცილებელია განხილულ იქნას ღვარცოფული ნაკადების წარმოქმნის ალბათობის და

მოცულობების შემცირება, რაც განპირობებულია ღვარცოფულ აუზში გატარებული ღვარცოფსაწინააღმდეგო კომპლექსური ღონისძიებების (სატყეო-სამელიორაციო, პროფილაქტიკური, ორგანიზაციულ-სამეურნეო) გატარების შედეგად.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო სატყეო-სამელიორაციო ღონისძიებები გამოიყენება თავსხმა წვიმებით გამოწვეული ღვარცოფის საწინააღმდეგოდ ფერდობების ეროზირებული მონაკვეთების გამაგრებისა და ზედაპირული ჩამონადენის შემცირების გზით. ასეთი ღონისძიებების გატარების ტექნიკური მიზენშეწონილობა კონკრეტული აუზისთვის დგინდება ინჟინრული კვლევა-ძიების მასალების საფუძველზე.

პროფილაქტიკური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებები გამოიყენება ღვარცოფ წარმოქმნის ცალკეული ბუნებრივი ფაქტების შესასუსტებლად ან სალიკვიდაციოდ. პროფილაქტიკური ღვარცოფ საწინააღმდეგო ღონისძიებების ჩასატარებლად იყანებენ შემდეგ ქმედებებს:

- ა) მეწყერის, ყინულის ან ზვავის შედეგად წარმოქმნილი ტბების გარღვევის პრევენცია სიფონური, გვირაბული და სხვა ტიპის წყალსაგდებების მოწყობის გზით;
- ბ) ღვარცოფწარმომქმნელი წყალმოვარდნების რეგულირება ღვარცოფული კერების ზემოთ სპეციალური საცავების მოწყობით;



გ) მეწყერსაწინააღმდეგო ნაგებობების მშენებლობა (შემაკავებელი კედლები, დრენაჟი და სხვა) ღვაცოფული პროცესების შესაძლო წარმოქმნის მონაკვეთებზე;

დ) ტერასების, არხ-ტერასების, მთისა და წყალსაგდები არხების მოწყობა ღვარცოფწამომქმნელი თავსხმა წვიმების ხარჯის შემცირების მიზნით.

პროფილაქტიკური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების გატარების ტექნიკური მიზანშეწონილობა კონკრეტული აუზისათვის დგინდება ინჟინრული კვლევა-ძიების მასალების საფუძველზე.

ორგანიზაციულ-სამეურნეო ღვარცოფ საწინააღმდეგო ღონისძიებები ღვარცოფულ აუზებში ტარდება ღვარცოფწარმოქმნის ანთროპოგენური ფაქტორების შესასუსტებლად ან სალიკვიდაციოდ; ტყის გაჩეხვის შეზღუდვა ან აკრძალვა, პირუტყვის უსისტემო ძოვება, საგზაო და სხვა ტიპის მშენებლობის დროს ფერდობების ეროზიის პრევენცია, ეროზიის საწინააღმდეგო აგროტექნიკური მოთხოვნების დაცვა.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ღონისძიებების კომპლექსის შემადგენლობა უნდა განისაზღვროს შემუშავებული ვარიანტების ტექნიკო-ეკონომიკური მაჩვენებლების შედარების საფუძველზე, მოცემული აუზისათვის ღვარცოფების წარმოქმნის მექანიზმის გათვალისწინებით.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების და ღონისძიებების კონსტრუქციებისა და ტიპის შერჩევა უნდა ხდებოდეს შემუშავებული ვარიანტების ტექნიკო-ეკონომიკური მაჩვენებლების შედარების საფუძველზე. მშენებლობის რაიონის ტოპოგრაფიული, გეოლოგო-გეომორფოლოგიური და ჰიდრომეტეოროლოგიური პირობების, ადგილობრივი სამშენებლო მასალების არსებობის, სამუშაო წარმოების ხერხების, მშენებლობის ვადების, ნაგებობების ექსპლუატაციის პირობებისა და ღვარცოფული ნაკადის გავლის შემდეგ ნაგებობის დამცავი ფუნქციის აღდგენის შესაძლებლობების გათვალისწინებით.

## **16.2. ღვარცოფული აუზების ბუნებრივი პირობების საინჟინრო კვლევა**

საინჟინრო კვლევებმა უნდა უზრუნველყოს ღვარცოფული აუზების ბუნებრივი პირობების კომპლექსური შესწავლა, რათა მიღებულ იქნას საჭირო მასალები, რომლებიც ახასიათებენ ღვარცოფ წარმოქმნის მექანიზმს, ღვარცოფული ნაკადების საანგარიშო პარამეტრების განსაზღვრას და ეკონომიკურად მიზანშეწონილ და ტექნიკურად დასაბუთებულ გადაწყვეტილებებს ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობებისა და ღონისძიებების პროექტირება მშენებლობის დროს.

ღვარცოფული აუზების ტერიტორიაზე განხორციელებილი საინჟინრო კვლევების მასალები უნდა მოიცავდეს:

- ღვარცოფების ფორმირების პირობების აღწერას;
- მონაცემებს, ადრე გავლილ ღვარცოფულ ნაკადებზე;
- ღვარცოფული აუზების კომპლექსურ სქემატურ რუკას;
- ღვარცოფულ კერებში გრუნტების ფიზიკო-მექანიკურ მახასიათებლებს;
- ღვარცოფული კალაპოტების საანგარიშო კვეთებში მორფომეტრულ მახასიათებლებს.

ღვარცოფულ აუზებში ღვარცოფების ფორმირების პრობების აღწერა უნდა მოიცავდეს:

- აუზის მორფოგენეტიკური და ჰიდრომეტეოროლოგიური პირობების დახასიათებას, რაც განაპირობებს ღვარცოფწარმოქმნის შესაძლებლობებსა და მასშტაბებს;
- დასკვნებს, ღვარცოფული პროცესებისა და ღვარცოფული ნაკადების შესაძლებელ ტიპებზე, მათ მასშტაბურობასა (ცხრილი 16.2.1.) და განმეორადობაზე;
- რეკომენდაციებს, ღვარცოფ საწინააღმდეგო ღონისძიებების ხასიათსა და მიმართულებაზე.

ღვარცოფული ნაკადების მასშტაბურობა

ცხრილი 16.2.1.

ღვარცოფული ნაკადების მასშტაბურობა	ღვარცოფული ნაკადების მოცულობა, მ <sup>3</sup>
მცირე	ასეულები
საკმაოდ დიდი	ათასეულები
დიდი	ათიათასები
ძალიან დიდი	ასეულობით ათასები
უზარმაზარი	მილიონები
გრანდიოზული	ასეული და ათასეული მილიონები

**შენიშვნა:** ღვარცოფული ნაკადების ნებისმიერი მასშტაბების დროს ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობებისა და ღონისძიებების შერჩევა უნდა განხორციელდეს შემუშავებული დაცვის ვარიანტების ტექნო-ეკონომიკური მაჩვენებლების შედარების საფუძველზე.

ცნობები, ადრე გავლილ ღვარცოფულ ნაკადებზე, უნდა მოიცავდეს მონაცემებს, რომელიც მიღებული იქნება: ლიტერატურულ და საფონდო წყაროებიდან; ადგილობრივი მოსახლეობისაგან; ღვარცოფების გეობოტანიკური ქრონოლოგიის მეთოდის გამოყენებით; ღვარცოფული ნაკადების მიერ დატოვებული კვლების მიხედვით; ფოტოთეოდოლიტური, აეროფოტო და კოსმოსური გადაღებების მასალებით. აეროფოტო და კოსმოსური გადაღებები გამოყენებულ უნდა იქნას ღვარცოფული აუზის კომპლექსური სქემატური რუკის შესადგენად და ღვარცოფული კერების, მორენული ტბების, ნიადაგურ-მცენარეული საფარის, ადამიანის

სამეურნეო მოღვაწეობის შედეგებისა და სხვა ბუნებრივი მდგომარეობის ცვლილებების განვითარების დინამიკის შესაფასებლად.

ღვარცოფული აუზის კომპლექსურ სექმატურ რუკაზე უნდა იყოს აღნიშნული:

- ჰიდროგრაფიული ქსელი კალაპოტების ქანობების მახასიათებლები;
- შესაძლო დაგუბების ადგილები;
- ღვარცოფული კერები და მათში ფხვიერმონატები მასალების მარაგი;
- გამოტანის კონუსები;
- მყინვარები, ძველი და ახალი მორენები, ტბები და წყალსაცავები;
- ღვარცოფსაშიში აუზების საზღვრები, არსებული ღვარციფსაწინააღმდეგო ნაგებობები;
- ღვარცოფული ნაკადების მოქმედების ზომაში განლაგებული უმნიშვნელოვანესი ინფრასტრუქტურული ობიექტები.

გარდა ზემოთაღნიშნულისა, სექმატურ რუკაზე უნდა იყოს გამოყოფილი ღვარცოფების ფორმირების, ტრანზიტის და დაღეჭვის აკუმულაციის ადგილები.

ღვარცოფული კერებისა და ღვარცოფული დანალექი გრუნტების ფიზიკო-მექანიკურ მახასიათებლებს განეკუთვნება:

- გრანულომეტრული (მარცვლოვანი) შედგენილობა;
- შინაგანი ხახუნის კუთხე წყალგაჯერებულ მდგომარეობაში;

- მყარი შემადგენლის სიმკვრივე;
- ფორიანობა;
- მოცულობითი ტენიანობა და სხვა მახასიათებლები, რომლებიც აუცილებელია ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების პროექტირებისა და გაანგარიშებისათვის.

ღვარცოფული კალაპოტის საანგარიშო კვებების მორფორომეტრიული მახასიათებლები წარდგენილ უნდა იქნას გრძივი და განივი პროფილების სახით.

### **16.3. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირება**

ღვარცოფსაწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების პროექტირების დროს ღვარცოფული ნაკადების საანგარიშო მახასიათებლების განსაზღვრა უნდა წარმოებდეს ტოპოგრაფიული, გეოლოგო-გეომორფოლოგიური და ჰიდრომეტეოროლოგიური კომპლექსური კვლევების შედეგების გათვალისწინებით.

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ძირითად დატვირთვებზე და ზემოქმედებაზე პროექტირების დროს გათვალისწინებულ უნდა იქნას:

- ა) ნაგებობის საკუთარი წონა;
- ბ) გრუნტის წონა, რომელიც დაიძვრება ნაგებობებთან ერთად და გრუნტის გვერდითი წნევა ქვედა და ზედა ბიეფის მხრიდან;
- გ) ნაგებობის წინ დალექილი ნატანის წნევა;
- დ) გრუნტის წყლების ჰიდროსტატიკური და ფილტრაციული წნევა;

ე) საანგარიშო ღვარცოფული ნაკადის დალექილი მასის სტასტიკური წნევა, ამავე ნაკადის დალექილი მასის სტასტიკური წნევა, ამავე ნაკადს მოძრავი ღვარცოფული ზვირთის სტასტიკური და დინამიკური წნევა (მხოლოდ ღვარცოფშემკავებელი, ღვარცოფგამტარი და ღვარცოფ-მიმმართველი ნაგებობებისათვის).

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების განსაკუთრებულ დატვირთვებზე და ზემოქმედებაზე პროექტირების დროს გათვალისწინებულ უნდა იყოს შემდეგი დატვირთვებიდან ერთ-ერთი:

ა) სეისმური ზემოქმედება;

ბ) წყალმოვარდნით გამოწვეული ღვარცოფული ნაკადის ზემოქმედება (ღვარცოფშემკავებელი კაშხლებისათვის).

გადამლობი ნაგებობები განკუთვნილია, როგორც კალაპოტის სტაბილიზაციისთვის, აგრეთვე ღვარცოფული და არაღვარცოფული ხასიათის მყარი ჩამონადენის ნაწილობრივი შეკავებისათვის (დაჭერისათვის).

გადამლობი ნაგებობები, რომლებიც განკუთვნილია კალაპოტის სტაბილიზაციისთვის, იგება წყალსადინარის ტრანზიტულ ნაწილში, სიმაღლით 3-დან 5 მეტრამდე (შუალედური გამჭოლი ნაგებობები), ხოლო ძირითადი ნაგებობები 7-დან 12 მეტრამდე სიმაღლით.

მცირე მასტაბილიზირებელი გადამლობი ნაგებობები იგება კასკადურად, მთავარი წყალსადინარის კალაპოტში და მის ღვარცოფულ შენაკადებში.

მასტაბილიზირებელ ნაგებობებს შორის მანძილი უნდა იყოს ისეთი, რომ საგუბრის სრულად შევსების შემთხვევაში დალექილი ნატანი გავრცელებულ იქნას წინა გადამლობ ნაგებობის ძირამდე (უკანა მხრიდან), ანუ ნაგებობათა შორის მანძილი პროექტირდება დალექილი (ღვარცოფული) ნატანის გამათანაბრებელი ქანობის გათვალისწინებით.

გამათანაბრებელი ქანობის სიდიდე  $i_y$  პირველი მიახლოებით მიღება 0,7 რიგის ტოლი უბნის ძირითად ქანობთან შედარებით, როდესაც ძირითადი ქანობი არ აღემატება 20 %-ს.

ღვარცოფის მოცულობითი მასა განისაზღვრება ერთ-ერთი შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$Y_{\text{ღვარ.}} = Y_{\text{წყ.}} + S(Y_{\text{მყ.}} - Y_{\text{წყ.}}) \quad (16.3.1)$$

$$Y_{\text{ღვარ.}} = \frac{Y_{\text{მყ.}} \cdot Y_{\text{წყ.}}}{(1-P)Y_{\text{მყ.}} + P Y_{\text{წყ.}}} \quad (16.3.2)$$

$$Y_{\text{ღვარ.}} = \frac{Y_{\text{წყ.}} \cdot W_{\text{წყ.}} + Y_{\text{მყ.}} \cdot W_{\text{მყ.}}}{W_{\text{მყ.}} + W_{\text{წყ.}}} \quad (16.3.3)$$

$$Y_{\text{ღვარ.}} = \frac{Y_{\text{წყ.}} \cdot Q_{\text{წყ.}} + Y_{\text{მყ.}} \cdot Q_{\text{მყ.}}}{Q_{\text{მყ.}} + Q_{\text{წყ.}}} \quad (16.3.4)$$

სადაც:  $Y_{\text{ღვარ.}}$  არის ღვარცოფის მოცულობითი მასა;

$Y_{\text{წყ.}}$  - წყლის მოცულობითი მასა;

$Y_{\text{მყ.}}$  - ღვარცოფის მყარი შემადგენლის მოცულობითი მასა;

$W_{\text{წყ.}}$  - წყლის მოცულობა;

$W_{\text{მყ.}}$  - ღვარცოფის მყარი შემადგენლის მოცულობა;

$Q_{\text{წყ.}}$  - წყლის ხარჯი;

$Q_{\text{მყ.}}$  - ღვარცოფის მყარი შემადგენლის ხარჯი;



S - ნარევის კვეთში მყარი მასალის საშუალო მოცულობითი კონცენტრაცია;

P - ნარევაში მყარი მასალის წონითი კონცენტრაცია.

ღვარცოფებში მყარი მასალის მოცულობითი კონცენტრაცია განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$S = \frac{W_{მყ.}}{W_{ღვარ.}} = \frac{W_{მყ.}}{W_{წყ.} + W_{მყ.}} \quad (16.3.4)$$

ნარევაში მყარი მასალის წონითი კონცენტრაცია განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$P = \frac{G_{მყ.}}{G_{ღვარ.}} = \frac{G_{მყ.}}{G_{წყ.} + G_{მყ.}} \quad (16.3.5)$$

სადაც:  $G_{ღვარ.}$  არის ღვარცოფული მასის წონა;

$G_{მყ.}$  - ღვარცოფის მყარი შემადგენლის წონა;

$G_{წყ.}$  - წყლის წონა.

ღვარცოფის მოცულობითი და წონითი კონცენტრაციები შემდეგ დამოკიდებულებაშია:

$$S_{ღვარ.} = \frac{P\gamma_{წყ.}}{(1-P)\gamma_{მყ.} + P\gamma_{წყ.}} \quad (16.3.6)$$

$$P = \frac{S\gamma_{მყ.}}{(1-S)\gamma_{წყ.} + S\gamma_{მყ.}} \quad (16.3.7)$$

მყარი ნაწილაკების ძირითადი მახასიათებლები:

ა) ნაწილაკების საშუალო არითმეტიკული დიამეტრი - წარმოადგენს ცალკეული ნაწილაკების ზომების ჯამის ფარდობას მათ რაოდენობასთან (რიცხვთან):

$$d_{საშ.არით} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i d_i + n_2 d_2 + \dots + n_N d_N}{n_1 + n_2 + \dots + n_N} \quad (16.3.8)$$

სადაც:  $n_1, n_2$  არის  $d_1, d_2$  დიამეტრის მქონე ნაწილაკთა რაოდენობა (რიცხვი);

$\sum_{i=1}^N n_i$  - ყველა ნაწილაკის (გაზომვების) რაოდენობა (რიცხვი);

$n_i$  - ნაწილაკების, მოცემული სიძსხოს კლასის ფარგლებში.

ბ) ნაწილაკების საშუალო გეომეტრიული დიამეტრი - წარმოადგენს  $N$  ზომის ნაწილაკების (გაზომვების) ნამრავლს:

$$d_{\text{საშ.გეომ.}} = \sqrt[N]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot \dots \cdot d_N} \quad (16.3.9)$$

ან ლოგარითმული ფორმით:

$$\log d_{\text{საშ.გეომ.}} = \frac{\sum_{i=1}^N \log d_i}{N} \quad (16.3.10)$$

ნაწილაკების საშუალო გეომეტრიული დიამეტრი ნაკლებია საშუალო არითმეტიკულზე.

გ) ნაწილაკების საშუალო დიამეტრი განისაზღვრება გრანულომეტრიული შედგენილობის მრუდის ან მოსაზღვრე ნაწილაკების დიამეტრის მიხედვით.

არაბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე კვეთში არის სიჩქარე, რომლითაც მოძრაობენ ნაკადის როგორც მყარი, აგრეთვე თხიერი ნაწილაკები და უზრუნველყოფენ მოცემულ ხარჯს განსაზღვრული საანგარიშო კუთრი წონის შემთხვევაში. თუ ცნობილია ნაკადის ცალკეული

ფაზების მოძრაობის სიჩქარე კვეთში, მაშინ არაბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე კვეთში გამოითვლება დამოკიდებულებით:

$$V_{\text{საშ.}} = \frac{V_{\text{საშ.}}^{\text{მყ.}} \cdot S \rho_{\text{მყ.}} - V_{\text{საშ.}}^{\text{თხ.}} \cdot (1-S) \rho_{\text{თხ.}}}{S \rho_{\text{მყ.}} + (1-S) \rho_{\text{თხ.}}} \quad (16.3.11)$$

სადაც:  $V_{\text{საშ.}}$  არის ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე კვეთში;

$V_{\text{საშ.}}^{\text{თხიერი.}}$  - ღვარცოფის თხიერი შემადგენლის საშუალო სიჩქარე კვეთში;

$\rho_{\text{მყ.}}$  - ღვარცოფის მყარი შემადგენლის სიმკვრივე;

$\rho_{\text{თხ.}}$  - ღვარცოფის თხიერი შემადგენლის სიმკვრივე.

ბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე თანაბარი რეჟიმით მოძრაობის დროს, კალაპოტის სწორკუთხოვანი განივი კვეთის შემთხვევაში, გამოითვლება დამოკიდებულებით:

$$V = \frac{g i H^2}{v} f(\beta) \quad (16.3.12)$$

$$f(\beta) = \frac{\beta}{2} (\beta^2 - 1) + \frac{1}{3} (1 - \beta^3) \quad (16.3.13)$$

სადაც:  $\beta = \frac{h}{H}$  - ფარდობითი სიღრმე;

$h$  - ბმულ ღვარცოფში გულის (სტრუქტურული ნაწილის) სიმაღლე;

$H$  - ნაკადის სრული სიმაღლე;

$V$  - ღვარცოფის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი;

$i$  - კალაპოტის ფსკერის ქანობი;

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

$$\frac{H}{3} \left(1 - \frac{h^3}{H^3}\right) > \frac{h}{2} \left(1 - \frac{h^2}{H^2}\right) \quad (16.3.14)$$

ანუ  $h < 0,9H$ .

#### 16. 4. ღვარცოფშემკავებელი დამცავი საინჟინრო

##### ნაგებობები

ღვარცოფშემკავებელი ნაგებობები, რომელიც ქმნიან ღვარცოფსაცავებს, განკუთვნილია მნიშვნელოვანი ობიექტების დასაცავად, ღვარცოფული ნაკადის ზედა ბიეფში შეჩერების გზით.

ღვარცოფშემკავებელი ნაგებობების გაანგარიშების დროს საანგარიშო მოცულობა  $V$  უნდა განისაზღვროს დამოკიდებულებით:

$$V = W_1 - W_2 + TW \quad (16.4.1)$$

სადაც:  $W_1$  არის ღვარცოფის მაქსიმალური მოცულობა კაშხლის კვეთში;

$W_2$  - აკუმულაციის პროცესში ქვედა ბიეფში გადაგდებული ღვარცოფის მოცულობა;

$T$  - ღვარცოფსაცავის დალამვის დრო, მიიღება არანაკლებ 25 წელი;

$W$  - ღვარცოფსაცავში აკუმულირებული ნატანის საშუალო წლიური მოცულობა.

ღვარცოფის მაქსიმალური მოცულობა  $W_1$  მიიღება:

ა) ღვარცოფებისათვის, რომლებიც გამოწვეულია წვიმის წყალმოვარდნებით, მაქსიმალური მოცულობა მიიღება წვიმის წყალმოვარდნით ჩამოყალიბებული ღვარცოფის მასის ტოლი 1 % აღმატების ალბათობით;

ბ) სხვა გენეზისის მქონე ღვარცოფული ნაკადებისათვის - განვლილი ღვარცოფების კვალის შესწავლის შედეგების საფუძველზე.

ღვარცოფსაცავში აკუმულირებული ნატანის საშუალო წლიური მოცულობა  $W$  წარმოადგენს სხვაობას მყარი ჩამონადენის საშუალო მრავალწლიურ მოცულობასა (25 წელიწადში 1-ზე მეტჯერ განმეორების მქონე ღვარცოფული ნაკადების გათვალისწინებით) და ქვედა ბიეფში გადაგდებული ნატანის მოცულობას (განისაზღვრება წყალგამტარი ნაგებობების კონსტრუქციით) შორის. თუ ღვარცოფების განმეორადობა 25 წელიწადში 1-ზე ნაკლებია და უზრუნველყოფილია მყარი ჩამონადენის ტრანზიტი, მაშინ ღვარცოფსაცავის ტევადობა გაიანგარიშება დალექვაზე მარაგის გარეშე  $TW=0$ .

ღვარცოფსაცავის საანგარიშო მოცულობის შესაბამისი კაშხლის სიმაღლის განსაზღვრის დროს აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნას ღვარცოფული ნატანის გამთანაბრებელი ქანობი  $\tan\alpha$ . ქვატალახიანი ღვარცოფული ნაკადებისთვის მიითება  $(0,5\pm 0,7) \tan\alpha$  - ნაკადის სახის  $\gamma$ -ს მიხედვით, სადაც  $\tan\alpha$  - ბუნებრივი

კალაპოტის ქანობია. გრუნტის ყრუ ღვარცოფშემკავებელი კაშხლების სიმაღლის განსაზღვრის დროს  $\tan\alpha=0$ .

ღვარცოფშემკავებელი კაშხლები, რომელთა გარღვევამ შეიძლება კატასტროფული შედეგი გამოიწვიოს, აუცილებლად უნდა შემოწმებულ იქნას ისეთი ღვარცოფის ზემოქმედებაზე, რომელიც გამოწვეულია წვიმის წყალმოვარდნით 0,01% ალმატების ალბათობით. ამასთან, პროექტით გათვალისწინებულ უნდა იქნას ზედაპირული ღვარცოფსაგდები ნაგებობების მოწყობა, რომლებიც უზრუნველყოფენ ჭარბი (საანგარიშოსთან შედარებით) ღვარცოფული ნაკადის მოცულობის გადაგდებას ან კაშხლის ქიმის ნიშნულის აწევას ისე, რომ უზრუნველყოფილ იქნას ღვარცოფული ნაკადის სრული მოცულობის აკუმულირება.

ღვარცოფშემკავებელი კაშხლის პროექტირების დროს გათვალისწინებულ უნდა იქნეს წყალგამტარი ნაგებობები, მდინარის ჩამდინარე წყლების გასატარებლად ქვედა ბიეფში და ნატანწყლიანი ღვარცოფების თხევადი შემადგენელის გადასაგდებად. ამასთან, გადასაგდები ხარჯი არ უნდა აღემატებოდეს კრიტიკულ ღვარცოფწარმომქმნელ ხარჯს.

ღვარცოფშემკავებელი კაშხლები, როგორც წესი, უნდა დაპროექტდეს ფილტრაციის საწინააღმდეგო მოწყობილობებისა და წყალგამტარ ნაგებობებზე ზღუდარების გარეშე. ღვარცოფების აკუმულაციის მიზნით დასაშვებია გამჭოლი კონსტრუქციის კაშხლების

გათვალისწინება. დატვირთვები გამჭოლ კაშხალზე მიიღება ისევე, როგორც ყრუ კაშხალზე.

გრუნტის მასალის ყრუ ღვარცოფშემკავებელი კაშხლების ქიმის ამაღლება, ღვარცოფსაცავის საანგარიშო მოცულობის შესაბამისად, უნდა მიღებულ იქნას არანაკლები უკანასკნელი ღვარცოფული ზვირთის სიმაღლისა, რომელიც განისაზღვრება ღვარცოფის მაქსიმალური ხარჯისა და საშალო ქანობისთვის. საშუალო ქანობი აიღება ღვარცოფისათვის წინ განლაგებული ფართობის ქანობის ტოლი. ამასთან, ქვატალახიანი ღვარცოფებისათვის, ღვარცოფის ზვირთის სიმაღლე კაშხალთან მიიღება ღვარცოფსაცავში შემავალი ღვარცოფის სიღრმის ტოლი.

## 16.5. ღვარცოფგამტარი ნაგებობები

ძირითადი ღვარცოფგამტარი ნაგებობებია:

ა) **არხები** - დასახლებულ პუნქტებზე, საწარმოებზე და სხვა ობიექტებზე ღვარცოფული ნაკადების მოვლით ან მათზე გასატარებლად;

ბ) **ღვარსაშვები** - ღვარცოფული ნაკადების ხაზოვან ნაგებობებზე (საავტომობილო ან/და სარკინიგზო გზებზე, არხებზე, გაზსადენებზე, ნავთობსადენებზე და ა.შ.) გასატარებლად.

შენიშვნა: მიღების გამოყენება ღვარცოფული ნაკადების გასატარებლად დაუშვებელია!

ღვარცოფგამტარი ნაგებობების გამოყენება ქვატალახიანი ღვარცოფების გასატარებლად დასაშვებია

მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ნაგებობების გრძივი ქანობი 0,1 ნაკლები არ არის.

ღვარცოფგამტარი ნაგებობების ზომები, შემაჯავალი და გამაჯავალი მონაკვეთებითა და აგრეთვე ამრიდი ტრაქტით უნდა დანიშნულ იქნას ნაკადის სავალდებულო ტრანსპორტირების უნარის პირობიდან, ამასთან:

- ნაგებობის ქანობი უნდა მიღებულ იქნას არანაკლები, ვიდრე შემომავალი ღვარცოფის კალაპოტის საშუალო ქანობისა, რომლის სიგრძე აიღება არანაკლები ღვარცოფული ნაკადის 20-20 სიგანისა.
- ნაგებობის სიგანე, როგორც წესი, მიიღება შემომავალი ღვარცოფული ნაკადის საშუალო სიგანის ტოლი;
- ღვარცოფგამტარი ნაგებობების გრძივი ღერძი უნდა ემთხვეოდეს ღვარცოფული ნაკადის დინამიკურ ღერძს; ნაგებობის მოტრიალების აუცილებლობის შემთხვევაში ღერძებს შორის კუთხე უნდა მიღებულ იქნას არაუმეტეს  $11^{\circ}$ - $13^{\circ}$ -ისა;
- ღვარცოფგამტარი ნაგებობების კედლების (გადაფარვის) ამალლება ღვარცოფული ნაკადის მაქსიმალურ დონეზე უნდა მიღებულ იქნას  $0,2 H_{\max}$ -ის ტოლი, სადაც  $H_{\max}$  – ღვარცოფული ნაკადის მაქსიმალური სიღრმეა, აიღება: ღარებისთვის არა ნაკლებ 1 მეტრისა, ხოლო არხებისთვის - 0,5 მეტრი;



ღვარცოფგამტარი ნაგებობების შემავალი უბანი გეგმაში ისე უნდა იყოს ორიენტირებული, რომ შემაუღლებელი კედლების დაყენების კუთხე მთავარი კალაპოტის ღემის მიმართ არ აღემარებოდეს  $11^{\circ}$ -ს.

ღვარცოფგამტარი ნაგებობების კედლების ამალემა ღვარცოფული ნაკადის მაქსიმალურ დონეზე შემავალ უბნებზე რეკომენდებულია მიღებულ იქნას არანაკლები  $0,5 H_{\max}$ -ისა.

### **16.6. ღვარცოფმიმართველი ნაგებობები**

ღვარცოფმიმართველი ნაგებობები გათვალისწინებულია ნაკადის მიმართვისათვის ღვარცოფგამტარ ნაგებობისაკენ, ღვარცოფული ნაკადის მოსაცილებლად დასაცავი ობიექტიდან ან დასაცავი ტერიტორიის გამორეცხვის თავიდან აცილების მიზნით.

მიმართველი დამბების მოხვევის კუთხეები, როგორც წესი, მიღებულ უნდა იქნას მოთხოვნების შესაბამისად.

მიმართველის და გადამღობი დამბების დაწნევიანი ფერდები რეკომენდებულია გამაგრებულ იქნას მოპირკეთების ასაწყობი ან მონოლითური რკინაბეტონით.

დამბის ქიმის (მოპირკეთების) ამალემა ღვარცოფული ნაკადის მაქსიმალურ დონეზე უნდა იქნას მიღებული.

## 16.7. მასტაბილიზებერი ნაგებობები

მასტაბილიზირებელი ნაგებობები გათვალისწინებულია ღვარცოფული ნაკადის მოძრაობის შესაჩერებლად ან მისი დინამიკური მახასიათებლების შესასუსტებლად.

ფერდობების მასტაბილიზირებელი ნაგებობების პროექტირება უნდა განხორციელდეს მეწყერ-აწინააღმდეგო და ფერდობების ჩამოშლის საწინააღმდეგო დამცავი ნაგებობების პროექტირებისა და მშენებლობის ინსტრუქციის მოთხოვნების გათვალისწინებით.

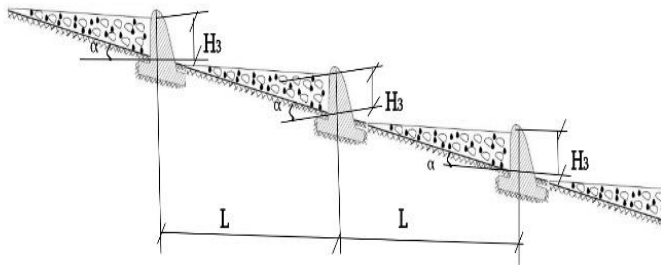
კალაპოტების სტაბილიზაციის ზედა ზღვარი განისაზღვრება იმ უბნით, რომლის ზემოთაც წვიმის წყალმოვარდნის ხარჯი (2% აღმატების ალბათობით) არ აჭარბებს კრიტიკულ ღვარცოფწარმოქმნელ ხარჯს.

ნაგებობის გამორეცხვის შესაჩერებლად, არაკლდოვან ფუძეზე საგუბრების მოწყობის შემთხვევაში, რეკომენდირებულია ქვედა ბიეფში 0,25 H სიმაღლის მქონე კონტრსაგუბრის მოწყობა, ძირითადი საგუბრიდან 2H მანძილით დაშორებით (H-ძირითადი საგუბრის სიმაღლე კალაპოტის ფსკერიდან, მ). საგუბარი და კონტრსაგუბრები ერთმანეთთან გრძივი კედლებით უნდა იქნას დაკავშირებული.

კალაპოტების მასტაბილიზირებელი ნაგებობების პროექტირება უნდა განხორციელდეს საგუბრების სისტემის სახით (ნახაზი 16.7.1) რომლებიც მოიცავენ მოცემუ-

ლი აუზის კალაპოტების ყველა მონაკვეთს, სადაც შესაძლებელია ღვარცოფული ნაკადების წარმოქმნა. ამასთან, საგუბრების სამშენებლო სამუშაოების თანმიმდევრობა უნდა გამორიცხავდეს აშენებული ნაგებობების ზემოთ ღვარცოფული ნაკადების წარმოქმნის შესაძლებლობას.

7.6. უნდა გამოყენებულ იქნას 2-დან 5 მეტრამდე სიმაღლის, როგორც წესი შემდეგი სახის გამჭოლი საგუბარი კონსტრუქციები:



ნახაზი 16.7.1. ღვარცოფული კალაპოტის გრძივ პროფილზე მასტაბილიზირებელი საგუბრების განაწილების სქემა

- ბეტონის და რკინაბეტონის შემკავებელი (გადამღობი) კედლები ღიობებით;
- რკინაბეტონის ასაწყობი ელემენტებისაგან შემდგარი ზღუდარი.

შემკავებელ კედლებს შორის მანძილი (ჰორიზინტალურად)  $L$  (მ) უნდა განისაზღვროს ფორმულით:

$$L = \frac{H_3}{\tan\theta - \tan\theta_y} \quad (16.7.1)$$

სადაც:  $H_3$  არის შემკავებელი კედლების სიმაღლე კალაპოტის ფსკერის ზემოთ, მ;

$\tan\theta$  - კალაპოტის ბუნებრივი ქანობი შემკავებელი კედლის წინ;

$\tan\theta_y$  - შემკავებელი კედლის წინ დანალექის გამთანებრებელი ქანობი,  $\tan\theta_y = 0,7\tan\theta$

მასტაბილიზერებელი ნაგებობები გაანგარიშებული უნდა იქნას წყალმოვარდნის გატარებაზე 2%-იანი ალბათობის აღმატებით.

ნაგებობის ბორტების გამორეცხვის თავიდან ასაცილებლად, წყალმოვარდნების საგუბრის ქიმზე გადმოდინება უნდა განხორციელდეს სპეციალური წყალგამტარი მოწყობილობის მეშვეობით, რომლის სიგანეც დამოკიდებულია მდინარის ჭავლური ნაწილის სიგანეზე, ხოლო სიღრმე - წვიმის საანგარიშო წყალმოვარდნის გატარების მოთხოვნილებაზე. საგუბრის ტანში წყლის გასაშვები ხვრეტები უნდა განლაგებულ იქნას წყალგამტარი მოწყობილობის ჰორიზონტალური პროექციის საზღვრებში.

საგუბრები უნდა გაანგარიშებული იყოს სიმტკიცეზე და მედეგობაზე, როგორც შემკავებელი (შემგუბებელი) კედლები, ჰიდროსტატიკური და წყლის ფილტრაციული დაწნევისა და დანალექი ნატანის გათვალისწინებით.

არხები, ღვარსაშვები და მასტაბილიზირებელი საგუბრების სისტემები, როგორც წესი, დაპროექტებულ

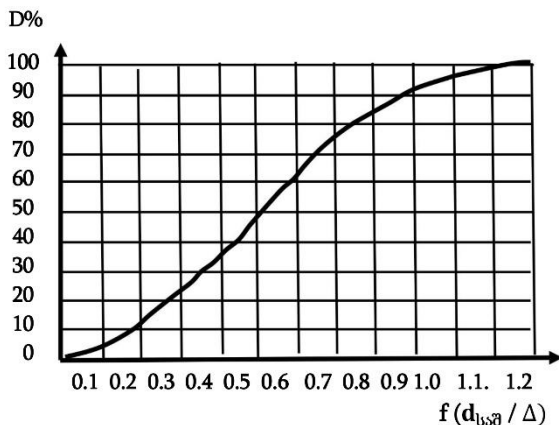
უნდა იქნას როგორც მცირე, აგრეთვე დიდი ღვარცოფული ნაკადებისათვის.

აუცილებელია ნაკადის ტალღური მოძრაობის შესაძლებლობის პროგნოზირება მოცემულ უბანზე. გათვალისწინებული უნდა იყოს, რომ ტურბულენტურ ღვარცოფულ ნაკადებში უწყვეტი ტალღის სიჩქარე 1,5-ჯერ, ხოლო სტრუქტურულ (ბმულ) ნაკადებში 3-ჯერ აღემატება ცოცხალ კვეთში ნაკადის საშუალო სიჩქარეს.

გამჭოლი ნაგებობები განკუთვნილია მყარი ჩამონადენის სრული ან ნაწილობრივი შეკავებისათვის (როგორც ღვარცოფული, აგრეთვე არაღვარცოფული ხასიათის).

გამჭოლ ღვარცოფდამჭერ ღერძებს შორის დაცილების ვერტიკალური პროექცია, ნაკადის მიერ ტრანსპორტირებული, მოცემულ დიამეტრებზე დიდი ნატანის შკავებისათვის, მცირე ზომის ნაწილი ნატანის „გაჭედვის“ ეფექტის გათვალისწინებით, ინიშნება ნახ. 16.7.2-ის მეშვეობით.

გრაფიკზე აღნიშნულია:  $d_{საშ.}$  - ტრანსპორტირებული ნატანის საშუალო დიამეტრი;  $\Delta$  - ღვარცოფდამჭერის ჰორიზონტალურ ღერძებს შორის საშუალო ვერტიკალური მანძილი;  $D\%$  - ღვარცოფდამჭერის მიერ შეკავებული ნატანის რაოდენობა მყარი ჩამონადენის საერთო მოცულობიდან, პროცენტებში.



ნახ 16.7.2. გრაფიკული დამოკიდებულება  $D\% = f\left(\frac{d_{საშ}}{\Delta}\right)$ .

$D\% = f\left(\frac{d_{საშ}}{\Delta}\right)$  გრაფიკული დამოკიდებულება იძლევა საშუალებას განსაზღვრულ იქნას ღვარცოფდამჭერის მიერ შეკავებული ნატანის რაოდენობა მყარი ჩამონადენის საერთო მოცულობიდან პროცენტებში, ღვარცოფდამჭერების ჰორიზონტალურ ღერძებს შორის მოცემული საშუალო ვერტიკალური მანძილის მიხედვით

**16.8. ბმული ღვარცოფული ნაკადის დამრტყმელი ძალის განსაზღვრა ყრუ და გამჭოლ ღვარცოფდამჭერ ნაგებობაზე**

ყრუ განივ ბარიერზე (ნაგებობაზე) ბმული ღვარცოფული ნაკადის დამრტყმელი  $P$  ძალა, განისაზღვრება დამოკიდებულებით, როცა:  $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$ ,

$$P = 4,5\rho_c\omega_0V_0^2 \quad (16.8.1)$$

სადაც:  $\omega_0V_0$  არის შესაბამისად, ბმული ღვარცოფული ნაკადის ცოცხალი კვეთის ფართობი და საშუალო სიჩქარე ცოცხალ კვეთში დარტყმამდე;

$\theta_1$  - ნაგებობის დაწნევიანი მხარის დახრის კუთხე წყალსადინარის ბუნებრივი ქანობის პერპენდიკულარის მიმართ.

მოვარდნილი ნაკადის მიმართ ყრუ განივი ნაგებობების საკუთარი წონით გაწეული მდგრადობის პირობა წარმოდგენილია დამოკიდებულებით:

$$fG \cos\theta_1 > R \sin\theta \quad (16.8.2)$$

სადაც:  $G$  - არის ნაგებობის წონა;

$f$  - ნაგებობის ფსკერთან ხახუნის კოეფიციენტი.

ბმული ღვარცოფული ნაკადის მიერ განივი ნაგებობის ნგრევის შემთხვევაში იზრდება ხარჯი დანგრეული ნაგებობის მასალის ნაკადში შერევის ხარჯზე და შესაბამისად სიჩქარე მცირდება. ამ შემთხვევაში სიჩქარე გამოითვლება:

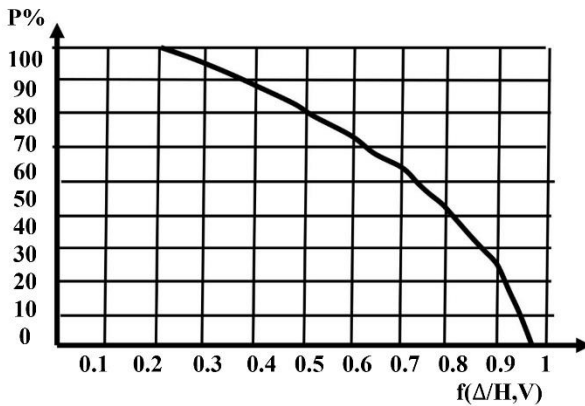
$$U = \frac{\rho_c\omega_0V_0^2\sin^2\theta}{2\left(\rho_H\frac{W}{T} - \rho_c\omega_0V_0\cos\theta\right)} \quad (16.8.3)$$

სადაც:  $\rho_c, \rho_H$  არის შესაბამისად ღვარცოფისა და ნაგებობის მასალის სიმკვრივეები;

$W$  - ნაგებობის დანგრეული ნაწილის მოცულობა  $t=1$  წამში.

გამჭოლ ნაგებობაზე მოსული ბმული ღვარცოფული ნაკადის დარტყმის ძალა პროცენტებში ( $P\%$ ), ექვივალენტურ ყრუ ნაგებობასთან შედარებით, განისაზღვრება გრაფიკით

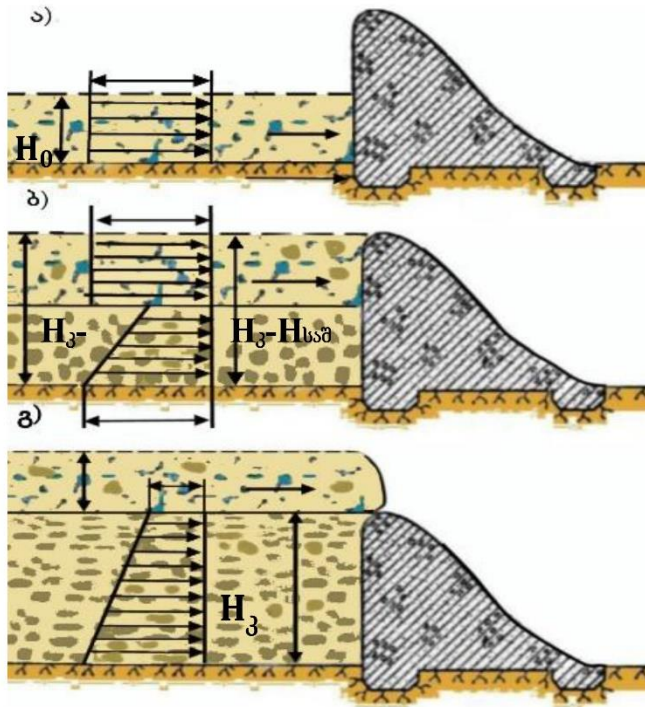
$P\% = f\left(\frac{\Delta}{H}, V\right)$ , (ნახ. 16.8.3).  $\Delta$  არის უჯრედის მინიმალური ზომა ვერტიკალურ სიბრტყეში.



ნახ. 16.8.3. გრაფიკული დამოკიდებულება  $P\% =$

$$f\left(\frac{\Delta}{H}, V\right);$$





ნახ. 16.8.4. ღვარცოფული ნაკადის მიერ ნაგებობაზე დატვირთვების განსაზღვრის სქემები

- ა) ღვარცოფული  $h_0$  სიღრმის ნაკადის პირველი ზვირთის დაწნევის ეპიურა;
- ბ)  $H_{საშ}$  სიღრმის ღვარცოფული ნაკადის მორიგი ზვირთის და  $H_3 - H_{საშ}$  სიღრმის ამავე ნაკადის მიერ ადრე დანალექი მასის მოქმედების შედეგად  $H_3$  სიმაღლის კაშხალზე მოსული დაწნევის ეპიურა;

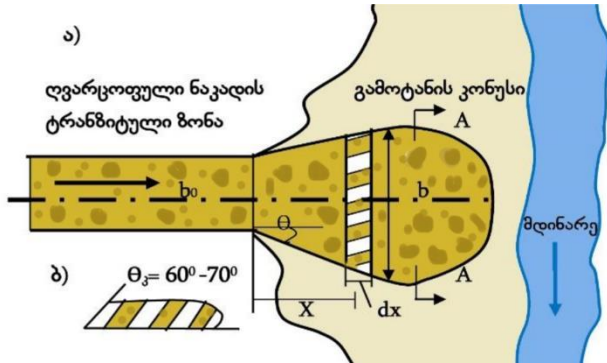
გ) კაშხალზე მოსული დაწნევის ეპიურა მორიგი ღვარცოფული ზვირთის მოსვლისას, რომელიც მოძრაობს ამავე ღვარცოფული ნაკადით შევსებულ ღვარცოფსაცავზე.

## **თავი 17. წყალსადინარის გამოტანის ზონა**

### **17.1. ბმული ღვარცოფის გამოტანის კონუსზე გაფართოება და გაჩერება**

წყალსადინარის ტრანზიტული ზონიდან გამოტანის კონუსზე ბმული ღვარცოფის გამოსვლისას, როდესაც იგი განთავისუფლდება მიმმართველი კალაპოტისგან, მიუხედავად ნაკადის მყარი შიდა სტრუქტურისა, გარდამავალ მონაკვეთზე ხდება სიჩქარეების ინტენსიური გადანაწილება, რაც გამოწვეულია ხარჯის ნაწილის გახარჯვით კალაპოტის ხორკლიანი ზედაპირის მოსწორებაზე, რომელიც იწვევს მოძრაობის დამატებით წინაღობას (ნახ. 17.1.1).

მნიშვნელოვანია განსაზღვრულ იქნას ღვარცოფული მასის გაჩერების ადგილი გამოტანის კონუსზე.



ნახ. 17.1.1. გამოტანის კონუსზე ღვარცოფული ნაკადის გაფართოების სქემა: ა) გეგმა, ბ) ჭრილი

მომრაობის რაოდენობის ცვლილების გათვალისწინებით:

$$K_{საშ.} = \frac{i_{ტრ.ზ}}{i_{გ.კ.}} \quad (17.1.1)$$

სადაც:  $i_{ტრ.ზ}$  არის ტრანზიტული ზონის კალაპოტის ფსკერის საშუალო ქანობი;

$i_{გ.კ.}$  - გამოტანის კონუსის საშუალო ქანობი.

თუ მივიღებთ  $K_{საშ.}$  - ს მუდმივი სიდიდით და  $x=0$ ,  $V=V_0$  სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით, ბმული ღვარცოფული ნაკადის კვეთში, რომელიც მდებარეობს გამოტანის კონუსის საწყისი კვეთიდან  $x$  მანძილზე, საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$V = V_0 \sqrt{\frac{\omega_0}{\lambda K_{\text{საშ}} b_0 x + \lambda x^2 \tan \theta + \omega_0}} \quad (17.1.2)$$

თუ მიღებულ დამოკიდებულებაში გავითვალისწინებთ, რომ

$$Q = V\omega = \frac{V_0^2 \omega}{K_{\text{საშ}}}, \quad (17.1.3)$$

მივიღებთ:

$$Q = \frac{V_0}{K_{\text{საშ}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\lambda K_{\text{საშ}} b_0 x + \lambda x^2 \tan \theta + \omega_0}}} \quad (17.1.4)$$

საბოლოო დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ ღვარცოვის ხარჯის ნაწილი იხარჯება გამოტანის კონუსის ზედაპირის გასწორება-დაგლუვების  $x$  კვეთამდე და ტოლია:

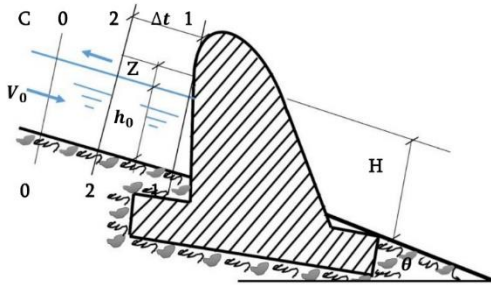
$$Q_{\text{გას}} = Q_0 - Q = Q_0 \left[ 1 - \frac{1}{K_{\text{საშ}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\lambda K_{\text{საშ}} b_0 x + \lambda x^2 \tan \theta + \omega_0}}} \right] \quad (17.1.5)$$

მომდევნო კვეთზე გადასვლის დროს საწყის მონაცემებად აიღება ნაკადის წინა კვეთის ჰიდრაულიკური მახასიათებლები.

## 17.2. ღვარცოფული ნაკადის ამმალღებელი უკუტალღის სიმაღლის განსაზღვრა განივ ყრუ ზღუდარზე

ღვარცოფული ნაკადების შემკავებელი კალაპოტის განივ ყრუ და გამჭოლ ნაგებობებზე ნაკადის დარტყმის დროს, ხშირად, წარმოიქმნება ამმალღებელი უკუტალღა. ღვარცოფული ნაკადის ამმალღებელი უკუტალღის სიმაღლის საანგარიშო სქემა ყრუ გადამღობ

ბარიერზე ზემოქმედების დროს მოცემულია ქვემოთ ნახაზზე.



ნახ.17.2.1. ღვარცოფული ნაკადის ამმალეგებელი უკუტალღის სიმაღლის საანგარიშო სქემა ყრუ გადამღობ ბარიერზე ზემოქმედების დროს

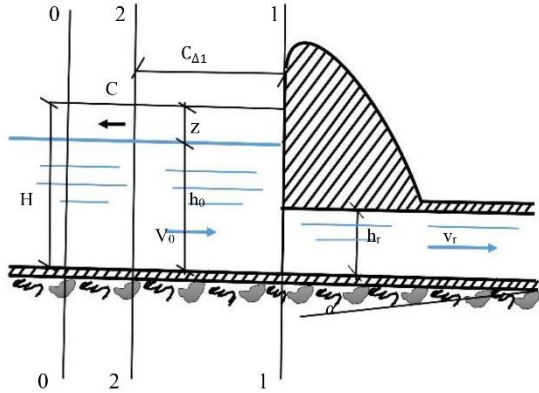
წინამდებარე ამოცანა დადის იმ შემთხვევაზე, როდესაც ხდება მოდინებული ნაკადის უეცარი გაჩერება პირდაპირზე დარტყმის დროს. უკუტალღის სიმაღლე  $Z$  განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$Z = \frac{-gh_0 \pm \sqrt{g^2 h_0^2 + 4gV_0^2 h_0}}{g} \quad (17.2.1)$$

ამმალეგებელი უკუტალღის სიჩქარე  $C$  იანგარიშება დამოკიდებულებით:

$$C = \frac{V_0 h_0}{Z} = \frac{V_0 h_0 g}{-gh_0 \pm \sqrt{g^2 h_0^2 + 4gV_0^2 h_0}} \quad (17.2.2)$$

$V_r, h_r$  - ნაკადის სიჩქარე და გალერეის (ან ხიდის ხვრეტის) სიმაღლე.



ნახ. 17.2.2. ბმული ნაკადის გალერეაში შესვლისას ტალღის შეტბორვის საანგარიშო სქემა როცა  $Q > Q_{კ.უ.ღ.}$  მოდინებული ხარჯი;  $Q_{გალ.უდაწ.}$  - გალერეის საანგარიშო ხარჯი უდაწნეო მოძრაობისას (ბმული ღვარცოფის დაწნევიანი მოძრაობა დახურულ კალაპოტებში დაუშვებელია)

როდესაც ხიდის ან უდაწნეო გალერეის გამტარუნარიანობა ნაკლებია მოდინებული ნაკადის ხარჯზე, უკუტალღის სიმაღლე იქნება:

$$Z_0 = - \frac{gh_0 \pm \sqrt{g^2 h_0^2 + 2Kg}}{g} \quad (17.2.3)$$

სადაც:  $K = (4V_r^2 h_r - V_0 V_r h_0)$ .

უკუტალღის სიჩქარე  $C_0$  იქნება:

$$C_0 = \frac{V_0 h_0 - V_r h_r}{Z} \quad (17.2.4)$$

ყრუ ბარიერზე მოქმედების შემთხვევაში წარმოქმნილი უკუტალღის სიღრმის გადიდების ჯერადობა მისი ნაგებობაზე ზემოქმედების დროს შეიძლება შეფასებულ იქნას დამოკიდებულებით:

$$\Delta Z = \frac{Z}{Z_0} \quad (17.2.5)$$

ხოლო სიჩქარის გადიდების ჯერადობა იქნება:

$$\Delta C = \frac{C}{C_0} \quad (17.2.6)$$

სადაც:  $V_0$ ,  $h_0$  არის შესაბამისად, მოდინებული ნაკადის სიჩქარე ცოცხალ კვეთში და სიღრმე.

### 17.3. ბმული ღვარცოფული ნაკადის უდაწნეო მოძრაობა გალერეაში

ბმული ღვარცოფის უდაწნეო მოძრაობისას, ნებისმიერი განივკვეთის მქონე გალერეაში იანგარიშება დამოკიდებულებით:

$$Q = \frac{3i\rho g B H^3}{2\mu} f_1(\beta); \quad (17.3.1)$$

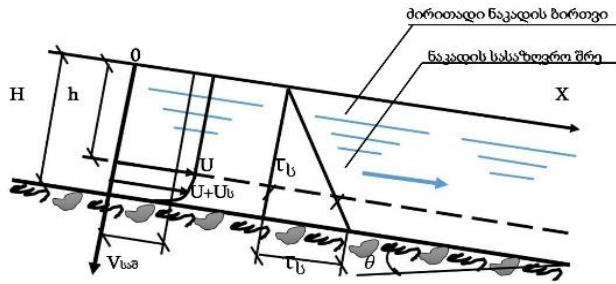
სადაც:  $i$  არის გალერეის ფსკერის ქანობი;

$P$  - ღვარცოფული სიმკვრივე;

$\mu$  - ღვარცოფის სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი;

$$f_1(\beta) = \frac{2}{3} - \frac{\beta}{2} - \frac{\beta^3}{6};$$

$\beta = \frac{h}{H}$  ფარდობითი სიღრმე.



ნახ. 17.3.1. ადგილობრივი სიჩქარეების განაწილების ეპიურა ბმული ღვარცოფის უდაწნეო მოძრაობისას გალერეაში

იმ შემთხვევაში, თუ ნაკადს ბირთვი (სტრუქტურული ნაწილი) არ გააჩნია, ე.ი. სიჩქარის გრადიენტი შეინიშნება მთელს H სიღრმეზე, მაშინ ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულება იღებს სახეს:

$$Q = \frac{\rho g i H^2 B}{3\mu} ; \quad (17.3.2.)$$

სადაც B არის გალერეის სიგანე ნაკადის თავისუფალ ზედაპირზე.

უდაწნეო გალერეაში ბმული ღვარცოფის მოძრაობა უზრუნველყოფილი იქნება, თუ შესრულდება შემდეგი პირობა:

$$\frac{2}{3} > \frac{h}{2H} + \frac{1}{6} \left( \frac{h}{2H} \right)^3 . \quad (17.3.3.)$$



**თავი 18. წყლის ნაკადის ძალური ზემოქმედება**  
**18.1 ნაკადის ზემოქმედება კალაპოტის ფსკერზე მყოფ**  
**კლდოვან სხეულზე**

წყლის ნაკადების ძალური ზემოქმედებით ხშირად ხდება ცალკეული დიდი ქვების ტრანსპორტირება.

წყლის ნაკადის მინიმალური სიჩქარის საანგარიშოდ, რომლის დროსაც ხდება დიდი ქვების ტრანსპორტირების დაწყება, კალაპოტის როგორც დადებითი, აგრეთვე უარყოფითი ქანობის დროს, რეკომენდებულია შემდეგი დამოკიდებულებების გამოყენება:

ა) ნაკადის მინიმალური გასაშუალოებული სიჩქარე კვეთში, რომლის დროსაც ქვა იწყებს სრიალს (მომრაობას) კალაპოტის უკუქანობის შეთხვევაში მოძრაობის მიმართულებით:

$$V'_{\text{დაძვ.}(i<0)} = \sqrt{\frac{gK_{ფ.}(Y_{ქ}-\gamma_{ფ.})\pi D^3 (\sin \theta_1 + f \cos \theta_1)}{3\gamma_{ფ.}(K_{3,ფ.}\omega_{\theta}-f\omega_{\theta})}} \quad (18.1.1)$$

როდესაც  $\theta_1=90^\circ$ ,  $\sin \theta_1=1$ ,  $\cos \theta_1=0$ , ანუ კედელი ვერტიკალურია, მაშინ:

$$V'_{\text{დაძვ.}} = \sqrt{\frac{gK_{ფ.}(Y_{ქ}-\gamma_{ფ.})\pi D^3}{3\gamma_{ფ.}(K_{3,ფ.}\omega_{\theta}-f\omega_{\theta})}} \quad (18.1.2)$$

ბ) ნაკადის მინიმალური გასაშუალოებული სიჩქარე კვეთში, რომლის დროსაც ქვა იწყებს სრიალს (მომრაობას)

კალაპოტის დადებითი და ნულოვანი ქანობის შემთხვევაში:

$$V''_{\text{დაძვ.}} = \sqrt{\frac{gK_{\text{ფ.}}(\gamma_{\text{ქ.}} - \gamma_{\text{წ.}})\pi D^3 (f \cos \theta_2 - \sin \theta_2)}{3\gamma_{\text{წ.}}(K_{\text{ჰ.წ.}}\omega_{\text{ა}} - f\omega_{\text{ფ}})}} \quad (18.1.3)$$

როდესაც  $i=0$ ,  $\theta_2=0^\circ$ ,  $\sin \theta_2=0$ ,  $\cos \theta_2=1$ , ანუ კალაპოტის ნულოვანი ქანობის შემთხვევაში:

$$V''_{\text{დაძვ.}} = \sqrt{\frac{f g K_{\text{ფ.}}(\gamma_{\text{ქ.}} - \gamma_{\text{წ.}})\pi D^3}{3\gamma_{\text{წ.}}(K_{\text{ჰ.წ.}}\omega_{\text{ა}} - f\omega_{\text{ფ}})}} \quad (18.1.4)$$

სადაც:  $K_{\text{ფ.}}$  არის ქვის ფორმის კოეფიციენტი;

$\gamma_{\text{ქ.}}$  - ქვის კუთრი წონა;

$\gamma_{\text{წ.}}$  - წყლის კუთრი წონა;

$D$  - ქვის დიამეტრი;

$K_{\text{ჰ.წ.}}$  - ჰიდროდინამიკური წინააღობის კოეფიციენტი;

$\omega_{\text{ა}}$  - ქვის „მოდელის“ კვეთი;

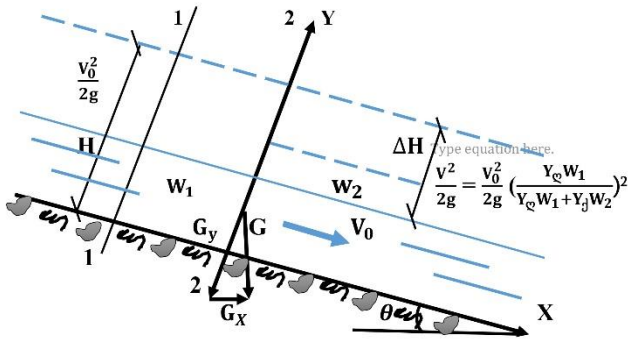
$\omega_{\text{ფ}}$  - ქვის ზედაპირის გარსდენის ფართობი;

$f$  - ქვის კალაპოტის ფსკერზე ხახუნის კოეფიციენტი.

## 18.2. მსხვილგაბარიტიანი კლდოვანი სხეულის ბმული ღვარცოფული ნაკადით გადაადგილება

ბმული ღვარცოფის გაზრდილი მატრანსპორტირებელი უნარი, როდესაც იგი ახდენს

მსხვილგაბარიტიანი კლდის მონატეხის ტრანსპორტირებას, განაპირობებს მის დიდ დამანგრეველ



ნახ. 18.2.1. ნაწილობრივ დაძირული მსხვილგაბარიტიანი კლდის მონატეხის ღვარცოფული ნაკადით გადაადგილების სქემა

ძალას. ასეთი კლდის მონატეხების მოცულობა 100 - 200 მ<sup>3</sup>-ს აღწევს და ჩვეულებრივ წყვეტენ მოძრაობას გამოტანის კონუსებზე, სადაც ღვარცოფული ნაკადების მატრანსპორტირებელი ძალა მკვეთრად მცირდება.

ნაწილობრივ დაძირული მსხვილგაბარიტიანი კლდის მონატეხის ღვარცოფული ნაკადით გადაადგილების სქემა მოცემულია ნახაზ 18.2.1-ზე.

ბმული ღვარცოფული ნაკადის საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებას, რომლის დროსაც ხდება მსხვილი კლდის მონატების ტრანსპორტირება, შემდეგი სახე აქვს:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2g \left[ \Delta H - \frac{G}{\gamma_{\text{სა}\theta} \Omega} (f \cos \theta - \sin \theta) \right]}{1 - K^2}} \quad (18.2.1)$$

სადაც  $g$  - არის სიმძიმის ძალის აჩქარება;

$\Delta H$  - კლდის მონატების ამალევა ნაკადის თავისუფალი ზედაპირიდან;

$G$  - ნაკადში ნაწილობრივ დამირული კლდის მონატების წონა;

$\gamma_{\text{სა}\theta}$  - ნაკადში ნაწილობრივ დამირული კლდის მონატების გასაშუალოებული ხვედრითი წონა;

$\Omega$  - კლდის მონატების სადინარის ფსკერთან შეხების ფართობი;

$f$  - ღვარცოფული ნაკადის მიერ მოსწორებული სადინარის ზედაპირზე კლდის მონატების ხახუნის კოეფიციენტი;

$\theta$  - კალაპოტის ჰორიზონტთან დახრის კუთხე;

$$K = \frac{\gamma_{\text{ღ}} W_1}{\gamma_{\text{ღ}} W_1 + \gamma_{\text{კ.ბ.}} W_2} \quad (18.2.2)$$

$\gamma_{\text{ღ}}$  - ღვარცოფული ნაკადის ხვედრითი წონა;

$\gamma_{\text{კ.ბ.}}$  - კლდის მონატების ხვედრითი წონა;

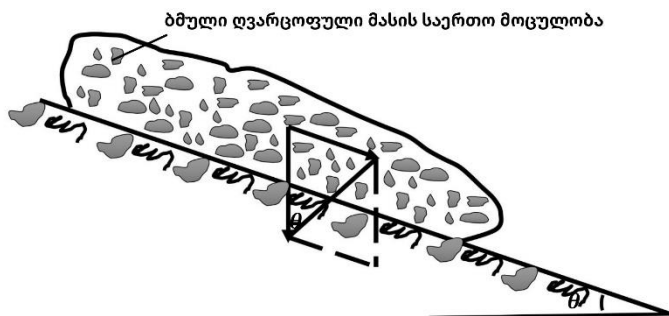
$W_1$  - კლდის მონატეხის ნაკადში დაძრული ნაწილის მოცულობა;

$W_2$  - კლდის მონატეხის ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ზემოთ განთავსებული ნაწილის მოცულობა.

მოცემული მონაცემების საფუძველზე ხდება ღვარცოფული ნაკადის სიღრმის, საშუალო სიჩქარის, ხარჯისა და შესაბამისად მსხვილი კლდის მონატეხის გამოტანის კონუსის საზღვრებში გაჩერების ადგილის განსაზღვრა.

### **18.3. ზვავისებრი ბმული ღვარცოფული ნაკადის დინამიკური მახასიათებლები**

ღვარცოფული დანალექის მოწყვეტას ხშირად ულუფისებრი ხასიათი აქვს. აღნიშნულ მოვლენას არ შეიძლება ვუწოდოთ „დინება“. იგი შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ერთი მთლიანი ღვარცოფული მასის მოწყვეტა (ნახ. 18.3.1.).



ნახ. 18.3.1. ღვარცოფული მასის ზვავისებრი  
გადაადგილების პროგნოზირების სქემა

ბმული ღვარცოფი ზვავისებრი მოძრაობის საკმაოდ იშვიათი მოვლენაა, მაგრამ ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირების დროს საჭიროა შემოწმდეს წყალსადინარში ზვავისებრი ღვარცოფის მოძრაობის შესაძლებლობა დამოკიდებულებით:

$$1 > \frac{\tau \Omega}{\gamma w i} \quad (18.3.1)$$

აღნიშნული პირობის დროს ბმული ღვარცოფის ზვავისებრი მოძრაობა შესაძლებელია.

ღვარცოფის გადაადგილების სიჩქარე განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$V_2 - V_1 = i g \left( 1 - \frac{\tau \Omega}{\gamma w i} \right) (t_2 - t_1) \quad (18.3.2)$$

სადაც  $\gamma$  - არის დალექილი ღვარცოფული მასის მოცულობითი წონა;

- $W$  - ეროზიულ ღრანტებში დანალექი მთლიანი ღვარცოფული მასის მოცულობა;
- $i = \sin \theta$  - ეროზიული ღრანტეს ფსკერის ქანობი;
- $\theta$  - ეროზიული ღრანტეს დახრის კუთხე ჰორიზონტთან მიმართებაში;
- $\tau$  - ღვარცოფის მხები ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა;
- $\Omega$  - ღვარცოფული წყალსადინარის კალაპოტთან შეხების ფართობი (კალაპოტის განივი კვეთის მიუხედავად);
- $V_1, V_2$  - სიჩქარეები მეზობელ კვეთებს შორის;
- $t_1, t_2$  - კონკრეტულ მონაკვეთში ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე (კვეთებს შორის).

მიღებული დამოკიდებულება გამოყენებულ უნდა იქნას თანმიმდევრობით, მოძრაობის გზის ყოველი სწორ-ხაზოვანი მონაკვეთისთვის დამოუკიდებლად, ეროზიული ღრანტებიდან დაწყებული, რომლისთვისაც საწყისი სიჩქარეა  $V = V_0 = 0$ , გამოტანის კონუსის ჩათვლით. ყოველი მომდევნო მონაკვეთისთვის საწყისი სიჩქარე მიიღება წინამდებარე მონაკვეთის ბოლოში მიღწეული სიჩქარის ტოლად, თუმცა მოძრაობის გზის მოხვეულობებში სიჩქარის გარკვეული დანაკარგია შესაძლებელი.

ზვავისებრი მოძრაობის წარმოქმნის მიახლოებითი შეფასებისათვის, აგრეთვე შესაძლებელია მთელი მოძრაობის გზის ქანობის გასაშუალება გაჩერების წერტილამდე და უნდა შეფასდეს  $1 > \frac{\tau\Omega}{\gamma Wi}$  კრიტერიუმის მიხედვით, ანუ მოხდეს ღვარცოფის ზვავისებრი მოძრაობის წარმოქმნის შესაძლებლობის პროგნოზირება.

ღვარცოფული მასის სრული მოცულობის მოძრაობის სიჩქარის განსაზღვრა პირველი მიახლოებით წარმოებს დამოკიდებულებით:

$$V = \sqrt{2g(i - i_{\partial})x + V_0^2} \quad (18.3.3)$$

სადაც:  $V_0$  არის მოძრაობის დაწყების სიჩქარე;

$i$  - კალაპოტის საშუალო ქანობი;

$i_{\partial}$  - მოძრაობის წინაღობის ქანობი

$$i_{\partial} = \frac{Qv}{BgH^3f(\beta)} \quad (18.3.4)$$

$\beta = \frac{h}{H}$  - ფარდობითი სიღრმე;

$h$  - ბირთვის სიღრმე (ნაკადის სტრუქტურული ნაწილის);

$H$  - სრული სიღრმე;

$B$  - კალაპოტის სიგანე.

$f(\beta)$ -ს კონკრეტული მნიშვნელობები შეიძლება აღებულ იქნას ქვემოთ მოცემული ცხრილიდან.

ცხრილი 18.3.1.  $f(\beta)$ -ს კონკრეტული მნიშვნელობების

$\beta = \frac{h}{H}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$f(\beta)$	0,33	0,28	0,23	0,187	0,14	0,1	0,069	0,004	0,418	0,0



ეროზიული ღრანტიდან ბმული ღვარცოფის მოძრაობა იწყება, როცა  $h < 0,9H$ .

კალაპოტის ნებისმიერი განივი კვეთის გათვალისწინების მიზნით, შეიძლება ვისარგებლოთ მეთოდით, რომლის მიხედვითაც, კალაპოტის განივი კვეთის მახასიათებლები იცვლება დამოკიდებულებით:

$$\frac{H^3 B}{3} = Y_{ბრ} \quad (18.3.5)$$

სადაც:  $Y_{ბრ}$  არის მართკუთხა კვეთის ღერძის ბრუნვის ინერციის მომენტი (მოცემული შემთხვევისათვის არის პრიზმული კალაპოტი მართკუთხა განივი კვეთით).

როცა  $\frac{B}{H} \rightarrow \infty$

$$Q = \frac{g i_{cd} Y_{ბრ}}{v} f(\beta) \quad (18.3.6)$$

ან

$$i_{cd} = \frac{Qv}{g Y_{ბრ} f(\beta)} \quad (18.3.7)$$

ბმული ღვარცოფული ნაკადის მახასიათებლების დადგენა „მონოსოლური“ ტალღისთვის ფორმულირებული ბმული ღვარცოფის მოძრაობის პარამეტრების მკვეთრი ზრდა, ჩვეულებრივ, დაკავშირებულია ეროზიული ღრანტებიდან ღვარცოფული კერის თანმიმდევრული დამუშავების პროცესთან.

„მონოსოლური“ ტალღა წყალმოვარდნის ტალღის პროტოტიპია, რომელიც წარმოადგენს დაუმყარებელი

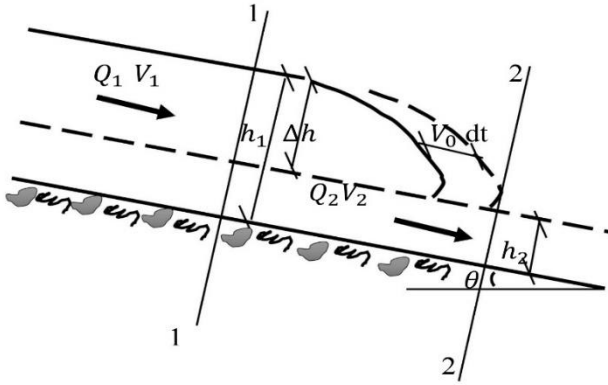
მოდრაობის სახეს. როდესაც ტალღის ფორმას აქვს მდგრადი პროფილი, რომლის მოხაზულობაც არ იცვლება დროში, მაშინ თანაბარი წინსვლითი მოძრაობა ხასიათდება შემდეგი განმასხვავებელი ნიშნით:

- ა) ტალღის შუბლის (ფრონტის) მდგომარეობა დროის სხვადასხვა მონაკვეთში ერთმანეთის იდენტურია;
- ბ) ტალღის შუბლის გადაადგილების სიჩქარე აღემატება საშუალო სიჩქარეს;
- გ) ტალღის პროფილი გადაადგილდება მუდმივი სიჩქარით.

განხილულ შემთხვევაში გვექნება:

$$V_1 - V_2 = \sqrt{\frac{g \cos \theta_1}{h_1} \Delta h} \quad (18.3.8)$$

სადაც:  $\theta_1$  არის წყალსადინარის ფსკერის ქანობის ზღვრული მნიშვნელობა, რომლის დროსაც გარკვეული სიღრმის და მოცემული კონცენტრაციის მქონე ბმული ღვარცოფის ნარევი იწყებს გადაადგილებას.



ნახ. 18.3.2. „მონოსოლური“ ტალღის ფორმის  
 ბმული ღვარცოფის ჰიდრავლიკური პარამეტრების  
 მკვეთრი გაზრდის სქემა

წყალსადინარის ფსკერის დახრის ამავე კუთხის დროს ბმული ღვარცოფული ნაკადი, როდესაც მიაღწევს გარკვეულ სიღრმეს, რომელიც ნაკლებია მოძრაობის სიღრმისა, იგი წყვეტს გადაადგილებას. ფაქტობრივად, ეს არის ასეთი ტიპის ნაკადების რეოლოგიური ბუნების გამოვლენის ერთ-ერთი შემთხვევა. იმ შემთხვევაში, როცა  $\theta_1=0$ ,  $\cos \theta_2=1$ .

#### 18.4. დიდი ქანობის კალაპოტებში ბმული ღვარცოფის გადაადგილება

იმის მიხედვით, პროცესი ქრება თუ ვითარდება (უკანასკნელი დაკავშირებულია აღმფოთებული,

მოდინებული ნაკადის გადასვლასთან ზეაღმჯოთებულ ტალღურში) რეჟიმს ეწოდება მდგრადი ან არამდგრადი.

პრაქტიკაში, ხშირად, ღვარცოფული ნაკადი გადაადგილდება ტალღური რეჟიმით. ციცაბო ფერდობებიდან ჩამონადენი გადაედინება მთის არხებში და აირინება მოპირკეთებული სწრაფდენებით დასახლებული პუნქტებიდან საავტომობილო ან სარკინიგზო გზების ქვემოდან ან ზემოდან. სწრაფდენში მიედინება ნაკადი, რომელიც შეიცავს შეტივნარებულ ნატანს. ხანდახან სწრაფდენებზე წარმოიქმნება ისეთი დიდი ამპლიტუდის მქონე ტალღები, რომ ნაკადი გადაედინება სწრაფდენის გვერდებზე (ბორტებზე),

თუმცაღა თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში, იგივე რაოდენობის წყალი და ნატანი მოთავსდებოღა იმავე სწრაფდენში.

შემოთავაზებული კრიტერიალური თანაფარდობები იძლევა ტალღების წარმოქმნის პროგნოზირების შესაძლებლობას, რაც უნდა გათვალისწინებულ იქნას ნაგებობის გვერდების სიმაღლის დანიშვნის დროს.

იმ შემთხვევაში, როდესაც საქმე გვაქვს ნატანდატვირთულ ნაკადებთან, პროგნოზირების კრიტერიალურ თანაფარდობებს შემდეგი სახე აქვს:

$$\frac{1}{F_{r0}} > \frac{1}{T} (\mu_1^2 + 2\alpha\mu_1 + \alpha) \quad (18.4.1)$$

სადაც:

$$T = \frac{W\omega + 0,6\sigma BvS_{საშ.}}{W\omega(1 + \sigma S_{საშ.})}$$

არის ე.წ. ნატანმზიდი

ნაკადის უგანზომილებო პარამეტრია.

$F_{r0}$  - ფრუდის რიცხვი,

$$F_{r0} = \frac{V_0^2 B_0}{g \omega_0}; \quad \mu = \frac{\omega_0 \chi}{2 B_0 H_0};$$

$\chi$  - კალაპოტის ჰიდრავლიკური მაჩვენებელი;

$\omega_0$  - ცოცხალი კვეთის ფართობი;

$B_0, H_0$  - შესაბამისად ნაკადის სიგანე და სიღრმე;

$W$  - ნარევი ნატანის ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს საშუალო მნიშვნელობა;

$S_{საშ}$  - ცოცხალ კვეთში ნატანის კონცენტრაციის საშუალო მნიშვნელობა;

$\sigma = \frac{\rho^* - \rho}{\rho}$  - ფარდობითი სიმკვრივე;

$\rho^*$  - ნატანის სიმკვრივე;

$\rho$  - წყლის სიმკვრივე;

$\alpha$  - მოძრაობის რაოდენობის კორექტივი, რომელიც ითვალისწინებს კვეთში გასაშუალოებული სიჩქარეების არათანაბარ განაწილებას და პულსაციურ წნევას.

„0“-ით აღნიშნული სიდიდეები ეკუთვნის მოცემული ხარჯით ნარევის თანაბარი მოძრაობის რეჟიმს.

თუ დაკმაყოფილებული იქნება მიღებული ტოლობა, მაშინ მოძრავი ნაკადის ზედაპირზე ტალღები არ წარმოიქმნება.

ბმული ღვარცოფული ნაკადის ზედაპირზე ტალღის წარმოქმნის შესაძლებლობის პროგნოზირება წარმოებს შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\frac{1}{Fr_0} > 4\mu_1^2 \quad (18.4.2)$$

სადაც:

$$\mu = \frac{\omega_0}{B_0 H_0}; \quad Fr_0 = \frac{V_0^2 B_0}{g \omega_0}; \quad (18.4.3)$$

ან დამოკიდებულებით:

$$V_0 < \frac{H_0}{2} \sqrt{\frac{g B_0}{\omega_0}} \quad (18.4.4)$$

თუ შევადარებთ ბოლო ორ დამოკიდებულებას ნათელია, რომ ექვივალენტურ პირობებში, ბმულ ღვარცოფულ ნაკადებში ტალღები ფორმირდება შედარებით მცირე სიჩქარეების შემთხვევაში.

### 18.5. საშუალო და მცირე დაწნევიანი მიწის კაშხლების გამრღვევი ტალღის სიმაღლის დადგენა

კაშხლების ასაკის მატებასთან ერთად ინტენსიფიცირდება ნეგატიური მოვლენები: მიწის კაშხლების მდგრადობის შემცირება და ნაპრალების წარმოქმნა, რაც ხშირად ავარიის მიზეზი ხდება. აღნიშნულ მოვლენებს ძირითადად ადგილი აქვს საშუალო და მცირე დაწნევიანი მიწის კაშხლებზე. ხანდახან ავარიის მიზეზს წარმოადგენს წყლის გადადინება მიწის კაშხლის ქიმზე, ხოლო კაშხლების რღვევა ხდება ერთი მიმართულების გრძელი ტალღებით.

გრძელი ტალღების გაანგარიშების დროს ხშირად არ ხდება ნაკადში მიწის შემადგენელი შემცველობის

გათვალისწინება, რომელიც წარმოიქმნება კაშხლების გარღვევის დროს. რეალურად, ტალღის მიერ ხდება მიწის კაშხლის მნიშვნელოვანი ნაწილის ტრანსპორტირება, რაც ბუნებრივია, გავლენას ახდენს საბოლოო შედეგებზე.

კაშხლის გარღვევის შემდეგ ნატანდატვირთული ნაკადის სიღრმე გაანგარიშებული უნდა იქნას დამოკიდებულებით:

$$h = \frac{4h_0}{\left(\sqrt{1 + \frac{S}{2nk_2}} + 2\right)^2} \quad (18.5.1)$$

- სადაც:  $h_0$  არის სიღრმის საწყისი მნიშვნელობა;  
 $S$  - ნარევი ნატანის საშუალო მოცულობითი კონცენტრაცია;  
 $n$  - სიმაღლეზე კონცენტრაციის განაწილების აპროქსიმაციის მრუდის მაჩვენებელი;  
 $k_2$  - კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს სხვაობას მატრანსპორტირებელი და სატრანსპორტირებელი ტურბულენტური აღრვევის კოეფიციენტებს შორი

**თავი 19. წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების დროს  
გასატარებელი ზოგიერთი ღონისძიებების ფორმები და  
მეთოდები**

**19.1. წყალდიდობისაგან მდინარის გარშემო  
ინფრასტრუქტურის დაცვა**

წყლის დონის რეგისტრაციისათვის გადამწოდში გამოყენებული ორი გადამრთველი გერკონი<sup>16</sup> საშუალებას იძლევა გავაკონტროლოთ წყლის დონის სამი მდგომარეობა: მინიმალური, შუალედური და კატასტროფული.

გადამწოდიდან საკონტროლო პუნქტამდე ინფორმაციის მისაწოდებლად გამოიყენება მობილური სატელეფონო კავშირის არხი. გადამცემი – მობილური ტელეფონი – სპეციალური ლოგიკური მოწყობილობის მეშვეობით, მუშაობს ავტომატურ რეჟიმში და პერიოდულად ხდება საკონტროლო პუნქტში მიმღებ-მობილურ ტელეფონთან დაკავშირება, რომლის დროსაც გადაიცემა გადამწოდის მდგომარეობის შესაბამისი კოდური სიგნალი. საკონტროლო პუნქტში ხდება ამ სიგნალის დაფიქსირება საინდიკაციო მოწყობილობით. წყლის მინიმალური და შუალედური დონის შესაბამისი შეტყობინების განმეორების ციკლი შეადგენს 12 საათს, ხოლო კატასტროფული დონის – 1 საათს. კატასტროფული დონის შესაბამისი სიგნალის დაფიქსირება ხდება როგორც საინდიკაციო მოწყობილობით, ისე ხმოვანი საგანგაშო სიგნალით. გადამცემი მოწყობილობის ნორმალური ფუნქციონირების გაკონტროლება შესაძლებელია საკონტროლო პუნქტიდან

---

<sup>16</sup> მაგნიტური სენსორი



გადამცემი მობილურ ტელეფონთან დაკავშირებით. სისტემის გამართული მუშაობის შემთხვევაში, მეტყველების მოდულის მეშვეობით, მიმღებ ტელეფონში მოვისმენთ ფრაზას: “სისტემა მუშაობს ნორმალურად”. იმ შემთხვევაში, როცა წყლის დონის გაკონტროლების ტერიტორიაზე მიუწვდომელია მობილური კავშირის სიგნალი, საჭიროა რადიო-დამაგრძელებლის გამოყენება, რომელიც გადამწოდ სისტემას დააკავშირებს უახლოეს მისაწვდომ მობილურ ოპერატორთან. გადამცემი სისტემის ელექტრო-კვება ხორციელდება ბუფერული აკუმულატორიდან, რომლის დამუხტვა მოხდება მზის ელემენტების გამოყენებით. გადამცემი მობილური ტელეფონის ბალანსის გაკონტროლება და შევსება შესაძლებელია დისტანციურად საკონტროლო პუნქტიდან ოპერატორთან დადებული ხელშეკრულების საფუძველზე.

## **19.2. კალაპოტის გასწვრივ ფერდობებზე არამდგრადგრუნტიანი – მეწყერული – მონაკვეთების დაცურება**

მდინარის კალაპოტში კატასტროფული მასშტაბის წყალდიდობის საშიშროების გარდა არანაკლებ საშიშია კალაპოტის გასწვრივ ფერდობებზე არამდგრად გრუნტიანი – მეწყერული – მონაკვეთების დაცურება და მის მიერ მდინარის კალაპოტის დროებით გადაღობვა. ამის შედეგად ხდება მდინარის წყლის შეგუბება, რაც დამოკიდებულია იმაზე, თუ რამდენად დიდი მოცულობისაა მეწყერი.

საქართველოში რელიგიური მახასიათებლებიდან და ტყეების არასწორი ექსპლუატაციის პრაქტიკიდან გამომდინარე, მრავალი მეწყერსაშიში ზონა არსებობს. მოცემული წინადადება გვთავაზობს მეწყერული ზონების აღრიცხვას და მათზე მუდმივი კონტროლის დაწესებას. ასევე, დამეწყვრის შემთხვევაში მომენტალური ავტომატიზებული სამაუწყებლო მოწყობილობის დახმარებით მოსახლეობის სახიფათო ზონებიდან სწრაფი ევაკუაციის შესაძლებლობის შექმნას.

ეს შესაძლებელია განხორციელდეს შესაბამისი სამაუწყებლო მოწყობილობების მეშვეობით, რომლებიც კატასტროფის მოახლოებისთანავე გადასცემს შესაბამის სიგნალს დასახლებული ადგილების საკონტროლო პუნქტებს შემდეგი პრინციპული სქემით: მეწყერის დაძვრის შემთხვევაში გადამწოდი (გადამცემი) სასიგნალო მოწყობილობა შესაბამის სიგნალს გადასცემს მიმღებ მოწყობილობას და მიმღები აუწყებს შესაბამის შტაბებს. გადამწოდ მოწყობილობას ელექტროენერჯიის კვება ექნება დამოუკიდებლად, დღის განმავლობაში სინათლეზე მომუშავე ჰელიოსისტემისა და ღამით დამუხტული აკუმულატორების და/ან მუდმივი დენის საშუალებით.

მეწყერის წარმოქმნის მაუწყებელი მოწყობილობის ნაწილი, რომელიც რამოდენიმე ელემენტისგან შედგება, მოთავსებული და სათანადოდ დამაგრებული იქნება თითოეული მეწყერსაშიში ზონის წინასწარ შერჩეულ საკონტროლო წერტილებში. გრუნტში

დამაგრებულ თითოეულ საკონტროლო მოწყობილობის გადამწოდ ელემენტს ექნება თავისი სახელი და ნომერი, რომლის საშუალებით შესაძლებელი იქნება ზუსტად დავადგინოთ, თუ რომელ უბანზე წარმოიშვა საშიში მდგომარეობა. აღსანიშნავია ის გარემოება, რომ გადამწოდი არ დააზიანებს გარემოს და არც მისი მონტაჟი წარმოადგენს სირთულეს. ამ მოწყობილობის მგრძობელობად შეგვიძლია ავილოთ 5 მმ, ან 2 მმ-მდეც კი.

### **19.3. ბუნებრივი ნაპირსამაგრი დამცავი ნაგებობები და გასატარებელი ღონისძიებები**

ელექტრო სადგურების კაშხლები ქმნის მდინარის ნატანის ზღვამდე მიტანის პრობლემას, რის გამოც ღარიბდება ზღვის სანაპირო ზოლი, ხდება მისი გადარეცხვა, ნგრევა და ტერიტორიების მიტაცება. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად მიმართავენ სხვადასხვა საშუალებებს, მათ შორის ძირითადად ზღვაში ქვიშის ხელოვნურად შეტანას. თუმცა, უნდა აღინიშნოს, რომ ზღვაში ხელოვნურად შეტანილი ქვიშა ის არ არის, რაც მდინარეებს საუკუნეების განმავლობაში შექონდათ ზღვაში. გარდა ამისა, ამ ქვიშის მოპოვებისათვის საჭიროა დიდი კარიერების გახსნა, უზარმაზარი ტექნიკისა და მომსახურე პერსონალის მუშაობა და ა.შ. ამის შედეგად მახინჯდება ან ისპობა ბუნებრივი ლანდშაფტი და ა.შ. ეს რომ ავიცილოთ თავიდან, წყალსაცავების გვერდის ავლით უნდა მოვახერხოთ მდინარის ბუნებრივი ნატანის

ზღვის აკვატორიაში მიწოდება. მეთოდის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ მდინარის ნატანი ბუნებრივი ტრანსპორტირებით ე.ი. მდინარის წყლით გვერდს აუვლის წყალსაცავს კაშხალთან, გაივლის კომუნიკაციებში, გაიწმინდება ნატანისაგან და ნატანართმეული წყალი ჩავა კაშხალთან წყალსაცავში, ხოლო ნატანი, რომელიც ჩაშვებული იქნება ქვედა ბიეფში, ტრანსპორტირებული იქნება ჰესის მიერ ნამუშევარი წყლის გამოყენებით ზღვამდე.

მეთოდი ძალიან ეკონომიურია. მას ესაჭიროება დაფინანსება მხოლოდ ერთხელ, მოწყობილობის ასაგებად. შემდეგ კი ტრანსპორტირებაზე არავითარი ხარჯები აღარაა საჭირო. განსხვავებით ამჟამად გამოყენებული მეთოდებისაგან, რომელთა დროს ყოველწლიურად უზარმაზარი თანხები იხარჯება ქვიშის მოპოვებასა და ტრანსპორტირებაზე.

#### **19.4. წყალსაცავების დაცვა მდინარის ნატანისაგან**

მდინარის კალაპოტში დიდი მოცულობის წყალსაცავების და მალლივი კაშხლების აშენებამ გამოიწვია მდინარის ნატანის შეტანა წყალსაცავებში და ყოველწლიურად მასში სასარგებლო წყლის მოცულობის შემცირება. ამის გამო საჭირო ხდება დამატებითი ღონისძიებების გატარება, კერძოდ ნატანამრიდი ნაგებობების აშენება და მოწყობა. ამ ნაგებობების საჭიროების საფუძველზე გამოიკვეთა

ენერგოეფექტურობის გაზრდის შესაძლებლობებიც. კერძოდ, შეიქმნა შესაძლებლობა დამატებითი ჰესის აშენების, რომლის შედეგად მიღებული იქნება დამატებითი სიმძლავრე და გამომუშავებული იქნება დამატებით სოლიდური რაოდენობის ელექტროენერგია. გაჩნდა შესაძლებლობა ერთი და იგივე წყალი გამოყენებულ იქნას ორჯერ, რომელიც ახალი მიღწევა იქნება ენერგეტიკაში. შემოთავაზებული მეთოდით წყალსაცავის შევსება მოხდება ორი მილიდან. პირველი ეს არის წყალსაცავის კუდიდან (გამოსილვის წერტილიდან) და კაშხლის მხრიდან (დამატებითი ჰესის ნამუშევარი წყლით).

გამოიკვეთა ასევე ამ მეთოდის გამოყენების რამოდენიმე ვარიანტი, რომლებიც კიდევ დამატებით დადებით შედეგებს იძლევა. ყველა ეს ვარიანტი ნაჩვენებია ნახაზებზე, სადაც ნათლად ჩანს, მათი შესაძლო დადებითი შედეგები და უპირატესობები დღემდე არსებულ კლასიკური სქემებით აშენებულ ჰესებთან შედარებით.

ეს უპირატესობებია:

1. შემოთავაზებული სქემით წყალსაცავი დაცულია ნატანის შეტანისაგან 80-85%-ით.
2. როდესაც ძირითადი ჰესი რაიმე მიზეზით დროებით (2-3 თვით) გაჩერებულია, დამატებითი ჰესი იმუშავებს მაქსიმალური სიმძლავრით და გამოიმუშავებს ელექტროენერგიას.

3. როდესაც წყალუხვობაა, დამატებითი ჰესი მაშინაც ძირითად ჰესთან ერთად იმუშავებს მაქსიმალური სიმძლავრით.
4. ასევე სალექარის მეშვეობით წყალზე მოშორებული ფსკერული და შეტივნარებული მდინარის ნატანი ტრანსპორტირებული იქნება ქვედა ბიეფიდან მდინარის წყლით ზღვის სანაპირო ზოლის ფორმირებისათვის.
5. საჭიროების შემთხვევაში შესაძლებელია სალექარიდან გამოსული ნატანი დახარისხებულ იქნას სამშენებლო ინერტულ მასალად და ლამაღ სავარგულებში შესატანად.
6. ენერგეტიკისათვის განკუთვნილი წყალი არ იკარგება და გამოიყენება მთლიანად ელექტროენერჯის გამოსამუშავებლად.
7. ამ მეთოდის გამოყენების შედეგად მდინარის ნატანთან ერთად ზღვაში შედის ცოცხალი მიკროორგანიზმები ზღვის იქტიოფაუნის<sup>17</sup> გამოკვებისათვის.
8. სალექარიდან ნატანის გამოსვლის დროს იხარჯება სანიტარული წყლის ხარჯის ნაწილი და ენერგეტიკისათვის განკუთვნილი წყალი მთლიანად ელექტროენერჯის გამომუშავებას ხმარდება.
9. თუ დამატებითი ჰესი რაიმე მიზეზით გაჩერდება, სალექარიდან ნატანართმეული წყალი ისევ წყალსაცავში შვეა დანაკარგების გარეშე.

---

<sup>17</sup> კონკრეტული რეგიონის ტევზის სახეობების ნაკრები

10. ენერგეტიკული ეფექტი ცალკეული წყალსაცავებისათვის იქნება სხვადასხვა (ე.ი. ყველა ცალკეულ შემთხვევას ექნება თავისი შესაფერისი ეფექტი).

### **განმარტებები- ტექნიკური ტერმინოლოგია**

**მდინარე** — წყლის ნაკადი, რომელიც ბუნებრივ კალაპოტში მიედინება და თავისი აუზის ზედაპირული და მიწისქვეშა ჩამონადენით საზრდოობს.

**მდინარის სათავე** — ადგილი, საიდანაც იწყება წყლის ნაკადი, და შესართავი — ადგილი, სადაც ის ზღვას, ტბას ან სხვა მდინარეს უერთდება. მდინარე, რომელიც უშუალოდ ერთვის ზღვას, ტბას, ჭაობს ან ქვიშებში იკარგება

**მთავარი მდინარე** - მდინარის აუზის ყველაზე გრძელი ან ყველაზე წყალუბვი მდინარე, რომელსაც ერთვის შენაკადები.

**მდინარეთა სისტემა.**- მდინარე ყველა შენაკადით ქმნის მდინარეთა შენაკადს.

**წყალშემკრები აუზი.**- ეს არის ტერიტორია და ნიადაგგრუნტი, სადაც წყალი გროვდება წვიმის დროს, მას ხშირად ესაზღვრება ბორცვები. როესაც დახრილობის დროს წყალი მიედინება ლანდშაფტებზე, ის აღმოაჩანს გზას ნაკადულებში საბოლოოდ კვებავს მდინარეს. ამ წყლის ნაწილი რჩება მიწისქვეშ და ნელ-ნელა აგრძელებს მდინარის კვებას მცირე ნალექის დროს.

**კალაპოტი** - ხეობის ნაწილი, რომელიც უკავია წყლის ნაკადს.

**მდინარის მნიშვნელოვანი ელემენტები:** სიგრძე, სიგანე, სიღრმე, წყლის დონე, დინების სიჩქარე, წყლისა და ნატანის

ხარჯი. რელიეფის შესაბამისად არსებობს მთისა და ვაკის მდინარე. მთის მდინარე მიედინება ვიწრო და ღრმა ხეობაში, გამოირჩევა მჩქეფარე დინებით, კალაპოტი ჭორომიანი აქვს და აჩენს ჩანჩქერებს. ვაკის მდინარე განიერ, კარგად გამომუშავებულ ხეობაში მიედინება, კალაპოტი დაკლაკნილი და დატოტვილი აქვს, დახრილობა — უმნიშვნელო, დინება — წყნარი.

**მდინარის სასიათი** - განვითარება დამოკიდებულია კლიმატზე, რელიეფზე, გეოლოგიურ სტრუქტურასა და აუზის სიდიდეზე. დროებით, სეზონურ მდინარეებს უადებს უწოდებენ (არაბულად Wadi). ისინი მდებარეობენ საჰარაში და მსგავსი კლიმატური პირობების რეგიონებში. მათი კალაპოტები მშრალია, ივსება მხოლოდ დიდი წვიმების შემდეგ.

**მდინარეთა ქსელი** ხშირია ჭარბად ნესტიან მხარეებში და მეჩხერდება ჰავის სიმშრალის ზრდის შესაბამისად. უდაბნოში მხოლოდ დროებითი (ეპიზოდური) და ტრანზიტული მდინარეებია. დედამიწის მთავარი წყალგამყოფი კონტინენტების ზედაპირს ორ ძირითად აუზად ჰყოფს: ატლანტიკურ-არქტიკული აუზის წყალი ერთვის ატლანტისა და ჩრდილოეთის ყინულოვან ოკეანეებს, წყნაროკეანური აუზისა — წყნარსა და ინდოეთის ოკეანეებს. პირველი აუზის ჩამონადენი ბევრად მეტია, ვიდრე მეორისა.

**მდინარის საზრდოობა** - მცინვარული და მიწისქვეშა წყლით მდინარეთა საზრდოობა ძირითადად შერეულია (მაგ., მდ. რიონი ქვემოთში წვიმის წყლით საზრდოობს,



ზემოთში — თოვლისა და მყინვარული წყლით). საზრდოობის თავისებურების მიხედვით დადგენილია მდინარის წყლის რეჟიმის სამი ძირითადი ფაზა: წყალდიდობა — მყინვარული წყლით მოსაზრდოვე მდინარეების ზაფხულის ხანგრძლივი უხვწყლიანობა, მაღალი დონეები, ზოგჯერ ნაპირებზე გადმოსვლა; წყალმოვარდნა — თავსხმით ან თოვლის სწრაფი დნობით გამოწვეული მდინარის წყლიანობის ერთბაშად გაზრდა; წყალმცირობა — წლის ცივ პერიოდში ძირითადად მიწისქვეშა წყლით საზრდოობაზე გადასვლით განპირობებული მდინარის დაბალი დონე და მცირე ხარჯი (არანაკლებ 10 დღე-ღამის განმავლობაში). ზომიერი და ცივი სარტყელის მდინარეებს ახასიათებს ყინულოვანი მოვლენები: გამგიფვა, თოშხერგილი, ყინულსვლა და სხვა.

**წყალმოვარდნა** - მდინარეში წყლის დონის სწრაფი, შედარებით მოკლევადიანი აწევა, რაც გამოწვეულია თავსხმა წვიმებით, თოვლისა და ყინულის ინტენსიური დნობით, იშვიათად - მიწისა და ყინულოვანი კაშხლების გარღვევით. წყალმოვარდნა ატარებს არარეგულარულ ხასიათს. წყალმოვარდნის დროს წყლის ნაკადის სიჩქარის და ხარჯის მნიშვნელოვან ზრდას თან ახლავს წყლის სიმღვრივის მომატება, კალაპოტის ხელახალი ფორმირება, ხოლო ხელსაყრელი პირობების შემთხვევაში ხდება წყალგაუმტარი ფენის მოწყვეტისა და კალაპოტის

სიღრმული ეროზიის შედეგად ღვარცოფის წარმოქმნის მიზეზი.

**წყალყინულიანი ნაკადი** - პარალელარცოფული ნაკადების სახეობა, რომლის მასა წარმოდგენილია ყინულის მყარი ფრაგმენტებით, თოვლით და მთის ქანების ფრაგმენტებით. წყალყინულიანი ნაკადი შეიძლება იყოს მყინვარული და მდინარისეული წარმოშობის. მყინვარული წარმოშობის წყალყინულიანი ნაკადი ყალიბდება ნაპრალის წყლით გაჯერებული ყინულოვანი მასების მოწყვეტით. მოწყვეტას განაპირობებს ყინულის დაბოლოების არამყარი მდგომარეობა, გარკვეულ ეტაპზე მისი დეგრადაცია ან პულსაცია. ხასიათდება გამონატანის გიგანტური მოცულობით და მოძრაობის სისწრაფით. მდინარისეული წარმოშობის წყალყინულიანი ნაკადი წარმოიქმნება ზამთრის პერიოდში დნობის დროს ფსკერიდან მოწყვეტილი ყინულის ფენებისაგან ან ჩამოწოლილი ზვავისაგან. ნაკადის მყარი შემადგენლობა ყალიბდება ყინულის ფრაგმენტების, თოვლისა და ყინულის საბურველის (საფრის), ყინვის, თოშის, კალაპოტის დანალექის ხარჯზე. შეზღუდული სიმძლავრის მიუხედავად, წყალსამეურნეო და საგზაო მოწყობილობებისათვის მნიშვნელოვანი ზიანის მომტანია.

**შეტივნარებული ნატანი** - წყლის ნაკადით გადატანილი მყარი ნაწილაკები შეტივნარებულ მდგომარეობაში. ღვარცოფის ნაკადში წყლისა და მასში შეტივნარებული

ქვიშისა და თიხის ნაწილაკების ნარევი (ზომით 1 მმ-ზე ნაკლები) ქმნიან ღვარცოფულ სუსპენზიას.

**ღვარცოფი** - კომპლექსური გეოლოგიურ გეომორფოლოგიური და ჰიდრომეტეოროლოგიური მოვლენა, მაღალი კონცენტრაციის წყალგრუნტოვანი ნაკადის მოძრაობა მდინარის ან ხრამის კალაპოტში, რისი გამოვლინებაც განპირობებულია რელიეფის ძლიერი დანაწევრებით, ფერდობებისა და კალაპოტების ძლიერი დახრილობით, დენუდაციური და ეროზიული პროცესების ინტენსიური განვითარებით, თოვლის ინტენსიური დნობით, ბუნებრივი ან ხელოვნური კაშხლების წყალსატევებიდან გადმოხეთქილი წყლებით და ძლიერი თავსხმა წვიმებით.

**ღვარცოფული პროცესი** - ბუნებრივი პროცესების ერთობლიობა, რომელიც აერთიანებს ღვარცოფული ნაკადის მომზადების, ფორმირებისა და ჩამოწოლის ეტაპებს. ღვარცოფული პროცესის ყველაზე მნიშვნელოვან შემადგენელს (რგოლს) ღვარცოფის ფორმირებისა და მოძრაობის მექანიზმი წარმოადგენს.

**ღვარცოფული რეჟიმი** - ღვარცოფული პროცესის განვითარების მახასიათებელი დროში. ღვარცოფული რეჟიმის ძირითად მაჩვენებლებს ღვარცოფსაშიში პერიოდი და ღვარცოფების განმეორებადობა წარმოადგენს. განასხვავებენ ბუნებრივ და შეცვლილ ღვარცოფულ რეჟიმებს; უკანასკნელი ხდება სამეურნეო

საქმიანობის ან თავდაცვის ღონისძიებების განხორციელების დროს.

**ღვარცოფული რისკი** – ადამიანთა მსხვერპლის და ეკონომიკური ზარალის მოსალოდნელი რაოდენობა, რაც გამოწვეულია ღვარცოფის მოვარდნით. ღვარცოფული რისკის რაოდენობრივი შეფასება ხორციელდება ალბათობის ანალიზის საშუალებით ღვარცოფული აუზების რუკების საფუძველზე ან ღვარცოფული აქტიურობის გასაშუალებული მონაცემების გამოყენებით.

**ღვარცოფული ტალღა** - ტალღის ფორმირება, ღვარცოფული ნაკადის მნიშვნელობიდან გამომდინარე, მის მეორე თვისებას წარმოადგენს მონატეხი მასალით გაჯერების შემდეგ. ჰიდრომექანიკის თვალსაზრისით ღვარცოფული ნაკადი შეიძლება განისაზღვროს როგორც ერთჯერადი ან მრავალჯერადი დადმავალი უწყვეტი ტალღა, რომელიც მოძრაობს პირობითად მშრალ კალაპოტში. ღვარცოფული ტალღის ფორმირება ნაკადის შინაგანი თვისებაა და დაკავშირებულია სხვადასხვა სიმსხოს მქონე მონატეხი მასალის განსხვავებული სიჩქარით გადაადგილებასთან. ღვარცოფული ტალღა მკვეთრად ასიმეტრიულია: ტალღის მკვეთრი წინა ფრონტი (შუბლი) ქმნის ღვარცოფის „თავს“. ტალღის შუბლი 1,5-ჯერ აღემატება ტალღის “ტანს” და, როგორც წესი, უმთავრესად შედგება მსხვილი მონატეხი მასალისაგან. ტალღებს შორის ინტერვალი ერთი ათეული წამიდან რამდენიმე წუთამდე მერყეობს; იგი უფრო

მოკლეა ღვარცოფული მასის ჩამოწოლის საწყის სტადიაზე და შედარებით გრძელი – საბოლოო სტადიაზე.

**ღვარცოფული ტერასა** – ღვარცოფული დანალექისგან შედგენილი ნაკადის აკუმულაციის ფორმა ღვარცოფული აუზის სატრანზიტო ზონაში. მდინარის ტერასებისაგან განსხვავებით, მდინარის მოსახვევებსა და ნაკადის დინამიკურ ჩრდილში წარმოდგენილია მოკლე ფრაგმენტებით. ღვარცოფული ტერასა აფიქსირებს ღვარცოფის ზედაპირის დონეს.

**ღვარცოფული ღარი** – ექსპერიმენტული დანადგარი, რომელიც გამოიყენება ღვარცოფული ნაკადების მოძრაობისა და სხვადასხვა წინააღმდეგობებთან (ნაგებობებთან) მათი ურთიერთქმედების შესასწავლად ფიზიკური მოდელების მეთოდის გამოყენებით. ღვარცოფული ღარის მოწყობილობა და ექსპერიმენტის ტექნიკა ხელოვნური ღვარცოფული მასის თვისებებისა და ღარის პარამეტრების (ქანობი, ხორკლიანობა) ცვლილების შესაძლებლობას იძლევა. ღვარცოფულ ღარზე განსახორციელებელი ექსპერიმენტების მიზანს რაოდენობრივი მახასიათებლებისა და დამოკიდებულებების მიღება წარმოადგენს, რაც აუცილებელია ღვარცოფული ნაკადის გასაანგარიშებლად, კერძოდ, სიჩქარეების ვერტიკალური ეპიურების აგება, ნაკადის სიჩქარის სიღრმესთან დამოკიდებულებების, ღვარცოფული მასის სიმკვრივის, ფსკერისა და ფერდების ხორკლიანობის დადგენა და სხვ. ღვარცოფულ ღარებზე ნაგებობებთან ღვარცოფული ნაკადის ურთიერთქმედების საკითხებიდან

განიხილება ისეთი ამოცანები, როგორცაა მოხვევის ზღვრული კუთხეები, ღვარცოფგამტარი ხვრეტების ზომა, მოხაზულობა და სხვ.

**ღვარცოფული წყალმოვარდნა** - ნაკადების ერთ-ერთი ტიპი, რომელსაც შუალედური პოზიცია უკავია ტიპურ ღვარცოფულ (ტალახოვან, ქვატალახოვან) ნაკადსა და წყალმოვარდნას შორის. ტიპური ღვარცოფული ნაკადებისაგან განსხვავდება ჩამონამტვრევი მასალის მცირე გაჯერებით ( $1100 \text{ კგ/მ}^3$ -ზე ნაკლები სიმკვრივით), ხოლო წყალმოვარდნებისაგან - მოკლე ხანგრძლივობითა და ღვარცოფული ტიპის ჰიდროგრაფით. ღვარცოფული პროცესის ელემენტების (კალაპოტის შემონაკირწყლის მოწყვეტა, ჩამონამტვრევი მასალით მაღალი გაჯერებულობა, მსხვილი ნატეხების გადატანა) - რეალიზება შესაძლებელია კალაპოტის მხოლოდ გარკვეულ უბნებზე და არა მის გასწვრივ მთელ სიგრძეზე. ეს აისახება ღვარცოფული რელიეფის აკუმულირებული ფორმების შეზღუდულ განვითარებაში. ღვარცოფული წყალმოვარდნა დამახასიათებელია არიდული ლანდშაფტებისათვის და ასევე სუბარქტიკის მთიანი რაიონებისათვის.

**ღვარცოფული ჭრილი** - ღვარცოფული აუზების რელიეფის ფორმა, რომელიც წარმოიქმნება ღვარცოფული ნაკადების სიღრმითი და გვერდითი ეროზიის პროცესების შედეგად. ღვარცოფული აუზის ზედა ნაწილში ღვარცოფული ჭრილის მახასიათებელ განივ პროფილს გააჩნია V-სებრი მოხაზულობა, ხოლო შუა და ქვედა ნაწილში - მართკუთხა.

ღვარცოფული ჭრილის განსხვავება წყალმოვარდნებით გამოწვეული ფორმებისაგან, არის მისი უშუალო კავშირი ღვარცოფული გენეზისის რელიეფის აკუმულაციურ ფორმებთან. ღვარცოფული აუზების ზედა ნაწილის მცინვარულ დანალექში განლაგებული ღვარცოფული ჭრილი ხშირად ღვარცოფების წარმოქმნის უბანი ხდება.

**ღვარცოფშემკავებელი კაშხლები** - ღვარცოფ საწინააღმდეგო ნაგებობათა ერთ-ერთი ტიპი. გათვლილია ღვარცოფის შეჩერებაზე, მისი მყარი ჩანართის აკუმულირებასა და ღვარცოფის თხევადი ჩანართის ორგანიზებულ ჩაშვებაზე. ღვარცოფშემკავებელი კაშხლების კონსტრუქციები შეიძლება იყოს მასიური \_ ბეტონის, რკინაბეტონის, ქვის წყობის, გრუნტის მასალის \_ ან გამჭოლი (გისოსისებრი), ანაკრები რკინაბეტონის ან ფოლადის დეტალებისგან. ღვარცოფული გამოტანის მასის მოცულობიდან გამომდინარე, ღვარცოფშემკავებელი კაშხლების სიმაღლე მერყეობს 10\_15 მ-დან 100\_150 მ-მდე. მისი გაანგარიშება ხდება ისე, რომ მოხდეს მყარი მასალის გამოტანის სრული აკუმულაცია, მიღებული საანგარიშო უზრუნველყოფით. ღვარცოფული ნაკადის მყარი მასა, რომელიც დალექილია ღვარცოფშემკავებელი კაშხლის ზედა ბიეფში განლაგებულ ღვარცოფსაცავში, პერიოდულად საჭიროებს გაწმენდას. ღვარცოფშემკავებელი კაშხლები, სხვა სახის ნაგებობებთან და მელიორაციულ ღონისძიებებთან ერთად, წარმოადგენს

ერთადერთ და ძირითად ღვარცოფსაწინააღმდეგო საშუალებას.

**ღვარცოფჩამომყალიბებელი ნალექები** - რაიონისათვის ან ღვარცოფული აუზისათვის დამახასიათებელი თხევადი ნალექების ჯამი. ღვარცოფჩამომყალიბებელი ნალექები უზრუნველყოფს ღვარცოფჩამომყალიბებელ ხარჯებს ან ღვარცოფული კერების აქტიურობას, ანუ ღვარცოფული ნაკადის წარმოშობას.

**ღვარცოფჩამომყალიბებელი ხარჯი** - წყლის მინიმალური ხარჯი, რომელსაც შემონაკირწყლის ჩამონგრევისა და კალაპოტის სიღრმითი ეროზიის ხარჯზე გააჩნია ღვარცოფის ფორმირების უნარი.

ყინულის ღვარცოფი - ყინულის ღვარცოფის ერთ-ერთი გენეტიკური ტიპი, რომლის ფორმირება დაკავშირებულია ყინულმორენული კომპლექსების მდგრადობის დარღვევასთან, ხოლო თხევადი შემადგენელი უპირატესად წარმოიქმნება მდნარი წყლით. ყინულის ღვარცოფის წარმოქმნა გამოწვეულია ყინულოვანი ტბების აუზებისა და გუბურების გარღვევით, ყინულისა და მორენების ჩამოცურებითა და მოწყვეტით. ღვარცოფული მასის შემადგენლობით ყინულის ღვარცოფი შეიძლება იყოს ქვაწყლიანი, ქვატალახიანი, ყინულწყლიანი. ყინულის ღვარცოფები – უმეტესად, ძლიერი მაღალმთიანი ღვარცოფებია. ყინულის ღვარცოფის აქტივიზაცია დამახასიათებელია გამყინვარების



დეგრადაციის ეტაპისათვის, განსაკუთრებით მის საწყის ეტაპზე.

**წვიმით გამოწვეული ღვარცოფი** - ღვარცოფის ერთ-ერთი გენეტიკური ტიპი. წარმოიქმნება წვიმებისა და თავსხმა წვიმების შედეგად. ღვარცოფის ჩამოყალიბების მექანიზმი, უმეტეს შემთხვევაში, განეკუთვნება ეროზიულ ტიპს - ფერდობების ჩამორეცხვა და წარეცხვა; კალაპოტების სიღრმული და გვერდითი წარეცხვა იწვევს ნაშალი მასალის წყალგაჯერების მომატებას და ღვარცოფული ტალღის წარმოქმნას. წვიმით გამოწვეული ღვარცოფი ღვარცოფული მოვლენების ყველაზე ფართოდ გავრცელებული ფორმაა დედამიწაზე და გვხვდება პრაქტიკულად ყველა კლიმატურ ზონაში.

**ხელოვნური ღვარცოფები** - ბუნებრივ პირობებში კვლევისა და პრაქტიკული მიზნებისათვის ფორმირებული ხელოვნური ღვარცოფები. ხელოვნური ღვარცოფების ფორმირებისათვის გამოიყენება წყალსაცავის წყალსაშივი და წყალმიმღები, რაც იძლევა ნაკადის პარამეტრების კონტროლირების საშუალებას.

**ღვარცოფსაშიში ადგილები** - ინტენსიური ფიზიკური გამოფიტვის შედეგად წარმოქმნილი ადგილები, დიდი მოცულობის ნაშალი მასალა წყლით გაჯერების და გათხევადების პირობებში გადაიქცევა ტალახის, ქვატალახისა და წყალქვის ნაკადებად, რომელიც ჩვეულებრივი წყალმოვარდნებისგან გამოირჩევა უფრო დიდი ხარჯით, მოძრაობის უფრო დიდი სიჩქარით, მყარი

ჩამონადენის დიდი მოცულობით, მაღალი სიმკვრივით და შესაბამისად დარტყმის განსაკუთრებული სიძლიერით.

### გამოყენებული ლიტერატურა

1. ნათიშვილი ო., თევზაძე ვ., დანელია ზ. - ღვარცოფებისა და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ჰიდრავლიკა. „ისარი“, თბილისი, 1995 წ., 78 გვ.
2. ნათიშვილი ო., გეგეშიძე ი. - ჰიდრავლიკა. „განათლება“, თბილისი, 1996 წ., 374 გვ.
3. გავარდაშვილი გ. - ირიგაცია, დრენაჟი, ეროზია. „უნივერსალი“, თბილისი, 2016, 410 გვ.
4. გავარდაშვილი გ. - ქალაქ ყვარლის მოსახლეობის უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით მდინარე დურუჯის კალაპოტში 2012 წლის მაისის თვეში განხორციელებული საველე კვლევის შედეგები. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული . 2012წ. #67.გვ. 22 - 31, თბილისი.

5. გუბელაძე დ. - კალაპოტური პროცესების რეგულირების საინჟინრო გადაწყვეტის მეთოდები - „საგამომცემლო სახლი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი - მონოგრაფია, თბილისი, 2019წ, 211გვ.
6. გუბელაძე, დ., გურგენიძე დ. - კალაპოტური პროცესების თავისებურებანი. ჟურნალი ჰიდროინჟინერია 19-20 საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი . 2015წ. 5 9გვ.
7. დიაკონიძე რ. - ჰიდრომეტრია (ელექტრონული ვერსია), 2017წ, გვ. 307, სტუ-ს ცენტრალური ბიბლიოთეკა;
8. დანელია ზ., ამბროლაძე თ., თოფურია მ,- ჰიდრაულიკა, ჰიდროლოგია, ჰიდრომეტრია. საქ. ტექნიკური უნივერსიტეტი. 2013 წ. სტუ-ს ცენტრალური ბიბლიოთეკა, 532.551.48;
9. ყრუაშვილი ი., ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა. საქ. მეცნიერებისა და ტექნიკის კომიტეტი (საქპატენტტი), 1995, ს.ს. #002095.
10. ყრუაშვილი ი. - ღვარცოფები და მასთან ბრძოლის მეთოდები - საგამომცემლო სახლი სტუ თბილისი. 2014 გვ.337.
11. ყრუაშვილი, კუხალაშვილი ე, ინაშვილი ი. ,ბზიავა კ.- ღვარცოფული მოვლენები- რისკი, პროგნოზი, დაცვა - საგამომცემლო სახლი სტუ თბილისი. 2017 გვ.249.
12. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე., ღვარცოფსაწინააღმდეგო ახალი ტიპის კონსტრუქციები. აგრარული მეცნიერების პრობლემები. სამეცნიერო შრომათა კრებული II, თბილისი. 1997, გვ. 180-186.

- 13.კერესელიძე დ., ტრაპაიძე ვ., ბრეგვაძე გ., ზოგადი ჰიდროლოგია, თსუ გამომცემლობა, 2011;
- 14.კუხალაშვილი ე., კ.ბზიავა ბ. - ბმული დვარცოფის გამოტანის კონუსებზე მოძრაობის პირობების პროგნოზი. საქართველოს განათლების სამინისტრო, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის წყალთა მეურნეობის სამეცნიერო შრომათ კრებული. . 2013წ. № 68, 127
- 15.მეტრეველი გ. საზღვაო ჰიდრომეტრია, თსუ გამომცემლობა, თბილისი, 1997;
- 16.უკლება ნ., ჰიდრომეტრია, თსუ გამომცემლობა, თბილისი, 1967;
- 17.ჩიკვაშვილი ბ. - ჰიდროლოგია ჰიდრომეტრია ჩამონადენის რეგულირება - გამომცემლობა „განათლება“, თბილისი, 1976 წ.;
- 18.მამასახლისი ჟ., კუხალაშვილი ე., სახვაძე ა., ომსარაშვილი გ. - საინჟინრო ჰიდროლოგია და ჩამონადენის რეგულირება. მეთოდური მითითებები, თბილისი, 2009 წ.;
- 19.პაპაშვილი ა. ჰიდრაულიკა. თბილისი: განათლება, 1988.
- 20.ჟელეზნიაკოვი გ. ჰიდრომეტრია. განათლება, 1978.
- 21.ამბროლაძე თ. მეთოდური მითითება სასწავლო-ჰიდრომეტრიული პრაქტიკის ჩასატარებლად სამდინარო ნაგებობებისა და ჰიდროელექტროსადგურების და ხიდების და გვირაბების მშენებლობის სპეციალობის სტუდენტებისათვის. თბილისი: სპი-ს სტამბა, 1986.

- 22.Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И. Гидравлика. – М.: Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
- 23.Алексеев Г.А., Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Л.: Гидрометиздат, 1971, 363 с.
- 24.Бахметов Б.А., Гидравлика открытых русел. М.: Гострансиздат, 1934, 248 с.
- 25.Беручашвили Г.М., Кокоришвили В.И., Некоторые результаты исследования селевых потоков. Труды КазНИГМИ, вып.33, 1969, с.42-62.
- 26.Боярский И.Я., Власов А.Ю., Коляда М.С., О приборе для измерения поверхностной скорости водокаменных селевых потоков. Вестник МГУ, сер. геогр., N 3, 1970, с.82-87.
- 27.Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б., Байбаков О.В., Кирилловский Ю.Л. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. – 2-е изд. Машиностроение, 1982. – 423 с.
- 28.Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.
- 29.Богомолов А.И., Константинов Н.М., Александров В.А., Петров Н.А. Примеры гидравлических расчетов. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1977. – 526 с.
- 30.Бурдули Н.С., Кизирия Г.В., Херхеулидзе Г.И., Некоторые результаты опыта постройки и эксплуатации экспериментального сквозного селеуловителя системы ЗакНИИ на р. Дуруджи. Труды ЗакРНИИ, вып.83(90), 1984, с.112-124.

31. Великанов М.А., Изучение селей в СССР. Селевые потоки и меры борьбы с ними. М.: Изд. АН СССР. 1957, с. 7-13.
32. Виноградов Г.В., Малкин Л.Я., Реология полимеров. М.:
33. Виноградов Ю.Б., Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеоиздат, 1980, 144 с.
34. Гагошидзе М.С., Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси, Сабчота Сакартвело, 1970, 386 с.
35. Гагошидзе М.С., Натишвили О.Г., Сулаквелидзе Л.А., Иорданишвили З.С., Тевзадзе В.И., Некоторые инженерные задачи расчета селевых потоков. – Труды ГрузНИИГиМ, вып.25, 1967, с.26-37.
36. Гольштейн М.Н., К вопросу возникновения селевых потоков. В кн.: Защита железных дорог от селевых потоков. М.:
37. Ибад-заде Ю.А., Инженерные методы борьбы с селевыми потоками в Азербайджане. Материалы V всесоюзного совещания по изучению селевых потоков и меры борьбы с ним. Баку, 1962, с. 265-269.
38. Иорданишвили З.С., Лабораторные исследования физикомеханических свойств в процессе движения. Материалы V всесоюзного совещания по изучению селевых потоков и меры борьбы с ним. Баку, 1962, с. 195-200.
39. Иорданишвили З.С., Сохадзе А.Д., К вопросу об ударном воздействии структурного селевого потока на сквозные сооружения. Эрозионные и селевые процессы и борьба с ними. вып. 3, М.: 1974, с. 48-54.

40. Кавецкий С.П., Об искусственном воспроизведении селей в природных условиях и меры борьбы с ними. Вып 3, 1974, с. 60-63.
41. Квасов А.И., Селевые потоки и их воздействие на сооружения. Алма-Ата, Наука, 1987, 131 с.
42. Мирцхулава Ц.Е., Оценка риска повреждения противоэрозионных и противоселевых сооружений. – В сб.: Эрозионные и селевые процессы и борьба с ними. Вып.4. М.: 1975, с.48-62.
43. Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И., Иорданишвили З.С., К установлению скорости структурного селевого потока на прямолинейных участках русла. Тр. ГрузНИИГиМ, вып. 22, Тбилиси, 1963, с. 243-248.
44. Натишвили О.Г., Губеладзе Д.О. - Волновое движение склонового стока активный побудитель эрозионного процесса - Математическое моделирование экологических системах и приборах» № 4. 2020 г. 25-30ст..
45. Натишвили О.Г., Губеладзе Д.О.- Гидравлический прыжок в связных селевых потоках- Экология и Строительства Журнал| | № 2, 2020 Москва DOI: 10.35688/2413-8452-2020-02-005.
46. Натишвили О.Г., Губеладзе Д.О. Некоторые соображения о гидравлическом моделировании связных селевых потоков // Экологические системы и приборы. 2017. № 12. С. 12-18.
47. Натишвили О.Г., Губеладзе Д.О. Критериальное условие устойчивости равномерного движения

- взвесенесущего потока в руслах с большими уклонами // Экологические системы и приборы. 2017. № 4. С.8-10.
48. Сванидзе Г.Г. Цуцкиридзе Я.А. Основные Гидрометеорологические явления на Кавказе. Гидрометеоиздат, Л., 1980 г., 288 с.
49. Железняков Г.В. Гидрология и гидрометрия. – М.: Высшая школа, 1981. – 264 с.
50. Киселев П.Г. Гидравлика. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
51. Константинов Ю.М. Гидравлика. – Киев: Выща школа, 1981. 358 с.
52. Латышенков А.М., Лобачев В.Г. Гидравлика. – М.: Стройиздат, 1971. – 408 с. 12. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. – 2-е изд. – М.: Л.: Энергия, 1967. – 283 с.
53. Рабинович Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1980. 278 с.
54. Угинчус А.А., Чугаева Е.А. Гидравлика. – Л.: Стройиздат, 1971. 350 с.
55. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – 4-е изд. – Л.: Энергия, 1982. – 672 с.
56. Ashworth "P.T. Ferguson R.J, (1998) - Size-selective entrainment of bed load in gravel-bed streams. Water resources research vol.25 N 4, pp
57. Beavers G.S., Joseph S.D. (1967) - Boundary conditions at a naturally Dermeable wall, J.nuid.Mech. ..50,1. p.197-207.
58. Bogardi .T. Sediment transport in- alluvial streams. Akad Kiado Budapest, pp.608-610,



59. Chawlo 3.3., Singh S.(1979) - Oscillatory flow part a porous bed. *Ada Mech.* 54. p.205-211.
60. Gelhar L.W. Turbulent pipe flow with granular permeable boundaries .Report
61. Ralph M. Parsons Laboratory M.t.'r. N148.1972.
62. Gubeladze D. (1996) - Determination of free surface slope in bed flows taking filtration in to account *Bulletin of the Georgia Academy of Sciences* Vol.154,N2,
63. Gubeladze D.O., Debolsky V.K. (1996) - Statistical description of turbulent motion in bed flows *Bulletin of the Georgia Academy of Sciences* Vol.154,N2,.
64. Gubeladze D. O. (2017) - Priorities for Agriculture Support Services in the Irrigation and Drainage Areas in Georgia IV International Scientific and Practical Conference “ Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions” International Scientific and Practical Conference “WORLD SCIENCE” № 10(26), Vol.1, October 2017 Multidisciplinary Scientific Edition RS Global IV Dubai, y P. 50-52;
65. Gubeladze D.O. (2017) - Irrigation & Drainage Systems of Georgia and Environmental Protection- V International Scientific and Practical Conference "Modern Scientific Achievements and Their Practical Application", *International Academy Journal*, “Web of Scoular” October 31, , Dubai, UAE;
66. Gubeladze D.O. (2017) - Measures to Improve the Efficiency of Irrigation in Georgia - *Proceedings of the International*

- Scientific Conference, "International Trends in Science and Technology" October 17, Warsaw, Poland Vol.1 pp.42-45;
67. Debolsky V.K., Gubeladze D.O. (1989) - Alluvial stream Hydraulic Resistance in the Presence of Filtration. International Conference on Channel flow and catchment Runoff Centennial of Manning's formula and Rational formula department Of civil engineering university Of Virginia. USA.
68. Wang W.G., Shen H.W. (1980) - Statistical properties of alluvial August 5-7, Tokyo. Japan. pp.71-589.
69. Yamada T. Kawabata . (1982) - A theoretical study on the resistance law of the flow over a porous layer. Proc. JSGE. N 525. pp.69-80 (in Japanese). M4.
70. Zanke I. Grundlagen der sedimen.tbeweKun.g. (1982) - Berlin Heidelberg. New-York, s 401 pp.55-59

### ელექტრონული ლიტერატურა

1. [www.nplg.gov.ge/gwdict/index.php?a=term&d=4&t=2401](http://www.nplg.gov.ge/gwdict/index.php?a=term&d=4&t=2401)
2. [www.parliament.ge/files/stajireba](http://www.parliament.ge/files/stajireba)
3. <https://farbitis.ru/.../channel-processes-and-their-typification-CHANNE...>
4. <https://www.matsne.gov.ge/ka/document/view/2187020>
5. [www.nplg.gov.ge/gwdict/index.php?a=term&d=4&t=2401](http://www.nplg.gov.ge/gwdict/index.php?a=term&d=4&t=2401)

6. [https://www.tsu.ge/data/file\\_db/library/trapaidze\\_resur\\_sebi.pdf](https://www.tsu.ge/data/file_db/library/trapaidze_resur_sebi.pdf)
7. <http://www.moe.gov.ge/ka//wyali>
8. <https://ka.wikipedia.org/wik>;
9. <https://matsne.gov.ge/ka/document/view/25840>
10. <https://ekofact.com/2012/04/28/>
11. <https://ka.wikipedia>;
12. <https://ka.wikipedia.org/wiki>
13. [https://www.tsu.ge/data/file\\_db/faculty\\_zust\\_sabuneb\\_ismetk/mariam%20cicagi.pdf](https://www.tsu.ge/data/file_db/faculty_zust_sabuneb_ismetk/mariam%20cicagi.pdf)
14. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/geo167802.pdf>
15. [http://www.gaas.dsl.ge/pdf/recomendations\\_2014-2015](http://www.gaas.dsl.ge/pdf/recomendations_2014-2015)
16. <http://conference.ens2015.tsu.ge/uploads/54ca5b2eb6bd8Vazha-Trapaidze-geo.pdf>
17. <http://mepa.gov.ge/Ge/Files/ViewFile/2308>

### დანართები

ფიზიკური სიდიდეების განზომილებათა ერთეულები  
დანართი N1

	სისტემა FLT	სისტემა MLT		სისტემა FLT	სისტემა MLT
აჩქარება	$LT^{-2}$	$LT^{-2}$	სიმძლავრე	$FLT^{-1}$	$ML^2T^{-3}$
კუთხე	$F^0L^0T^0$	$M^0L^0T^0$	წნევა	$FL^{-2}$	$ML^{-1}T^{-1}$
კუთხური აჩქარება	$T^{-2}$	$T^{-2}$	კუთრი თბოტევად ობა	$L^2T^{-2}\theta$	$L^2T^{-2}\theta$
კუთხური სიჩქარე	$T^{-1}$	$T^{-1}$	კუთრი წონა	$FL^{-3}$	$ML^{-2}T^{-1}$
ფართობი	$L^2$	$L^2$	ფარდობით ი დეფორმაც ია	$F^0L^0T^0$	$M^0L^0T^0$
სიმკვრივე	$FL^{-4}T^{-1}$	$ML^{-3}$	ძაბვა	$FL^{-2}$	$ML^{-1}T^{-1}$
ენერგია	$FL$	$ML^2T^{-2}$	ზედაპირუ ლი დაჭიმულ ობა	$FL^{-1}$	$MT^{-2}$

	სისტემა FLT	სისტემა MLT		სისტემა FLT	სისტემა MLT
ძალა	$F$	$MLT^{-2}$	ტემპერატურა	$\theta$	$\theta$
სიხშირე	$T^{-1}$	$T^{-1}$	დრო	$T$	$T$
თბოტევადობა	$FL$	$ML^2T^{-2}$	გრეხა	$FL$	$ML^2T$
სიგრძე	$L$	$L$	სიჩქარე	$LT^{-1}$	$LT^{-1}$
მასა	$FL^{-1}T^2$	$M$	სიბლანტე (დინამიკური)	$FL^{-2}T$	$ML^{-1}T^{-1}$
დრეკადობის მოდული	$FL^{-2}$	$ML^{-1}T^{-1}$	სიბლანტე (კინემატიკური)	$L^2T^{-1}$	$L^2T^{-1}$
ძალის მომენტი	$FL$	$ML^2T^{-2}$	მოცულობა	$L^3$	$L^3$
ინერციის მომენტი(ფართობი)	$L^4$	$L^4$	მუშაობა	$FL$	$ML^2T^{-2}$

სიჩქარისა და ფრაქციის მნიშვნელობები

დანართი N2

კალაპოტის ქვედა ფენის ფრაქციული შედგენილობა	მაქსიმალური სიჩქარე	
	$R = 0,2$ მ	$R = 0,2$ მ
1. წმინდა კოლოიდური ლამი	0,10	0,20
2. მძიმე ლამი	0,20	0,40
3. წვრილი სუფთა ქვიშა	0,20	0,30

4. მსუბუქი ქვიშნარი	0,30	0,40
5. საშუალო ქვიშნარი	0,35	0,50
6. მსხვილი ქვიშა	0,45	0,60
7. ოვივე, კენჭებნარევი	0,60	0,85
8. წვრილი კენჭი	0,60	1,00
9. მსხვილი კენჭი	1,40	1,85
10. რბილი მთის ქანები	1,80	3,00
11. კლდე ფენოვანი	2,20	4,00
12. კლდე მაგარი	3,00	7,00
13. მსუბუქი თიხიანი	0,45	0,65
14. საშუალო თიხიანი	0,55	0,75
15. მძიმე თიხიანი	0,65	1,00
16. ჩვეულებრივი თიხა	0,65	0,90
17. მკვრივი თიხა	0,75	1,00
18. მსუბუქი ლიოსი	0,35	0,55
19. საშუალო ლიოსი	0,50	0,75
21. მკვრივი ლიოსი	0,60	0,90

დაფერდების კოეფიციენტი ჭრილში

გატარებული არხისათვის

დანართი N 3

გრუნტი	სარწყავი არხები წყლის დონით		
	1 m	1-2 m	2-3 m
კენჭი, სუსტად შეცემენტებული	1,00	1,00	1,00
კენჭი ხრეშითა და ქვიშით	1,25	1,50	1,50
თიხა, მძიმე და საშუალო თიხნარი	1,00	1,00	1,25

მსუბუქი თიხნარი	1,25	1,25	1,50
ქვიშნარი	1,50	1,50	1,72
ქვიშა	1,75	2,11	2,25

მიწის კაშხლის გვერდების დაფერდების მაჩვენებლები

დანართი N4

გრუნტი	ზედა – სველი გვერდი	ქვედა – მშრალი გვერდი
ერთგვაროვანი კაშხალი		
საშუალო და მსუბუქი თიხნარი	2,25–3,0	2,0–2,5
ქვიშნარი	2,5–3,5	2,0–2,5
ქვიშა (5 მ ნაკლები სიმაღლის კაშხლისათვის)	3,0	2,5
ეკრანიანი კაშხალი		
ქვიშა და მსუბუქი ქვიშნარი	2,25–3,0	2,0–2,5
გულიანი კაშხალი		
ქვიშა და მსუბუქი თიხნარი	2,75–3,25	2,0–2,5

სარწყავი წყლის ვარგისიანობის შემოწმება.

სტებლერის საირიგაციო კოეფიციენტი

დანართი N5

Y	წყლის შეფასება	წყლის სარწყავად გამოყენების პირობები
> 18	კარგი	დამლაშების საწინააღმდეგო ლონისძიე-ბების გამოყენებლად სარწყავი წყლის გამოყენება შეიძლება მრავალი წლის განმავლობაში
18–6	დამაკმაყოფი-	ფხვიერი და კარგად დრენირებული

	ლებელი	ნიადა-გების გამოკლებით, ყველა ნიადაგში საჭიროა დამლაშების საწინააღმდეგო ღონისძიებების გამოყენება
5,9-1,2	არადამაკმა-ყოფილებელი	თითქმის ყოველთვის საჭიროა ხელოვნური დრენაჟი
< 1,2	ცუდი	წყალი სარწყავად არ ვარგა

ხორკლიანობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა  
დანართი N6

#	კალაპოტის დახასიათება	n
1	2	3
1	ცემენტის, სუფთა თიხის, თუჯისა და რკინის მილები, კარგად დაწყობილი და შეერთებული	0,011
2	თლილი ქვის ან აგურის კარგი წყობა წყალსადენის მილები, არა სავსებით მორგებული გაუმალაშინებელი ფიცრები	0,013
3	დამაკმაყოფილებელ მდგომარეობაში მყოფი ჩვეულებრივი ყორე-წყობა, აგურის ძველი (დაშლილი) წყობა, შედარებით ტლანქი დაბეტონება	0,017
4	აღიან ტლანქი ყორე-წყობა, მსხვილი ქვის მშრალი წყობა, კლდეში სუფთად გაყვანილი არხი, არხები – ლიოსში, მსხვილ ხრეშში, მკვრივ მიწაში	0,020
5	მიწის დიდი არხი მოვლისა და შეკეთების საშუალო და ცოტათი უკეთეს პირობებში. მდინარეები და რუები კარგ პირობებში, თავისუფალი დინებით	0,023
6	რხი ან მდინარე მეტად ცუდ მდგომარეობაში (მცენარეებით, რიყის ქვებით, ჩამოზვავებული გვერდებით)	0,030
7	არხი ან მდინარე მეტად ცუდ მდგომარეობაში, არაწესიერი პროფილით, ქვებითა და მცენარეებით	0,035



8	იგივე, განსაკუთრებით ცუდ მდგომარეობაში, კალაპოტში მსხვილი ქვები, შესამჩნევია ორმოები და ზვავები, ლერწამი	0,040
---	--	-------

სიჩქარის კოეფიციენტის (C) მნიშვნელობა  
აკად. ნ. პავლოვსკის ფორმულით დანართი N7

$\alpha$ $R(m)$	0,011	0,013	0,017	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040
1	2	3	4	5	5	7	8	9
0,05	61,3	48,7	33,2	26,1	18,6	13,9	10,9	8,7
0,06	62,8	50,1	34,4	27,2	19,5	14,7	11,5	9,3
0,07	64,1	51,3	35,5	28,2	20,4	15,5	12,2	9,9
0,08	65,2	52,4	36,4	29,0	21,1	16,1	12,8	10,3
0,10	67,2	54,3	38,1	30,6	22,4	17,3	13,8	11,2
0,12	68,8	58,8	39,5	32,6	23,5	18,3	14,7	12,1
0,14	70,3	57,2	40,7	33,0	24,5	19,1	15,4	12,8
0,16	71,5	58,4	41,8	34,0	25,4	19,9	16,1	13,4
0,18	72,6	59,5	42,7	34,8	26,2	20,6	16,8	14,0
0,20	73,7	60,4	43,6	35,7	26,9	21,3	17,4	14,5
0,22	74,6	61,3	44,4	36,4	27,6	21,9	17,9	15,0
0,24	75,5	62,1	45,2	37,1	28,3	22,5	18,5	15,5
0,26	76,3	62,9	45,9	37,8	28,8	23,0	18,9	16,0
0,28	77,0	63,6	46,5	38,4	29,4	23,5	19,4	16,4
0,30	77,7	64,3	47,2	39,1	29,9	24,0	19,9	16,8
0,35	79,3	63,8	48,6	40,3	31,1	25,1	20,9	17,8
0,40	80,7	67,1	49,8	41,5	32,2	26,0	21,8	18,6
0,45	82,0	68,4	50,9	42,5	33,1	26,9	22,6	19,4
0,50	83,1	69,5	51,9	43,5	34,0	27,8	23,4	20,1
0,55	84,1	70,4	52,8	44,4	34,8	28,5	24,0	20,7

0,60	85,3	71,4	53,7	45,2	35,6	29,2	24,7	21,3
0,65	86,0	72,2	54,5	45,9	36,2	29,8	25,3	21,9
0,70	86,8	73,0	55,2	46,9	36,9	30,4	25,8	22,4
0,80	88,3	74,5	56,5	47,9	38,0	31,8	26,8	23,4
0,90	89,4	89,4	57,5	48,8	38,9	32,3	27,6	24,1
1,00	90,9	90,9	58,8	50,0	40,0	33,3	28,6	25,0
1,10	1,10	92,0	59,8	50,9	40,9	40,9	29,3	25,7
1,20	1,20	93,1	60,7	51,8	41,6	41,6	30,0	26,3
1,30	1,30	94,0	61,5	52,8	42,3	42,3	30,6	26,9
1,50	1,50	95,7	52,9	53,9	43,6	43,6	31,7	28,0
1,70	1,70	97,3	64,3	55,1	44,7	44,7	32,7	28,9
2,00	2,00	99,3	65,9	56,6	46,0	46,0	33,8	30,0

საირიგაციო კოეფიციენტის გამოსათვლელი  
სტებლერის ფორმულები

დანართი N8

ხსნარის ტიპი	Y
I. Na ონი უფრო ცოტაა, ვიდრე Cl <sup>-</sup> იონი ხსნარში არის ნატრიუმის ქლორიდი	$Y = \frac{288}{5g Cl'}$
II. Na <sup>+</sup> ონი უფრო მეტია, ვიდრე Cl <sup>-</sup> ონი, მაგრამ ნაკლებია, ვიდრე ძლიერი მჟავების იონთა ჯამი. ხსნარში არის ქლორიდები და სულფატები	$Y = \frac{288}{4g Na^+ + 4g Cl'}$
III. Na <sup>+</sup> ონი მეტია, ვიდრე ძლიერი მჟავების იონთა ჯამი. ხსნარში არის ქლორიდები, სულფატები და კარბონატები	$Y = \frac{288}{10g Na^+ + 5g Cl' + 9g SO_4^{2-}}$

ზედაპირული ჩამონადენის კოეფიციენტი  
დამშრობის დროს

დანართი N9

რელიეფი, ნიადაგი, მცენარეულობა	$\sigma$
სწორი ზედაპირი, ხნული, წყალგამტარი ნიადაგი	0,3–0,4
მცირე ქანობი, საშუალო წყალგამტარი ნიადაგი, მდელო	0,4–0,5
საშუალო ქანობი, საშუალოზე ნაკლებ წყალგამტარი ნიადაგი, ტყიანი ფერდი	0,5–0,65
ძლიერი ქანობი, მძიმე, წყალგაუმტარი ნიადაგი	0,65–0,8

ჩამონადენის კოეფიციენტი –  $\sigma$  რისკერის მიხედვით (%)

დანართი N10

ნიადაგი	თიხის შემცველობა, %	წყალგამტარი ნიადაგი				წყალგაუმტარი ნიადაგი			
		ზედაპირის დახრილობა (%)							
		5	10	15	20	5	10	15	20
ქვიშა	20	40	45	50	55	45	50	50	60
ქვიშნარი	40	50	55	60	65	55	60	60	70
თიხნარი	60	65	70	75	80	70	75	75	85
თიხა	80	80	85	90	95	85	90	95	100

დრენაჟის სიღრმე –  $H$  და მათ შორის მანძილი –  $I$

დანართი N11

კულტურები	$H$ (მ) და $I$ (მ)	წყალგამტარი ქვენიადაგი			წყალგაუმტარი ქვენიადაგი		
		დაბლობის ჭაობის ტორფი	მაღლობის ჭაობის ტორფი	ქვიშნარი	თიხნარი	თიხა	

მინდვრის	<i>H</i>	1,2-1,4	1,1-1,25	0,8-1,2	1,0-1,4	1,0-
	<i>I</i>	20-40	10-25	25-40	12-25	0,8
ბოსტნის	<i>H</i>	1,25-1,4	1,2-1,3	0,9-1,1	1,0-1,4	12-8
	<i>I</i>	15-35	10-20	15-35	12-20	1,1-
მრავალწლიან ინარგავები	<i>H</i>	1,4-1,6	1,3-1,5	1,2-1,4	1,4-1,6	0,9
	<i>I</i>	8-12	7-10	12-25	10-14	10-8 1,4- 1,2 8-7

ფართობის დახრილობა, სადაც გამოიყენება  
მოცემული ტიპის ტერასა (*i*)

დანართი N12

ტერასის ტიპი	<i>h</i> , m	<i>b</i> , m	<i>m</i>	<i>H</i> , m	<i>i</i>
ტერასი ჰორიზონტალური ბეჭობით	0,24-0,42	2-4	3-4	0,8-1,5	0,03-0,12
ტერასი დახრილი ბეჭობით	0,15-0,3	6-9	3-4	0,9-2,4	0,05-0,18
საფეხურისებრი ტერასი ჰორიზონტალური ზედა- პირით	0,15-0,3	0,6	0,2-0,5	0,9-1,8	0,12-0,20
საფეხურისებრი ტერასი დახრილი ზედაპირით	0,3-0,5	0,9-1,0	0,2-0,5	1-3	0,15-0,25

ტერასის ზომები

დანართი N13

ფართობის დახრილობა <i>i</i>	ტერასის სიმაღლე <i>H</i> , მ.		ტერასის განი <i>b</i> , მ.	
	თიხნარი	ქვიშნარი	თიხნარი	ქვიშნარი

მონაცემები წყალსაცავების შევსების შესახებ

დანართი N14

#	წყალსაცავების დასახელება	წყალსაცავების ადგილმდებარეობა (რაიონის დასახელება)	საპროექტო		სასარგებლო მოცულობა მლნ კმმ
			სრული მოცულობა მლნ კმმ	სასარგებლო მოცულობა მლნ კმმ	
1	სიონი	თიანეთი	325,0	315,0	2,23
2	თბილისი	თბილისი	308,0	155,0	58,57
3	ალგეთი	თეთრიწყარო	65,0	60,0	2,0
4	მარაბდა	თეთრიწყარო	1,20	1,20	1,20
5	ასურეთი	თეთრიწყარო	0,91	0,91	-
6	ბორბალო	თეთრიწყარო	0,10	0,06	-
7	ლიპი	თეთრიწყარო	2,20	2,00	1,8
8	კუმისი	გარდაბანი	11,00	7,67	7,67
9	თიანეთი	ადიგენი	0,30	0,30	0,20
10	ზონკარი	ცხინვალი	40,3	39,0	-
11	ხეთაგური	ცხინვალი	0,50	0,50	-
12	ნადარბაზ ევი	გორი	7,20	6,20	-
13	იაკუბლო	დმანისი	11,00	10,20	2,6
14	პანტიანი	დმანისი	5,30	5,20	2,1
15	ჯანდარა	გარდაბანი	54,28	25,06	7,8
16	ნარეკვავი	დუშეთი	6,80	5,60	3,33
17	დალის მთა	დედოფლისწყარო	180,0	140,0	2,1

გამომცემლობა ინდ. მეწარმე გოჩა დალაქიშვილი  
**E- mail : [gochadalakishvili@yahoo.com](mailto:gochadalakishvili@yahoo.com)**



ოთარ ნათიშვილი – ტაქნიკის მენეჯერებათა  
 დოქტორი, პროფესორი, საქართველოს  
 მენეჯერებათა ეროვნული აკადემიის  
 აკადემიკოსი, 200 – ზე მეტი სამეცნიერო  
 ნაშრომის ავტორი ლიკონოგრაფიული პროცესების  
 პრობლემატიკასა და გუნდური რესურსების  
 დასვაში



დავით გუგუჩია – ტაქნიკის მენეჯერებათა  
 დოქტორი, პროფესორი, ეკოლოგიის  
 და გუნდატსაკავალონის სპერტაშორისო  
 აკადემიის აკადემიკოსი – 166 სამეცნიერო  
 ნაშრომის ავტორი – კალანოტური პროცესების  
 რეპულირებასა და გუნდური რესურსების  
 დასვაში



ნინო აკრობია – ტაქნიკის მენეჯერებათა  
 კანდიდატი 16 სამეცნიერო ნაშრომის ავტორი  
 წყლისშიერი პრობიული პროცესების საკითხებზე

ISBN 978-9941-8-2357-2

