ზ. გედენიძე, თ. ამბროლაძე

წ ყ ლ ი ს მ ე უ რ ნ ე ო ბ ა

თბილისი
2009

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ზ. გედენიძე, თ. ამბროლაძე

წყლის მეურნეობა

დამხმარე სახელმძღვანელო

დამტკიცებულია სტუ-ს
სარედაქციო-საგამომცემლო
საბჭოს მიერ

გამომცემლობა „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2009

დამხმარე სახელმძღვანელო „წყლის მეურნეობა“ შედგენილია ანალოგის გარეშე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდროტექნიკური მშენებლობის უმაღლესი პროფესიული სწავლების სტუდენტებისათვის და სამხედრო საინჟინრო აკადემიის მსმენელებისათვის იმ პროგრამის სრული შესაბამისობით, რომელიც განხილული და დამტკიცებული იქნა სამხედრო საინჟინრო აკადემიის მეთოდური საბჭოს კომისიის სხდომაზე. მისი გამოყენება გარკვეულ დახმარებას გაუწევს ჰიდროინჟინერიის და სხვა მონათესავე სპეციალობების ბაკალავრიატის სტუდენტებსაც.

დამხმარე სახელმძღვანელოში მოცემულია ძირითადი თეორიული და პრაქტიკული საკითხები ისეთი სპეციალური დისციპლინების, როგორიცაა: ჰიდრავლიკის საფუძვლები, ჰიდროლოგია, ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, საინჟინრო მელიორაცია, ჰიდროელექტროსადგურები სანაოსნო გზები და ნავსადგურები, წყალმომარაგების ქსელები და სისტემები. შედარებით ფართოდაა გაშუქებული სხვადასხვა დანიშნულების წყალსამეურნეო კვანძების, ნაგებობებისა და მოწყობილობა–დანადგარების ტექნიკური ექსპლუატაციის საკითხები, როგორც ნორმალურ საექსპლუატაციო, აგრეთვე განსაკუთრებულ პირობებში. სპეციფიკიდან გამომდინარე საგნის შინაარსი არ აცხადებს პრეტენზიას განსახილველი საკითხების დეტალურ ასახვაზე, რომელიც წარმოადგენს სპეციალური ლიტერატურის პრეროგატივას.

რეცენზენტი, ტექ. მეცნ. დოქტორი, პროფესორი ბ. ხელიძე

სარჩევი

საგნის შინაარსი და ამოცანები.
მოკლე ისტორიული მიმოხილვა 11

I განყოფილება.
ჰიდრავლიკის საფუძვლები

I თავი. შესავალი 22

1.1.1. ჰიდრავლიკის საგანი 22
1.1.2. სითხის ძირითადი ფიზიკური თვისებები . . 23

II თავი. ჰიდროსტატიკა 28

1.2.1. ჰიდროსტატიკური წნევა და მისი თვისებები 28
1.2.2. სითხის წონასწორობის დიფერენციალური განტოლებები (ეილერის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა) 31
1.2.3. თანაბარი წნევის ზედაპირი 33
1.2.4. ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება . . . 34
1.2.5. წერტილში ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდის საანგარიშო ფორმულები 35
1.2.6. ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურები 37
1.2.7. ჰიდროსტატიკური წნევის ძალა ნებისმიერად ორიენტირებულ სიბტყეზე. წნევის ცენტრი 40
1.2.8. წნევის ძალა მრუდწირულ ზედაპირზე 44

III თავი. ჰიდროდინამიკის საფუძვლები 47

1.3.1 ჰიდროდინამიკის ძირითადი ამოცანები. სითხის მოძრაობის კლასიფიკაცია 47
1.3.2. დენის წირი, დენის მილაკი, ელემენტარული ჭავლი, სითხის ნაკადი 49
1.3.3. ნაკადის უწყვეტობის განტოლება 54
1.3.4. იდეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები, ეილერის განტოლებათა სისტემა მოძრაობისათვის 54

1.3.5. ბერნულის განტოლება იდეალური სითხის ელემენტერული ჭავლისათვის 56
1.3.6. ბერნულის განტოლების გეომეტრიული და ენერგეტიკული არსი 58
1.3.7. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის 60
1.3.8. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის დამყარებული ნაკადისათვის 61
1.3.9. სითხის თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლება 64
1.3.10. სითხის მოძრაობის ორი რეჟიმი 67
1.3.11. სითხის მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი. სიჩქარისა და მხები ძაბვების განაწილება ლამინარულ ნაკადში. დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგები ლამინარული მოძრაობის დროს 72
1.1.3.12. სითხის მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმი 76
1.3.12.1. სიჩქარის პულსაცია, გასაშუალებული სიჩქარე. ლამინარული ქვეშრე, ჰიდრავლიკურად გლუვი და ხორკლიანი ზედაპირები 76
1.3.12.2. დამატებითი მხები ძაბვების წარმოქმნა ტურბულენტურ ნაკადში. სიჩქარის განაწილება ტურბულენტურ ნაკადში 81
1.3.12.3. სიგრძეზე ენერგიის ანუ დაწნევის დანაკარგები ტურბულენტურ ნაკადში . . . 85
1.3.12.4. საშუალო სიჩქარის საანგარიშო შეზის ფორმულა. შეზის კოეფიციენტების საანგარიშო ფორმულები 89
1.3.12.5. დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგების განსაზღვრა ტურბულენტური მოძრაობის დროს 91
1.3.12.6. სისტემის წინაღობის კოეფიციენტი 92

IV თავი. სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან 94

1.4.1. გამოდინება თხელკედლიანი მცირე ხვრეტებიდან მუდმივი დაწნევისას 94

1.4.2. სითხის გამოდინება ნაცმებიდან 98

V თავი. სითხის დამყარებული მოძრაობა მილსადენებში 102

1.5.1. მილსადენების კლასიფიკაცია 102
1.5.2. მარტივი გრძელი მილსადენების გაანგარიშება 104
1.5.3. მიმდევრობით შეერთებული მილსადენების გაანგარიშება 107
1.5.4. პარალელურად შეერთებული მილსადენების გაანგარიშება 108
1.5.5. მილსადენების გაანგარიშება მოძრაობის გზაზე ხარჯის უწყვეტი გაცემის დროს 110
1.5.6. სითხის დაუმყარებელი მოძრაობა მილსადენებში. ჰიდრავლიკური დარტყმა . . . 112

VI თავი. მიწისქვეშა წყლის მოძრაობა 117

1.6.1. ფილტრაციის კლასიფიკაცია 117
1.6.2. ლამინარული ფილტრაციის ძირითადი კანონი 119
1.6.3. ფილტრაციის კოეფიციენტის განსაზღვრა . 120

VII თავი. წყალსაშვები 123

1.7.1. წყალსაშვების კლასიფიკაცია და მათი საანგარიშო ფორმულები 123

II განყოფილება.
მდინარეების და წყალსაცავების ჰიდროლოგიური მახასიათებლები

I თავი. ზოგადი ჰიდროლოგია 131

2.1.1. წყალბრუნვა ბუნებაში. წყლის ბალანსის განტოლება 131
2.1.2. ჰაერის ტენიანობა 133
2.1.3. ნალექები. აორთქლება 134

II თავი. მდინარეები 138

2.2.1. მდინარის ქსელი. წყალშემკრები აუზი . . . 138
2.2.2. მდინარის ხეობა. მდინარის გრძივი პროფილი 141
2.2.3. მდინარის ნაკადის კინემატიკური თავისებურებანი 144
2.2.4. მდინარეთა კვება. მდინარის რეჟიმი. წყლის დონის ცვალებადობა 146
2.2.5. მდინარის ჩამონადენის მახასიათებელი ელემენტები 150

III თავი. ჰიდროლოგიური გაანგარიშებები 154

2.3.1. მდინარის ჩამონადენის ძირითადი სტატისტიკური მახასიათებლების განსაზღვრა . . . 154
2.3.2. კორელაცია 158
2.3.3. უზრუნველყოფის მრუდების გამოყენება ჰიდროლოგიაში 160
2.3.4. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება დაკვირვებათა საკმარისი მწკრივის არებობის შემთხვევაში 167
2.3.5. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრულ არარსებობის შემთხვევაში . 173
2.3.6. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება 177
2.3.6.1. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრულ დაკვირვებათა შედეგების არსებობის შემთხვევაში 177
2.3.6.2. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრულ დაკვირვებათა არარსებობის შემთხვევაში 179

IV თავი. წყალსატევები 181

2.4.1. ზოგადი ცნობები 181
2.4.2. წყალსაცავების სახეობანი და მათი მახასიათებლები 190
2.4.3. წყალსაცავში მეწყერული და სეისმოგენური ტალღების სიმაღლის პროგნოზირება 195

III განყოფილება
ჰიდროტექნიკური ნაგებობები

I თავი. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები საერთო ცნობები ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებსა და ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა კვანძებზე 203

3.1.1. ჰიდროტექნიკა, ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, მათი თავისებურებანი და მუშაობის პრინციპები 203
3.1.2. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სახეობანი და კვანძები 207
3.1.3. კაშხლები და მათზე მოქმედი დატვირთვები 214
3.1.4. წყალსაგდებ და წყალმიმღებ ნაგებობათა ტიპები და კვანძები 225
3.1.4.ა) წყალსაგდები ნაგებობები 226
3.1.4.ბ) წყალჩამშვები ნაგებობები 236
3.1.4. გ) წყალმიმღები ნაგებობები 239
3.1.5 ზოგადი ცნობები ჰიდროტექნიკურ არხებსა და გვირაბებზე 248
3.1.5. ა) არხები და მათზე მოთავსებული ნაგებობები 248
3.1.5. ბ) ჰიდროტექნიკური გვირაბები 256

II თავი. ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის და მდგრადობის ზოგადი პირობები 260

3.2.1. ძირითადი დებულებები და ცნობები 260
3.2.2. ბეტონის გრავიტაციული კაშხლები 266
3.2.3. თაღოვანი კაშხლები 280
3.2.4. კონტრფორსული კაშხლები 289
3.2.5. ბეტონის და რკინაბეტონის კაშხლების სიმტკიცის პირობების ანალიზი და მისი დარღვევის ეფექტური მეთოდების შემუშავება განსაკუთრებულ შემთხვევებში . 297

III თავი. ადგილობრივი მასალების კაშხლების დაპროექტების ზოგადი საკითხები ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ექსპლუატაცია 299

3.3.1. გრუნტის მასალის კაშხლები 299
3.3.2. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ტექნიკური ექსპლუატაცია და გამოკვლევა 310
3.3.3. გრუნტის კაშხლებიან ჰიდროკვანძებზე ჩასატარებელი ღონისძიებები განსაკუთრებული პირობებისათვის 314

IV განყოფილება. ჰიდროელექტროსადგურები, ნაგებობათა შედგენილობა და ტიპები

4.1. ზოგადი ცნობები 316
4.2. წყლის ენერგიის გამოყენების სქემები და ნაგებობათა შეთანწყობა 318
4.3. ჰესების სიმძლავრე და ენერგია 324
4.4. ჰიდრავლიკური ტურბინების მოქმედების პრინციპები და მათი კლასიფიკაცია 327
4.5. ჰესების ტურბინების ავტომატური რეგულირება 332
4.6. ჰიდროაგრეგატების ექსპლუატაცია ნორმალურ და განსაკუთრებულ შემთხვევებში . . . 335

V განყოფილება ჰიდროტექნიკური ნაგებობები მელიორაციულ სისტემაში

5.1. მორწყვითი მელიორაციის ზოგადი საკითხები 340
5.2. მდინარიდან წყლის აღება და მისი გამოყენება სარწყავად 344
5.3. სარწყავი სისტემის ექსპლუატაციის საკითხები, ნორმალურ და განსაკუთრებულ შემთხვევებში 350

VI განყოფილება
სანაოსნო გზები და ნავსადგურები

6.1. წყლის ტრანსპორტის როლი საერთო სატრანსპორტო სისტემაში 353
6.2. მდინარის სანაოსნოდ მომზადებისა და სანაოსნო პირობების გაუმჯობესების პირობები 357
6.3. ნავსადგურები 364

VII განყოფილება.
წყალმომარაგების სისტემები და ნაგებობები

7.1. ზოგადი ცნობები 372
7.2. ძირითადი ნაგებობები და მოწყობილობები . 381
7.3. სამხედრო დანაყოფების დროებითი წყალმომარაგების სისტემები საველე პირობებში . 383
7.4. წყლის გაუსნებოვნება და გაუვნებლობა . . . 385
7.5. მილსადენების გამოცდა და ტექნიკური ექსპლუატაცია 386

ლიტერატურა 391

საგნის შინაარსი და ამოცანები. მოკლე ისტორიული მიმოხილვა

დედამიწის ზედაპირის საერთო ფართობი 510 მილიონ (მლნ) კმ^2 შეადგენს, რომლიდანაც 361 მლნ.კმ^2 (71%) ოკეანეებსა და ზღვებს უკავია, ხოლო დანარჩენი 149 მლნ.კმ^2 კი ხმელეთს. წყლის საერთო მარაგი დედამიწაზე პრაქტიკულად უცვლელია და შეადგენს ≈1388 მლნ.კმ^3, რომლის ~97,5% უკავია მარილიან წყალს (მსოფლიო ოკეანე, მლაშე ტბები და ჭაობები), ხოლო დანარჩენი 2,5% (35 მლნ.კმ^3) მტკნარ წყალს. მტკნარი წყალი ბუნებაში ძირითადად არსებობს ყინულის (არქტიკა, ანტარქტიკა, გრენლანდია, ხმელეთის მყინვარები), მდინარის ჩამონადენის და მიწისქვეშა წყლების სახით, რომელთა სრულად გამოყენება გარკვეულ ტექნიკურ სიძნელეებთანაა დაკავშირებული. ამჟამად მოხმარებისათვის მისაწვდომი მტკნარი წყლის მოცულობა შეადგენს წყლის მსოფლიო მარაგის მხოლოდ 0,3%-ს (4,16 მლნ.კმ^3). ადამიანთა სამეურნეო საქმიანობაში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება მდინარეთა ჩამონადენს, რომლის მსოფლიო საშუალოწლიური რაოდენობა 38830 კმ^3-ა. შაქართველო, რომლის საერთო ზედაპირის ფართობი ≈69,5 ათ.კმ^2-ია, წყლის რესურსებით მდიდარი ქვეყნების კატეგორიას მიეკუთვნება, რომლის მდინარეთა ჩამონადენი საშუალოდ 66,3 კმ^3-ს შეადგენს. მდინარის ჩამონადენი,

ისე როგორც წყლის საერთო მარაგი, დედამიწის ზედაპირზე ტერიტორიულად და დროში განაწილებულია არათანაბრად, რომელიც არ შეესაბამება წყალმომხმარებელთა მოთხოვნებს. საქართველოში მდინარის წყლების ჩამონადენის 75,1% მოდის დასავლეთზე, ხოლო 24,9% - აღმოსავლეთზე, ჩამონადენის უდიდესი ნაწილი (75-80%) ემთხვევა წყალდიდობის მოკლე პერიოდს (1. . . . 3 თვე). მდინარის ბუნებრივი ჩამონადენის ხელოვნურად გადანაწილება დროში და სივრცეში, წყალმომხმარებლის მოთხოვნათა შესაბამისად, მიიღწევა სპეციალური საინჟინრო ღონისძიებებების განხორციელებით.

ეროვნული მეურნეობის იმ დარგს, რომელიც შეისწავლის ქვეყნის წყლის რესურსების აღრიცხვას, რეგულირებას, განაწილებისა და გამოყენების საკითხებს ეწოდება წყლის მეურნეობა. წყლის მეურნეობის დარგებია: ჰიდროენერგეტიკა, წყლის ტრანსპორტი, ჰიდრომელიორაცია, წყალმომარაგება და წყალარინება, წყლის წიაღისეულის მოპოვება, წყლის დაბინძურებისაგან დაცვა და სხვა.

1. ჰიდროენერგეტიკა – წყლის რესურსების ენერგიის გამოყენება;
2. წყლის ტრანსპორტი – მდინარეების, ტბებისა და ზღვების გამოყენება სანაოსნოდ, კერძოდ მგზავრებისა და ტვირთების გადასაზიდად;
3. ჰიდრომელიორაცია – ტერიტორიის არახელსაყრელი ბუნებრივი პირობების გაუმჯობესება, კერძოდ: მშრა-

ლი ნიადაგის დამატებითი გატენიანება (ირიგაცია); ნიადაგიდან ზედმეტი ტენის მოცილება (დაშრობა);

4. წყალმომარაგება და წყალარინება – დასახლებული ადგილების, სამრეწველო, სატრანსპორტო და სხვა ობიექტების სასმელი და ტექნიკური წყლით უზრუნველყოფა (წყალმომარაგება), აღნიშნული ადგილებიდან ჩამონადენი და დამუშავებული წყლების გაყვანა და გაწმენდა (წყალარინება);

5. წყლის წიაღისეული სიმდიდრეების გამოყენება – თევზის მეურნეობა, წყლიდან მადნეულის, მარილების, სასარგებლო მცენარეულის მოპოვება, ზღვის ცხოველებზე ნადირობა და სხვა.

6. თავდაცვა - წყლის ზღუდეების შექმნა, ადგილმდებარეობის დროებითი დატბორვა, მძაფრი დინამიკური ნაკადების აღძვრა და სხვა. გარდა აღნიშნულისა წყლის მეურნეობაში შედის მისი გამოყენება სპორტული ღონისძიებებისათვის, დასვენებისათვის მის დამანგრეველ მოქმედებათა (წყალდიდობა, შტორმი, მოქცევა და სხვა) წინააღმდეგ ბრძოლა,

7. წყლის დაბინძურებისაგან დაცვა – გამწმენდი ნაგებობების მოწყობა.

წყლის მეურნეობის დარგები თვისობრივად სხვადასხვაგვარად გამოიყენებენ წყლის რესურსებს: წყალმომხმარებლები (წყალმომარაგება, ირიგაცია, თავდაცვა) მთლიანად მოიხმარენ წყალს და ზოგჯერ შედარებით ცოტას უბრუნებენ პირველწყაროს, წყალმოსარგებლე დარგები კი გამოიყენებენ მას და თითქმის მთლიანად უბრუნებენ პირველწყაროს (ჰიდროენერგეტიკა, წყლის ტრანსპორტი, წყლის წიაღისეულის დამუშავება და ზოგჯერ თავდაცვა). როგორც ვხედავთ წყლის მეურნეობის

დარგები მეტად მრავალფეროვანია, ხოლო მისი ამოცანები საკმაოდ რთული და ინდივიდუალური, ამიტომ წყალსამეურნეო ობიექტების დაპროექტება, მშენებლობა, ექსპლუატაცია და რემონტი მოითხოვს დიდი პასუხისმგებლობით მაღალკვალიფიციური სპეციალისტების შემოქმედებით მიდგომას.

წყალთა მეურნეობის ორგანიზაციის რაციონალური პრინციპია წყლის რესურსების კომპლექსური გამოყენება, რაც გულისხმობს მის გამოყენებას ყველა შესაძლო და ეკონომიკურად დასაბუთებული მიზნებისათვის. საქართველოში წყლის რესურსების კომპლექსური გამოყენების კარგი მაგალითია ჟინვალის ჰიდროკვანძი მდ. არაგვზე, რომელიც ემსახურება, როგორც ენერგეტიკას, აგრეთვე წყალმომარაგებასა და ირიგაციას.

ადამიანთა წყალსამეურნეო საქმიანობას ხანგრძლივი ისტორია აქვს. კაცობრიობისათვის წყლის სასიცოცხლო მნიშვნელობის გამო ხალხი თავიდანვე სახლდებოდა მდინარეების, ტბებისა და ზღვების ნაპირებზე, რომელთაც გარდა უშუალო საყოფაცხოვრებო დანიშნულებისა, მეზობელ ხალხთან ურთიერთ კავშირის დამყარების ფუნქციაც ეკისრებოდა. ჩინეთში კაშხლებსა და არხებს აშენებდნენ რამდენიმე ათასი წლის წინათ ჩვენს წელთაღრიცხვამდე. დიდ სარწყავ და სანაოსნო არხებს აშენებდნენ აგრეთვე ასირიელები და ბაბილონელები ათასხუთასი წლის წინათ ჩვენს წელთაღრიცხვამდე. დი-

ნარის წყლის ენერგიის გამოყენება პირველად დაიწყო წყლის წისქვილების მოძრაობაში მოსაყვანად ჩინეთსა და შუა აზიაში, შემდეგ კი გავრცელდა სხვა ქვეყნებშიც.

ადამიანის წყალსამეურნეო საქმიანობის მრავალმა ნიმუშმა ჩვენამდეც მოაღწია. დაახლოებით 5000 წლის ისტორია აქვს კოშეინის ქვის კაშხალს ეგვიპტეში (სიმაღლე 15 მ, სიგრძე 450 მ), ამავე პერიოდისაა ქვის წყობის ჭები, რომლებიც გალერეებით იყო შეერთებული მდ. ნილოსთან. რომის სახელმწიფოს არსებობის დროს VI-III საუკუნეებში ჩვენს წელთაღრიცხვამდე, აშენდა წყალსადენის გრანდიოზული სისტემები აკვედუკების ფართო გამოყენებით, რომლებიც დღესაც კი იწვევენ გაოცებას. ცნობილია, რომ რუსეთის ერთიანი სახელმწიფოს შექმნამდე სლავები აწარმოებდნენ დაკვირვებებს მდინარეების დონეებზე.

ქართველ ხალხთა წყალსამეურნეო საქმიანობის ამსახველ მასალებს ვხდებით ძველ ლიტერატურულ წაყროებში. მაგალითად: პლინიუსი (23-79 წწ.) მდ. ფაზისის (რიონი) შესახებ წერს, რომ „... იგი სანაოსნოა დიდი გემებისათვის ... პატარა გემებით ასვლა შეიძლება უფრო ზევითაც. ფაზისზე აშენებულია 120 ხიდი“.; ცნობილი ქართველი მეცნიერის ვახუშტი ბატონიშვილის ნაშრომში „აღწერა სამეფოსი საქართველოსი“ ნათქვამია „შოლის პირიდან გაიტანა მეფემან ვახტანგ რუ, რამეთუ იყო მინდორი ესე უწყლო, და ჰყო წისქვილი, და სმენ პირუ-

ტყვნი“.

საქართველოში უძველესი დროიდან არებობდა წაყროს წყლების ბაზაზე შექმნილი მრავალი, უმეტესად თვითდენითი, წყალსადენი. წყალსადენის ნაგებობებს აშენებდნენ არა მარტო საყოფაცხოვრებო მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, არამედ სტრატეგიული თვალსაზრისითაც. საქართველოში თითქმის არ არის არც ერთი ციხე-სიმაგრე და მონასტერი, რომელსაც არ ჰქონდა ინდივიდუალური წყალმომარაგების სისტემა.

ჩვენს წელთაღრიცხვამდე მეორე საუკუნეს მიეკუთვნება გოხნარის, ბედენის, ჭოვჭავის და სხვა ციკლოპური ქალაქების წყალსადენები. დაახლოებით ამავე ასაკისაა მცხეთის, ბაგინეთ-არმაზის 3 კმ სიგრძის წყალსადენი. ნოქალაქევის ციხის ანუ ციხეგოჯის წყალმომარაგებისათვის გაყვანილი საიდუმლო გვირაბი ძველი და ახალი, საუკუნეების მიჯნაზე აშენდა გონიოს ციხის წყალსადენი.

თამარ მეფის საზაფხულო რეზიდენციაში, ნადარბაზევში, მოწყობილი იყო 6 კმ სიგრძის თვითდენითწნევიანი წყალსადენი. უძველეს წყალსადენებში დაწნევითი მილსადენები წარმოადგენენ კარგად გამომწვარი თიხის მილებს, რომელთაც ქონდათ 6 სმ სისქის დუღაბის საფარი. მეტად მნიშვნელოვანია კლდეში გამოკვეთილი ქალაქ ვარძიის წყალსადენი, რომლის ასაგებად გამოყენებულია უნიკალური ხერხები და ზუსტი გაან-

გარიშებები. გაკვირვებას იწვევს მცირე ზომის რეზერვუარი, რომელშიც წყლის დონე არ იცვლება ხარჯის ცვალებადობის მიუხედავად. ჰიდრომშენებლობის გამორჩეულ ნიმუშად მიიჩნევენ XII საუკუნის ალაზნისა (199 კმ) და სამგორის (20 კმ) სარწყავ არხებს.

მსოფლიოში წყალსამეურნეო მშენებლობის დაჩქარებული წინსვლა აღინიშნება XIX საუკუნის ბოლოს და XX საუკუნის მთელ პერიოდში. შენდება საინჟინრო თვალსაზრისით სრულყოფილი სხვადასხვა წყალსამეურნეო დანიშნულების უნიკალური ჰიდროკვანძები. შაქართველოს მდინარეთა ჰიოდროენერგეტიკული პოტენციალის ათვისებამ გასული საუკუნის 80-იან წლებიდან მიიპყრო, როგორც ქართველი საზოგადო მოღვაწეების (ი. ჭავჭავაძე, ნ. ნიკოლაძე, და სხვა), ისე რუსი და სხვა უცხოელი ინჟინრების ყურადღება. საქართველოში აგებული იქნა მცირე სიმძლავრის მხოლოდ რამდენიმე ჰიდროელექტროსადგური: ბორჯომის (აიგო 1898-1903 წწ), ახალი-ათონის (1902-1913 წწ.), გაგრის (1904 წ.), სოხუმის (1908-1909 წწ.), ბიჭვინთის (1913 წ.), ბოლნისის (1913 წ.), ახალქალაქის (1914 წ.) და სხვა. სულ მოქმედი ჰიდროელექტროსადგურების საერთო სიმძლავრე 1913 წლისათვის შეადგენდა დაახლოებით 1,3 ათ.კვტ-ს.

თბილისის წყალმომარაგებისათვის უძველესი დროიდან გამოიყენებოდა ქალაქის ტერიტორიაზე არსებული

წყაროები და ხევის წყლები. ერთიანი წყალსადენის მოწყობა მაშინდელ პირობებში არ ხერხდებოდა.

თბილისის წყალმომარაგების სისტემის დაარსების თარიღად შეიძლება ჩაითვალოს 1862 წლი, როდესაც აშენდა ე.წ. „ყორღანოვის წყალსადენი“, რომელსაც ქონდა წყალმომარაგების ცენტრალური სისტემისათვის დამახასიათებელი ელემენტები: წყალმიმღები ნაგებობა, რეზერვუარები და გამანაწილებელი ქსელი. ამასთან ქალაქის სათათბიროში არსებობდა ამ მეურნეობის ხელმძღვანელი ორგანო. 1929 წელს დაიწყო ნატახტარის წყალსადენის მშენებლობა, მშენებლობას ახორციელებდა სამშენებლო ორგანიზაცია „ნატახტარმშენი“. პირველი რიგის სამუშაოები დასრულდა 1933 წელს, ხოლო მეორე რიგისა 1936 წელს. წყალმიმღები ნაგებობა წარმოადგენდა 28 მუშა ჭაბურღილს. თითოეული ჭაბურღილი იძლეოდა დაახლოებით 40-45 ლ/წმ-ში წყალს. დღეისათვის თბილისის წყალმომარაგების სისტემა მოიცავს 5 სათავე-ნაგებობას: ნატახტარის, ბულაჩაურის, საგურამოს, ჭოპორტის და მუხრანის; მიწისქვეშა წყლის ხელოვნურად გამდიდრების მიზნით 600 000 $მ^2$ ფართზე მოწყობილ საინფილტრაციო აუზებს, თბილისის ზღვის ბაზაზე არსებული სამგორისა და ღრმაღელის წყალსადენები დაახლოებით 3 000 კმ სიგრძის მაგისტრალური და გამანაწილებელი ქსელით, რომელთა გამტარუნარიანობა შეადგენს 21 $მ^3$/წმ-ში

საქართველოში შედარებით მძლავრი ჰიდროელექტროსადგურის მშენებლობა, მდ. მტკვარზე დაიწყო 1922 წელს ზემოავჭალის ჰიდროელექტროსადგურის (ზაჰესი) სახით და ექსპლუატაციაში შევიდა 1927 წელს. 1928 წელს მდ. რიონზე დაიწყო II სარაიონო მნიშვნელობის ჰიდროელექტროსადგურის – რიონჰესის მშენებლობა, რომლის სიმძლავრე იყო 48 ათ.კვტ. და დამთავრდა 1933 წელს. სულ ომამდე საქართველოში დასრულდა 5 ჰიდროელექტროსადგურის მშენებლობა: ზაჰესი (1927 წ), აბჰესი (1928 წ), რიონჰესი (1933 წ), აწჰესი (1937 წ) და ალაზანჰესი (1939 წ).

დიდი სამამულო ომის შემდეგ მწყობრში ჩადგა ხრამჰეს-1 (1947 წ), სოხუმჰესი (1948 წ), ჩითახევჰესი (1949 წ), ორთაჭალჰესი (1954 წ), შაორჰესი (1955 წ.), იგოეთჰესი (1955 წ.), ბუუჯაჰესი (1956 წ.), გუმათჰესი II (1956 წ.), ტყიბულჰესი (1956 წ.), გუმათჰესი I (1958 წ.), ლაჯანურჰესი (1959 წ.), ტირიფონჰესი (1961 წ.) და ხრამჰესი II (1963 წ.). ფართოდ გიშალა სარწყავი სისტემების მშენებლობა. 1930 წელს მწყობრში ჩადგა ტირიფონის სარწყავი სისტემა, რომელიც 280500 ჰა ფართობს რწყავდა. 1931 წელს დამთავრდა ქვემო ალაზნის სარწყავი სისტემა (ირწყვებოდა 29 000 ჰა მიწები). რესპუბლიკისათვის დიდი მნიშვნელობა ჰქონდა ზემო სამგორის სარწყავი სისტემის ნაგებობათა მშენებლობის დამთავრებას 1951 წლის 4 ნოემბერს, რითაც გადაწყდა კომპლექსური ამოცანა მდ.

იორის წყლის გამოყენებისა ერთდროულად სამგორის გვალვიანი მიწების მორწყვისათვის და ენერგეტიკული მიზნებისათვის. ამუშავდა საშუალო სიმძლავრის სამი ჰიდროელექტროსადგური, რომლებიც განლაგებულია სამგორის ზემო მაგისტრალურ არხზე: საცხენისჰესი, მარტყოფჰესი და თეთრიხევჰესი. მოგვიანებით მწყობრში ჩადგა ამ სისტემის მეოთხე ჰიდროელექტროსადგური – სიონჰესი, რომელიც ექსპლუატაციაში შევიდა სიონის მარეგულირებელ წყალსაცავთან ერთად. ეს წყალსაცავი შეიქმნა 82 მ სიმაღლის მიწის კაშხლით, რომელიც იმ დროისათვის ყველაზე მაღალი იყო საბჭო-თა კავშირში.

1955 წელს აშენდა ტაშისკარის სარწყავი სისტემა, იგი მტკვრის წყლით რწყავდა 10 500 ჰა ფართობს. 1962 წელს დამთავრდა ზემო ალაზნის სარწყავი სისტემა, რომელიც 41 000 ჰა ფართობს აწყლოვანებდა. 1971 წელს მწყობრში ჩადგა ქვემო სამგორის სარწყავი სისტემა, რომელიც რწყავდა 37 900 ჰა მიწის ფართობს.

უკანასკნელ წლებში საქართველოს საერთო საკავშირო ენერგოსისტემაში ყოფნის პერიოდში აიგო: მდ. ნგურზე მაღალდაწნევიანი ენგურის ჰიდროელექტროსადგური, მსოფლიოში რეკორდული სიმაღლის თაღოვანი კაშხლით (H=271,5 მ) და ოთხი კაშხალთან მდებარე ვარდნილჰესებით, რომელთა საერთო სიმძლავრე 1600 ათ. კვტ-ია; მდ. რიონზე ოთხსაფეხურიანი ვარციხე ჰესი, საერთო სიმძლავრით 170 ათ.კვტ; მდ. არაგვზე კომპ-

ლექსური დანიშნულების ჟინვალი ჰესი, დადგმული სიმძლავრით 130 ათ.კვტ. მშენებლობის პერიოდშია რამოდენიმე მცირე და საშუალო სიმძლავრის ჰიდროელექტროსადგური მათ შორის ხადორი ჰესი მდ. ალაზანზე 24 ათ.კვტ სიმძლავრით; ბახვი ჰესი მდ. ბახვისწყალზე 16 ათ.კვტ სიმძლავრით. ნაწილი ჰიდროელექტროსადგურებისა დღეს ლიკვიდირებულია ან ფიზიკური მოძველების გამო დაკარგული აქვს სიმძლავრის გარკვეული პროცენტი. ამჟამად კვლავ დღის წესრიგში დგას ქვეყნის ენერგეტიკული ბალანსის შევსება ახალი გენერაციის ობიექტების მშენებლობის ბაზაზე.

მშენებლობისა და პროექტირების სტადიაშია შავი ზღვის ნავსადგურების რეკონსტრუქციის საკითხები, აგრეთვე ახალი ნავსადგურების მშენებლობა – სუფსის ტერმინალი, ანაკლიას და გონიოს ნავსადგურები და სხვა.

I განყოფილება.
ჰიდრავლიკის საფუძვლები

I თავი. შესავალი

1.1.1. ჰიდრავლიკის საგანი

ტერმინი ჰიდრავლიკა შედგება ორი ბერძნული სიტყვისაგან: hydor – წყალი და aulos – მილი. რაც ისტორიულ წარსულში ნიშნავდა მილებში წყლის მოძრაობის სწავლებას. თანამედროვე გაგებით, ჰიდრავლიკა არის ტექნიკური (გამოყენებითი) მეცნიერება, რომელიც შეისწავლის სითხეების წონასწორობის პირობებს და მოძრაობის კანონზომიერებებს, მყარი სხეულებისა და სითხეების ურთიერთქმედებებს და შეიმუშავებს ამ კანონზომიერებების საინჟინრო პრაქტიკაში გამოყენების მეთოდებს.

სითხეების წონასწორობას, მოძრაობის კანონზომიერებებსა და სითხის და მყარი სხეულების ურთიერთქმედებას შეისწავლის აგრეთვე ჰიდრომექანიკა. იდრომექანიკა ეფუძნება მხოლოდ მკაცრ მათემატიკურ მეთოდებს, რომლებიც გვაძლევს ზოგად თეორიულ ამონახსნებს. ჰიდრავლიკა არის გამოყენებითი ჰიდრომექანიკა, რომლის კანონზომიერებებს იყენებენ უმეტესად საინჟინრო ხასიათის ამოცანების გადასაწყვეტად, რისთვისაც ჰიდრავლიკაში ფართოდ გამოიყენება მიახლოებითი მეთოდები და ექსპერიმენტული კვლევები. იშვიათად მოიძებ-

ნება ტექნიკის ისეთი დარგი, სადაც არ იყენებენ ჰიდრავლიკის კანონებს. მისი შესწავლის ობიექტია არა მარტო წყალი, არამედ ყველა სახის წვეთოვანი სითხე, რომლებიც ხასიათდება დენადობით, მაგრამ აირისაგან განსხვავებით, ძალიან მცირედ იცვლის სიმკვრივეს. მეცნიერებას, რომელიც შეისწავლის აირის წონასწორობასა და მოძრაობას, აერომექანიკა ეწოდება.

ჰიდრავლიკა შედგება ჰიდროსტატიკისა და ჰიდროდინამიკისაგან. წარმოდგენილ ნაშრომში მოცემულია ჰიდრავლიკის საფუძვლების მოკლე კურსი.

1.1.2. სითხის ძირითადი ფიზიკური თვისებები

სითხე ეწოდება ფიზიკურ სხეულს, რომელიც ვერ უწევს წინააღმდეგობას მხებ და გამჭიმავ ძალებს, რის გამოც ადვილად იცვლის ფორმას და იღებს იმ ჭურჭლის ფორმას, რომელშიც ისაა მოთავსებული. სითხე მიედინება სიმძიმის ძალის გავლენით ანუ ხასიათდება დენადობით.

ანსხვავებენ წვეთოვან (წყალი, სპირტი, ნავთობი და სხვ.) და აირისებრ ანუ არაწვეთოვან სითხეებს. წვეთოვანი სითხე ხასიათდება დენადობით და მცირე კუმშვადობით, ხოლო აირისებრი სითხე – დიდი კუმშვადობით. ჰიდრავლიკა ძირითადად შეისწავლის წვეთოვან სითხეებს.

მოკლედ გავეცნოთ იმ ძირითად ფიზიკურ თვისებებს, რომლებიც გვხვდება ჰიდრავლიკის შესწავლის პროცესში.

სითხის კუთრი ანუ მოცულობითი წონა

სითხის კუთრი ანუ მოცულობითი წონა ეწოდება სითხის წონის **G** შეფარდებას მის მოცულობასთან **W**, აღინიშნება **γ** ასოთი.

$$\gamma = \frac{G}{W}.$$

მისი განზომილება ტექნიკურ სისტემაში არის კგძ/მ^3, ხოლო Si სისტემაში ნ/მ^3.

სითხის სიმკვრივე

სითხის სიმკვრივე ეწოდება მისი მასის m შეფარდებას მოცულობასთან **W**, აღინიშნება **ρ** ასოთი.

$$\rho = \frac{m}{W},$$

მისი განზომილება ტექნიკურ სისტემაში არის კგძ.წმ^2/მ^4, ხოლო Si სისტამაში კგ/მ^3. მოცულობითი წონა და სიმკვრივე იცვლება ტემპერატურის გავლენით. მაქსიმალურ მნიშვნელობას ისინი აღწევენ 4^0C ტემპერატურაზე. გამოხდილი წყლის მოცულობითი წონა 4^0C ტემპერატურაზე ტოლია $\gamma_წ$=1კგ.ძ/სმ^3=1კგ.ძ/დმ^3=1ტ.ძ/მ^3.

სითხის კუმშვადობა და ტემპერატურული გაფართოება

სითხის კუმშვადობა ხასიათდება მოცულობითი კუმშვის β_C კოეფიციენტით. იგი გვიჩვენებს სითხის მოცულობის ფარდობით ცვლილებას წნევის ერთი ერთეულით ცვლილებისას.

$$\beta_C = \frac{1}{W}\frac{dW}{dp} \quad [მ^2/ნ] \; [მ^2/კგძ].$$

მტკნარი წყლის β_C ჩვეულებრივი ტემპერატურის შემთხვევაში (0-დან 20°-მდე), საშუალოდ ტოლია

$$\beta_C = \frac{1}{2100} \quad [სმ^2/კგძ].$$

როგორც ვხედავთ, იგი ძალიან მცირე სიდიდეა, ამიტომ წყალს და საერთოდ წვეთოვან სითხეებს პრაქტიკულად უკუმშვად სითხეებად თვლიან.

სითხის ტემპერატურული გაფართობა ხასიათდება ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტით, რომელიც გვიჩვენებს სითხის მოცულობის ფარდობით ცვლილებას ტემპერატურის 1^0C –ით გაზრდისას

$$\beta_t = \frac{1}{W}\frac{dW}{dt}\left[\frac{1}{t°C}\right].$$

სითხის სიბლანტე

სითხის სიბლანტე ერთ-ერთი მის ძირითადი თვისებაა. იგი გამოწვეულია სითხის შიგა მოლეკულური ძალებით და გამოიხატება იმაში, რომ სითხის ერთი ფენის მეორე ფენის მიმართ მოძრაობისას წარმოიქმნება ხახუნის ძალები. ამიტომ სიბლანტეს ხშირად შიგა ხახუნსაც უწოდებენ. ნიუტონის ჰიპოთეზის თანახმად, სითხის მეზობელ შრეებს შორის წარმოქმნილი ხახუნის ძალა პირდაპირპროპორციულია შრეებს შორის სიჩქარის **du** ნაზრდის და უკუპროპორციულია შრეებს შორის **dn** მანძილის

$$\mathbf{T} = \pm\mu\frac{\mathbf{du}}{\mathbf{dn}}\cdot\mathbf{S}\,.$$

S არის შრეების შეხების ფართობი, ხოლო პროპორციულობის μ კოეფიციენტს უწოდებენ სიბლანტის დინამიკურ კოეფიციენტს. მისი განზომილება ტექნიკურ სისტემაში არის კგძ.წ/მ^2, ხოლო Si სისტემაში ნ.წმ/მ^2. პრაქტიკაში ხშირად გამოიყენება სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი ν, რომელიც წარმოადგენს სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტის ფარდობას სიმკვრივესთან

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{მ}^2/\text{წმ}].$$

რეალური და იდეალური სითხეების ცნება

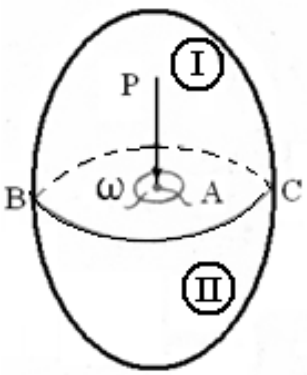
ბუნებაში არსებული ყველა სითხე, რეალური სითხეა. იგი ხასითდება სიბლანტით, პრაქტიკულად მუდმივი სიმკვრივით და მხები ძალების მიმართ მცირე წინაღობით. იდეალური სითხე არის ფაქტიური წარმოსახვითი სითხე, რომელიც აბსოლუტურად უკუმშვადია და არააქვს სიბლანტე ანუ მოძრაობის დროს შრეებს შორის არ წარმოიქმნება ხახუნის ძალა. მას ხშირად, არაბლანტ სითხესაც უწოდებენ.

კაპილარულობა

სითხის თვისებას – აიწიოს (დამსველებელი სითხე) ან დაიწიოს (არადამსველებელი სითხე) ვიწრო დიამეტრის მილებში ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების გავლენით, კაპილარულობა ეწოდება. კაპილარული აწევის სიმღალე წყლისათვის 20^0C–ტემპერატურაზე ტოლია $\mathbf{h = \frac{30}{d}}$, ხოლო დაწევის სიმაღლე ვერცხლისწყლისათვის – $\mathbf{h = \frac{10}{d}}$.

II თავი. ჰიდროსტატიკა

ჰიდროსტატიკური წნევა და მისი თვისებები



ნახ. 1.1

ჰიდროსტატიკა შეისწავლის სითხეების წონასწორობის პირობებს. იდროსტატიკაში ძირითადია ჰიდროსტატიკური წნევის ცნება, რომლის ფიზიკური არსის გასაგებად, წონასწორობაში მყოფ სითხეში გამოვყოფთ სითხის გარკვეულმოცულობას (ნახ.1.1). AB სიბრტყით ეს მოცულობა წარმოსახვით გავყოთ ორ ნაწილად და მოვაშოროთ I ნაწილი II ნაწილს. იმისათვის, რომ II ნაწილის წონასწორობა შევინარჩუნოთ, საჭიროა I ნაწილის ზემოქმედება II-ზე შევცვალოთ რაიმე ძალებით. ვთქვათ, ამ ძალებიდან AB სიბრტყეზე მდებარე ω ფართობზე მოქმედებს $\mathbf{P}$ ძალა. ამ ძალას ჰიდროსტატიკური წნევის ძალა ეწოდება, ხოლო მის შეფარდებას მოქმედების ფართობთან – საშუალო ჰიდროსტატიკური წნევა

$$\mathbf{P}_{\text{საშ}} = \frac{\mathbf{P}}{\boldsymbol{\omega}}.$$

ამ ფარდობის ზღვარს, როდესაც $\boldsymbol{\omega \to 0}$, ეწოდება ჰიდროსტატიკური წნევა წერტილში

$$\mathbf{P} = \lim_{\omega \to 0} \left(\frac{\mathbf{P}}{\omega} \right). \qquad (1.1)$$

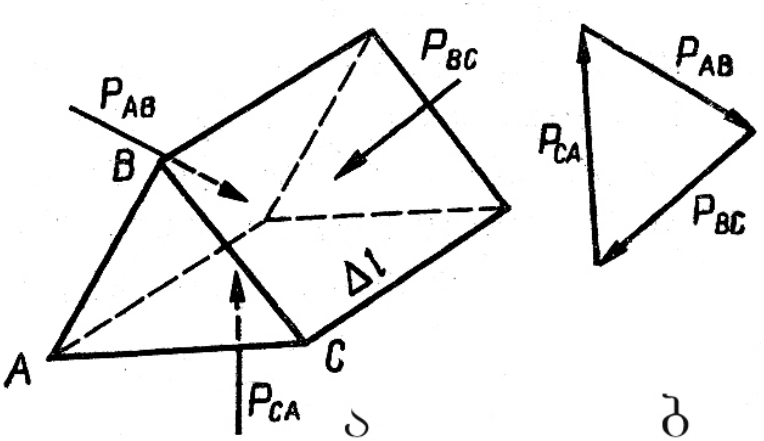
ჰიდროსტატიკური წნევის განზომლებებია ტექნიკურ სისტემაში კგძ/მ^2, ხოლო Si სისტემაში ნ/მ^2. ჰიდროსტატიკური წნევა ხასიათდება შემდეგი თვისებებით:

1. წერტილში ჰიდროსტატიკური წნევა ყოველთვის მართობულია მოქმედების ზედაპირის და აქვს შიგა ნორმალის მიმართულება. ეს თვისება გამომდინარეობს იქიდან, რომ წონასწორობაში მყოფ სითხეს არა აქვს უნარი გაუწიოს წინააღმდეგობა მხებ და გამჭიმავ ძალებს. ამ ძალებს სითხე წონასწორობიდან გამოჰყავს.

2. ნებისმიერ წერტილში ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდე არ არის დამოკიდებული მოქმედების ზედაპირის ორიენტაციაზე და ყველა მიმართულებით ერთნაირია.

ამ თვისებების დასამტკიცებლად განვიხილოთ შემდეგი მაგალითი. განსახილველ სითხეში გამოვყოთ პრიზმა, რომლის ფუძე იქნება ABC სამკუთხედი (ნახ. 1.2). გარემომცველი სითხის ზემოქმედება პრიზმის თითოეულ წახნაგზე შევცვალოთ P_{AB}, P_{BC} და P_{CA} ძალებით; რადგან პრიზმა წონასწორობაშია, ამ ძალების სამკუთხედი იქნება შეკრული (ნახ. 1.2 ბ).

ძალთა სამკუთხედი ABC სამკუთხედის მსგავსია. მსგავსებიდან გამომდინარეობს, რომ $\frac{\mathbf{P_{AB}}}{\mathbf{AB}} = \frac{\mathbf{P_{Bc}}}{\mathbf{BC}} = \frac{\mathbf{P_{CA}}}{\mathbf{CA}}$.



ნახ.1.2

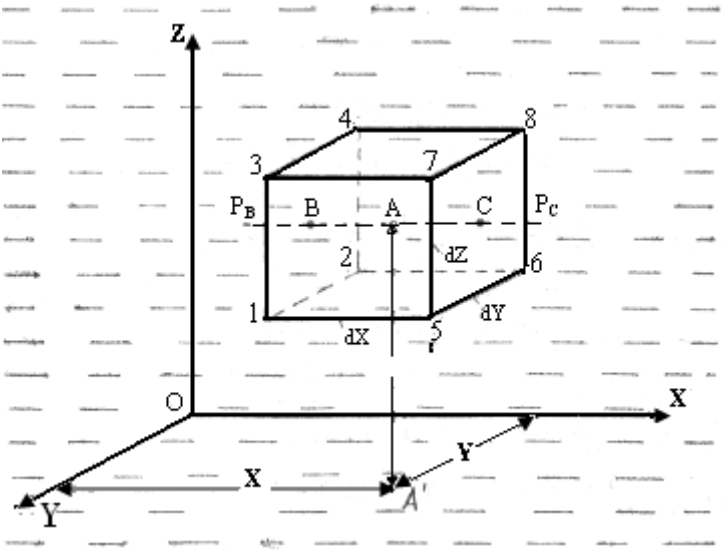
ამ გამოსახულების მნიშვნელი გავამრავლოთ პრიზმის Δl სიგრძეზე, მივიღებთ $\frac{P_{AB}}{AB\Delta l} = \frac{P_{Bc}}{BC\Delta l} = \frac{P_{CA}}{CA\Delta l}$. თუ განვიხილავთ ამ გამოსახულების ზღვარს, როდესაც AB,BC, CA და Δl ზომები მიისწრაფვის ნულისაკენ, მაშინ (1.1) გამოსახულებიდან მივიღებთ, რომ

$$P_{AB} = P_{BC} = P_{CA}.$$

პირველი ორი თვისებიდან გამომდინარეობს, რომ ჰიდროსტატიკური წნევა წერტილში დამოკიდებულია მხოლოდ წერტილის მდებარეობაზე სივრცეში.

1.2.2. სითხის წონასწორობის დიფერენციალური განტოლებები (ეილერის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა)

წონასწორობაში მყოფ სითხეში გამოვყოთ ელემენტარული პარალელეპიპედი წიბოებით **dx, dy, dt** (ნახ. 1.3).



ნახ.1.3

გამოყოფილ პარალელოპიპედზე მოქმედებს გარე ძალები ანუ გარემომცველი სითხის წნევის ძალები და შიგა, ანუ მოცულობითი ძალები, რომელთაც ხშირად, მასით ძალებს უწოდებენ. მოცულობით ძალებს მიეკუთვნება სიმძიმის ძალა და ინერციის ძალა ფარდობითი წონასწორობის დროს. გარე ძალების მოქმედებით გამო-

წვეული წნევის სიდიდე პარალელეპიპედის ცენტრში აღვნიშნოთ **P**-თი, წნევის ცვლილება **x** ღერძის გასწვრივ ერთეულ სიგრძეზე აღვნიშნოთ $\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}$-ით. მაშინ 1-2-3-4 წახნაგზე მოქმედი საშუალო ჰიდროსტატიკური წნევა იქნება $\mathbf{P} - \mathbf{05}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{dx}$, ხოლო წნევის ძალა – $\left(\mathbf{P} - \mathbf{05}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{dx}\right)\mathbf{dydx}$; ანალოგიურად, 3-4-5-6 წახნაგზე მოქმედი წნევის ძალა ტოლი იქნება $\left(\mathbf{P} + \mathbf{05}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{dx}\right)\mathbf{dydx}$.

პარალელეპიპედის ერთეულ მასაზე მოქმედი შიგა ანუ მოცულობითი ძალის ტოლქმედი აღვნიშნოთ **F**-ით, ხოლო მისი გეგმილები შესაბამის ღერძზე **Fx, Fy** და **Fz**-ით, მაშინ პარალელეპიპედის მთელ მასაზე მოქმედი შიგა ძალების გეგმილი **x** ღერძზე ტოლი იქნება $\mathbf{Fx} \cdot \boldsymbol{\rho}\mathbf{dxdydz}$.

პარალელეპიპედის წონასწორობის პირობიდან გამომდინარეობს, რომ გარე და შიგა, ანუ მოცულობითი ძალების გეგმილების ჯამი შესაბამის ღერძებზე ნულის ტოლია. **x** ღერძისთვის გვექნება

$$\left(\mathbf{P} - \mathbf{05}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{dx}\right)\mathbf{dydx} - \left(\mathbf{P} + \mathbf{05}\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{dx}\right)\mathbf{dydx} + \mathbf{Fx} \cdot \boldsymbol{\rho}\mathbf{dxdydz} = \mathbf{0}. \quad (1.2)$$

მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ, რომ $\mathbf{Fx - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = 0}$

ანალოგიურად დაიწერება წონასწორობის პირობა სხვა ღერძების მიმართაც. შედეგად მივიღებთ წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = 0} \\ \mathbf{F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} = 0} \\ \mathbf{F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} = 0} \end{aligned}\right\}. \qquad (1.3)$$

1.2.3. თანაბარი წნევის ზედაპირი

(1.3) განტოლებათა სისტემა გავამრავლოთ შესაბამისად **dx**–ზე, **dy**-ზე, **dz**-ზე და შევკრიბოთ, მივიღებთ

$$\mathbf{Fxdx + Fydy + Fz\,dz - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial x}dx + \frac{\partial p}{\partial y}dy + \frac{\partial p}{\partial z}dz\right) = 0}.$$

ფრჩხილებში მოთავსებული წევრი წარმოადგენს წნევის სრულ დიფერენციალს **dP**, ე.ი

$$\mathbf{Fxdx + Fydy + Fz\,dz - \frac{dp}{\rho} = 0}. \qquad (1.4)$$

თანაბარი წნევის ზედაპირი ეწოდება ისეთ ზედაპირს, რომლის ყველა წერტილში წნევა ერთნაირია, ანუ **P=const**; მაშინ (1.4) განტოლებაში $\mathbf{d\rho = 0}$ და მივიღებთ

თანაბარი წნევის ზედაპირის დიფერენციალურ განტოლებას

$$\mathbf{Fxdx + Fydy + Fz\,dz = 0}.$$

1.2.4. ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება

განვიხილოთ (1.4) განტოლება. დავუშვათ, რომ მოცულობითი ძალებიდან სითხეზე მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა; მაშინ **Fx=0, Fy=0** და $\mathbf{F_z = -gdz}$, თუ ამ მნიშვნელობებს შევიტანთ (1.4) განტოლებაში, გვექნება

$$\mathbf{-g\,dz - \frac{1}{\rho}\,dP = 0}.$$

ამ განტოლების ინტეგრირებით მივიღებთ

$$\mathbf{z + \frac{P}{g\rho} = const}. \qquad (1.5)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\boldsymbol{\gamma = \rho g}$, მაშინ (1.5) მიიღებს შემდეგ სახეს:

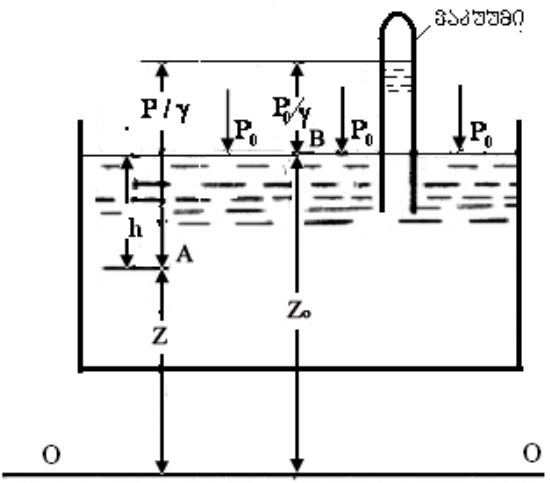
$$\mathbf{z + \frac{P}{\gamma} = const}. \qquad (1.6)$$

(1.6) განტოლება წარმოადგენს ჰიდროსტატიკის ძირითად განტოლებას.

1.2.5. წერტილში ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდის საანგარიშო ფორმულები

წონასწორობაში მყოფ სითხეში გამოვყოთ A და B წერტილები (ნახ. 1.4). A წერტილის დაშორება საფარდი სიბრტყიდან აღვნიშნოთ **Z**-ით, ხოლო B წერტილისა $\mathbf{Z_0}$-ით (საფარდი სიბრტყე არის ნებისმიერად გატარებული ჰორიზონტალური სიბრტყე, საიდანაც ხდება ანათვლების აღება, ნახაზზე 0-0 სიბრტყე). წნევა B წერტილში მოცემულია და იგი $\mathbf{P_0}$-ის ტოლია, ხოლო A წერტილში წნევა **P** საძიებელი სიდიდეა. დავწეროთ A და B წერტილებისთვის ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება

$$\mathbf{Z}+\frac{\mathbf{P}}{\gamma}=\mathbf{Z_o}+\frac{\mathbf{P_0}}{\gamma}.$$



ნახ.1.4

აქედან $\mathbf{P = P_o + \gamma(Z_0 - Z)}$. როგორც ნახაზიდან ჩანს, $\mathbf{Z_0 - Z = h}$; აქ $\mathbf{h}$ არის A წერტილის ჩაძირვის სიღრმე სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან. მისი გათვალისწინებით გვექნება, რომ $\mathbf{P = P_o + \gamma h}$. ამ წნევას უწოდებენ სრულ ანუ აბსოლუტურ წნევას განსახილველ A წერტილში

$$\mathbf{P_{სრ.(აბს)} = P_o + \gamma h}. \qquad (1.7)$$

ამრიგად, სრული წნევა წარმოადგენს ორი წნევის ჯამს; $\mathbf{P_o}$ არის წნევა სითხის თავისუფალ ზედაპირზე. იგი შეიძლება ატმოსფერულ წნევის ტოლი იყოს, მეტი ან ნაკლები $\mathbf{P_o \gtrless P_{ატმ.}}$. $\mathbf{\gamma h}$ არის $\mathbf{h}$ სიმაღლის სითხის სვეტის მიერ განვითარებული წნევა. სრულ წნევაზე ერთი ატმოსფეროთი ნაკლებ წნევას, ჭარბი ანუ მანომეტრული წნევა ეწოდება.

$$\mathbf{P_{ჭარბ.(მან)} = P_{სრ} - P_{ატმ}}. \qquad (1.8)$$

ჭარბი წნევა იმიტომ ეწოდება, რომ იგი გვიჩვენებს, თუ რამდენით სჭარბობს სრული წნევა ატმოსფერულ წნევას. მანომეტრული წნევა იმიტომ ეწო-დება, რომ იგი იზომება მანომეტრებით. შევიტანოთ (2.7) გამოსახულებაში სრული წნევის მნიშვნელობა, გვექნება

$$\mathbf{P_{ჭარბ.(მან)} = P_0 + \gamma h - P_{ატმ}}. \qquad (1.9)$$

განვიხილოთ კერძო შემთხვევა, როდესაც $\mathbf{P_0 = P_{ატმ}}$, მივიღებთ

$$\mathbf{P}_{\text{ჭარბ.(მან)}} = \boldsymbol{\gamma h}. \qquad (1.10)$$

სითხის ისეთ მდგომარეობას, როდესაც სრული წნევა ნაკლებია ატმოსფერულ წნევაზე, ვაკუუმი ეწოდება. ე.ი. ვაკუუმი არის სრული წნევის დანაკლისი ატმოსფერულ წნევამდე

$$\mathbf{P}_{\text{ვაკ}} = \mathbf{P}_{\text{ატ}} - \mathbf{P}_{\text{სრ}}. \qquad (1.11)$$

ატმოსფერული წნევის სიდიდე დამოკიდებულია ზღვის დონიდან ადგილმდებარეობის სიმაღლეზე. ზღვის დონიდან 200 მეტრის სიმაღლეზე არსებულ წნევას ტექნიკურ ატმოსფეროს ან მოკლედ ატმოსფეროს უწოდებენ. ამრიგად, ქ.ატმ=1ატმ=1კგძ/სმ^2=9.81 ნ/სმ^2=98100პა=981ჰექტპა. ასეთ წნევას ავითარებს 736 მმ ვერცხლისწყლის სვეტი 0^0C-ზე, ან 10 მ სიმაღლის წყლის სვეტი + 4^0C –ზე.

1.2.6. ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურები

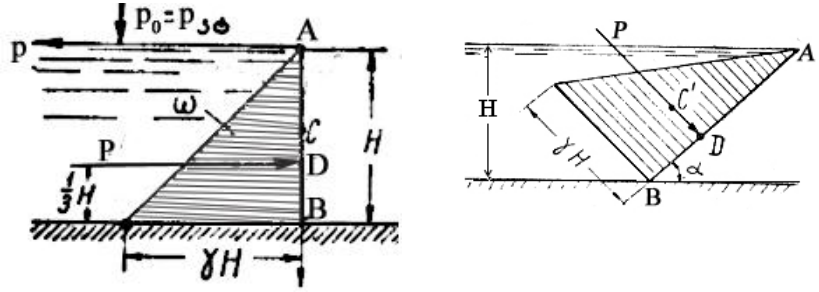
პრაქტიკული ამოცანების გადაწყვეტისას ხშირად საჭირო ხდება ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურების აგება. განვიხილოთ რამდენიმე მაგალითი.

ავაგოთ მანომეტრული წნევის ($\mathbf{P}_{\text{მან}} = \boldsymbol{\gamma h}$) ეპიურა ვერტიკალურ AB კედელზე. ნახ 1.5.ა მთემატიკურად $\mathbf{P} = \boldsymbol{\gamma h}$ წარმოადგენს წრფის განტოლებას. მის ასაგებად საჭიროა ორი წერტილი; A წერტილში ჩაძირვის სიღრმე h=0, ამიტომ $\mathbf{P}_{\text{მან}} = \mathbf{0}$. B წერტილში ჩაძირვის სიღრმე **h=H** და მანომეტრული წნევა ტოლი იქნება $\mathbf{P}_{\text{მან}} = \boldsymbol{\gamma H}$. გადავზომოთ

γH მონაკვეთი B წერტილიდან მარცხნივ, მიღებული მონაკვეთის ბოლო წერტილი შევაერთოთ A წერტილთან. ივიღებთ სამკუთხედს, რომელიც წარმოადგენს AB კედელზე მანომეტრული ჰიდროსტატიკური წნევის განაწილების გრაფიკულ გამოსახვას – წნევის ეპიურას. შამკუთხედის ფართობი რიცხობრივად AB კედლის ერთეულ სიგანეზე მოქმედი წნევის ძალის ტოლია,

$$\mathbf{P} = \frac{\gamma \mathbf{H}}{2} \cdot \mathbf{H} = \frac{\gamma \mathbf{H}^2}{2},$$

ხოლო კედლის მთელ **b** სიგანეზე მოქმედი წნევის ძალა ტოლი იქნება $\mathbf{P} = \frac{\gamma \mathbf{H}^2}{2}\mathbf{b}$.



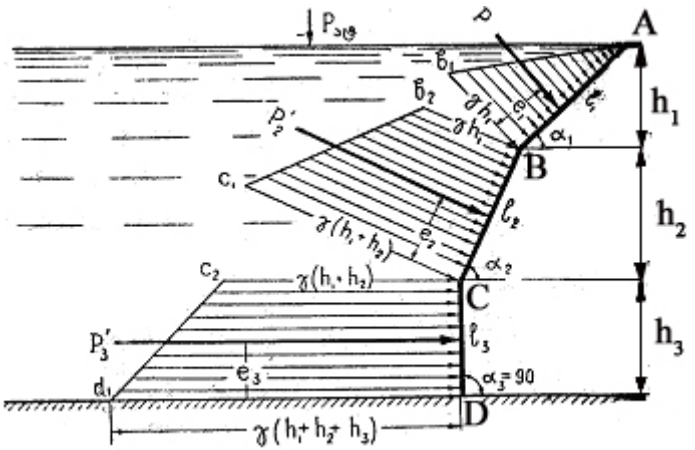
ა) ბ)

ნახ 1.5.

წნევის ძალის ტოლქმედის მოდების წერტილი (წნევის ცენტრი) ფუძიდან დაშორებული იქნება $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{3}} \cdot \mathbf{H}$ მანძი-

ლით. ანალოგიურად შეიძლება ავაგოთ მანომეტრული წნევის ეპიურა ჰორიზონტთან α კუთხით დახრილ კედელზე (ნახ. 1.5.ბ). ამ შემთხვევაში, წნევის ძალა გამოითვლება შემდეგი ფორმულით: $\mathbf{P=\frac{\gamma H^2}{2\sin\alpha}b}$; ეს ძალა AB კედელზე მოდებული იქნება წერტილიდან $\frac{1}{3}\cdot\mathbf{AB}$ სიმაღლეზე.

ნახ.1.6 მოცემულია მანომეტრული წნევის ეპიურები ABCD ტეხილი პროფილის კედელზე. წნევის ეპიურა თითოეული წრფივი უბნისათვის ცალ-ცალკე უნდა აიგოს ზემოთ მოყვანილი მსჯელობის საფუძველზე.

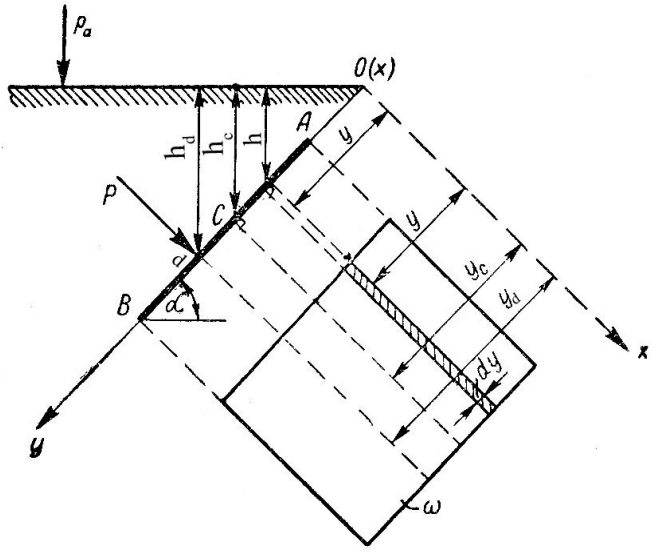


ნახ.1.6.

ცხადია, BC და CD უბნების ეპიურები წარმოადგენს ტრაპეციებს, რომელთა ფართობები შესაბამის კედელზე მოქმედი წნევის ძალის ტოლი იქნება. წნევის ძალების ტოლქმედი გაივლის ტრაპეციის სიმძიმის ცენტრში, მისი სიმაღლის (შესაბამისი კედლის) მართობულად.

1.2.7. ჰიდროსტატიკური წნევის ძალა ნებისმიერად ორიენტირებულ სიბრტყეზე. წნევის ცენტრი

გამოვთვალოთ სრული ჰიდროსტატიკური წნევის ძალა ჰორიზონტთან α კუთხით დახრილ AB სიბრტყეზე (ნახ.1.7). კოორდინატთა სისტემა ავირჩიოთ ისე, როგორც ნახაზზეა ნაჩვენები.



ნახ.1.7

წარმოსახვით ვაბრუნოთ განსახილველი AB სიბრტყე **OY** ღერძის გასწვრივ ისე, რომ იგი დაემთხვეს ნახაზის სიბრტყეს; ნახაზის სიბრტყეს დაემთხვევა აგრეთვე **OX** ღერძი. განსახილველ სიბრტყეზე, სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან **h** სიღრმეზე, გამოვყოთ უსასრულოდ მცირე ფართი **dω**. მისი დაშორება **OX** ღერძამდე იქნება **y**. ამ ელემენტარულ ფართობზე იმოქმედებს ელემენტალური წნევის ძალა, **dP** რომელიც ტოლი იქნება

$$dP = (P_o + \gamma h)d\omega .$$

ამ განტოლების ინტეგრირებით **ω** ფართობზე განისაზღვრება ჯამური სრული წნევის ძალა, რომელიც მოქმედებს AB სიბრტყეზე.

$$P_{AB} = \int_{\omega} (P_0 + \gamma h)d\omega = \int_{\omega} P_0 d\omega + \int_{\omega} \gamma h d\omega .$$

როგორც 1.7. ნახაზზე ჩანს **h=ysinα** ამის გათვალისწინებით მივიღებთ, რომ

$$P_{AB} = P_0\omega + \sin\alpha \int_{\omega} \gamma d\omega .$$

როგორც თეორიული მექანიკიდანა ცნობილია, $\int_{\omega} y d\omega$ წარმოადგენს განსახილველი AB სიბრტყის ზედაპირის ფართის სტატიკურ მომენტს **OX** ღერძის მიმართ და იგი ტოლია

$$\int_{\omega} y d\omega = y_c \omega ;$$

სადაც, y_c არის განსახილველი სიბრტყის სიმძიმის ცენტრის დაშორება **OX** ღერძიდან, ანუ ფართობის მხარი **X** ღერძის მიმართ. ამის გათვალისწინებით მივიღებთ, რომ

$$P_{AB} = P_0 \omega + y \sin\alpha y_c \omega$$

ნახაზიდან ჩანს, რომ $y_c \sin\alpha = h_c$, სადაც h_c არის განსახილველი სიბრტყის სიმძიმის ცენტრის ჩაძირვის სიღრმე სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან. ამრიგად, ჯამური წნევის ძალა ტოლი იქნება

$$P_{AB} = P_0 \omega + \gamma h_c \omega = (P_0 + \gamma h_c)\omega \qquad (1.12)$$

ფრჩხილებში მოთავსებული წევრი წარმოადგენს **AB** ზედაპირის სიმძიმის ცენტრში არსებულ სრულ წნევას. იმავე ზედაპირზე მოქმედი მანომეტრული წნევის ძალის ჯამური სიდიდე ტოლი იქნება

$$P_{AB} = \gamma h_c \omega \qquad (1.13)$$

სადაც γh_c არის მანომეტრული წნევა სიბრტყის სიმძიმის ცენტრში.

ამრიგად, ბრტყელ ზედაპირზე მოქმედი ჯამური ჰიდროსტატიკური წნევის ძალა ტოლია ამ ზედაპირის სიმძიმის ცენტრში არსებული წნევის და ზედაპირის ფართობის ნამრავლისა.

ჯამური ჰიდროსტატიკური წნევის ძალის ტოლქმედის მოდების წერტილს, წნევის ცენტრი ეწოდება და აღინიშნება **d** ასოთი. მისი ჩაძირვის სიღრმე სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან აღვნიშნოთ h_d-ით, ხოლო მისი დაშორება **OX** ღერძამდე – y_d-თი. განვსაზღვროთ y_d მანომეტრული წნევის შემთხვევაში. ცნობილია, რომ ტოლქმედი ძალის მომენტი ნებისმიერი ღერძის მიმართ ტოლია მისი შემდგენი ძალების მომენტების ჯამისა იმავე ღერძის მიმართ, ანუ ელემენტარული წნევის ძალების იმავე ღერძის მიმართ მომენტების ჯამის. ელემენტალური წნევის ძალის მომენტი **OX** ღერძის მიმართ ტოლია

$$H = \gamma \cdot y \cdot y \sin\alpha \cdot d\omega$$

ამ გამოსახულების ინტეგრირებით ω ფართობზე მივიღებთ ტოლქმედი ძალის მომენტს

$$H = \gamma \sin\alpha \int_{\omega} y^2 d\omega .$$

$\int_{\omega} y^2 d\omega$ არის AB ზედაპირის ფართობის ინერციის მომენტი **OX** ღერძის მიმართ და ტოლია

$$\int_{\omega} y^2 d\omega = I_X \quad \text{ე.ი} \quad H = \gamma \sin\alpha \cdot I_X . \qquad (1.14)$$

მეორე მხრივ, ტოლქმედი ძალის მომენტი **OX** ღერძის მიმართ ტოლია

$$H = \gamma y_c \sin\alpha \omega y_d . \qquad (1.15)$$

(1.14) და (1.15) გამოსახულებების გატოლებით, მივიღებთ

$\gamma \sin\alpha I_X = \gamma y_c \sin\alpha \omega y_d$. აქედან $y_d = \frac{I_X}{y_c \omega}$.

თეორიული მექანიკიდან ცნობილია, რომ

$$I_X = I_0 + y_c^2 \omega$$

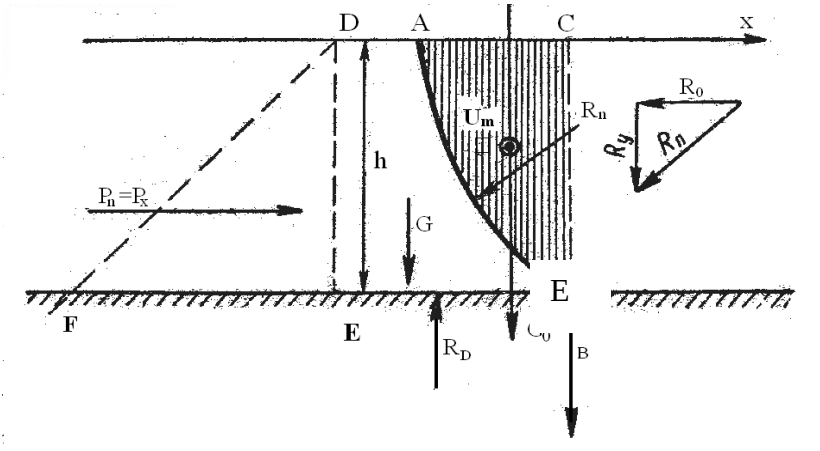
სადაც, I_0 არის ცენტრალური ინერციის მომენტი ანუ განსახილველი ფართობის ინერციის მომენტი სიმძიმის ცენტრში გამავალი და **OX** ღერძის პარალელური ღერძის მიმართ. ამის გათვალისწინებით, საბოლოოდ მივიღებთ

$$I_d = y_c + \frac{I_0}{y_c \omega} \quad . \qquad (1.16)$$

(1.16.) გვიჩვენებს, რომ წნევის ცენტრი ყოველთვის სიმძიმის ცენტრზე დაბლა მდებარეობს.

1.2.8. წნევის ძალა მრუდწირულ ზედაპირზე

განვიხილოთ მრუდწირული ზედაპირის კერძო შემთხვევა – ცილინდრული ზედაპირი. გამოვთვალოთ AB ცილინდრულ ზედაპირზე მოქმედი მანომეტრული წნევის ძალის ჯამური მნიშვნელობა (ნახ. 1.8.). ცილინდრული ზედაპირის მსახველის სიგრძე ავღნიშნოთ **b**-თი, ხოლო ზედაპირზე მოქმედი წნევის ძალის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური შემდგენები P_X და P_Z –ით. ამ შემდგენების მოსაძებნად გავატაროთ **DE** სიბრტყე და განვიხილოთ



ნახ. 1.8.

ABED მოცულობის წონასწორობის პირობა **X** ღერძის მიმართ. წონასწორობის პირობა შემდეგნაირად ჩაიწერება

$$\mathbf{P_h+R_X=0} \text{ ან } \mathbf{P_h=-R_X},$$

სადაც, $\mathbf{P_h}$ ჰიდროსტატიკური წნევის ძალაა, ხოლო $\mathbf{R_X}$ – ცილინდრული ზედაპირის მხრიდან რეაქციის ძალის პროექცია **X** ღერძზე. რეაქციის ძალა $\mathbf{R_X}$ სიდიდით სა-ძიებელი წნევის ძალის ჰორიზონტალური შემდგენის $\mathbf{P_X}$ ტოლია, მაგრამ აქვს საპირისპირო მიმართულება. აქედან გამომდინარე, $\mathbf{P_X=P_h}$, ე.ი. წნევის ძალის ჰორიზონტალუ-რი შემდგენი ცილინდრული ზედაპირის ვერტიკალურ გეგმილზე მოქმედი წნევის ძალის ტოლია.

ABED მოცულობის წონასწორობის პირობას **y** ღერ-ძის მიმართ აქვს შემდეგი სახე $\mathbf{G+R_y-R_D=0}$ ანდა $\mathbf{R_y=R_D-G}$,

სადაც **G** არის ABED მოცულობის წონა; $\mathbf{R_y}$ – ცილინდრული ზედაპირის მხრიდან რეაქციის ძალის გეგმილი **Y** ღერძზე; $\mathbf{R_D}$ – ფსკერის რეაქციის ძალა.

რადგან $\mathbf{P_h = -R_x}$, ამიტომ $\mathbf{P_h = -G}$ (1.17)

1.8. ნახაზიდან

$\mathbf{R_d}$=ფართ(CADEB)bγ, **G**=ფართ(ADEB)bγ,

მაშინ (1.17) განტოლებიდან მივიღებთ, რომ ჭარბი წნევის ძალის ვერტიკალური მდგენელი ტოლია

$$\mathbf{P_y}=-[\text{ფართ(CADEB)b}\gamma-\ \text{ფართ(ADEB)b}\gamma]$$

ანუ

$$\mathbf{P_y}=-\text{ფართ(CAB)b}\gamma=\mathbf{W_{წ.ტ}}\ \gamma=-\mathbf{G}.$$

$\mathbf{W_{წ.ტ}}$ არის ე.წ. წნევის ტანის მოცულობა. წნევის ტანის კვეთი ნახაზზე დაშტრიხულია, ე.ი. ჭარბი წნევის ძალის ვერტიკალური მდგენელი წნევის ტანის ტოლი სითხის მოცულობის წონის ტოლია. ჯამური წნევის ძალა ტოლია

$$\mathbf{P}=\sqrt{\mathbf{P_X^2}+\mathbf{P_Y^2}}\ .$$

ტოლქმედი ძალის მიმართულება განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით

$$\mathbf{cos}\alpha=\frac{\mathbf{P_X}}{\mathbf{P}}\ ,\ \ \mathbf{sin}\alpha=\frac{\mathbf{P_Y}}{\mathbf{P}}\ .$$

სადაც, α წნევის ძალის ტოლქმედის ჰორიზონტთან დახრის კუთხეა.

III თავი. ჰიდროდინამიკის საფუძვლები

1.3.1. ჰიდროდინამიკის ძირითადი ამოცანები. სითხის მოძრაობის კლასიფიკაცია

ჰიდროდინამიკა არის ჰიდრავლიკის ნაწილი, რომელიც შეისწავლის გარე ძალებით გამოწვეულ სითხის მოძრაობის კანონზომიერებებს და სითხესა და მყარ სხეულებს შორის მექანიკური ურთიერთქმედებების საკითხებს. ჰიდრავლიკა სითხეს განიხილავს, როგორც სივრცის მთლიანად შემვსებ უწყვეტ გარემოს. იგი სითხის მოძრაობის შესწავლის დროს, განიხილავს სითხის ნაწილაკის მოძრაობას. სითხის ნაწილაკში იგულისხმება უსასრულოდ მცირე მოცულობისა და მასის ფიზიკური სიდიდე, რომელსაც აქვს სითხის ყველა ფიზიკური თვისება.

ჰიდროდინამიკის ძირითადი ამოცანაა ნაკადის ცალკეულ წერტილებში სითხის ნაწილაკის სიჩქარისა U და წნევის P განსაზღვრა. სიჩქარეს აღებულ წერტილში, ადგილობრივი სიჩქარე ეწოდება, ხოლო წნევას მოძრაობის დროს – ჰიდროდინამიკური წნევა.

ჰიდროდინამიკაში ფართოდ გამოიყენება იდეალური სითხის ცნება. საკითხი ჯერ გადაწყდება იდეალური სითხისათვის და შემდეგ სითხის თვისებრივ მახასიათებლებზე სათანადო შესწორების შეტანით გადავდივართ რეალურ სითხეებზე.

სითხის მოძრაობის კლასიფიკაცია ეყრდნობა მის ზოგიერთ ნიშან-თვისებას. მაგალითად, თუ აღებულ წერტილში სითხის ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარე და წნევა დროში იცვლება, მაშინ ასეთ მოძრაობას დაუმყარებელს უწოდებენ. თუ სიჩქარე და წნევა წერტილში დროში არ იცვლება, მაშინ ასეთ მოძრაობას დამყარებულს უწოდებენ.

დამყარებული მოძრაობა, თავის მხრივ, შეიძლება იყოს თანაბარი და არათანაბარი. მოძრაობა თანაბარია, თუ ნაკადის სიღრმე და სიჩქარე შესაბამის წერტილებში მოძრაობის გზაზე არ იცვლება. არათანაბარია მოძრაობა, თუ ნაკადის სიღრმე და სიჩქარე მოძრაობის გზაზე იცვლება.

როგორც თანაბარი, ისე არათანაბრი მოძრაობა შეიძლება იყოს წნევიანი და უდაწნეო. სითხის მოძრაობა წნევანია, თუ სითხე ყოველმხრივ შემოსაზღვრულია მყარი სხეულებით (არა აქვს თავისუფალი ზედაპირი) და წნევა ნაკადის ნებისმიერ წერტილში ატმოსფერულზე მეტია. უდაწნეო ნაკადი შემოსაზღვრულია მყარი სხეულებით და სითხისა და აირის გამყოფი ზედაპირით ანუ აქვს ე.წ. სითხის თავისუფალი ზედაპირი.

თუ სითხის ნაწილაკები გადატანით მოძრაობასთან ერთად ასრულებენ ბრუნვით მოძრაობას, მაშინ ასეთ მოძრაობას, გრიგალური ეწოდება. თუ არ არის ნაწი-

ლაკების ბრუნვითი მოძრაობა, მაშინ გვაქვს არაგრიგალური მოძრაობა.

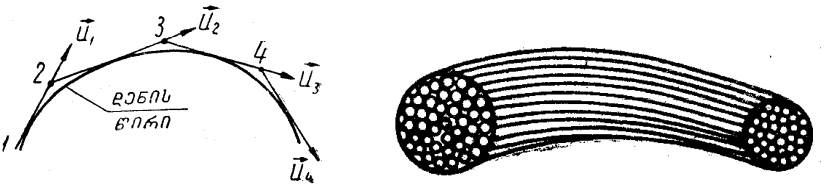
არსებობს სითხის მოძრაობის შესწავლის ორი მეთოდი: ლაგრანჟის და ეილერის. ლაგრანჟის მეთოდი შეისწავლის სითხის ნაწილაკის სივრცეში მდებარეობის შეცვლას დროში ანუ მის სტრუქტურას. ეილერის მეთოდი შეისწავლის სიჩქარის ველს, ანუ აღებულ მომენტში სივრცის ნებისმიერ წერტილში ნაკადის ნაწილაკის სიჩქარეს.

1.3.2. დენის წირი, დენის მილაკი, ელემენტარული ჭავლი, სითხის ნაკადი

დენის წირი წარმოადგენს მრუდს, რომლის ყველა წერტილში, აღებულ მომენტში სიჩქარეს აქვს მხების მიმართულება. დაუმყარებელი მოძრაობისას დროს დენის წირის მოხაზულობა დროში იცვლება; დამყარებული მოძრაობისას კი დენის წირი ემთხვევა ნაწილაკის მოძრაობის ტრაექტორიას და დროში არ იცვლება.

ნაკადში ავიღოთ ელემენტარული ფართობი $d\omega$; თუ ამ ფართობის შემომსაზღვრელი კონტურის ყველა წერტილში გავატარებთ დენის წირებს, მაშინ მათი ერთობლიობა გვაძლევს დენის მილაკს (ნახ. 1.9); ხოლო თუ ელემენტარული ფართობის ყველა წერტილში გავატარებთ დენის წირებს, მაშინ მათი ერთობლიობა გვაძლევს ელემენტარულ ჭავლს. თუ ელემენტარულ ჭავლს გავკვე-

თავთ დენის წირების მართობი ზედაპირით, მივიღებთ კვეთს, რომელსაც ცოცხალ კვეთს **dω** უწოდებენ.



ა) ბ)

ნახ.1.9

ელემენტარული ჭავლის ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გადენილი სითხის მოცულობას ხარჯი ეწოდება

$$\mathbf{dQ = Ud\omega}, \qquad (1.18)$$

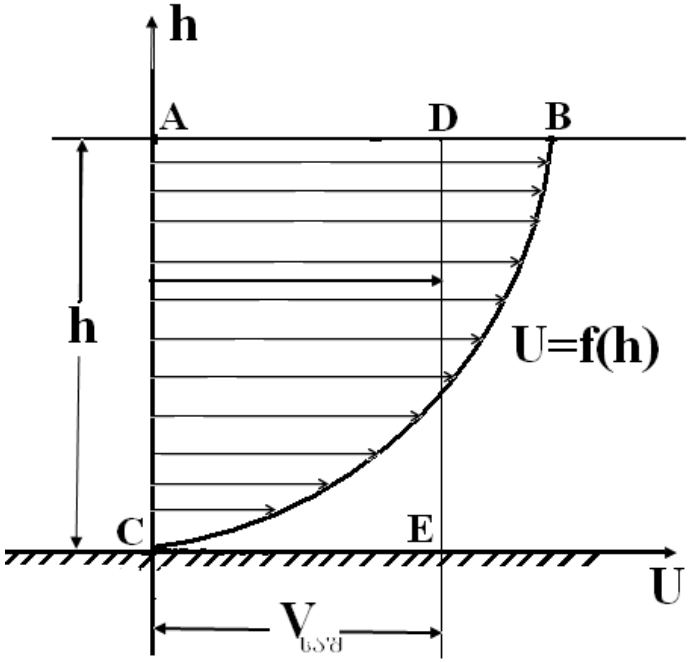
სადაც **U** – სიჩქარეა.

ელემენტარული ჭავლის უსასრულოდ დიდი რაოდენობის ერთობლიობა გვაძლევს სითხის ნაკადს. თუ ნაკადს გავკვეთავთ დენის წირების მართობული ზედაპირით, მაშინ მიღებულ კვეთს, ცოცხალ კვეთს უწოდებენ, ხოლო მის ფართობს **ω**, – ცოცხალი კვეთის ფართობს. ნაკადის ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გადენილი სითხის მოცულობას (რაოდენობას), ნაკადის ხარჯი ეწოდება. რადგან ნაკადი ელემენტარული ჭავლების ერთობლიობაა, ამიტომ ნაკადის ხარჯი ელემენტარული ჭავლების ხარჯთა ჯამის ტოლია, ე.ი.

$$Q = \int_{\omega} dQ = \int_{\omega} U d\omega \qquad (1.19)$$

ადგილობრივი ანუ რეალური სიჩქარე **U** ნაკადის ცოცხალი კვეთის სხვადასხვა წერტილში სხვადასხვაა.

ცოცხალ კვეთში ავიღოთ ვერტიკალი, მის სხვადასხვა წერტილში მასშტაბში გადავზომოთ არსებული რეალური სიჩქარეები. მიღებულ მონაკვეთების ბოლო წერტილები შევაერთოთ მრუდით. მიღებულ ფიგურას, სიჩქარის ეპიურა ეწოდება (ნახ. 1.10).



ნახ.1.10

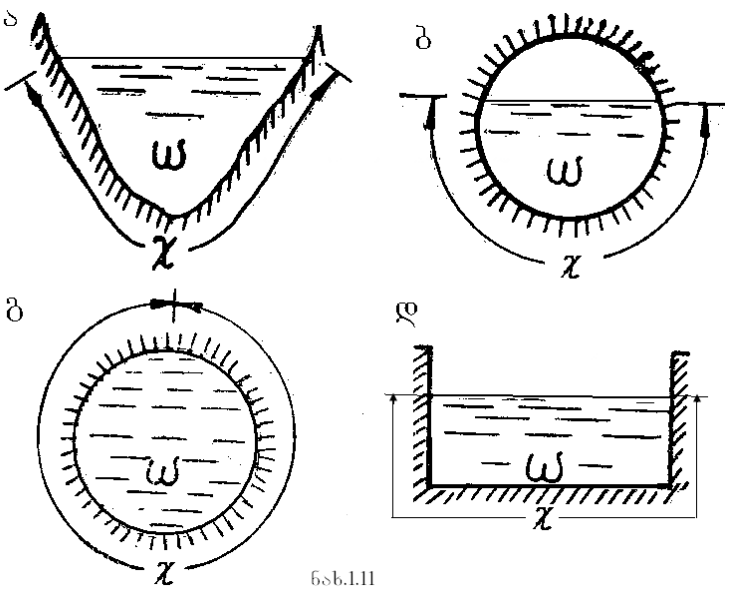
იგი გვიჩვენებს ვერტიკალზე სიჩქარის არათანაბარ განაწილებას. ვერტიკალზე სიჩქარის განაწილების კანონი ზუსტად არ არის დადგენილი, ამიტომ ჰიდრავლიკაში შემოღებულია საშუალო სიჩქარის ცნება. საშუალო სიჩქარე ეს არის ფიქტიური, წარმოსახვითი სიჩქარე, რომლითაც სითხის ყველა ნაწილაკს რომ ემოძრავა ნაკადის ცოცხალ კვეთში, სითხის ხარჯი ამ ნაწილაკების რეალური სიჩქარეებით გამოთვლილი ხარჯის ტოლი იქნებოდა (**BC** წირით შემოსაზღვრული ეპიურისა და **ADEC** სწორკუთხედის ფართობები ერთმანეთის ტოლია); საშუალო სიჩქარეს აღვნიშნავთ V ასოთი (ნახ.1.10). (1.19) გამოსახულებაში რეალური სიჩქარე შევცვალოთ საშუალო სიჩქარით, გვექნება

$$\mathbf{Q=\int_{\omega} U d\omega=\int_{\omega} V d\omega=V\int_{\omega} d\omega=V\omega}\cdot$$

ამრიგად, $\mathbf{Q=\omega V}$ [მ^3/წმ], აქედან $\mathbf{V=\frac{Q}{\omega}}$. მეორე მხრივ, განმარტების თანახმად

$$\mathbf{Q=\frac{W}{t}}\ [\text{მ}^3/\text{წმ}],$$

სადაც, **W** არის ნაკადის ცოცხალ კვეთში **t** დროში გადენილი სითხის მოცულობა.



ნახ.1.11

ნაკადის ცოცხალი კვეთის პერიმეტრის (კონტურის) ნაწილს, რომელსაც სითხის ნაკადი ეხება, სველ პერიმეტრს უწოდებენ. იგი აღინიშნება χ ასოთი (ნახ. 1.11).

ნაკადის ცოცხალი კვეთის ფართობის შეფარდებას სველ პერიმეტრთან, ჰიდრავლიკურ რადიუსს უწოდებენ

$$\mathbf{R = \frac{\omega}{\chi}} \quad [მ].$$

წრიული კვეთებისათვის

$$\mathbf{R = \frac{r}{2} = \frac{d}{4}}.$$

1.3.3. ნაკადის უწყვეტობის განტოლება

ჰიდრავლიკაში განვიხილავთ უკუმშვადი სითხის ნაკადს, რომელიც მთლიანად (სიცარიელეების გარეშე) ავსებს მის მიერ დაკავებულ სივრცეს და ნაკადის გვერდითი ზედაპირიდან არ ხდება სითხის გადინება ან მოდინება; ასეთ ნაკადებს, უწყვეტ ნაკადებს უწოდებენ. უწყვეტობის პირობა იდეალური სითხის ნაკადისათვის დიფერენციალური სახით შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 . \qquad (1.20)$$

უკუმშველი სითხის დამყარებული მოძრაობისათვის ნაკადის უწყვეტობის ჰიდრავლიკურ განტოლებას ანუ ხარჯის მუდმივობის განტოლებას შემდეგი სახე აქვს:

$$\mathbf{Q = \omega_1 v_1 = \omega_2 v_2 = ... = \omega_n v_n = const.}$$

1.3.4. იდეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები. ეილერის განტოლებათა სისტემა მოძრაობისათვის

როგორც აღვნიშნეთ, ჰიდროდინამიკის ძირითადი ამოცანაა, სითხის ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარისა და ჰიდროდინამიკური წნევების განსაზღვრა. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად საჭიროა ისეთი დიფერენციალური განტოლებების მიღება, რომლებიც კავშირს დაამყარებენ სიჩქარეს, აჩქარებასა და ნაკადზე მოქმედ ძალებს შორის. ასეთ განტოლებათა სისტემას წარმოადგენს იდეალური

სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები (ეილერის განტოლებები). მათ მისაღებად გამოვიყენოთ სითხის წონასწორობის დიფერენციალური განტოლებები (1.3) და მათში დალამბერის პრინციპის თანახმად, დამატებით შევიყვანოთ ერთეულ მასაზე მოქმედი გადატანითი მოძრაობის ინერციის ძალების გეგმილები. რომელთაც შემდეგი სახე აქვს

$$\mathbf{I_x = -\frac{dU_x}{dt}},\quad \mathbf{I_y = -\frac{dU_y}{dt}},\quad \mathbf{I_z = -\frac{dU_z}{dt}},$$

ნიშანი „–“ აღებულია იმიტომ, რომ ინერციის ძალა მიმართულია გადატანითი მოძრაობის აჩქარების საპირისპიროდ. ამრიგად, იდეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას აქვს შემდეგი სახე:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{F_x - \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial P}{\partial X} = -\frac{dU_x}{dt}} \\ \mathbf{F_y - \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial P}{\partial Y} = -\frac{dU_y}{dt}} \\ \mathbf{F_z - \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial P}{\partial Z} = -\frac{dU_z}{dt}} \end{aligned}\right\}. \qquad (1.21)$$

ამ განტოლებათა სისტემაში გვაქვს ოთხი უცნობი, ესენია $\mathbf{P, U_x, U_y}$ და $\mathbf{U_z}$.

იმისათვის, რომ (1.21) განტოლებათა სისტემა შეიკრას, საჭიროა მეოთხე განტოლება; ასეთ განტოლებად ავიღოთ

იდეალური სითხის მოძრაობის უწყვეტობის განტოლება (1.20).

1.3.5. ბერნულის განტოლება იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის

იდეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის 1.21 განტოლებები გავამრავლოთ შესაბამისად **dx**-ზე, **dy**-ზე, **dz**-ზე და შევკრიბოთ

$$\mathbf{Fxdx+Fydy+Fzdz-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial P}{\partial x}dx+\frac{\partial P}{\partial y}dy+\frac{\partial P}{\partial z}dz\right)=}$$
$$\mathbf{=\frac{dU_x}{dt}dx+\frac{dU_y}{dt}dy+\frac{dU_z}{dt}dz} \qquad (1.22)$$

(1.22) განტოლების ფრჩხილებში მოთავსებული წევრი წარმოადგენს წნევის სრულ დიფერენციას **dP**. როგორც ვიცით, $\mathbf{\frac{dx}{dt}=U_x, \frac{dy}{dt}=U_y, \frac{dz}{dt}=Uz;}$ დავუშვათ, რომ მოცულობითი ძალებიდან სითხეზე მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა, მაშინ **Fx=0, Fy=0, Fz=-gdz**. $\mathbf{F_z=-gdz;}$ თუ ამ მნიშვნელობებს შევიტანთ (1.22) განტოლებაში, გვექნება

$$\mathbf{-gdz-\frac{1}{\rho}dP=dUx\cdot Ux+dUy\cdot Uy+dUz\cdot dUz}\ . \qquad (1.23)$$

ცნობილია, რომ

$$\mathbf{U^2=U_x^2+U_y^2+U_z^2}\ .$$

გავადიფერენციალოთ ეს გამოსახულება, მივიღებთ

$$\mathbf{dU^2=2\left(dU_x\cdot U_x+dU_y\cdot U_y+dU_z\cdot U_z\right)}.$$

ამ უკანასკნელის შედარებით (1.23) განტოლებასთან, მივიღებთ,

$$dU_x \cdot U_x + dU_y \cdot U_y + dU_z \cdot U_z = \frac{dU^2}{2}.$$

ამის გათვალისწინებით, გვექნება,

$$-gdz - \frac{1}{\rho}dP = \frac{dU^2}{2}.$$

ამ განტოლების ინტეგრირება მოგვცემს

$$gz + \frac{P}{\rho} + \frac{U^2}{2} = const \text{ ანდა } z + \frac{P}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} = const.$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\gamma = \rho g$, საბოლოოდ მივიღებთ

$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} = const. \qquad (1.24)$$

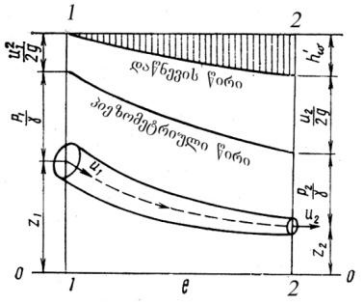
იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლის ორი კვეთისათვის გვექნება

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} \qquad (1.25)$$

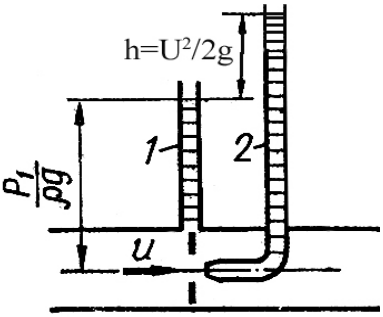
(1.24) და (1.25) განტოლებები წარმოადგენს ბერნულის განტოლებებს იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის.

1.3.6. ბერნულის განტოლების გეომეტრიული და ენერგეტიკული არსი

ბერნულის განტოლების გეომეტრიული არსის გასაგებად ელემენტარულ ჭავლში ავირჩიოთ ორი ნებისმიერი კვეთი (1-1 და 2-2) (ნახ.1.12). ამ კვეთების ცენტრების დაშორება 0-0 საფარდი სიბრტყიდან აღვნიშნოთ $\mathbf{Z_1}$ და $\mathbf{Z_2}$-ით. ცენტრებში მოთავსებულია მინის ვიწრო მილები (პიეზომეტრები) და პიტოს მილები. პიტოს მილი წარმოადგენს 90˚-ით მოხრილ მილს, რომლის ბოლო მიმართულია ნაკადის მოძრაობის საპირისპიროდ (ნახ.1.12-ბ).



ა



ბ. 1. პიეზომეტრი,
2. პიტოს მილი

ნახ.1.12

ბერნულის განტოლების წევრი **Z** წარმოადგენს მანძილს საფარდი სიბრტყიდან განსახილველი კვეთის ცენტრამდე. მას უწოდებენ გეომეტრიულ სიმაღლეს ანუ გეომეტრიულ დაწნევას.

$\mathbf{P/\gamma}$ სიდიდე წარმოადგენს სიმაღლეს, რომელზეც სითხე აიწევს პიეზომეტრში. მას უწოდებენ პიზომეტრიულ სიმაღლეს ანუ პიეზომეტრულ დაწნევას.

$\frac{\mathbf{U^2}}{\mathbf{2g}}$ სიდიდეს აქვს სიგრძის განზომილება. იგი წარმოადგენს პიტოს მილისა და პიეზომეტრის ჩვენებათა სხვაობას და უწოდებენ სიჩქარულ სიმაღლეს ანუ სიჩქარულ დაწნევას.

ამრიგად, იდეალურ სითხეებში სამი დაწნევის ანუ სამი სიმაღლის ჯამი მუდმივი სიდიდეა. თუ ელემენტარული ჭავლის სხვადასხვა კვეთებში გადავზომავთ $\mathbf{Z+\frac{P}{\gamma}}$ სიდიდეებს და მიღებული მონაკვეთების ბოლოებს შევაერთებთ მრუდით, მივიღებთ წირს, რომელსაც პიეზომეტრულ წირს უწოდებენ. ხოლო, თუ კვეთებში გადავზომავთ $\mathbf{H=Z+\frac{P}{\gamma}+\frac{U^2}{2g}}$ სიდიდეებს და მიღებული მონაკვეთების ბოლო წერტილებს შევაერთებთ წირით, მივიღებთ ე.წ. დაწნევის წირს. ცხადია, იდეალურ სითხეებში დაწნევის წირი საფარდი სიბრტყის პარალელურია. თვით $\mathbf{H}$ სიდიდეს, ჰიდროდინამიკურ დაწნევას უწოდებენ.

ახლა გავეცნოთ ბერნულის განტოლების ფიზიკურ არსს.

Z არის მდებარეობის კუთრი პოტენციური ენერგია. კუთრი ენერგია ეწოდება ერთეული წონის სითხის ენერგიას.

$\frac{\mathbf{P}}{\gamma}$ – არის წნევის კუთრი პოტენციური ენერგია. იგი იმ ენერგიის ტოლია, რომელიც საჭიროა ერთეული წონის სითხის $\frac{\mathbf{P}}{\gamma}$ სიმაღლეზე ასატანად.

$\frac{\mathbf{U^2}}{\mathbf{2g}}$ არის კუთრი კინეტიკური ენერგია.

ამრიგად, იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლის გასწვრივ კუთრი კინეტიკური და პოტენციური ენერგიების ჯამი მუდმივი სიდიდეა.

1.3.7. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის

როგორც ცნობილია, რეალური ანუ ბლანტი სითხეების მოძრაობის დროს სითხის შრეებს შორის წარმოიქმნება ხახუნის ძალა. ხახუნი წარმოიქმნება აგრეთვე სადინარის კედლებსა და სითხის ნაწილაკებს შორის. ხახუნის ძალა კი მოძრაობისადმი წინაღობის ძალაა და მის გადალახვაზე სითხე ხარჯავს გარკვეულ ენერგიას, რომელიც სითბურ ენერგიად გარდაიქმნება. ამიტომ, მოძრაობის გზაზე ჭავლის სრული კუთრი ენერგია ყოველთვის მცირდება. წინაღობათა გადალახვაზე დახარჯულ ენერგიას, ენერგიის ანუ დაწნევის დანაკარგს უწოდებენ. რადგან ბერნულის განტოლების თითოეულ წევრს

აქვს სიგრძის განზომილება, ამიტომ ენერგიის ანუ დაწნევის დანაკარგს აღნიშნავენ $\mathbf{hw_{1\text{-}2}}$-ით. მაშინ ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის, შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\mathbf{Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^{\,2}}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^{\,2}}{2g} + hw_{1-2}}\,. \qquad (1.26)$$

სადაც $\mathbf{hw_{1\text{-}2}}$ არის ენერგიის დანაკარგი 1-1 კვეთიდან 2-2 კვეთამდე.

1.3.8. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის დამჭარებული ნაკადისათვის

როგორც ცნობილია, სითხის ნაკადი წარმოადგენს ელემენტარული ჭავლების ერთობლიობას. ბერნულის განტოლება ელემენტარული ჭავლისათვის ახასიათებს ენერგიას ჭავლის კვეთში. ცხადია, ნაკადის ენერგია ცოცხალ კვეთში ტოლი იქნება ელემენტარული ჭავლების ენერგიათა ჯამის, ანუ ბერნულის განტოლება მთლიანი ნაკადისათვის მიიღება (1.26) განტოლების ინტეგრირებით. სრული კუთრი ენერგია ნაკადის კვეთში ტოლია:

$$\mathbf{E = \int_{\omega}\left(Z + \frac{P}{\rho g}\right)g\,dm + \int_{\omega}\frac{U^2}{2}dm}\,, \qquad (1.27)$$

სადაც **dm** ელემენტარული ჭავლის კვეთში დროის ერთეულში გადენილი სითხის მასაა.

ნელცვლადი მოძრაობისათვის შეგვიძლია დავუშვათ, რომ კვეთში წნევების განაწილება ხდება ჰიდროსტატიკის კანონით ანუ $\mathbf{Z+\frac{P}{\rho g}=const}$

განვიხილოთ $\int_{\omega}\frac{\mathbf{U^2}}{2}\mathbf{dm}$. ინტეგრალი, რადგან $\mathbf{dm=\rho dQ=\rho u d\omega}$, ამიტომ

$$\int_{\omega}\frac{\mathbf{U^2}}{2}\mathbf{dm}=\int_{\omega}\rho\frac{\mathbf{U^3 d\omega}}{2}.$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\int_{\omega}\mathbf{U d\omega=Q=\omega\cdot v}$, მაშინ (1.27) განტოლების მეორე ინტეგრალი, რომელიც წარმოადგენს კინეტიკურ ენერგიას, შეიძლება გამოისახოს **V** საშუალო სიჩქარით და გვექნება

$$\int_{\omega}\frac{\mathbf{U^2}}{2}\mathbf{dm}=\frac{\rho}{2}\alpha\mathbf{V^3\omega}$$

სადაც **α** არის ე.წ. კინეტიკური ენერგიის კოეფიციენტი ანუ კორიოლისის კოეფიციენტი. იგი წარმოადგენს რეალური კინეტიკური ენერგიის ფარდობას საშუალო სიჩქარით გამოთვლილ კინეტიკურ ენერგიასთან და ითვალისწინებს კვეთში სიჩქარის არათანაბარ განაწილებას.

$$\alpha=\frac{\int_{\omega}\mathbf{U^3 d\omega}}{\mathbf{V^3\omega}}.$$

α ყოველთვის ერთზე მეტი სიდიდეა და იგი 1-დან 2-მდე იცვლება.

ამასთან თუ დავუშვებთ, რომ დაწნევის დანაკარგები თითოეული ელემენტარული ჭავლისათვის განსახილველ კვეთებს შორის მუდმივია და დანაკარგების საშუალო მნიშვნელობის ტოლია, მაშინ ბერნულის განტოლება რეალური სითხის დამყარებული ნაკადისათვის შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\mathbf{Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + hw} \qquad (1.28)$$

ჰიდრავლიკური ქანობი ეწოდება ნაკადის სრული დაწნევის (სრული კუთრი ენერგიის) ვარდნას განსახილველი უბნის სიგრძის ერთეულზე და აღინიშნება **I** ასოთი. თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში, სრული დაწნევის წირი დახრილი წრფეა. ჰიდრავლიკური ქანობი გამოითვლება ფორმულით

$$\mathbf{I = \frac{\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}\right)}{\ell} = \frac{hw}{\ell}}.$$

არათანაბრი მოძრაობის შემთხვევაში დაწნევის წირი მრუდია. ჰიდრავლიკური ქანობის ნამდვილი მნიშვნელობა ნაკადის ნებისმიერ კვეთში ტოლია

$$\mathbf{I = -\frac{dhw}{d\ell} = -\frac{d}{d\ell}\left(Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}\right)}$$

განვიხილოთ პიეზომეტრული ქანობის ცნება. ცვლადი კვეთის ნაკადის სხვადასხვა უბანზე პიეზომეტრულ წირს შეიძლება ჰქონდეს როგორც პირდაპირი, ისე უკუქანობი. მუდმივი კვეთის ნაკადებში პიეზომეტრულ წირს აქვს პირდაპირი ქანობი. საშუალო პიეზომეტრული ქანობი განსახილველ უბანზე $\mathbf{I_3}$ ტოლია

$$\mathbf{I}_{\text{ჰსაშ}} = \frac{\mathbf{H}_{\delta 1} - \mathbf{H}_{\delta 2}}{\ell} = \frac{\left(\mathbf{Z}_1 + \frac{\mathbf{P}_1}{\gamma}\right) - \left(\mathbf{Z}_2 + \frac{\mathbf{P}_2}{\gamma}\right)}{\ell}.$$

პიეზომეტრული ქანობის ნამდვილი მნიშვნელობა ნაკადის განსახილველ კვეთში გამოითვლება ფორმულით

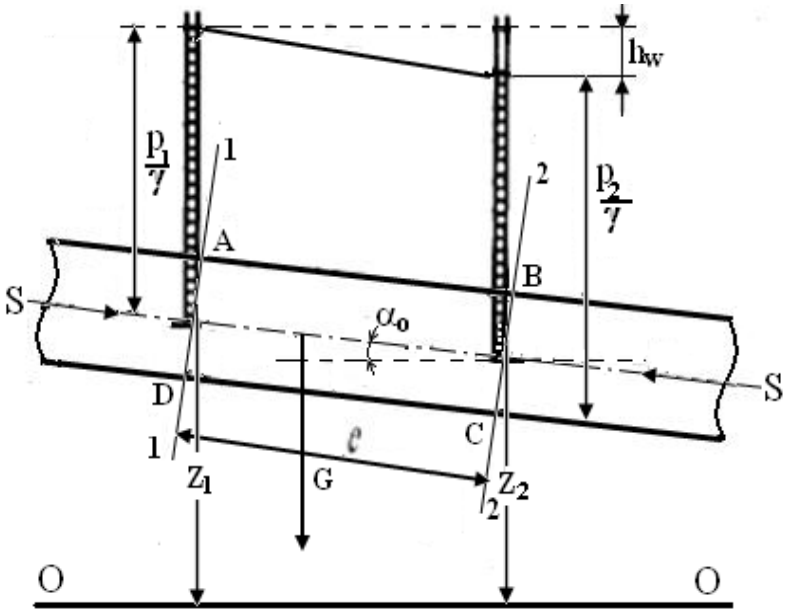
$$\mathbf{I}_{\text{ჰ}} = -\frac{\mathbf{dH}}{\mathbf{d}\ell} = -\frac{\mathbf{d}\left(\mathbf{Z} + \frac{\mathbf{P}}{\gamma}\right)}{\mathbf{d}\ell}.$$

1.3.9. სითხის თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლება

თანაბარი მოძრაობა შესაძლებელია იმ შემთხვევაში, როდესაც მოძრაობის აღმძვრელი ძალები და მოძრაობისადმი წინაღობის ძალები ერთმანეთს აწონასწორებენ.

განვიხილოთ თანაბრი მოძრაობა ნებისმიერი ფორმის ჰორიზონტისადმი α კუთხით დახრილ სადინარში (ნახ.1.13) ნაკადში 1-1 და 2-2 კვეთებით გამოვყოთ სითხის ℓ სიგრძის მონაკვეთი. ამ მონაკვეთზე მოქმედი მოძრაობის აღმძვრელი ძალებია ჰიდროდინამიკური წნევის ძალები

1-1 და 2-2 კვეთებში $\mathbf{P_1}$ და $\mathbf{P_2}$ და სიმძიმის ძალა ანუ გამოყოფილი სითხის წონა **G**.



ნახ.1.13

თანაბარი მოძრაობის დროს $\mathbf{P_1 = p_1 \cdot \omega}$ და $\mathbf{P_2 = p_2 \cdot \omega}$, სადაც $\mathbf{p_1}$ და $\mathbf{p_2}$ შესაბამის კვეთებში მოქმედი ჰიდროდინამიკური წნევებია. სიმძიმის ძალა ტოლია $\mathbf{Q = \omega \ell \chi}$. მოძრაობისადმი წინაღობის ძალებს მიეკუთვნება ნაკადისა და სადინარის კედელს შორის მოქმედი ხახუნის ძალა. სითხესა და კედელს შორის ფართობის ერთეულზე მოქმედი ხახუნის ძალა ანუ მხები ძაბვა აღვნიშნოთ τ_0-

ით. მაშინ ხახუნის ძალა $\mathbf{T=\tau_0\cdot\ell\cdot\chi}$. თანაბარი მოძრაობის პირობა ნაკადის ღეძის მიმართ შემდეგნაირად დაიწერება:

$$\mathbf{P_1 - P_2+Gsin\ \alpha=T}. \tag{1.29}$$

ჩავსვათ მნიშვნელობები, მივიღებთ

$$\mathbf{P_1\omega - P_2\omega + \frac{\gamma\omega\ell(z_1 - z_2)}{\ell} = \tau_0\chi\ell} \tag{1.30}$$

გავყოთ ეს გამოსახულება $\boldsymbol{\gamma\cdot\omega}$ ნამრავლზე, მივიღებთ

$$\left(\mathbf{z_1 + \frac{p_1}{\gamma}}\right) - \left(\mathbf{z_2 + \frac{p_2}{\gamma}}\right) = \mathbf{\frac{\tau_0\chi\ell}{\gamma\omega}}.$$

ამ გამოსახულების მარცხენა მხარე წარმოადგენს დაწნევის დანაკარგს თანაბარი მოძრაობის დროს (რადგანაც თანაბარი მოძრაობისას $\mathbf{V_1=V_2}$), ე.ი.

$$\mathbf{hw = \frac{\tau_0}{\gamma}\cdot\frac{\chi\ell}{\omega}}. \tag{1.31}$$

(1.31) განტოლება წარმოადგენს თანაბრი მოძრაობის ძირითად განტოლებას. იგი მართებულია როგორც დაწნევითი, ისე უდაწნეო ნაკდებისათვის. ამ განტოლებიდან

$$\mathbf{\tau_0 = \frac{hw}{\ell}\cdot\frac{\gamma\omega}{\chi}}$$

რადგანაც თანაბარი მოძრაობისას $\mathbf{I = \frac{hw}{\ell}}$, ხოლო $\mathbf{R = \frac{\omega}{\chi}}$, მივიღებთ,

$$\tau_0 = \gamma IR. \tag{1.32}$$

წრიული კვეთების შემთხვევაში, ჰიდრავლიკური რადიუსი $\mathbf{R} = \frac{\mathbf{r}}{\mathbf{2}}$. მაშინ სითხესა და კედელს შორის არსებული მხები ძაბვა იქნება

$$\tau_0 = \gamma I \frac{r_0}{2} \tag{1.33}$$

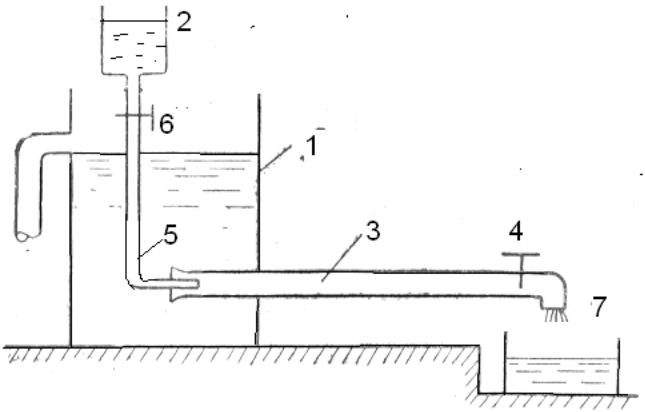
სადაც $\mathbf{r_0}$ მილის რადიუსია, ნებისმიერ $\mathbf{r}$ რადიუსზე მდებარე სითხის ორ ფენას შორის არსებული მხები ძაბვა ტოლი იქნება

$$\tau = \gamma I \frac{r}{2} \tag{1.34}$$

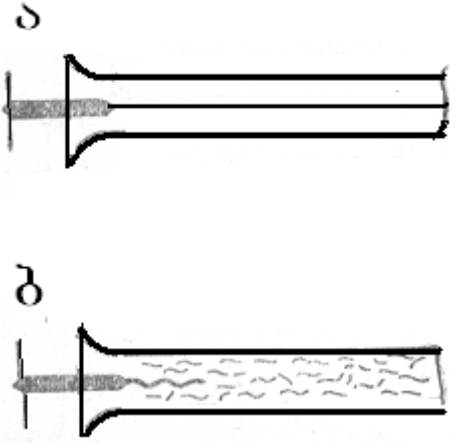
(1.32), (1.33) და (1.34) განტოლებებიც თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლებებია.

1.3.10. სითხის მოძრაობის ორი რეჟიმი

ბუნებაში არსებობს სითხის მოძრაობის ორი რეჟიმი: ლამინარული და ტურბულენტური. მოძრაობის ეს რეჟიმები ექსპერიმენტულად შეისწავლა ინგლისელმა მეცნიერმა რეინოლდსმა ხელსაწყოზე, რომლის სქემა მოცემულია (ნახ.1.14)



ნახ. 1.14



ნახ.1.15

იგი შედგება ძირითადი ავზისაგან 1, რომელიც ივსება სითხით. ამ ავზიდან გამოდის **d** დიამეტრის მილი 3,

რომლის ბოლოში მოწყობილია სიჩქარისა და ხარჯის მარეგულირებელი ონკანი 4. ხარჯის გაზომვა ხდება ავზის 7 საშუალებით. 3 მილის შესასვლელ კვეთს აქვს მდოვრე ძაბრისებრი ფორმა. შესასვლელ კვეთთან მიყვანილია ვიწრო მილი 5, რომელიც გამოდის 2 ავზიდან. ამ ავზში მოთავსებულია შეღებილი სითხე, რომელიც 6 ონკანის გაღების შემთხვევაში მიეწოდება 3 მილის შესასვლელ ნაწილში. გავხსნათ 4 ონკანი მცირედ. მაშინ 2 მილში გადენილი სითხის ხარჯი იქნება მცირე და შესაბამისად სითხის მოძრაობის სიჩქარეც იქნება მცირე. თუ გავხსნით 6 ონკანს და 3 მილში შევუშვებთ შეღებილ სითხეს დავინახავთ, რომ ის სწორხაზობრივი ჭავლის სახით გადაადგილდება 3 მილში ისე, რომ არ შეერევა ამ მილში მოძრავ სითხეს. ეს გვიჩვენებს, რომ პატარა სიჩქარეების დროს 3 მილში მოძრავი სითხის ნაწილაკები ურთიერთპარალელურად გადაადგილდებიან (ნახ. 1.15-ა) და მათ ურთიერთშერევას ადგილი არა აქვს. სითხის მოძრაობას, რომლის დროსაც გვაქვს პარალელური ჭავლური მოძრაობა, ლამინარული ეწოდება.

თანდათან მდოვრედ გავხსნათ 4 ონკანი ანუ მდოვრედ გავზარდოთ 3 მილში ძირითადი ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე. დავინახავთ, რომ შეღებილი სითხე გარკვეულ ზღვრულ სიჩქარემდე შეინარჩუნებს სწორხაზოვნებას; ხოლო, როდესაც სიჩქარე მიაღწევს ზღვრულ სიდიდეს, შეღებილი სითხის ნაწილაკები შეერევა ძირითად სითხეს

და შეღებავს მას. ეს გვიჩვენებს, რომ დაირღვა წრფივ ჭავლური მოძრაობა და ადგილი აქვს ნაწილაკების ურთიერთშერევას (ნახ. 1.15-ბ). სითხის მოძრაობის რეჟიმს, რომლის დროსაც ადგილი აქვს ნაწილაკების ინტენსიურ შერევას, ტურბულენტური მოძრაობა ანუ ტურბულენტური რეჟიმი ეწოდება. ცდების შედეგების ანალიზისა და განზომილებათა თეორიის საფუძველზე, რეინოლდსმა მიიღო უგანზომილებო კრიტერიუმი, რომლის საშუალებითაც ხდება მოძრაობის რეჟიმის დადგენა, რომელსაც რეინოლდსის რიცხვს უწოდებენ

$$\mathbf{Re} = \frac{\mathbf{vd}}{\boldsymbol{\nu}}, \qquad (1.35)$$

სადაც **v** საშუალო სიჩქარეა; **d** – დიამეტრი; **ν** – სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი.

(1.35) გამოსახულება მიღებულია წრიული კვეთებისათვის, რომელთა გეომეტრიული მახასიათებელია **d** დიამეტრი. სიჩქარეს რომლის დროსაც ხდება რეჟიმების შეცვლა, კრიტიკულ სიჩქარეს უწოდებენ. შესაბამის რეინოლდსის რიცხვს, რეინოლდსის რიცხვის კრიტიკულ მნიშვნელობას უწოდებენ. ასხვავებენ რეინოლდსის რიცხვის ქვედა და ზედა კრიტიკულ მნიშვნელობებს. ზედა კრიტიკული რიცხვის დროს ლამინარული ნაკადი გარდაიქმნება ტურბულენტურად, ხოლო ქვედა კრიტიკული რიცხვის დროს, ტურბულენტური ნაკადი გარდაიქმნება ლამინარულ ნაკადად. ავტორთა უმრავლესობის თანახმად

$\mathbf{Re_{კრ.ქვ}=2320}$, ხოლო $\mathbf{Re_{კრ.ზ}=13800}$. მათ შორის არის ე.წ. გარდამავალი ზონა, სადაც ლაბორატორიულ პირობებში შეიძლება შენარჩუნებულ იქნეს როგორც ტურბულენტური, ისე ლამინარული რეჟიმი. ამ დროს არ არის მყარი რეჟიმი. პრაქტიკაში რეინოლდსის რიცხვის კრიტიკული მნიშვნელობა მიღებულია 2320-ის ტოლად.

ზოგად შემთხვევაში, რეინოლდსის რიცხვი შეიძლება გამოითვალოს ჰიდრავლიკური რადიუსის მიხედვით

$$\mathbf{Re = \frac{vR}{\nu}}.$$

ღია უდაწნეო ნაკადებისათვის ჰიდრავლიკური რადიუსით გამოთვლილი რეინოლდსის რიცხვის კრიტიკული მნიშვნელობაა $\mathbf{Re_{კრ}=580}$.

1.3.11. სითხის მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი. სიჩქარისა და მხები ძაბვების განაწილება ლამინარულ ნაკადში. დაწნევის სიბრძეზე დანაკარგები ლამინარული მოძრაობის დროს

განვიხილოთ სითხის ლამინარული მოძრაობა r_0 რადიუსის მილში (ნახ.1.16) ნიუტონის ჰიპოთეზის თანახმად, მხები ძაბვები $\tau_0 = -\mu\frac{dU}{dr}$, ხოლო თანაბარი მოძრაობის ძირითადი ფორმულის თანახმად, $\tau_0 = \gamma I\frac{r}{2}$. ცხადია,

$$-\mu\frac{dU}{dr} = \gamma I\frac{r}{2}$$

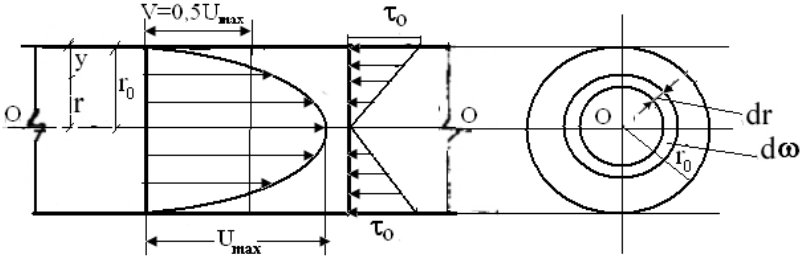
.

ცვლადთა განცალებით, მივიღებთ

$$\mathbf{dU = -\frac{\gamma I}{2\mu} r dr}.$$

ამ განტოლების ინტეგრირებით, საბოლოოდ მივიღებთ

$$\mathbf{U = \frac{\gamma I}{4\mu}(r_0^2 - r^2)} \qquad (1.36)$$



ნახ.1.16

(1.36) გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ ლამინარულ ნაკადში სიჩქარის განაწილება ხდება კვადრატული პარაბოლის კანონის მიხედვით. მაქსიმალურ სიჩქარეს ვღებულობთ მაშინ, როდესაც **r=0**, ე.ი. ნაკადის ღერძზე

$$\mathbf{U_{max} = \frac{\gamma I}{4\mu} r_0^2} \qquad (1.37)$$

მინიმალურ სიჩქარეს მივიღებთ, მაშინ როდესაც $\mathbf{r = r_0}$, $\mathbf{U_{min}=0}$.

მხები ძაბვების განაწილების კანონის მისაღებად გამოვიყენოთ (1.33) და (1.34) ფორმულები $\tau = \gamma \cdot I\frac{r}{2}$ და $\tau_0 = \gamma I\frac{r_0}{2}$ პირველის მეორესთან შეფარდებით მივიღებთ,

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{r}{r_0} \quad \text{აქედან} \quad \tau = \tau_0 \cdot \frac{r}{r_0} = \tau_0\left(1 - \frac{y}{r_0}\right). \qquad (1.38)$$

(1.38) გვიჩვენებს, რომ მხები ძაბვების განაწილება ლამინარულ ნაკადში ხდება სწორი ხაზის კანონით. მაქსიმალურ მნიშვნელობას ვღებულობთ მაშინ, როდესაც განსახილველი წერტილის დაშორება კედლიდან (ნახ.1.17) y=0. ე.ი. კედელთან $\tau = \tau_0$ მინიმალურ მნიშვნელობას ვღებულობთ, როცა $y = r_0$. ე.ი. ღერძზე $\tau = 0$.

ლამინარულ ნაკადში სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგების საანგარიშო ფორმულის მისაღებად ნაკადში რაიმე **r** რადიუსზე გამოვყოთ ელემენტარული ფართობი **dω** სისქით **dr**. ამ ფართობში გადენილი სითხის ხარჯი ტოლი იქნება

$$dQ = Ud\omega = \frac{\gamma \cdot I}{4\mu}\left(r_0^2 - r^2\right) \cdot 2\pi dr .$$

ნაკადის სრული ხარჯი ტოლი იქნება

$$Q = \frac{\pi\gamma I}{2\mu}\int_0^{r_0}\left(r_0^2 - r^2\right) r dr = \frac{\pi\gamma I}{8\mu} .$$

ნაკადის საშუალო სიჩქარე

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{\gamma I}{32\mu} d^2 \qquad (1.39)$$

ამ ფორმულის (1.37) ფორმულასთან შედარება გვაძლევს, რომ ლამინარულ ნაკადში $V = \frac{U_{max}}{2}$.

ცნობილია, რომ თანაბარი მოძრაობის დროს ენერგიის დანაკარგები $hw = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$, ხოლო $I = \frac{hw}{\ell}$-ის გათვალისწინებით, (1.39) განტოლებიდან მივიღებთ

$$hw = \frac{32\nu\ell \cdot V}{gd^2}$$

თუ ამ გამოსახულებას გავყოფთ და გავამრავლებთ $2V$-ზე და გავიხსენებთ, რომ $Re = \frac{Vd}{\nu}$, მაშინ მივიღებთ,

$$hw = \frac{64}{Re} \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}.$$

შემოვიტანოთ აღნიშვნა, $\lambda = \frac{64}{Re}$. λ-ს უწოდებენ წინაღობის დარსის კოეფიციენტს ან ჰიდრავლიკური ხახუნის კოეფიციენტს, ან სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგების კოეფიციენტს. ამის გათვალისწინებით, საბოლოოდ მივიღებთ სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგების საანგარიშო ფორმულას

$$hw = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}. \qquad (1.40)$$

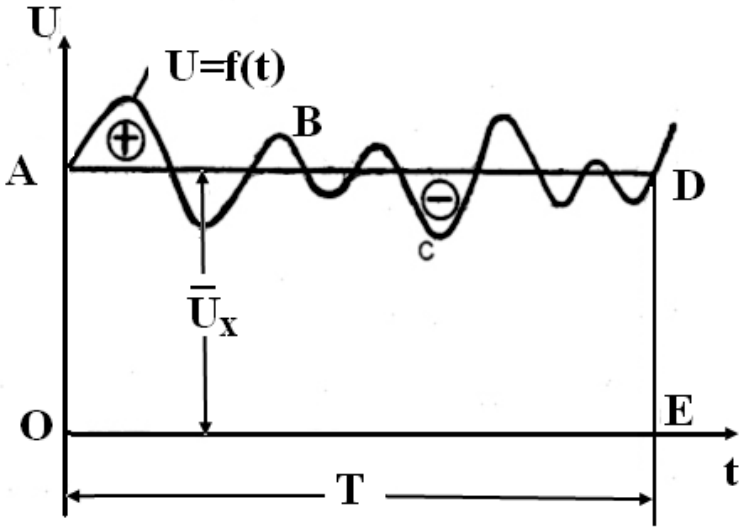
ამ ფორმულას დარსი-ვეისბახის ფორმულას უწოდებენ.

1.3.12. სითხის მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმი

1.3.12.1. სიჩქარის პულსაცია. გასაშუალოებული სიჩქარე. ლამინარული ქვეშრე. ჰიდრავლიკურად გლუვი და ხორკლიანი ზედაპირები

როგორც აღნიშნული იყო, ტურბულენტური ნაკადი ხასიათდება სითხის ნაწილაკების ინტენსიური და მოუწესრიგებელი შერევით. ამიტომ, ნაკადის ნებისმიერ წერტილში სითხის ნაწილაკების სიჩქარე დროში იცვლება როგორც სიდიდით, ისე მიმართულებით. სიჩქარის ამ ცვალებადობას, სიჩქარის პულსაცია ეწოდება. სიჩქარის მნიშვნელობას ნაკადის ნებისმიერ წერტილში დროის აღებულ მომენტში, მყისი სიჩქარე ეწოდება და აღინიშნება **U** ასოთი. სიჩქარის პულსაციის გათვალისწინება პრაქტიკული ამოცანების გადაწყვეტისას თითქმის შეუძლებელია, ამიტომ ჰიდრავლიკაში გამოიყენება ე.წ. გასაშუალოებული სიჩქარე $\overline{\mathbf{U}}$. ამ სიჩქარის არსის გასაგებად განვიხილოთ შემდეგი მაგალითი. ტურბულენტური ნაკადის ნებისმიერ წერტილში სიჩქარის ღერძული შემდგენის დროში ცვალებადობის გრაფიკული გამოსახულებაა **ABCD** ხაზი (ნახ.1.17), რომლის განტოლებაა $\mathbf{U = f(t)}$. ვიღოთ დროის საკმარისად დიდი ინტერვალი **T** და განვიხილოთ ინტეგრალი

$$\int_0^T U\ dt = \int_0^T f(t)dt\ .$$



ნახ.1.17

როგორც ცნობილია, ეს ინტეგრალი წარმოადგენს OABCDE მრუდწირული ნაკვთის ფართობს. თუ ამ ინტეგრალს გავყოფთ დროის **T** ინტერვალზე, რომელიც წარმოადგენს მრუდწირული ნაკვთის ფუძეს, მივიღებთ ABDEO მართკუთხედის საშუალო სიმაღლეს, რომელიც განსახილველ წერტილში გასაშუალებულ სიჩქარეა

$$\overline{U} = \frac{1}{T}\int_0^T U\ dt$$

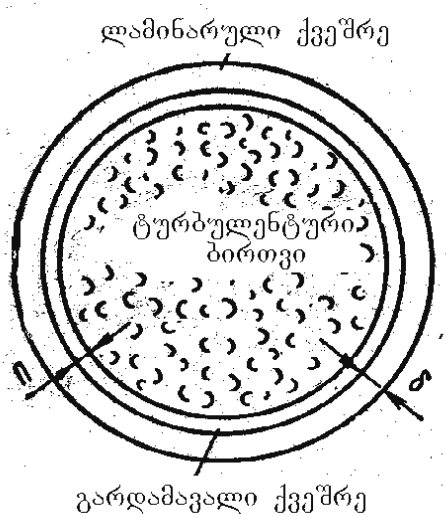
ამრიგად, გასაშუალებული სიჩქარე საშუალო სიჩქარისაგან განსხვავებით, წარმოადგენს მყისი სიჩქარეების დროში გასაშუალოებულ სიდიდეს.

მყისი სიჩქარისა და გასაშუალოებული სიჩქარის სხვაობას, პულსაციის სიჩქარე ეწოდება და აღინიშნება $\mathbf{U'}$ ასოთი

$$\mathbf{U' = U - \overline{U}}\,.$$

პრანდტლის, ნიკურაძისა და სხვა მეცნიერთა ექსპერიმენტული და თეორიული კვლევების საფუძველზე თვლიან, რომ ტურბულენტურ ნაკდში სადინარის კედლის უშუალო სიახლოვეს წარმოიქმნება ძალიან თხელი შრე, სადაც მოძრაობა თითქმის ლამინარულია. ამ შრეს, ლამინარულ ქვეშრეს უწოდებენ. ამ შრის შემდგომ არსებობს ასევე ძალიან თხელი გარდამავალი შრე. შადაც მოძრაობა ხან ლამინარულია, ხან ტურბულენტური. ლამინარული ქვეშრე და გარდამავალი შრე ერთად აღებული წარმოადგენს სასაზღვრო შრეს. ნაკადის დანარჩენ ძირითად ნაწილში მოძრაობა მკვეთრად ტურბულენტურია და მას ტურბულენტურ ბირთვს უწოდებენ (ნახ.1.18) ლამინარული ქვეშრის სისქე იცვლება რეინოლდსის რიცხვის მიხედვით და გამოითვლება ფორმულით

$$\delta = \frac{\mathbf{30 \cdot d}}{\mathbf{Re}\sqrt{\boldsymbol{\lambda}}}$$

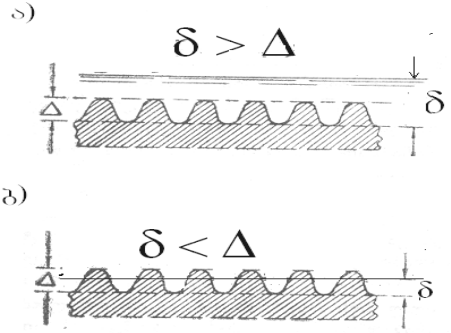


ნახ.1.18

ნაკადის შემომსაზღვრელ სადინარის კედლებს ყოველთვის აქვს გარკვეული ხორკლიანობა, რომელსაც ახასიათებენ ხორკლების შვერილების საშუალო სიმაღლით **Δ.** მას აბსოლუტურ ხორკლიანობას უწოდებენ. ასეთ იდეალიზებულ ხორკლიანობას, თანაბარმარცვლიანი ეწოდება. აბსოლუტური ხორკლიანობის ფარდობას მილის რადიუსთან ან დიამეტრთან ($\frac{\Delta}{r};\frac{\Delta}{d}$), ფარდობითი ხორკლიანობა ეწოდება, მის შებრუნებულ სიდიდეს კი – ფარდობითი სიგლუვე.

აბსოლუტური ხორკლიანობისა და ლამინარული ქვეშრის სიდიდის მიხედვით ასხვავებენ ჰიდრავლიკურად

გლუვ, ჰიდრავლიკურად ხორკლიან და გარდამავალ ზედაპირებს (ნახ.1.19)



ნახ.1.19

თუ ლამინარული ქვეშრის სისქე **δ** მეტია ხორკლების შვერილების სიმაღლეზე, ანუ როდესაც ლამინარული ქვეშრე ფარავს ხორკლებს, მაშინ ამბობენ, რომ გვაქვს ჰიდრავლიკურად გლუვი ზედაპირი. იმ შემთხვევაში, როდესაც **δ<Δ** ანუ, როდესაც ხორკლები გამოდის ლამინარული ქვეშრიდან, გვაქვს ჰიდრავლიკურად ხორკლიანი ზედაპირი. რადგან ლამინარული ქვეშრის სისქე იცვლება რეინოლდსის რიცხვზე დამოკიდებულებით, ამიტომ გლუვი და ხორკლიანი ზედაპირები პირობითი ცნებაა. თუ **δ** და Δ დაახლოებით ერთნაირია, მაშინ ზედაპირს გარდამავალი წინაღობის ზონას მიაკუთვნებენ.

1.3.12.2. დამატებითი მხები ძაბვების წარმოქმნა ტურბულენტურ ნაკადში. სიჩქარის განაწილება ტურბულენტურ ნაკადში

ტურბულენტური მოძრაობის თავისებურებებმა საფუძველი მისცა პრანდტლის, კარმანს და სხვა მეცნიერებს წამოეყენებინათ ე.წ. ნახევრად ემპირიული თეორია, რომელიც ეყრდნობა ტურბულენტური მხები ძაბვის ცნებას. ამ ძაბვების მოქმედება პირობითად ცვლის ტურბულენტური ურთიერთშერევის მოქმედებას. როგორც ვიცით, ტურბულენტურ ნაკადში ნაწილაკების გრძივ გადაადგილებასთან ერთად, ადგილი აქვს მათ განივ გადაადგილებას სითხის ერთი ფენიდან მეორეში. ნაწილაკების ასეთი გადაადგილება განაპირობებს სითხის ფენებს შორის მოძრაობის რაოდენობის გაცვლას. ეს უკანასკნელი კი, თავის მხრივ, იწვევს მხები ძაბვების წარმოქმნას. ეს დამატებითი მხები ძაბვები შეიძლება გამოვთვალოთ შემდეგი ფორმულით:

$$\tau = \rho \ell^2 \left(\frac{dU_x}{dy} \right)^2,$$

სადაც ℓ პრანდტლის მიხედვით წარმოადგენს ე.წ. ტურბულენტური შერევის გზის სიგრძეს. ამრიგად, ტურბულენტურ ნაკადში გვაქვს როგორც სიბლანტით გამოწვეული მხები ძაბვები, ისე ტურბულენტური შერევით გამოწვეული მხები ძაბვები

$$\tau = \tau_{\text{სიბლ}} + \tau_{\text{დამ}} = \mu \frac{dU_x}{dy} + \rho \ell^2 \left(\frac{dU_x}{dy} \right)^2 .$$

ლამინარული მოძრაობის დროს $\ell=0$, დამატებითი ძაბვები ნულის ტოლია და გვაქვს მხოლოდ სიბლანტით გამოწვეული მხები ძაბვები.

განვითარებული ტურბულენტური მოძრაობისას დამატებითი მხები ძაბვები ბევრად აღემატება სიბლანტით გამოწვეულ მხებ ძაბვებს. ამიტომ, ამ უკანასკნელს უგულებელყოფენ და მხედველობაში მიიღებენ მხოლოდ ტურბულენტური შერევით გამოწვეულ მხებ ძაბვებს.

პრანდტლის დაშვების მიხედვით $\ell = \chi \, y$. სადაც, χ არის ე.წ. პრანტდლის მუდმივა, ხოლო y განსახილველი წერტილის დაშორება კედლიდან (ნახ.1.20.).

ამის გათვალისწინებით ტურბულენტური ნაკადისათვის მივიღებთ, $\tau = \rho \chi^2 y^2 \left(\frac{dU_x}{dy} \right)^2$. თუ დავუშვებთ, რომ $\tau = \tau_0$, გვექნება $\tau_0 = \rho \chi^2 y^2 \left(\frac{dU_x}{dy} \right)^2$, აქედან

$$dU_x = \frac{1}{\chi} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \frac{dy}{y} \qquad (1.41)$$

$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ სიდიდეს აქვს სიჩქარის განზომილება, ამიტომ მას დინამიკურ სიჩქარეს უწოდებენ და აღნიშნავენ U_* ასოთი, ე.ი. $U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$

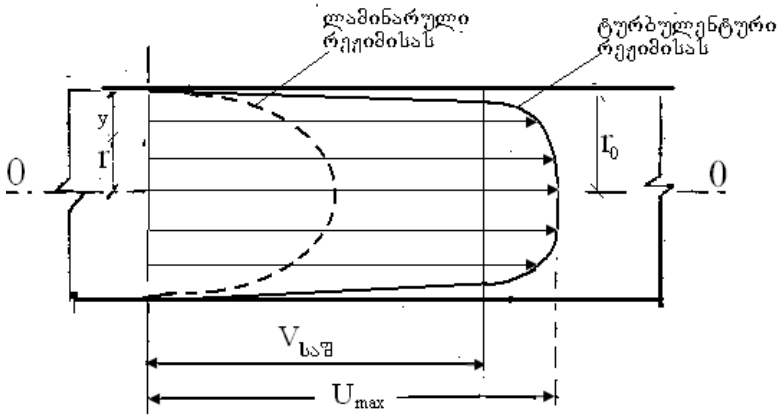
(1.41) განტოლების ინტეგრირება გვაძლევს

$$U = \frac{U_*}{\chi} \ln y + C \qquad (1.42)$$

(1.42) განტოლება გვიჩვენებს, რომ ტურბულენტურ ბირთვში სიჩქარის განაწილება ხდება კედლიდან დაშორების ნატურალური ლოგარითმის კანონით. აქვე აღვნიშნოთ, რომ ტურბულენტურ ბირთვში მასების ინტენსიური შერევის გამო ხდება სიჩქარის განაწილების გათანაბრება ლამინარულ ნაკადთან შედარებით (ნახ.1.20) საშუალო სიჩქარის სიდიდე უახლოვდება მაქსიმალურ სიჩქარეს.

$$V=(0,75\text{-}0,9)U_{max},$$

რაც შეეხება ლამინარულ ქვეშრეს, იქ სიჩქარე უშუალოდ კედელთან ნულის ტოლია, შემდეგ კი იზრდება შრის საზღვართან არსებულ გარკვეულ სიჩქარემდე.



ნახ.1.20

(1.42) განტოლებაში ინტეგრირების მუდმივას განსაზღვრის მიზნით განვიხილოთ სასაზღვრო პირობები, როდესაც $\mathbf{y = r_0}$, ე.ი. ნაკადის ღერძზე გვაქვს მაქსიმალური სიჩქარე $\mathbf{U_{max}}$, ამიტომ $\mathbf{C = U_{max} - \frac{U_*}{\chi} ln r_0}$, თუ **C**-ს ამ მნიშვნელობას შევიტანთ 1.42 გამოსახულებაში და ნატურალური ლოგარითმიდან გადავალთ ათობით ლოგარითმზე და დავუშვებთ, რომ $\boldsymbol{\chi \approx 0{,}4}$, მივიღებთ

$$\mathbf{U = U_{max} - 5{,}75 U_* lg \frac{r_0}{y}}$$

მაქსიმალური სიჩქარე შეიძლება განისაზღვროს პრანდტლის ფორმულით

$$\mathbf{U_{max} = D \cdot U_* + V},$$

სადაც $\mathbf{V}$ ნაკადის საშუალო სიჩქარეა, ხოლო $\mathbf{D = \frac{U_{max} - V}{U_*}}$ წარმოადგენს ე.წ. საშუალო სიჩქარის დეფიციტს.

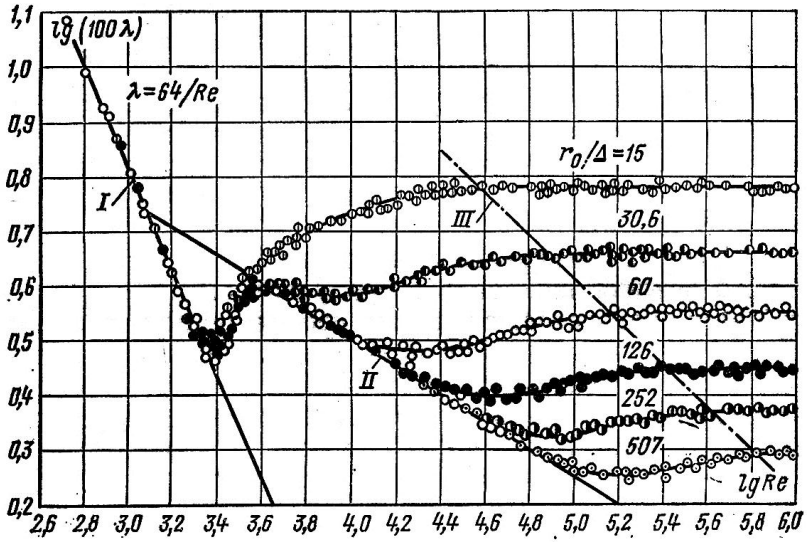
1.3.12.3. სიბრძეზე ენერგიის ანუ დაწნევის დანაკარგები ტურბულენტურ ნაკადში

წრიული კვეთის სადაწნეო მილსადენებისათვის დაწნევის ანუ ენერგიის დანაკარგები სიგრძეზე ტურბულენტურ ნაკადში გამოითვლება დარსი-ვეისბახის ფორმულით, ისე როგორც ლამინარულ ნაკადში. ე.ი.

$$\mathbf{h_{W_l} = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}}.$$

მრავალრიცხოვანი ცდებით დადგენილია, რომ წინაღობის კოეფიციენტი λ ტურბულენტური მოძრაობის დროს დამოკიდებულია რეინოლდსის რიცხვსა და ფარდობით ხორკლიანობაზე $\lambda = \mathbf{f}\left(\mathbf{Re}, \frac{\Delta}{\mathbf{r_0}}\right)$; ამასთან, წინაღობის თითოეული ზონისათვის λ გამოითვლება სპეციალური ფორმულებით. λ კოეფიციენტის ცვლილების კანონზომიერებათა დასადგენად ი. ნიკურაძემ სხვადასხვა ხორკლიანობის მილებში ჩაატარა ფართო და დეტალური ექსპერიმენტული კვლევები, რომელთა შედეგები მოცემულია გრაფიკის სახით და ცნობილია ნიკურაძის გრაფი-

კის სახელწოდებით (ნახ.1.21.) გრაფიკზე გამოიყოფა შემდეგი ზონები:



ნახ. 1.21

პირველი ზონა (გრაფიკზე შეესაბამება 1 წრფე) მიეკუთვნება სითხის მოძრაობის ლამინარულ რეჟიმს. იგი გვიჩვენებს, რომ ლამინარული მოძრაობის დროს წინაღობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე.

მეორე ზონა მოთავსებულია 1 და II წრფეებს შორის და შეესაბამება ლამინარულიდან ტურბულენტურში გარდამავალ რეჟიმს. ამ ზონაშიც წინაღობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე.

მესამე ზონას გამოსახავს II ხაზი. იგი მიეკუთვნება სითხის მოძრაობის ტურბულენტურ რეჟიმს გლუვი ზედაპირების შემთხვევაში. ამ ზონაშიც λ დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე.

მეოთხე ზონა მოთავსებულია II და III წრფეებს შორის. იგი შეესაბამება გლუვიდან ხორკლიან ზედაპირში გარდამავალ წინაღობის ზონას. ამ ზონაში λ დამოკიდებულია როგორც რეინოლდსის რიცხვზე, ისე ხორკლიანობაზე.

მეხუთე ზონა მოთავსებულია III ხაზის მარჯვნივ. იგი შეესაბამება ჰიდრავლიკურად ხორკლიანი ზედაპირების ზონას, რომელსაც აგრეთვე კვადრატული წინაღობის ზონასაც უწოდებენ (რადგანაც დაწნევის დანაკარგები ამ ზონაში სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია). ამ ზონაში λ დამოკიდებულია მხოლოდ ხორკლიანობაზე.

როგორც აღვნიშნეთ, ლამინარული მოძრაობის დროს

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

ტურბულენტური მოძრაობის შემთხვევაში, წინაღობის გლუვი ზედაპირების ზონისათვის, როდესაც $Re < 100\ 000$, წინაღობის კოეფიციენტი λ გამოითვლება ბლაზიუსის ფორმულით

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{Re^{0{,}25}}, \qquad (1.43)$$

ხოლო, როდესაც $\mathbf{Re > 100\ 000}$ λ გამოითვლება კონაკოვის ფორმულით

$$\lambda = \frac{1}{(1{,}8 \lg Re - 1{,}52)^2} \tag{1.44}$$

წინაღობის გარდამავალი ზონისათვის წინაღობის კოეფიციენტი შემდეგი ფორმულით გამოითვლება:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[0{,}27 \frac{\Delta}{d} + \left(\frac{6{,}81}{Re} \right)^{0{,}9} \right], \tag{1.45}$$

კვადრატული წინაღობის ზონისათვის სარგებლობენ ი. ნიკურაძის ფორმულით

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{r_0}{\Delta} + 1{,}74 \right)^2} \tag{1.46}$$

პრაქტიკაში ხშირად გამოიყენება ალტშულის ფორმულა, რომელიც მართებულია წინაღობის ყველა ზონისათვის

$$\lambda = 0{,}11 \left(\frac{\Delta_{ეკვ}}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0{,}25}, \tag{1.47}$$

სადაც, $\Delta_{ეკვ}$ – ეკვივალენტური ხორკლიანობაა, ანუ ისეთი თანაბარი ხორკლიანობა, რომელიც გაანგარიშების დროს გვაძლევს მოცემული ხორკლიანობის შესაბამის λ მნიშვნელობას.

1.3.12.4. საშუალო სიჩქარის საანგარიშო შეზის ფორმულა. შეზის კოეფიციენტების საანგარიშო ფორმულები

დარსი ვეისბახის ფორმულას მივცეთ შემდეგი სახე

$$\mathbf{h_w = \lambda \frac{\ell}{4R} \cdot \frac{\upsilon^2}{2g}}.$$

ამ ფორმულიდან განვსაზღვროთ საშუალო სიჩქარე

$$\upsilon = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot h_w}{\ell}}.$$

შემოვიტანოთ აღნიშვნა, რომ $\mathbf{C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}}$. აგრეთვე გავითვალისწინოთ, რომ თანაბარი მოძრაობის დროს ჰიდრავლიკური ქანობი ტოლია $\mathbf{I = \frac{h_w}{\ell}}$, მაშინ მივიღებთ

$$\upsilon = C\sqrt{RI} \quad . \qquad (1.48)$$

(1.48) წარმოადგენს საშუალო სიჩქარის საანგარიშო შეზის ფორმულას თანაბარი მოძრაობისათვის. რადგან თანაბარი მოძრაობის დროს ჰიდრავლიკური ქანობი და სადინარის ფსკერის გეომეტრიული ქანობი ერთმანეთის ტოლია, შეგვიძლია დავწეროთ, რომ

$$\upsilon = C\sqrt{Ri}$$

შესაბამისი გარდაქმნით, მივიღებთ

$$\mathbf{h_w = \frac{\upsilon^2 \ell}{C^2 R}} \qquad (1.49)$$

(1.49) წარმოადგენს სიგრძეზე ენერგიის დანაკარგების საანგარიშო ფორმულას ღია კალაპოტისათვის.

იმისათვის, რომ (1.49) ფორმულა გამოვიყენოთ, საჭიროა შეზის კოეფიციენტის მნიშვნელობის დადგენა. შემოთავაზებულია შეზის კოეფიციენტის საანგარიშო ბევრი ემპირიული ფორმულა. პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება შემდეგი ფორმულები: მანინგის ფორმულა

$$\mathbf{C = \frac{1}{n} R^{1/6}} \quad , \qquad (1.50)$$

სადაც **n** არის ხორკლიანობის კოეფიციენტი. მისი მნიშვნელობა სხვადასხვა სახის ზედაპირებისათვის აიღება ცხრილიდან. მაგალითად, ფოლადის სუფთა მილებისათვის **n=0.014**, ხოლო რამდენიმე წლის ექსპლუატაციის შემდეგ **n=0.2**; რკინის ახალი მილებისათვის **n=0.15**, რამდენიმე წლის ექსპლუატაციის შემდეგ კი **n=0.5**.

პავლოვსკის ფორმულა

$$\mathbf{C = \frac{1}{n} R^{y}} \qquad (1.51)$$

ხორკლიანობის კოეფიციენტის **n** მნიშვნელობა აიღება ცხრილებიდან, ხოლო ხარისხის მაჩვენებელი **y** შეიძლება გამოვითვალოთ მიახლოებითი ფორმულებით

$\mathbf{y \approx 1{,}5\sqrt{n}}$, როდესაც **R<1** მ;

$\mathbf{y \approx 1{,}3\sqrt{n}}$, როდესაც **R>1** მ.

1.3.12.5. დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგების განსაზღვრა ტურბულენტური მოძრაობის დროს

რეალური სითხის მოძრაობისას სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგებთან ერთად ადგილი აქვს დაწნევის ადგილობრივ დანაკარგებს. ადგილობრივ დანაკარგებს იწვევს ადგილობრივი წინაღობები. სადაწნეო მილსადენებში ადგილობრივი წინაღობებია: ნაკადის უეცარი გაფართოება ან შევიწროება, მოხვეულობა, განშტოება, დიაფრაგმა, საკეტი და სხვ; ხოლო ღია კალაპოტებში: გადასასვლელი უბანი, მოხვეულობა და იქ წარმოქმნილი განივი ცირკულაცია, ბურჯი, წყალმიმღების გისოსი, ნაკადების შეერთება ან გაყოფა, სხვადასხვა კონსტრუქციის ზღურბლი და სხვ. ნებისმიერი წინაღობის გადალახვისას ნაკადი კარგავს გარკვეულ ენერგიას. რადგან ადგილობრივი წინაღობები ინდივიდუალურია, მათში წარმოქმნილი ენერგიის დანაკარგების საანაგრიშო ზოგადი თეორიული ფორმულა არ არსებობს. მიღებულია რომ დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგები განისაზღვროს ვეისბახის ცნობილი ფორმულით

$$\mathbf{h_w = \zeta \frac{v^2}{2g}} \qquad (1.52)$$

სადაც ζ არის ადგილობრივი წინაღობის კოეფიციენტი, რომელიც გვიჩვენებს თუ რამდენი სიჩქარული დაწნევა იხარჯება ამა თუ იმ წინაღობის გადალახვაზე. მისი

მნიშვნელობა, როგორც წესი, განისაზღვრება ცდებით და მოცემულია ცხრილებში.

v არის ნაკადის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე. ღორც წესი, აიღება წინაღობის შემდეგ არსებული საშუალო სიჩქარე.

გამონაკლისს წარმოადგენს მილსადენის უეცარი გაფართოება, რომლის დროსაც დაწნევის დანაკარგები საკმარისი სიზუსტით შეიძლება გამოვთვალოთ ბორდას თეორიული ფორმულით

$$\mathbf{h_w = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}}.$$

1.3.12.6. სისტემის წინაღობის კოეფიციენტი

იმ შემთხვევაში, როდესაც მილსადენზე განლაგებულია რიგი ადგილობრივი წინაღობა, რომლებიც ხასიათდება ადგილობრივი წინაღობის კოეფიციენტებით $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3 \ldots \zeta_n$ და მილსადენის განსახილველ უბანზე მუდმივია დიამეტრი და სითხის ხარჯი, მაშინ დაწნევის საერთო დანაკარგები შეიძლება განვსაზღვროთ ადგილობრივი დანაკარგების არითმეტიკული შეკრებით. არდა ამისა, აუცილებელია სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგების განსაზღვრა, ე.ი. თუ გვაქვს

$$\mathbf{h_{w1} = \zeta_1 \frac{v^2}{2g}}$$

$$h_{w2} = \zeta_2 \frac{v^2}{2g}$$

.....

$$h_{wn} = \zeta_n \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{w1} = \lambda \frac{\ell}{d_1} \frac{v^2}{2g},$$

მათი შეკრებით, მივიღებთ

$$h_w = (\zeta_1 + \zeta_2 + ... + \zeta_n + \lambda \frac{\ell}{d}) \frac{v^2}{2g}.$$

ფრჩხილებში მოთავსებულ წევრს უწოდებენ სისტემის წინაღობის კოეიფციენტს, ე. ი. $\zeta_{სის} = \zeta_1 + \zeta_{2+} ..... + \zeta_n + \lambda \frac{\ell}{d}$

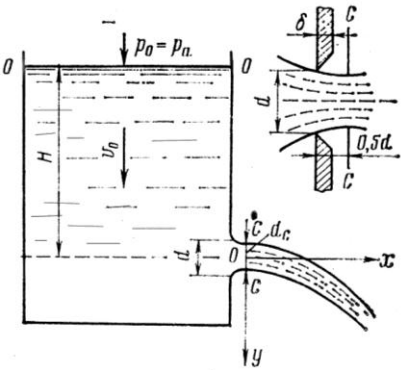
და $h_w = \zeta_1 \frac{v^2}{2g}$.

IV თავი. სითხის გამოდინება ხვრეტებიდან და ნაცმებიდან

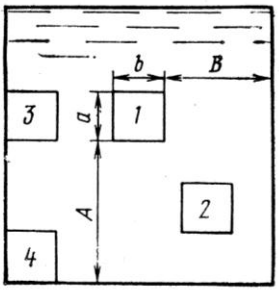
1.4.1. გამოდინება თხელკედლიანი მცირე სვეტებიდან მუდმივი დაწნევისას

საინჟინრო პრაქტიკაში ხშირად გვხვდება სითხის გამოდინება სხვადასხვა ზომისა და ფორმის ხვრეტებიდან, აგრეთვე ხვრეტთან მიერთებული მოკლე მილებიდან, რომლებსაც ნაცმებს უწოდებენ. თუ რეზერვუარს ფსკერზე ან კედელზე გავუკეთებთ ხვრეტს, ცხადია, სითხე დაიწყებს გამოდინებას ამ ხვრეტიდან. იმ შემთხვევაში, როდესაც რეზერვუარში ჩადენილი სითხის ხარჯი და ხვრეტიდან გამოდენილი სითხის ხარჯი ერთმანეთის ტოლია, მაშინ სითხე რეზერვუარში მუდმივ დონეზე დადგება **H=Const** (ნახ.1.22) და გვექნება გამოდინება მუდმივი დაწნევის დროს. ხოლო, თუ მიწოდებული და გამოდენილი ხარჯი ერთმანეთის ტოლი არ არის, მაშინ გვაქვს გამოდინება ცვლადი დაწნევის დროს. **H**-ს უწოდებენ დაწნევას ხვრეტის ცენტრზე.

ტერმინი – თხელი კედელი არ გულისხმობს კედლის ფიზიკურ სისქეს, არამედ იგულისხმება, რომ ხვრეტის კედლებს უკეთდება მახვილი ბოლო (ნახ. 1.22) და კედლის სისქე ვერ ახდენს გავლენას ხვრეტიდან გამოდენილი ჭავლის ფორმასა და ხარჯზე.



ნახ.1.22



ნახ. 1.23

ხვრეტს ეწოდება მცირე, თუ წრიული **d** დიამეტრის ან **a** სიმაღლის ხვრეტის შემთხვევებში დაცულია **d≤0,1H** და **a≤0,1H** პირობები. ამ შემთხვევაში შეგვიძლია დავუშვათ, რომ დაწნევა ხვრეტის ნებისმიერ წერტილში ერთნაირია.

სითხის გამოდინება შეიძლება იყოს თავისუფალი ანუ დაუტბორავი (გამოდინება ატმოსფეროში) და არათავისუფალი ანუ დატბორილი (გამოდინება დონის ქვეშ).

განვიხილოთ გამოდინება მცირე, თხელკედლიანი და თავისუფალი ხვრეტიდან მუდმივი დაწნევის დროს. Vინაიდან სითხის ნაწილაკების მოძრაობის ტრაექტორია მრუდწირულია, ხვრეტის ცენტრში დენის წირები არ არის ურთიერთპარალელური. ამასთან ერთად, ჭავლის ცოცხალი კვეთი განიცდის შეკუმშვას. ხვრეტიდან დაახლოებით **0,5d** მანძილზე შეკუმშვა მთავრდება. ამ კვეთში

დენის წირები თითქმის პარალელურია და ამ კვეთს შეკუმშულ კვეთს უწოდებენ. ხვრეტის ფართობი აღვნიშნოთ **ω** ასოთი, ხოლო შეკუმშული ხვრეტის ფართობი **ωC** ასოთი. შეკუმშული კვეთის ფართობის შეფარდებას ხვრეტის ფართობთან, კუმშვის კოეფიციენტს უწოდებენ

$$\varepsilon = \frac{\omega_C}{\omega}. \qquad (1.53)$$

გამოვთვალოთ ხვრეტიდან გამოდენილი სითხის სიჩქარე და ხარჯი. ამისათვის დავწეროთ ბერნულის განტოლება 0-0 და C-C კვეთებისათვის (ნახ. 1.22). საფარდ სიბრტყედ ავირჩიოთ ხვრეტის ცენტრზე გამავალი სიბრტყე, მივიღებთ $\mathbf{H + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = \frac{P_c}{\gamma} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + h_w}$

ხვრეტიდან გამოდინება მიეკუთვნება მოძრაობის ისეთ შემთხვევას, როდესაც გვაქვს მხოლოდ ადგილობრივი დანაკარგები, ე. ი. $\mathbf{h_w = \zeta \cdot \frac{v_c^2}{2g}}$. თუ რეზერვუარი ღიაა და გამოდინება ხდება ატმოსფეროში, მაშინ $\mathbf{P_0 = P_C = P_{ატმ}}$. რადგან გვაქვს გამოდინება, მუდმივი დაწნევის დროს შეგვიძლია დავუშვათ, რომ $\mathbf{v_0 \approx 0}$. მაშინ ბერნულის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს

$$\mathbf{H = \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + \zeta \frac{v_c^2}{2g} = (\alpha_c + \zeta) \frac{v_c^2}{2g}}.$$

აქედან ჭავლის სიჩქარე C-C კვეთში იქნება

$$\upsilon_c = \sqrt{\frac{1}{\alpha_c + \zeta}} - \sqrt{2gH}\,.$$

შემოვიტანოთ აღნიშვნა

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{\alpha_c + \zeta}}\,.$$

φ-ს უწოდებენ სიჩქარის კოეფიციენტს, რომელიც ითვალისწინებს ენერგიის, ანუ დაწნევის დანაკარგებს. ამის გათვალისწინებით, გვექნება

$$\mathbf{v_c = \varphi\sqrt{2gH}}\,.$$

ხვრეტიდან გამოდენილი ჭავლის ხარჯი იქნება

$$\mathbf{Q = \omega_c \cdot v_c = \omega_c \varphi\sqrt{2gH}}\,.$$

(1.53) გამოსახულებიდან $\mathbf{\omega_c = \varepsilon \cdot \omega}$, მაშინ

$$\mathbf{Q = \omega \varepsilon \mu\sqrt{2gH}}$$

აღვნიშნოთ $\mathbf{\mu = \varepsilon \cdot \varphi}$ მას ხარჯის კოეფიციენტს უწოდებენ. მისი გათვალისწინებით მივიღებთ, რომ ხარჯი

$$\mathbf{Q = \mu\omega\sqrt{2gH}}\,. \qquad (1.54)$$

ხვრეტიდან გამოდენილი ჭავლის კუმშვის ხარისხი დამოკიდებულია ხვრეტის მდებარეობაზე. თუ ჭავლი განიცდის კუმშვას ყოველი მხრიდან, მაშინ გვაქვს ე. წ. სრული კუმშვა (ნახ. 1.23) თუ ხვრეტის კონტური ემიჯნება ჭურჭლის ერთ ან რამდენიმე მიმმართველ კედელს, მაშინ იგი ამ კედლის მხრიდან არ განიცდის კუმშვას და

მას არასრულ კუმშვას უწოდებენ. სრული კუმშვის შემთხვევაში თუ დაცულია პირობა, რომ $\mathbf{A > 3b}$ და $\mathbf{B > 3a}$ (ნახ. 1.23) მაშინ გვაქვს სრულყოფილი კუმშვა; თუ $\mathbf{A < 3b}$ და $\mathbf{B < 3a}$, მაშინ კუმშვა არასრულყოფილია.

სრულყოფილი კუმშვის შემთხვევაში $\boldsymbol{\varepsilon = 0{,}6 \div 0{,}64}$, ხოლო $\boldsymbol{\mu = 0{,}6 \div 0{,}62}$.

1.4.2. სითხის გამოდინება ნაცმებიდან

ნაცმი ეწოდება მოკლე მილს, რომელიც მიერთებულია თხელკედლიან ხვრეტთან. ნაცმის შესასვლელ ნაწილში სითხის ნაწილაკების ტრაექტორიების სიმრუდის გამო, ჭავლი განიცდის კუმშვას, ამიტომ იგი დასაწყისში მთლიანად ვერ ავსებს ნაცმის განივკვეთს და წარმოქმნის ე. წ. შეკუმშულ კვეთს, შემდგომ კი ფართოვდება და მთლიანად ავსებს კვეთს. შეკუმშული კვეთის სიახლოვეს წარმოიქმნება ე. წ. „გრიგალური მორევი“. თუ გამოდინება გვაქვს ატმოსფეროში, მაშინ „გრიგალური მორევის“ ადგილზე გაჩნდება ვაკუუმი. ამის გამო, მოხდება წყლის დამატებით რაოდენობის „შეწოვა“ რეზერვუარიდან თხელკედლიან ხვრეტთან შედარებით, ე.ი. იზრდება ნაცმში შედენილი წყლის ხარჯი. (ნახ. 1.24). მაგრამ ნაცმში, თხელკედლიან ხვრეტთან შედარებით, დამატებით წარმოიქმნება ენერგიის დანაკარგები სიგრძეზე. ცდებით დადგენილია, რომ ნაცმის შემთხვევაში

ვაკუუმით გამოწვეულ ხარჯის ზრდის მაქსიმალურ ეფექტს ვიღებთ მაშინ, როდესაც ნაცმის სიგრძე $\ell = (3 \div 4)d$.

ნაცმები ძირითადად იყოფა სამ ჯგუფად: ცილინდრული, კონუსური და კონოიდური. თავის მხრივ, ცილინდრული ნაცმი შეიძლება იყოს შიგა ცილინდრული და გარე ცილინდრული (ნახ. 1.24. ა და ბ). გარე ცილინდრულ ნაცმში ჭავლი გარე კუმშვას არ განიცდის, ამიტომ ამ ნაცმისავის $\varepsilon=1$ და $\mu=0,82$. ნაცმში წარმოქმნილი ვაკუუმის სიდიდე

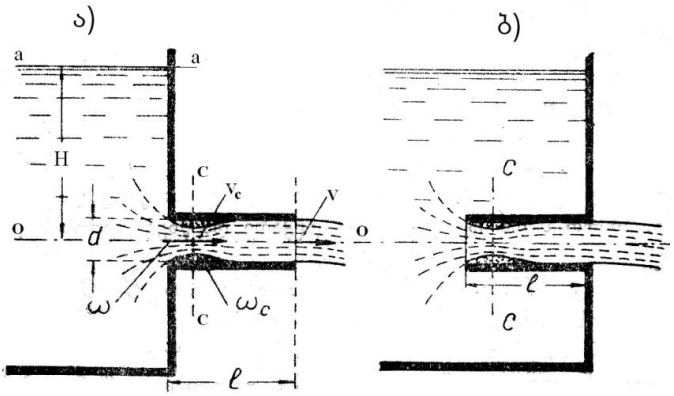
$$h_{ვაკ} \approx 0,75H.$$

აქედან გამომდინარე, გარე ცილინდრულ ნაცმზე დასაშვები ზღვრული დაწნევა ტოლია

$$H_{ზვ} = \frac{h_{ვაკ.ზვ}}{0.75} = \frac{10}{0.75} \approx 13.3 \text{ მ.}$$

შიგა ცილინდრული ნაცმი ხასიათდება მეტი ჰიდრავლიკური წინაღობით ამიტომ, მცირდება სიჩქარისა და ხარჯის კოეფიციენტების მნიშვნელობები. ამ შემხთვევაში $\varepsilon=1$, $\varphi=0,71$ და $\mu=0,71$, ე.ი. მცირდება ხარჯი გარე ცილინდრულ ნაცმთან შედარებით.

კონუსურ ნაცმებში ასხვავებენ კონუსურ ბოლოშევიწროებულ და კონუსურ ბოლოგაშლილ ნაცმებს (ნახ. 1.25 ა და ბ).

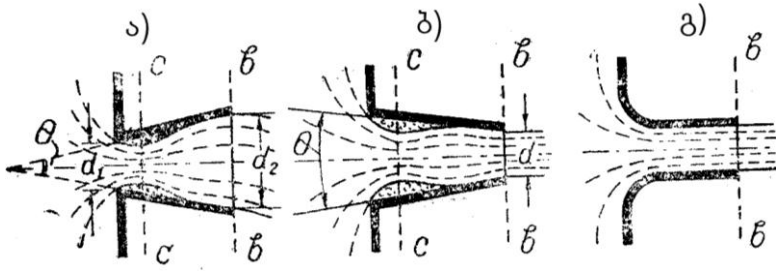


ნახ. 1.24

კონუსური ბოლოშევიწროებული ნაცმი გვაძლევს კომპაქტურ ჭავლს დიდი სიჩქარითა და ხარჯით. ამ თვისების გამო იგი გამოიყენება ჰიდრომონიტორებში. სახანძრო ბრანდსპოიტების ბუნიკებში, შადრევნებში, ტურბინებში და სხვ. კონუსური ნაცმის სიჩქარისა და ხარჯის კოეფიციენტები დამოკიდებულია კონუსობის კუთხეზე Θ. ხარჯის კოეფიციენტი მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს, როდესაც $\Theta \approx 13^0$-ს. ამ დროს $\mu = 0{,}94\text{-}0{,}95$ სიჩქარის კოეფიციენტი ცოტათი მეტია $\varphi = 0{,}96$.

კონუსური ბოლოგაშლილი ნაცმის შემთხვევაში კონუსობის კუთხის ზრდასთან ერთად იზრდება ვაკუუმის სიდიდე, ე. ი. იზრდება ხარჯი. მაგრამ, როდესაც კუთხე 8^0-ს აჭარბებს, მაშინ ჭავლი წყდება ნაცმის კედელს და გვექნება თითქოსდა გამოდინება თხელკედლიანი ხვრეტი-

დან, ე. ი. ხარჯის გაზრდის ეფექტი აღარ იქნება. ცდებით დადგენილია, რომ ოპტიმალური კონუსობის კუთხე $\Theta \approx 7^0$. ამ დროს ხარჯისა და სიჩქარის კოეფიციენტები ტოლია $\mu = \varphi = 0{,}45$. მართალია ხარჯის კოეფიციენტი მცირეა ცილინდრულ ნაცმთან შედარებით, მაგრამ რეალური ხარჯი ბოლოგაშლილ ნაცმში მეტია, ვიდრე გარეგან ცილინდრულ ნაცმში, რადგანაც ბოლოგაშლილი ნაცმის ხარჯი გამოთვლილია გაშლილი ბოლოს ფართობის მიხედვით, რომელიც ბევრად აღემატება ნაცმის შესასვლელი კვეთის ფართობს (ანუ ხვრეტის ფართს).



ნახ. 1.25

კონოიდალური ნაცმი (ნახ. 1.25 გ) სრულყოფილი ბოლოშევიწროებული ნაცმია, რომელსაც აძლევენ ხვრეტიდან გამოდევნილი ჭავლის მოხაზულობას, რის გამოც მინიმუმამდეა დაყვანილი დაწნევის დანაკარგები. ამიტომ სიჩქარისა და ხარჯის კოეფიციენტები მეტია ყველა სხვა ნაცმთან შედარებით, იგი ტოლია $\mu = \varphi = 0{,}97\text{-}0{,}98$.

V თავი. სითხის დამყარებული მოძრაობა სადაწნეო მილსადენებში

1.5.1. მილსადენების კლასიფიკაცია

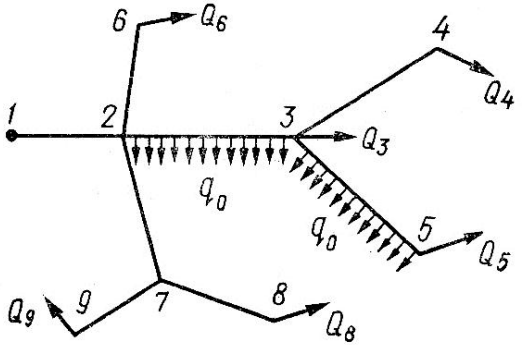
განვიხილოთ სითხის წნევიანი დამყარებული მოძრაობა მილსადენებში, წინაღობის კვადრატული ზონის პირობებში.

მილსადენების სიგრძისა და დანაკარგების თანაფარდობის მიხედვით ასხვავებენ ჰიდრავლიკურად გრძელ და ჰიდრავლიკურად მოკლე მილსადენებს. იმ შემთხვევაში, როდესაც ადგილობრივი დანაკარგები სიგრძეზე დანაკარგების 5-10%-ზე ნაკლებია, ადგილობრივ დანაკარგებს უგულებელყოფენ, მხედველობაში მიიღებენ მხოლოდ სიგრძეზე დანაკარგებს და მილსადენს ჰიდრავლიკურად გრძელს უწოდებენ. ისეთ მილსადენის გაანგარიშებისას, რომლებშიც ადგილობრივი დანაკარგები სიგრძეზე დანაკარგების 5-10%-ზე მეტია, მხედველობაში მიიღება როგორც ადგილობრივი, ისე სიგრძეზე დანაკარგები და ასეთ მილსადენს ჰიდრავლიკურად მოკლეს უწოდებენ. მოკლე მილსადენებს მიეკუთვნება ტუმბოს შემწოვი მილი, სიფონი და სხვ. გრძელი მილსადენებია წყალსადენის მაგისტრალური მილები, ნავთობსადენები, ენერგეტიკული სადაწნეო გვირაბები და სხვ.

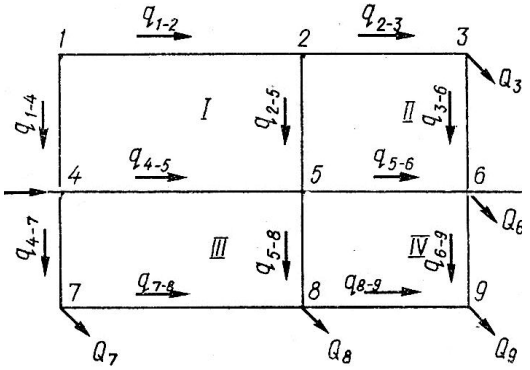
მუშაობის ჰიდრავლიკური სქემის მიხედვით, გრძელი მილსადენები იყოფა მარტივ და რთულ მილსადენებად. მარტივი მილსადენი შედგება ერთნაირი ან სხვადასხვა

დიამეტრის მილებისაგან, რომელთაც არა აქვს განშტოებები და მათში გაედინება ერთი მუდმივი ხარჯი (ე.წ. სატრანზიტო ხარჯი).

რთული მილსადენი შედგება მაგისტრალური მილისაგან, რომელსაც აქვს განშტოებები. რთულ მილსადენებში გამოყოფენ ჩიხურ და რგოლურ მილსადენებს. ჩიხური მილსადენები შედგება მაგისტრალური მილსადენისაგან გვერდითი განშტოებებით (ნახ 1.26.) რგოლური მილსადენები შეიცავს მილსადენების ჩაკეტილ რგოლურ სისტემას (ნახ. 1.27).



ნახ. 1.26



ნახ. 1.27

1.5.2. მარტივი გრძელი მილსადენების გაანგარიშება

მარტივი გრძელი მილსადენების ძირითად საანგარიშო ფორმულას წარმოადგენს შეზის ფორმულა

$$\mathbf{V = C\sqrt{RI}} \text{ და } \mathbf{Q = \omega C\sqrt{RI}}$$

შემოვიტანოთ აღნიშვნა $\mathbf{K = \omega C\sqrt{R}}$

K-ს უწოდებენ ხარჯის მახასიათებელს. მას აქვს ხარჯის განზომილება და წარმოადგენს ხარჯს ერთეულოვანი ქანობის დროს. მისი გათვალისწინებით, მივიღებთ

$$\mathbf{Q = K\sqrt{I}} \qquad (1.55)$$

მარტივი გრძელი მილსადენების გაანგარიშებისას ვუშვებთ, რომ არსებული დაწნევა მთლიანად იხარჯება

წინაღობების გადალახვაზე $H=h_w$, ე.ი. $I=\frac{H}{\ell}$, ამის გათვალისწინებით, გვექნება

$$Q = K\sqrt{\frac{H}{\ell}}, \tag{1.56}$$

აქედან

$$H = \frac{\ell}{K^2}Q^2 \tag{1.57}$$

(1.55), (1.56), (1.57) ფორმულები წარმოადგენს მარტივი გრძელი მილსადენების საანგარიშო ძირთად ფორმულებს. მათი საშუალებით შეიძლება გადავწყვიტოთ შემდეგი ტიპის ამოცანები:

1. ცნობილია დაწნევა **H**, მილსადენის სიგრძე **ℓ** და დიამეტრი **d**. ამოცანის მიზანია გავიანგარიშოთ მილსადენში გადენილი სითხის ხარჯი;

2. ცნობილია **Q**, **ℓ** და **d**. ამოცანის მიზანია გავიანგარიშოთ საჭირო დაწნევა H;

3. ცნობილია **Q**, **ℓ** და **H**. ამოცანის მიზანია გავიანგარიშოთ დიამეტრი d.

პრაქტიკული ამოცანების ამოხსნის დროს ჩვეულებრივ, მოცემულ ან საძიებელ სიდიდეს წარმოადგენს ხარჯი **Q**.

ამ დროს დაწნევის დანაკარგების გაანგარიშება მოსახერხებელია დარსი-ვეისბახის ფორმულით

$$h_w = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{\upsilon^2}{2g}.$$

მივცეთ მას შემდეგი სახე:

$$hw = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{Q^2 \cdot 16}{2g\pi^2 d^4} = Q^2 \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} \ell$$

აღვნიშნოთ

$$S_0 = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5},$$

მაშინ

$$hw = S_0 Q^2 \ell \qquad (1.58)$$

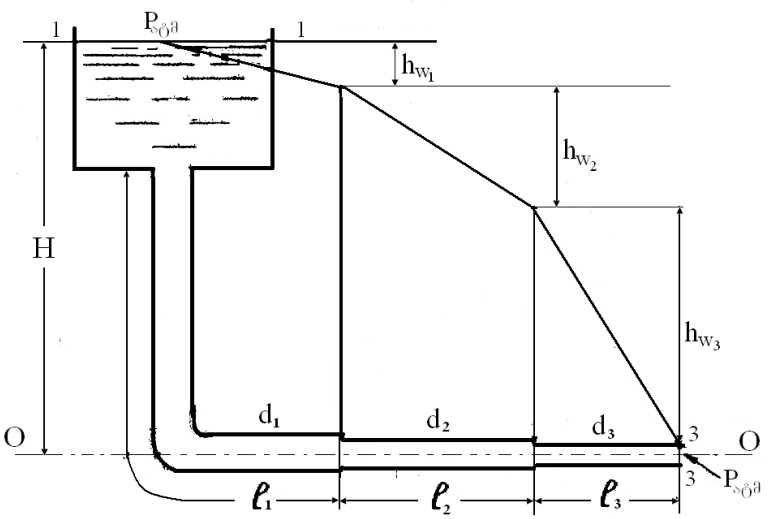
S_0-ს უწოდებენ კუთრ წინაღობას. თუ შევადარებთ (1.57) და (1.58) ფორმულებს, მაშინ კუთრი წინაღობა ტოლია

$$S_0 = \frac{1}{K^2}$$

რადგან λ დამოკიდებულია რეინოლდსის რიცხვსა და ფარდობით ხორკლიანობაზე, ამიტომ კუთრი წინაღობა შეიძლება წარმოვადგინოთ როგორც მილის მასალის, დიამეტრისა და სითხის მოძრაობის საშუალო სიჩქარის V ფუნქცია. კუთრი წინაღობისა S_0 და ხარჯის მახასიათებლების K მნიშვნელობები სხვადასხვა მასალისა და დიამეტრის მილებისათვის გარკვეული სიჩქარეების დროს მოცემულია საცნობარო ლიტერატურაში.

1.5.3. მიმდევრობით შეერთებული მილსადენების გაანგარიშება

განვიხილოთ მიმდევრობით შეერთებული მილსადენები, რომლებიც შედგება სხვადასხვა დიამეტრისა და სიგრძის მილებისაგან ნახ (1.28.).



ნახ. 1.28

დიამეტრები და სიგრძეები ცნობილი სიდიდეებია, შესაბამისად შეგვიძლია განვსაზღვროთ ხარჯის მახასიათებლები თითოეული უბნისათვის: K_1, K_2 და K_3. დაწნევის დანაკარგები თითოეულ უბანზე გამოითვლება (1.57) ფორმულის საშუალებით

$$hw_1 = \ell_1 \frac{Q^2}{K_1^2};\ h_{w2} = \ell_2 \frac{Q^2}{K_2^2};\ h_{w3} = \ell_3 \frac{Q^2}{K_3^2};$$

დაწნევის საერთო დანაკარგი

$$h_w = Q^2\left(\frac{\ell_1}{K_1^2} + \frac{\ell_2}{K_2^2} + \frac{\ell_3}{K_3^2}\right),$$

აქედან

$$Q = \sqrt{\frac{1}{\frac{\ell_1}{K_1^2} + \frac{\ell_2}{K_2^2} + \frac{\ell_3}{K_3^2}}} \cdot \sqrt{h_w}\ .$$

1.5.4. პარალელურად შეერთებული მილსადენების გაანგარიშება

პარალელურად შეერთებული მილსადენების გაანგარიშება განვიხილოთ (ნახ. 1.29)-ზე წარმოდგენილი სქემის მიხედვით. **A** პუნქტიდან **B** პუნქტში მიეწოდება **Q** ხარჯი, ურთიერთპარალელური სხვადასხვა სიგრძისა და დიამეტრის მილებით. A და B წერტილები ამ უბნებისათვის საერთოა. პიეზომეტრული დაწნევა **A** წერტილში აღვნიშნოთ H_A, ხოლო **B** წერტილში H_B-თი. ხარჯი თითოეულ უბანზე გამოითვლება (1.56) ფორმულის შესაბამისად

$$Q_1 = K \cdot \sqrt{\frac{H}{\ell_1}};\qquad Q_2 = K_2 \cdot \sqrt{\frac{H}{\ell_2}};\qquad Q_3 = K_3 \cdot \sqrt{\frac{H}{\ell_3}}.$$

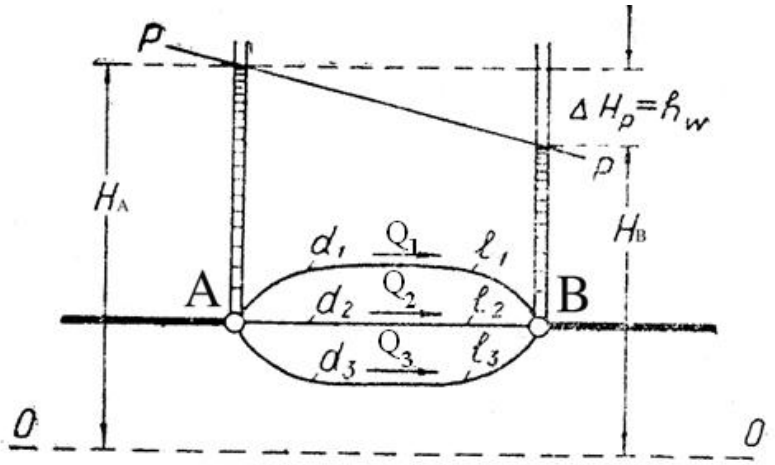
საერთო ხარჯი ტოლია

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = K_1 \cdot \sqrt{\frac{H}{\ell_1}} + K_2\sqrt{\frac{H}{\ell_2}} + K_3\sqrt{\frac{H}{\ell_3}} =$$

$$= \sqrt{H}\left(\frac{K_1}{\ell_1} + \frac{K_2}{\ell_2} + \frac{K_3}{\ell_3}\right)$$

აქედან

$$H = \frac{Q^2}{\left(\frac{K_1}{\sqrt{\ell_1}} + \frac{K_2}{\sqrt{\ell_2}} + \frac{K_3}{\sqrt{\ell_3}}\right)^2}.$$



ნახ.1.29

1.5.5. მილსადენების გაანგარიშება მოძრაობის გზაზე ხარჯის უწყვეტი გაცემის დროს

რეზერვუარიდან გამომავალ ℓ სიგრძის მილს გავუკეთოთ ხვრეტები. მაშინ ადგილი ექნება მოძრაობის გზაზე ხარჯის უწყვეტ გაცემას (ნახ.1.30). ხვრეტების დიამეტრი და მათ შორის მანძილი ისე შევარჩიოთ, რომ ერთეულ სიგრძეზე გაცემული ხარჯი (კუთრი ხარჯი q) მუდმივი იყოს. ზოგად შემთხვევაში, საერთო ხარჯი მილსადენში Q ტოლი იქნება მოძრაობის გზაზე გაცემული ხარჯის $Q_გ$ და მილსადენის ბოლოში არსებული ანუ ტრანზიტული ხარჯების $Q_ტ$ ჯამისა.

$$Q=Q_გ+Q_ტ$$

ნებისიმერ X მანძილზე ხარჯი გამოითვლება ფორმულით

$$Q_x = Q_გ+Q_ტ - \frac{Q_g}{\ell} X .$$

მილსადენის ნებისმიერ მანძილზე ჰიდრავლიკური ქანობი (5.2) ფორმულის თანახმად, ტოლია $I = \frac{Q_x^2}{K^2}$.

ამ გამოსახულებაში ჩავსვათ Q_x-ის მნიშვნელობა, მივიღებთ

$$I = \frac{\left(Q_გ + Q_ტ - \frac{Q_გ}{\ell} \chi \right)^2}{K} .$$

დაწნევის ვარდნა, დანაკარგი d_x მანძილზე ტოლი იქნება

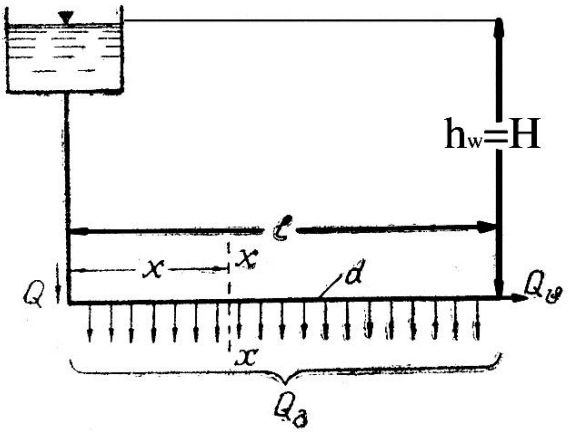
$$dh_w = Idx = \left[\frac{(Q_ბ + Q_ტ)^2}{K} - \frac{2Q}{\ell K^2}(Q_ბ + Q_ტ)x + \frac{Q^2}{\ell^2 K^2}x^2\right]dx.$$

ამ განტოლების ინტეგრირებით მივიღებთ დაწნევის დანაკარგების საანგარიშო განტოლებას

$$h_w = H = \frac{\ell}{K^2}\left(Q_ტ^2 + Q_ტ \cdot Q_ბ + \frac{1}{3}Q_ბ^2\right). \qquad (1.59)$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც ადგილი აქვს მოძრაობის გზაზე ხარჯის სრულ გაცემას – ე. ი. როდესაც $Q_ტ=0$ (1.59)-დან მივიღებთ, რომ

$$H = \frac{1}{3}\ell\frac{Q_ბ^2}{K^2}. \qquad (1.60)$$



ნახ.1.30

(1.57)-ისა და (1.60)-ის შედარება გვაძლევს, რომ ხარჯის უწყვეტი გაცემის დროს საჭირო დაწნევა სამჯერ ნაკლებია, ვიდრე იმავე სიდიდის ტრანზიტული ხარჯის მოძრაობის შემთხვევაში.

თუ შემოვიტანთ აღნიშვნას, რომ

$$\mathbf{Q_ტ^2 + Q_ტ \cdot Q_გ + \frac{1}{3} Q_გ^2 \approx (Q_ტ + 0.55 Q_გ)^2},$$

მივიღებთ

$$\mathbf{H = \frac{\ell}{K^2} (Q_ტ + 0.55 Q_გ)^2}.$$

$\mathbf{Q_ტ+0{,}55Q_გ}$ სიდიდეს უწოდებენ საანგარიშო ხარჯს, მაშინ საბოლოოდ მივიღებთ

$$\mathbf{H = \frac{\ell}{K^2} Q^2_{საანგ}}.$$

ეს ფორმულა მართებულია როგორც ტრანზიტული, ისე უწყვეტად გაცემული ხარჯისათვის.

1.5.6. სითხის დაუმყარებელი მოძრაობა მილსადენებში. ჰიდრავლიკური დარტყმა

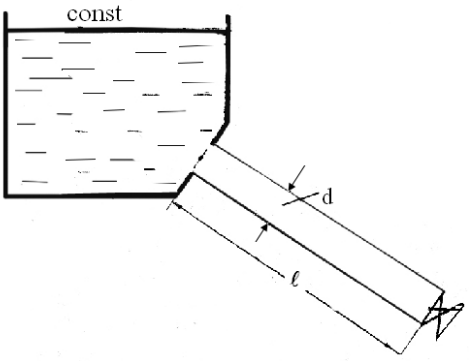
ჰიდრავლიკური დარტყმა ეწოდება მილსადენში წნევის ცვლილებას (გადიდებას ან შემცირებას), გამოწვეულს ცოცხალ კვეთში სითხის მოძრაობის სიჩქარის ცვლილებით.

განვიხილოთ **ℓ** სიგრძისა და **დ** დიამეტრის მილსადენი, რომელიც გამოდის საკმაოდ დიდი ზომის რეზერვუარიდან (ნახ.1.31), მილსადენის ბოლოში მოწყო-

ბილია საკეტი. როდესაც საკეტი ღიაა, მილსადენში მუდმივი დაწნევისას სითხე მოძრაობს რაიმე **V** სიჩქარით. საკეტის მყისი ჩაკეტვის შემთხვევაში, ასევე მყისიერად გაჩერდება საკეტთან მდებარე უახლოესი შრე. მასზე შემდგომი შრეების ზემოქმედებით მისი კინეტიკური ენერგია სწრაფად გარდაიქმნება შეკუმშული სითხის პოტენციურ (წნევის) ენერგიად. წნევა აქ მკვეთრად იზრდება. შემდგომ გაჩერდება სითხის მომდევნო შრე, რომელიც ასევე იკუმშება და რომელშიც წნევა სწრაფად იზრდება და ა. შ. წნევის უეცარი გაზრდა – დიდი სიჩქარით გავრცელება საკეტიდან რეზერვუარისაკენ. დრეკადი დეფორმაციების გავრცელების სიჩქარეს, დარტყმითი ტალღის გავრცელების სიჩქარეს უწოდებენ. აღვნიშნოთ იგი **a** ასოთი. დარტყმითი ტალღა $\mathbf{t = \frac{\ell}{a}}$ დროში მიაღწევს რეზერვუარს. ამ მომენტისათვის სითხე მთელ მილსადენში შეკუმშულია და წნევა გაზრდილია **ΔP** სიდიდით. რადგან ამ დროისათვის წნევა მილსადენში მეტია, ვიდრე რეზერვუარში, სითხე დაიწყებს მოძრაობას მილსადენიდან რეზერვუარისკენ, იგი ფართოვდება და მისი წნევა მცირდება. პირველად ამოძრავდება რეზერვუართან მდებარე სითხის შრე, რომელსაც მიყვება შემდეგი შრეები. წნევის შემცირება იმავე **a** სიჩქარით გავრცელდება რეზერვუარიდან საკეტისაკენ და $\mathbf{t_0 = \frac{2\ell}{a}}$ დროში მიაღწევს

საკეტს. **to**-ს ჰიდრავლიკური დარტყმის ფაზა ანუ ხანგრძლივობა ეწოდება. ამ დროისათვის საკეტთან აღდგება საწყისი წნევა და სიჩქარე. შემდეგ სითხე ინერციით აგრძელებს მოძრაობას (გაფართოებას) საპირისპირო მიმართულებით რეზერვუარისაკენ და $\frac{3\ell}{a}$ დროში მიაღწევს რეზერვუარს. ამ მომენტისათვის წნევა მილსადენში მცირეა, ვიდრე რეზერვუარში. ამიტომ, მყისვე იწყება სითხის მოძრაობა რეზერვუარიდან საკეტისაკენ საწყისი **V** სიჩქარით და $\mathbf{T} = \frac{4\ell}{a}$ დროში მიაღწევს საკეტს. **T** დროს, ჰიდრავლიკური დარტყმის პერიოდს უწოდებენ. თუ ამ მომენტისათვის საკეტი ისევ ჩაკეტილია, კვლავ მოხდება ჰიდრავლიკური დარტყმა და ა.შ. პროცესი კვლავ განმეორდება. სითხის სიბლანტისა და მილსადენის კედლების დეფორმირებადობის გამო, ჰიდრავლიკური დარტყმა მილევადი პროცესია.

როგორც ვხედავთ, ჰიდრავლიკური დარტყმისას მოძრაობის მახასიათებლები დროში იცვლება, ე.ი. ჰიდრავლიკური დარტყმა დაუმყარებელ მოძრაობას წარმოადგენს.



ნახ.1.31

ასხვავებენ პირდაპირ და არაპირდაპირ ჰიდრავლიკურ დარტყმას. თუ საკეტის ჩაკეტვის დრო ნაკლებია დარტყმის ფაზაზე t_0, მაშინ დარტყმას პირდაპირი ჰიდრავლიკური დარტყმა ეწოდება; ხოლო, თუ საკეტის ჩაკეტვის დრო მეტია დარტყმის ფაზაზე, გვაქვს არაპირდაპირი ჰიდრავლიკური დარტყმა.

ნ. ჟუკოვსკის თეორიის მიხედვით, წნევის ნაზრდი პირდაპირი ჰიდრავლიკური დარტყმისას გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\Delta p=\rho.v.a,$$

ხოლო დარტყმითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე **a** იანგარიშება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\mathbf{a}=\frac{\mathbf{C}}{\sqrt{\mathbf{1}+\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{E}}\cdot\frac{\mathbf{D}}{\boldsymbol{\delta}}}} \qquad (1.61)$$

სადაც **C** არის სითხეში ბგერის გავრცელების სიჩქარე. წყლისათვის **C=1425** მ/წმ; **K** – სითხის დრეკადობის მოდული; **E** – მილის მასალის დრეკადობის მოდული; **D** – მილის დიამეტრი; **δ** – მილის კედლის სისქე.

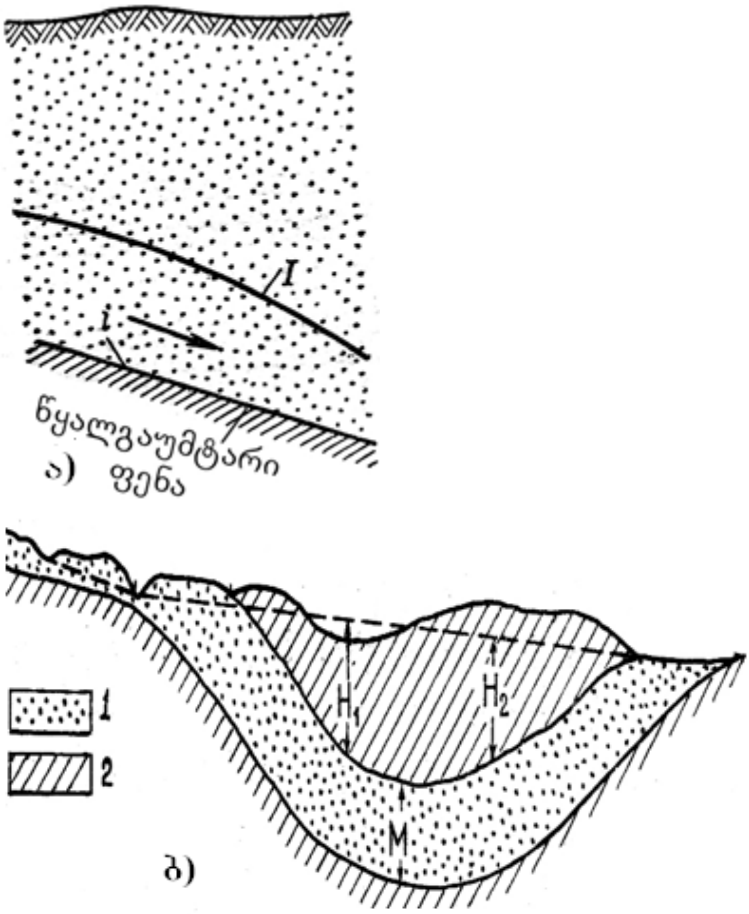
ჰიდრავლიკური დარტყმის მოვლენას ხშირად ვხვდებით ჰიდროელექტროსადგურების სადაწნეო ტრაქტში, სადაწნეო მილსადენებში ტუმბოს ამორთვისას, წყალსადენის მაგისტრალურ მილსადენებში საკეტების მკვეთრი რეგულირებისას და სხვა. იგი არასასურველი მოვლენაა, პრაქტიკაში ტარდება მრავალი სპეციალური ღონისძიება ამ მოვლენის თავიდან აცილების მიზნით.

VI თავი. მიწისქვეშა წყლის მოძრაობა.

1.6.1. ფილტრაციის კლასიფიკაცია

წყალი გრუნტში სხვადასხვა გზით შეიძლება მოხვდეს (მაგალითად, ატმოსფერული ნალექების გაჟონვით). იგი სიმძიმის ძალის გავლენით მოძრაობს ზევიდან ქვევით და როდესაც მიაღწევს წყალშეუღწევადი გრუნტის შრეს (მაგალითად, თიხა) იწყებს მოძრაობას ამ შრის ქანობის მიმართულებით, წარმოიქმნება მიწისქვეშა წყლის ნაკადი, რომელსაც ფილტრაციულ ნაკადს უწოდებენ; ხოლო თვით გრავიტაციული წყლის მოძრაობას გრუნტის ფორმებში, ფილტრაცია ეწოდება. ამრიგად, წყალშეუღწევადი ფენა წარმოადგენს ფილტრაციული ნაკადის ერთგვარ კალაპოტს.

ისე როგორც მიწისზედა წყლის ნაკადი, მიწისქვეშა წყლის ნაკადიც შეიძლება იყოს თანაბარი და არათანაბარი, დამყარებული და დაუმყარებელი, ლამინარული და ტურბულენტური, წნევიანი და უდაწნეო. უდაწნეო ფილტრაციული ნაკადი მოძრაობს წყალშეუღწევად ფენაზე და აქვს მიწისქვეშა წყლის თავისუფალი ზედაპირი, რომელსაც დეპრესიული ზედაპირი ეწოდება (ნახ.1.32.ა), ხოლო თავისუფალი ზედაპირის გამომსახველ მრუდს – დეპრესიის წირი. წნევიანი ფილტრაციული ნაკადი მოძრაობს ორ წყალშეუღწევად შრეს შორის, მას არა აქვს თავისუფალი ზედაპირი (ნახ. 1.32.ბ).



ნახ.1.32
1. წყალგამტარი ფენა 2. წყალგაუმტარი ფენა

მიწისზედა ნაკადებისაგან განსხვავებით, მიწისქვეშა წყლის ნაკადი უმეტეს შემთხვევაში ლამინარულია მოძრაობის მცირე სიჩქარეების გამო; მხოლოდ მსხვილმარცვლოვან ქვიშებში, ღორღში, ხრეშსა და ქვანაყარ

გრუნტებში მოძრაობის დროს შეიძლება იყოს ტურბულენტური ნაკადი.

რადგან ლამინარულ ფილტრაციულ ნაკადში მცირე სიჩქარეებია, ამიტომ სიჩქარული დაწნევა $\frac{\mathbf{v^2}}{\mathbf{2g}}$ ძალიან მცირე სიდიდეა და მას უგულებელყოფენ. აქედან გამომდინარე, ლამინარულ ფილტრაციულ ნაკადში პიეზომეტრული წირი და დაწნევის წირი ერთმანეთს ემთხვევა, ანუ ჰიდრავლიკური და პიეზომეტრული განობები ერთმანეთის ტოლია $\mathbf{I_ჰ = I_პ}$.

1.6.2. ლამინარული ფილტრაციის ძირითადი კანონი

მრავალრიცხოვანი ცდებით დადგენილია, რომ ლამინარული ფილტრაციის დროს მოძრაობის სიჩქარე **U** ქანობის პირველი ხარისხის პროპორციულია და გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\mathbf{U = KI} \qquad (1.62)$$

(1.62) გამოსახულება ცნობილია დარსის ფორმულის სახელწოდებით, სადაც **I** არის ქანობი; **K** – პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელსაც ფილტრაციის კოეფიციენტს უწოდებენ. იგი დამოკიდებულია გრუნტის ფორიანობასა და ფორებში მოძრავი სითხის გვარობაზე. მას აქვს სიჩქარის განზომილება და წარმოადგენს სიჩქარეს ერთეულოვანი ქანობის დროს. **K** ახასიათებს

გრუნტის წყალჟონადობის უნარს; **U** – არის ფილტრაციის სიჩქარე. იგი წარმოადგენს ფიქტიურ (წარმოსახვით) სიჩქარეს, რომელიც მიიღება იმ დაშვებით, რომ თითქოს სითხე მოძრაობს არა მარტო ფორმებში, არამედ წყალშემცველი ფენის მთელ განივკვეთში (მარცვლებშიც).

ფილტრაციული ნაკადის ხარჯი ტოლი იქნება

$$\mathbf{Q=\omega \cdot v \cdot \omega KI} \qquad (1.63)$$

დარსის ფორმულები (1.62) და (1.63) გამოსახავენ ლამინარული ფილტრაციის ძირითად კანონს.

1.6.3. ფილტრაციის კოეფიციენტის განსაზღვრა

პრაქტიკული ამოცანების ფილტრაციული გაანგარიშებისათვის აუცილებელია განსახილველი გრუნტის ფილტრაციის კოეფიციენტის განსაზღვრა. არსებობს ფილტრაციის კოეფიციენტის განსაზღვრის შემდეგი სამი მეთოდი:

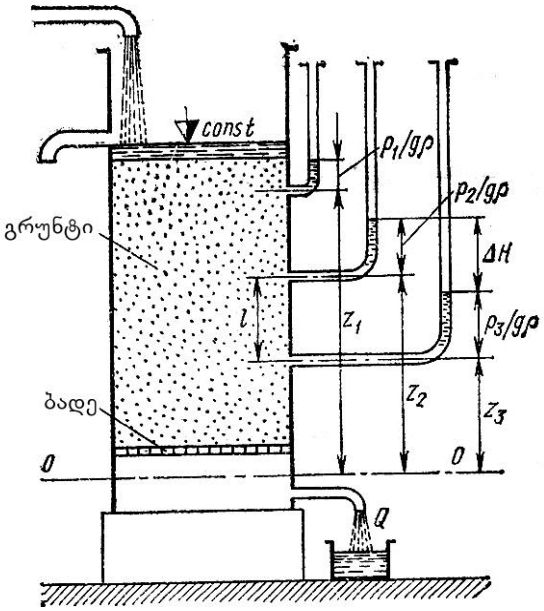
1. ლაბორატორიული მეთოდი;
2. გაანგარიშება ემპირიული ფორმულების გამოყენებით;
3. საველე მეთოდი.

ლაბორატორიული მეთოდით ფილტრაციის კოეფიციენტის განსაზღვრა ხდება დარსის ხელსაწყოს გამოყენებით. ხელსაწყო წარმოადგენს ვერტიკალურ ცილინდრულ მილს, რომლის ქვედა ნაწილში მოწყობილია ბადე.

მასზე გამოსაკვლევი გრუნტის მონოლითს ათავსებენ ცილინდრული მილის ორ კვეთში (ნახ.1.33) (რომლებიც ერთმანეთისგან დაშორებულია ℓ მანძილით), მიერთებულია ორი პიეზომეტრი. წყალი მუდმივი **H** დაწნევით მიეწოდება ცილინდრის ზედა ნაწილში და გრუნტში გაჟონვის შემდეგ ჩაედინება ქვედა საზომ ავზში. მისი საშუალებით ხდება ფილტრაციული ნაკადის ხარჯის **Q** გაზომვა მოცულობითი წესით. პიეზომეტრების ჩვენებათა სხვაობა გვაძლევს ფილტრაციული ნაკადის ენერგიის (დაწნევის) დანაკარგს h_w სიგრძეზე. ქანობის განსაზღვრა ხდება $I = \frac{hw}{\ell}$ ფორმულით. ვიცით რა **Q**, **I** და მილის განივკვეთის ფართობის ω ფილტრაციის კოეფიციენტს განსაზღვრავენ დარსის ფორმულიდან

$$K = \frac{Q}{\omega I}.$$

მრავალი ავტორის მიერ შემოთავაზებულია ფილტრაციის კოეფიციენტის საანგარიშო ემპირიული ფორმულები, მაგრამ მათი სიზუსტე გაცილებით ნაკლებია ლაბორატორიულ მეთოდთან შედარებით.



ნახ.1.33

ფილტრაციის კოეფიციენტს ძირითადად საველე მეთოდით განსაზღვრავენ ჰიდროგეოლოგები. მეთოდის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ გაჰყავთ ძირითადი და სათვალთვალო ჭაბურღილები. ძირითადი ჭაბურღილიდან ხდება წყლის საცდელი ამოტუმბვა. ზომავენ წყლის დონეს ძირითად და სათვალთვალო ჭებში და ზომავენ ძირითადი ჭიდან ამოტუმბული წყლის ხარჯს. შემდეგ, სპეციალური ფორმულებით განსაზღვრავენ ფილტრაციის კოეფიციენტის მნიშვნელობას.

VII თავი. წყალსაშვები

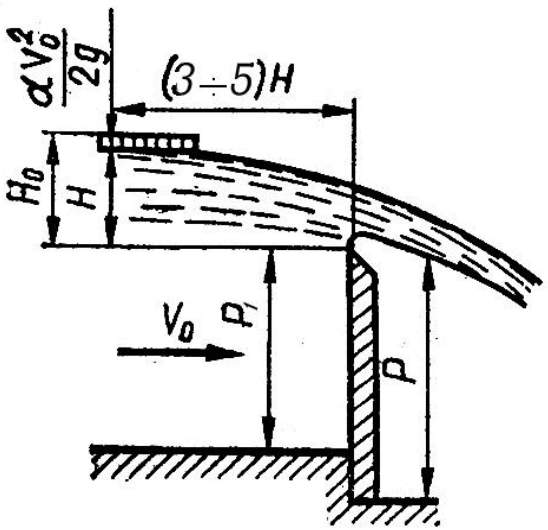
1.7.1. წყალსაშვების კლასიფიკაცია და მათი ძირითადი ფორმულები

შემტბორავ ნაგებობას, რომელზეც ხდება წყლის გადადინება, წყალსაშვი ეწოდება. ნაგებობის იმ ნაწილს, რომელზეც უშუალოდ გადაედინება წყალი, ზღურბლს უწოდებენ.

ნაკადის ნაწილი წყალსაშვის წინ წარმოადგენს ზედა ბიეფს, ხოლო წყალსაშვის შემდეგი ნიწილი – ქვედა ბიეფს. ზედა ბიეფში წყლის დონის ნიშნულსა და ზღურბლის ნიშნულს შორის H სხვაობას უწოდებენ დაწნევას წყალსაშვზე. იგი აიღება ზღურბლიდან $\ell > (3 \div 5) - H$ მანძილზე, იქ სადაც პრაქტიკულად იწყება წყლის დონის სწრაფი ვარდნა. P_1 და P წყალსაშვის სიმაღლეა ზედა ბიეფისა და ქვედა ბიეფის მხრიდან. წყალსაშვის ზღურბლის ფორმისა და ზომების მიხედვით ასხვავებენ შემდეგი ტიპის წყალსაშვებს:

ა) თხელკედლიანი წყალსაშვები, როდესაც წყალსაშვის სიგანე $\delta < \frac{2}{3} H$ -ზე (ნახ.1.34);

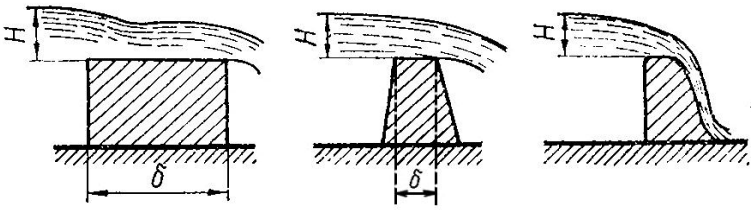
ბ) ფართოზღურბლიანი წყალსაშვი, როდესაც $2H < \delta < 8H$ (ნახ. 1.35.ა);



ნახ.1.34

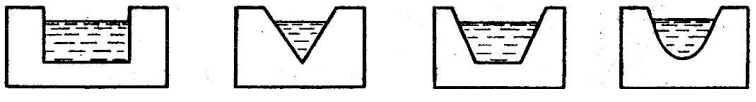
გ) პრაქტიკული პროფილის წყალსაშვი. აქ გამოყოფენ სწორკუთხა მოხაზულობის პრაქტიკული პროფილის წყალსაშვს, როდესაც $\frac{2}{3}\mathbf{H} < \delta < \mathbf{2H}$ (ნახ.1.35.ბ), და მრუდწირული მოხაზულობის პრაქტიკული პროფილის წყალსაშვს, რომელსაც აძლევენ თავისუფლად ვარდნილი ჭავლის მოხაზულობას (ნახ. 1.35.გ).

წყალსაშვის ჭრილის ფორმის მიხედვით განასხვავებენ სწორკუთხა (ნახ. 1.36), სამკუთხა (ნახ. 1.36.ბ), ტრაპეციულ (ნახ. 1.36.გ) და მრუდწირულ (ნახ. 1.36.დ) წყალსაშვებს.



ა) ბ) გ)

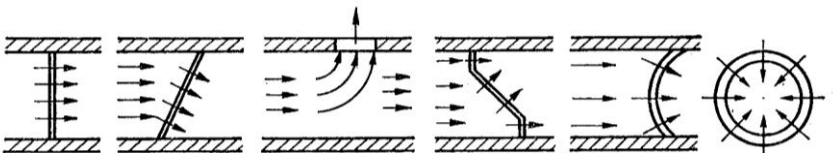
ნახ.1.35



ა ბ გ დ

ნახ.1.36

გეგმაში მოხაზულობის მიხედვით განასხვავებენ პირდაპირ (ნახ. 1.37.ა) ირიბ (ნახ. 1.37 გვერდით (ნახ. 1.37. გ) პოლიგონალურ (ნახ. 1.37.დ) მრუდწირულ (ნახ. 1.37.ე), წრიულ (ნახ. 1.37.ვ) წყალსაშვებს.

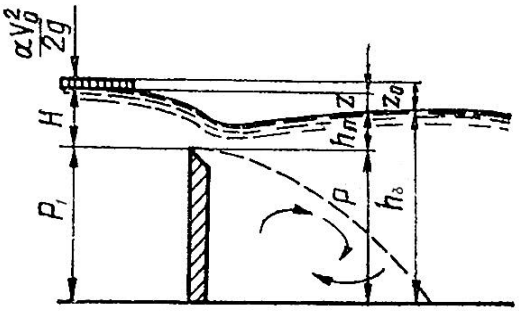


ა ბ გ დ ე ვ

ნახ. 1.37

ნაკადის წყალსაშვთან მისვლის პირობების მიხედვით, ასხვავებენ წყალსაშვს გვერდითი კუმშვის გარეშე (როდესაც კალაპოტის სიგანე B და წყალსაშვის სიგანე b ერთნაირია **(B=b)**), და წყალსაშვს გვერდითი კუმშვით (როდესაც **b<B**).

წყალსაშვზე გადადენილი ჭავლის ბიეფთან შეუღლების პირობების მიხედვით განასხვავებენ დაძირულ და დაუძირავ წყალსაშვებს. დაუძირავი წყალსაშვის ანუ თავისუფალად ვარდნილი ჭავლიანი წყალსაშვის შემთხვევაში, ქვედა ბიეფში წყლის დონე $h_ბ$ არ ახდენს გავლენას წყალსაშვზე გადადენილ წყლის ხარჯზე **Q** და დაწნევაზე **H**. იმ შემთხვევაში, როდესაც ქვედა ბიეფში წყლის დონე ახდენს გავლენას წყალსაშვზე გადადენილი ჭავლის ხარჯზე **Q** და დაწნევაზე **H**, წყალსაშვს ეწოდება დაძირული (ნახ. 1.38).



ნახ.1.38

ყველა ტიპის წყალსაშვზე გადადენილი წყლის ხარჯი გამოითვლება ფორმულით

$$Q = m \cdot b\sqrt{2g}H_0^{3/2},$$

სადაც **m** ხარჯის კოეფიციენტია; სხვადასხვა ტიპის წყალსაშვებისათვის იგი გამოითვლება სხვადახსვა ემპირიული ფორმულებით; H_0 – დაწნევა შესწორებული მისვლის სიჩქარით $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$; V_0 – მისვლის სიჩქარე.

ზოგჯერ უფრო მოსახერხებელია მისვლის სიჩქარე გათვალისწინებული იყოს ხარჯის კოეფიციენტში m_0, მაშინ:

$$Q = m_0 \cdot b\sqrt{2g}H^{3/2}.$$

გვერდითი კუმშვა გათვალისწინებულია ხარჯის კოეფიციენტით m_c, რომელიც ასევე ემპირიული ფორმულით გამოითვლება

$$Q = m_c \cdot b\sqrt{2g}H_0^{3/2}.$$

დაძირული წყალსაშვის შემთხვევაში, ხარჯის ფორმულაში დამატებით შედის დაძირულობის კოეფიციენტი σ_δ,

$$Q = m \cdot \sigma_\delta b\sqrt{2g}H_0^{3/2}$$

ღია არხებსა და ლაბორატორიულ დანადგარებში მცირე ხარჯების გასაზომად ხშირად გამოიყენება სამკუთხა და ტრაპეციული წყალსაშვები.

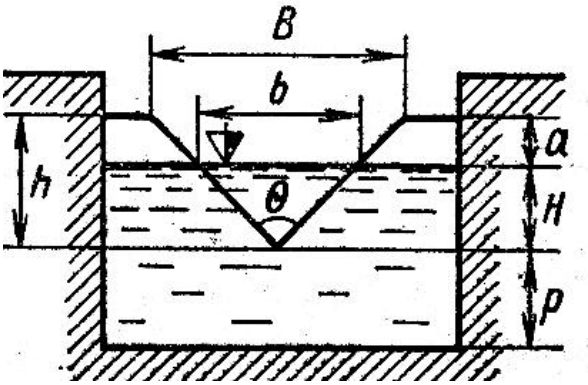
სამკუთხა წყალსაშვები (ნახ. 1.39.) თხელკედლიანი წყალსაშვია, რომელშიც ამოჭრილია სამკუთხედი. იმ შემთხვევაში, როდესაც კუთხე $\Theta = 90°$ -ს და დაწნევა **H** იცვლება 0,05 მ-დან 0,25 მ-მდე, **m=0.316** და ხარჯი გამოითვლება ფორმულით

$$Q = 1.4H^{5/2} \text{ მ}^3/\text{წმ}.$$

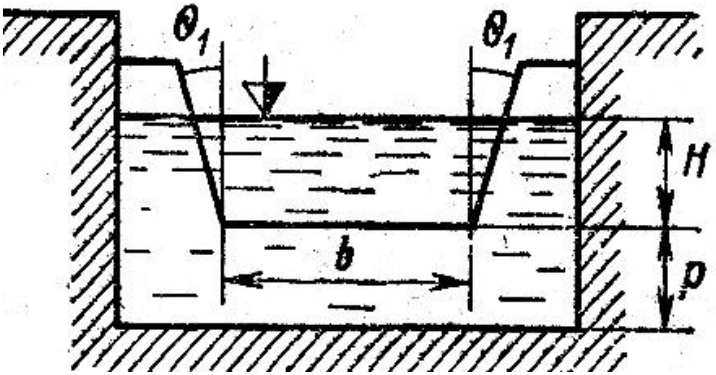
ტრაპეციული წყალსაშვის შემთხვევაში (ნახ. 1.40), როდესაც $\Theta = 14^0$, **m=0.25** და ხარჯი გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$Q = 1.86bH^{3/2} \text{ მ}^3/\text{წმ}.$$

b – წყალსაშვის სიგანეა ფუძეში.



ნახ.1.39.



ნახ.1.40.

პრაქტიკული გამოყენების დროს წყალსაშვისათვის წინასწარ აგებენ **Q**-სა და **H**-ს შორის დამოკიდებულების გრაფიკს. ნებისმიერ მომენტში შეიძლება პიეზომეტრით გავზომოთ დაწნევა **H** და გრაფიკიდან ავიღოთ შესაბამისი ხარჯის მნიშვნელობა.

II განყოფილება

მდინარეებისა და წყალსაცავების ჰიდროლოგიური მახასიათებლები

მეცნიერებას, რომელიც შეისწავლის დედამიწის ზედაპირზე და მისი ქერქის ზედა ნაწილში არსებულ ბუნებრივ წყლებს (ჰიდროსფეროს), მის თვისებებსა და იქ მიმდინარე პროცესებს ატმოსფეროს, ლითოსფეროსა და ბიოსფეროსთან ურთიერთკავშირში, ეწოდება ჰიდროლოგია.

ჰიდროლოგიის ნაწილს, რომელიც შეისწავლის ზედაპირულ წყლებს ხმელეთის ჰიდროლოგია ან მოკლედ ჰიდროლოგია ეწოდება. ოკეანეებისა და ზღვების წყლებს შეისწავლის ჰიდროლოგიის ნაწილი – ოკეანოლოგია, ხოლო მიწისქვეშა წყლებს – ჰიდროგეოლოგია.

შესასწავლი წყლის ობიექტების შესაბამისად ასხვავებენ მდინარის ჰიდროლოგიას, ტბების ჰიდროლოგიას (ლიმნოლოგიას), მყინვარების ჰიდროლოგიას (გლაციოლოგიას). მდინარის ჰიდროლოგია და ჰიდრავლიკა ავსებენ ურთიერთს.

ხმელეთის ჰიდროლოგიაში გამოყოფენ შემდეგ დარგებს: ზოგადი ჰიდროლოგია, ჰიდროგრაფია, ჰიდრომეტრია, საინჟინრო ჰიდროლოგია და ჰიდროლოგიური პროგნოზები. საინჟინრო ჰიდროლოგია შეიძლება განვიხილოთ როგორც გამოყენებითი ჰიდროლოგია, რომელიც ჰიდ-

როლოგიური კანონზომიერებით წყვეტს წყლის რესურსების რაციონალური გამოყენებისა და მათი დაცვის ამოცანებს.

I თავი. ზოგადი ჰიდროლოგია

2.1. წყალბრუნვა ბუნებაში. წყლის ბალანსის განტოლებაა

მზის ენერგიის გავლენით დედამიწის ზედაპირზე არსებული წყალი განიცდის უწვეტ წყალბრუნვას. ასხვავებენ წყალბრუნვის რამდენიმე სახეს.

მსოფლიო წყალბრუნვა – ოკეანეების ზედაპირიდან აორთქლებული ტენი, ქარის მიერ გადაიტანება ხმელეთზე, მოდის ხმელეთის ზედაპირზე ნალექების სახით და ზედაპირული და მიწისქვეშა ჩამონადენების სახით კვლავ ბრუნდება ოკეანეებში.

ოკეანური წყალბრუნვა – ოკეანეების ზედაპირიდან აორთქლებული ტენი უშუალოდ ოკეანეებში ბრუნდება ნალექების სახით.

შიგა კონტინენტური წყალბრუნვა – ხმელეთის ზედაპირიდან აორთქლებული წყალი კვლავ მის ზედაპირზე ბრუნდება ატმოსფერული ნალექების სახით.

წყალბრუნვა დედამიწაზე გრანდიოზული პროცესია. დედამიწაზე მოსული მზის ენერგიის 23% ხმარდება ოკეანეებიდან და ხმელეთიდან წყლის აორთქლებას.

წყლის შემოსავალისა და გასავალის შეფარდებას გარკვეული ობიექტებისათვის, არჩეული დროის ინტერვალში მარაგების ცვლილებების გათვალისწინებით, წყლის ბალანსი ეწოდება. წყლის ბალანსის მათემატიკურ გამოსახვას, წყლის ბალანსის განტოლება ეწოდება. მისი შედგენა შეიძლება წყლის გარკვეული ობიექტისათვის (ტბა, წყალსაცავი და სხვ.), მდინარის აუზისათვის, ტერიტორიის ნაწილისათვის, ჰიდროლოგიური რაიონისათვის, ქვეყნისათვის, მატერიკისა და დედამიწისათვის.

მრავალწლიანი დაკვირვების შედეგად შეიძლება დავასკვნათ, რომ ოკეანეების, ზღვებისა და ხმელეთის ზედაპირიდან საშუალო წლიური აორთქლების რაოდენობა მათ ზედაპირზე მოსული ატმოსფერული ნალექების ჯამის ტოლია, ე.ი. წყლის ბალანსის განტოლებას დედამიწისათვის აქვს შემდეგი სახე:

$$\mathbf{Z_0 + Z_c = X_0 + X_c},$$

სადაც **Z0** და **Zc** შესაბამისად ხვრების, ოკეანეებისა და ხმელეთის ზედაპირებიდან საშუალო წლიური აორთქლებაა.

Xo და **Xc** შეაბამისად არის ხღვების, ოკეანეებისა და ხმელეთის ზედაპირებზე მოსული ნალექები. ცალკეული მდინარის აუზის წყლის ბალანსის განტოლებას ხანგრძლივი პერიოდისათვის აქვს შემდეგი სახე:

$$\mathbf{X=Z+Y}$$

სადაც **X** – ნალექებია; **Z** - აორთქლება; **Y** – მდინარის ჩამონადენი.

ხოლო შეზღუდული პერიოდისავის (თვე, წელიწადი) მდინარის აუზის წყლის ბალანსის შედგენისას აუცილებლად უნდა გავითვალისწინოთ აუზში ტენის მარაგის ცვლილება, ე. ი.

$$X=Z+Y\pm U,$$

სადაც **U** არის ტენის მარაგის ცვლილება.

ამრიგად შეიძლება დავასკვნათ, რომ მდინარის ჩამონადენის ჩამოყალიბებაზე ძირითად გავლენას ახდენს კლიმატური ფაქტორები (ნალექები, აორთქლება, ტენიანობა, ტემპერატურა).

2.1.2. ჰაერის ტენიანობა

ჰაერის ტენიანობას განსაზღვრავს ჰაერში არსებული წყლის ორთქლის რაოდენობა. ასხვავებენ აბსოლუტურ ტენიანობას, ფარდობით ტენიანობას და ტენიანობის დეფიციტს.

აბსოლუტური ტენიანობა ეწოდება წყლის ორთქლის რაოდენობას 1 მ ჰაერში აღებულ ტემპერატურაზე; იზომება გ/მ^3-ით და აღინიშნება **e** ასოთი. რაც მეტია ჰაერის ტემპერატურა, მით მეტი ორთქლის დაკავება შეუძლია 1 მ^3 ჰაერს. ასე, მაგალითად, -30^{0}C ტემპერატურაზე ჰაერში შეიძლება იყოს 0,45 გ ორთქლი, ხოლო +30^{0}C ტემ-

პერატურაზე 30.4 გრამი. ჰაერში არსებული ორთქლი ზრდის მის წნევას, რომელსაც წლის ორთქლის დრეკადობას უწოდებენ და იზომება მილიბარებით. მილიბარი შეესაბამება 0.75 მმ ვერცხლის წყლის სვეტის სიმაღლეს.

ჰაერში რეალურად არსებული ორთქლის რაოდენობის **e** შეფარდებას ორთქლის იმ რაოდენობასთან, რომელიც მაქსიმალურად შეიძლება არსებობდეს ჰაერში აღებულ ტემპერატურაზე, **E** ფარდობითი ტენიანობა ეწოდება და აღინიშნება r ასოთი. იგი გამოისახება % -ით.

$$\mathbf{r = \frac{e}{E} 100\%} \qquad (2.1)$$

თუ ფარდობითი ტენიანობა მიაღწევს 100%-ს, ჰაერი გაჯერებულია ორთქლით, მოხდება მისი კონდენსაცია და წარმოიქმნება ნალექი.

აღებულ ტემპერატურაზე ჰაერის გაჯერებისათვის საჭირო ორთქლის რაოდენობისა და ჰაერში რეალურად არსებული ორთქლის რაოდენობის სხვაობას, ტენიანობის დეფიციტი ეწოდება.

$$\mathbf{D=E-e} \qquad (2.2)$$

2.1.3. ნალექები, აორთქლება

აორთქლების პროცესი იმაში მდგომარეობს, რომ თხევადი და მყარი მდგომარეობიდან წყალი გადადის გაზობრივ მდგომარეობაში. წყლის მოლეკულები განუწყვეტლივ მოძრაობენ. რაც მეტია წყლის ტემპერატურა,

მით მეტია მოლეკულების მოძრაობის სიჩქარე. როდესაც მოლეკულების მოძრაობის სიჩქარე გადააჭარბებს მოლეკულების მიზიდულობის ძალებს, ისინი მოწყდებიან წყლის თავისუფალ ზედაპირს და გადადიან ჰაერში. ამიტომ აორთქლების ინტენსივობა პირველ ყოვლისა, დამოკიდებულია წყლის ტემპერატურაზე. გარდა ამისა, აორთქლებაზე დიდ გავლენას ახდენს ჰაერის ნაკადები (ქარი) კერძოდ კი ჰაერის ტურბულენტურობა. ქარი ზრდის ჰაერის ტურბულენტურობას და შესაბამისად იზრდება აორთქლება. აღსანიშნავია, რომ წყალსაცავების ზედაპირზე ქარის სიჩქარე 1,5-2,5 **T**-ჯერ მეტია ხმელეთის ზედაპირზე ქარის სიჩქარესთან შედარებით. გარდა ამისა, აორქლებაზე დიდ გავლენას ახდენს ტენიანობის დეფიციტი. თუ ჰაერი გაჯერებლია ორთქლით, მაშინ აორთქლება პრაქტიკულად წყდება.

აორთქლება ყინულსა და თოვლის ზედაპირიდან რამდენიმე ათეულით ნაკლებია წყლის ზედაპირიდან აორთქლებასთან შედარებით. ზომიერ განედებში იგი 20-30 მმ-ს არ აღემატება ზამთრის მთელ პერიოდში. გაზაფხულზე ჰაერის ტემპერატურის ზრდის გამო, თოვლის ზედაპირიდან აორთქლება მნიშვნელოვნად იზრდება. ყინულისა და თოვლის ზედაპირიდან აორთქლების განსხვავებული თავისებურება ისაა, რომ წყლის გადასვლა მყარი მდგომარეობიდან გაზობრივში ისე ხდება, რომ არ გადადის თხევად ფაზაში. ხმელეთიდან (გრუნტიდან) აორთქლება

იყოფა ორ ნაწილად: აორთქლება ხმელეთიდან, რომელიც არ არის დაფარული მცენარეული საფარით, და აორთქლება ხმელეთიდან, რომელიც დაფარულია მცენარეული საფარით. პირველ შემთხვევაში აორთქლება იმაში მდგომარეობს, რომ ორთქლდება უშუალოდ მიწის ზედაპირზე მოსული ნალექები და კაპილარული აწევის გავლენით მიწის ზედაპირზე ამოსული მიწისქვეშა წყალი. მცენარეული საფარით დაფარული ხმელეთიდან აორთქლება მდგომარეობს იმ ნალექების აორთქლებაში, რომელთაც შეიკავებს მცენარის ფოთლები და ტანი, და აორთქლება რომელიც დაკავშირებულია მცენარის სასიცოცხლო პროცესებთან. ცნობილია, რომ მცენარის მიერ შეწოვილი წყლის დიდი ნაწილი მიდის აორთქლებაზე, ხოლო მცირე ნაწილი ხმარდება სასიცოცხლო პროცესებს (1-ლიტრი შეწოვილი წყლიდან მხოლოდ 2-3 გრამი ხმარდება სასიცოცხლო პროცესებს). აორთქლების ამ რთულ პროცესს, ტრანსპირაცია ეწოდება. აორთქლების გათვალისწინება აუცილებელია მარეგულირებელი წყალსაცავების საშუალებით ჩამონადენის რეგულირების განგარიშებისას.

წყლის ობიექტებიდან და ხმელეთიდან აორთქლებული წყლის ტენი ჰაერის დინებებით გადაიტანება როგორც ვერტიკალური, ისე ჰორიზონტალური მიმართულებით. წყლის ორთქლი მოხდება რა ატმოსფეროს ზედა ფენებში, სადაც ტემპერატურა ნაკლებია, იქმნება იმის პი-

რობა, რომ ფარდობითმა ტენიანობამ მიაღწიოს გაჯერების ზღვარს და მოხდეს კონდენსაცია, ანუ ორთქლის გადასვლა წყლის წვეთებში; თუ ტემპერატურა დაბალია, წარმოიქმნება ყინულის კრისტალები. ამრიგად, წამოვა ნალექი წვიმის, თოვლისა და სეტყვის სახით. ნალექები არათანაბრადაა განაწილებული დროსა და სივრცეში. ნალექების რაოდენობაზე გავლენას ახდენს რელიეფი, სიმაღლე ზღვის დონიდან, ტყის საფარი, ზღვის სიახლოვე, ქარები ზღვიდან და სხვ.

დედამიწაზე ნალექების განაწილებაზე დეტალურ წარმოდგენას გვაძლევს იზოჰიეტებიანი რუკა. იზოჰიეტი ერთნაირი ნალექების მქონე წერტილების შემაერთებელი ხაზია. ნალექების მოსვლის პროცესი დისკრეტული ხასიათისაა, ამიტომ გასაშუალოების აუცილებელი პერიოდია 20-30 წელი. თანამედროვე წვიმსაზომი და თოვლსაზომი ხელსაწყოები გვაძლევს იმის საშუალებას, რომ იზოჰიეტები ავაგოთ, არა მარტო საშუალო წლიური ნალექებისათვის, არამედ თვიური ნალექებისათვისაც. ნალექები იზომება მმ-ით. დროის ერთეულში მოსულ ნალექებს, ინტენსივობას უწოდებენ. პრაქტიკული ამოცანების გადასაწყვეტად დიდი მნიშვნელობა აქვს არა მარტო საშუალო წლიური ნალექების რაოდენობას, არამედ მისი მოსვლის ინტენსივობასაც. წვიმას, რომლის ინტენსივობა 0,5 მმ-ს აღემატება წუთში, კოკისპირულ წვიმას უწოდებენ. მსოფლიოში ყველაზე მეტი ნალექი მოდის

ინდოეთში (ბენგალის შტატში), სადაც 1861 წელს მოვიდა 22900 მმ; დღე-ღამის განმავლობაში ყველაზე მეტი ნალექი დაფიქსირდა ფილიპინების კუნძულზე 1168 მმ; საქართველოში ყველაზე მეტი ნალექი მოდის ბათუმში 2700 მმ წელიწადში. ნალექები იზომება ნალექსაზომით, რომელიც წარმოადგენს 500 სმ ფართობის მქონე კასრს, რომელსაც ვერტიკალურ დგარზე ათავსებენ 2 მ-ის სიმაღლეზე მიწის ზედაპირიდან. მასში მოხვედრილ ნალექს გადაასხამენ სპეციალურად დაგრადიურებულ მენზურაში, რომელიც პირდაპირ გვაძლევს ნალექების სიდიდეს მმ-ით. არსებობს ავტომატური თვითჩამწერი ხელსაწყო – პლუვიოგრაფი.

II თავი. მდინარეები

2.2.1. მდინარის ქსელი. წყალშემკრები აუზი

მიწის ზედაპირზე ნალექების სახით მოსული წყალი, მოხვდება რა დადაბლებულ ადგილებში, ბუნებრივი ქანობის გაყოლებით იწყებს დინებას ჯერ პატარ-პატარა ნაკადულებად, რომლებიც გარკვეული მანძილის გავლის შემდეგ წარმოქმნიან მდინარეებს. ეს პატარა მდინარეები შემდგომ თავს იყრიან ერთ მთავარ მდინარეში, რომელიც ჩაედინება ზღვაში. ასე შეიქმნება მდინარის ქსელი, რომელსაც გეგმაში აქვს დატოტვილი ხის ფორმა და რომელიც შედგება მთავარი მდინარისა და მისი მარჯვენა და მარცხენა შენაკადებისაგან. იმ ადგილს, სადაც მდინარე

იწყება, სათავე ეწოდება, ხოლო შესართავი ჰქვია იმ ადგილს, სადაც მდინარე უერთდება ზღვას, ტბას ან მეორე მდინარეს.

მდინარის კლაკნილობას ახასიათებენ ე.წ. კლაკნილობის კოეფიცენტით, რომელიც წარმოადგენს მდინარის კლაკლინი სიგრძისა და სათავის, და შესართავი უბნების შემაერთებელი სწორი ხაზის სიგრძის ფარდობას

$$\mathbf{K} = \frac{\ell}{\mathbf{L}}. \qquad (2.3)$$

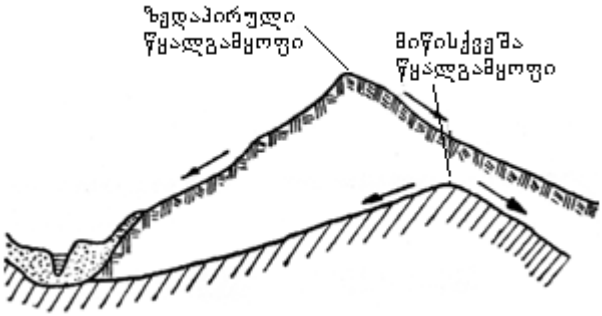
მდინარის ქსელი ხასიათდება აგრეთვე სიხშირით. იგი წარმოადგენს მთავარი მდინარისა და მისი შენაკადების სიგრძეების ჯამისა და წყალშემკრები აუზის ფართობის ფარდობას.

$$\mathbf{a} = \frac{\sum \ell}{\mathbf{F}}. \qquad (2.4)$$

სადაც ***l*** ცალკეული მდინარის სიგრძეა; **F** – წყალშემკრები აუზის ფართობი.

ხმელეთის ის ნაწილი, რომლიდანაც წყალი ჩაედინება ცალკეულ მდინარეში (ტბაში) ან მდინარეთა სისტემაში, წარმოადგენს ამ მდინარის (ტბის) ზედაპირულ წყალშემკრებ აუზს. მიწისქვეშა წყალშემკრები იმ გრუნტების ერთობლიობაა, საიდანაც მიწისქვეშა წყალი შეედინება მდინარეებში, ტბაში, წყალსაცავში (ნახ.2.1). ზედაპირული წყალშემკრები შემოსაზღვრულია წყალგამყოფი ხაზით, მისი დადგენა შეიძლება ტოპოგრაფიული რუკებიდან. იგი

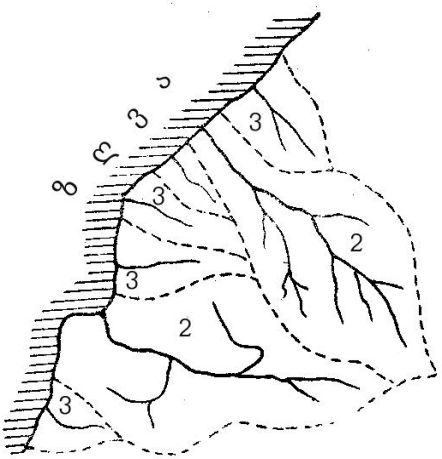
გადის ხმელეთის უმაღლეს წერტილებში, შეკრული კონტურია, რომელიც ერთმანეთისგან გამოყოფს მეზობელ წყალშემკრებ აუზებს (ნახ. 2.2) და რომლის დადგენაც შესაძლებელია საკმარისი სიზუსტით. პრაქტიკაში მდინარის წყალშემკრებ აუზად მიიღება ზედაპირული წყალშემკრები აუზის ფართობი **F**.



ნახ. 2.1. ზედაპირული და მიწისქვეშა წყალგამყოფები

მდინარის აუზს ახასიათებენ სიგრძით L, საშუალო სიგანით $\mathbf{B} = \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{F}}$ და ასიმეტრიულობის კოეფიციენტით

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}_{\text{მარცხენა}}}{\mathbf{F}_{\text{მარჯვენა}}}.$$



ნახ.2.2.

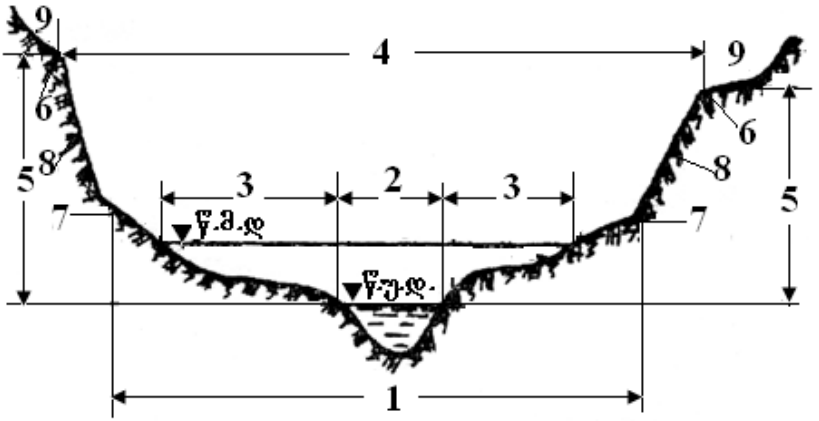
1 – წყალგამყოფი ხაზები, 2 – მდინარის სისტემები,
3 – ცალკეული მდინარეები, რომელიც უშუალოდ ერთვის ზღვებს

2.2. 2 მდინარის ხეობა. მდინარის გრძივი პროფილი

მდინარის ხეობის ძირითადი დამახასიათებელი ელემენტებია: ხეობის ფსკერი, მდინარის კალაპოტი, ჭალა ანუ ნოღა კალაპოტი, სიგანე, წარბი, ფერდობის ძირი, სიმაღლე და ტერასები (ნახ. 2.3).

ხეობის დადაბლებულ ნაწილს, ხეობის ფსკერს უწოდებენ. ფსკერი ხშირად დაფარულია მდინარის მიერ ტრანსპორტირებული მყარი ნატანით – ალუვიონით. ალუვიონში გაჭრილია მდინარის კალაპოტი ანუ ხეობის ის ნაწილი, რომელშიც წყალი გაედინება ჩვეულებრივ

პირობებში. კალაპოტის უდაბლესი წერტილების შემაერთებელ ხაზს, ტალვეგი ჰქვია.



ნახ.2.3. ხეობის განივი კვეთი (ტერასების გარეშე):
1–ხეობის ფსკერი; 2–მდინარის კალაპოტი; 3–ნოღა კალაპოტი; 4-ხეობის განი; 5-სიმაღლე; 6–ხეობის წარბი; 7-ფედობის ძირი; 8–ხეობის ფერდობი; 9–მომიჯნავე ადგილმდებარეობა; წმდ –წყლის მაქსიმალური დონე; წუდ – წყლის უდაბლესი დონე.

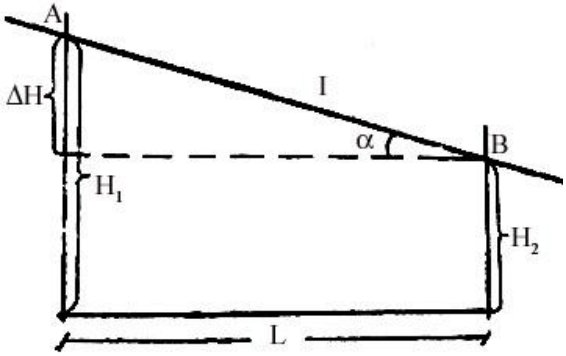
ჭალა ანუ ნოღა კალაპოტი აგებულია მყარი ნატანით, წარმოადგენს მოვაკებულ ადგილს, რომელიც წყლით იფარება მხოლოდ წყალმეტობის დროს. მას აქვს ქანობი მდინარისაკენ. ხეობის წარბი არის ხეობის ფერდობებისა და მიწის ზედაპირის ურთიერთშეუღლების წერტილებში გამავალი ხაზი.

ხეობის წარბის ნიშნულისა და წყლის უდაბლესი დონის ნიშნულს შორის სხვაობა არის ხეობის სიმაღლე.

ხეობის ფერდობზე საფეხურისებრ განლაგებულ მოვაკებულ ადგილებს, რომელზედაც მდინარე მიედინებოდა ისტორიულ წარსულში, ტერასა ეწოდება. ვიწრო და ღრმა ხეობას, კანიონი ეწოდება.

მდინარის სათავესა და შესართავში არსებულ ნიშნულთა სხვაობას, მდინარის ვარდნას უწოდებენ, $\Delta H=H_1-H_2$ ვარდნის შეფარდებას მდინარის სიგრძესთან, ქანობი ეწოდება (ნახ. 2.4)

$$I = \frac{\Delta H}{\ell} = tg\alpha \qquad (2.5)$$

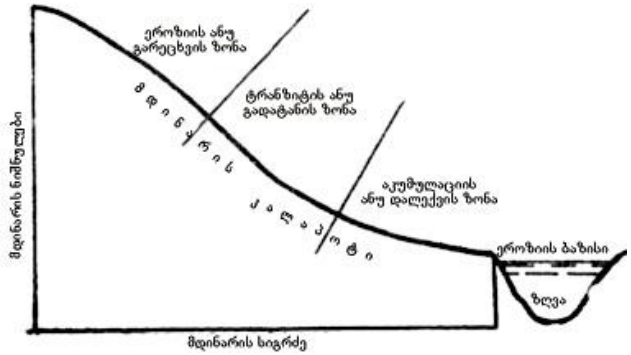


ნახ.2.4 მდინარის ვარდნა და ქანობი

მდინარის სიგრძეზე გამოყოფენ სამ დამახასიათებელ უბანს (ნახ. 2.5)

მდინარის ზემო – მაღალმთიან და მთიან ნაწილში დიდია მდინარის ქანობი და შესაბამისად დიდია ნაკადის

მოძრაობის სიჩქარე. ამიტომ ამ უბანზე ხდება მდინარის კალაპოტის ინტენსიური გამორეცხვა და მას ეროზიის ზონას უწოდებენ.

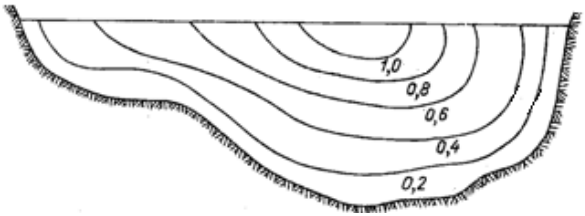


ნახ.2.5. მდინარის გრძივი პროფილის დამახასიათებელი პროფილი

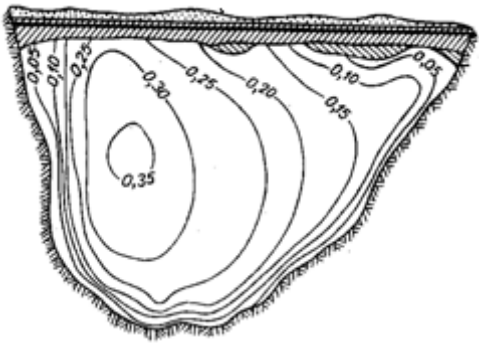
მდინარის შუა ნაწილში – მთისწინა უბნებში რეცხვითი და დალექვითი პროცესები ერთმანეთს ენაცვლება და ძირითადად დაცულია წონასწორობის პროფილი. ამიტომ ამ უბანს, ტრანზიტის ანუ გადატანის ზონას უწოდებენ. მდინარის ქვემო ნაწილში ქანობი და შესაბამისად ნაკადის სიჩქარე მცირდება, ამიტომ ამ უბანზე ხდება მყარი ნატანის დალექვა. აქედან გამომდინარე, ამ უბანს აკუმულაციის ანუ დალექვის ზონას უწოდებენ.

2.2.3. მდინარის ნაკადის კინემატიკური თავისებურებანი

მდინარის ნაკადში სიჩქარის განაწილება გამოირჩევა დიდი სირთულით. ამიტომ ჰიდროლოგიაში ფართოდ გამოიყენება სიჩქარის ველის განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდი. თვალსაჩინო წარმოდგენას მდინარეში სიჩქარეთა განაწილებაზე გვაძლევს ერთნაირი ადგილობრივი სიჩქარეების შემაერთებელი ხაზები - იზოტაქები. იზოტაქების მოხაზულობა მჭიდროდაა დაკავშირებული კალაპოტის ფორმასთან და მის ხორკლიანობასთან. განსაკუთრებით არსებითი განსხვავებაა უდაწნეო ნაკადში სიჩქარის განაწილების პროფილსა და ყინულით დაფარულ ნაკადში სიჩქარის განაწილების პროფილებს შორის (ნახ.2.6 და 2.7). თუ პირველ შემთხვევაში მაქსიმალური სიჩქარე მდებარეობს სითხის თავისუფალ ზედაპირზე, მეორე შემთხვევაში მაქსიმალური სიჩქარე მოთავსებულია სიღრმეში და მისი მდებარეობა დამოკიდებულია კალაპოტის ფსკერისა და ყინულის ქვედა ზედაპირის ხორკლიანობათა შეფარდებაზე. ჰიდრომეტრულ კვეთებს მონიშნავენ მდინარის სწორხაზოვან უბანზე, სადაც მოძრაობა თანაბარი ან მასთან მიახლოებულია. ამიტომ ჰიდროლოგიის სხვადასხვა ამოცანების გადაწყვეტის დროს გამოიყენება ჰიდრავლიკაში თანაბარი მოძრაობისათვის მიღებული საანგარიშო ფორმულები.



ნახ.2.6. იზოტაქების განლაგების ტიპური სქემა მდინარის ღია კალაპოტში



ნახ.2.7. იზოტაქების განლაგების ტიპური სქემა ყინულით დაფარულ მდინარის კალაპოტში

განსაკუთრებით რთული კინემატიკური სურათი გვაქვს მდინარის მოხვეულ უბნებში. როგორც აღვნიშნეთ, ადგილობრივი სიჩქარე მცირდება სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან ფსკერისაკენ. ამიტომ ცენტრიდანული ძალები ზედაპირთან გაცილებით მეტია, ვიდრე ფსკერთან. ეს გარემოება იწვევს განივ ცირკულაციას, რის გამოც ზედაპირული დენის წირები მიმართულია ამოზნექილი

გვერდიდან შეზნექილი გვერდისაკენ, ხოლო ფსკერული დენის წირები პირიქით – შეზნექილი გვერდიდან ამოზნექილი გვერდისკენ. ამასთან, მაქსიმალური სიჩქარეები თანდათან გადაადგილდებიან ამოზნექილი გვერდიდან შეზნექილი გვერდისაკენ. ამიტომ ცირკულაცია იწვევს არასიმეტრიული ცოცხალი კვეთის ფართობების ჩამოყალიბებას. ამოზნექილ გვერდთან გვაქვს მყარი ნატანის დალექვა, შეზნექილ გვერდთან კი ღრმა გარეცხვები და ნაკადის დიდი სიღრმეები – ნატბორები. რადგან მდინარეს გეგმაში კლაკნილი მოხაზულობა აქვს, ამიტომ ნატბორები მდინარის ხან ერთ ნაპირთან იქმნება, ხან მეორესთან. შესაბამისად, გადაინაცვლებს მდინარის უდაბლესი წერტილების შემაერთებელი ხაზი – ფარვატერი. ორი მეზობელი მოხვეულობის შემაერთებელი სწორი უბანი ხასიათდება დაბალი სიღრმეებით, რომელსაც ჩქერებს უწოდებენ.

2.2.4. მდინარეთა კვება. მდინარის რეჟიმი. წყლის დონის ცვალებადობა

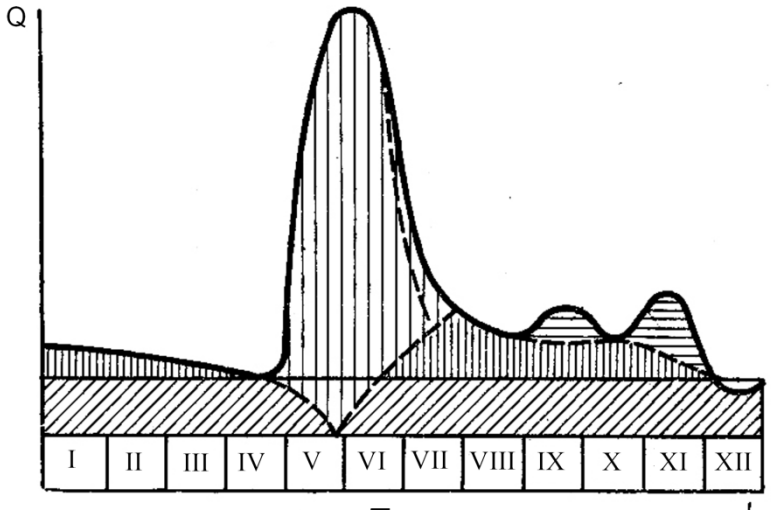
იმ ფაქტორების ერთობლიობას, რომლებიც განსაზღვრავს მდინარის წყლიანობას, უწოდებენ მდინარის კვებას. მდინარის კვებაში მონაწილეობენ ზედაპირული წყლები თხევად და მყარ მდგომარეობაში და მიწისქვეშა წყლები. ამრიგად, მდინარე შეიძლება იკვებებოდეს წვიმის წყლით, თოვლის და მყინვარების დნობით ჩამოყალიბებული

წყლით და მიწისქვეშა წყლებით. წყლის რეჟიმი ეწოდება წყლის დონის, ხარჯისა და მოცულობის ცვალებადობას დროში. მდინარის წყლის რეჟიმის ძირითად რაოდენობრივ მახასიათებელს წარმოადგენს ჰიდროგრაფი – წყლის ხარჯის ქრონოლოგიური ცვალებადობის გრაფიკი მდინარის აღებულ კვეთში (ნახ. 2.8). ჰიდროგრაფი გვაძლევს ჩამონადენის შიგაწლიურ განაწილებაზე სრულ წარმოდგენას ანუ ჩამონადენის განაწილებას წლის კალენდარულ პერიოდში, ან სეზონში. ჰიდროგრაფის ანალიზის შედეგად შეიძლება განვსაზღვროთ მდინარის ჩამონადენის წარმოშობა. ჰიდროგრაფით შემოხაზული ფართობი რიცხობრივად ჩამონადენის მოცულობის ტოლია; გამოიყენება აგრეთვე მდინარეში წყლის დონის ცვალებადობის გრაფიკი.

წყლის რეჟიმის ძირითადი ფაზებია – წყალმეტობა, წყალდიდობა და წყალმცირობა. მდინარის წყლის რეჟიმის ფაზას, რომელიც ყოველწლიურად მეორდება ერთსა და იმავე სეზონში, ხასიათდება დიდი წყლიანობით, წყლის დონის აწევით ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში და გამოწვეულია თოვლის დნობით ან თოვლისა და მყინვარის ერთდროული დნობით, წყალმეტობა ეწოდება.

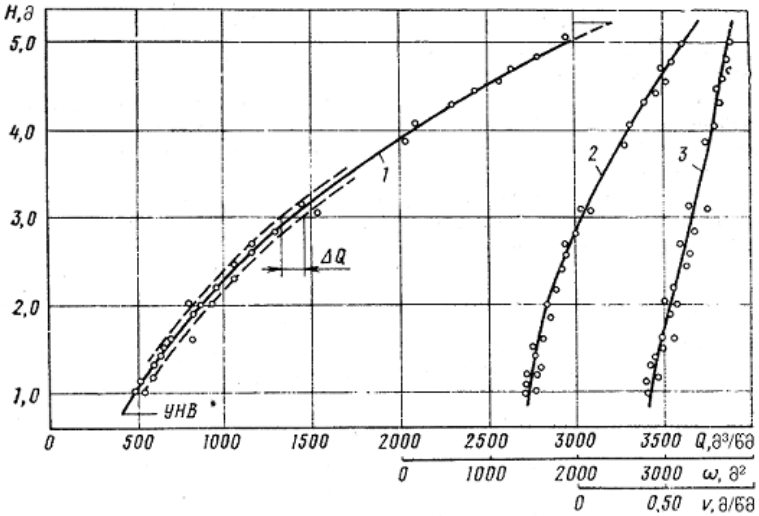
წყლის რეჟიმის ფაზა, რომელიც შეიძლება მრავალჯერ განმეორდეს წლის სხვადასხვა სეზონში და რომელიც ხასიათდება წყლის ხარჯისა და დონის ხანმოკლე

პერიოდში აწევით, წყალდიდობა ეწოდება. იგი გამოწვეულია წვიმებით ან თოვლის დნობით, საერთო დათბობის შედეგად.



ნახ. 2.8

მდინარის ჩამონადენის მახასიათებლები (წყლის დონე, ხარჯი, სიმაღლე და სხვ.) განიცდის დღეღამურ, თვიურ, წლიურ (სეზონურ) და მრავალწლიურ ცვალებადობას. აღებულ კვეთში მდინარის წყლის დონესა და ხარჯს შორის გრაფიკულად გამოსახულ დამოკიდებულებას, ხარჯის მრუდს უწოდებენ. (ნახ. 2.9)



ნახ. 2.9. წყლის ხარჯის, ცოცხალი კვეთის ფართობისა და სიჩქარეთა დამახასიათებელი მრუდები

მდინარეში წყლის ხარჯის ცალკეული გაზომვების ძირითადი მიზანია კავშირის დამყარება წყლის ხარჯსა და დონეს შორის. **Q=f(H)**. ამის მიხედვით შემდგომში შესაძლებელია წყლის ყოველდღიური ხარჯის დადგენა გაზომილი წყლის დონის საშუალებით. რადგანაც ხარჯი **Q=ω·υ,** ხარჯის მრუდს აქვს პირდაპირი კავშირი ცოცხალი კვეთის ფართობსა და საშუალო სიჩქარის მრუდებთან. ცოცხალი კვეთის მრუდს უწოდებენ ω=f(H) გრაფიკულ გამოსახულებას, ხოლო საშუალო სიჩქარისა და დონეს შორის გრაფიკულად გამოსახულ კავშირს, საშუალო სიჩქარის მრუდს უწოდებენ **υ=f(H)**.

ხარჯის მრუდზე ცდებით მიღებული წერტილები გარკვეული გაბნევით განლაგდებიან; მრუდს მდორედ ატარებენ გაბნევის ზოლის შუაში.

2.2.5. მდინარის ჩამონადენის მახასიათებელი ელემენტები

წყლის ობიექტების მახასიათებლების ცვალებადობას დროში, ჰიდროლოგიურ რეჟიმს უწოდებენ. მისი ერთერთი ძირითადი მახასიათებელია ჩამონადენი. მდინარის წყლიანობის დასახასიათებლად აგრეთვე სხვადასხვა მდინარეთა ჩამონადენის შესადარებლად ჰიდროლოგიაში იყენებენ შემდეგ მახასიათებლებს:

1. მდინარის ხარჯი არის დროის ერთეულში აღებულ განივკვეთში გადენილი წყლის რაოდენობა (მოცულობა). მას ჩვეულებრივ გამოსახავენ $მ^3$/წმ-ით. იგი ახასიათებს მდინარის წყლიანობას აღბულ მომენტში. ჰიდროლოგიური გაანგარიშების დროს გამოიყენება ხარჯის საშუალო დღიური, საშუალო თვიური, საშუალო წლიური და საშუალო მრავალწლიური მნიშვნელობები.

2. ჩამონადენის მოცულობა W არის მდინარის აღებულ კვეთში დროის პერიოდში გადენილი სითხის მოცულობა (რაოდენობა) $W=Q_{საშ}T$ გამოისახება $მ^3$-ით ან $კმ^3$-ით. სადაც **W** არის დროის **T** პერიოდში გადენილი სითხის მოცულობა, ხოლო $Q_{საშ}$ წყლის საშუალო ხარჯი განსახილველ პერიოდში.

3. ჩამონადენის მოდული **M** არის წყლის ხარჯი, რომელიც ჩამოედინება წყალშეკრები აუზის ერთეული ფართობიდან დროის ერთეულში. მას გამოსახავენ ლ/წმ. კმ^2-ით, ზოგჯერ მ^3/წმ კმ^2-ით. ჩამონადენის მოდულსა და ხარჯს შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება

$$\mathbf{M}=\frac{\mathbf{1000\cdot Q}}{\mathbf{F}}=\left[\frac{\text{ლ}}{\text{წმ}\cdot\text{კმ}^2}\right] \qquad (2.6)$$

1000 არის მ^3/წმ-დან ლ/წმ-ში გადამყვანი კოეფიციენტი.

მოდული ახასიათებს წყალშემკრები აუზის წყლიანობას. მდინარისათვის შეიძლება გამოთვლილ იქნეს მოდული აღებული მომენტისათვის, ასევე საშუალო ჩამონადენის მოდული რაიმე პერიოდისათვის (მაგ., თვისათვის, წლისათვის და ა.შ.). წლიური ჩამონადენის დასახასიათებლად იღებენ ე.წ. „ჰიდროლოგიურ“ წელს. მის დასაწყისად ხშირად თვლიან იმ პერიოდს, როდესაც მდინარის საზრდოობაში შეიმჩნევა მკვეთრი ცვლილება ან როდესაც ზედაპირული ჩამონადენი სრულიად წყდება და იწყება ნალექების დაგროვება თოვლის სახით. ჰიდროლოგიური წლის დასაწყისად ევროპულ ნაწილში ხშირად იღებენ პირველ ოქტომბერს, პირველ ნოემბერს ან პირველ დეკემბერს.

ჰიდროლოგიურ გაანგარიშებაში ფართოდ გამოიყენება ჩამონადენის მოდულის რუკა. მასზე დააქვთ საშუალო

მრავალწლიური მოდულის მნიშვნელობა აუზის ცენტრში. ერთნაირი მოდულების მქონე წერტილებს აერთებენ იზოხაზებით.

4. ჩამონადენის შრის სიმაღლეა **h.** თუ ცნობილია ჩამონადენის მოცულობა რაიმე პერიოდში (**W** მ^3) და აუზის ფართობი, მაშინ ჩამონადენის შრის სიმაღლე ამ პერიოდში გამოითვლება ფორმულით

$$\mathbf{h = \frac{W \cdot 10^3}{F \cdot 10^6}} \text{ [მმ].} \qquad (2.7)$$

10^6 არის კმ^2-ის მ^2-ში გადამყვანი რიცხვი, ხოლო მ-დამ მმ-შო გადამყვანი რიცხვია 10^3.

ჩამონადენის მოდულისა და შრის სიმაღლეს შორის არსებობს შემდეგი კავშირი:

$$\mathbf{h=M \cdot N,}$$

სადაც **N** არის მილიონი წამის რაოდენობა აღებულ პერიოდში. 30 დღიან თვეში **N=2,59**, ხოლო 31 დღიანი თვისათვის **N=2,68**, წლისათვის **N=31,56 .10^6.**

5. ჩამონადენის ნორმა. წლიური ჩამონადენი განიცდის მნიშვნელოვან ცვლილებას მრავლწლიან პერიოდში. თუ გამოვთვლით ჩამონადენის საშუალო მრავალწლიურ მნიშვნელობას, მაშინ მივიღებთ მეტ-ნაკლებად მყარ მახასაითებლებს, რომელსაც საშუალო მრავლწლიურ ჩამონადენს ანუ ნორმას უწოდებენ. მაგალითად **Q_0, h_0, M_0** და ა.შ.

6. მოდულური კოეფიციენტი არის ჩამონადენის ნებისმიერი მახასიათებლის აღებული მნიშვნელობის შეფარდება ნორმასთან

$$\mathbf{K = \frac{M_i}{M_0} = \frac{hi}{h_0} = \frac{Q_i}{Q_0}} \ . \qquad (2.8)$$

i ინდექსით აღნიშნულია ჩამონადენის სიდიდე აღებული პერიოდისათვის. მოდულური კოეფიციენტი ახასიათებს მდინარის წყლიანობას აღებულ პერიოდში. მაგალითად, როდესაც k>1, ის წლები უხვწყლიან წლებად ითვლება და პირიქით.

7. ჩამონადენის კოეფიციენტი არის აღებული პერიოდის შრის სიმაღლის **h** შეფარდება იმავე პერიოდში მოსული ნალექების რაოდენობასთან **x** და გამოისახება პროცენტებით

$$\mathbf{\eta = \frac{h}{x} \cdot 100\%}$$

იგი გვიჩვენებს მოსული ნალექების რა რაოდენობა ხმარდება მდინარის ჩამონადენის ჩამოყალიბებას.

III თავი. ჰიდროლოგიური გაანგარიშებები

2.3.1. მდინარის ჩამონადენის ძირითადი სტატისტიკური მახასიათებლების განსაზღვრა

ჰიდროლოგიური გაანგარიშების ძირითადი მიზანია იმ მახასიათებლების განსაზღვრა, რომლებიც რაოდენობრივად აღწერსჰიდროლოგიურ პროცესებს. მათ ჰიდროლოგიურ მახასიათებლებს უწოდებენ. ... მდინარის ჩამონადენის ფორმირების ფიზიკურ-გეოგრაფიული პირობების მრავალფეროვნება და მათი ცვლილება დროში განაპირობებს ჰიდროლოგიური გაანგარიშების სირთულეს.

ჰიდროლოგიური მახასიათებლების ცვალებდობა აშკარად გამოხატულ ალბათურ ხასიათს ატარებს, ამიტომ საანგარიშო ჰიდროლოგიური მახასიათებლების განსაზღვრის (შეფასების) მეთოდები ეყრდნობა მათზე არსებულ დაკვირვებათა მწკრივების სტატისტიკურ კანონზომიერებებს. ცხადია, რაც უფრო ხანგრძლივი იქნება დაკვირვებათა მწკრივი, მით უფრო ზუსტი იქნება სტატისტიკური კანონზომიერება და მით უფრო საიმედო იქნება მომავლისათვის ჰიდროლოგიურ მახასიათებელთა პროგნოზი.

მწკრივის ცვალებადობის ძირითად სტატისტიკურ მახასიათებლებს წარმოადგენს მწკირვების წევრთა საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობა X_0, ვარიაციის კოეფიციენტი C_v და ასიმეტრიის კოეფიციენტი C_s. თუ გვაქვს

დაკვირვებათა $X_1, X_2, X_3 \ldots X_n$ მწკრივი, მაშინ მისი საშუალო არითმეტიკული ანუ მოდა შემდეგნაირად გამოითვლება:

$$X_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \,, \qquad (2.9)$$

სადაც n არის მწკრივის წევრთა რაოდენობა.

სტატისტიკური მწკრივის საშულო არითმეტიკულის მიმართ გაბნევის (ცვალებადობის) დასახასიათებლად გამოიყენება საშუალო კვადრატული გადახრა ანუ სტანდარტი, რომელიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_0)^2}{n-1}} \,. \qquad (2.10)$$

საშუალო კვადრატული გადახრის კვადრატს, დისპერსიას უწოდებენ. საშუალო კვადრატული გადახრა კარგად ახასიათებს მწკრივის წევრთა ცვალებადობას, მაგრამ მას აქვს მწკრივის წევრთა განზომილება. ჰიდროლოგიური განგარიშებისას ხშირად საჭირო ხდება სხვადასხვა ჰიდროლოგიური მახასიათებელების დაკვირვებათა მწკრივების ცვალებადობის შედარება. საშუალო კვადრატული გადახრა (რადგან მას აქვს მწკრივის წევრთა განზომილება) შედარებისათვის არ გამოდგება. სხვადასხვა მწკრივების ცვალებადობის შედარების მიზნით, საშუალო კვადრატულ გადახრას გამოსახავენ

საშუალო არითმეტიკულის ნაწილებში, რომელსაც ვარიაციის კოეფიციენტს უწოდებენ. იგი ტოლია

$$C_V = \frac{\sigma_X}{X_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i - 1)^2}{n-1}} \quad . \qquad (2.10)$$

$K_i = \frac{X_i}{X_0}$ წარმოადგენს მწკრივის აღებული წევრის ფარდობას საშუალო არითმეტიკულთან, მას მოდულური კოეფიციენტი ეწოდება.

ვარიაციის კოეფიციენტი წარმოადგენს მწკრივის წევრთა ცვალებადობის მახასიათებელ უგანზომილებო სიდიდეს.

საშუალო არითმეტიკული და ცვალებადობის სხვადასხვა მახასიათებლები **(σX,CV)** სრულად ვერ ახასიათებს მწკრივს. საქმე ისაა, რომ სხვადასხვა მწკრივებიდან შეიძლება შეგვხვდეს ისეთები, რომლებსაც აქვს ერთნაირი საშუალო არითმეტიკული და დისპერსია, მაგრამ ერთმანეთისაგან განხვავდებიან ცენტრის მიმართ სხვადასხვაგვარი დაჯგუფებით და განაწილებით. თუ მწკრივის წევრთა გადახრებიდან დადებით და უარყოფით გადახრათა რაოდენობა ერთნაირია (მიუხედავად მათი აბსოლუტური სიდიდისა), მაშინ ასეთ მწკრივს სიმეტრიულს უწოდებენ. თუ დადებით გადახრათა რიცხვი უარყოფით გადახრებთან შედარებთ მცირეა, მაშინ ამბობენ, რომ

მწკრივს აქვს დადებითი ასიმეტრია, ხოლო თუ მწკრივში დადებითი გადახრები სჭარბობს უარყოფით გადახრებს, მაშინ გვაქვს უარყოფითი ასიმეტრია. თუ გადახრებს ავიყვანთ კუბში დადებითი ასიმეტრიის დროს დადებითი გადახრები გაიზრდება უფრო მეტად, ვიდრე უარყოფითი გადახრები და გადახრათა კუბების ჯამი იქნება დადებითი. უარყოფითი ასიმეტრიის დროს კი გადახრათა კუბების ჯამი იქნება უარყოფითი. მწკრივის სიმეტრიულობის დასახასიათებლად უგანზომილებო გამოსახულების მისაღებად გადახრათა კუბების საშუალო მნიშვნელობას ყოფენ საშუალო კვადრატული გადახრის კუბზე. ამ ფარდობას ასიმეტრიის კოეფიციენტს უწოდებენ. იგი ტოლია

$$C_S = \frac{\sum_{i=2}^{n}(K_i - 1)^3}{nC_v^3} \quad . \qquad (2.11)$$

ცხადია, სიმეტრიული მწკრივისათვის ასიმეტრიის კოეფიციენტი $C_S = 0$. ასიმეტრიის კოეფიციენტის მნიშვნელობა რომ საიმედო იყოს, საჭიროა გვქონდეს დაკვირვებათა ხანგძლივი მწკრივი (100 წელი და მეტი), რაც ჰიდროლოგიურ პრაქტიკაში იშვიათად გვხვდება. რადგან ვარიაციის კოეფიციენტი უფრო მდგრადია დროის მიმართ, ამიტომ საინჟინრო-ჰიდროლოგიურ გაანგარიშებებში ასიმეტრიის კოეფიციენტს გამოთვლიან ემპირიული

ფორმულით, როგორც ვარიაციის კოეფიციენტის ჯერად რიცხვს, **Cs=aCv.**

თუ მდინარე იკვებება თოვლის დნობის ხარჯზე, **a=2**, ე.ი. **Cs=2Cv**.

თუ მდინარე იკვებება წვიმების ხარჯზე, **a =4**, ე.ი. **Cs=3Cv**.

თუ მდინარეს აქვს შერეული კვება, **a =3** და **Cs=3Cv.**

2.3.2. კორელაცია

ჰიდროლოგიური კვლევების დროს ხშირად წარმოიქმნება ორი და მეტი მწკრივის ჰიდროლოგიურ მახასიათებლებს შორის დამოკიდებულების დამყარების აუცილებლობა.

თუ **Y** ფუნქცია დამოკიდებულია არა მარტო **X_1, X_2, X_3 … X_n**-ზე, არამედ სხვა ფაქტორებზეც, მაშინ ფუნქციონალური კავშირებისგან განსხვავებით, **Y** –სა და **X_1, X_2, X_3 … X_n** -ს შორის კავშირს, კორელაციური ეწოდება.

ფუნქციონალური დამოკიდებულების შემთხვევაში არგუმენტის თითეულ მნიშვნელობას შეესაბამება **Y** ფუნქციის მხოლოდ ერთი განსაზღვრული მნიშვნელობა. კორელაციური დამოკიდებულების შემთხვევაში არგუმენტის თითოეულ მნიშვნელობას შეიძლება შეესაბამებოდეს ფუნქციის რამდენიმე მნიშვნელობა.

ჰიდროლოგიურ მახასიათებლებს შორის კავშირი უმეტეს შემთხვევაში კორელაციურია. კორელაციური დამოკიდებულება შეიძლება გამოისახოს ანალიზურად თუ შევარჩევთ განტოლებას, რომელიც კორელაციურად დააკავშირებს **X** და **Y**-ს.

კორელაციურ კავშირს ახასიათებენ კორელაციის კოეფიციენტით **R**. იგი იცვლება 0-დან 1-მდე, მაგრამ მას შეიძლება ჰქონდეს დადებითი ან უარყოფითი ნიშანი. კორელაციის კოეფიციენტის დადებითი მნიშვნელობა გვიჩვენებს პირდაპირ კავშირს, როდესაც **X** და **Y**-ის ორივე მნიშვნელობა იზრდება ან მცირდება ერთდროულად. კორელაციის კოეფიცენტის უარყოფითი მნიშვნელობა გვიჩვენებს, რომ **X**-ის გაზრდის შემთხვევაში **Y** მცირდება, რაც შებრუნებული კავშირის მაჩვენებელია.

რაც უფრო ახლოსაა **R** ერთთან მით უფრო მჭიდროა **X** და **Y** –ს შორის კავშირი.

კორელაციის კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულით

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_0)(Y_i - Y_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i - X_0)^2 \cdot \sum_{i=1}^{N}(Y_i - Y_0)^2}} . \qquad (2.13)$$

ჰიდროლოგიაში ორი მწკრივის ურთიერკავშირის ხარისხის განსაზღვრასთან ერთად, ხშირად საჭირო ხდება აღებული მწკრივის წევრთა ურთიერკავშირის (შიგა კავ-

შირის) განსაზღვრა, ამისათვის იყენებენ ავტოკორელაციას.

ავტოკორელაციის კოეფიცენტი გამოითვლება ფორმულით

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_t - X_0)(X_{t+k} - X_0)}{\sigma_X^2} \qquad (2.14)$$

სადაც X_t საწყისი მწკრივია $t=0,1,2,\ldots, N$; X_{t+k} მწკრივია, რომელიც გადაადგილებულია K ბიჯით ($K=1,2,3,\ldots, \frac{N}{4}$).

2.3.3. უზრუნველოფის მრუდების გამოყენება ჰიდროლოგიაში

როგორც ვიცით, მდინარის ჩამონადენი განიცდის ცვალებადობას დროში. წლიური ცვალებადობა გამოწვეულია წელიწადის დროებით. თუ მხედველობაში არ მივიღებთ ჩამონადენის დღეღამურ ცვალებადობას, გვექნება ჩამონადენის მახასიათებლების უწყვეტი მწკრივი. ჩამონადენის მრავალწლიანი რეჟიმის შესწავლის დროს საქმე გვაქვს წყვეტილ მწკრივთან, რომლებსაც ერთმანეთისგან ყოფს დროის მონაკვეთი. უწყვეტი მწკრივის ხანგრძლივობა ანუ უზრუნველყოფა გვიჩვენებს აღებული სიდიდის ან მასზე მეტი სიდიდის ხარჯის არსებობის ხანგრძლივობას. წყვეტილი წკრივის უზრუნველყოფა გვიჩვენებს იმ შემთხვევების რიცხვს, რამდენჯერაც გვხვდე-

ბა აღებული სიდიდის ან მასზე მეტი სიდიდის ხარჯი. თუ წყვეტილ მწკრივს დავალაგებთ კლებადობის მიხედვით, მაშინ მწკრივის წევრთა უზრუნველყოფა გამოითვლება ფორმულით

$$\mathbf{P = \frac{m}{n} \cdot 100\%},$$

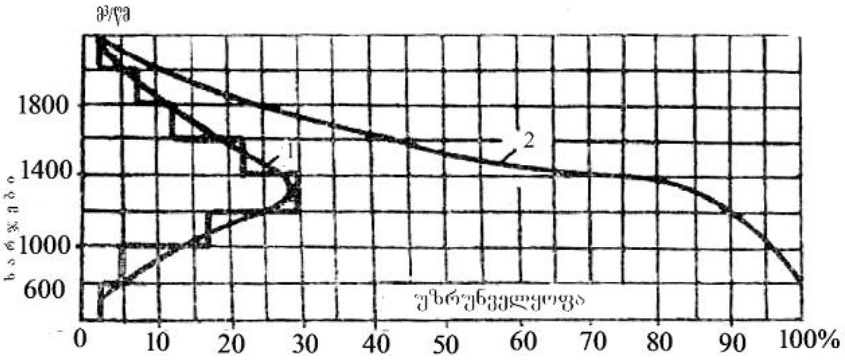
სადაც **m** კლებადობით დალაგებული მწკრივის წევრის რიგითი ნომერია; **n** კი მწკრივის წევრთა რიცხვი. იმისათვის, რომ 0%-იანი და 100%-იანი უზრუნველყოფა გამოვრიცხოთ, ემპირიული უზრუნველყოფის საანგარიშოდ გამოიყენება შემდეგი ფორმულა:

$$\mathbf{P = \frac{m}{n+1} \cdot 100\%} \qquad (2.15)$$

ჰიდროლოგიური მწკრივების დასახასიათებლად გამოიყენება შემდეგი გრაფიკები: ჰიდროგრაფი, განმეორების გრაფიკი და უზრუნველყოფის გრაფიკი.

განმეორების გრაფიკის ასაგებად ორდინატთა ღერძზე გადაზომავენ კლებადობით დალაგებულ ხარჯებს, ხოლო აბსცისთა ღერძზე ხარჯების განმეორების რიცხვს. ხარჯებს ყოფენ ინტერვალებად და საზღვრავენ თითოეული ინტერვალის შესაბამისი ხარჯების განმეორების რიცხვს. წერტილები აიღება ინტერვალის შუაში მიღებულ წერტილებს აერთებენ ვერტიკალური ხაზებით. მივიღებთ განმეორების გრაფიკს. თუ ინტერვალს თანდათანობით შევა-

მცირებთ, მაშინ განმეორების გრაფიკი ზღვარში მოგვცემს განმეორების მრუდს (ნახ. 2.10).



ნახ. 2.10. განმეორების განაწილების 1 და უზრუნველყოფის 2 ტიპური მრუდები

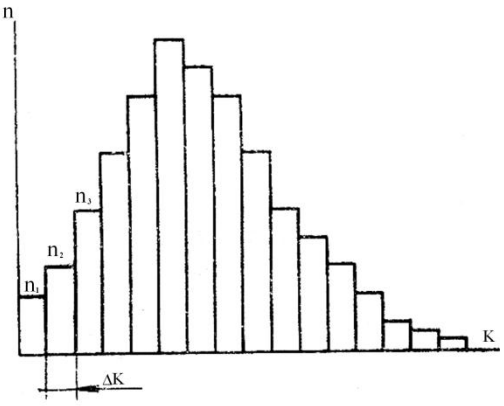
თანდათანობით შევკრიბოთ ზედა ინტერვალიდან ქვედა ინტერვალისკენ ხარჯების განმეორების რიცხვი. იგი მივაკუთვნოთ ინტერვალის ქვედა ბოლოს. ასეთი წესით აგებულ საფეხურისებრ გრაფიკს, ხანგრძლივობის გრაფიკი ანუ უზრუნველყოფის გრაფიკი ეწოდება. იგი გვიჩვენებს რამდენჯერ შეგვხვდება აღებულ ინტერვალში მოთავსებული ხარჯი ან მასზე მეტი ხარჯი დაკვირვების მთელ პერიოდში. ინტერვალის შემცირებით ზღვარში მივიღებთ მრუდს, რომელსაც ხანგრძლივობის ანუ უზრუნველყოფის მრუდს უწოდებენ. ხშირად აბსცისთა ღერძს გამოსახავენ განსახილველი პერიოდის პროცენტებით. მთელ პერიოდს იღებენ 100%-ის ტოლს. ასეთ პროცენტებს, უზრუნველყოფის პროცენტებს უწოდებენ (ნახ.2.10).

უზრუნველყოფის მრუდი გვიჩვენებს რამდენ შემთხვევაში (%-ით) შეიძლება შეგვხვდეს აღებული სიდიდის ან მასზე მეტი სიდიდის ხარჯი.

ჰიდროლოგიაში გამოიყენება აგრეთვე განაწილების მრუდები. მის ასაგებად აბსცისთა ღერძზე გადაზომავენ ხარჯებს ან მოდულურ კოეფიციენტებს, რომელთაც ყოფენ ინტერვალებად. ორდინატთა ღერძზე გადაიზომება თითოეულ ინტერვალში მოთასებული ხარჯების (ან მოდულური კოეფიციენტების) განმეორებათა რიცხვი n ანუ სიხშირე. მიღებულ გრაფიკს, ჰისტოგრამა ეწოდება. ინტერვალების თანდათანობით შემცირებით მივიღებთ მრუდს, რომელსაც განაწილების მრუდს უწოდებენ (ნახ.2.11). ამრიგად, უზრუნველყოფის მრუდი მიიღება ჰისტოგრამიდან სიხშირეების თანდათანობითი შეკრებით, ანუ განაწილების მრუდის ინტეგრირებით. განაწილების მრუდის ინტეგრალს თეორიული უზრუნველყოფის მრუდს უწოდებენ. უზრუნველყოფის მრუდის თეორიული გამოსახვა დღეისათვის შეუძლებელია, რადგანაც ძალიან ცოტა მონაცემი გვაქვს მრუდის ზედა და ქვედა ბოლო მონაკვეთებისათვის, რომლებიც ახასიათებს ჩამონადენის უდიდეს და უმცირეს მნიშნელობებს. ამიტომ, უზრუნველყოფის თეორიულ მრუდს აგებენ განაწილების მათემატიკური მრუდების საფუძველზე.

ჰიდროლოგიაში ყველაზე ფართო გამოყენებით სარგებლობს პირსონის III ტიპის ბინომიალური და სამპა-

რამეტრიანი გამა-განაწილების მრუდები. ორივე სახის განაწილების მრუდები თავისუფლად შეიძლება განვსაზღვროთ **X0, Cv** და **Cs** პარამეტრებით.



ნახ.2.11

პირსონის III ტიპის ბინომიალური მრუდის მათემატიკური გამოსახულების ზუსტი ინტეგრირება შეუძლებელია. ა. ფოსტერმა მოახდინა ამ განტოლების მიახლოებითი ინტეგრირება და შეადგინა ცხრილები, რომელთა მიხედვითაც შეიძლება განისაზღვროს უზრუნველყოფის მრუდის ორდინატები X0, Cv და Cs პარამეტრების საშუალებით. ეს ცხრილები შემდეგში დააზუსტა რიბკინმა. ცხრილებში მოცემულია უზრუნველყოფის მრუდის ორდინატის გადახრა საშუალო მნიშვნელობიდან **Φp%** იმ

შემთხვევაში, როცა **Cv=1**. **Cs-**ისა და უზრუნველყოფის პროცენტზე **P%** დაყრდნობით,

$$\Phi_{P\%} = \frac{K_{P\%} - 1}{C_v} \cdot 100\%.$$

აქედან უზრნველყოფის მრუდის ორდინატა

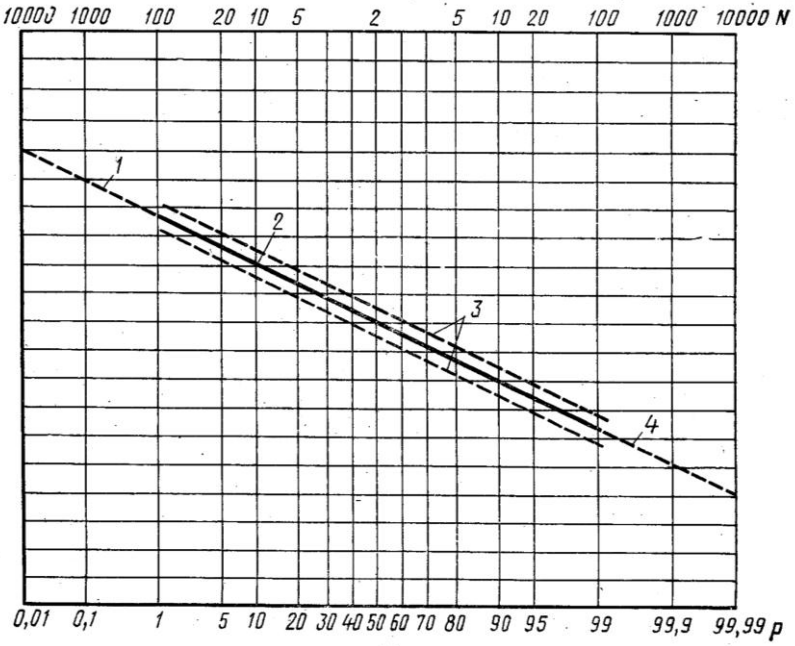
$$K_{P\%} = \phi_{P\%} \cdot C_v + 1 \qquad (2.16)$$

(2.16) ფორმულის ანალიზის საფუძველზე ვღებულობთ, რომ იმ შემთხვევაში, როდესაც **Cs<2Cv** ბინომიალური მრუდის გამოყენება შეუძლებელია ჰიდროლოგიური გაანგარიშებებისათვის, თეორიულად და პრაქტიკულად დამტკიცებულია, რომ სამპარამეტრიანი გამა-განაწილების გამოყენება შესაძლებელია **Cs** და **Cv**-ს ნებისმიერი თანაფარდობისათვის. ამრიგად, აქვს გამოყენების უფრო ფართო სფერო. სამპარამეტრიანი გამა-განაწილების მრუდების რიცხვითი ინტეგრირების საფუძველზე კრიცკიმ და მენკელმა შეადგინეს ცხრილები, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ უზრუნველყოფის თეორიული მრუდის ორდინატა **Cv,** $\frac{C_s}{C_v}$ და უზრუნველყოფისაგან დამოკიდებულებით ცხრილებში მოცემულია მოდულური კოეფიციენტების მნიშვნელობები KP%. P%=0,001-დან P%=99^0-მდე. თუ ცნობილია KP%, უზრუნველყოფის მრუდის ორდინატა ტოლი იქნება

$$X=KP\%X_0 \qquad (2.17)$$

სადაც $\mathbf{X_0}$ არის დაკვირვებათა მწკრივის საშუალო მნიშვნელობა – ნორმა.

უზრუნველყოფის თეორიული მრუდი ეწოდება იმ მრუდს, რომელიც აგებულია თეორიული ფორმულით (2.17) განსაზღვრული კოორდინატებით. ემპირიული მრუდის აგება გართულებულია იმით, რომ არასაკმარისი რაოდენობითაა მოცემული ემპირიული მნიშვნელობები უზრუნველყოფის მრუდის ზედა და ქვედა ნაწილში. გარდა ამისა, ამ ნაწილებში მრუდის მოხაზულობა რთულია (აქვს დიდი გრადიენტი), რის გამოც უზრუნველყოფის მცირე ცვლილებას შეესაბამება ჰიდროლოგიური მახასიათებლის ძალიან დიდი ნაზრდი. ამ სიძნელეების გადალახვა შეიძლება უზრუნველყოფის მრუდის აგებით ალბათობის უჯრედულაზე. ამ უჯრედულაზე ალბათობის სკალას გარდაქმნიან ისე, რომ მართკუთხა კოორდინატთა სისტემაში მოხდეს უზრნველოფის მრუდის გაწრფივება (ნახ. 2.12). იმავე ნახაზზე დაიტანენ (2.14) ფორმულით გამოთვლილ ემპირიულ მნიშვნელობებს.



ნახ. 2.12 1. დაბალი უზრუნველყოფის შესაბამისი ექსტრაპოლირებული ნაწილი; 2.. გაწრფივებული ემპირიული მრუდი; 3. ემპირიული წერტილების მომვლებები; 4.მაღალი უზრუნველყოფის შესაბამისი ექსტრაპოლირებული ნაწილი

2.3.4. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება დაკვირვებათა საკმარისი მწკრივის არსებობის შემთხვევაში

საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯი ეწოდება იმ ხარჯს რომლის გატარებაზე იანგარიშება ჰიდროკვანძის წყალსაგდები ნაგებობების ზომები, ხიდის ხვრეტის ზომები და სხვა.

საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება ხდება სახელმწიფო სტანდარტების მიხედვით. ამ სტან-

დარტებით დადგენილია მაქსიმალური ხარჯების საანგარიშო უზრუნველყოფა ნაგებობის კლასის მიხედვით.

ცხრილი 1

საანგარიშო შემთხვევა	წყლის საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯების უზრუნველყოფა P% ნაგებობის კლასის მიხედვით			
	I	II	III	IV
ძირითადი	0.1	1.0	3.0	5.0
შესამოწმებელი	0.01	0.1	0.5	1.0
* - გარანტირებული შესწორების გათვალისწინებით				

თოვლის დნობით და წვიმებით გამოწვეული მაქსიმალური ხარჯები დაკვირვებათა საკმარისი მწკრივის არსებობის შემთხვევაში გაიანგარიშება უზრუნველყოფის ანალიზური მრუდების საშუალებით. როგორც წესი, გამოიყენება სამპარამეტრიანი გამა-განაწილების მრუდი. განსაკუთრებულ შემთხვევაში გამოიყენება განაწილების ბინომიალური მრუდი. დაკვირვებათა მწკრივის სტატისტიკურ დამუშავებას წინ უნდა უსწრებდეს საწყისი მასალის დეტალური ანალიზი. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება ხარჯის მრუდის $\mathbf{Q = f(H)}$ სწორ აგებას და მის ექსტრაპოლაციას. ზემოხსენებული განაწილების მრუდის პარამეტრების, კერძოდ, დაკვირვებათა მაქსიმალური ხარჯების საშუალო მრავალწლიური მნიშვნელობა $\overline{Q}$ ვარიაციის კოეფიციენტი $\mathbf{C_v}$ და ასიმეტრიის კოეფიციენტი $\mathbf{C_s}$. გამოითვლებიან მომენტების, უდიდესი დამა-

ჯერებლობის და გრაფოანალიტიკური მეთოდებით. მომენტების მეთოდით საშუალო არითმეტიკული გამოითვლება ფორმულით.

$$\overline{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i}{n} \qquad (2.18)$$

სადაც **n** დაკვირვებათა წლების რაოდენობაა.

ვარიაციისა და ასიმეტრიის კოეფიციენტები მომენტების მეთოდით გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

$$Cv = \left(a_1 + \frac{a_2}{n}\right) + \left(a_3 + \frac{a_4}{n}\right)\overline{Cv} + \left(a_3 + \frac{a_6}{n}\right)\overline{Cv^2};$$

$$Cs = \left(b_1 + \frac{b_2}{n}\right) + \left(b_3 + \frac{b_4}{n}\right)\overline{Cv} + \left(b_3 + \frac{b_6}{n}\right)\overline{Cv^2};$$

a_1 .. a_6 და b_1 .. b_6 კოეფიციენტები აიღება ცხრილებიდან. $\overline{Cv}$ და $\overline{Cs}$ გადანაცვლებული ვაიაციისა და ასიმეტრიის კოეფიციენტებია, რომლებიც გამოითვლებიან შემდეგი ფორმულებით.

$$\overline{Cv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i - 1)^2}{n-1}}, \qquad (2.19)$$

$$\overline{Cs} = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(K_i - 1)^3}{\overline{C_v^3}(n-1)(n-2)}. \qquad (2.20)$$

თუ **Cv≤0,6** და **Cs<1,0** ვარიაციისა და ასიმეტრიის კოეფიციენტების გაანგარიშება დასაშვებია (2.19) და (2.20) ფორმულებით.

დაკვირვებათა პერიოდი ითვლება საკმარისად, თუ განსახილველი პერიოდი რეპრეზენტაციულია და განსახილველი ჰიდროლოგიური მახასიათებლების ფარდობითი საშუალო კვადრატული ცდომილება არ აღემატება 20%-ს.

საშუალო არითმეტიკულის საშუალო კვადრატული ცდომილება გამოითვლება ფორმულით

$$\sigma_{cv} = \frac{\sigma_Q}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+r}{1-r}},$$

სადაც **r** ავტოკორელაციის კოეფიციენტია.

ვარიაციის კოეფიციენტის საშუალო კვადრატული ცდომილება გამოითვლება შემდეგი ფორმულით

$$\sigma_{cv} = \frac{Cv}{n+4C_v^2}\sqrt{\frac{n(1+C_v^2)}{2}\left(1+\frac{3Cvr^2}{1+r}\right)}.$$

სხვა მახასიათებლებისა და კორელაციის კოეფიციენტების ცდომილებები აიღება სპეციალური ცხრილებიდან.

უდიდესი დამაჯერებლობის მეთოდი იმაში მდგომარეობს, რომ საძიებელი პარამეტრების შეფასების დროს მხედველობაში მიიღება მისი ისეთი მნიშვნელობა, რომლის დროსაც დამაჯერებლობის ფუნქცია მიაღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას. ამ მეთოდის დროს ვარიაციის კოეფიციენტი C_v და ასიმეტრიის კოეფიციენტისა და ვა-

რიაციის კოეფიციენტის ფარდობა $\frac{C_S}{C_v}$ განისაზღვრება ნომოგრამის საშუალებით სტატისტიკების λ_2 და λ_3 მიხედვით

$$\lambda_2 = \frac{\sum_{i-1}^{n} \lg K_i}{n-1} \quad \text{და} \quad \lambda_3 = \frac{\sum_{i-1}^{n} K_i \lg K_i}{n-1} \qquad (2.21)$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც გვაქვს ცნობები ისტორიული მაქსიმუმის შესახებ, რომელიც არ შედის დაკვირვებათა მწკრივში, უზრუნველყოფის მრუდის პარამეტრები გამოთვლება შემდეგი გათვალისწინებით:

ა) უდიდესი დამაჯერებლობის მეთოდის დროს სტატისტიკების მიხედვით

$$\lambda_2 = \frac{1}{N'}\left(\lg\frac{Q_{N'}}{\overline{Q}} + \frac{N'-1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}\lg\frac{Q_i}{\overline{Q}}\right) \qquad (2.22)$$

და

$$\lambda_3 = \frac{1}{N'}\left(\frac{Q_{N'}}{\overline{Q}}\lg\frac{Q_{N'}}{\overline{Q}} + \frac{N'-1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}\frac{Q_i}{\overline{Q}}\lg\frac{Q_i}{\overline{Q}}\right) \qquad (2.23)$$

ბ) მომენტების მეთოდის დროს ფორმულებით

$$\overline{Q} = \frac{1}{N'}\left(Q_{N'} + \frac{N'-1}{n-1}\sum_{i-1}^{n} Q_i\right) \qquad (2.24)$$

და

$$C_v =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{N'}\left(\frac{Q_{N'}}{\overline{Q}} - 1\right)^2 + \frac{N'-1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}\left(\frac{Q_i}{\overline{Q}} - 1\right)^2} \qquad (2.25)$$

სადაც Q_N ისტორიული მაქსიმალური ხარჯია; n – დაკვირვებათა წლების რაოდენობა; N' – პერიოდის ხანგრძლივობა, რომლის დროსაც აღინიშნება $Q_{N'}(N > n)$

მიღებული პარამეტრების მიხედვით აგებენ უზრუნველყოფის თეორიულ მრუდს, რომლის მიხედვითაც გამოითვლება საანგარიშო მაქსიმალურ ხარჯი

$$Q_{P\%} = K_{P\%} \cdot \overline{Q_{max}},$$

სადაც $K_{P\%}$ -არის მოდულური კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობასაც აიღებენ კრიცკი-მენკელის ცხრილებიდან. I კლასის ნაგებობის დაპროექტების დროს მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშებაში შეჰყავთ საგარანტიო შესწორება ΔQ, რომელიც იანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$\Delta Q = \frac{a \cdot E_{P\%}}{\sqrt{n}} \cdot Q_{P\%}. \qquad (2.26)$$

$Q_{P\%}$ – საანგარიშო უზრუნველყოფის შესაბამისი ხარჯია; a – კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს მდინარის ჰიდროლოგიურ შესწავლას, იგი იცვლება 1 დან 1,5 მდე; $E_{P\%}$ – ახასიათებს მაქსიმალური ხარჯის გაანგარიშების საშუალო კვადრატულ შეცდომას, აიღება გრაფიკიდან.

საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯი ტოლია

$$Q_{max}^{საანგ} = Q_{P\%} + \Delta Q .$$

საგარანტიო შესწორება აიღება საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯის არა უმეტესი 20%-ზე.

2.3.5. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრიულ დაკვირვებათა არარსებობის შემთხვევაში

ჰიდრომეტრიულ დაკვირვებათა არარსებობის შემთხვევაში, მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშებისათვის გამოიყენება ემპირიული ფორმულები, რომლებიც მიღებულია ჰიდროლოგიური კვლევების განზოგადების საფუძველზე. მდინარეები იყოფა – ბარის მდინარეებად და მთის მდინარეებად, რომელთა მაქსიმალური ხარჯების ფორმირების პირობები არსებითად განსხვავდება ერთმანეთისაგან. ასევე განსხვავდება თოვლის დნობით ჩამოყალიბებული მაქსიმალური ხარჯებისა და წვიმებით ჩამოყალიბებული მაქსიმალური ხარჯების ფორმირების პირობები.

თოვლის დნობით გამოწვეული მაქსიმალური ხარჯები ბარის მდინარეებისათვის გამოიანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$,Q_{maxP\%} = \frac{K_0 h_p F}{(F+1)^n} \delta_1 \delta_2 \mu \qquad (2.27)$$

სადაც **F** არის მდინარის წყალშემკრები აუზის ფართობი; $\mathbf{h_p}$ – წყალმეტობის პერიოდის ჩამონადენის შრის სიმაღლე, რომელიც შეესაბამება საანგარიშო უზრუნველყოფას; $\mathbf{K_0}$ – წყალმეტობის შეთანწყობის პარამეტრი; δ_1–კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს მაქსიმალური ხარჯების შემცირებას ტბებისა და წყალსაცავების გავლენით; δ_2–კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს მაქსიმალური ხარჯების შემცირებას ტყეებისა და ჭაობების გავლენით; μ–კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ჩამონადენის შრისა და მაქსიმალური ხარჯების სტატისტიკური პარამეტრების უთანაბრობას.

ხარჯის მაჩვენებელი **n** და პარამეტრი $\mathbf{K_0}$ აიღება ცხრილებიდან ბუნებრივი ზონების (რაიონების) და რელიეფის კატეგორიის მიხედვით.

ჩამონადენის შრის სიმაღლის საანგარიშო უზრუნველყოფის შესაბამისი მნიშვნელობა $\mathbf{h_p}$ აიღება ჩამონადენის შრის საშუალო სიმაღლის $\overline{\mathbf{h}}$, ვარიაციის კოეფიციენტისა და ასიმეტრიის კოეფიციენტის მიხედვით. $\mathbf{h_p}$.-ის მნიშვნელობა აიღება იზოხაზებიანი რუკებიდან. იზოხაზებიანი რუკებიდან აიღება აგრეთვე ვარიაციის კოეფიციენტის $\mathbf{C_v}$ მნიშვნელობა. ასიმეტრიის კოეფიციენტს იღებენ $\mathbf{C_S = 2C_v}$-ის ტოლს, საანგარიშო შრის სიმაღლე კი გამოითვლება ფორმულით

$$h_P = K_P \cdot \bar{h}.$$

δ_1 და δ_2 კოეფიციენტები გამოითვლება ემპირიული ფორმულებით, ხოლო μ კოეფიციენტი აიღება ცხრილებიდან გეოგრაფიული ზონისა და საანგარიშო უზრუნველყოფის მიხედვით.

თოვლის დნობით გამოწვეული მაქსიმალური ხარჯი მთის მდინარეებისათვის გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$Q_p = \frac{K_0 h_P F}{(F+1)^{0.15}} \delta_1 \mu \qquad (2.28)$$

აღნიშვნები ამ ფორმულაში წინა ფორმულის აღნიშვნების ანალოგიურია.

შეთანწყობის პარამეტრი K_0 აიღება სპეციალური ცხრილიდან გეოგრაფიული რაიონის და ამ რაიონის წყალშემკრები აუზის ზღვის დონიდან საშუალო სიმაღლის მიხედვით.

ჩამონადენის შრის სიმაღლე ამ გამოსახულებაშიც სამი პარამეტრის $\bar{h}$, C_v და C_S-ის მიხედვით გამოითვლება, ოღონდ ასიმეტრიის კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულით

$$C_S = 3\, C_v.$$

წვიმებით გამოწვეული მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშების მეთოდები შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად:

1. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება რეგიონალური ემპირიული ფორმულების გამოყენებით, რომლებიც ითვალისწინებს მაქსიმალური ხარჯების ფორმირების მთავარ ფაქტორებს განზოგადებული ფორმით და მიღებულია მონაცემების სტატისტიკური დამუშავების გზით.

2. მეთოდები, რომლებიც ეყრდნობა ჩამონადენის გენეტიკურ ფორმულებს, რომლებიც, თავის მხრივ, ასახავენ ჩამონადენის ფორმირების პროცესის თეორიულ წარმოდგენას.

რადგანაც თეორიული განტოლებების მკაცრი მათემატიკური ამონახსნი არ არსებობს, ამიტომ სახელმწიფო სტანდარტების მიხედვით დიდი და საშუალო სიდიდის წყალშემკრები აუზის მდინარეებისათვის რეკომენდებულია ემპირიული რედუქციული ფორმულით, ხოლო მცირე სიდიდის წყალშემკრები აუზის მდინარეებისათვის ჩამონადენის ზღვრული ინტენსივობის ფორმულით გაანგარიშება.

ემპირიულ რედუქციულ ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:

$$\mathbf{Q_P = M_{200}\left(\frac{200}{F}\right)^n \lambda_p \delta_1 \delta_2 F} \qquad (2.29)$$

$\mathbf{M_{200}}$ არის 1%-იანი უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯის მოდული, რომელიც დაყვანილია 200 კმ^2 ფართობზე, აიღება რუკებიდან; **n** –ხარისხის მაჩვენებელი,

რომელიც აიღება რუკიდან; λ_p – 1%-იანი უზრუნველყოფიდან სხვა უზრუნველყოფაზე გადამყვანი კოეფიციენტი, აიღება ცხრილიდან.

ჩამონადენის გაანგარიშების ზღვრული ინტენსივობის ფორმულას აქვს შემდეგი სახე

$$Q_P = A_{1\%}\varphi H_{1\%}\lambda_p\delta_1 F \qquad (2.30)$$

სადაც H_1 არის 1%-იანი უზრუნველყოფის ნალექების შრის სიმაღლე, აიღება რუკიდან; φ – წყალდიდობის ჩამონადენის კოეფიციენტი აიღება ცხრილიდან; $A_{1\%}$ – წვიმის ჩამონადენის მაქსიმალური მოდული, მისი მნიშვნელობა აიღება ცხრილიდან.

2.3.6. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება

2.3.6.1. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრიულ დაკვირვებათა შედეგების არსებობის შემთხვევაში

მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება აუცილებელია შეუფერხებელი ელექტრო- და წყალმომარაგების უზრუნველყოფისათვის, აგრეთვე მდინარეების გამოყენებისათვის სარწყავად და სანაოსნოდ. მდინარეების წყალმომარაგებისათვის გამოყენების დროს საანგარიშო უზრუნველყოფად აიღება 95%-იანი უზრუნველყოფა; ჰიდროსადგურების დაპროექტების დროს ანგარიშობენ 90%-იან უზრუნველყოფის ხარჯს, ხოლო მორწყვისათვის 85%-იან

უზრუნველყოფის ხარჯს. საანგარიშო მინიმალური ხარჯს ანგარიშობენ საშუალო თვიური ხარჯების ან საშუალო დღიური ხარჯების მიხედვით.

საშუალო თვიური ხარჯები გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც წყალმცირობის პერიოდი ხანგრძლივია და მდგრადი (იგი გრძელდება არანაკლებ ორი თვისა და ამ პერიოდში არ არის წყალდიდობა).

30-დღიანი საშუალო ხარჯი გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც არის ხანმოკლე წყალმცირობის პერიოდი წყვეტებით. იგი გამოითვლება შემდეგნაირად: წლიური ხარჯების ჰიდროგრაფები აიგება დაკვირვების ყველა წლისთვის. თითოეულ ჰიდროგრაფზე გამოიყოფა უბნები, რომლებიც შეესაბამება 30-დღიან არაკალენდარულ მონაკვეთს მინიმალური ხარჯებით. შემდეგ გამოვთვლით მათ საშუალო მნიშვნელობას.

ჰიდრომეტრიული დაკვირვებების არსებობის შემთხვევაში მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება წარმოებს უზრუნველყოფის თეორიული მრუდის გამოყენებით. ამ მრუდის პარამეტრები – საშუალო მინიმალური ხარჯი $\mathbf{Q_{0min}}$, ვარიაციის კოეფიციენტი $\mathbf{Cv}$ და ასიმატრიის კოეფიციენტი $\mathbf{C_S}$ გამოითვლება ცნობილი ფორმულებით

$$\mathbf{Q_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_c}{n}},\quad \mathbf{C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (K_i - 1)^2}{n}}},\quad \mathbf{C_S = \frac{\sum_{i=1}^{n} (K_i - 1)^3}{n C_v^3}}.$$

შემდეგ შემოწმდება ამ პარამეტრების სარწმუნოება ცნობილი მეთოდებით. მინიმალური ხარჯების უზრუნველყოფის თეორიულ მრუდს აგებენ ან განაწილების ბინომიალური მრუდის, ან სამპარამეტრიანი გამა-განაწილების მრუდების გამოყენებით. უზრუნველყოფის მრუდების მიხედვით განისაზღვრება საანგარიშო უზრუნველყოფის შესაბამისი ორდინატა K_p, ხოლო შემდეგ მინიმალური ხარჯი.

2.3.6.2. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრიული დაკვირვების არარსებობის შემთხვევაში

მცირე მდინარეების მინიმალური ხარჯების ფორმირების პროცესი განსხვავდება საშუალო მდინარეების მინიმალური ხარჯების ფორმირების პროცესისაგან. ამიტომ მათი მინიმალური ხარჯების გაანგარიშების მეთოდები ერთმანეთისაგან განსხვავდება. მდინარეების დაყოფა მცირე და საშუალო მდინარეებად დამოკიდებულია მდინარის გეოგრაფიულ მდებარეობაზე (რაიონზე) და მინიმუმის ტიპზე (ზაფხულის, შემოდგომის და ზამთრის).

სახელმწიფო სტანდარტებში მოცემულია რუკები ევრაზიის ტერიტორიისა და რაიონებისათვის, იქვე წარმოდგენილია მცირე მდინარეების წყალშემკრები აუზის ზღვრული სიდიდეების ცხრილი.

საშუალო მდინარეების საანგარიშო მინიმალური ხარჯები შემდეგნაირად განისაზღვრება: იზოხაზებიანი რუკე-

ბიდან განისაზღვრება მინიმალური 30-დღიანი ჩამონადენის 80%-იანი უზრუნველყოფის მოდული წყალშემკრები აუზის ცენტრისათვის ინტერპოლაციით. შემდეგ ეს მოდული გადაჰყავთ 30-დღიან ხარჯში

$$\mathbf{Q_{80\%} = \frac{M_{80\%} F}{1000}} \qquad (2.31)$$

სადაც **F** არის წყალშემკრები აუზის ფართობი.

საანგარიშო უზრუნველყოფის შესაბამისი მინიმალური ხარჯი გამოითვლება ფორმულით

$$\mathbf{Q_{min\,P\%} = Q_{80\%} \cdot \lambda_P},$$

სადაც λ_P გადამყვანი კოეფიციენტია, რომლის მნიშვნელობა აიღება ცხრილებიდან.

მინიმალური 80%-იანი უზრუნველყოფის საშუალო თვიური ხარჯი იმ მდინარეებისათვის, რომლებიც იკვებება ტბებიდან, გამოითვლება შემდეგი ფორმულით

$$\mathbf{Q_{80\%ტბ} = 0.7 Q_{80\%} + 0.26 \beta Q_0}$$

სადაც $\mathbf{Q_{80\%}}$ არის ტბიდან გამომდინარე მდინარის 80%-იანი უზრუნველყოფის 30-დღიანი ხარჯი; β – ტბის ფარდობითი მოცულობა $\beta = \frac{W_C}{W}$; W_C – ტბის საშუალო მრავალწლიური მოცულობა; **W** – საშუალო მრავალწლიური ჩანადენი ტბაში;

მცირე მდინარეებისათვის 80%-იანი უზრუნველყოფის 30-დღიანი ხარჯი გამოითვლება ფორმულით

$$Q_{80\%} = 10^{-3}\alpha(F + f_0)^n .$$

α, f_0 და n პარამეტრები განისაზღვრება გეოგრაფიული რაიონის მიხედვით, ხოლო საანგარიშო უზრუნველყოფის მინიმალური ხარჯი გამოითვლება ფორმულით

$$Q_P = Q_{80\%} \cdot \lambda_P .$$

გადამყვანი კოეფიციენტი λ_P მოცემულია ცნობარებში.

IV თავი. წყალსატევები

2.4.1. ზოგადი ცნობები

ხმელეთის წყალსატევებს წარმოადგენს ტბები და წყალსაცავები. ტბებს უწოდებენ ხმელეთის ქვაბულში მოქცეულ შენელებული წყალცვლის ბუნებრივ წყალსაცავებს, რომელთაც არა აქვთ უშუალო კავშირი მსოფლიო ოკეანესთან. წყალსაცავები კი მიეკუთვნება ხელოვნური წყალსატევების კატეგორიას, ამიტომ რიგი ჰიდროლოგიური თვისებები და პარამეტრები ერთდროულად დამახასიათებელია როგორც ტბების, ისე წყალსაცავებისათვის.

დედამიწაზე ტბების საერთო მოცულობა შეადგენს დაახლოებით 176 ათას კმ^3-ს. ამ მოცულობის 52% მტკნარი წყლებია, დანარჩენი კი მოდის მინერალიზებულ ტბებზე. მსოფლიოს უდიდესი ტბების მთავარი მახასიათებლები მოცემულია 2 ცხრილში.

ცხრილი 2

მსოფლიოს უმთავრესი ტბები

№	ტბის სახელწოდება	კონტინენტი, ქვეყანა	ძირითადი მორფომეტრიული მახასიათებლები			
			მოცულობა, კმ^3	ფართობი, 1000 კმ^2	უდიდესი სიღრმე, მ	სიმაღლე ზღვის დონიდან, მ
1	კასპიის ზღვა	აზია	78200	374	1025	-28,5
2	ბაიკალი	აზია (რუსეთი)	23000	31,5	1741,,	456
3	ტანგანიიკა	აფრიკა	18900	32,9	1435	773
4	ზემო ტბა	ჩრ. ამერიკა	11600	82,7	406	183
5	ნაისა (მალავი)	აფრიკა	7725	30,9	706	472
6	მიჩიგანი	ჩრ. ამერიკა	4680	58,1	281	177
7	ჰურონი	ჩრ. ამერიკა	3580	59,8	229	177
8	ვიქტორია	აფრიკა	2700	69,0	92	1134
9	ისიქ-ქოლი	აზია (ყირგიზეთი)	1730	6,2	702	1608
10	ონტარიო	ჩრ. ამერიკა	1710	19,0	236	75

საქართველოს ტერიტორიაზე 850 ტბაა, რომელთა საერთო ფართობია 170 კმ^2; ტბებში წყლის მარაგია 0,72 კმ^3. პირველი ხუთი დიდი ტბის (რიწა, ფარავანი, პალიასტომი, საღამო, ტაბაწყური) საერთო ფართობია 72,6 კმ^2 (45%), რომელთა წყლის მოცულობა 535 მლნ მ^3 ანუ მთელი ტბების მოცულობის 74%-ია (იხ. ცხრ 7.2).

ცხრილი 3

№	ტბის სახელწოდება	ძირითადი მორფომეტრიული მახასიათებლები			
		მოცულობა, კმ^3	ფართობი, 1000 კმ^2	უდიდესი სიღრმე, მ	სიმაღლე ზღვის დონიდან, მ
1	ტაბაწყური	221,0	14,2	40,2	1997
2	რიწა	94,0	1,49	101	884
3	ფარავანი	90,8	37,5	3,3	2073
4	პალიას-ტომი	52,0	18,2	3,2	-0,3
5	ჯანდარი	51,0	10,6	7,2	291
6	ყელის ტბა	31,7	1,3	63	2914
7	ხოზავანი (კარწახი)	19,3	26,3	1,0	1799
8	მადათაფა	9,5	8,8	1,7	2108
9	საღამოს ტბა	7,7	4,8	2,3	1996
10	ხანჩალი	6,4	13,3	0,7	1928
11	ბაზალეთი	5,6	1,2	7,0	878

დაგროვილი წყლის მოცულობით მსოფლიოს დიდი წყალსაცავები არ ჩამოუვარდება ტბებს (ცხრ. 4).

ცხრილი 4

მსოფლიოს უმთავრესი წყალსაცავები

№	წყალსაცავის დასახელება	ქვეყანა	მდინარე, ტბა	შენების პერიოდი	ძირითადი მახასიათებლები				
					წყლის შეტბორვა კაშხალთან, მ	სრული მოცულობა, კმ³	სასარგებლო მოცულობა, კმ³	სარკობრივი ზედაპირის ფართობი, 1000 კმ²	სიღრმე, კმ
1	ვიქტორია (ოუენფოლსი)	უგანდა, ტანზანია, კენია	მდ.ნილოსი, ტბა. ვიქტორია	1954	31	204,8	204,8	76,0	320
2	ბრატსკის	რუსეთი	ანგარა	1965-67	106	169,3	48,2	5,47	565
3	კარიბა	ზამბია, ზიმბაბვე	ზამბეზი	1958-63	100	160,3	46	4,45	300
4	ნასერი	ეგვიპტე, სუდანი	ნილოსი	1970	95	157	74	5,12	500
5	ვოლტა (აკოსომბო)	განა	ვოლტა	1964-67	70	148	90	8,48	400
6	ანიელ-ჯონსონი (მანიკუაგანი-5)	კანადა	მდ. დატბა მანიკუაგანი	1968-74	154	141,8	85,9	1,95	100
7	კრასნოიარსკის	რუსეთი	ენისეი	1967	100	73,3	30,4	2,0	390
8	უადისარსარი	ერაყი	ტიგრი	1956-76	-	72,8	43,5	2,0	100
9	ორდონმ.შრამი (პორტიჯ-მაუნტინი)	კანადა	პისრივერა	1968	165	70,1	37,0	1,68	360
10	ზეის	რუსეთი	ზეა	1974	98	68,4	32,1	2,42	225

საქართველოში წყალსაცავები ძირითადად გამოიყენება სარწყავად და ენერგეტიკული მიზნით (ცხრ. 5).

ცხრილი 5

წყალსაცავები	კუბის წყარო	მდებარეობის ადმინისტრაც. რაიონი	გამოყენების სახე	რეჟიმირების ხასიათი	ექსპლ. შესვლის წელი	მოცულობა, მლნ. მ³		სარკობრივი ზედაპირის ფართი ნ.შ.დ.-ზე, კმ²
						მთლიანი	სასარგებლო	
ჯვარის	მდ. ენგური	წალენჯიხა	ე.წ.ტ.თ.ს	სეზონური	1984	1102	676	13,5
ჟინვალის	მდ. არაგვი	დუშეთი	ე.მ.წ	წლიური	1986	520	370	11,5
თბილისის	მდ. იორი	თბილისი	გ.წ.თ.რ	სეზონური	1954	308	160	11,8
სიონის	მდ. იორი	თიანეთი	ე.მ.წ.თ.რ	მრავალწლიური	1965	325	310	10,4
წალკის	მდ. ხრამი	წალკა	ე.წ.თ.რ	მრავალწლიური	1947	313	293	33,7
გალის	მდ. ენგური	გალი	ე.ჭ.რ.თ	დღეღამური	1978	145	110	8,2
ჯანდარის	მდ. მტკვარი	გარდაბანი	მ	ტბის	1967	52	23,0	-
ზონკარის	მდ. დ.ლიახვი	ცხინვალი	მ.თ.რ	სეზონური	1981	40,3	39,0	7,6
დმანისის	მდ. მაშავერა	დმანისი	მ	სეზონური	1977	11,0	10,8	-

ალგე-თის	მდ. ალგე-თი	თეთრი-წყარო	გ.თ.რ	სეზო-ნური	1983	65,0	60,0	7,2
ტყიბუ-ლის	მდ. ტყი-ბული	ტყი-ბული	ე.თ.რ	სეზო-ნური	1956	80,0	65,7	12,1
შაორის	მდ. დიდი-ჭალა	ამბრო-ლა-ური	ე.რ.თ	სეზო-ნური	1955	90,0	87,5	13,4
ლაჯა-ნურის	მდ. მდ. ცხენის-წყალი ლაჯანა	ცაგერი	ე.წ.რ	დღე-ღამუ-რი	1966	24,6	17,6	1,4

ე – ენერგეტიკა, თ- თევზის მეურნეობა, წ – ბრძოლა წყალდიდობასთან, მ – მორწყვა, რ – რეკრეაცია, ს- სანიტარული გაშვება, ტ- ტყის დაცურება, წყ – წყალმომარაგება.

შედარებისათვის, აღსანიშნავია აზერბაიჯანში მდ. მტკვარზე მინგეჩაურის წყალსაცავი (აგების წლები 1950 - 1954 წწ.), მისი მოცულობაა 16 მლრდ მ^3, სასარგებლო მოცულობა 7,5 მლრდ მ^3, სარკის ზედაპირის ფართობით 605 კმ^2, რომელსაც ქმნის 80 მ სიმაღლის მიწის კაშხალი. მსოფლიოში არცთუ იშვიათია წყალსაცავები, რომელთა სარკობრივი ზედაპირის ფართობი რამოდენიმე ათასი კმ^2-ით განისაზღვრება (იხ. ცხრ. 7.3).

ბოლო წლებში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება წყლის რესურსების დამატებით შევსებას ბუნებრივ მოვლენებზე (პროცესზე) ხელოვნური ზემოქმედების შედეგად, კერძოდ ზემოქმედება ღრუბლებზე დამატებითი

ნალექების მიღების მიზნით. ამ ზემოქმედებიდან განსაკუთრებით ეფექტურია – ღრუბლის გამოთესვა რეაგენტებით, რომელთაც ყინულის ბირთვების მაგივრობის გაწევა შეუძლია. ამ მეთოდით მიღწეულია ნალექების ხელოვნური გაზრდა 10÷20%-ით. ამ მხრივ მნიშვნელოვანი მიღწევებია აშშ-ში. საქართველოში აღსანიშნავია პროექტები „იორი“ და „ფარავანი“, რომლებიც ხორციელდება იმ რაიონებში, სადაც შესაძლებელია მათი თავმოყრა წყალსაცავებში.

დამატებითი წყლის რესურსების მისაღებად საყურადღებოა აგრეთვე მყინვარების ლღობის ხელოვნური რეგულირება, რომელიც მარტივად შეიძლება განხორციელდეს ზედაპირის გადაშავებით ან მასზე დამატებით თოვლის საფარით, რომელიც შესაბამისად აჩქარებს ან ახანგრძლივებს მყინვარის დნობის პროცესს. მყინვარების დნობის გაძლიერებით შესაძლებელია საქართველოში, როგორც წინასწარი გათვლებით ჩანს, წლიური ჩამონადენი გაიზარდოს 400 მლნ $მ^3$-ით (12,7 $მ^3/წმ$). ხოლო თოვლის ხელოვნური საფარის გაძლიერებისას – 530 მლნ $მ^3$-ით (16,8 $მ^3/წმ$). ამგვარად, საქართველოში მყინვარების, რომელთა ფართობი კავკასიონზე 506 $კმ^2$-ია, დნობის ხელოვნური რეგულირებით შესაძლებელია მდინარეთა ჩამონადენის ხარჯი გაიზარდოს 40,1 ან 53,1%-ით ბუნებრივთან შედარებით; რაც საქართველოს მდინარეებისათვის საშუალოდ 31,6 $მ^3/წმ$-ია.

ბუნებაში ტორფის წარმოქმნა-დაგროვება ერთდროულად გულისხმობს წყლის მარაგის შექმნასაც, რადგან დადგენილია, რომ წყალი შეადგენს ტორფის მოცულობის 88-97%-ს. საქართველოში ჭაობებს (ტორფს) მნიშვნელოვანი ფართობები უკავია კოლხეთის დაბლობზე.

სულ საქართველოში ექსპლუატაციაშია 32 წყალსაცავი, საერთო დარეგულირებელი წყლის მოცულობით 3170 მლნ მ^3, რომელთა შორის 2148 მლნ მ^3 სასარგებლო მოცულობაა (ანუ მოცულობა, რომელიც მოთავსებულია წყალსაცავის ნორმალურ და მინიმალურ დონეთა შორის). სასარგებლო მოცულობის 851 მლნ მ^3 მოდის დასავლეთ საქართველოს 9 წყალსაცავზე, ხოლო 1297 მლნ მ^3 აღმოსავლეთ საქართველოს 23 წყალსაცავზე.

კაშხლის მიერ შექმნილი წყალსაცავის შეტბორვა ვრცელდება მისგან მნიშვნელოვან მანძილზე, რაც იწვევს მდინარისა და მისი შენაკადების დონის აწევას. წყალსაცავის წარმოქმნის ზონაში, გარდა დადებითი ეფექტისა, ადგილი აქვს მიწების, საწარმოების, ნაგებობების დატბორვას, გრუნტის წყლების დონის აწევას, მდინარეზე არსებული სატუმბი, ჰიდროძალოვანი და სხვა დანადგარების მუშაობის რეჟიმის შეცვლას. გრუნტის წყლების დონის აწევამ შეიძლება უარყოფითად იმოქმედოს კულტურული მცენარეების განვითარებაზე და შეცვალოს იგი წყალმოყვარე ჭაობის ბალახებით. ზოგიერთ ადგილზე

შეიძლება წარმოიქმნას ჭაობი, დატბოროს შენობათა სარდაფები და სხვ.

გარდა აღნიშნულისა, დიდი წყალსაცავების შემთხვევაში წყდება მდინარის ფსკერული და შეტივტივებული ნატანის ტრანსპორტირება ქვედა ბიეფში – ილექება იგი წყალსაცავში, ხოლო ქვედა ბიეფში ე.წ. „მშიერი ნაკადი“ აძლიერებს კალაპოტის რეცხვას, იცვლება მდინარეზე სანაოსნო პირობები, წყალსაცავების თერმული, ყინულოვანი, ბიოლოგიური და მინერალიზაციის რეჟიმი, ადგილი აქვს ნაპირების გადამუშავებას და სხვ. ყველა აღნიშნული მოვლენა გათვალისწინებული და შეფასებულ-გაანალიზებული უნდა იქნეს დაპროექტების სტადიაში, რამაც შეიძლება გადამწყვეტი როლი შეასრულოს ჰიდროკვანძის პარამეტრების დადგენაში.

საქართველოს ტერიტორიაზე წყალსაცავებში დარეგულირებული წყლის მოცულობა მთლიანად ვერ აკმაყოფილებს ეროვნული მეურნეობის მოთხოვნებს, ამიტომ მომავალში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ახალი წყალსაცავების მშენებლობას.

საქართველოს წყლის რესურსებზე სხვადასხვა საკვლევ-სამეცნიერო და საპროექტო ინსტიტუტების მონაცემები განსხვავებულია, ამიტომ საჭიროა ამ მონაცემების ხელმეორედ გადამოწმება დაზუსტების მიზნით, რომელიც უნდა დამტკიცდეს და შემდგომ დიდი საიმე-

დოობით იქნეს გამოყენებული წყალსამეურნეო გაანგარიშებებში.

2.4.2. წყალსაცავების სახეობანი და მათი მახასიათებლები

საწყალსაცავი კაშხლები ქმნის წყალსაცავში წყლის ისეთ მოცულობას, რომელიც უზრუნველყოფს მდინარის ბუნებრივი რეჟიმის გარდაქმნას გარკვეულ (სარეგულაციო) პერიოდში, წყალმომხმარებლის(ენერგეტიკა, მელიორაცია, ნაოსნობა და ა.შ) მოთხოვნილებათა შესაბამისად. ამის მიხედვით წყლის დონე წყალსაცავში იცვლება სარეგულაციო დროში და აღწევს უმაღლეს მდებარეობას წყალდიდობის წყლის მიღების შემდეგ, ხოლო უდაბლეს საექსპლუატაციო დონეს – შემდგომი ავსების დაწყების მომენტისათვის. ამ დონეთა შორის სხვაობას, ზედა ბიეფის ამოქმედების სიმაღლე ანუ სარეგულაციო პრიზმის სიმაღლე ეწოდება, ხოლო მათ შორის მოთავსებულ წყლის მოცულობას, რომელიც ერთი მხრივ ტოპოგრაფიულ პირობებზე, ხოლო მეორე მხრივ სარეგულაციო პერიოდსა და რეგულირების ხარისხზე იქნება დამოკიდებული, სასარგებლო მოცულობა ანუ სარეგულაციო პრიზმის მოცულობა ეწოდება.

რეგულირების პერიოდის მიხედვით ასხვავებენ დღეღამური, კვირეული, წლიური (სეზონური) და მრავალწლიური რეგულირების წყალსაცავებს.

წლიური და მრავალწლიური რეგულირების წყალსაცავები, როგორც წესი, დიდი მოცულობის წყალსაცავებია, რომელთა შესაქმნელად საჭიროა განსაკუთრებით ხელსაყრელი გეოლოგიური და ტოპოგრაფიული პირობები, რაც იშვიათია. ამ მიზნით უფრო მოსახერხებელია მდინარესთან ახლო ბუნებრივი ტბების გამოყენება, თუკი ასეთი არსებობს. წყალდიდობის (წყალმოვარდნის) ხარჯების ან მისი ნაწილის შესაკავებლად (სააკუმულაციოდ) სწორედ სეზონური და მრავალწლიური რეგულირების წყალსაცავები გამოიყენება. ზოგჯერ ამ ხარჯების შეკავება მათი ძირითადი მოვალეობაა (წყალდიდობის წყალსაცავები), მაგალითად, ჩინეთში წყალსაცავი „ათასი ტბა“, რომლის სარკის ზედაპირი დაახლოებით ათი ათასი კმ^2-ია ანუ საქართველოს ტერიტორიის მეშვიდედი.

წყალსაცავის დონეებისა და მოცულობების, აგრეთვე წყალსაცავის ქვაბულის ტევადობის (ტოპოგრაფიული პირობების) დახასიათება შესაძლებელია შემდეგი მაჩვენებლებისა და მახასიათებლების მიხედვით (ნახ. 2.13):

ნორმალური შეტბორვის დონე (ნშდ), სადამდეც რეგულარულად ივსება წყალსაცავი და რომლის შესაბამისადაც გაიანგარიშება ჰიდროკვანძის ნაგებობები, მუშაობის საიმედოობის ნორმალური მარაგის გათვალისწინებით;

საგანგებო წყალდიდობის ანუ ე.წ. ფორსირებული შეტბორვის დონე (ფშდ) – წყალსაცავის მაქსიმალური

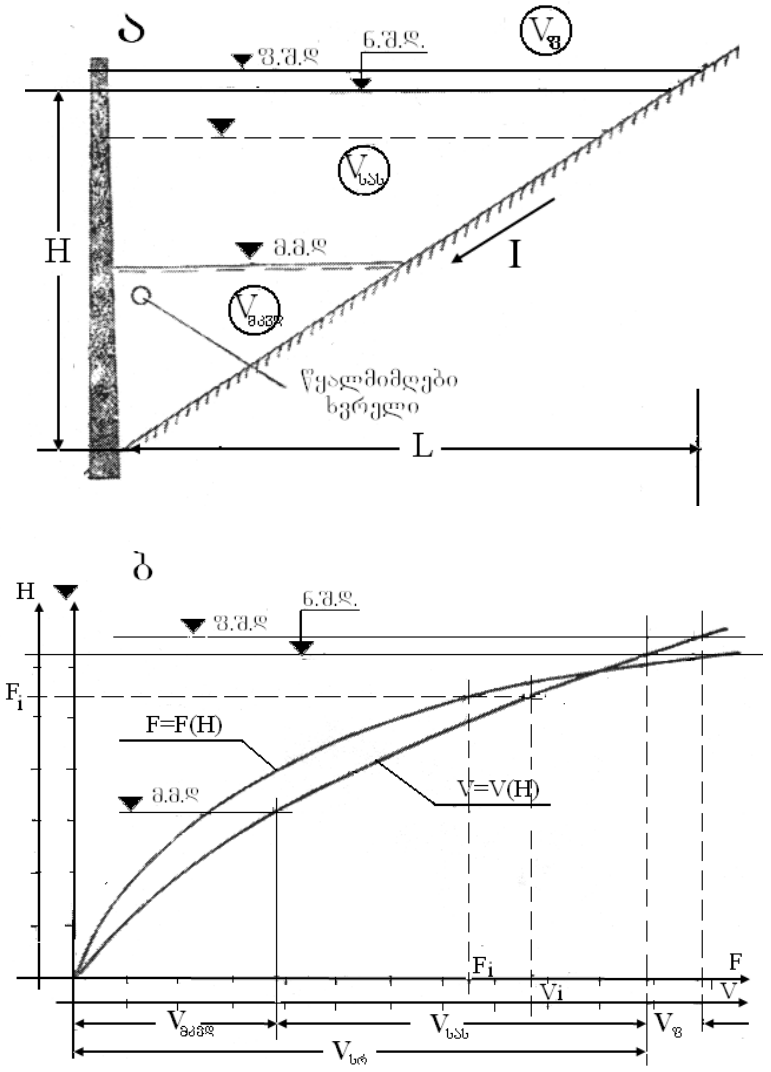
საანგარიშო დონე, სადამდეც დაიშვება წყალსაცავის შევსება საანგარიშო უზრუნველყოფის მაქსიმალური ჩამონადენის გატარების დროს; ფორსირებულმა დონემ შეიძლება 1-3 მ-ით გადააჭარბოს ნორმალური შეტბორვის ჰორიზონტს;

მკვდარი მოცულობის დონე (მმდ) – უდაბლესი (მინიმალური) საანგარიშო დონე, სადამდეც დასაშვებია წყალსაცავის დაცლა;

სასარგებლო მოცულობა (სარეგულაციო პრიზმა) $V_{სას}$ – მოცულობა მოთავსებული წყალსაცავის ნორმალური შეტბორვის და მკვდარი მოცულობის დონეებს შორის, რომელიც გამოიყენება მდინარის ჩამონადენის წყალსამეურნეო მიზნით რეგულირებისათვის;

მკვდარი მოცულობა $\mathbf{V_{მკვდ}}$ – მოცულობა მკვდარი მოცულობის დონისა და წყალსაცავის ფსკერს შორის, რომელიც არ მონაწილეობს მდინარის ჩამონადენის წყალსამეურნეო რეგულირებაში;

სრული მოცულობა $\mathbf{V_{სრ}}$ – მოცულობა მოთავსებული წყალსაცავის ნორმალური შეტბორვის დონესა და წყალსაცავის ფსკერს შორის, $\mathbf{V_{სრ}=V_{სას}+V_{მკვდ}}$;



ნახ. 2.13 წყალსაცავის ძირითადი მაჩვენებლები და მახასიათებლები

ა–წყალსაცავის დამახასიათებელი დონეები და მოცულობები; ბ–წყალსაცავის სარკობრივი ზედაპირების ფართობისა და მოცულობის მრუდები

ფორსირების მოცულობა (ფორსირების პრიზმა), $\mathbf{V_ფ}$ – მოცულობა ფორსირებული და ნორმალური შეტბორვის დონეებს შორის, რომელიც გამოიყენება წყალდიდობისა და წყალმოვარდნის ჩამონადენის გარკვეული ნაწილის აკუმულირებისათვის, ანუ მაქსიმალური ხარჯების „წასაკვეთად“.

წყალსაცავის ფარდობითი ტევადობა

$$\beta=V_{საბ}/W_0, \qquad (4.1)$$

სადაც $\mathbf{W_0}$ არის მდინარის საშუალომრავალწლიური ჩამონადენი;

სარკისებრი ზედაპირის ფართობების მრუდი – წყალსაცავის სარკისებრი ზედაპირის $\mathbf{F_i}$ ფართობებისა და წყლის $\mathbf{H_i}$ დონეთა შორის დამოკიდებულების $\mathbf{F_i = f(H_i)}$ მრუდი (აიგება წყალსაცავის ქვაბულის ტოპოგრაფიული რუკის საფუძველზე);

მოცულობების მრუდი – წყალსაცავის $\mathbf{V_i}$ მოცულობასა და წყლის $\mathbf{H_i}$ დონეს შორის დამოკიდებულების მრუდი;

საშუალო სიღრმე – წყალსაცავის სიღრმის პირობითი მახასიათებელი წარმოდგენილი წყალსაცავის მოცულობის შეფარდებით სარკობრივი ზედაპირის ფართობთან.

2.4.3. წყალსაცავში მეწყერული და სეისმოგენური ტალღების სიმაღლის პროგნოზირება *

საქართველოში სხვადასხვა დანიშნულების ჰიდროკვანძები ხშირ შემთხვევაში განლაგებულია (ან გეგმარდება) მთიან, სეისმოაქტიურ რაიონებში, რომლებიც რთული ტოპო-გეოლოგიური პირობებით ხასიათდება. აღნიშნული პირობები ხშირად ხდება მიზეზი ისეთი გეოდინამიკური პროცესების წარმოქმნისა, როგორიცაა მეწყრები წყალსაცავის სანაპირო ფერდობსა და სეისმოტექტონიკური დეფორმაციები დედამიწის ზედაპირზე, წყალსაცავის რაიონში (ძლიერი მიწისძვრების დროს). აღნიშნულმა პროცესებმა თავის მხრივ, შეიძლება გამოიწვიოს წყალსაცავში წყლის მაღალი ტალღები, რომელთა ზემოქმედებას (გადადინებას) წყალშემტბორავ ნაგებობებზე (კაშხლებზე) თან სდევს ავარიული, ზოგჯერ კი, კატასტროფული შედეგები. ამიტომაა, რომ ასეთი ტალღების სწორ პროგნოზირებას მთიან რეგიონებში ჰიდროკვანძების დაგეგმარებისა და ექსპლუატაციის დროს, დიდი სოციალურ-ეკოლოგიური და ტექნიკურ-ეკონომიკური მნიშვნელობა ენიჭება.

როგორც ცნობილია, ძლიერი მიწისძვრის დროს დედამიწის შიგნით მიწისძვრის კერაში წარმოქმნილმა კლდოვანი ქანების გადაადგილებებმა შეიძლება მოიცვას ზედაპირული შრეებიც. ამ შემთხვევაში, დედამიწის ზედა-

*– პარაგრაფი დაწერილია პროფ. თ. გველესიანის მიერ.

პირზე, კერძოდ კი წყალსაცავის ზონაში წარმოიქმნება ე.წ. პირველადი ნარჩენი დეფორმაციები (სეისმოტექტონი-კური გადანაცვლება). ამ გადანაცვლებას, როგორც წესი, ადგილი აქვს ძველი (არსებული) სეისმოგენური რღვევის ხაზის გასწვრივ ან ახალი რღვევის წარმოქმნის შედე-გად.

წყალსაცავის რაიონში მიწის ზედაპირზე სწორედ ასეთი გადანაცვლება ხდება მიზეზი მაღალი ტალღების გენერაციისა, რომლებიც ოკეანეებში წარმოქმნილი ცუნა-მის ტიპის ტალღების მსგავსია.

ჰიდროკვანძის დაპროექტების ან ექსპლუატაციის სტა-დიებზე წყალსაცავის რაიონში სეისმოტექტონიკური რღვევის ხაზის არარსებობის შემთხვევაში მიწისძვრის შედეგად წარმოქმნილი ე.წ. სეისმოგენური ტალღის მაქ-სიმალური ამპლიტუდის პროგნოზირება წარმოებს ყო-ფილ საბჭოთა კავშირის სახელმწიფო ნორმებისა და წესების („სნიპ“-ის) თანახმად, თ. გველესიანის მიერ მი-ღებული ფორმულით

$$\eta_{\text{სეისმ}} = 0,4 + 0,76(I - 6,0) \quad (\text{მ}), \tag{4.2}$$

სადაც **I** არის ჰიდროკვანძის რაიონის საანგარიშო ბა-ლიანობა.

იმ შემთხვევაში, როდესაც გეოლოგიური კვლევების შედეგად სეისმოგენური ტექტონიკური რღვევის ხაზის არსებობა არ არის დადგენილი წყალსაცავის რაიონში (კერძოდ, მისი ფსკერის ზონაში), მაშინ ნორმატიული

მითითებების [22] და [23] თანახმად, $\eta_{სეისმ}$ სიდიდის შეფასების მიზნით რეკომენდებულია შემდეგი ფორმულა: როდესაც $5 \le M \le 7$

$$\eta_{სეისმ} = 0,5 + 1,15(M-5,0) \quad (მ), \tag{4.3}$$

სადაც **M** არის მიწისძვრის მაგნიტუდის სიდიდე მიწისძვრის ენერგიის შეფასების მიზნით რიხტერის სკალის მიხედვით, რომელიც ამჟამად გამოიყენება მსოფლიოს საინჟინრო პრაქტიკაში (ბალების სკალის მაგივრად).

მაგნიტუდსა და ბალიანობას შორის დამოკიდებულების განსაზღვრისათვის შეიძლება გამოვიყენოთ მ. მებალინის შემდეგი ემპირიული ფორმულა:

$$M = 0,671 + 2,33\ tgH_E - 2,0$$

ან

$$I = 1,25M - 3,5tgH_E + 3,0,$$

სადაც H_E არის მიწისძვრის კერის სიღრმე, კმ-ში (მისი დადგენა წარმოებს სპეციალური საინჟინრო-სეისმოლოგიური კვლევების შედეგად). მე-6 მცხრილში მოცემულია, როგორც **M** და *I* სიდიდეები (იმ შემთხვევისათვის, როდესაც H_E=20 კმ), ასევე (3.2) ან (3.3) ფორმულით გამოთვლილი ტალღის ამპლიტუდის მნიშვნელობები.

ცხრილი 6

M	6.1	6.3	6.5	6.8	7.0
I	5.6	7.9	8.2	8.6	9.0
η სეისმ	1.6	1.8	2.0	2.3	2.8

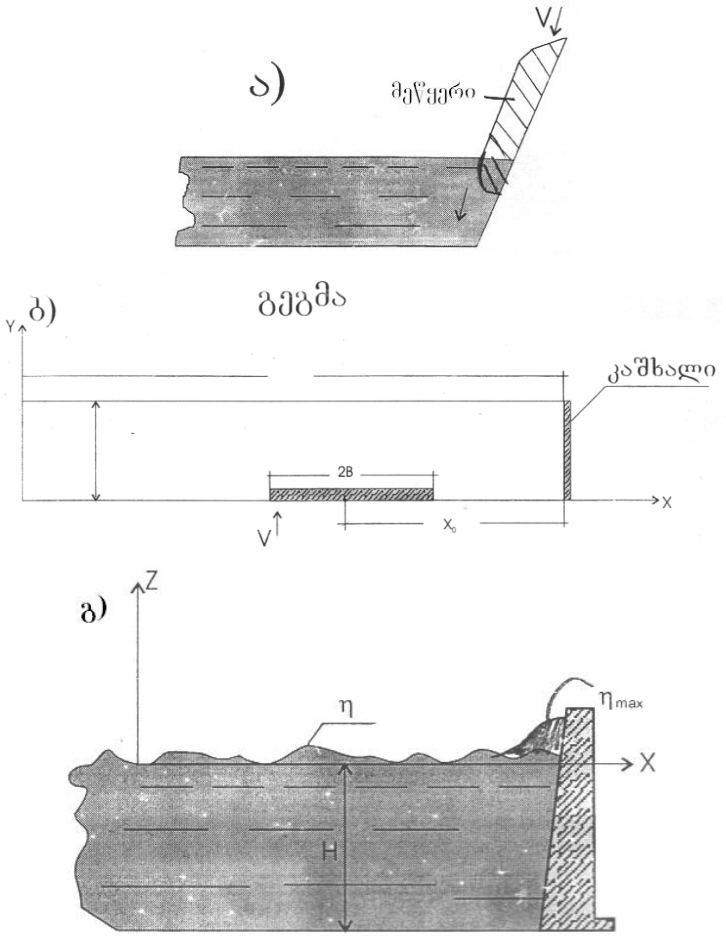
წყალსაცავში მეწყერით გამოწვეული ტალღის სიმაღლის პროგნოზირების მიზნით შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ჰიდროდინამიკის შესაბამისი სასაზღვრო ამოცანის მიღებული ამონახსნის მიხედვით საქართველოს ენერგეტიკისა და ენერგეტიკული ნაგებობების სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში დამუშავებული კომპიუტერული პროგრამა [23]. ამ ამონახსნის მიხედვით, ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდა კაშხლის კვეთში (ნახ. 2.14) ზოგად შემთხვევაში, არის შემდეგი ფუნქცია

$$\eta_{\text{მეწ}} = \mathrm{f}\left(\ell, \ell_1, \mathrm{H}, 2\mathrm{B}, \chi_0, \mathrm{t}_0, \mathrm{D}\right),$$

სადაც ℓ, ℓ_1 და **H** არის წყალსაცავის გასაშუალოებული სიგრძე, სიგანე და სიღრმე (მ); **2B** – სანაპირო ფერდობზე განლაგებული პოტენციური მეწყრის სიგანე (სანაპირო ზოლის გასწვრივ) (მ); χ_0 - მანძილი კაშხლის კვეთიდან მეწყრული უბნის შუა წერტილამდე (მ); $\mathbf{t_0}$ – მეწყრის წყალში შემოსვლის პროცესის ხანგრძლივობა (წმ); **D** – მეწყრული მასის სისქე მისი წყალში ჩამონგრევის შედეგად (მ);

მეწყრული მასის გასაშუალოებული მოცულობა განისაზღვრება ასე

$$W_{\text{მეწ}} = 2 \cdot B \cdot D \cdot H \quad (\text{მ}^3).$$



ნახ. 2.14 მეწყრით გამოწვეული ტალღის წარმოქმნის საანგარიშო სქემა

წყალსაცავში მოცემული ზომის მეწყრის ჩამონგრევის შედეგად კაშხალთან გენერირებული ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდის პროგნოზირება კაშხალთან ნორმატიული მითითებების [23] თანახმად, წარმოებს თ. გველესიანის მიერ მიღებული მიახლოებითი ფორმულით. ეს ფორმულა კერძო შემთხვევისათვის წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

როდესაც $\frac{\chi_0}{H} \geq 20;\ \frac{\ell_1}{H} \leq 7.0;\ t_0^* = t_0\sqrt{\frac{g}{H}} = 1.0,$

$$\eta_{მეწ} = 0.22\frac{W_{მეწ}}{\ell_1 H}\left[1.0 - 0.5\left(\frac{\chi_0}{H} - 20\right)10^{-2}\right] \text{ (მ)}, \qquad (4.4)$$

სადაც **g** თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა იმ შემთხვევაში, როდესაც წყალსაცავი საკმაოდ ვიწროა $\left(\ell_1 / H \leq 3.0\right)$ და მეწყერმა ჩამოქცევის შედეგად შეიძლება გადაფაროს წყალსაცავი (**2B** სიგრძის მონაკვეთზე) მთელ სიგანეზე, მაშინ კაშხლის კვეთში წყლის დონის მაქსიმალური აწევის სიდიდე განისაზღვრება მიახლოებითი გამოსახულებით [23].

როდესაც $t_0^* \geq 15$

$$\frac{\eta_{მეწ}}{D_{0.5}} = 0.18 - 0.28 \cdot \tilde{t}_0^* \text{ (მ)}, \qquad (4.5)$$

სადაც $\tilde{t}_0^* = 0.01 \cdot t_0\sqrt{\frac{g}{H}} = 0.01 \cdot t_0^*,$

$$D_{0.5} = \frac{W_{\text{მეწ}}}{2\ell_1 H}.$$

ჩვეულებრივ წყალსაცავებში თუ მოსალოდნელია მხოლოდ წყალდიდობით და ქარით გამოწვეული წყლის დონის მატება, მაშინ კაშხლის ქიმის ნიშნულის **(ᲙᲥნ)** დადგენა, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ხდება მხოლოდ ამ ფაქტორების გათვალისწინებით. ეს ხორციელდება იმ მიზნით, რომ არ მოხდეს მაღალი ტალღების გადადინება კაშხალზე, რაც ბუნებრივი მასალისგან (მიწა, ქვა, ღორღი და სხვ.) აგებული კაშხლების შემთხვევაში სამშენებლო ნორმებისა და წესების თანახმად, დაუშვებელია. აღვნიშნოთ, რომ ამ შემთხვევაში ტალღებით გამოწვეული დატვირთვები კაშხალზე მიეკუთვნება დროებითი, ხანმოკლე ზემოქმედების კატეგორიას. რაც შეეხება მიწისძვრით ან მეწყრით გამოწვეული ტალღების ზემოქმედებებს, მათ განსაკუთრებული დატვირთვების რიგს მიაკუთვნებენ. აღნიშნული დროებითი და განსაკუთრებული დატვირთვების გათვალისწინებისას კაშხლის ქიმის ნიშნულის განსაზღვრა შესაძლებელია შემდეგი ფორმულით;

$$\text{ᲙᲥნ}=\text{ნშდ}+\psi_1\left(h_{\text{ფორ}}+\eta_{\text{ქარ}}\right)+\psi_2\eta_{\text{სეის}},$$

$$\text{კქნ}=\text{ნშდ}+\psi_1\left(h_{\text{ფორ}}+\eta_{\text{ქარ}}\right)+\psi_2\eta_{\text{მეწ}}, \qquad (2.36)$$

სადაც **ნშდ** არის წყალსაცავში ნორმალური შეტბორვის დონე; $h_{ფორ}$ – წყალდიდობის (ან წყალმოვარდნის) დროს წყალსაცავის ფორსირების მოცულობის სიმაღლე; $\eta_{ქარ}$ – ქარით გამოწვეული ტალღის ამპლიტუდა (შესაბამისი უზრუნველყოფის %); ψ_1 და ψ_2 – დატვირთვათა შეუღლების (შეთანწყობის) კოეფიციენტები: ხანმოკლე დატვირთვისათვის $\psi_1 = 0.9$, განსაკუთრებული დატვირთვებისათვის $\psi_2 = 0.8$.

სეისმოაქტიური და გეოლოგიური თვალსაზრისით, რთულ პირობებში ჰიდროკვანძის დაპროექტების შემთხვევაში კაშხლის ქიმის საანგარიშო ნიშნულის დადგენა უნდა მოხდეს (2.36) ფორმულებით მიღებული მნიშვნელობებიდან უდიდესის არჩევის გზით.

III განყოფილება. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები

I თავი. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები საერთო ცნობები ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებსა და ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა კვანძებზე

3.1.1. ჰიდროტექნიკა, ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, მათი თავისებურებანი და მუშაობის პირობები

მეცნიერებას, რომელიც შეისწავლის სხვადასხვა სამეურნეო მიზნებისათვის წყლის რესურსების გამოყენებისა და წყლის მავნე მოქმედებათა წინააღმდეგ ბრძოლის ღონისძიებებს, აგრეთვე ამ ღონისძიებათა განხორციელებისათვის საჭირო ნაგებობების დაპროექტების, მშენებლობისა და ექსპლუატაციის მეთოდებს, ეწოდება ჰიდროტექნიკა, ხოლო საინჟინრო ნაგებობებს, რომლებიც უშუალოდ ახორციელებს ამა თუ იმ წყალსამეურნეო ღონისძიებას – ჰიდროტექნიკური ნაგებობები.

ჰიდროტექნიკა, როგორც მეცნიერება, ემყარება მრავალ თეორიულ და ექსპერიმენტულ-გამოყენებით დისციპლინას, რომელთაგან შეიძლება გამოიყოს ორი ძირითადი ციკლი – ჰიდრავლიკა-ჰიდროლოგიისა და საერთო სამშენებლო საინჟინრო დისციპლინები. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს მუშაობა უხდება რთულ პირობებში, რომლებიც მუდმივად იმყოფება მდგარ ან მოძრავ წყალში. ეს უკანასკნელი მათზე ახდენს სხვადასხვა სახის მექანიკურ, ფიზიკურ-ქიმიურ და ბიოლოგიურ ზემოქმედებას.

ამ ზემოქმედებათა თავისებურებებისა და ადგილობრივი (ტოპოგრაფიული, გეოლოგიური, სეისმური და სხვა. პირობების სხვადასხვაობის გამო, ტიპიურობა ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში თითქმის არ არსებობს. მსოფლიოში არ მოიპოვება ორი ერთნაირი წყალსამეურნეო დანიშნულების ნაგებობათა კომპლექსი.

ნაგებობათა გეომეტრიული ფორმები და მათი სასაზღვრო პირობები, როგორც წესი, რთულია, რაც თავის მხრივ ართულებს ნაგებობათა როგორც ჰიდრავლიკურ, ისე დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე გაანგარიშებებს. ამიტომ ხშირად (განსაკუთრებით კი საპასუხისმგებლო ნაგებობების) დაპროექტების დროს გამოიყენება ექსპერიმენტული მეთოდი, რომლის მეშვეობით მოდელებზე დადგინდება საჭირო მონაცემები. ექსპლუატაციაში მყოფ ნაგებობებზე ექსპერიმენტული დაკვირვების მეთოდი საშუალებას იძლევა შემოწმდეს თეორიული გაანგარიშებისა და მოდელური კვლევის შედეგები, რომლებიც ძვირფას მასალას წარმოადგენს სპეციალისტთა შემდგომი შემოქმედებითი მოღვაწეობისათვის.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობა, სხვა სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობისაგან განსხვავებით, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გარემოზე.

ზოგჯერ წყალსაცავებით შექმნილი შეტბორვა ვრცელდება ასეულ კილომეტრ მანძილზე და იწვევს ათეულ და ასეულ ჰექტარი მიწების დატბორვას, გრუნ-

ტის წყლების დონის აწევას, მიკროკლიმატის შეცვლას, თერმული და ყინულოვანი რეჟიმების შეცვლას და სხვ. ავარიის შემთხვევაში წყალსაცავში მოთავსებული წყლის უდიდესი მასა სწრაფად გადინდება მდინარის კალაპოტში უდიდესი სიჩქარით და თავის გზაზე ყველაფერს ანგრევს. ისტორიაში ცნობილია შემთხვევები, როდესაც წყალსაცავების ფორმირებამ (ფერდობების ჩამონგრევამ), კაშხლებისა და ჯებირების გარღვევამ გამოიწვია მთელი ქალაქებისა და დასახლებული პუნქტების წალეკვა, ადამიანთა დიდი მსხვერპლით. ამასთან დაკავშირებით, შეიძლება გავიხსენოთ მომხდარი ავარიები მალპასეს კაშხლისა საფრანგეთში და ვაიონტის წყალსაცავისა იტალიაში, რომელთაც მოჰყვა კატასტროფული შედეგები (ადამიანთა მსხვერპლი, ქალაქების, ხიდების, სამრეწველო ნაგებობების ნგრევა და სხვ.).

სამრეწველო, სატრანსპორტო და სხვა ნაგებობებისაგან განსხვავებით, ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობა ხასიათდება დიდი სირთულეებით და მოცულობებით, შესაბამისად კი დიდი კაპიტალტევადობით. თუ სხვა ნაგებობების ავარიით გამოწვეული ზარალი ხშირ შემთხვევაში ფასდება მათი აღსადგენი ღირებულებით, შემტბორი ჰიდროტექნიკური ნაგებობებით გამოწვეული მატერიალური ზარალი, ჩვეულებრივ, ბევრად აღემატება თავის ღირებულებას; ხშირად ამ ავარიას თან სდევს ადამიანთა დიდი მსხვერპლი.

3.1.2. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სახეობანი და კვანძები

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა დანიშნულებისა და მშენებლობის პირობების მრავალფეროვნება განაპირობებს მათი ტიპებისა და კონსტრუქციების დიდ სიმრავლესა და მრავალსახეობას. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა კლასიფიკაცია, რომელიც გარკვეული თვალსაზრისით პირობით ხასიათს ატარებს, უფრო მიზანშეწონილია ცალკეული მახასიათებლების მიხედვით. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების კლასიფიკაციის ერთ-ერთი, პრაქტიკაში უფრო გავრცელებული, ვარიანტი მოცემულია ნახ.-ზე. 3.1.

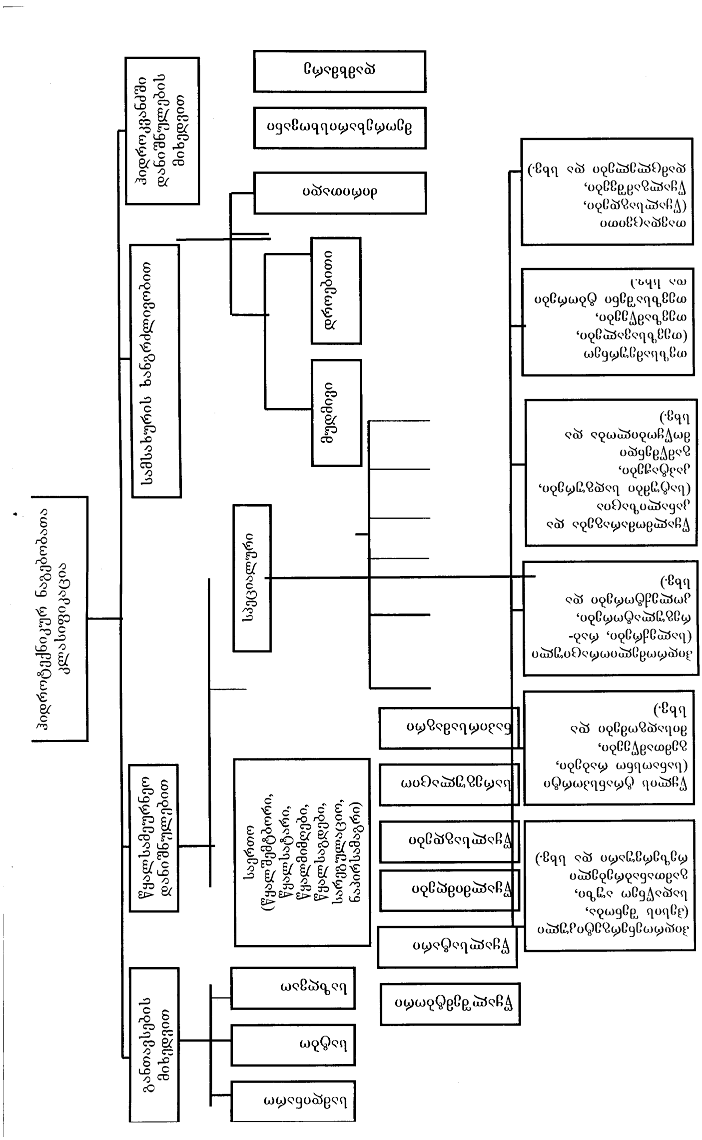
ამჟამად ქვეყნის ტერიტორიაზე მოქმედი ნორმების შესაბამისად (სნ 1.06.01-97) ჰიდროტექნიკური ნაგებობები მათი სახალხო-სამეურნეო მნიშვნელობის, საწარმოო ეფექტურობის, ჰიდროკვანძებსა და სისტემებში მათი მნიშვნელობის, საექსპლუატაციო ხანგრძლივობის, ავარიით ან ექსპლუატაციის დარღვევით გამოწვეული შედეგების, შემტბორავ ნაგებობათა სიმაღლისა და წყალსაცავის მოცულობების, ფუძის გეოლოგიური აგებულების, რაიონის სეისმურობის და სხვა მახასიათებლების მიხედვით, იყოფა ოთხ კლასად. რამდენად მეტი საპასუხისმგებლოა დასაგეგმარებელი ნაგებობა, იმდენად უფრო მეტია მისი კლასი. დროებითი ნაგებობები, განსაკუთ-

რებული გამონაკლისის გარდა, როგორც წესი მიეკუთვნება IV კლასს.

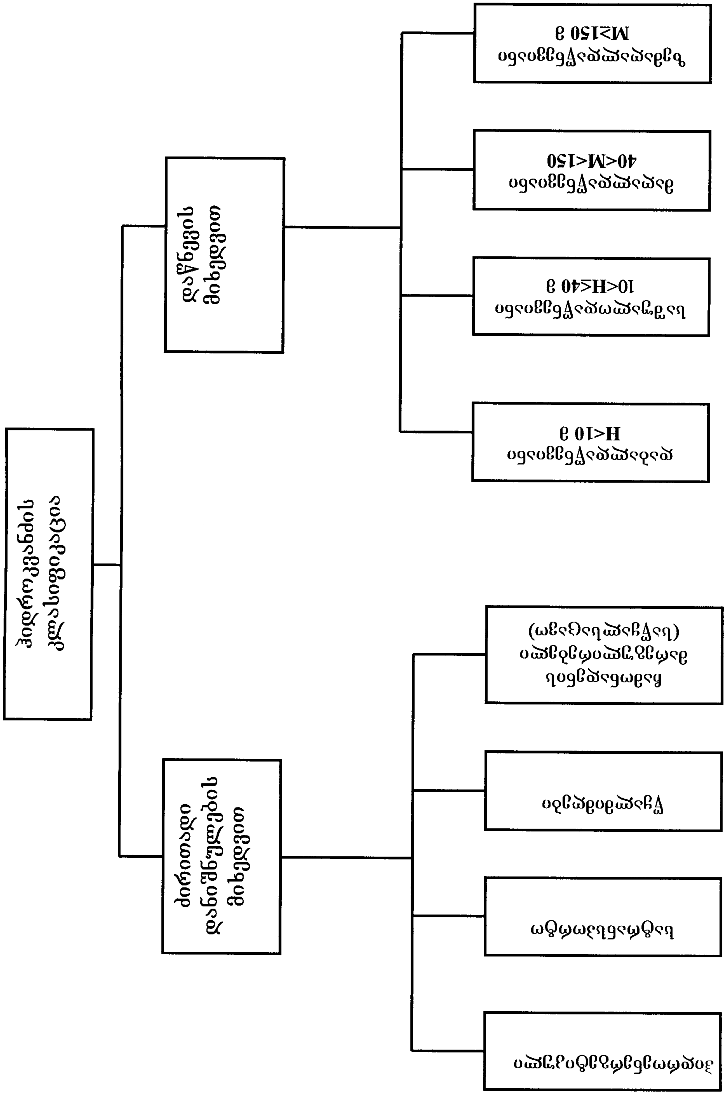
დროებითი ჰიდროტექნიკური ნაგებობები გამოიყენება მხოლოდ მუდმივი ნაგებობების მშენებლობის ან რემონტის პერიოდში; ძირითადია ის ნაგებობათა ჯგუფი, რომელთა დანგრევა-დაზიანება იწვევს ჰიდროკვანძის ფუნქციის მოშლას, ხოლო მეორეხარისხოვანის დანგრევა ან დაზიანება არ იწვევს აღნიშნულ შედეგებს.

ცალკეული დანიშნულების ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სპეციალურ შეთანწყობას, მათი ერთობლივი მუშაობის პირობების გათვალისწინებით, ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა კვანძებს ან მოკლედ, ჰიდროკვანძებს უწოდებენ. სხვადასხვა წყალსამეურნეო დანიშნულების ჰიდროკვანძები, სამხედრო თვალსაზრისით, ყველა სტრატეგიული მნიშვნელობისაა. ჰიდროკვანძების კლასიფიკაცია სხვადასხვა ნიშნის მიხედვით, მოცემულია 3.2. ნახზე.

ჰიდროსადგურის დაწნევა შეიძლება შეიქმნას სხვადასხვა სქემით. ჰიდროკვანძის კაშხლის სიმაღლე შეიძლება იყოს დაბალი, ხოლო ჰიდროკვანძი – საშუალო, მაღალ ან ზემაღალდაწნევიანი (ნახ. 3.3) ჰიდროკვანძის დაწნევა განისაზღვრება მის ზედა და ქვედა ბიეფებს შორის დონეთა სხვაობით. ასეთი ე.წ. დერივაციული სქემის ჰესი შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს ნაგებობათა შემდეგი მთავარი კვანძის სახით (ნახ. 3.2):


ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა კლასიფიკაცია
ჰიდროკვანძში დანიშნულების მიხედვით
სამსახურის ხანგრძლივობით
წყალსამეურნეო დანიშნულებით
განთავსების მიხედვით
დროებითი
მუდმივი
სპეციალური
საერთო (წყალშემკრებიო, წყალსატარი, წყალგამყოფები, წყალსაგდები, სარეგულაციო, ნაპირსამაგრი)

ნახ. 3.1

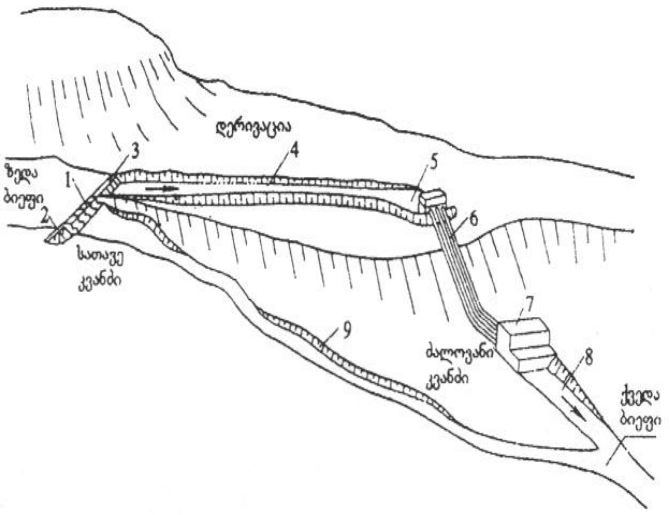

ჰიდროკვანძის კლასიფიკაცია
ძირითადი დანიშნულების მიხედვით
ჰიდროენერგეტიკული
სატრანსპორტო
წყალმიმღები
ჩამონადენის მარეგულირებელი (საწყალსაცავე)
დაწნევის მიხედვით
დაბალდაწნევიანი H<10 მ
საშუალოდაწნევიანი 10<H≤40 მ
მაღალდაწნევიანი 40<M<150
ზემაღალდაწნევიანი M≥150 მ

ნახ.3.2

1. სამდინარო ანუ სათავო ჰიდროკვანძი (კაშხალი, წყალსაგდები, წყალმიმღები, ზოგჯერ სანაოსნო რაბი, თევზსავალი, ტივსავალი და სხვ.);

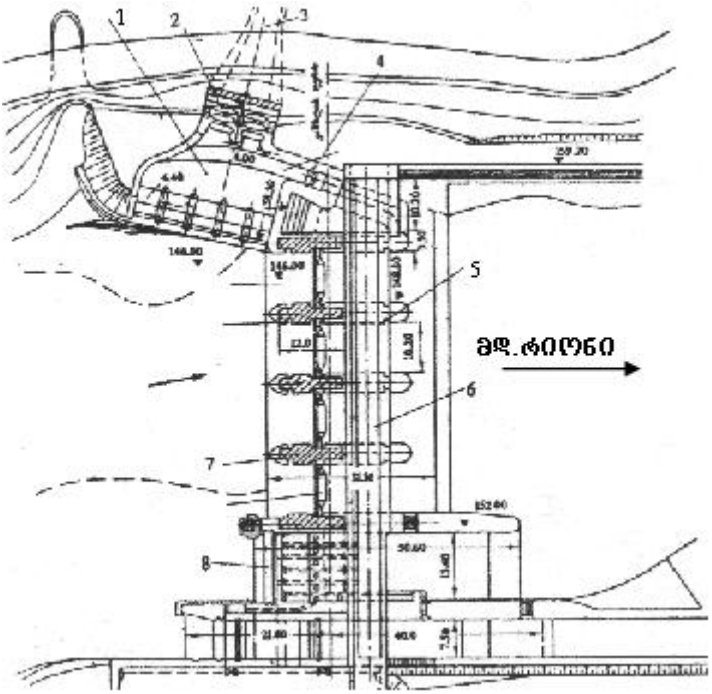
2. დერივაცია (არხი, გვირაბი, მილსადენი და ნაგებობები დერივაციაზე);

3. ძალური კვანძი (ჰესის შენობა, სადაწნეო აუზი ან გამთანაბრებელი რეზერვუარი, გამანაწილებელი ქვესადგური, სატურბინო მილსადენები);

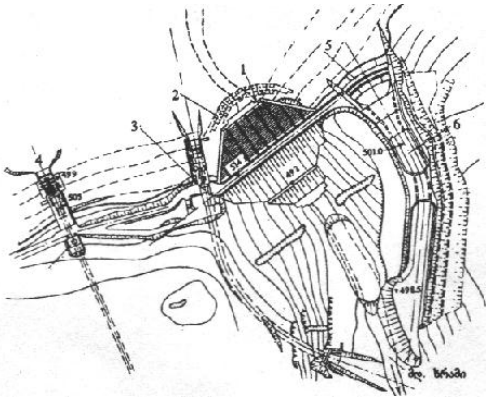


ნახ. 3.3. სადაწნეო დერივაციული ჰიდროელექტროსადგურის ნაგებობების განლაგების სქემა:
1.–წყალსაშვები კაშხალი; 2–ყრუ კაშხალი; 3– წყალმიმღები; 4 – დერივაციული არხი; 5–სადაწნეო აუზი; 6–სადაწნეო მილსადენები; 7– ჰიდროელექტროსადგურის შენობა; 8 გამყვანი არხი; 9–მდინარის კალაპოტი.

დაბალ, საშუალო და ზემაღალდაწნევიანი სათავო ჰიდროკვანძების ტიპური სქემები, ექსპლუატაციაში მყოფი ჰესების მაგალითზე მოცემულია შესაბამისად დაწნევების მიხედვით, როგორც ნახაზებიდან ჩანს, განსხვავებულია როგორც ნაგებობათა ტიპები, ისე მათი შეთანწყობა.

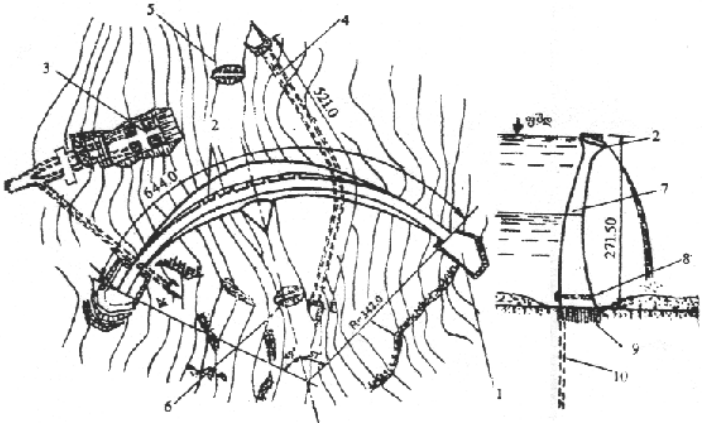


ნახ. 3.4. დაბალდაწნევიანი სათავო ჰიდროკვანძი (რიონჰესის) დასაშლელი კაშხლით
1 – წყალმიმღები; 2 – წყალმიმღების საკეტი; 3 – გვირაბი; 4 – გამრეცხის საკეტი; 5 – ზღურბლი; 6 – სამომსახურო ხიდი; 7 – ბურჯი; 8 – სიფონური წყალსაგდები



ნახ. 3.5. საშუალოდაწნევიანი სათავო ჰიდროკვანძი (ხრამჰეს I-ის) გრუნტის კაშხლით

1 – გრუნტის კაშხალი ლითონის ეკრანით; 2 – ზედა ზღუდარი; 3 – სამშენებლო გვირაბი სიღრმული წყალგამშვებით; 4 – წყალმიმღები; 5 – წყალსაგდების ზღურბლი; 6 – ღია სანაპირო წყალსაგდები.



ნახ. 3.6. ზემაღალდაწნევიანი სათავო ჰიდროკვანძი (ენგურჰესის) თაღოვანი კაშხლით

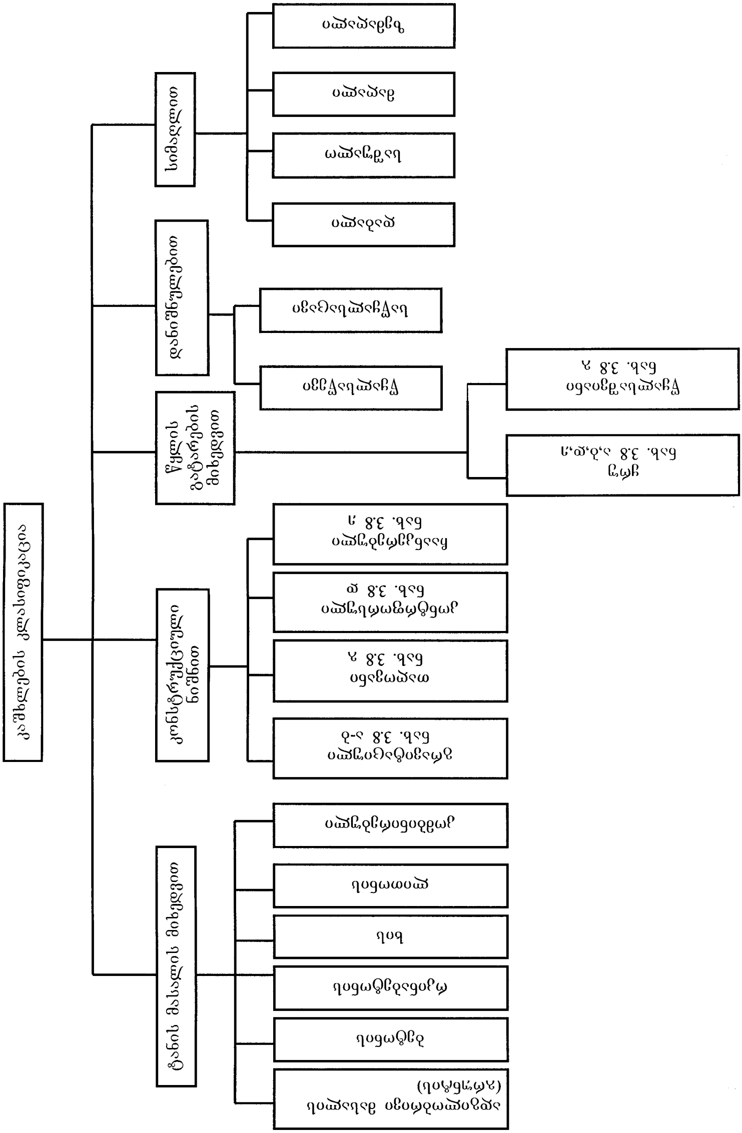
1 – სანაპირო ბურჯები; 2 – საექსპლუატაციო წყალსაგდები (6X25 მ, Q=2200 მ³/წმ); 3 – წყალმიმღები; 4 – სადაწნეო გვირაბი; 5 – ზედა ზღუდარი; 6 – ქვედა ზღუდარი; 7 – I რიგის წყალსაგდები; 8 – ფსკერული გამშვები; 9 – განმამტკიცებელი ცემენტაცია; 10 – ცემენტაციური ფარდა

3.1.3. კაშხლები და მათზე მოქმედი დატვირთვები

კაშხალი არის წყალშემტბორი ჰიდროტექნიკური ნაგებობა, რომლის დანიშნულებაა წყლის ნაკადის კალაპოტის გადაღობვა. კაშხლიდან წყალნაკადის საწინააღმდეგო მომართულებით იქმნება შეტბორვა, რომელსაც ზედა ბიეფი (ზ.ბ) ეწოდება, ხოლო დინების მიმართულებით (მეორე მხარეს) – ქვედა ბიეფი (ქ.ბ). ზედა და ქვედა ბიეფებს შორის დონეთა სხვაობას, ეწოდება დაწნევა კაშხალზე. მდინარის (არხის) განივკვეთს, სადაც კაშხალია აგებული, კაშხლის გასწორს უწოდებენ.

კაშხლის ტიპისა და კონსტრუქციის შერჩევა ხდება მშენებლობის რაიონის ბუნებრივი, სამეურნეო და სამშენებლო პირობების მიხედვით, სხვადასხვა საპროექტო ვარიანტების ტექნიკურ-ეკონომიკური შედარების საფუძველზე. კაშხალი მეტად რთული და საპასუხისმგებლო ნაგებობაა ჰიდროკვანძის შემადგენლობაში. ბოლო მონაცემებით, მსოფლიოში ექსპლუატაციაშია 14700-ზე მეტი კაშხალი, მშენებლობის პროცესშია რამდენიმე ასეული, მათ შორის 60 მ-ზე მეტი სიმაღლის 44 კაშხალი იაპონიაში. კაშხლების კლასიფიკაცია სხვადასხვა ნიშნით მოცემულია ნახ-ზე 3.7.

თანამედროვე კაშხალთმშენებლობაში სიმაღლის მიხედვით კაშხლების კლასიფიკაცია პირობითია და წარმოებს კაშხლის ტიპის მიხედვით.


კაშხლების კლასიფიკაცია
ტანის მასალის მიხედვით
კონსტრუქციული ნიშნით
წყლის გატარების მიხედვით
დანიშნულებით
სიმაღლით
ადგილობრივი მასალის (გრუნტის)
ბეტონის
რკინაბეტონის
ხის
ლითონის
კომბინირებული
გრავიტაციული ნახ. 3.8 ა-ბ
თაღოვანი ნახ. 3.8 გ
კონტრფორსული ნახ. 3.8 დ
ჩაანკერებული ნახ. 3.8 ე
ყრუ ნახ. 3.8 ა,ბ,დ,ე
წყალსაშვიანი ნახ. 3.8 გ
წყალსაწევი
საწყალსაცავო
დაბალი
საშუალო
მაღალი
ზემაღალი

ნახ.3.7

ჰიდროტექნიკური ნაგებობები სხვა საინჟინრო ნაგებობებისაგან მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან მათზე მოსული დატვირთვებისა და ზემოქმედებების სიმრავლით, მრავალსახეობითა და მათი შესაძლო შეთანწყობის მრავალფეროვნებით.

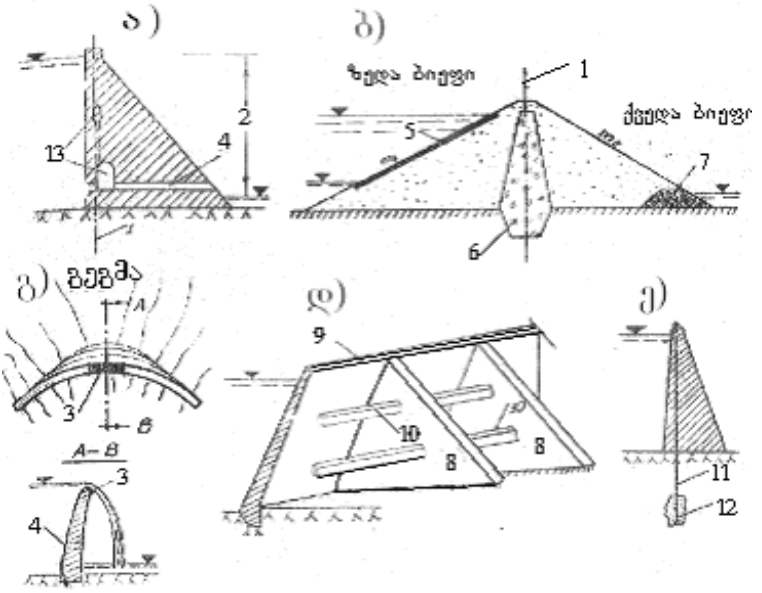
სამშენებლო ნორმებისა და წესების თანახმად, ასხვავებენ ჰიდრონაგებობებზე მოსული დატვირთვებისა და ზემოქმედების მუდმივ, დროებით (ხანგრძლივ, ხანმოკლე) და განსაკუთრებულ ჯგუფებს (СНиП 2.06.01-86.მ.1987). მუდმივ და დროებით დატვირთვებსა და ზემოქმედებებს მიეკუთვნება ის გარე ძალური ფაქტორები, რომლებიც მოქმედებს ნაგებობაზე ნორმალური ექსპლუატაციის პირობებში: ნაგებობების საკუთარი წონა, მუდმივი მოწყობილობების წონა, წყლის წნევები, ფილტრაციული წნევის ძალები, გრუნტის წონა და მისი გვერდითი დაწნევა, დალექილი ნატანის დატ-ვირთვა, ფორული წნევა, ტემპერატურული ზემოქმედებები, ტალღის და ყინულის წნევა და სხვ. განსაკუთრებუ-ლი დატვირთვა და ზემოქმედება შეესაბამება ნაგებობის მუშაობის თავისებურ (გართულებულ-არანორმალური ექსპლუატაციის) პირობებს, როგორიცაა: ზედა ბიეფში ფორსირებული (მაქსიმალური) შეტბორვის დონე; ფილტრაციის საწინააღმდეგო და სადრენაჟო მოწყობილობების ნორმალური მუშაობის დარღვევა; ჰაერის საშუალო თვიური ტემპერატურის ცვალებადობის უდიდესი ამპლიტუდა; ყინულის დატვირთ-

ვები დამანგრეველი ძალის ყინულსვლის დროს; დატვირთვა კატასტროფული სიძლიერის ქარისაგან, სეისმური ზემოქმედებანი, გემის დარტყმა, მდინარის კასკადური გამოყენების დროს ზედა საფეხურის გარღვევის ზემოქმედება ქვედა საფეხურზე; წყალსაცავში გარღვევის ტალღის ზემოქმედება, სამხედრო საინჟინრო თვალსაზრისით, ხელოვნურად შექმნილი აფეთქებით გამოწვეული დინამიკური დატვირთვები.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა გაანგარიშება საჭიროა ჩატარდეს ძალთა ძირითად და განსაკუთრებულ შეთანხმებზე (შეთანწყობაზე). ძირითადი შეთანწყობის დროს ნაგებობა უნდა შემოწმდეს იმ ძალური ფაქტორების ზემოქმედებაზე, რომლებიც მასზე მოქმედებს ნორმალური ექსპლუატაციის პირობებში. განსაკუთრებული შეთანწყობისას მას ემატება ერთ-ერთი განსაკუთრებული დატვირთვა (ზემოქმედება).

გაანგარიშებისას შეირჩევა ძალების ყველაზე არახელსაყრელი, მაგრამ რეალურად მოსალოდნელი შეთანწყობა.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე მოქმედი ამ დატვირთვებისა და ზემოქმედებების გამოთვლა მოცემულია სათანადო სამშენებლო ნორმებსა და წესებში, აგრეთვე ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სახელმძღვანელოებში.



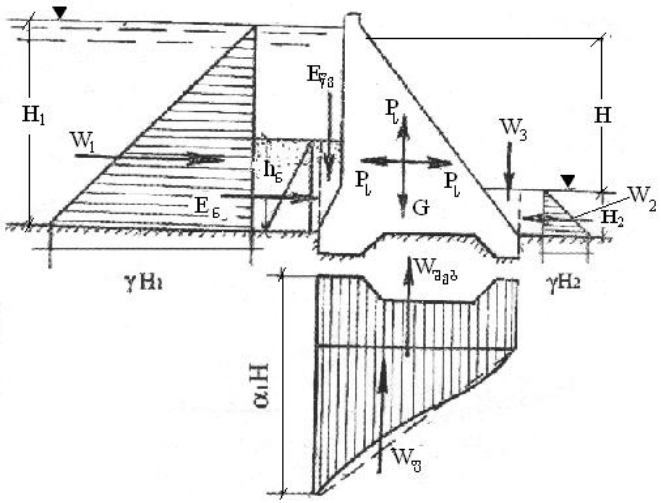
ნახ. 3.8. კაშხლების კლასიფიკაცია კონსტრუქციული ნიშნების ანუ ძირითადი მუშაობის პრინციპის მიხედვით
ა–ბეტონის გრავიტაციული კაშხალი; ბ– გრუნტის გრავიტაციული კაშხალი; გ–თაღოვანი კაშხალი; დ–კონტრფორსული კაშხალი; ე–ჩაანკერებული კაშხალი; 1–კაშხლის გასწორი; 2–კაშხალზე დაწნევა; 3–წყალსაშვები; 4–წყალჩასაშვები; 5–ფერდოს გამაგრება; 6–თიხის გული; 7–სადრენაჟო პრიზმა; 8–კონტრფორსი; 9–სადაწნეო გადახურვა; 10–სიხისტის კოჭები; 11–ანკერები; 12–ანკერების ჩამაგრება; 13–გალერეა

სიმარტივის მიზნით, მოცემულია გრავიტაციულ კაშხალზე მოქმედი ის ძალური ფაქტორები, რომლებიც ძირითადად განსაზღვრავს მის მდგრადობასა და დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობას (ნახ. 3.9).

W_1 არის ზედა ბიეფიდან კაშხალზე მოქმედი წყლის ჰიდროსტატიკური წნევის ჰორიზონტალური შემდგენი,

რომლის ინტენსივობა ფუძეში იქნება γH_1 (γ წყლის კუთრი წონა, $\gamma \approx 1000$ კგძ/მ^3=1 ტ/მ^3≈10000 ნ/მ^3), თუ საანგარიშოდ ავიღებთ კაშხლის ერთეულ სიგრძეს $W_1 = \frac{\gamma H_1^2}{2}$ (კგძ/მ), ანალოგიურად ქვედა ბიეფიდან $W_2 = \frac{\gamma H_2^2}{2}$; G – ნაგებობის (ან მისი ნაწილის) საკუთარი წონა, გაიანგარიშება მისი მოცულობის გადამრავლებით ნაგებობის მასალის მოცულობით წონაზე, რომელიც მოდებულია სიმძიმის ცენტრში და ვერტიკალურადაა მიმართული ზევიდან ქვევით. სიბრტყეში ანუ ორგანზომილებიან სისტემაში (ნახ. 3.8) $G=F_ძ\gamma_1$ ($F_ძ$ კაშხლის განივკვეთის ფართობია, γ_1 – კაშხლის მასალის კუთრი წონა, მძიმე ბეტონის შემთხვევაში $\gamma_1 \approx 2{,}4$ ტ/მ^3).

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ფუძეებისა და ფერდობების გრუნტები ცოტად თუ ბევრად წყალშეღწევადია, ამიტომ ნაგებობის მიერ შექმნილი დაწნევის შედეგად წყალი ფორებსა და ბზარებში მოძრაობს ზედა ბიეფიდან ქვედა ბიეფისაკენ, რომელსაც ფილტრაციას უწოდებენ. განასხვავებენ ფილტრაციას ნაგებობათა ფუძეში ანუ დაწნევით ფილტრაციას (ნახ.3.9.) და გვერდით (შემოვლით) ანუ უდაწნეო ფილტრაციას.



ნახ. 3.9. ჰიდრონაგებობაზე მოქმედ დატვირთვათა სქემა

ჰიდრონაგებობების ძირზე შეიძლება მოქმედებდეს ორი სახის ფილტრაციული წნევა: შემტივტივებელი (**W**ვაკ), რომლის რიცხვითი მნიშვნელობა განისაზღვრება არქიმედეს კანონით და რომლის თანახმად, ნაგებობის ძირის ნებისმიერ წერტილში წნევა განისაზღვრება ქვედა ბიეფის დონიდ განსახილველი წერტილის ჩაღრმავების ტოლი სიმაღლის წყლის სვეტის წონით, და ფილტრაციული ჰიდროდინამიკური (**W**ფ), რომელიც გამოწვეულია ფილტრაციული ნაკადის მოძრაობის სიჩქარით. **W**ფ-ის გამოთვლა საკმაოდ რთულია, იგი ხორციელდება ფილტრაციის ჰიდროდინამიკური ბადის აგებით ან წინაღობის კოეფიციენტთა მეთოდის გამოყენებით. დაპროექტების საწყის ეტაპზე შეგვიძლია გამოვიყენოთ

წრფივ კონტურული მეთოდი ანუ ჰიდროდინამიკური წნევების წრფივი განაწილების ეპიურა, რომლის მაქსიმალური ინტენსივობა სადაწნეო წახნაგის მხარეს აღვნიშნოთ αH-ით. აქ H დაწნევაა (იხ. ნახ. 3.9), ხოლო α – ფილტრაციული წნევის შემამცირებელი კოეფიციენტი ($0 \le \alpha \le 1$), რომლის სიდიდე დამოკიდებულია, როგორც საძირკვლის გრუნტის გეოლოგიურ ჭრილზე, აგრეთვე ნაგებობის მიწისქვეშა კონტურის ფორმასა და ზომებზე. ამ დაშვებით, $W_ფ = \alpha H \gamma b/2$ (b კაშხლის სიგანე ფუძეში). ორივე სახის ფილტრაციული წნევის ძალა ($W_{შემ}$, $W_ფ$) გაინსაზღვრება შესაბამისი ეპიურების ფართობის მიხედვით, გაივლის მის სიმძიმის ცენტრში ნაგებობის ძირის მართობულად, რომელთა ჯამი იძლევა ფილტრაციულ უკუწნევას

$$W_{ფ.უ} = W_{შემ} + W_ფ \qquad (3.1)$$

განმარტებიდან გამომდინარე ცხადია, თუ დონეები ზედა და ქვედა ბიეფში გათანაბრდა $W_ფ = 0$, ხოლო ქვედა ბიეფში შეტბორვა არა გვაქვს, $W_{შემ} = 0$.

გარდა წყლის უქმი კარგვისა, ფილტრაცია უარყოფით გავლენას ახდენს როგორც თვით ნაგებობებზე, ისე მათი ფუძეებისა და ნაპირების გრუნტებზე, რაც შეიძლება გახდეს ნაგებობათა ავარიის მიზეზი. ფილტრაციული გაანგარიშების საფუძველზე (განისაზღვრება ფილტრაციის ხარჯი, დაწნევა, სიჩქარე და ა.შ) ისე უნდა შეირჩეს

ნაგებობის ფორმები და ზომები, რომ გამოირიცხოს მისი მდგრადობის პირობის დარღვევა, აგრეთვე ფუძის გრუნტის სუფოზიისა (გამორეცხვის) და ამობურცვის მოვლენები. ფილტრაციის მავნე ზემოქმედებისგან ნაგებობის დაცვის ერთ-ერთ ძირითად ღონისძიებად ითვლება ფილტრაციული ნაკადის მოძრაობის ტრაექტორიის გზის დაგრძელება. ამ ღონისძიებით მცირდება ნაგებობის ფუძეში ფილტრაციული დაწნევის სიდიდე, ფილტრაციის სიჩქარე და შესაბამისად ხარჯი. ნახ-ზე 3.10 მოცემულია არაკლდოვან ფუძეზე აგებული წყალსაშვიანი კაშხლის ელემენტები: 1–2–3–4–5–6– ძირული; 6–7–8–9–10–11 კაშხლის ტანი; 11–12– წყალსაცემი; 13–14– რისბერმა; 2–3–4 და 6–7–8 ვერტიკალური ზღუდეები – ნარანდები. ფილტრაციული ნაკადის ზედა საზღვარს (1,2,...14). მიწისქვეშა ფილტრაციული კონტური ეწოდება, ხოლო წყალსატბორი ნაგებობის იმ ნაწილს (ძირული, კაშხლის ტანი, წყალსაცემი და რისბერმა), რომელზედაც გადაედინება ღია წყლის ნაკადი, ფლუტბეტი ეწოდება.

წყალსაცავში დალექილი ნატანის წნევის ინტენსივობა ფუძეში ტოლია $\mathbf{P_6=\gamma_6 h_6 tg^2(45^0-\varphi/2)}$, შესაბამისად, ნატანის წნევის ძალის ჰორიზონტალური შემდგენი იქნება

$$\mathbf{E_{6.ჯ}=0{,}5\gamma_6 h_6^2\ tg^2(45^0-\varphi/2).} \qquad (3.2)$$

აქ **φ** დალექილი ნატანის შიგა ხახუნის კუთხეა (წყლისათვის **φ=0**, კლდოვანი მასალისათვის **φ=90**^{0}). **γ**$_{ნ}$ – კაშხლის წინ დალექილი ნატანის კუთრი წონა შეტივტივებულ მდგომარეობაში

$$\gamma_{ნ}=(\gamma_2-\gamma)(1-n). \qquad (3.3)$$

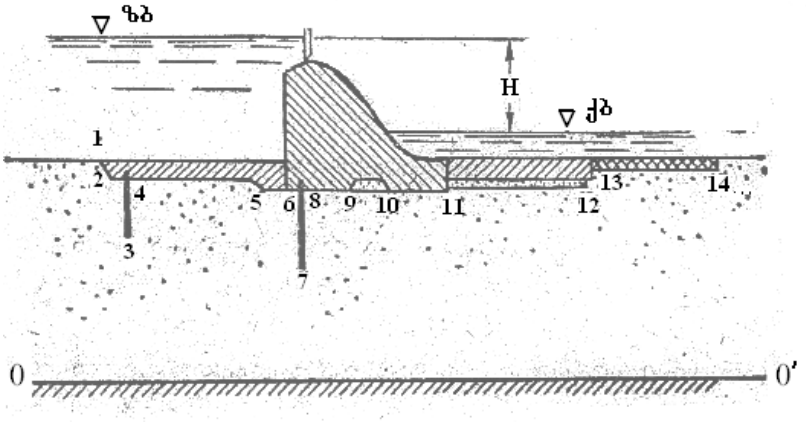
აქ **γ**$_2$ დალექილი ნატანის კუთრი წონაა მშრალ მდგომარეობაში; **n** - დალექილი ნატანის ფორიანობა.

საქართველო მიეკუთვნება სეისმურად აქტიურ რაიონს, ამიტომ ნაგებობების სეისმურ დატვირთვაზე გაანგარიშება უნდა ჩატარდეს მთელი პასუხისმგებლობით. მშენებლობის რაიონში მიწისძვრის ძალა ფასდება სეისმურობით, რომელიც ბალებით გამოისახება და მოცემულია სეისმური დარაიონების რუკებზე. სეისმურობის 12 ბალიანი სისტემის შემთხვევაში, სეისმომედეგობაზე გაიანგარიშება მხოლოდ ის ნაგებობები, რომლებიც განლაგებულია 7,8 და 9 ბალიანი მიწისძვრის რ-ში. სეისმური ძალები განისაზღვრება თანამედროვე დინამიკური თეორიების საფუძველზე. დაპროექტების საწყის ეტაპზე სეისმური ძალის სიდიდე, რომელიც მოდებულია სიმძიმის ცენტრში და შეიძლება ნებისმიერად იქნეს მიმართული (გაანგარიშებისას უნდა შეირჩეს ყველაზე საშიში მიმართულება), განისაზღვრება სტატიკური თეორიის მიახლოებითი ფორმულით

$$P_{ს}=K_{ს}G\ . \qquad (3.4)$$

აქ **G** კაშხლის საკუთარი სიმძიმის ძალაა; $\mathbf{K_{ს}}$ – სეისმურობის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია მშენებლობის რ-ის სეისმურ აქტიურობაზე 7 – ბალიანის შემთხვევაში $\mathbf{K_{ს}=0,025}$, შესაბამისად 8 და 9 ბალიანისას 0,05 და 0,1.

მომზადების პროცესშია ახალი ქართული სამშენებლო ნორმები, რომლებიც ძირითადად ეფუძნება ევრო ნორმებს და რომელშიც სეისმური ზემოქმედების დადგენა ნაგებობებზე მოცემულია თანამედროვე მიღწევების საფუძველზე.



ნახ. 3.10 კაშხლის მიწისქვეშა (ფილტრაციული) კონტური

3.1.4. წყალსაგდებ და წყალმიმღებ ნაგებობათა ტიპები და მათი დაპროექტების საფუძვლები

წყალსაგდებ ნაგებობათა დანიშნულებაა: ა) წყალდიდობის ან სხვა გამოუყენებელი ხარჯების გატარება ქვედა ბიეფში; ბ) წყალსაცავის მთლიანი ან ნაწილობრივი დაცლა; გ) წყლის სასარგებლო გაშვების უზრუნველყოფა. ამ ნაგებობებს აშენებენ კაშხლის აგებამდე, ანდა მასთან ერთად, კაშხლის ტანში ან კაშხლის ტანის გარეთ (ნაპირებში).

სიმაღლეში განთავსების მიხედვით ასხვავებენ ზედაპირულ წყალსაგდებებს, რომლებიც წყალს ატარებს თავისუფალი ზედაპირით, ე.ი. კაშხლის თხემზე ან ღია სანაპირო წყალსაგდებით და სიღრმულ ან ფსკერულ ხვრეტებს. პირველი სახეობის წყალსაგდები ასრულებს მხოლოდ დანიშნულების ა) ფუნქციას, ხოლო მეორე სახეობისა, შეიძლება გამოყენებული იქნეს ყოველგვარი მიზნისათვის. СНиП 2.06.01-86 მ, 1987-ის მიხედვით ჰიდროკვანძის შემადგენლობაში შემავალ სპეციალურ წყალსაშვებ ნაგებობებს, რომლებიც ა) ფუნქციას ასრულებენ, წყალსაგდები ნაგებობები ეწოდება, ხოლო რომლებიც ასრულებენ ბ) ფუნქციას – წყალჩასაშვები ნაგებობები, თუ კი უზრუნველყოფს სასარგებლო გაშვებას წყალსატარ ნაგებობაში (გ) ფუნქცია), წყალგამომშვებ ანუ წყალმიმღებ ნაგებობებს უწოდებენ.

წყალსაგდებ, წყალჩასაშვებ და წყალმიმღებ ნაგებობათა ფუნქციების მკვეთრი გამიჯვნა ყოველთვის გამართლებული არ არის, რადგან ხშირად ჰიდროკვენძებში ერთდროულად სხვადასხვა ფუნქციას ასრულებს.

3.1.4. ა) წყალსაგდები ნაგებობები

წყალსაგდები ნაგებობების ძირითადი დანიშნულებაა საანგარიშო **P%** ალბათობის მაქსიმალური ხარჯის ქვედა ბიეფში უსაფრთხო გატარების უზრუნველყოფა. წყალსაგდების საანგარიშო უზრუნველყოფის პროცენტი განისაზღვრება ნაგებობების კლასის შესაბამისად. წყალსაგდები ნაგებობების ტიპები, რაოდენობა და ხვრეტების ზომები შეირჩევა ძირითადი საანგარიშო შემთხვევების პირობებში. როცა წყალსაცავში შეტბორვის ჰორიზონტი შეესაბამება ნორმალური შეტბორვის დონეს, სრულადაა გაღებული წყალსაგდები ნაგებობების ყველა ხვრეტი, მუშაობს ყველა ტურბინა, ყველა სხვა წყალსაშვები ნაგებობა ფუნქციონირებს ნორმალური საექსპლუატაციო რეჟიმით. საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯის გატარების შესამოწმებელი საანგარიშო შემთხვევა გულისხმობს წყალსაცავში ფორსირებული (მაქსიმალური, კატასტროფული) შეტბორვის დონის არსებობას და ნორმებით გათვალისწინებულ მთელ რიგ სხვა დაშვებებს.

ზოგადად წყალსაგდები ნაგებობები შეიძლება დავყოთ ორ დიდ ჯგუფად: 1. წყალსაგდებები, რომელთაც

აწყობენ კაშხლის ტანში და 2. წყალსაგდებები კაშხლის ტანის გარეთ (სანაპირო).

კაშხლის ტანში მოწყობილ ზედაპირულ წყალსაგდებებს შეიძლება ჰქონდეს სხვადასხვა ფორმის განივკვეთი, რომელთაგან პრაქტიკაში ყველაზე გავრცელებულია მრუდწირული ანუ პრაქტიკული მოხაზულობის პროფილები (ნახ. 3.11), რომლებიც აიგება კრიგერ-ოფიცეროვის ან ნ. როზანოვის ცხრილების მიხედვით იმის გათვალისწინებით, ვაკუუმიანია იგი თუ უვაკუუმო. უვაკუუმო წყალსაშვებზე გადადინება ხდება მშვიდად, ხოლო ვაკუუმიანზე გადადინების დროს ნაგეობობა განიცდის ბიძგებს, დარტყმებსა და ვიბრაციებს; მაგრამ მათი გაზრდილი გამტარუნარიანობის გამო, პრაქტიკაში არცთუ იშვიათად გამოიყენება.

კაშხლის წყალსაგდები ნაწილის გამტარუნარიანობა შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ფორმულით:

$$\mathbf{q=m\sigma\sqrt{2g}H_0^{3/2}}, \qquad (3.5)$$

სადაც **q** არის წყლის კუთრი ხარჯი (წყალსაშვების 1 გძ. მ-ზე $\mathbf{q=\frac{Q}{B}}$); $\mathbf{m=km_{კაშ}}$ - ხარჯის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია წყალსაშვების მოხაზულობასა და ხვრეტთან ნაკადის მისვლის პირობებზე; $\mathbf{m_{კაშ}}$ – წყალსაშვების ხარჯის კოეფიციენტი, როცა გადადინებული ნაკადი გვერდით კუმშვას არ განიცდის;

k – კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს გვერდით კუმშვას და ხვრეტთან ნაკადის მისვლის პირობებს; **σ** - წყალსაშვების დაძირულობის კოეფიციენტი; **B** – წყალსაშვების სიგრძე (ნახ. 3.11,გ)

$\mathbf{H_0 = H + \frac{V_0^2}{2g}}$ - დაწნევა წყალსაშვების თხემთან ნაკადის მოსვლის $\mathbf{V_0}$ სიჩქარის გათვალისწინებით.

თხემის სიმაღლისა და მოხაზულობის შესაბამისად პრაქტიკულპროფილიანი უვაკუუმო წყალსაშვების ხარჯის კოეფიციენტი **m=0,42÷0,49**, ხოლო ფართოზღურბლიანი წყალსაშვისათვის **m=0,32÷0,38**.

წყლის ხარჯი სიფონური (ნახ. 3.2.1დ) წყალსაგდების გამოსავალ კვეთში, რომლის ფართობია ω, გაინსაზღვრება ფორმულით.

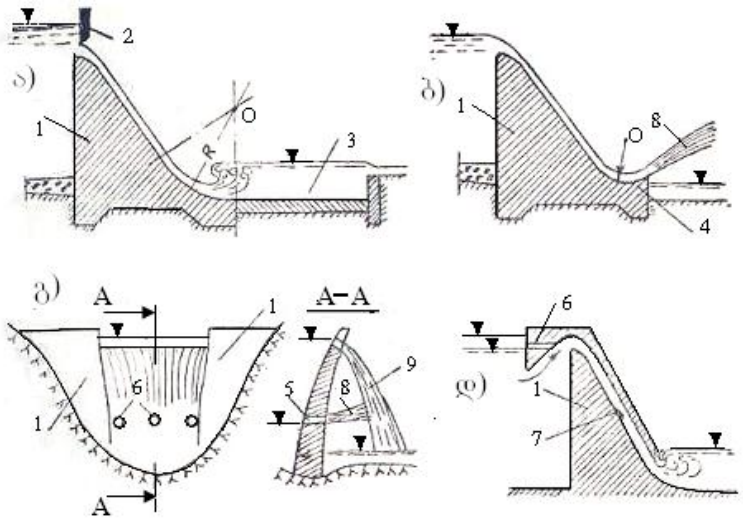
$$\mathbf{Q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}}\ , \qquad (3.6)$$

სადაც **μ** არის ხარჯის კოეფიციენტი, ჩვეულებრივ **μ=0,60÷0,85**.

განსაკუთრებით გართულებულია წყალსაგდები ნაგებობის მოწყობა გრუნტის კაშხლის ტანში, თუმცა ასეთი გამონაკლისებიც არსებობს (ნახ. 3.12).

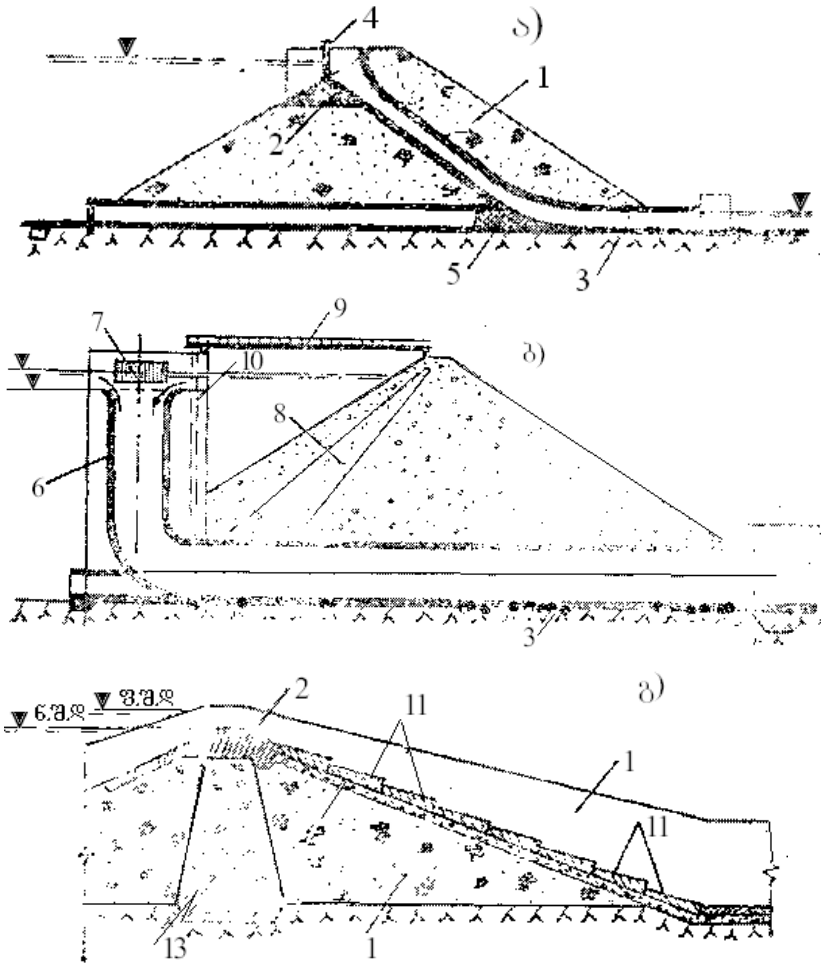
წყალსაგდები ნაგებობის მოწყობა კაშხლის გარეთ (სანაპირო წყალსაგდები) შედარებით ძვირად ღირებული გადაწყვეტაა, ამიტომ იგი განპირობებული უნდა იყოს

სათანადო შეზღუდვებითა და აუცილებელი პირობებით. აღნიშნულიდან გამომდინარე, სანაპირო წყალსაგდები ნაგებობები იშვიათად ეწყობა ჰიდროკვანძში, რომლის შემადგენლობაშია ბეტონის ან რკინაბეტონის მასიური, თუნდაც შემსუბუქებული ტიპის კაშხლები. სანაპირო წყალსაგდებები უფრო ხშირად გამოიყენება გრუნტის კაშხლიან სათავე კვანძების შემადგენლობაში.



ნახ. 3.11 ბეტონის წყალსაგდები კაშხლების ძირითადი სახეები

ა–გრავიტაციული ზედაპირული საკეტით; ბ–გრავიტაციული უსაკეტო; გ–თაღოვანი ზედაპირული წყალსაგდებით; დ–სიფონური; 1–კაშხლის ტანი; 2–საკეტი; 3–ენერგიის ჩამქრობი ჭა; 4–ტრამპლინი; 5–წყალსაშვები; 6–ვაკუუმის შეწყვეტის ხვრელი; 7–ნაშვერი (ცხვირი) წყალნაკადის გასატყორცნად სიფონის ამოქმედებისას



ნახ. 3.12 წყალსაგდებები გრუნტის კაშხლების ტანში

ა– მილისებრი წყალსაგდები ზედაპირული წყალმიმღებით; ბ– მილისებრი წყალსაგდები კოშკური წყალმიმღებით; გ– გრუნტის წყალსაგდები კაშხალი; 1– კაშხლის ტანი; 2– ბეტონის წყალსაშვები ზღურბლი; 3– ფსკერული მილი; 4– საკეტი; 5– ბეტონის საცობი; 6– კოშკი; 7– წრიული საკეტი; 8–გრუნტის ეკრანი; 9– სასამხურო ხიდი; 10– სააერაციო მილი; 11–რკინაბეტონის ფილები; 12–საგები ფენა; 13– გრუნტის გული.

სანაპირო წყალსაგდებების კლასიფიკაცია ძირითადად მისი სათავე, საგდები და გამოსასვლელი ნაწილების კონსტრუქციის, მასალისა და წყლის მოძრაობის რეჟიმის მიხედვით ხორციელდება. 3.13 ნახ-ზე ნაჩვენებია ღია სანაპირო წყალსაგდები გრუნტის კაშხლიან ჰიდროკვანძის შემადგენლობაში, რომლის წყალსაგდები ტრაქტის ნაგებობათა შემადგენლობა, ადგილობრივი პირობების მიხედვით შეიძლება იყოს სხვადასხვა ნახ. 3.14. მთაგორიან პირობებში ხშირად უფრო გამართლებულია გვირაბული წყალსაგდების მოწყობა ნახ. 3.15, რომელსაც სათავე ნაგებობის ტრანშეის ტიპის წყალსაშვის მოწყობის შემთხვევაში, ტრანშეის ტიპის წყალსაგდებსაც უწოდებენ. მაღალდაწნევიან ჰიდროკვანძებში ხშირად გამოიყენება აგრეთვე წყალსაგდებები წრიული (ნახ. 3.16) არასრული წრიული ან ფოთლისებრი წყალსაშვები ძაბრით.

შახტური ტიპის წყალსაგდების გამტარუნარიანობა განისაზღვრება თხემზე დაწნევისა და წყალშემკრები ორმოს დიამეტრის ფარდობით, აგრეთვე წყალსაშვი ძაბრის შეტბორვის ხასიათის მიხედვით.

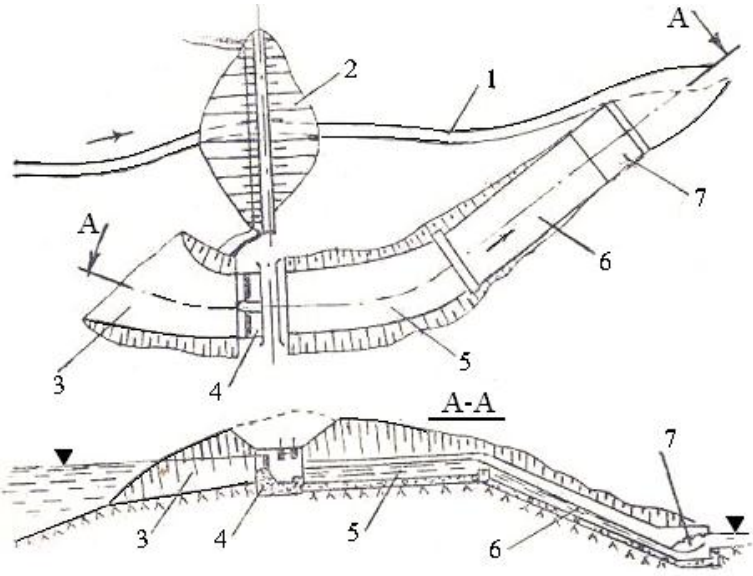
ხშირად, როცა **H/R≤1** და წყალსაშვები ძაბრის შეტბორვას ადგილი არა აქვს, შახტური წყალსაგდების გამტარუნარიანობა ტოლია

$$\mathbf{Q = \varepsilon m(2\pi R - n_0 S)\sqrt{2g}H^{3/2}}, \qquad (3.7)$$

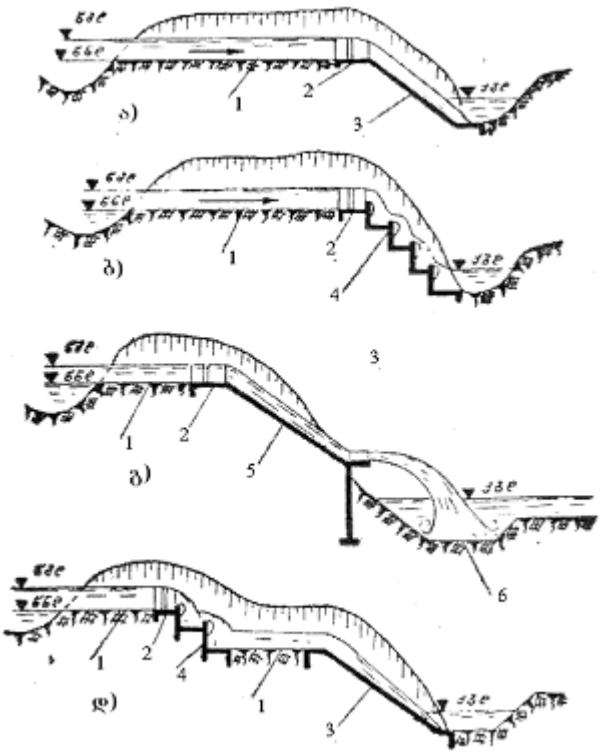
სადაც **m**, **R** და **H** არის შესაბამისად ხარჯის კოეფიციენტი, ძაბრის რადიუსი და დაწნევა მის თხემზე; წრიული მოხაზულობის თხემისა და ძაბრის მქონე წყალსაგდების ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობები მოცემულია სათანადო ცხრილებში.

n_0, **S** და **ε** - შესაბამისად წყალშემკრებ ორმოზე წყლის ხრახნისებრი მოძრაობის საპირისპიროდ მოწყობილი ჭავლმიმმართველი ბურჯების რიცხვი, მათი სიგანე და კუმშვის კოეფიციენტი. ეს უკანასკნელი საშუალოდ 0,9-ს ეტოლება, ხოლო, როდესაც თხემზე ბურჯები არ ეწყობა (ძაბრის ≈20 მ დიამეტრის შემთხვევაში), **ε=1**.

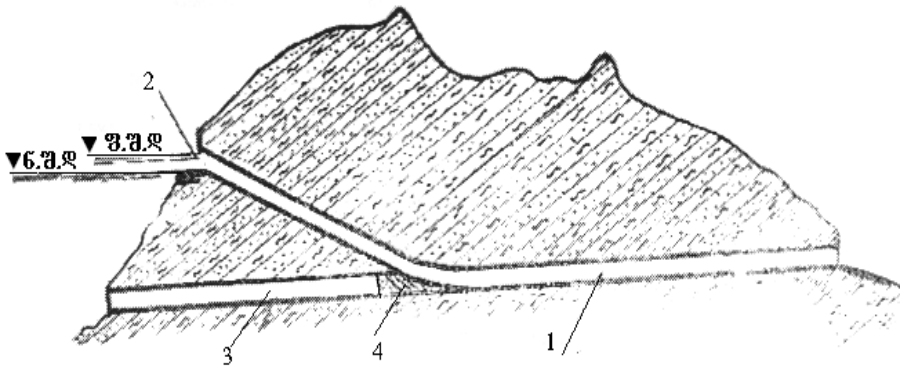
თუ წყალსაშვები ძაბრის მოწყობა ციცაბო ფერდობზე გართულებულია, შესაძლებელია კოშკური გვირაბული წყალსაგდების მოწყობა (ნახ. 3.12, ბ).



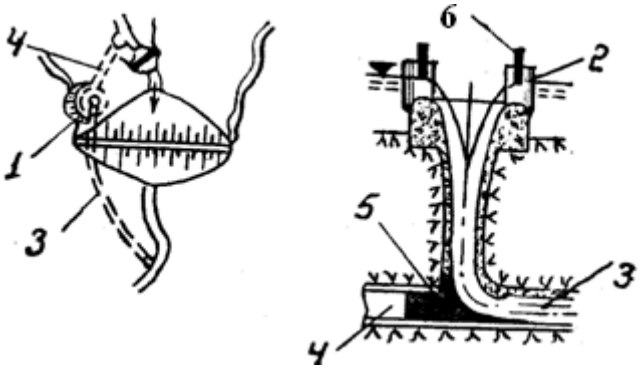
ნახ. 3.13 ღია სანაპირო წყალსაგდები არხი.
1-მდინარის კალაპოტი; 2-გრუნტის კაშხალი; 3-მიმყვანი არხი;
4-წყალსაშვები ზღურბლი; 5-შუალედური არხი; 6- საგდები
ანწილი (სწრაფდენი); 7-ენერგიის ჩაქრობი ჭა



ნახ. 3.14 სანაპირო ღია წყალსაგდების სქემები
ა–არხი სწრაფდენით; ბ–არხი მრავალსაფეხურიანი ვარდნილით; გ–არხი კონსოლური ვარდნილით; დ–არხი ვარდნილითა და სწრაფდენით; 1–არხი; 2– წყალსაშვები ზღურბლი (წყალსაშვები); 3–სწრაფდენი; 4– საფეხურებიანი ვარდნილი; 5–კონსოლური ვარდნილი; 6–გარეცხვის ძაბრი.



ნახ. 3.15 გვირაბული წყალსაგდები ზედაპირული წყალმიმღებით
1–წყალსაგდები გვირაბი; 2–ზედაპირული წყალმიმღები;
3–სამშენებლო გვირაბის ნაწილი; 4–ბეტონის საცობი



ნახ. 3.16. შახტური წყალსაგდები წროილი წყალსაშვებით.
1– წყალსაშვები; 2– წყალმიმმართველი ბურჯები;
3–წყალსაგდები გვირაბი; 4—სამშენებლო გვირაბის ნაწილი;
5–ბეტონის საცობი; 6–საკეტი.

3.1.4. ბ) წყალჩამშვები ნაგებობები

წყალჩასაშვები ნაგებობების ძირითადი დანიშნულებაა წყალსაცავის მთლიანი ან ნაწილობრივი დაცლა, აგრეთვე საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯების ნაწილის გადაგდება ქვედა ბიეფში. წყალჩასაშვებ ნაგებობებს უფრო ხშირად კაშხლის ტანში აწყობენ. ბეტონისა და რკინაბეტონის მაღალ კაშხლებში. წყალჩასაშვებებს, სიღრმული წრიული ხვრეტების სახით, ხშირად აწყობენ იარუსებად (ნახ. 3.11. გ.) წყალჩასაშვების წრიული ხვრეტების დიამეტრი და შესაბამისად მათი რაოდენობა განისაზღვრება ჰიდრავლიკის ცნობილი ფორმულებით.

განსაკუთრებულ შემთხვევაში თავდაცვის მიზნით საჭიროა წყალსაცავის დაცლა, ხშირად მკვდარი შეტბორვის დონემდე, რომელიც, ერთი მხრივ უნდა განხორციელდეს რაც შეიძლება სწრაფად, მაგრამ მეორე მხრივ სწრაფი დაცლა მოითხოვს დიდი დიამეტრის (ან დიდი რაოდენობის) სიღრმული ხვრეტების მოწყობას, რაც, თავის მხრივ, ასუსტებს კაშხლის საერთო სიმტკიცეს და ხვრეტების ირგვლივ იწვევს ძაბვების კონცენტრაციას ანუ საჭიროებს ძლიერ დაარმატურებას. გარდა აღნიშნულისა, წყალსაცავის სწრაფმა დაცლამ შეიძლება გამოიწვიოს წყალსაცავისა და გრუნტის კაშხლის ფერდოების მდგრადობის პირობის დარღვევა (ჩამოცურება): ამიტომ დაცლის დროის შერჩევა მოითხოვს სათანადო

ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტას. დიდი დაწნევების შემთხვევაში, სიღრმულ ხვრეტებში წყლის ნაკადის სიჩქარე ზოგჯერ აჭარბებს ბეტონისათვის დასაშვებ გამრეცხ სიჩქარეს (20÷25 მ/წმ) და ასეთ შემთხვევაში უმჯობესია ხვრეტს გაუკეთდეს ფოლადის მოპირკეთება.

სიღრმული წყალსაგდების (წყალჩასაშვები) სიგრძისა და მუშაობის პირობების მიხედვით მის გამტარუნარიანობას ანგარიშობენ ერთ-ერთი შემდეგი ჰიდრავლიკური სქემის მიხედვით: ა) მილიდან გამოდინება ; ბ) ნაცმიდან გამოდინება; გ) ხვრეტიდან გამოდინება; დ) წყალსაშვებზე გადადინება.

იმ სიღრმული წყალსაგდებების გამტარუნარიანობა, რომლებიც მუშაობენ, როგორც დაწნევითი მილები, განისაზღვრება ფორმულით

$$\mathbf{q=\mu\omega\sqrt{2gz}}\,, \qquad (3.8)$$

სადაც **ω** არის წყალსაგდების გამოსასვლელის საანგარიშო განივკვეთის ფართობი; **μ** - წყალსაგდების ხარჯის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია, როგორც წყალსაგდების კონსტრუქციასა და გაბარიტულ ზომებზე, ისე დაწნევაზე, რომლის მნიშვნელობა გაინსაზღვრება სათანადო ფორმულით ან ცხრილებით; **g**- თავისუფალი ვარდნის აჩქარება; **z** - მოქმედი დაწნევა.

მაგალითი 1

მტრის მოსალოდნელი თავდასხმისას დიდი მატერიალური ზარალისა და ადამიანთა მსხვერპლის თავიდან აცილების მიზნით, საჭიროა ენგურის წყალსაცავის დაცლა მკვდარი შეტბორვის დონემდე; ეს კი უნდა განხორციელდეს 5,0 მ დიამეტრის ხუთი სიღრმული ხვრეტით, რომლის ღერძი ზედა ბიეფის ნორმალური შეტბორვის დონიდან ჩაღრმავებულია 102 მ-ზე; გაინსაზღვროს წყალსაცავის დაცლის დრო თუ მკვდარი შეტბორვის დონეზე წყლის მოცულობაა (სასარგებლო) 676 მლნ მ^3.

ამოხსნა

ერთი წყალსაგდები ხვრეტით დასაცლელი წყლის მოცულობა

$$\mathbf{W=\frac{676\cdot 10^6}{5}=135{,}2}\ \text{მლნ მ}^3$$

წყლის ხარჯი, როცა წყალსაცავში წყლის დონე მაქსიმალურია და მუდმივი, განისაზღვრება 3.8 ფორმულით.

ავიღოთ ხარჯის კოეფიციენტი μ=0,65; z=102 მ;

$$\omega=\frac{\pi D^2}{4}=\frac{3{,}14\cdot 5^2}{4}=19{,}62\ \text{მ}^2,$$

მაშინ $\mathbf{Q=0{,}65\cdot 19{,}62\sqrt{2\cdot 9{,}81\cdot 102}=570{,}5}$ მ^3/წმ, მაშინ 135,2 მლნ. მ^3 წყლის გატარებას დასჭირდება.

$$T_{ფ}=\frac{135{,}2\cdot 10^{6}}{570{,}5}=236985\text{წმ}=65{,}8\ \text{სთ}.$$

რადგან წნევა წყალსაგდების ღერძზე მუდმივი არ არის და იცვლება 102 მ-დან 0-მდე, დრო ცვლადი დაწნევის გათვალისწინებით ორჯერ უნდა გაიზარდოს, ე. ი. $T=2T_{ფ}=131{,}6$ **სთ** $\approx$ **5,5** დღე. ამრიგად წყალსაცავის დასაცლელად სათავე წყალსაცავის შემთხვევაში საჭირო იქნება 5,5 დღე.

3.1.4. ბ). წყალმიმღები ნაგებობები

წყალმიმღებ ნაგებობათა დანიშნულებაა წყლის აღება წყალსატევიდან ან წყალდენიდან (მდინარიდან ან კვების სხვა წყაროდან) და მისი მიწოდება არხებში, ან სხვა წყალსატარებში ამა თუ იმ სამეურნეო მიზნების დასაკმაყოფილებლად.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, წყალმიმღებმა ნაგებობებმა უნდა უზრუნველყოს წყალსამეურნეო სისტემებისადმი წყლის შეუფერხებელი მიწოდება გრაფიკის შესაბამისად, არხების დაცვა მათში ფსკერული ნატანის, თოშის, ყინულისა და ტივტივა სხეულების მოხვედრისაგან; გარდა ამისა, სათავის ნაგებობათა კონსტრუქციები უნდა იყოს მარტივი და ეკონომიკური, ექსპლუატაციისა და ავტომაზიციისათვის მოსახერხებელი; მათ უნდა დააკმაყოფილონ სიმტკიცის, მდგრადობის და სამ-

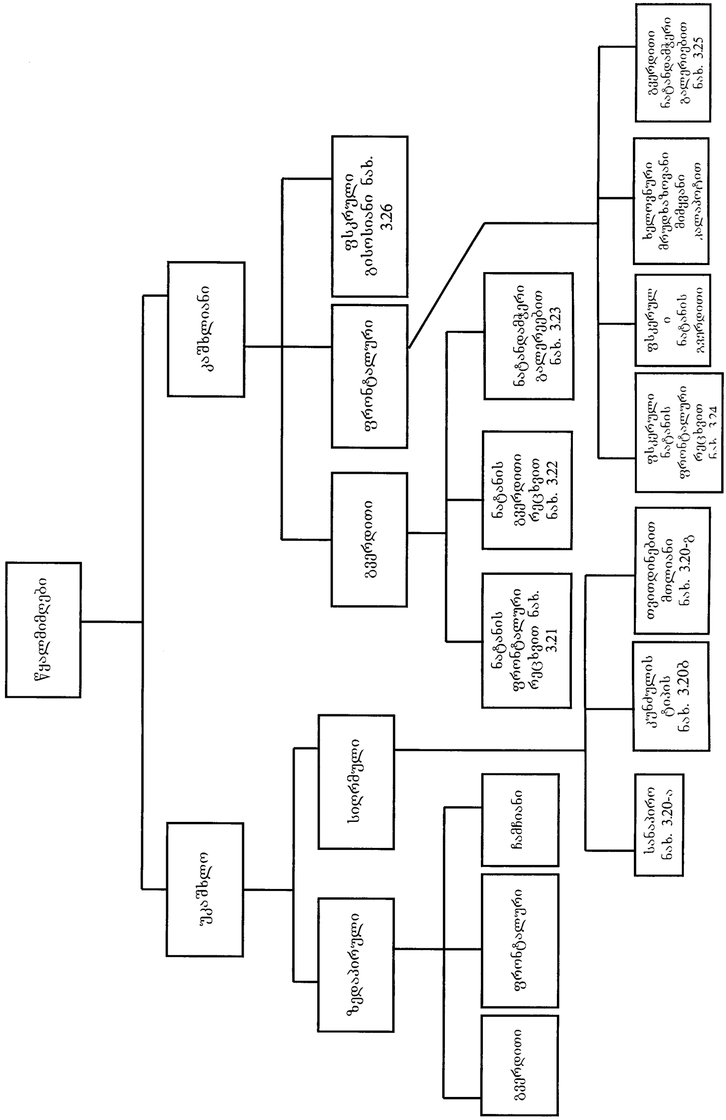
სახურის ხანგრძლივობის ნორმებით განსაზღვრული მოთხოვნილება.

წყალმიმღებისა და წყალმიმღები ნაგებობების კლასიფიკაცია შეიძლება განხორციელდეს სხვადასხვა ნიშნის (მახასიათებლების) მიხედვით.

წყლის აღების პრინციპისა და კონსტრუქციის მიხედვით, წყალმიმღებები შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად: კაშხლიანი წყალმიმღებები ანუ წყალმიმღებები კაშხლიანი ჰიდროკვანძების შემადგენლობაში და უკაშხლო წყალმიმღებები, ანუ წყალმიმღებები უკაშხლო ჰიდროკვანძებში.

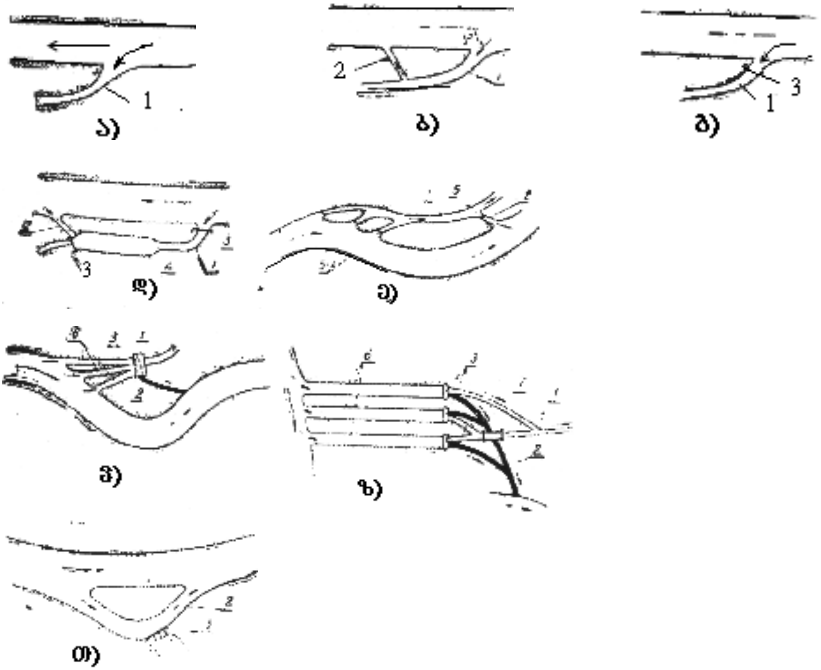
უკაშხლო წყალმიმღებების მოწყობა შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც მდინარის ჩამონადენის ბუნებრივი რეჟიმი და წყლის დონე წლის განმავლობაში საშუალებას იძლევა შეუფერხებლად მივიღოთ წყლის საანგარიშო ხარჯი, რომელიც არ უნდა აჭარბებდეს მდინარის ხარჯის 20÷25%-ს. უკაშხლო წყალმიმღებებში გართულებულია ბრძოლა ნატანთან, თოშთან, ყინულთან, ფერდობების მდგრადობასთან. გართულებულია მდინარეში სხვადასხვა დონის შემთხვევაში საანგარიშო ხარჯის აღება და სხვ.

წყალმიმღების კლასიფიკაცია მოცემულია ნახ-ზე 3.17


წყალმიმღები
უკაშხლო
კაშხლიანი
ზედაპირული
სიღრმული
გვერდითი
ფრონტალური
ფსკრული გისოსიანი ნახ. 3.26
გვერდითი
ფრონტალური
ჩამჩიანი
ნატანის ფრონტალური რეცხვით ნახ. 3.21
ნატანის გვერდითი რეცხვით ნახ. 3.22
ნატანდამჭერი გალერეებით ნახ. 3.23
სანაპირო ნახ. 3.20-ა
კუნძულის ტიპის ნახ. 3.20ბ
თვითდინებით მთლიანი ნახ. 3.20-გ
ფსკერული ნატანის ფრონტალური რეცხვით
ფსკერული ნატანის გვერდითი
ხელოვნური მრუდხაზოვანი მიმყვანი კალაპოტით
გვერდითი ნატანდამჭერი გალერიებით ნახ. 3.25

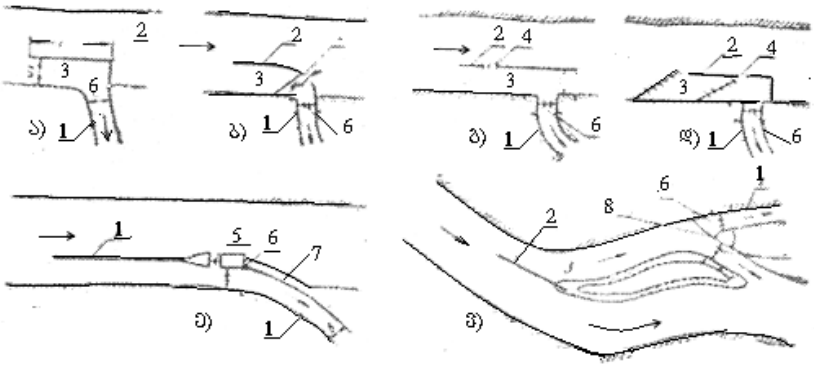
ნახ.3.17

ჩამჩიან, ანუ სათავეში აუზიან (ციცხვიანი) ზედაპირულ და სიღრმულ უკაშხლო წყალმიმღებებს წყალმომარაგებაში ხშირად იყენებენ, შედარებით მცირე ხარჯების ასაღებად.

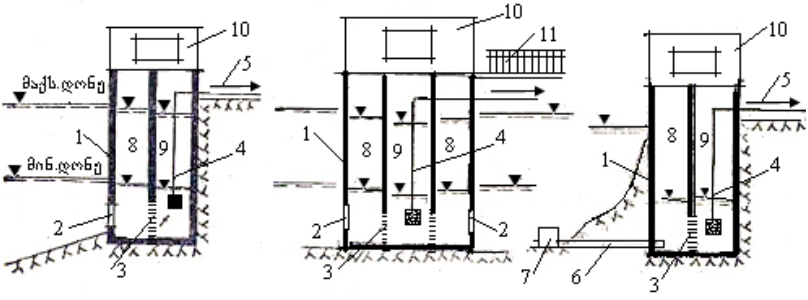


ნახ. 3.18. გვერდითი უკაშხლო ღიაარხიანი წყალმიმღებების ძირითადი სქემები

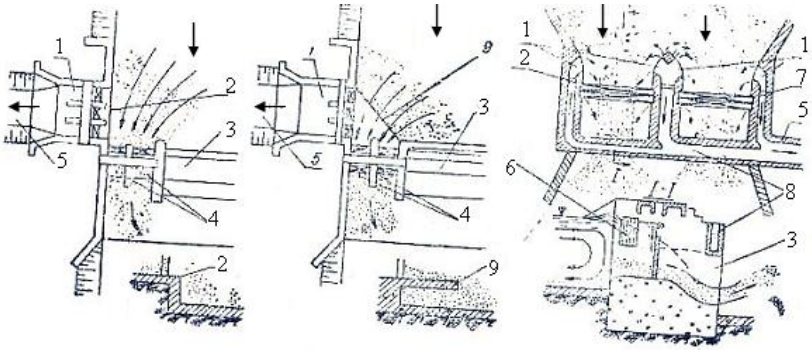
ა და ბ– სათავის ნაგებობის გარეშე; გ– სათავის ნაგებობით; დ– სალექრით და მარეგულირებელი ნაგებობებით; ე– მრავალსათავსიანი, რომლის არხების შესავალთან მოწყობილია ზღუდარები; 3– თხრილ-სალექრებით და ერთი სათავის ნაგებობის მეშვეობით ცენტრალიზებული მართვით; ზ–იგივე, დეცენტრალიზებული მართვით და დიუკერით; თ– ხელოვნური მრუდხაზოვანი მიმყვანი არხით; 1– მაგისტრალური არხი; 2– საგდები არხი; 3– სათავის ნაგებობა; 4– სალექარი; 5– ზღუდარები; 6– თხრილ-სალექრები; 7– დიუკერი; 8– მრუდხაზოვანი მიმყვანი არხი



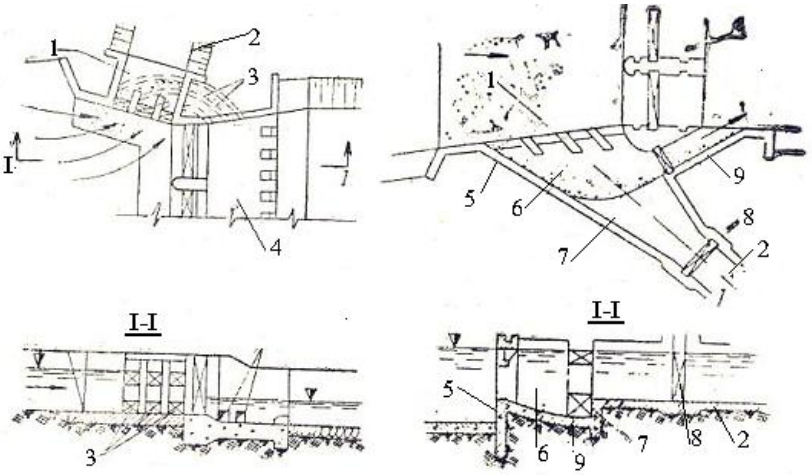
ნახ. 3.19. უკაშხლო ფრონტალური წყალმიმღებების სქემები
ა–სათავის ნაგებობის გარეშე (არასინჟინრო); ბ–გვერდითი სათავის ნაგებობითა და ფსკერული ზღურბლით, რომელიც ნატანს მიმართავს დეზის ფარგლებს გარეთ; გ– გვერდითი სათავის ნაგებობით და დეზის კედელში მოწყობილი გამრეცხი ხვრეტებით; დ–გვერდითი ნაგებობით და ზედაპირული მიმმართველი სისტემებით; ე–ფრონტალური სათავის ნაგებობით და დეზის გრძივ კედელში მოთავსებული გამრეცხი მოწყობილობებით; ვ–მდინარის ტოტზე სათავისა და გამრეცხი ნაგებობით; 1–არხი; 2–დეზი; 3–მიმყვანი კალაპოტი; 4–საგდები; 5–გამრეცხი ნაგებობა; 7– ჯებირი; 8– ფსკერული ზღურბლი.



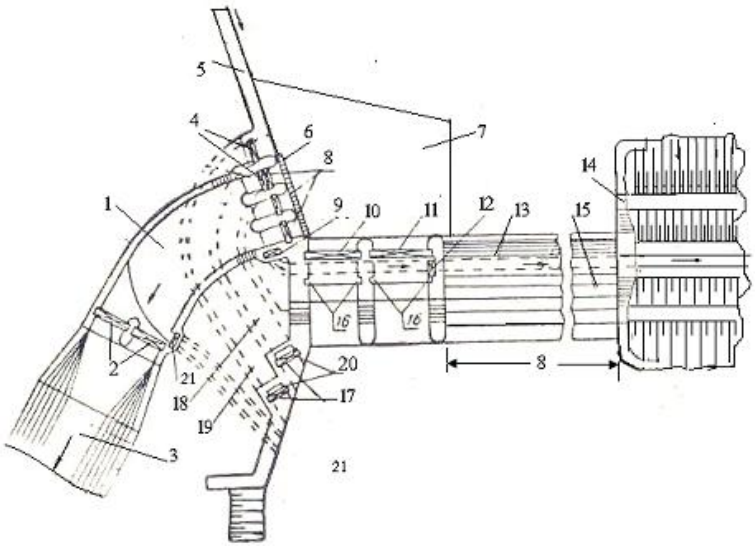
ნახ. 3.20. სიღრმული უკაშხლო წყალმიმღების სახეები.
ა– სანაპირო; ბ– კუნძულის ტიპი; გ– თვითდინებითმილიანი; 1–ჭა; 2–სიღრმული წყალმიმღები ფანჯრები; 3–გისოსი; 4–შემწოვი მილი; 5–ტუმბოსაკენ; 6–თვიდინებითი (წყალმიმღები) მილი; 7– წყალმიმღები მილის სათავსი; 8–წყალმიმღები კამერა; 9–შემწოვი კამერა; 10– სასამსახურო სათავსი; 11–სასამსახურო ხიდი.



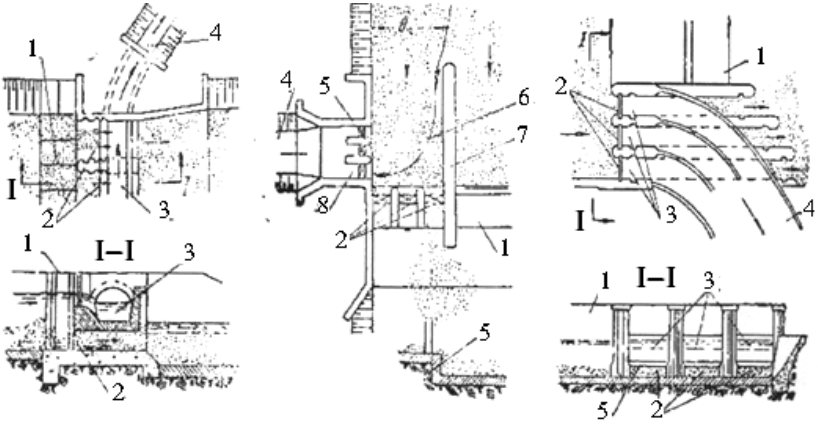
ნახ. 3.21. კაშხლიანი გვერდითი წყალმიმღებები ნატანის ფრონტალური რეცხვით: 1–სათავის ნაგებობა; 2–შესასვლელი ზღურბლი; 3–კაშხალი; 4–გამრეცხი ხვრეტები; 5–არხი; 6–გისოსები; 7–წყალსატარების საკეტები; 8–აკვედუკი; 9–ჰორიზონტალური თარო



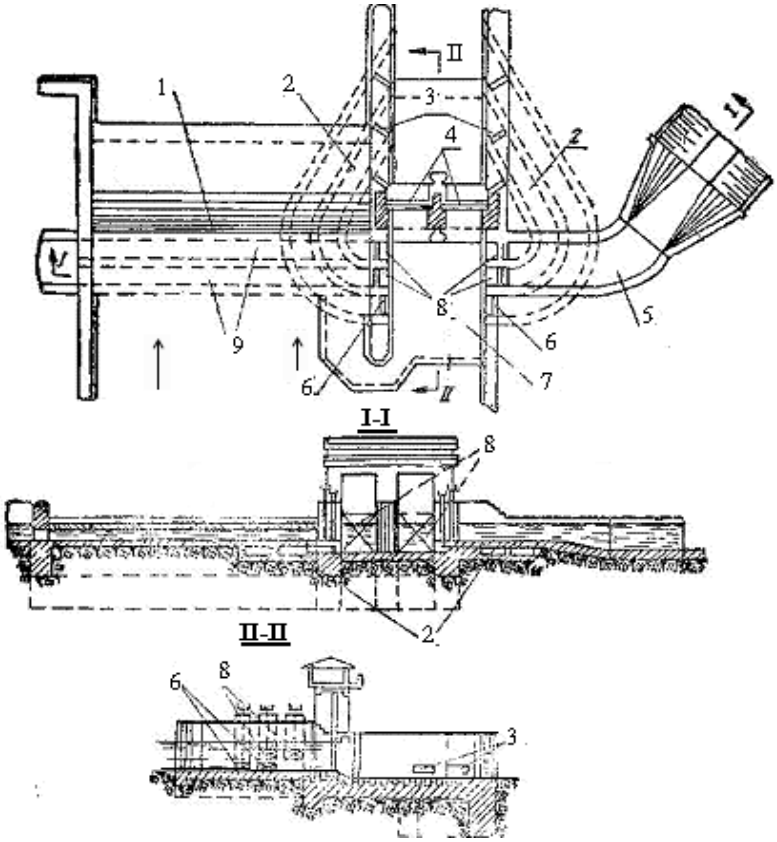
ნახ. 3.22. კაშხლიანი გვერდითი წყალმიმღებები ნატანის გვერდითი რეცხვით:
1–სათავის ნაგებობა; 2–არხი; 3–ფსკერული გამრეცხები; 4–კაშხალი; 5–შესავალი ზღურბლი; 6–ავანკამერა; 7–ავანკამერის ზღურბლი; 8–წყალმიმღების საკეტი; 9–გამრეცხი.



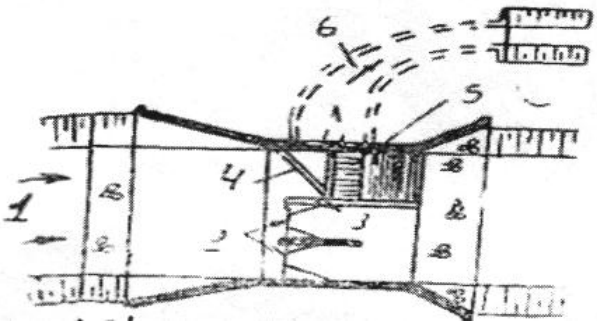
ნახ. 3.23. კაშხლიანი გვერდითი წყალმიმღები ნატანდამჭერი გალერეებით: 1–წყალმიმღები; 2–მაგისტრალური არხის ბრტყელი საკეტები; 3–მაგისტრალური არხი; 4 და 4/–ბრტყელი საკეტები ნდ გალერეების შესავალში; 5–ჭავლმმართველი კედელი; 6–მოსახსნელი გისოსი; 7–ბეტონის ძირული; 8–წყალმიმღების ბრტყელი საკეტები; 9–დიუკერის ბრყელი საკეტი; 10 და 11–კაშხლის გამრეცხი ხვრეტების საკეტები; 12–დიუკერის სარეზერვო საკეტი; 13– დიუკერი; 14– კაშხალის ყრუ ნაწილი; 15– კაშხლის წყალსაშვიანი ნაწილი; 16– საშანდორე კილოები; 17–საკეტები ნდ გალერეების გამოსასვლელში; 18 და 19 ნდ გალერეები; 20– ნდ გალერეების სამზერი ჭები; 21–წყალმიმღების გამრეცხი



ნახ. 3.24. კაშხლიანი ფრონტალური წყალმიმღებების ნატანის ფრონტალური რეცხვით:
ა–ღარიანი წყალმიმღები; ბ–ჯიბიანი წყალმიმღები; გ–ორიარუსიანი (ელსადენის ტიპის) წყალმიმღები ფსკერული გამრეცხი გალერეებით; 1–კაშხალი; 2–გამრეცხი ხვრეტები; 3–რკინაბეტონის ღარი; 4–არხი; 5–შესავალი ზღურბლი; 6–ჯიბე; 7–გამყოფი კედელი; 8–სათავის რეგულატორი



ნახ. 3.25. კაშხლიანი ფრონტალური წყალმიმღები ნატანდამჭერი გალერეებით 1–წყალსაშვიანი კაშხალი; 2–ნატანდამჭერი გალერეები; 3–ნატანდამჭერი გალერეების გამოსავალი ნაწილი; 4–კაშხალის გამრეცხების საკეტები; 5–წყალმიმღები; 6– ნატანდამჭერი გალერეების შესავალი ნაწილები; 7–ჯიბე; 8–წყალმიმღები ხვრეტები; 9–დიუკერი



ნახ. 3.26. სამთო ტიპის წყალმიმღები
1–მიმყვანი კალაპოტი; 2–წყალსაგდები ხვრეტები (მალები);
3–გამრეცხი ხვრეტი; 4–ნატანმიმმართველი ზღურბლი; 5–წყალმიმღები გალერეა ფსკერული გისოსით; 6–წყალსატარი

3.1.5. ზოგადი ცნობები ჰიდროტექნიკურ არხებსა და გვირაბებზე

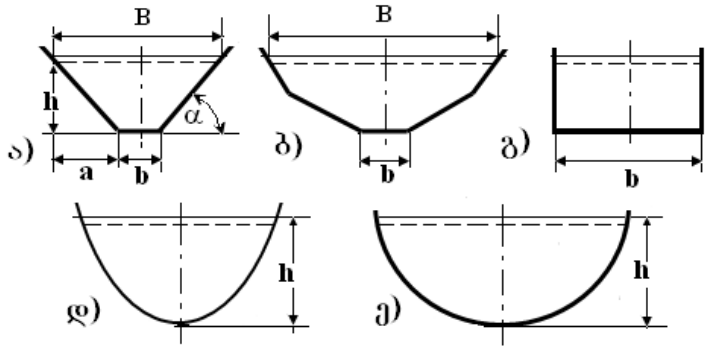
3.1.5.ა არხები და მათზე მოთავსებული ნაგებობები

არხები გრუნტში მოწყობილი უდაწნეო რეჟიმით მომუშავე ხელოვნური კალაპოტებია (წყალსატარი ნაგებობები), რომლებითაც წარმოებს წყლის ხარჯების მიყვანა კვების წყაროდან (მდინარიდან, წყალსაცავიდან, წყალსატევიდან და ა.შ) მომხმარებლამდე (ჰიდროელექტროსადგური, სარწყავი სისტემა, წყალმომარაგების სისტემა და ა.შ) ან ერთი პუნქტიდან მეორეში.

მიზნობრივი დანიშნულების მიხედვით ერთმანეთისაგან ასხავებენ შემდეგი სახის არხებს: ენერგეტიკულს, სანაოსნოს, სარწყავს (ირიგაციულს), გამაწყლოვანებელს,

წყალსადენს, დამშრობს, ხე–ტყის დასაცურებელს, წყალსატარს, კომპლექსურს და ა.შ.

კვების წყაროდან წყლის მიწოდების ხერხის მიხედვით, ერთმანეთისაგან ასხავებენ თვითდინებით ან მექანიკური მიწოდებით (სატუმბი სადგურებით) მომუშავე არხებს. ტოპოგრაფიული პირობების შესაბამისად არხი შეიძლება გადიოდეს მთლიანად ჭრილში, მთლიანად ყრილში ან ნახევრად ჭრილ-ნახევრად ყრილში. რბილ გრუნტებში გამავალი არხები საჭიროებს საკმაოდ დამრეცი ფერდობის მოწყობას, წყლის დინების სიჩქარის შეზღუდვას და ფილტრაციის საწინააღმდეგო ღონისძიებეთა ჩატარებას. არხის განივკვეთის ფორმები, რომელთაც განსაზღვრავს ტრასის საინჟინრო-გეოლოგიური პირობები, მისი სიღრმე, ზომები, მოპირკეთების ტიპი, სამუშაოთა წარმოების ხერხი და დანიშნულება, შეიძლება იყოს ტრაპეციული, პოლიგონური (უფრო ხშირად გამოიყენება სანაოსნოდ), მართკუთხა, პარაბოლური, ნახევარწრიული (ჰიდრავლიკურად ყველაზე ხელსაყრელი) და სხვა უფრო რთული კომბინირებული მოხაზულობის განივკვეთები. პრაქტიკაში უფრო გავრცელებულია ტრაპეციული განივკვეთის არხები (ნახ. 3.27).



ნახ. 3.27. არხებისა და ღარების ცოცხალი კვეთის ფორმები ა–ტრაპეციული; ბ–პოლიგონური; გ–სწორკუთხოვანი; დ–პარაბოლური; ე–ნახევარწრიული.

არხის ფერდობის დახრილობა ხასიათდება ფერდოს **m** კოეფიციენტით; m=ctgα ან $\mathbf{m = \frac{a}{h}}$ (ნახ. 3.27,ა). ფერდოს კოეფიციენტი ინიშნება ფერდოს მდგრადობის უზრუნველყოფის პირობების შესაბამისად: 5 მეტრზე ნაკლები სიღრმის კვეთში გამავალი არხების წინასწარი გაანგარიშებისათვის შეიძლება ვისარგებლოთ 3.1 ცხრილის მონაცემებით.

ცხრილი 3.1

№	გრუნტები	ფერდოს m კოეფიციენტი	
		წყალქვეშ	წყლის ზემოთ
1	გამოუფიტავი კლდოვანი ქანები	0,1. . .0,25	0
2	გამოფიტული კლდოვანი ქანები	0,25. . .0,5	0,25
3	ნახევრად კლდოვანი წყალმედეგი გრუნტი	0,5. . .1,0	0,5

4	კენჭნარი და ქვიშა-ხრეშოვანი გრუნტი	1,25. . .1,5	1,0
5	თიხა, მძიმე და საშუალო თიხნარი	1,0. . .1,5	0,5. . .1,0
6	მსუბუქი თიხნარი, ქვიშნარი	1,25. . .2,0	1,0. . .1,5
7	მსხვილი და საშუალომარცლოვანი ქვიშა	1,25. . .2,25	1,5
8	წვრილმარცლოვანი ქვიშა	1,5. . .2,5	2,0
9	მტვრისებრი ქვიშა	3,0. . .3,5	2,0
10	ტორფი	0,25. . .2,0	-

არხის განივკვეთის გაანგარიშებას საფუძვლად უდევს წყლის თანაბარი მოძრაობის ანუ შეზის ფორმულა, რომლის თანახმად არხის საანგარიშო ხარჯი

$$\mathbf{Q = \omega C\sqrt{Ri}}\,, \tag{3.9}$$

სადაც **ω** არის არხის ცოცხალი კვეთის ფართობი; ტრაპეციული კვეთებისათვის

$$\mathbf{\omega=(b+mh)h;} \tag{3.10}$$

R – ჰიდრავლიკური რადიუსი ტრაპეციული კვეთისათვის

$$\mathbf{R=\frac{\omega}{\chi}=\frac{(b+mh)h}{b+2h\sqrt{1+m^2}}}\,; \tag{3.11}$$

χ - სველი პერიმეტრის სიგრძე;

C – შეზის კოეფიციენტი მანინგის მიხედვით,

$$\mathbf{c=\frac{1}{n}R^{1/6}}. \tag{3.12}$$

აქ **n** არის ხორკლიანობის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა აიღება შესაბამისი ცხრილებიდან; **I** –არხის გრძივი ქანობი.

არხების ფსკერისა და ფერდოების სპეციალური სამოსით მოპირკეთება მიზნად ისახავს რიგი საკითხის ერთდროულ გადაწყვეტას, როგორიცაა არხის დაცვა ტალღების, ყინულის, მცურავი სხეულების მექანიკური ზემოქმედებისაგან; კალაპოტის ზედაპირის ეროზიაზე წინაღობადობის გაუმჯობესება, რაც საშუალებას იძლევა გავზარდოთ სიჩქარეები ანუ არხის გამტარუნარიანობა; არხის სიმქისის და წყლის ფილტრაციული დანკარგების შემცირება და სხვ. აღნიშნულიდან გამომდინარე, არხის სამოსების დაყოფა დამცავ და ფილტრაციის საწინააღმდეგო სამოსებად პირობითია.

ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში არხების მოპირკეთების ყველაზე გავრცელებული სახეა ბეტონი და რკინაბეტონი როგორც მონოლითური, ისე ასაწყობი ფილების სახით. ბეტონით მონოლითური მოპირკეთების ფენის სისქეა 0,06÷0,20 მ, საგების სისქით 0,1÷0,15 მ. ბურცვადი თიხოვანი გრუნტების შემთხვევაში მას ზრდიან 0,3÷0,5 მდე. რკინაბეტონის მონოლითური სამოსი გამოირჩევა ბეტონისაგან ნაკლები სისქით, რომლის დაარმატურება შეადგენს 0,2–0,4%. ასაწყობი რკინაბეტონის ფილების სისქე, როგორც წესი, არ აღემატება 10 სმ-ს. პრაქტიკაში გამოიყენება აგრეთვე არხების მოპირკეთება ქვის მასალისა და პოლიმერული აფსკის სამოსით, რომლის სისქეა

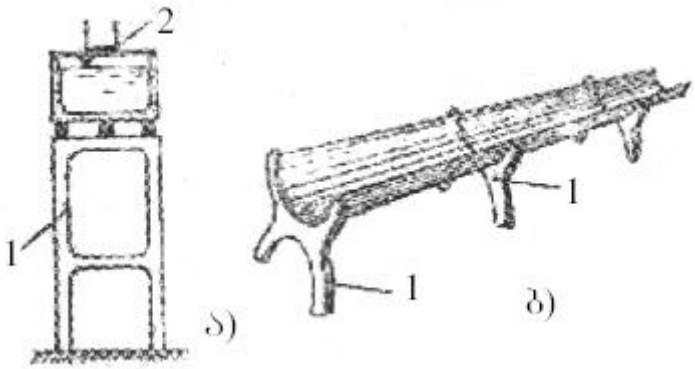
0,2–0,3 მმ, რომელიც ზემოდან დაცულია გრუნტის ფენით არანაკლები 0,5 მ-ისა.

არხის გრძივი პროფილის მკვეთრი გადატეხების და გეოგრაფიული ან ხელოვნური წინააღმდეგობების დასაძლევად, ამასთანავე არხიდან წყლის განაწილება – რეგულირების მიზნით არხზე მოთავსებულია სხვადასხვა სახის წყალსატარი, შემაუღლებელი და მარეგულირებელი ნაგებობები.

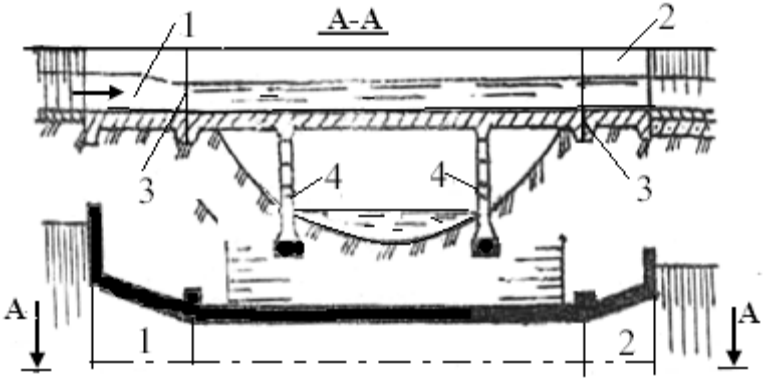
თავის მხრივ, წყალსატარ ნაგებობებს მიეკუთვნება ღარები (ნახ. 3.28), მილსადენები, გვირაბები, გალერეები, აკვედუკები (ნახ. 3.29) და დიუკერები (ნახ. 3.30).

შემაუღლებელ ნაგებობებს მიეკუთვნება სწრაფმდენები და საფეხურიანი ვარდნილები ან მათი კომბინაციები (ნახ. 3.14), სატუმბი სადგურები, გადასასვლელები.

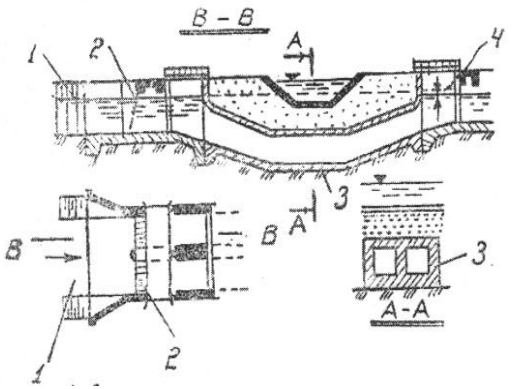
მარეგულირებელ ნაგებობებს მიეკუთვნება შლუზ-რეგულატორები, წყალგამყოფები (ნახ. 3.31), წყალსაგდებები, ღვარცოფსატარები, ღვარსაშვები მილები და სხვ.



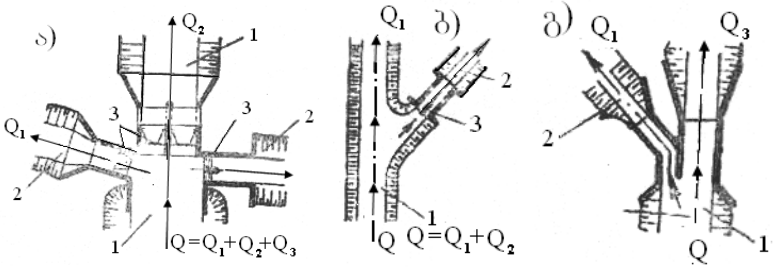
ნახ. 3.28. წყალსატარი ღარის სახეები
ა–რკინაბეტონის ღარი ესტაკადაზე; ბ–პარაბოლური ასაწყობი რკინაბეტონის ღარი; 1–საყრდენები; 2–სასამსახურო ბოგა



ნახ. 3.29. აკვედუკი
1,2–შესასვლელი და გამოსასვლელი ნაწილი;
3–დეფორმაციული ნაკერი; 4–საყრდენები



ნახ. 3.30. დიუკერი
1–არხი; 2–ნაგავდამჭერი გისოსი; 3–რკინაბეტონის მილი;
4–დონეთა სხვაობა



ნახ. 3.31. ხარჯების მარეგულირებელი ნაგებობები არხზე
ა–შლუზ-რეგულატორების სისტემა; ბ–რეგულატორი მხოლოდ
განშტოებაზე; გ–წყალგამყოფი; 1–მაგისტრალური არხი;
2–განშტოებები; 3–რეგულატორები

3.1.5. ბ).ჰიდროტექნიკური გვირაბები

ჰიდროტექნიკურ გვირაბებს უწოდებენ მიწისქვეშა წყალსატარ ნაგებობებს, რომელთა მეშვეობით მომხმარებლისადმი წყლის მიწოდება ხდება უმოკლესი გზით და შესაძლო სწორხაზოვანი ტრასით. მათ იყენებენ მთიან პირობებში ციცაბო და ძლიერ დანაოჭებული რელიეფის დროს, აგრეთვე მაშინ, როდესაც ღია წყალსატარის (არხის) ტრასაზე გვხვდება მაღლობები ან მეწყეროვანი ადგილები, რომელთა შემოვლა გაუმართლებელია ტექნიკურ-ეკონომიკური თვალსაზრისით. გვირაბები გამოიყენება მაშინაც, როდესაც წყალსატარის ტრასა გადის განაშენიანებულ და მჭიდროდ დასახლებულ ადგილებში. გვირაბები წყალსამეურნეო დანიშნულების მიხედვით, შეიძლება იყოს: 1) ენერგეტიკული; 2) ირიგაციული და გამაწყლოვანებელი; 3) წყალსადენი და საკანალიზაციო; 4) სანაოსნო და ხე-ტყის დასაცურებელი; 5) წყალსაგდები; 6) ჰიდროკვანძის მშენებლობის დროს მდინარის წყლის გადამგდები (მოსაშორებელი) და 7) კომპლექსური.

ჰიდრავლიკური რეჟიმის მიხედვით, ჰიდროტექნიკური გვირაბები შეიძლება იყოს სადაწნეო და უდაწნეო.

ღერძის მდებარეობისა და სამთო გამონამუშევრის ხასიათის მიხედვით, ანსხვავებენ: ა) საკუთრივ გვირაბებს, რომელთა ღერძი ჰორიზონტალურია ან ჰორიზონტალურთან ახლო; ბ) შახტებს, როდესაც გამონამუშევრის ღერძი

ვერტიკალურია ან მასთან ახლო; გ) შტოლნებს, რომელსაც გამონამუშევრის განივკვეთი მცირე ზომისაა ან აქვს დამხმარე მნიშვნელობა; დ) შტრეკებს – სასამსახურო დანიშნულების მოკლე გამონამუშავრებს.

გვირაბების ჰიდრავლიკური გაანგარიშება ეფუძნება ჰიდრავლიკის თანაბარი მოძრაობის განტოლებებს, რომელთა საფუძველზე განისაზღვრება გვირაბის განიკვეთის ზომები, ქანობი ან მასში გადენილი წყლის ხარჯი.

დანიშნულების მიხედვით, ჰიდროტექნიკური გვირაბები შეიძლება იყოს ძირითადი, მეორეხარისხოვანი და დროებითი.

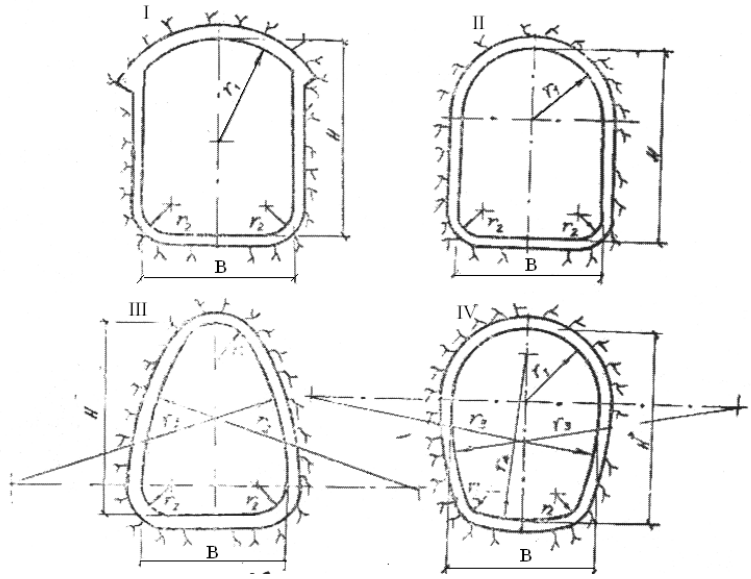
გვირაბის განივკვეთის ფორმა დამოკიდებულია ჰიდრავლიკურ, სტატიკურ და სამშენებლო-საწარმოო პირობებზე. გვირაბის გაყვანის შედეგად იცვლება გამონამუშევრის გარემომცველი ქანების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა. არასაკმაო სიმტკიცის ქანების შემთხვევაში, ამ დეფორმაციებს შეიძლება მოჰყვეს გვირაბის ჭერის ჩამონგრევა და გვერდითი კედლების გამობურცვა. ამ მოვლენის გამოსარიცხად გვირაბის კონტურის ჩაატარებენ მოპირკეთებას, რომელიც უნდა გაანგარიშდეს დეფორმირებადი ქანების წნევაზე ანუ ე.წ. სამთო წნევაზე. იგი უფრო ხშირად ვლინდება გვირაბის ჭერში (თაღში) და აქვს ვერტიკალური მიმართულება. სუსტ არამდგრად ქანებში გვირაბის კედლებზეც წარმოიშობა გვერდითი სამთო წნევები.

სამთო წნევის სიდიდის ზუსტ განსაზღვრას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება გვირაბებისა და სხვა მიწისქვეშა ნაგებობების მოპირკეთებას სწორი დაპროექტებისათვის. დღეისათვის არსებობს სამთო წნევის კვლევის სამი მიმართულება: ანალიზური (მაგალითად მ. პროტოდიაკონოვის ხერხით), ლაბორატორიული და ნატურული კვლევის. ბოლო წლებში, როცა გვირაბის გარემომცველი ქანების გეოლოგიური ჭრილი კარგადაა შესწავლილი, გვირაბის მოპირკეთების გაანგარიშებაში უპირატესობა ენიჭება მის ანგარიშს გარემოცველ გრუნტთან ერთად, სასრულ ან სასაზღვრო ელემენტთა, ან მათი კომბინირებული მეთოდების გამოყენებით.

გვირაბის განივკვეთის ფორმაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სითხის მოძრაობის რეჟიმები, ტრასის საინჟინრო გეოლოგიური პირობები და სამუშაოთა წარმოების ხერხი. მოქმედი სამშენებლო ნორმებით უდაწნეო ჰიდროტექნიკური გვირაბებისათვის რეკომენდებულია შემდეგი ტიპის განივკვეთები (ნახ. 3.32).

უდაწნეო გვირაბებისათვის, გვირაბის წრიული კვეთი იშვიათად გამოიყენება, ხოლო სადაწნეო გვირაბებისათვის, თითქმის ყოველთვის.

გვირაბის მოპირკეთება შეიძლება იყოს მასწორებელი ან მზიდი. ეს უკანასკნელი შეიძლება განხორციელდეს ბეტონის, რკინაბეტონის, ლითონის ან კომბინირებული მასალების გამოყენებით.



ნახ. 3.32. უდაწნეო გვირაბების განივკვეთის ტიპები
I– სწორკუთხა დამრეცი თაღით; II– ვარცლისებრი ნახევარწრიული თაღით; III– შემაღლებული მრუდხაზოვანი კედლებით; IV– ნალისებრი (მრავალცენტრიანი)

II თავი. ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის და მდგრადობის შეფასების ზოგადი პირობები

3.2.1. ძირითადი დებულებები და ცნობები

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების, მათი კონსტრუქციებისა და ცალკეული ელემენტების გაანგარიშება საჭიროა ქვეყანაში მოქმედი ნორმების (სნ 2.06.01-97) შესაბამისად, ზღვრული მდგომარეობის მეთოდით. კერძოდ, გაანგარიშება ტარდება ზღვრული მდგომარეობის ორი ჯგუფის მიხედვით:

პირველი – გაანგარიშებები სისტემის ნაგებობა-ფუძის სიმტკიცეშ და მდგრადობაზე, ფუძეებისა და გრუნტის ნაგებობების საერთო ფილტრაციულ სიმტკიცეზე, ნაგებობების ცალკეული ელემენტებძ , რომელთა დანგრევა იწვევს ნაგებობის ექსპლუატაციის შეწყვეტას სიმტკიცესა და გადაადგილებებზე;

მეორე – გაანგარიშებები ფუძეების ადგილობრივ სიმტკიცეზე; გადაადგილებისა და დეფორმაციების შეზღუდვაზე, ბზარების გაჩენაზე ან სამშენებლო ნაკერების გახსნაზე; ადგილობრივ ფილტრაციულ სიმტკიცეზე ან ნაგებობების ცალკეული ელემენტების სიმტკიცეზე და გაანგარიშებები, რომლებიც არ არის გათვალისწინებული პირველი ჯგუფის ზღვრული მდგომარეობით.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების, მათი ფუძეებისა და ცალკეული კონსტრუქციული ელემენტების გაანგარიშების დროს ზღვრული მდგომარეობის თავიდან აცილების მიზნით, დაცული უნდა იქნეს პირობა

$$\gamma_{1C}F \le \frac{\gamma_C}{\gamma_n}R \qquad (3.13)$$

სადაც γ_{1C} დატვირთვების შეხამების კოეფიციენტი, რომელიც პირველი ჯგუფის ზღვრული მდგრადობით გაანგარიშებისას დატვირთვებისა და ზემოქმედების ძირითადი შეხამებისათვის (ნორმალური ექსპლუატაციის პირობებში) აიღება $\gamma_{1C}=1,0$; იგივე მშენებლობისა და რემონტის პერიოდებისათვის ტოლია 0,98, ხოლო დატვირთვებისა და ზემოქმედების განსაკუთრებული შეხამებისას 0,90; **F** – განზოგადებული საანგარიშო ძალვა (ძალა, მომენტი, ძაბვა), დეფორმაცია ან სხვა პარამეტრი, რომლის მიხედვითაც წარმოებს ზღვრული მდგომარეობის შეფასება; **R** - განზოგადებული საანგარიშო მზიდუნარიანობა, დეფორმაცია ან სხვა დაპროექტების ნორმებით დადგენილი პარამეტრი; γ_C - მუშაობის პირობების კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობები ცალკეულ შემთხვევებში დადგენილია მოქმედი ნორმატიული დოკუმენტაციებით; γ_n - საიმედოობის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა პირველი ჯგუფის ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით გაანგარიშებისას აიღება ნაგებობის კლასის (იხ.

ცხრ. 3.2) (I, II, III, IV კლასის ნაგებობებისათვის შესაბამისად), ხოლო მეორე ჯგუფის ზღვრული მდგომარეობით გაანგარიშებისას – 1,0-ის ტოლი.

ცხრილი 3.2

ძირითადი მუდმივი ჰიდროტექნიკური ნაგებობების კლასი სიმაღლის და ფუძეების გრუნტების ტიპის მიხედვით

№	ნაგებობები	ფუძის გრუნტის ტიპი	ნაგებობების სიმაღლე მ, მათი კლასის მიხედვით			
			I	II	III	IV
1	ადგილობრივი მასალის კაშხლები	A B C	>100 >75 >50	70....100 35...75 25...50	25....70 15...35 15...25	<25 <15 <15
2	ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლები; ჰიდროელექტროსადგურების შენობების წყალქვეშა კონსტრუქციები	A B C	>100 >50 >25	60....100 25...50 20...25	25....60 10...25 10...20	<25 <10 <10
3	საყრდენი კედლები	A B C	>40 >30 >25	25....40 20...30 18...25	15...25 12...20 10...18	<15 <12 <10
4	საზღვაო ნავმისადგომების ძირითადი დანიშნულების ნაგებობები (სატვირთო, სამგზავრო, გემთსარემონტო და ა.შ.	A,B,C	>25	20...25	<20	.....

5	საზღვაო შიგასაპორტო დაცვითი ნაგებობები; პასიური დაცვის სანაპირო გამაგრებები	A,B,C	.....	>15	≤15	.....
6	შემომზღუდავი ნაგებობები (მოლები, ტალღჩამქრობები და ჯებირები)	A,B,C	>25	5...25	<5	.....
7	შელფზე ნავთობისა და გაზის ამომდები სტაციონარული მბურღავი პლატფორმები; ღია ზღვაში ესტაკადები; ხელოვნური კუნძულები	A,B,C	>25	≤25	.....	.....

შენიშვნები 1. გრუნტები: A – კლდოვანი; B – მსხვილმონატეხი და თიხოვანი მყარ და ნახევრადმყარ მდგომარეობაში; C – თიხოვანი, წყალნაჯერი, პლასტიკურ მდგომარეობაში;
2. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სიმაღლის დადგენა და მისი ფუძის შეფასება წარმოებს ცალკეულ სახეობათა ჰიდროტექნიკური ნაგებობებისა და ფუძეების დაპროექტების სამშენებლო ნორმებისა და წესების მიხედვით;
3. მე-4 და მე-6 პოზიციებში ნაგებობის სიმაღლის ნაცვლად მიღებულია სიღრმე ნაგებობასთან, ხოლო მე-7 პოზიციაში – სიღრმე დაყენების ადგილზე.

დატვირთვების ნორმატიული მნიშვნელობა ცალკეულ სახეობათა ნაგებობებისათვის, მათი კონსტრუქციებისა და ფუძეებისათვის განისაზღვრება შესაბამისი სამშენებლო ნორმებისა და წესების მიხედვით, ხოლო დატვირთვის საანგარიშო მნიშვნელობები მათი γ_f საიმედოობის კოეფიციენტზე ნამრავლით.

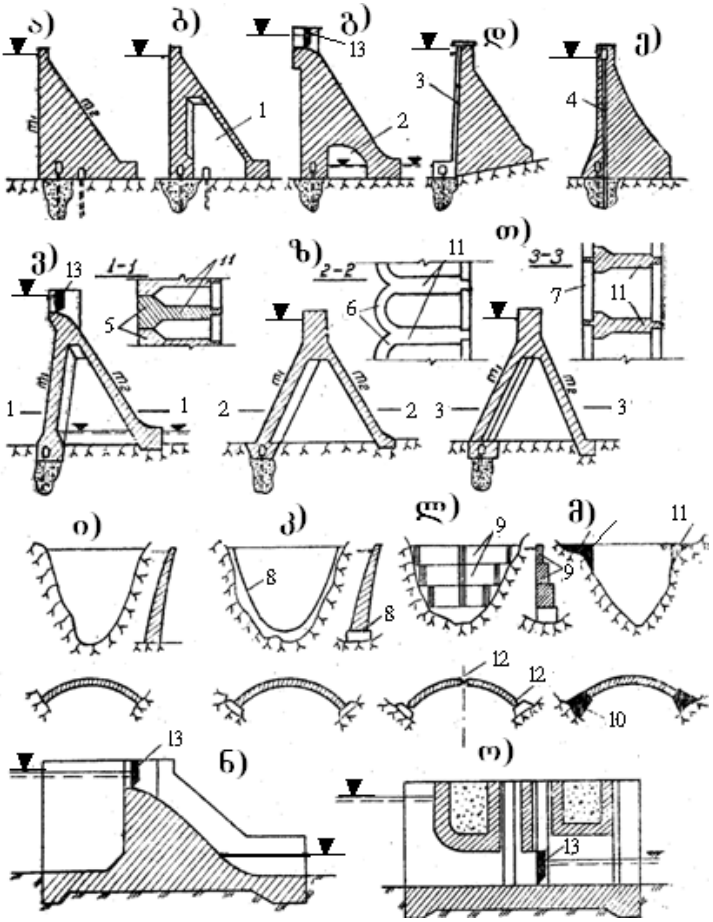
ჰიდროტექნიკური ნაგებობების გაანგარიშება, როგორც წესი, ტარდება დატვირთვებისა და ზემოქმედებების ძირითად და განსაკუთრებულ შეთანწყობაზე, რომელთა გაანგარიშების მეთოდები, ცალკეულ ნაგებობათა ტიპისა და კონსტრუქციის მიხედვით, დადგენილია ნორმებით.

ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლების ძირითადი სახეები СНиП2.06-85-ის მიხედვით მოცემულია ნახ-ზე 3.33.

ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლების სიმაღლე არაკლდოვან გრუნტზე, როგორც წესი არ აღემატება 45-60 მ-ს.

სამშენებლო ნორმებითა და წესებით განსაზღვრულია ჰიდროტექნიკური ბეტონის შემდეგი სახეები:

- სიმტკიცის კლასი კუმშვაზე – B10, B15, B20, B25, B30, B35, B40, B45, B50, B60;
- სიმტკიცის კლასი გაჭიმვაზე – B_t0,8; B_t1,2; B_t1,6; B_t2,4; B_t2,8; B_t3,2;
- მარკა ყინვამედეგობაზე – F15, F25, F50, F75, F100, F150, F200, F300, F400, F500;
- მარკა წყალშეუღწევობაზე – W2, W4, W6, W10, W12.



ნახ .3.33. ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლების ძირითადი სახეები გრავიტაციული: ა– მასიური; ბ–გაფართოებული ნაკერებით (1); გ–გრძივი სიღრუით (2) ძირთან; დ–ეკრანით (3) სადაწნეო წახნაგთან; ე–ფუძეში ჩაანკერებით (4); კონტრფორსული; ვ–მასიური თავებით (5) ანუ მასიურ-კონტრფორსული; ზ–თაღოვანი გადახურვით (6) ანუ მრავალთაღოვანი; თ–ბრტყელი გადახურვით (7); თაღოვანი: ი–ჩამაგრებული ქუსლებით; კ–პერიმეტრული ნაკერით (8); ლ–სამსახსრიანი სარტყლებით (9); მ–გრავიტაციული ბურჯებით (10); ნ,ო–წყალსაგდები კაშხლები არაკლდოვან ფუძეებზე; 11–კონტრფორსები; 12–სახსრები; 13–საკეტები

ციფრები ასოების შემდეგ აღნიშნავს: სიმტკიცის კლასებისათვის – ბეტონის 180 დღიანი სპეციალური ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარს სტატიკურ კუმშვაზე (გაჭიმვაზე), მპა; მარკებისათვის ყინვამედეგობაზე – მონაცვლეობითი გაყინვისა და გალღობის ციკლების რაოდენობას, რომელსაც უძლებს 28 დღიანი ბეტონის წყალგაჯერებული ნიმუში (სიმტკიცის კარგვა არ აღემატება 15%-ს); მარკებისათვის წყალშეუღწევობაზე – წყლის წნევას ატმოსფეროებში, რომელსაც უძლებს 180 დღიანი ბეტონის ნიმუში მასში წყლის გაუჟონვად.

ცალკეული კაშხლისა და მისი ცალკეული ზონებისათვის, როგორც წესი, შეირჩევა შესაბამისი სიმტკიცის, ყინვამედეგობისა და წყალშეუღწევობის ბეტონი.

ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში უფრო მეტად იყენებენ პორტლანდ-ცემენტს (არააგრესიული გარემოსა და წყლის შემთხვევაში). გრავიტაციული და თაღოვან-გრავიტაციული კაშხლების შიგა ზონებისათვის ცემენტის ხარჯია 160-180 კგ/მ^3, ხოლო თაღოვანი (მრავალთაღოვანი) კაშხლებისათვის – 290-325 კგ/მ^3.

3.2.2. ბეტონის გრავიტაციული კაშხლები

გრავიტაციული კაშხალი მასიური წყალშემტბორი ნაგებობაა, რომელიც წინააღმდეგობას უწევს მძვრელ ძალებს ძირითადად საკუთარი წონის მოქმედებით, ფუძეში

წარმოშობილი ხახუნით, ხოლო კლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში, აგრეთვე შეჭიდულების ძალებით.

გრავიტაციული კაშხლების ფართო გავრცელება მსოფლიო კაშხალთმშენებლობაში ძირითადად განაპირობა მათი კონსტრუქციის სიმარტივემ, აგრეთვე იმან, რომ გრავიტაციული კაშხლების მშენებლობა: დიდ მოთხოვნებს არ უყენებს გასწორის ტოპოგრაფიას და ფუძის გეოლოგიას, რომელსაც იგი გადასცემს მასზედ მოსულ დატვირთვებს; საიმედოდ ინარჩუნებს საექსპლუატაციო მოთხოვნებს მკაცრ კლიმატურ პირობებში; იძლევა სამუშაოთა წარმოების თანამედროვე ტექნიკისა და ტექნოლოგიის ფართოდ გამოყენების საშუალებას და სხვ. გრავიტაციული კაშხლების ძირითადი ნაკლია ბეტონის, შესაბამისად, ცემენტის დიდი ხარჯი, კაშხლის ძირში ძაბვების განაწილების მნიშვნელოვანი უთანაბრობა, მასალის (ბეტონის) მექანიკური მახასიათებლების არასრული გამოყენება.

მსოფლიოში ექსპლუატაციაში მყოფი გრავიტაციული კაშხლებიდან ყველაზე მაღალია გრანდ დიკსანსის კაშხალი შვეიცარიაში (284 მ), მნიშვნელოვანი სიმაღლისაა აგრეთვე ბოულდერის (222 მ), გრანდ-კულის (170 მ) და შასტას (180 მ) კაშხლები აშშ-ში. ყოფილ საბჭოთა კავშირში ცნობილი კაშხლებია: ვოლხოვის, დნეპრის, ვოლგის, ბრატსკის, ტოქტოგულის, კრასნოიარსკის და სხვა, რომელთა შორის ყველაზე მაღალია ტოქტოგულის

კაშხალი მდ. ნარინზე (215 მ), საქართველოში კი გუმათის კაშხალი მდ. რიონზე (52,5 მ).

გრავიტაციული კაშხლის ოპტიმალური სიგანე ფუძეში განისაზღვრება მისი იდიალიზებული (თეორიული) მკაცრად სამკუთხა პროფილისათვის, სიმტკიცისა და ფუძის სიბრტყეში ძვრაზე მდგრადობის პირობიდან გამომდინარე. გაანგარიშებისას, როგორც წესი, მხედველობაში მიიღება მხოლოდ ის ძალები, რომლებიც ძირითადად განსაზღვრავს კაშხლის მინიმალურ სიგანეს ფუძეში (ნახ. 3.34).

სიმტკიცის პირობა კრძალავს სადაწნეო წახნაგზე გამჭიმი ძაბვების წარმოშობას სავსე წყალსაცავის შემთხვევაში. გეომეტრიულად ეს ნიშნავს, რომ კაშხალზე მოქმედი ძალთა სისტემის ტოლქმედი არ უნდა გავიდეს საანგარიშო კვეთის გულიდან ანუ ფუძის კვეთის შუა მესამედიდან გარეთ. ფუძის სიგანე მინიმალური იქნება მაშინ, თუ ტოლქმედი მოდებული იქნება კვეთის გულის კიდურა წერტილში ქვედა წახნაგის მხარეს. ამ შეზღუდვით, კაშხლის მინიმალური სიგანე ფუძეში მიიღება სადაწნეო წახნაგის უკუქანობის პირობებში, რაც სამუშაოთა წარმოების თვალსაზრისით მიუღებელია და რამაც შეიძლება დაცლილი წყალსაცავის შემთხვევაში კაშხალს საფრთხე შეუქმნას სიმტკიცის თვალსაზრისით, კერძოდ მის ქვედა წახნაგს, რის გამოც სადაწნეო წახნაგს ვიღებთ ვერტიკალურს, ე.ი. **n=0.**

ამ პირობით თუ კაშხალზე მოქმედ ყველა ძალის სის-

ტემის $\mathbf{W_1 = \frac{1}{2}\gamma h^2}$; $\mathbf{W_ფ = \frac{1}{2}\gamma nbh}$; $\mathbf{G = \frac{1}{2}\gamma_ბ bh}$;

$\mathbf{W_2 = \frac{1}{2}\gamma bh = 0}$ მომენტების ჯამს კვეთის გულის კიდურა (ანუ ტოლქმედის მოდების) წერტილის მიმართ გავუტოლებთ 0-ს, მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ

$$\mathbf{b = \frac{h}{\sqrt{\frac{\gamma_ბ}{\gamma} - \alpha_1}}}. \qquad (3.14)$$

ანალოგიურად თუ ძვრაზე მარაგის კოეფიციენტს წარმოვადგენთ, როგორც შემკავებელი (ვერტიკალური ძალების ალგებრული ჯამი გამრავლებული კაშხალსა და ფუძეს შორის **f** ხახუნის კოეფიციენტზე) და დამძვრელი (ჰიდროსტატიკური წნევის ძალის ძვრის სიბრტყის მიმართულებით $\mathbf{W_1}$ შემდგენი) ძალის ფარდობას, მარტივი გარდაქმნით მივიღებთ

$$\mathbf{b = k_ძ \frac{h}{f(\frac{\gamma_ბ}{\gamma} - \alpha_1)}}. \qquad (3.15)$$

აქ $\gamma_ბ$ და γ არის კაშხლის მასალისა (ბეტონის) და წყლის მოცულობითი წონა; α_1 – ფილტრაციული წნევის შემამცირებელი კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ანტიფილტრაციულ კონსტრუქციულ ღონისძიებებსა და საძირკვლის ფუძის გეოლოგიურ ჭრილ-

ზე. თეორიულად $0 \le \alpha_1 \le 1$; $k_{ძვ}$ – კაშხლის მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტი ძვრაზე, რომლის მინიმალური მნიშვნელობა ნაგებობის კლასისა და ძალთა შეთანწყობის ტიპის მიხედვით, მოცემულია ნორმებში.

სიმტკიცის პირობიდან (3.14) გამომდინარეობს, რომ:

როდესაც $\gamma_ბ/\gamma=2,4$ და $\alpha_1=0,5$, მაშინ $b=0,73h$;

როდესაც $\gamma_ბ/\gamma=2,4$ და $\alpha_1=0$, მაშინ $b=0,65h$.

ძვრის პირობიდან (3.15):

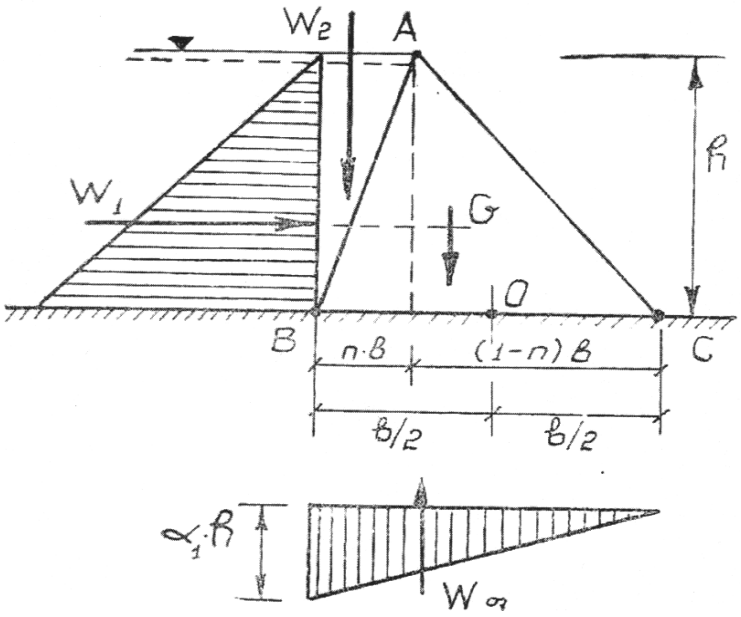
როდესაც $\gamma_ბ/\gamma=2,4$; $f=0,7$; $\alpha_1=0,5$ და $k_{ძვ}=1$ (ზღვრული წონასწორობა), მაშინ $b=0,73h$;

როდესაც $\gamma_ბ/\gamma=2,4$; $f=0,7$; $\alpha_1=0$ და $k_{ძვ}=1$, მაშინ $b=0,65h$.

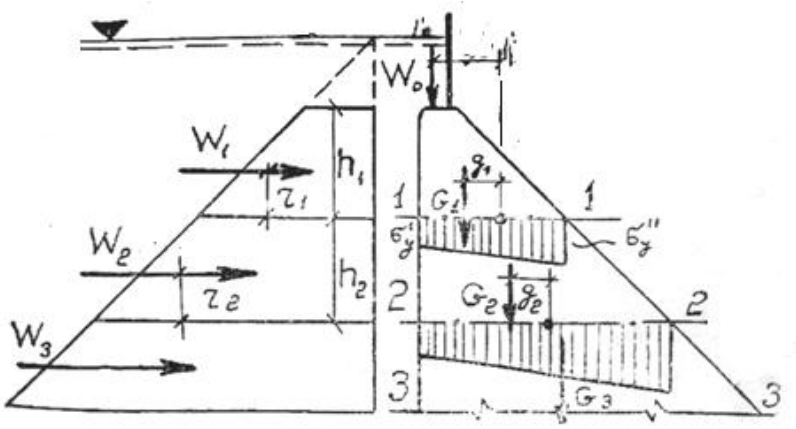
მიღებული ტოლობები ახლოსაა კაშხლის სიგანის იმ მნიშვნელობებთან, რომლებიც მიიღება სიმტკიცის პირობიდან. არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში, როდესაც ხახუნის **f** კოეფიციენტი მნიშვნელოვნად მცირდება (მაგალითად თიხებისათვის $f=0,2\div0,3$), კაშხლის სიგანე ძვრაზე მნიშვნელოვნად იზრდება ანუ კაშხალი გეგმაში იღებს გალასტურ პროფილს. ორივე პირობის (სიმტკიცე, ძვრა) დასაკმაყოფილებლად საჭიროა (3.14) და (3.15) გამოსახულებები ერთობლივად ამოვხსნათ ორი პარამეტ-რის მიმართ (ვთქვათ, α_1 და **b**-ს მიმართ, თუ $n\neq0$, მაშინ **n**–ისა **b**–ს მიმართ).

ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების საერთო სიმტკიცეზე გაანგარიშება სრულდება ძირითადი და განსა-

კუთრებული შეხამების დატვირთვებისა და ზემოქმედების სრული შემადგენლობის შემთხვევაში; დატვირთვათა შემცირებული შემადგენლობა დასაშვებია 60 მ-ზე ნაკლები სიმაღლის კაშხლებისათვის და უფრო მაღალი კაშხალებისათვის დაპროექტების საწყის სტადიებზე.



ნახ. 3.34. კაშხლის სამკუთხა პროფილის საანგარიშო სქემა



ნახ. 3.35. ბეტონის გრავიტაციული კაშხლის სიმტკიცეზე გაანგარიშების სქემა (ვერტიკალური ნორმალური ძაბვების განსაზღვრა)

კაშხლების სიმტკიცის პირობის დასადგენად საჭიროა მისი ტანის დაძაბული მდგომარეობის შესწავლა, რომელიც III – IV კლასის კაშხლებისათვის დაპროექტების ყველა სტადიაზე და I – II კლასის კაშხლებისათვის დაპროექტების საწყის ეტაპებზე, როგორც წესი, წარმოებს სამშენებლო მექანიკის ელემენტარული მეთოდებით; ხოლო დატვირთვათა შემცირებული შემადგენლობის განხილვისას ძაბვები გაიანგარიშება მასალათა გამძლეობის მეთოდებით. ამ მეთოდებით ძაბვები განისაზღვრება კაშხლის საანგარიშო კვეთებში სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგებზე, ხოლო მათ შორის მიღებულია ძაბვების წრფივი განაწილება (ნახ. 3.35).

კაშხლის დაძაბული მდგომარეობის შესასწავლად უფრო სრულყოფილად ითვლება დრეკადობის თეორიის თანამედროვე რიცხვითი მეთოდები (სასრულ სხვაობათა მეთოდი, სასაზღვრო ელემენტთა მეთოდი და სხვ.), რომლებიც სირთულისა და დიდი მოცულობის გამო კურსში არ განიხილება.

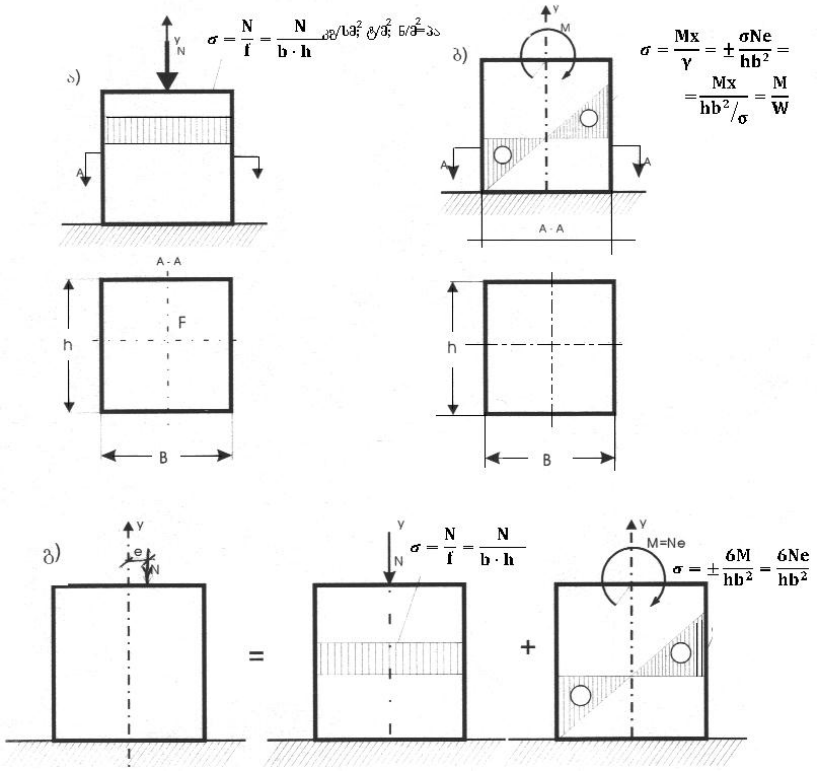
დეფორმირებადი სხეულების სიმტკიცის პირობის სრულფასოვანი შემოწმება, როგორც წესი, ხორციელდება მთავარი ძაბვებით, რომლებიც წინასწარ მოითხოვს ძაბვის კომპონენტების განსაზღვრას.

ექსპლუატაციაში მყოფი გრავიტაციული კაშხლების სიმტკიცის პირობის შემოწმება მისი სუსტი უბნების გამოვლენის მიზნით, შეიძლება მიახლოებით შეფასდეს ვერტიკალური ნორმალური ძაბვებით. σ ძაბვა ზოგადად, ფართობის ერთეულზე მოსული ძალის სიდიდით განისაზღვრება.

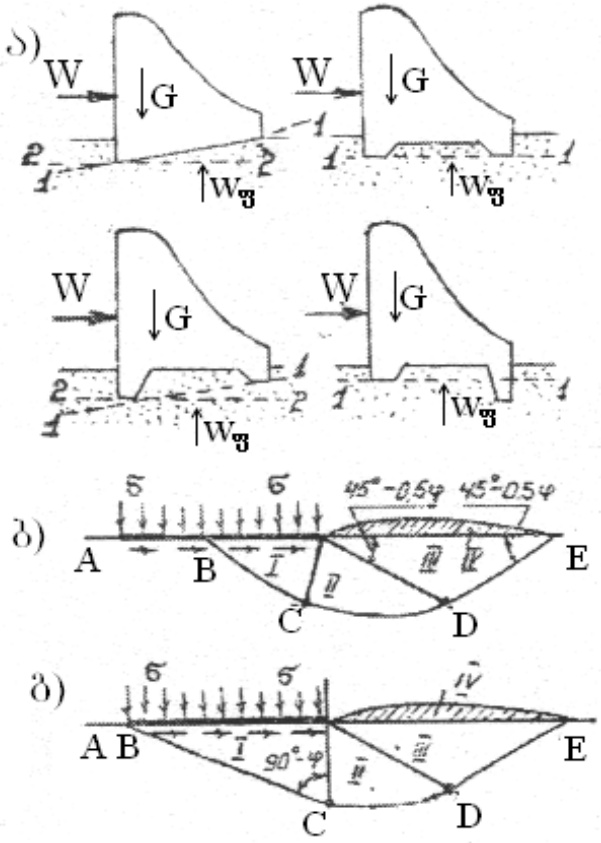
მისი განსაზღვრის შესაბამისი ეპიურები სხვადასხვა სახის მარტივი (კუმშვა ან ღუნვა) და რთული (კუმშვა-ღუნვა) დეფორმციის დროს ნაჩვენებია ნახ-ზე 3.36.

ამ ნახაზის მიხედვით ნორმალური ძაბვები ($\sigma=\sigma_y$) გრავიტაციული კაშხლის ჰორიზონტალური კვეთების განაპირა წერტილებში, ანუ, რაც იგივეა, სადაწნეო **σ'** და უდაწნეო **σ''** წახნაგებზე გაიანგარიშება ცნობილი არა-

თანაბარი კუმშვის ფორმულით, რომლის დროსაც ადგილი აქვს ერთდროულად როგორც კუმშვას, ისე ღუნვას.

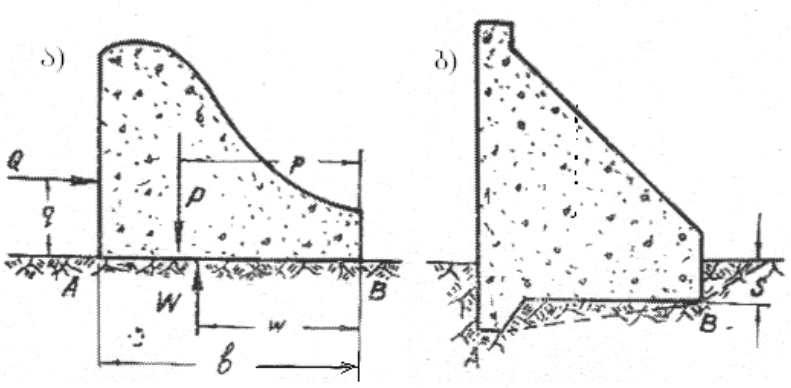


ნახ. 3.36. $\sigma_y = \sigma$ ძაბვების განსაზღვრა ძელში კუმშვის (ა), ღუნვის (ბ) და არათანაბარი კუმშვის დროს (გ)



ნახ. 3.37. ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების ძვრაზე მდგრადობის საანგარიშო სქემები

ა–ბრტყელი ძვრის სქემები კაშხლის მიწისქვეშა კონტურის სხვადასხვა მოხაზულობის შემთხვევაში; ბ–შერეული ძვრის სქემა; გ–სიღრმული ძვრის სქემა; 1–1 და 2–2ბრტყელი ძვრის საანგარიშო სიბრტყეები; I–აქტიური დაძაბულობის მდგომარეობის ზონა; II–რადიალური ძვრების ზონა; III–პასიური დაძაბულობის მდგომარეობის ზონა; IV–ამობურცვის ზონა



ნახ. 3.38. კაშხალების ძვრაზე მდგრადობის საანგარიშო სქემები
ა–ფუძეში ჩაუმაგრებელი კაშხალი ჰორიზონტალური ძირით;
ბ–ფუძეში ჩამაგრებული კაშხალი კბილით

ამრიგად,

$$\sigma^{I;II}=N/F\pm Mx/I_y. \qquad (3.16)$$

როდესაც სიმძიმის ცენტრი მოთავსებულია საანგარიშო კვეთის შუაში **x=b/2**, მაშინ

$$\sigma^{I;II}=N/F\pm M/W \quad \text{ანუ} \quad \sigma^{I;II}=N/hb\pm 6M/hb^2. \qquad (3.17)$$

თუ განვიხილავთ ერთეული სიგრძის გრავიტაციულ კაშხალს (**h=1**) და გავითვალისწინებთ, რომ **M=Ne**, მივიღებთ

$$\sigma^{I;II}=N/b(1\pm 6e/b) \quad ტ/მ^2; \text{ მპა}.$$

სავსე წყალსაცავის შემთხვევაში საშიშია კაშხალზე მოქმედმა ძალთა სისტემამ არ გამოიწვიოს სადაწნეო წახნაგის გაჭიმვა, ან უდაწნეო წახნაგზე მკუმშავმა

ძაბვებმა არ დაარღვიოს ზღვრული მდგომარეობის (3.13) უტოლობა. დაცლილი წყალსაცავის შემთხვევაში პირიქით, მოსალოდნელია უდაწნეო წახნაგის გაჭიმვა და საწნეო წახნაგის დასაშვებზე მეტი მნიშვნელობით შეკუმშვა. ეს პირობები შეიძლება მარტივად გამოისახოს აგრეთვე დასაშვები ძაბვების საშუალებით:

ა) სავსე წყალსაცავის შემთხვევა

$$\sigma' = N/b(1-6e/b) \geq 0; \quad \sigma'' = N/b(1+6e/b) \leq [\sigma]$$

ბ) დაცლილი წყალსაცავის შემთხვევა

$$\sigma' = N/b(1-6e/b) \leq [\sigma]; \quad \sigma'' = N/b(1+6e/b) \geq 0. \qquad (3.18)$$

გარდა სიმტკიცისა, კაშხალი უნდა აკმაყოფილებდეს მდგრადობის პირობებსაც, ანუ უნდა ჰქონდეს მდგრადობის გარკვეული მარაგი გარე ძალთა არახელსაყრელი მოქმედების შემთხვევაში.

ნაგებობის, ნაგებობა-ფუძის სისტემისა და ფერდობების მდგრადობის უზრუნველყოფის კრიტერიუმია ზღვრული მდგომარეობის ზოგადი პირობა (3.13) СНиП 2.02.02-84.

გრავიტაციული კაშხლების შემოწმება მდგრადობაზე არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში გულისხმობს ძვრის სამ საანგარიშო შემთხვევას (ნახ. 3.37):

ბრტყელი ძვრა, რომელიც წარმოებს უშუალოდ ნაგებობის დაყრდნობის ზედაპირის გასწვრივ; შერეული ძვრა, როცა ძირის ნაწილზე ხდება ბრტყელი ძვრა, ხოლო დანარჩენ ნაწილზე – ფუძის გრუნტის ამობურცვა;

სიღრმული ძვრა, რომლის დროს ფუძის გრუნტი ამოიბურცება მთელი საძირკვლის ქვეშ.

გრავიტაციული კაშხლის შემოწმება ტარდება მხოლოდ ბრტყელი ძვრის სქემით, როდესაც ფუძეები აგებულია ქვიშოვანი, მსხვილმარცლოვანი, ან მაგარი (ნახევრად მაგარი) მტვერისებრ-თიხოვანი გრუნტებისაგან.

კლდოვან ფუძეზე კაშხლის ძვრაზე მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტი შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით

$$\mathbf{K}_{ძვ} = \frac{\mathbf{f(P-W)+CF}}{\mathbf{Q}}, \qquad (3.19)$$

სადაც **C** და **f** შესაბამისად კუთრი შეჭიდულობისა და ხახუნის კოეფიციენტებია იხ. ცხრ. 3.3.

ცხრილი 3.3

f და **C** საანგარიშო მნიშვნელობანი СН123-60 მიხედვით

ფუძის ქანობის დახასიათება	f	c ტ/მ^3
კლდოვანი ქანები (გრანიტები, სიენიტები, ქვიშაქვები და სხვ.), პრაქტიკულად გამოუფიტავი, ძლიერ სუსტი ბზაროვნობით, 400 კგ/სმ^2-ზე მეტი დროებითი წინაღობით	0,75	40
კლდოვანი ქანები, პრაქტიკულად გამოუფიტავი, სუსტი ბზაროვნობით, 400 კგ/სმ^2 მეტი-ზე დროებითი წინაღობით	0,7	30
კლდოვანი ქანები, საშუალო ბზაროვნობით, სუსტად გამოფიტული, დროებითი წინაღობა კუმშვაზე <400 კგ/სმ^2	0,65	20

$\mathbf{K_{ძვ}}$ სიდიდე აღებულ უნდა იქნეს ნაგებობის კლასისა და ძალურ ზემოქმედების მიხედვით; ძალთა ძირითადი შეხამების შემთხვევაში I, II და III კლასის ნაგებობისათვის რეკომენდებულია $K_{ძვ}$ აღებული იქნეს შესაბამისად 1,3; 1,2 და 1,15 ხოლო განსაკუთრებული შეხამების შემთხვევაში, შესაბამისად – 1,15; 1,1 და 1,05.

როდესაც კაშხალს აქვს კბილი, მაშინ მისი წინაღობა იზრდება ჭრაზე კბილის წინაღობის $\mathbf{C_{კბ}}$ სიდიდით (ნახ. 3.38. ბ)

$$\mathbf{K_{ძვ}} = \frac{\mathbf{f(P-W)+CF+C_{კბ}}}{\mathbf{Q}}. \qquad (3.20)$$

არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში, როდესაც ძვრის სიბრტყე ჰორიზონტალურია

$$\mathbf{K_{ძვ}} = \frac{\mathbf{(p-W)tg\varphi+E_S+CF}}{\mathbf{(T_1+E_1)-(T_2+E_2)}}. \qquad (3.21)$$

დახრილი ძვრის სიბრტყის შემთხვევაში საჭიროა მოქმედი ძალები დაგეგმილდეს ძვრისა და მის მართობულ სიბრტყეებში.

(3.21) ფორმულაში **P** არის ვერტიკალური ძალების ჯამი საანგარიშო სიბრტყეში; **W** - ფილტრაციული წყლის ჯამური უკუწნევა; **F** - ნაგებობის ძირის ჰორიზონტალური პროექციის ფართობი; **C** - კუთრი შეჭიდულობა ნაგებობასა და ფუძეს შორის; $\mathbf{E_ვ}$ - გრუნტის პასიური უკუწნევა ქვედა ბიეფიდან; $\mathbf{T_1}$, $\mathbf{T_2}$ - ჰორიზონტალური

წნევები ზედა და ქვედა ბიეფიდან; $\mathbf{E_1}$, $\mathbf{E_2}$ - გრუნტის აქტიური წნევა ზედა და ქვედა ბიეფიდან; **β** - ძვრის სიბრტყის დახრის კუთხე ჰორიზონტთან; **φ** - გრუნტის შიგა ხახუნის კუთხე.

3.2.3. თაღოვანი კაშხლები

გეგმაში თაღოვანი კაშხალი წარმოადგენს მრუდწირული მოხაზულობის წყალშემტბორავ სივრცით კონსტრუქციას, რომელიც მუშაობს, როგორც გუმბათი ან გარსი და მასზე მოსულ დატვირთვებს გადასცემს ხეობის ფერდობებს (ნახ. 3.39). თაღოვანი კაშხლის მოყვანილობის კოეფიციენტი ახასიათებს კაშხლის ფარდობით სისქეს და ტოლია

$$\mathbf{n=b/H.} \qquad (3.22)$$

მოყვანილობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ხეობის კვეთის ფორმასა და გასწორის კოეფიციენტზე

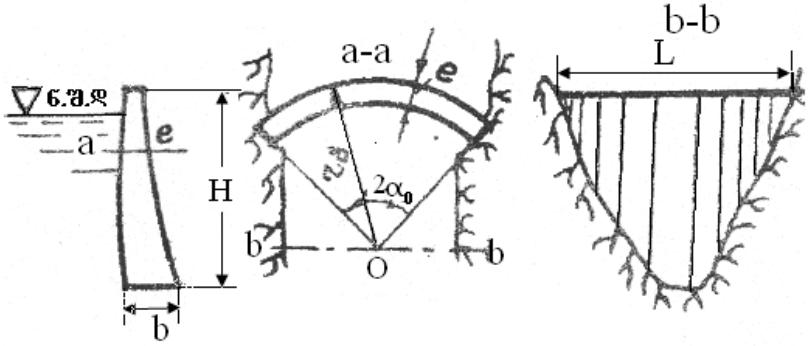
$$\mathbf{n=L/H}, \qquad (3.23)$$

სადაც **b** კაშხლის სისქეა ფუძეში; **H** -კაშხლის მაქსიმალური სიმაღლე, **L** - გასწორის სიგანეა კაშხლის თხემის სიმაღლეზე. **K** და **n** კოეფიციენტებს შორის დამოკიდებულების მრუდები ნაჩვენებია ნახ-ზე 3.40, რომელთა გამოყენებით შეიძლება დაინიშნოს კაშხლის ფუძის სიგანის მიახლოებითი მნიშვნელობა.

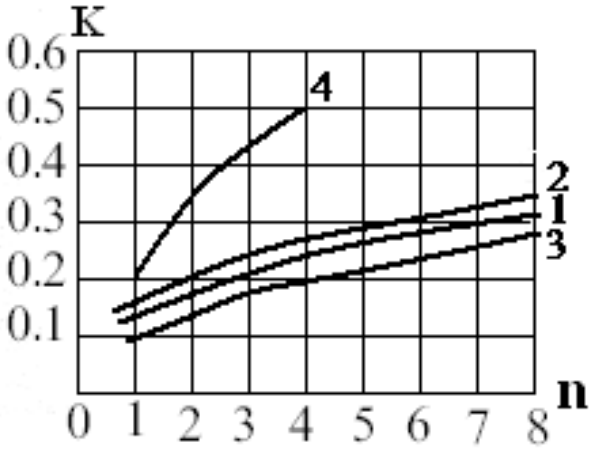
თაღოვანი კაშხლის კლასიფიკაცია წარმოებს სხვადასხვა ნიშნის მიხედვით (იხ. ნახ. 3.41)

თაღოვან კაშხლებში ბეტონის მოცულობა 1,5-5-ჯერ მცირეა, ვიდრე იმავე სიმაღლის გრავიტაციულში. ფულადი ხარჯების ეკონომია რამდენადმე მცირეა, რადგან თაღოვანი კაშხლის ბეტონი 15÷20%-ით ძვირია, ვიდრე გრავიტაციულის, რამაც განაპირობა თაღოვანი კაშხლების ფართო გავრცელება მსოფლიო კაშხალთმშენებლობაში.

ამჟამად მსოფლიოში აშენებულია, შენდება ან დაპროექტების სტადიაშია 75 მ-ზე მაღალი 850 სხვადასხვა კონსტრუქციის კაშხალი, რომელთა შორის ყოველი მესამე თაღოვანია (ცხრ. 3.4).



ნახ. 3.39. თაღოვანი კაშხლის სქემა



ნახ. 3.40. აშენებული კაშხლების მოცვანილობასა და გასწორის კოეფიციენტებს შორის დამოკიდებულების გრაფიკები: 1–საშუალო ყველა თანამედროვე კაშხლისათვის; 2–80მ-ზე მაღალი კაშხლებისათვის; 3 – 80 მ-მდე სიმაღლის კაშხლებისათვის; 4– ა. სტუკის მიერ რეკომენდებული

ცხრილი 3.4

75 მ-ზე მაღალი კაშხლების რაოდენობრივი განაწილება კონსტრუქციის მიხედვით

კონსტრუქცია	მაღალი კაშხლების რაოდენობა			
	სულ	აშენებული	მშენებარე	დაპროექტების სტადიაში
გრავიტაციული	294	170	40	84
თაღოვანი	202	130	40	32
ქვანაყარი	95	46	14	35
მიწის	73	27	12	34

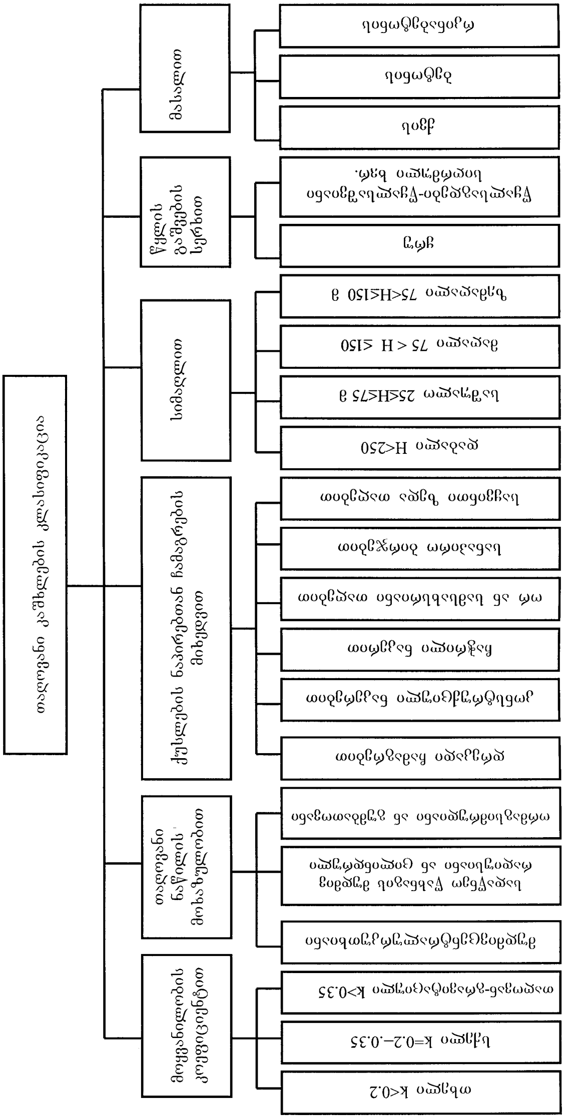
კონტრფორსული	62	36	11	15
თაღოვან-გრავიტაციული	55	42	8	5
შერეული ტიპის	25	14	6	5
პროექტები ტიპის მიუთითებლად	44	44	-	44
სულ	850	465	131	254

ექსპლუატაციაში მყოფი და მშენებარე მაღალი (H>75მ) ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლების საერთო რაოდენობით მსოფლიოში პირველ ადგილზეა აშშ (110 კაშხალი), მეორეზე – იტალია (93 კაშხალი), ხოლო მესამეზე – საფრანგეთი (52 კაშხალი), ყოფილ საბჭოთა კავშირში აშენებულია ასეთი ტიპის სულ 15 კაშხალი.

ბოლო 30 წლის განმავლობაში გრავიტაციული კაშხლების წილი მსოფლიო კაშხალთმშენებლობაში შემცირდა 35-დან 20%-მდე.

1950 წლამდე მსოფლიოში აშენებული მაღალი თაღოვანი კაშხლების 50% მოდიოდა აშშ-ზე. ბოლო 30 წელიწადში სურათი მკვეთრად შეიცვალა. დაპროექტებული და აშენებული თაღოვანი კაშხლების 56% მოდის ევროპის განვითარებულ ქვეყნებზე. გამონაკლისია იაპონია, რომელმაც ბოლო წლებში დიდ წარმატებებს მიაღწია თაღოვანი კაშხლების მშენებლობაში, სადაც ამჟამად 55 მაღალი კაშხლიდან 25 თაღოვანია.

ამჟამად მსოფლიოში ყველაზე მაღალი (271,5 მ) თაღოვანი კაშხალია მდ. ენგურზე საქართველოში.



თაღოვანი კაშხლების კლასიფიკაცია
მოყვანილობის კოეფიციენტით
თხელი k<0.2
სქელი k=0.2–.0.35
თაღოვან-გრავიტაციული k>0.35
თაღოვანი ნაწილის მოხაზულობით
მუდმივცენტრალურკუთხიანი
სადაწნეო წახნაგის მუდმივ რადიუსიანი ან ცილინდრული
ორმაგსიმრუდიანი ან გუმბათოვანი
ქუსლების ნაპირებთან ჩამაგრების მიხედვით
ღრეკადი ჩამაგრებით
კონსტრუქციული ნაკერებით
ჩაჭრილი ნაკერით
ორ ან სამსახსრიანი თაღებით
სანაპირო ბირჯებით
საყრდენი ზედა თაღებით
სიმაღლით
დაბალი H<250
საშუალო 25≤H≤75 მ
მაღალი 75 < H ≤150
ზემაღალი 75<H≤150 მ
წყლის გაშვების სერხით
ყრუ
წყალსაგდები-წყალსაშვიანი სიღრმული ხვრ.
მასალით
ქვის
ბეტონის
რკინაბეტონის

ნახ. 3.41

ზოგადი მოხაზულობის თაღოვანი კაშხლების სიმტკიცეზე გაანგარიშება ზუსტი თეორიული მეთოდებით, მისი შუა ზედაპირის რთული გეომეტრიისა და მუშაობის პირობების გათვალისწინებით, სამშენებლო მექანიკის ერთ-ერთი ურთულესი ამოცანაა. მიუხედავად მრავალგზის ცდისა, თაღოვანი კაშხლის სიმტკიცის ამოცანის მკაცრი თეორიული გადაწყვეტა ჯერ კიდევ არაა მირებული. მიუხედავად ამისა, ბოლო 25-30 წლის განმავლობაში მსოფლიოში დაგროვდა მდიდარი გამოცდილება თაღოვანი კაშხლის კვლევის, დაპროექტების, მშენებლობის და ექსპლუატაციის საქმეში. ამჟამად თაღოვანი კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის მეთოდები საშუალებას იძლევა ნებისმიერი კონსტრუქციის თაღოვანი კაშხლები გაანგარიშდეს პრაქტიკულად მისაღები სიზუსტით.

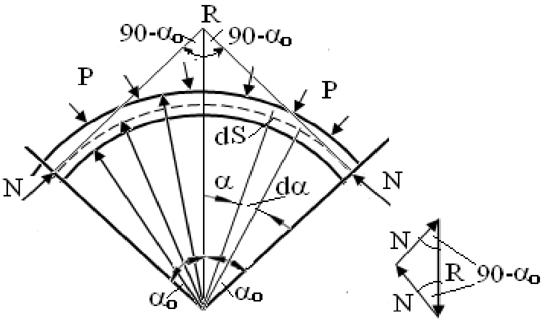
ზოგადად, თაღოვანი კაშხლების გაანგარიშების მეთოდები იყოფა ორ ჯგუფად. პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება, ე.წ. „სუფთა თაღის“ მეთოდები, რომლებიც განიხილავენ თაღოვანი კაშხლიდან ჰორიზონტალური სიბრტყეებით ამოჭრილ ერთეული სიმაღლის თაღებს, ჰორიზონტალური დატვირთვების მოქმედების და სხვადასხვა ხასიათის დაყრდნობის პირობებში; ხოლო მეორე ჯგუფს – მეთოდები, რომლებიც თაღოვან კაშხალს განიხილავენ როგორც ჰორიზონტალური და ვერტიკალური დატვირთვების ქვეშ მომუშავე სივრცულ სისტემას.

თაღოვანი კაშხლის, როგორც სივრცითი სისტემის გაანგარიშების მეთოდები (საანგარიშო სქემიდან გამომდინარე) შეიძლება დაჯგუფდეს შემდეგნაირად: „ცენტრალური კონსოლის მეთოდი“, ფიქტიური ორთოტროპული სისტემების შერწყმის, ვარიაციულ-ღეროვანი, სასრულ-გადამკვეთი ღეროების, გარსებისა და დრეკადობის თეორიის მეთოდები.

თავისუფლად დაყრდნობილი თხელი წრიული თაღის მეთოდით გაანგარიშებისას მიღებულია დაშვება იმის შესახებ, რომ თეორიული საანგარიშო თაღი ქუსლებით თავისუფლად ეყრდნობა საყრდენს, რომელზეც შეუძლია ხახუნის გარეშე სრიალი (ნახ. 3.42). ამიტომ ნორმალური ძალა თაღის ნებისმიერ რადიალურ კვეთში მუდმივია და ტოლია საყრდენი რეაქციისა $\mathbf{N=Pr_g}$. აქ $\mathbf{r_g}$ თაღის გარე რადიუსია, ხოლო – ჰიდროსტატიკური წნევის ინტენსივობა.

$$\mathbf{P=\gamma h_i},$$

სადაც $\boldsymbol{\gamma}$ წყლის მოცულობითი წონაა, $\mathbf{h_i}$ არის **i**-ური თაღის ჩაღრმავება სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან.



ნახ. 3.42. თაღის ცილინდრული ფორმულით გაანგარიშება

აღნიშნულიდან გამომდინარე, რადგან თაღი მუშაობს მხოლოდ კუმშვაზე, ნორმალური ძაბვა თაღის ნებისმიერ რადიალურ კვეთში იქნება

$$\sigma = N/F = Pr_{გ}/e.$$

აქედან, საანგარიშო თაღის საძიებელი სისქე

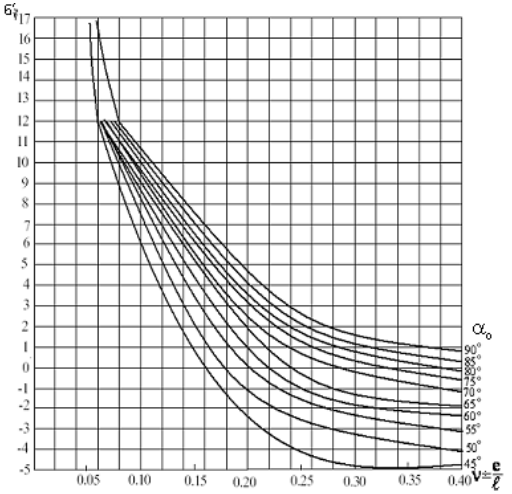
$$e = \frac{\gamma h_i r_{გ}}{[\sigma]}, \qquad (3.24)$$

სადაც [σ] ბეტონის დასაშვები ძაბვაა კუმშვაზე, რომლის მნიშვნელობა გამარტივებული საანგარიშო სქემის გამო შემცირებულია: [σ]=20 კგ/სმ^2 ზედა თხელი თაღებისათვის და [σ]=8-10 კგ/სმ^2 შუალედური და ქვედა სქელი თაღე-ბისათვის.

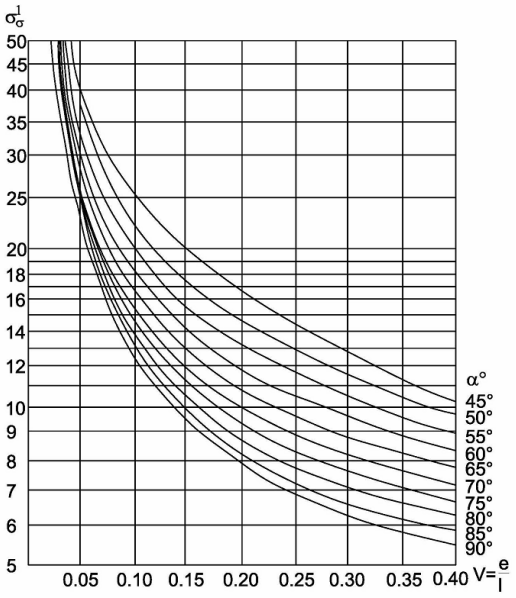
მიღებული (3.24) ფორმულა, რომელსაც ცილინდრული, ანუ „საქვაბე“ ეწოდება, ძალზე მიახლოებითია და შეიძლება გამოვიყენოთ მხოლოდ თხელი თაღების მიახლოებითი გაანგარიშებისათვის.

ქუსლებით ხისტად ჩამაგრებული „სუფთა თაღი“ ზოგადად, სამჯერ სტატიკურად ურკვევ სისტემას წარმოადგენს, რომლის სიმტკიცეზე გაანგარიშება საკმაოდ შრომატევადია.

ცნობილია, რომ სიმტკიცის თვალსაზრისით, უფრო საშიშია თაღოვანი კაშხლის ნაპირებში ჩამაგრების კვეთი (ქუსლები), სადაც მღუნავი მომენტები აღწევს მაქსიმუმს. თაღის ქუსლებში ძაბვათა სწრაფი განსაზღვრისათვის გამოიყენება ნ. კელენის გრაფიკები $\sigma'_{\varphi}=f(\alpha_0,\nu)$ (ნახ. 3.43). ჰიდროსტატიკური დაწნევით თაღის ქუსლებში აღძრული ძაბვის მნიშვნელობათა დასადგენად საჭიროა გრაფიკით აღებული σ'_{φ}-ის რიცხვითი მახასიათებლები გამრავლდეს γh-ზე, ე.ი. $\sigma'_{\varphi}=\sigma'_{\varphi}\gamma h$.



ა) სადაწნეო წახნაგი



ბ)უდაწნეო წახნაგი

ნახ. 3.43. წყლის თანაბარი წნევის ძაბვები თაღის ქუსლებში

3.2.4. კონტრფორსული კაშხლები

კონტრფორსული კაშხლები წარმოადგენს შემსუბუქებული ტიპის შემტბორავ ნაგებობებს, რომლებიც საკმაოდ ფართოდ გამოიყენება მსოფლიოს მრავალი ქვეყნის ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში.

გრავიტაციულთან შედარებით კონტრფორსული კაშხლები ხასიათდება მნიშვნელოვანი ეკონომიურობით როგორც გამოყენებული მასალის (ბეტონის) მოცულობის, ისე მშენებლობის საერთო ღირებულების მხრივ. აღნიშნულმა უპირატესობამ განაპირობა XX საუკუნის დასა-

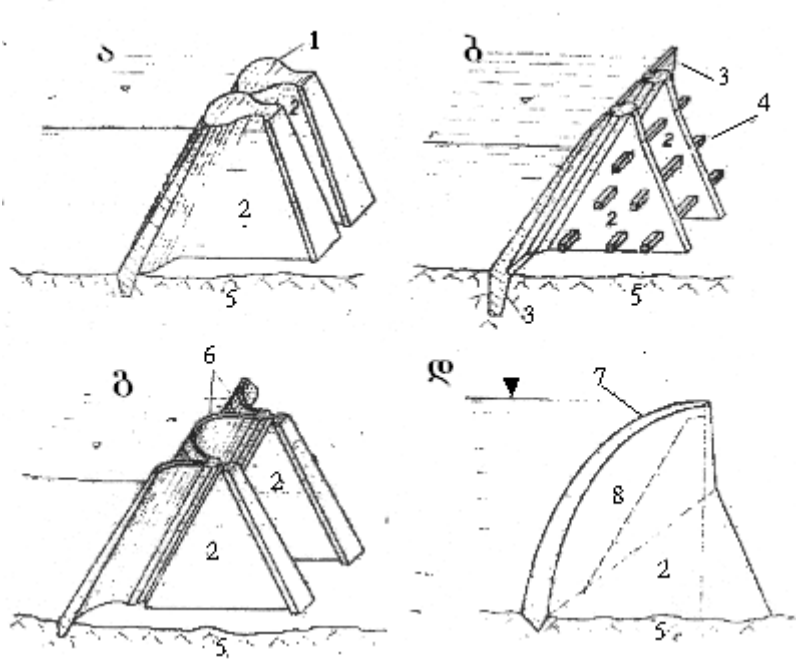
წყისიდან (1903 წ) დღემდე 500-ზე მეტი კონტრფორსული კაშხლის მშენებლობა.

კონტრფორსული კაშხალი შედგება ცალკე მდგომი კონტრფორსებისაგან და ამა თუ იმ ტიპის სადაწნეო გადახურვისაგან. ასრულებს რა საყრდენების მოვალეობას, გადახურვისაგან მიღებულ დატვირთვებს კონტრფორსები გადასცემენ ფუძის გრუნტს უშუალოდ ან საძირკვლის ფილის მეშვეობით. ამ უკანასკნელს აწყობენ არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში.

კონტრფორსული კაშხლების კლასიფიკაციას უფრო ხშირად აწარმოებენ სადაწნეო გადახურვის ტიპისა და კონტრფორსების კონსტრუქციის მიხედვით.

სადაწნეო გადახურვის ტიპის მიხედვით ასხვავებენ კაშხლებს: ა) ბეტონის მასიური გადახურვებით, ანუ მასიურ-კონტრფორსულს; ბ) რკინაბეტონის ბრტყელი გადახურვებით (ფილებით); გ) ბეტონისა და რკინაბეტონის თაღოვანი გადახურვით, ანუ მრავალთაღოვანს (ნახ. 3.44).

კონტრფორსების კონსტრუქციის მიხედვით კი ასხვავებენ: ა) ბეტონისა და ქვაბეტონის მასიური კონტრფორსებით; ბ) ბეტონისა და რკინაბეტონის თხელი, მთლიანი ან გამჭოლი კონსტრუქციებით; გ) დიაფრაგმებით გაძლიერებული რკინაბეტონის ღრუ კონტრფორსებით; დ) ბეტონის გაორმაგებული (ღრუ) კონტრფორსებით (კ. მარჩელოს ტიპი).



ნახ. 3.44. კონტრფორსული კაშხლების ძირითადი ტიპები ა–მასიურ-კონტრფორსული; ბ–ბრტყელი გადახურვით; გ–მრავალთაღოვანი; დ–მრავალგუმბათოვანი; 1–მასიური სათავსები; 2–კონტრფორსები; 3–გადახურვის ფილები; 4–სიხისტის კოჭები; 5–კლდე; 6–თაღები; 7–გუმბათი; 8–ქუსლების ხაზი

დამატებითი ელემენტების სახით კონტრფორსებს შორის კაშხალში შეიძლება მოეწყოს სიხისტის კოჭები (განმბრჯენები) ანდა კონტრფორსების გვერდებზე გათვალისწინებულ იქნეს სიხისტის წიბოები ქვედა წახნაგების პარალერული ან ვერტიკალური მიმართულებით; შედარე-

ბით იშვიათად შესაძლებელია სიხისტის კოჭები შეიცვალოს სიხისტის დიაფრაგმებით. მოსალოდნელი გრძივი ღუნვის (გამობურცვის) დროს აღნიშნული დამატებითი ელემენტების დანიშნულება კონტრფორსების ვერტიკალური სწორხაზოვანი ფორმის მდგრადობის უზრუნველყოფა.

კონტრფორსულ კაშხალში კონტრფორსებს ერთმანეთისაგან ისეთ მანძილზე ათავსებენ, რომ დატვირთვის გადაცემის შედეგად სრულად იქნეს გამოყენებული მათი მასალის ზიდვის უნარი დასაშვები ძაბვების ფარგლებში. ღუნვაზე ან თაღის პრინციპზე მომუშავე გადახურვებშიც მასალა სრულადაა დატვირთული, ამიტომ კონტრფორსული კაშხლის კონსტრუქციის საერთო წონა მნიშვნელოვნად ნაკლებია, ვიდრე გრავიტაციული კაშხლისა. ძვრაზე მდგრადობის უზრუნველსაყოფად დანაკლის წონას კონტრფორსული კაშხალი ივსებს წყლის პრიზმის წონით, რომელიც გადაეცემა დახრილ სადაწნეო გადახურვას. ვერტიკალური სადაწნეო გადახურვის შემთხვევაში კი წყლის ასეთი პრიზმა არ არსებობს, ამიტომ, საკუთარი წონის გაზრდის მიზნით, უნდა აიგოს მასიური (სქელი) კონტრფორსები ანდა გამოყენებულ იქნეს ფუძეში კონტრფორსების ჩაანკერების მეთოდი.

პირველი კონტრფორსული კაშხალი აგებულ იქნა ესპანეთში XVI საუკუნის ბოლოს (ელიჩეს კაშხალი). იგი წარმოადგენდა ქვის 23 მ სიმაღლის მრავალთაღოვან კაშხალს ვერტიკალური თაღებით. მაგრამ უნდა აღინი-

შნოს, რომ მრავალთაღოვანი კაშხლების მშენებლობა ფართოდ გავრცელდა მხოლოდ XX საუკუნის დასაწყისიდან, როდესაც გამოყენებულ იქნა უფრო ეკონომიური დახრილი თაღები. ამჟამად მსოფლიოს სხვადასხვა ქვეყანაში უკვე განხორციელებულია ამ ტიპის 70-ზე მეტი კაშხალი, რომელთაგან ყველაზე მაღალია მანიკუაგან-5-ის კაშხალი კანადაში (215 მ).

რკინაბეტონის პირველი კაშხალი ბრტყელი სადაწნეო გადახურვით (ფილებით) აგებულ იქნა 1903 წელს აშშ-ში, მდ. ტერეზაზე. ამჟამად მსოფლიოში განხორციელებულია ამ ტიპის 400-ზე მეტი კაშხალი.

მასიურ-კონტრფორსული კაშხლები ჰიდრომშენებლობის პრაქტიკაში შემოვიდა XX საუკუნის 30-იანი წლებიდან და თანდათანობით გავრცელდა მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში. ამ ტიპის კაშხლებიდან ყველაზე მაღალია ხატანაგის კაშხალი (იაპონია)-125 მ, შემდეგ მოდის ანჩიპას კაშხალი იტალიაში – 111,5 მ (1952 წ.), რომელიც აშენდა ინჟ. კ. მარჩელოს წინადადებით.

მასიურთავებიანი კონტრფორსული კაშხლების სიმტკიცეზე საანგარიშოდ ძირითადად გამოიყენება მასალათა გამძლეობის ელემენტარული მეთოდი, მცირე ბლოკების მეთოდი, კოჭური მეთოდი და სხვ. ბოლო წლებში მასიურთავებიანი კონტრფორსული კაშხლის სექციის სიმტკიცეზე გაანგარიშებისათვის ფუძესთან ერთად ფართო გამოყენება იპოვა სასრულო ელემენტების მეთოდმა (სემ).

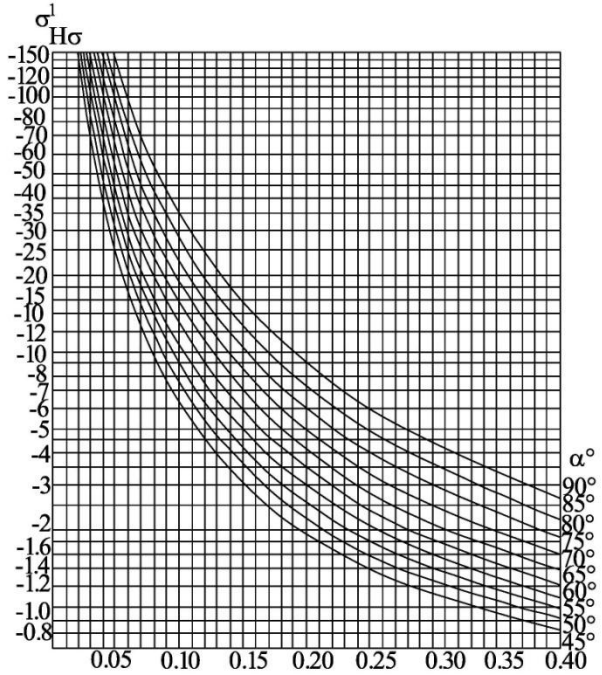
ელემენტრული მეთოდით კონტრფორსის ჰორიზონტალ-ლურ საანგარიშო კვეთში (წახნაგებზე) მოქმედი σ_y ვერტიკალური ნორმალური ძაბვები განისაზღვრება არათანაბარი კუმშვის ფორმულის გამოყენებით:

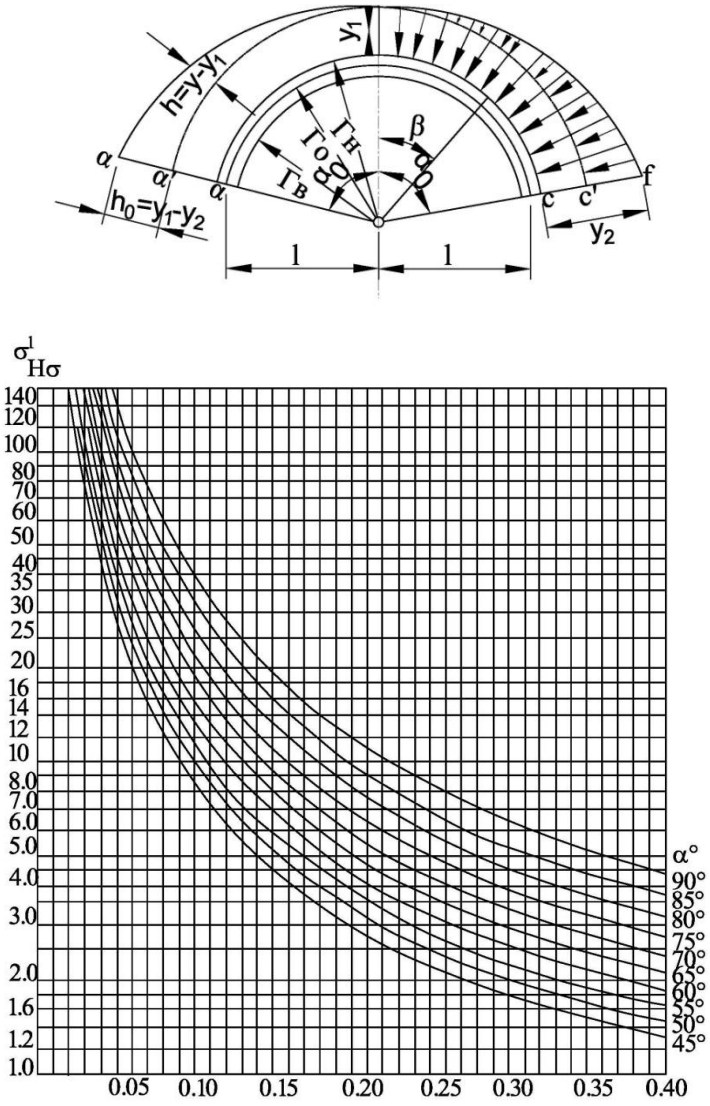
$$\sigma_y = \frac{\Sigma P}{F} \pm \frac{\Sigma M_0 x}{I} \qquad (3.25)$$

სადაც ΣP არის განსახილველი კვეთის ზემოთ მოქმედი ყველა ვერტიკალური ძალის ჯამი; ΣM_0 – განსახილველი კვეთის ზემოთ მოქმედი ყველა ძალის მომენტების ჯამი კვეთის სიმძიმის ცენტრის მიმართ; **F, I** - განსახილველი კვეთის ფართობი და ინერციის მომენტი მისი სიმძიმის ცენტრზე გამავალი კაშხლის ღერძის პარალელური ღერძის მიმართ; **x** - მანძილი კვეთის სიმძიმის ცენტრიდან იმ წერტილამდე, სადაც განისაზღვრება σ_y ძაბვები.

ბრტყელგადახურვიანი და მრავალთაღოვანი კონტრფორსული კაშხლების გადახურვები და კონტრფორსები უფრო ხშირად იანგარიშება ცალ-ცალკე; ბრტყელი გადახურვა, როგორც ფილა ან კოჭი, ხოლო მრავალთაღი, როგორც ცილინდრული გარსი ან თაღი. მრავალთაღოვანი კაშხლის გადახურვის გაანგარიშებისას გასათვალისწინებელია, რომ გადახურვის ნორმალური მკვეთი სიბრტყით ამოჭრილი თაღის ქუსლები უფრო ღრმად არის ჩაძირული შეტბორვის თავისუფალი ზედაპირიდან, ვიდრე კლიტე; ამიტომ თაღის გაანგარიშება ტარდება

წყლის თანაბარ (ისე როგორც თაღოვანი კაშხლის) და არათანაბარ წნევაზე. არათანაბარი წნევით ქუსლებში ძაბვათა სწრაფი გაანგარიშების მიზნით (ისე როგორც თაღოვანი კაშხლის გაანგარიშებისას), შეიძლება ვისარგებლოთ კელენის მიერ შედგენილი გრაფიკებით (ნახ. 3.45).





ნახ. 3.45. ძაბვები თაღის ქუსლებში წყლის არათანაბარი დატვირთვისას

3.2.5. ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლების სიმტკიცის პირობის ანალიზი და მისი დარღვევის ეფექტური მეთოდების შემუშავება განსაკუთრებულ შემთხვევებში

დაპროექტების პროცესში კონსტრუქტორი ცდილობს ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლებში არმატურა მინიმალურად იყოს გამოყენებული, მაგრამ ეს ყოველთვის არ არის შესაძლებელი (მაგალითად ბრტყელგადახურვიან კონტრფორსულ კაშხლებში). აღნიშნულიდან გამომდინარე, შემტბორ ნაგებობებში საჭიროა გამჭიმი ძაბვები, რომელზედაც ცუდად მუშაობს ბეტონი, საერთოდ არ არსებობდეს ან იყოს დაშვების ფარგლებში. ასეთ შემთხვევაში კაშხლებს უკეთდება მხოლოდ კონსტრუქციული დაარმატურება. სამაგიეროდ ამ დროს ნაგებობებში საკმარისია გარეგანი შემთხვევითი, წინასწარ გაუთვალისწინებელი, თუნდაც უმნიშვნელო, ძალის ზემოქმედება, რომელსაც განსაკუთრებით თხელკედლიან კონსტრუქციებში შეუძლია გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი გამჭიმი ძაბვები.

გრავიტაციული კაშხლების შემთხვევაში ასეთი გამჭიმი ძაბვები სავსე წყალსაცავის შემთხვევაში უფრო ადვილად აღიძვრება სადაწნეო წახნაგზე, ხოლო დაცლის დროს – უდაწნეოზე, რომელიც მიიღწევა შედარებით „მცირე“ სიმძლავრის ფეთქებადი მუხტით და რომელმაც ადვილად შეიძლება დაარღვიოს კაშხლის სიმტკიცის პირობა.

თუ კაშხლის ძვრაზე ან სიმტკიცეზე მარაგის კოეფიციენტი შედარებით მცირეა კაშხლის ზიდვის უნარი შეიძლება მოიშალოს წყალსაცავის ფერდოს ხელოვნური დაძვრით წყალსაცავში (მეწყერი), რომელიც თავის მხრივ, წარმოქმნის გარკვეული პარამეტრების (იხ. მეორე განყოფილება) ტალღებს.

თაღოვან კაშხალში იმ გამჭიმი ძაბვების წარმოშობა, რომელმაც შეიძლება გამოიწვიოს მისი ნგრევა უფრო მოსალოდნელია სადაწნეო წახნაგის ქუსლებში (რომელიც სავსე წყალსაცავის პირობებში ძნელად მისაგომია) ან უდაწნეო წახნაგის კლიტეში.

კონტრფორსულ კაშხლებში უფრო ეფექტურია კონტრფორსის მოშლა. რადგან მღუნავი მომენტები კონტრფორსული კაშხლის გადახურვებში მისი მალის კვადრატის პროპორციულია; ამიტომ ერთი კონტრფორსის მოშლა 4-ჯერ გაზრდის მომენტებსა და შესაბამისად, ძაბვებს გადახურვებში, ხოლო ორი მეზობელი კონტრფორსის მოშლა 16-ჯერ. კონტრფორსული კაშხლების გადახურვებში გამორიცხულია სიმტკიცეზე ასეთი მარაგების არსებობა.

III თავი. ადგილობრივი მასალების კაშხლების დაპროექტების ზოგადი საკითხები. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ექსპლუატაცია

3.3..1. ბრუნტის მასალის კაშხლები

გრუნტის კაშხლები წყალშემტბორ ნაგებობათა ყველაზე ძველი და გავრცელებული სახეობაა; კაშხლების რაოდენობის დაახლოებით 60%-ს გრუნტის კაშხლები შეადგენს. გრუნტის კაშხლების პოპულარობის ახსნა შესაძლებელია მათი მრავალი უპირატესობით: მშენებლობა თითქმის ნებისმიერ ფუძეებზე, კაშხლის ტიპების კონსტრუქციული მრავალფეროვნება, საშენ მასალად მახლობლად არსებული პრაქტიკულად ყველა სახის გრუნტის გამოყენების შესაძლებლობა, კაშხლის მშენებლობის ტექნოლოგიური პროცესის მთლიანი მექანიზაცია, საგრძნობი ეკონომიკურობა და სხვ. გრუნტის კაშხლების მშენებლობამ ფართო გაქანება პოვა ჩვენს დროში. მსოფლიოში უდიდესი გრუნტის კაშხლებია: ნურეკის (ყოფილი სსრკ) – 305 მ, ოროვილის (კანადა) – 235 მ, ჩირვაკის (ყოფილი სსრკ) – 168 მ.

გრუნტის კაშხლების უპირატესობებთან ერთად საჭიროა აღინიშნოს ის ფაქტიც, რომ მსოფლიოში აღრიცხული კაშხლების კატასტროფებისა თუ ავარიების უმეტესი რაოდენობა მოდის ამ ტიპის კაშხლებზე. კატასტროფების ძირითადი მიზეზია გრუნტის კაშხლების ტანში თუ ფუძეში დაუშვებელი ფილტრაციული დეფორმაციების

განვითარება და მდინარის საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯის არასწორი პროგნოზი.

გრუნტის კაშხლების ძირითად კლასიფიკაციას (ცხრ. 3.5) საფუძვლად უდევს კაშხლის ტანისა და ფილტრაციის საწინააღმდეგო მოწყობილობის (წყალშეუღწევი ზღუდის) მასალის სახე და კაშხლის აგების ხერხი.

ცხრილი 3.5

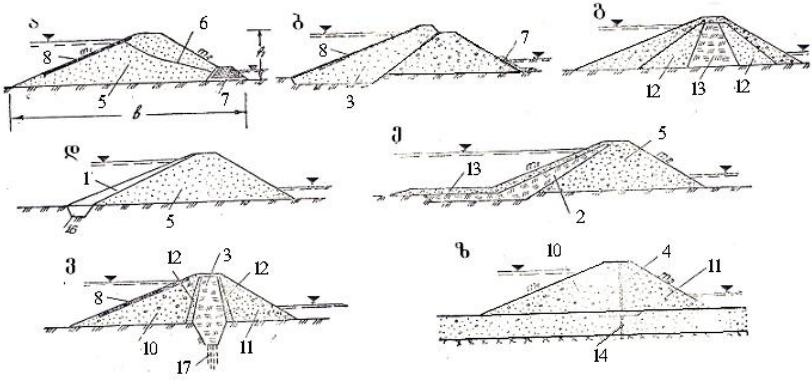
გრუნტის კაშხლების ძირითადი კლასიფიკაცია

№	კაშხლის ტიპი	განმასხვავებელი ნიშნები	
		კაშხლის ტანისა და ფილტრაცია საწინაღო მოწყობილობის გრუნტი	კაშხლის აგების წესი
1	მიწის ნაყარი	თიხოვანი გრუნტებიდან ხრეშოვან-კენჭნარ გრუნტებამდე	მშრალი დაყრა შემდგომი გამკვრივებით (დატკეპნით) ან ჩაყრა წყალში
2	მიწის მონალექი	თიხოვანი გრუნტებიდან ხრეშოვან-კენჭნარ გრუნტებამდე	მოლექვა ჰიდრომექანიზაციის ხერხებით
3	ქვა-მიწის	კაშხლის ტანი – მსხვილმარცვლოვანი გრუნტები; ფილტრაცია საწინაღო მოწყობილობა – თიხოვანი გრუნტებიდან წვრილმარცლოვან ქვიშებამდე	მშრალი დაყრა შემდგომი გამკვრივებით
4	ქვაყრილი	კაშხლის ტანი – მსხვილმარცლოვანი გრუნტები; ფილტრაცია საწინაღო მოწყობილობა – არაგრუნტის მასალებისაგან	ჩაყრა ესტაკადიდან ან პიონერული მეთოდით; დამატებითი გამკვრივება ჰიდრომონიტორებით

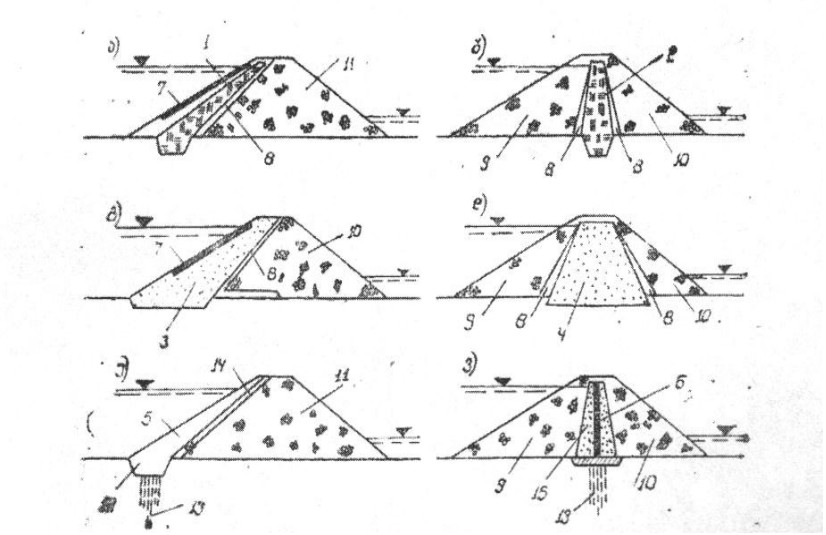
ზოგჯერ გრუნტის კაშხლების კლასიფიკაციას ახდენენ კაშხლის სიმაღლის შესაბამისად: ასხვავებენ დაბალ **h<30** მ, საშუალო 30 – 75 მ, მაღალ 75 – 125 მ და ზემაღალ **h>125** მ კაშხლებს.

გრუნტის კაშხლების ძირითადი კლასიფიკაცია (ცხრ. 3.5) არ იძლევა ინფორმაციას კაშხლის კონსტრუქციულ თვისებასა და თავისებურებებზე, ამიტომ ქვემოთ მოგვყავს გრუნტის კაშხლების ცალკეული ტიპების სამშენებლო-კონსტრუქციული სახეები.

- მიწის ნაყარი კაშხლები ტანსა და ფუძეში ფილტრაციასაწინაღო მოწყობილობის (წყალშეუღწევი ზღუდის) კონსტრუქციის შესაბამისად იყოფა 3.6 ცხრილში მითითებულ ქვეტიპებად (ნახ. 3.46) მიწის ნაყარი კაშხლებიდან უპირატესობა უნდა მიენიჭოს: ერთგვაროვან კაშხლებს, კაშხლებს გრუნტის ეკრანით და გრუნტის გულით.
- მიწის მონალექი კაშხლების კლასიფიკაციას ახდენენ კაშხლის ტანის გრუნტის და კაშხლის აგების (მოლექვის) ხერხის შესაბამისად.
- ქვა-მიწის და ქვაყრილი კაშხლების კლასიფიკაცია ფილტრაციასაწინაღო მოწყობილობის ტიპისა და სამშენებლო სამუშაოთა წარმოების ხერხების შესატყვისად, მოცემულია 3.7 ცხრილში (ნახ. 3.47).



ნახ. 3.46. მიწის ნაყარი კაშხლების ძირითადი სახეები:
ა–ერთგვაროვანი; ბ,გ–არაერთგვაროვანი; დ–არაგრუნტის მასალის ეკრანით (1); ე–გრუნტის ეკრანით (2); ვ–გრუნტის გულით (3); ზ–არაგრუნტის დიაფრაგმით (4); 5–კაშხლის ტანი; 6–დეპრესიის მრუდი; 7–დრენაჟი; 8–ფერდოს გამაგრება; 9–ფილტრაციასაწინაღო ზედა პრიზმა; 10,11–კაშხლის ზედა და ქვედა პრიზმა; 12–გადასასვლელი ფენა; 13– ფილტრაციასაწინაღო ცენტრალური პრიზმა; 14–შპუნტი ან კედელი; 15–ძირული; 16– კბილი; 17–ცემენტაციური ფარდა



ნახ. 3.47. ქვა-მიწის და ქვაყრილი კაშხლების ძირითადი სახეები. ქვამიწის: ა–გრუნტის ეკრანით;(1); ბ–გრუნტის გულით (2); გ–გრუნტის ფილტრაციისსაწინაღო პრიზმით (3); დ–გრუნტის ფილტრაციასაწინაღო ცენტრალური პრიზმით (4); ქვაყრილი: ე–არაგრუნტის (რკინაბეტონის) ეკრანით (5); ვ–დიაფრაგმით (6); 7–ფერდოს გამაგრება: 8–გადასასვლელი ფენა (უკუფილტრი); 9,10– კაშხლის ზედა და ქვედა პრიზმა; 11–კაშხლის ტანი; 12–კბილი; 13– ცემენტაციური ფარდა; 14–ეკრანისქვეშა საგები; 15–გადასასვლელი ფენა

ცხრილი 3.6

მიწის ნაყარი კაშხლების ძირითადი სახეები

განმამსხვავებელი კონსტრუქციული ნიშნები	კაშხლის სახე	ნახაზი 9.2
კაშხლის ტანის	ერთგვაროვანი არაერთგვაროვანი არაგრუნტის მასალის ეკრანით გრუნტის მასალის ეკრანით გრუნტის მასალის ვერტიკალური ან დახრილი გულით არაგრუნტის მასალის დიაფრაგმით	ა ბ, გ დ ე ვ ზ
ფილტრაციასსაწინაღო მოწყობილობის კაშხლის ფუძეში	კბილით ცემენტაციური თუ სხვა სახის ფარდით კედლით, ნარანდით ძირულით	დ ვ ზ ე

ცხრილი 3.7

ქვა-მიწის და ქვაყრილი კაშხლების ძირითადი სახეები

კაშხლის ტიპი	ფილტრაციასაწინაღო მოწყობილობების კონსტრუქცია	ნახაზი
ქვა-მიწის	გრუნტის ეკრანით გრუნტის გულით გრუნტის მასალის ზედა პრიზმით გრუნტის მასალის ცენტრალური პრიზმით ინერციული დიაფრაგმით; კაშხლის აგება მიმართული აფეთქებით ეკრანით; კაშხლის აგება მიმართული აფეთქებით	ა ბ გ დ - -
ქვაყრილი	არაგრუნტის მასალის ეკრანით დიაფრაგმით	ე ვ

ყველა ტიპის გრუნტის კაშხლის განივკვეთი ტრაპეციული ფორმისაა ზედა (სადაწნეო) და ქვედა ფერდოს სწორხაზოვანი ან ტეხილი მოხაზულობით (ნახ. 3.48). ფერდობის ზედა B და C პირი წარმოადგენს ფერდოს კიდეს, ქვედა A და D კი – ფერდოს ძირს. თუ ფერდოს ჰორიზონტთან დახრის კუთხეა θ, მაშინ ფერდოს დახრილობას ახასიათებენ ფერდოს კოეფიციენტით ანუ ფერდოს ქვედებულით m=ctgθ; შესაძლებელია აგრეთვე ასეთი ჩაწერაც **1 : m**.

კაშხლის ფერდოების დახრილობის წინასწარი დანიშვნა ხდება არსებული კაშხალი-ანალოგების შესაბამისად; არჩეული დახრილობის შესაფერისობა შემდგომ მოწმდება ფერდოების მდგრადობაზე გაანგარიშებით. ფერდოს კოეფიციენტების საორიენტაციო მნიშვნელობები სხვადასხვა ტიპის გრუნტის კაშხლებისათვის ნაჩვენებია 3.8 ცხრილში.

კაშხლის ფერდოებზე, კერძოდ, პროფილის გადატეხის ადგილებში, აწყობენ ჰორიზონტალურ ბაქნებს – ბერმებს, რომლებიც საჭიროა სხვადასხვა მიზნისათვის: ფერდოს მოხერხებული ზედამხედველობა და რემონტი, სავალი ნაწილის მოწყობა, ფერდოს საშუალო ქანობის შემცირება, წვიმის წყლებით ფერდოს წარეცხვის თავიდან აცილება და სხვ. ბერმებს განალაგებენ კაშხლის სიმაღლეზე 10 –

20 მ ინტერვალებით; მათი სიგანე უნდა იყოს 1 – 2 მ და მეტიც.

ცხრილი 3.8

გრუნტის კაშხლების ფერდოს კოეფიციენტის საორიენტაციო მნიშვნელობა

კაშხლის ტიპი	განმამსხვავებელი ნიშანი	ფერდოს კოეფიციენტი	
		m_1	m_2
მიწის ნაყარი	სიმაღლე, მ: <5	2,0 . . .2,5	1,5 . . 1,75
	5 . . . 10	2,5 . . .2,75	1,75 . . 2,25
	10 . . . 15	2,5 . . 3,0	2,0 . . 2,5
	15 . . . 50	3,0 . . 4,0	2,5 . . 4,0
	>50	4,0 . . 5,0	4,0 . . 4,5
მიწის მონალექი ერთგვაროვანი	კაშხლის ფუძის გრუნტები: - ქვიშები, ქვიშნარები	3,5 . . 5,0	
	- დანალექები, ტორფი, ლამი	5,0. . .8,0	
მიწის მონალექი (არაეთგვაროვანი – გულით)	- კლდოვანი, მკვრივი თიხები	3,0 . . 4,0	
ქვა-მიწის	გრუნტის გულით	1,75 . . 3,0	1,75 . . 2,5
	გრუნტის ეკრანით	2,2 . . 3,0	1,3 . . 1,75
ქვაყრილი		0,5 . . 2,0	

კაშხლის ტანის გრუნტი და ფილტრაციასაწინაღო მოწყობილობის მასალა, ყოველთვის ცოტად თუ ბევრად წყალშეღწევადია, რის გამოც გრუნტის კაშხლები იმყო-

ფება ფილტრაციული ნაკადის მუდმივი ზემოქმედების ქვეშ. ჰიდრონაგებობათა ფუძეში ფილტრაციული მოვლენებისაგან განსხვავებით, ფილტრაცია გრუნტის კაშხლის ტანში უდაწნეოა. გაანგარიშებას, ჩვეულებრივ, აწარმოებენ ბრტყელი ამოცანის პირობებში; ფილტრაციული ნაკადის საზღვრები შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი ზოგადი სქემით (ნახ. 3.48): ზედა ფერდოს და წყალსაცავის ფსკერის EAB სველი სიბრტყე (ხაზი), ქვედა ფერდოს ასეთივე CDF ტეხილი, ქვემოთ – კაშხლის ფუძის წყალსაკავი, ზემოთ – დეპრესიის მრუდი.

გრუნტის კაშხლების ფილტრაციულ გაანგარიშებებს ეკისრება გაზრდილი პასუხისმგებლობა. მათი მთავარი მიზანია კაშხლის ტანში, ფუძესა და ნაპირებში დეპრესიის მრუდის მდებარეობის, ფილტრაციული ხარჯების, სიჩქარეებისა და გრადიენტების განსაზღვრა.

არსებული ნორმატიული დოკუმენტის მიხედვით გათვალისწინებულია I და II კლასის გრუნტის კაშხლების დაძაბულ-დეფორმაციული მდგომარეობის შესწავლა.

ნებისმიერი ტიპისა და კლასის გრუნტის კაშხლის გაანგარიშების უმნიშვნელოვანესი ამოცანაა კაშხლის ფერდოების მდგრადობის შემოწმება. ფერდობის მდგრადობის გაანგარიშება უფრო ხშირად ტარდება იმ თეორიის მიხედვით, რომელიც ეფუძნება კაშხლის ფერდოს ერთიანი (გამყარებული) ტანის დაძვრის მოდელს.

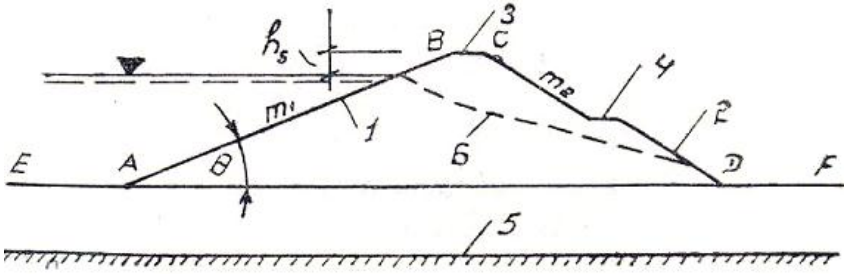
გრუნტის კაშხლები, ხასიათდება რა დიდი წონით, ძვრაზე მდგრადობის შემოწმებას არ საჭიროებს; არამდგრადი შეიძლება აღმოჩნდეს კაშხლის ფერდოები. ფერდოს მდგრადობის შემოწმებისას იყენებენ ძვრის წრიულცილინდრული ზედაპირების ზოგად მეთოდს, რომელსაც საფუძველი ჩაუყარეს შვედმა ინჟინრებმა („შვედური მეთოდი“). ამ მეთოდის მიხედვით დაშვებულია, რომ ძალთა მოქმედების შედეგად კაშხალსა და მის ფუძეში წარმოიშვას ძვრის წრიულცილინდრული ზედაპირი და მის გასწვრივ მოხდეს ფერდოს გარკვეული ნაწილის ერთიანი ტანით ძვრა (ჩამონგრევა) ფუძის გრუნტის ამობურცვით. გაანგარიშებისას განიხილავენ კაშხლის 1 მ სიგრძის უბანს ანუ ბრტყელ ამოცანას.

ძვრის წრიულცილინდრული ზედაპირით კაშხლის ტანიდან (ნახ. 3.49) გამოყოფილი ფრაგმენტის მდგრადობის კრიტერიუმი გამოისახება ზღვრული მდგომარეობის დადგომის დაუშვებლობის ზოგადი პირობით, რომელიც ძვრის ყველზე სახიფათო ზედაპირის გამოვლენის მიზნით მოხერხებულია ჩაიწეროს ძვრაზე მდგრადობის კოეფიციენტის ($\mathbf{k_ð}$) ფორმით

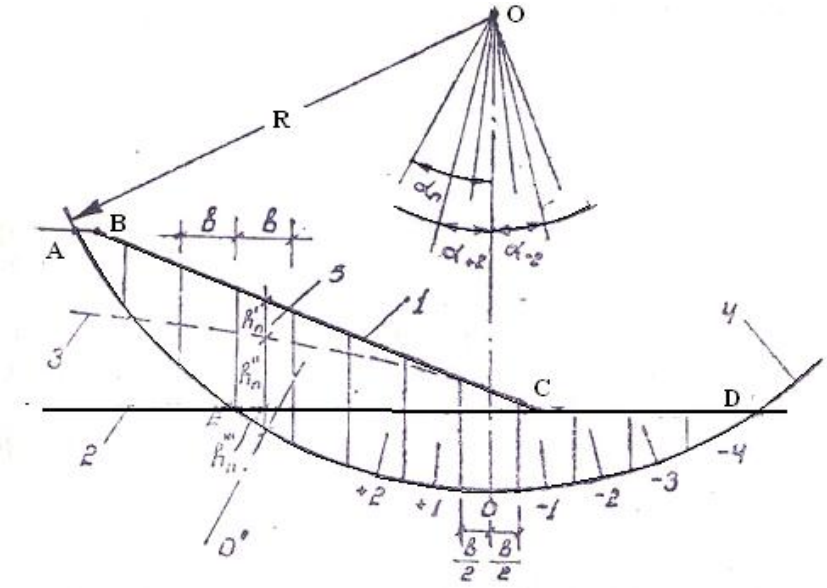
$$\mathbf{k_ð=R/F\geq\gamma_{lc}\gamma_n/\gamma_c.} \qquad (3.26)$$

აქ γ_{lc} არის მოქმედ დატვირთვათა შეხამების კოეფიციენტი; γ_c - მუშაობის პირობების კოეფიციენტი; გაანგარიშების მიახლოებითი მეთოდების შემთხვევაში γ_c=0,95;

γ_n - საიმედოობის კოეფიციენტი ნაგებობის პასუხისმგებლობაზე; **F** - განზოგადებული ძალური ზემოქმედების საანგარიშო მნიშვნელობა (განსაზღვრულ დატვირთვაზე საიმედოობის γ_n კოეფიციენტის მხედველობაში მიღებით); უფრო ხშირად იგი გამოისახება ძვრის ზედაპირის ცენტრის მიმართ აქტიური (დამძვრელი) ძალების მომენტების ტოლქმედით; **R** – განზოგადებული ზიდვისუნარიანობის საანგარიშო მნიშვნელობა (განსაზღვრული, გრუნტზე საიმედოობის γ_c კოეფიციენტის მხედველობაში მიღებით); უფრო ხშირად იგი გამოისახება ძვრის ზედაპირის ცენტრის მიმართ რეაქტიული (დამჭერი)ძალების მომენტების ტოლქმედით.



ნახ. 3.48. გრუნტის კაშხლების განიკვეთის ძირითადი სქემა
1–ზედა (სადაწნეო) წახნაგი; 2–ქვედა წახნაგი; 3–თხემი;
4–ბრმა; 5–წყალუჭონადი გრუნტი (შრე); 6–დეპრესიის მრუდი



ნახ. 3.49. ფერდოს მდგრადობის შემოწმების საანგარიშო სქემა:
1–გრუნტის კაშხლის ფერდო; 2–კაშხლის ძირი; 3–დეპრესიის მრუდი;
4–ძვრის წრიულცილინდრიანი ზედაპირი; 5–ზოგადი n-ური ნაკვეთური

3.3.2. ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ტექნიკური ექსპლუატაცია და გამოკვლევა

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ექსპლუატაციაში იგულისხმება ჰიდროკვანძში (ან ნაგებობებში) წყლის დონეებისა და ხარჯის მიზანშეწონილი და ეკონომიური მართვა, მათი ფუნქციით მინიჭებული მოვალეობის უწყვეტი და ნორმალური უზრუნველყოფა, უსაფრთხოებისა და მაქსიმალურად შესაძლო ხანგამძლეობის შენარჩუნებით.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების უწყვეტი მუშაობის უზრუნველყოფა წარმოადგენს მათი ტექნიკური ექსპლუატაციის მთავარ ამოცანას.

ნაგებობის ნორმალური ფუნქციონირების მოშლის მიზეზი შეიძლება იყოს: ა) სამშენებლო სამუშაოების უხარისხო შესრულება და პროექტით გათვალისწინებულ მოთხოვნათა გაუთვალისწინებლობა; ბ) ჰიდროკვანძის პროექტში, ბუნებრივი პირობების არასწორი შეფასება, მაგალითად, წყლის მოსალოდნელი ხარჯები, ფუძის გრუნტის ზიდვის უნარი, გრუნტის ფილტრაციული მახასიათებლები, წყალსაცავის ფორმირება (ფერდობების ჩამოშვავება), კატასტროფული ქარის მახასიათებლები და სხვ.; გ) ნაგებობების და მოწყობილობების თანდათანობითი ცვეთა (ფიზიკური დაძველება); დ) მათზე სტიქიური და განსაკუთრებული ზემოქმედება, რომლის გათვალისწინება პროექტში შეუძლებელი იყო; ე) საექსპლუატაციო პერსონალის არასწორი მოქმედება.

ნაგებობათა გამართული მუშაობის მოშლა შეიძლება იყოს სხვადასხვა. ზოგიერთი მათგანი უმნიშვნელოა, რომელსაც მიეკუთვნება ნაგებობის უმნიშვნელო ჯდომა, ბეტონში არაღრმა (დასაშვები) ბზარების წარმოშობა, უმნიშვნელო ფილტრაცია, საფარისა და მოსახვის მცირე დაზიანებები, საკეტების მანევრირების დროებითი შეფერხება, ადგილობრივი უმნიშვნელო გამორეცხვები და სხვ.

ასეთი დეფექტების ლიკვიდაცია, როგორც წესი, ხდება მოკლე დროში და მცირე დანახარჯებით.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებში შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ისეთ დაზიანებებს, რომლებმაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს მათი მუშაობის ეფექტი ან ხანგრძლივი დროით საერთოდ შეაჩეროს მისი ფუნქციონირება. ასეთ დაზიანებად ჩაითვლება ფლუტბეტის გამორეცხვის შედეგად რისბერმის დაშლა; მიწის კაშხლებში შეყურსული ფილტრაცია, კაშხლის ტანის ნაწილაკების გამოტანით; ბურჯების მკვეთრი დეფორმაცია, რომელმაც შეიძლება დააბრკოლოს საკეტების მანევრი; მიწისძვრით გამოწვეული ავარიები და სხვ.

ზოგჯერ, ერთი შეხედვით უმნიშვნელო დეფექტმა შეიძლება გარკვეული დროის შემდეგ გამოიწვიოს მნიშვნელოვანი არასასურველი შედეგები.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობებისა და კვანძების ნორმალური მუშაობის შესანარჩუნებლად საჭიროა მათზე მუდმივი და ყურადღებიანი მეთვალყურეობა, გამაფრთხილებელი და პროფილაქტიკური ღონისძიებების დროულად ჩატარების მიზნით.

ჰიდროკვანძის ან ნაგებობებზე სისტემატური დაკვირვებები უნდა მიმდინარეობდეს:

ა) სათავე კვანძის ზედა და ქვედა ბიეფში, აგრეთვე ყველა წყალსატარ და წყალსაგდებ ნაგებობებში წყლის დონეებზე;

ბ) წყალსატარ ნაგებობებში წყლის ხარჯებზე;

გ) ზედა და ქვედა ბიეფში გარეცხვებსა და ნატანის დალექვაზე, სამოსის, სამაგრების მოსახვისა და მოკეთებების ცვეთა-დაშლაზე;

დ) ფილტრაციულ მოვლენებსა და მათ მახასიათებლებზე (სიჩქარე, ხარჯი, წნევა, მექანიკური სუპოზი);

ე) ბზარების წარმოქმნაზე, მის განვითარებასა და შედეგებზე;

ვ) ბეტონის ნაგებობების ტემპერატურულ რეჟიმებზე;

ზ) ნაგებობების, მისი ელემენტების, ფერდობების ძაბვებზე, დეფორმაციებზე, ჯდომებზე.

ეს დაკვირვებები გათვალისწინებულია დროის გარკვეულ შუალედებში, რომლებიც განსაზღვრულია ნორმებით.

ნაგებობათა მდგომარეობის დასაფიქსირებლად საჭიროა პერიოდული დათვალიერება, რომელიც აუცილებელია ჩატარდეს: 1) გაზაფხულზე, წყალდიდობისა და ყინულის გასატარებლად ნაგებობათა მომზადების მიზნით; 2) ყინულსვლის გატარებისა და წყალდიდობის ხარჯების დაცემის შემდეგ; 3) შემოდგომაზე, ჰიდროკვანძების ზამთრისათვის მოსამზადებლად.

წელიწადში ერთხელ უნდა ჩატარდეს ყველა ნაგებობის დეტალური დათვალიერება, რომლის შედეგები შეიტანება ნაგებობის პასპორტში.

3.3.3. ბრუნტის კაშხლებიან ჰიდროკვანძებზე ჩასატარებელი ღონისძიებანი განსაკუთრებული პერიოდისათვის

ტერიტორიაზე, რომელზეც განთავსებულია სხვადასხვა დანიშნულების ჰიდროკვანძი ადგილობრივი მასალის (გრუნტის) კაშხლით, მოსალოდნელი მასიური გადაგურების საშუალებებით თავდასხმისას, პირველ რიგში, წყალსაცავი უნდა დაიცალოს. წყალსაცავის დაცლა განხორციელდება იმ სიღრმული ხვრეტების საშუალებით, რომლებიც ხშირად მოთავსებულია კაშხლის ტანის გარეთ ან იშვიათად კაშხლის ტანში. წყალსაცავის დაცლას შეიძლება დასჭირდეს, რამდენიმე დღე, რომლის განსაზღვრა ჩვენთვის უკვე ცნობილია. წყალსაცავის დაცლის შესახებ ხმაურიანი სიგნალით ან სხვა საშუალებით ინფორმირებულ უნდა იქნეს ქვედა ბიეფში მცხოვრები მოსახლეობა, რომ არ მოხდეს ადამიანთა მსხვერპლი.

შექმნილი სიტუაციიდან გამომდინარე, თუ საჭირო შეიქმნა კაშხლის მთლიანი დაშლა უნდა გვახსოვდეს, რომ ისეთი მასიური ტიპის ნაგებობისათვის, როგორიც გრუნტის კაშხალია, ეს რთული საკითხია.

ეფექტურია გრუნტის კაშხლის დაშლა მისი ზევიდან (თხემზე) წყლის გადადინებით. აქ გათვალისწინებულ უნდა იქნეს, რომ გრუნტის კაშხლის გადარეცხვა ხდება

ზევიდან თანდათანობით, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ქვედა ბიეფში მნიშვნელოვანი დატბორვა და ნგრევა.

წყლის გადაგდება კაშხლის თხემზე შეიძლება განხორციელდეს პროვოცირებული ტალღების წარმოქმნით წყალსაცავში (თუ იგი ბოლომდეა სავსე), რომელიც წარმოიქმნება ან წყალსაცავის აფეთქებით ან ფერდობის მეწყრული ჩამონგრევით წყალსაცავში (იხ. მეორე განყოფილება).

შესაძლებელია აგრეთვე წყალსატარ და წყალსაგდებ ნაგებობათა საკეტების ჩაკეტვა, რაც გამოიწვევს პირველ ეტაპზე წყალსაცავის ბოლომდე შევსებას და შემდეგ კაშხალზე წყლის გადადინებას. ეს პროცესი შეიძლება შედარებით ხანგრძლივი გამოდგეს, რაც დამოკიდებული იქნება ამ მომენტში მდინარის ხარჯზე, წყალსაცავში წყლის დგომის ნიშნულზე და საერთოდ, წყალსაცავის ტოპოგრაფიულ მახასიათებლებზე.

IV განყოფილება. ჰიდროელექტროსადგურები, ნაგებობათა შედგენილობა და ტიპები

4.1. ზოგადი ცნობები

ჰიდროენერგეტიკული რესურსები მიეკუთვნება განახლებადი რესურსების კატეგორიას. წყლის პოტენციური ენერგიის მსოფლიო მარაგი (ცხრ. 4.1) განისაზღვრება 3750 მლნ კვტ საშუალოწლიური სიმძლავრით ანუ 32900 მლრდ კვტ.სთ საშუალო წლიური ენერგიით.

ცხრილი 4.1.

წყლის პოტენციური ენერგიის მსოფლიო მარაგი

კონტინენტი ან ქვეყანა	საშუალო წლიური სიმძლავრე მლნ.კვტ	საშუალო წლიური ენერგია მლრდ. კვტ·სთ	პროცენტი მსოფლიო მარაგიდან	კილოვატი დედამიწის ზედაპირის ერთეულ $კმ^2$-ზე
ევროპა	240	2100	6,4	25
აზია	1340	11750	35,7	30
აფრიკა	700	6150	18,7	23
ჩრდილო ამერიკა	700	6150	18,7	34
სამხრეთ ამერიკა	600	5250	16,0	33
ავსტრალია	170	1500	4,5	19
სულ დედამიწაზე	3750	32900	100,0	28
საქართველო *				
ა) თეორიული მთელი ზედაპი-რული წყლების	26,08	228,5	0,69	372,5
ბ) დიდი	15,62	136,9	0,42	223,1

საშუალო და მცირე მდინარეთა (319-ის 26060 – დან) თეორიული რესურსი				

* Сванидзе Г.Г., Гагуа В.П., Сухишвили Э.В.. Возобновляемые энергоресурсы Грузии. Л. Гидрометеоиздат, 1987, с. 84.

ჰიდროენერგეტიკული დანადგარი (ჰედ) წარმოადგენს საწარმოს, სადაც ადგილი აქვს წყლის ნაკადის მექანიკური ენერგიის ელექტროენერგიად გარდაქმნას ან პირიქით. წყლის მექანიკურ ენერგიას ხშირადნ ჰიდრავლიკურ ენერგიას უწოდებენ.

ჰედი წარმოადგენს ცალკეული ჰიდროტექნიკური ნაგებობების, ენერგეტიკული და მექანიკური მოწყობილობების მიზნობრივ ერთობლიობას.

ჰედ-სნ სადაც ადგილი აქვს ჰიდრავლიკური ენერგიის ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნასნ ჰიდროელექტრული სადგური (ჰიდროელექტროსადგური, ჰიდროსადგური ან ჰესი) ეწოდება. ჰიდროსადგურის აუცილებელი მახასიათებელი ფიზიკური სიდიდეებია წყლის ხარჯი **Q** მ^3/წმ და თავმოყრილ დონეთა ვარდნა, ანუ დაწნევა **H**, მ.

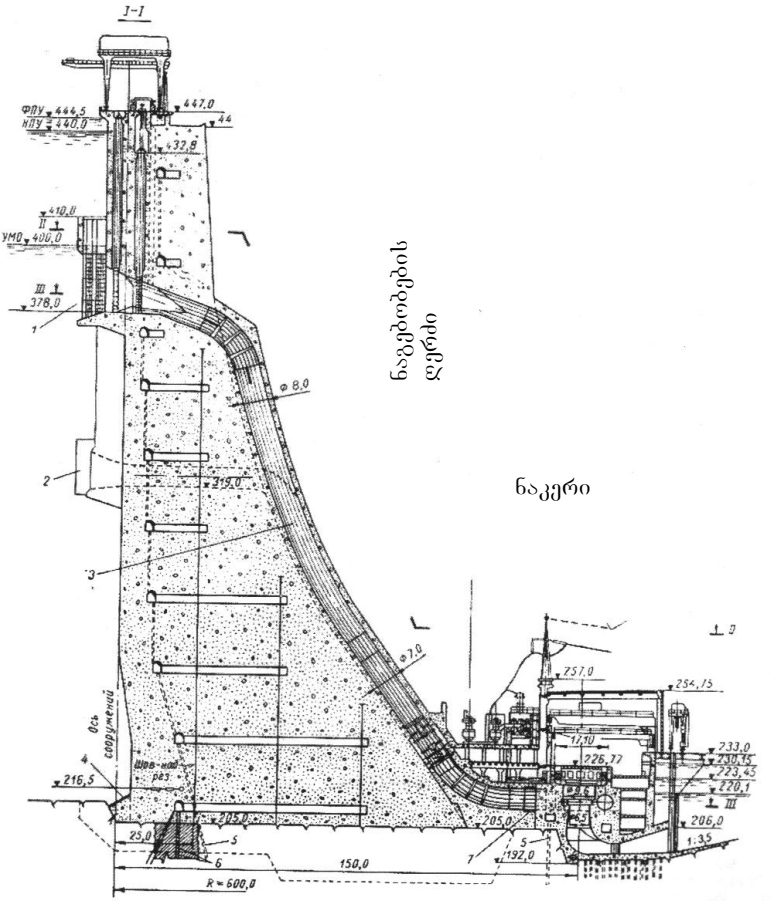
4.2. წყლის ენერგიის გამოყენების სქემები და ნაგებობათა შეთანწყობა

იმისდა მიხედვით, თუ როგორ (რა ნაგებობებით) იქმნება წნევა ჰესზე, ასხვავებენ ჰესის მოწყობის სამ სქემას: 1) კაშხალთან მდებარე ჰესი (ნახ. 4.1) (გუმათჰესი, ვარდნილი ჰესები და სხვ.), რომლის ერთ-ერთი სახესხვაობაა კალაპოტური ტიპის ჰესი (ჰესის შენობა კაშხალთან ერთად ან მის გარეშე, ქმნის სადაწნეო ფრონტს (ნახ. 4.2. მაგალითად ორთაჭალჰესი); 2) დერივაციული ჰესი, როცა დაწნევას ძირითადად ქმნის დერივაცია-გვირაბი (ნახ. 4.3) ან არხი, ან მილსადენი. მაგალითად შაორი ჰესი, ხადორი ჰესი, ხრამჰეს I და სხვ.; 3) შერეული ჰესი-კაშხალ-დერივაციული სქემა, რომელშიც დაწნევა იქმნება როგორც კაშხლით, ისე დერივაციით, მაგალითად, ენგურჰესი, ჟინვალჰესი და სხვ.

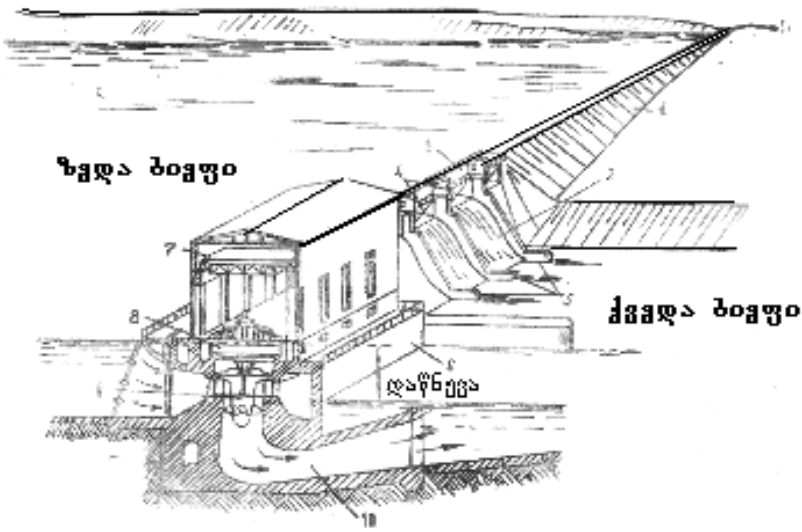
როდესაც ჰიდროელექტროსადგურის დაწნევის შესაქმნელად გამოყენებულია ამა თუ იმ ტიპის დერივაცია, მაშინ ჰესი შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს ნაგებობათა შემდეგი სამი მთავარი კვანძის სახით: 1) სამდინარო ანუ სათავე ჰიდროკვანძი – კაშხლის, წყალსაგდების, წყალმიმღების, როგორც აუცილებელი და ზოგჯერ სპეციალური ნაგებობების (სანაოსნო რაბის, თევზსავალის, ტივსავალის, თოშსავალის და სხვ.) შემადგენლობით; 2) დერივაცია – ღია არხის, დაწნევითი ან უდაწნეო გვირაბის, ანდა დერივაციული მილსადენის სახით. დერივაციაზე შეიძლება განთავსდეს რიგი ნაგებობებისა: სალექარი, რომელშიც ნაკადი განთა ნაკადი განთავი-

სუფლდება შეტივრივებული ნატანისაგან, რაბები – წყლის მიწოდების რეგულირებისათვის, ხიდები – გზების გადაკვეთის ადგილებში, ხელოვნური წყალსატარები, მაგალითად აკვედუკები – ხეობათა გადაკვეთის ადგილებში და სხვ.; 3) ძალური კვანძი – ჰიდროელექტროსადგურის შენობის, ძაბვის ამწევი და მანაწილებელი მოწყობილობების, სადაწნეო მილსადენების, სადაწნეო აუზის ან გამთანაბრებელი რეზერვუარის შედგენილობით. დამატებით ძალური კვანძის შემადგენლობაში შეიძლება შედიოდეს უქმი წყალსაგდებები, ენერგიის შთანმთქმელები, შემაუღლებელი ნაგებობანი (ვარდნილები, სწრაფმდენები) და სხვ.

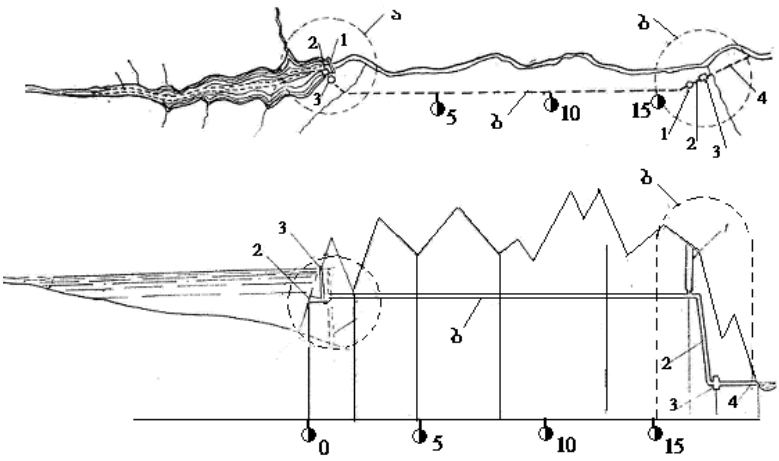
ცხადია, ჰესის სათავე კვანძის ნაგებობათა შედგენილობას განსაზღვრავს შეტბორვის სიმაღლე, ადგილობრივი ტოპოგრაფიული და გეოლოგიური პირობები, აგრეთვე მდინარეზე არსებული ნაოსნობის, სარწყავი წყლის მოთხოვნილების, ზემო და ქვემო ბიეფების რეჟიმების პირობები და სხვა დამატებითი ფუნქციები, რომლებიც ეკისრება კვანძს.



ნახ. 4.1. საიანო-შუშენის ჰესი მდ. ენისეიზე
1. წყალმიმღები; 2. დროებითი წყალმიმღები; 3. სატურბინო მილსადენი; 4. ჰიდროიზოლაცია; 5. სადრენაჟო ჭაბურღილი; 6. ჭაბურღილები ღრმა ცემენტაციისათვის; 7. დრეკადი სადენი

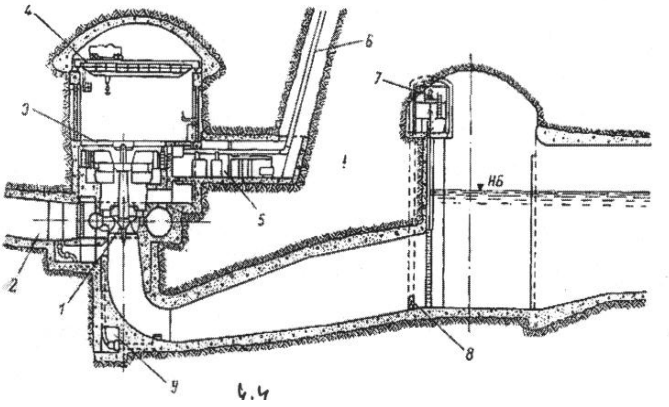


ნახ. 4.2. კალაპოტური ტიპის ენერგეტიკული ჰიდროტექნიკური კვანძის ჭრილი–ხედი
1–მიწის კაშხალი; 2–ბეტონის წყალსაშვები კაშხალი; 3–ხიდი; 4–საკეტები; 5–ბურჯები; 6–ჰიდროელექტროსადგურის შენობა; 7–ხიდური ამწე; 8–გენერატორი; 9– ტურბინა; 10– გამწოვი მილი.



ნახ. 4.3. სადაწნეო დერივაციანი შერეული ტიპის ჰიდროელექტროსადგურის ნაგებობათა განლაგების სქემა (გეგმა და გრძივი პროფილი)

ა– სათავე კვანძის ნაგებობანი: 1–კაშხალი; 2–წყალმიმღები; 3–საკეტების სამართავი შახტი; ბ–სადაწნეო დერივაციული გვირაბი; გ–ძალური კვანძის ნაგებობანი: 1–გამთანაბრებელი რეზერვუარი; 2–სადაწნეო მილსადენი; 3–ჰესის მიწისქვეშა შენობა; 4–უდაწნეო გამყვანი გვირაბი.



ნახ. 4.4. მიწისქვეშა ჰესი
1.ტურბინა; 2. სადაწნეო გვირაბი; 3. გენერატორი; 4. ამწე; 5. ელექტრო- მოწყობილობის სათავსი; 6. გენერატორიდან გამომყვანის შახტა; 7. ცელფერი; 8. გამწოვი მილი; 9. წყალშემკრები გალერეა.

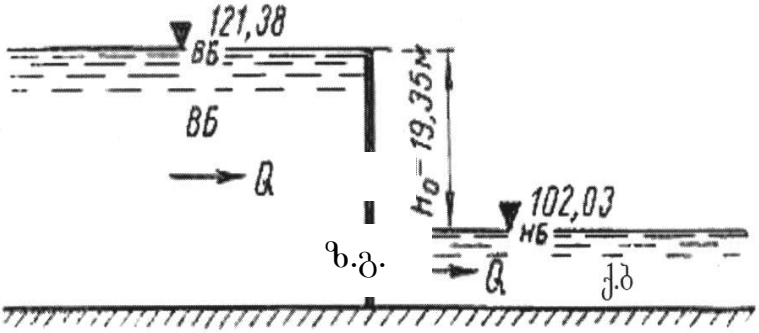
განარჩევენ ჰესის შენობის ღია (ნახ. 4.1), მაგალითად ხრამჰეს I, ზაჰესი, აწჰესი, რიონჰესი და მიწისქვეშა მოთავსებას (ნახ. 4.4). მაგალითად ენგურჰესი, ლაჯანურჰესი, ხრამჰეს II, ჟინვალჰესი. ამა თუ იმ სქემის მიზანშეწონილობა უნდა დასაბუთდეს გეოლოგიური, ტოპოგრაფიული და ეკონომიკური ფაქტორების გათვალისწინებით. ამასთან, მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული სამხედრო-თავდაცვითი მოსაზრებებიც. ჰესის შენობის მიწისქვეშა მოთავსებისას ხშირ შემთხვევაში გამოიყენება

უდაწნეო გამყვანი გვირაბი, ხოლო უფრო იშვიათად, დაწნევითი გვირაბი.

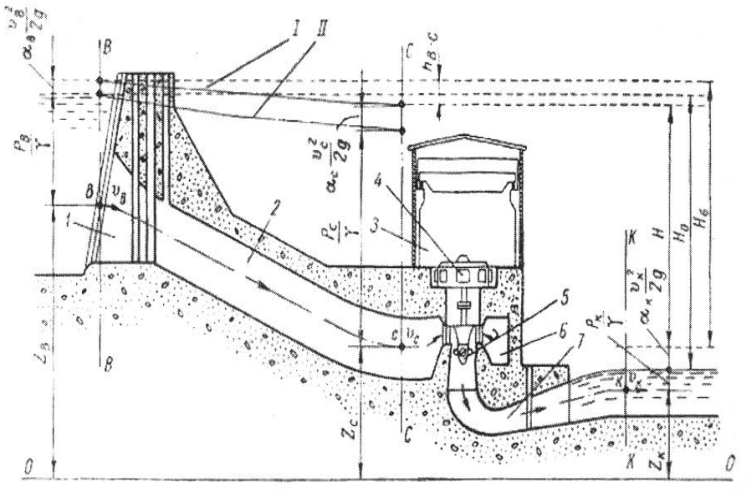
4.3. ჰესის სიმძლავრე და ენერგია

ჰესის გეომეტრიული ანუ სტატიკური დაწნევა განისაზღვრება, როგორც ზედა და ქვედა ბიეფებს შორის დონეთა სხვაობა (ნახ. 4.5)

$$H_0=\nabla_{ზ.ბ.}-\nabla_{ქ.ბ.}=121,38-102,03=19,35 \text{ მ}.$$



ნახ. 4.5. დაწნევის განსაზღვრის სქემა



ნახ. 4.6. ჰესის დაწნევის განსაზღვრა

I– ენერგიის წირი; II–პიეზომეტრიული წირი. 1. წყალმიმღები; 2. სატურბინო მილსადენი; 3. ჰესის შენობა; 4. გენერატორი; 5. ტურბინა; 6. სპირალური კამერა; 7. გამწოვი მილი

ჰიდროენერგეტიკულ გაანგარიშებებში ჰესის დაწნევა განისაზღვრება ფორმულით

$$\mathbf{H = H_0 - h_{B\text{-}C}},$$

სადაც $\mathbf{h_{B\text{-}C}}$ სითხის მოძრაობისას დაწნევის დანაკარგებია მისი აღების B-B კვეთიდან ტურბინის კამერის C-C კვეთამდე (ნახ. 4.6), რომელიც შედგება ადგილობრივი (შესვლაზე, გისოსის გავლაზე, მოხვეულებებზე და სხვ.) და სიგრძეზე დანაკარგების ჯამისაგან. ყველა ეს დანაკარგი, ენერგეტიკული დანიშნულების ჰიდროკვან-

ძისათვის, სტატიკური $\mathbf{H_0}$ დაწნევის 2-5%-ს, ზოგჯერ კი 10%-საც აღწევს, რომელიც უნდა დადგინდეს ჰიდრავლიკური გაანგარიშების საფუძველზე.

თუ საანგარიშო დაწნევა ჰესზე შეადგენს **H** მ-ს, ხოლო საანგარიშო (ჰესის მაქსიმალური) ხარჯი **Q** $მ^3/წმ$, მაშინ მუშაობას, რომელსაც ასრულებს წყალი 1 წმ-ის შუალედში ტოლი იქნება γQH კგძ/წმ, სადაც γ არის -1 $ტ/მ^3$. წყლის წონაა კგძ-ით (γ=1000 $კგძ/მ^3$). დროის ერთეულში შესრულებულ მუშაობას, როგორც ცნობილია, სიმძლავრე ეწოდება, რომლის განზომილება ტექნიკურ ერთეულთა სისტემაში არის 1 კვტ≈102 კგძ.მ/წმ, მაშინ, როცა ცნობილია **H** და **Q**-ს მნიშვნელობები, ტურბინის ღერძზე სიმძლავრე

$$N_ტ=\frac{\gamma Q H}{102}\eta_ტ=9{,}81QH\eta_ტ, \qquad (4.1)$$

სადაც $\eta_ტ$ ტურბინის მქ კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ტურბინის კონსტრუქციაზე, მის ზომებზე, დამზადების ტექნოლოგიურ ფაქტორებზე და სხვ. მცირე სიმძლავრის ტურბინებისათვის, რომელთა მუშა თვლის დიამეტრი 1 მ-ის ფარგლებშია, შეგვიძლია ავიღოთ $\eta_ტ$=0,88÷0,91, დიდი ტურბინებისათვის, რომელთა მუშა თვლის დიამეტრი 9÷10 მ-ია, შეიძლება ავიღოთ $\eta_ტ$≈0,94÷0,95. გენერატორის მომჭერებზე სადგურის ელექტრული სიმძლავრე

$$N_{აგრ}=N_{ტ}\eta_{გენ}=9,81QN\eta_{ა}. \qquad (4.2)$$

აქ $\eta_{გ}$ გენერატორის მქ კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა ზოგჯერ 0.98-საც აღწევს.

4.4. ჰიდრავლიკური ტურბინების მოქმედების პრინციპები და მათი კლასიფიკაცია

ჰიდრავლიკურ ტურბინებში ანუ ჰიდროტურბინებში ადგილი აქვს წყლის ენერგიის მექანიკურ ენერგიად გარდაქმნას. ჰიდროტურბინების მუშა თვლის ფრთებში წყალი შედის ერთი მხრიდან და გამოდის მეორე მხრიდან, მაშინ როდესაც წყლის ბორბალში წყალი გამოდის იქიდან, საიდანაც შედის.

კუთრი ანუ ერთი კილოგრამი წყლის ენერგია, რომელიც შედის ტურბინის მუშა თვალში, გამოისახება ბერნულის ფორმულით

$$E = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}, \qquad (4.5)$$

სადაც **z** არის ერთი კილოგრამი წყლის მდებარეობის ანუ კუთრი პოტენციური ენერგია, მუშა თვლიდან გამოსვლის სიბრტყის მიმართ; $\frac{P}{\gamma}$ – წნევის კუთრი პოტენციური ენერგია; $\frac{v^2}{2g}$ – წყლის კუთრი კინეტიკური ენერგია.

თუ ტურბინის მუშა თვალში წყალი შედის მხოლოდ კინეტიკური ენერგიის სახით და წნევის პოტენციური

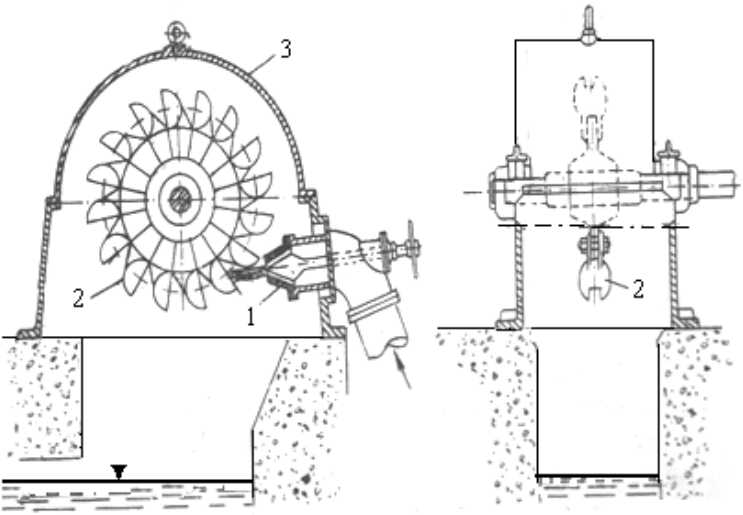
ენერგია ნულის ტოლია, მაშინ იგი მიეკუთვნება აქტიურ ანუ თავისუფალჭავლიან ტურბინას, ხოლო, თუ შემავალი წყლის პოტენციური ენერგია არ უდრის ნულს, მას რეაქტიული ანუ ზედმეტი წნევის ტურბინა ეწოდება. მაშასადამე, აქტიური ტურბინის მუშა თვალი ნაკადის კინეტიკურ ენერგიას გარდაქმნის მექანიკურ ენერგიად, ხოლო რეაქტიული – პოტენციურსა და კინეტიკურს.

ამჟამად აქტიური ტიპის ტურბინებიდან პრაქტიკაში გავრცელებულია მხოლოდ ჩამჩიანი ტიპის ტურბინები. ნაკლებადაა გავრცელებული ე.წ. ორჯერადი ანუ ბანკის ტიპის ტურბინები, რომლებიც მხოლოდ მცირე სიმძლავრეებისათვის გამოიყენება, და დახრილჭავლიანი ე.წ. ტიურგოს ტიპის ტურბინა, რომელიც გამოიყენება საშუალო და მცირე სიმძლავრეებისათვის.

აქტიური ჩამჩიანი ტურბინა (ნახ. 4.7) ძირითადად შედგება მიმმართველი აპარატისა 1 და მუშა თვლისაგან 2.

წყლის ნაკადს აძლევს საჭირო მიმართულებას მიმმართველი აპარატი, რომელსაც ხშირად საქშენს უწოდებენ. საქშენის ნემსას გადაადგილებით ხდება ტურბინის ხარჯის ანუ სიმძლავრის რეგულირება, მომხმარებლის (სისტემის) მოთხოვნილების შესაბამისად. ტურბინის მუშა თვალი წარმოადგენს წირზე თანაბრად განლაგებულ ჩამჩებს. თოთოეული ჩამჩა ორი ერთნაირი ნახევარჩამჩისგან შედგება. საქშენიდან გამოსული მრგვალი კვეთის ჭავლი ნახევარჩამჩების დანისებრი შეერ-

თებით ორ თანაბარ ნაწილად იშლება, გარსშემოედინება ჩამჩის ნახევრებს და გადასცემს მას ენერგიას. ტურბინას აქვს გარსაცმი 3, ლილვი და საკისრები.

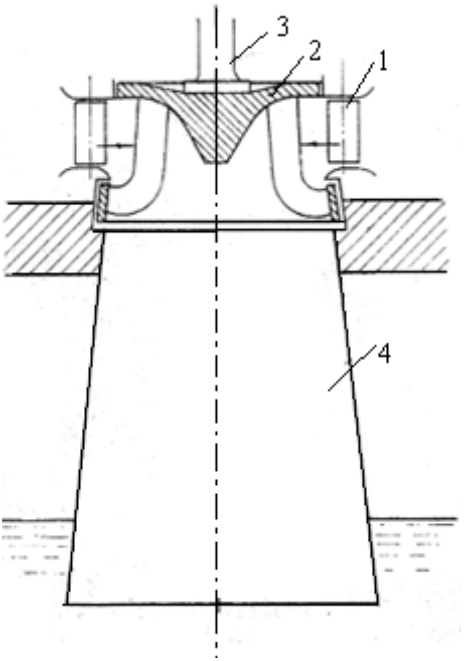


ნახ. 4.7. ჩამჩიანი ტურბინების სქემა
1– საქშენი (მიმმართველი აპარატი); 2–მუშა თვალი;
3–გარსაცმი.

რეაქტიული ტურბინის ძირითადი ნაწილებია: მიმმართველი აპარატი, მუშა თვალი და გამწოვი მილი.

რეაქტიული სისტემის ტურბინებიდან პრაქტიკაში უფრო გავრცელებულია შემდეგი ტიპები:

1. რადიალურ–ღერძული;
2. პროპელერის;
3. მბრუნავფრთიანი;
4. დიაგონალური.



ნახ. 4.8. რადიალურ-ღერძული ტურბინის მოქმედების სქემა
1– მიმმართველი აპარატი; 2– მუშა თვალი; 3– ლილვი; 4– გამწოვი მილი

ნახ-ზე 4.8 მოცემულია რადიალურ-ღერძული ტურბინის მოქმედების პრინციპული სქემა. აქ რადიალური მიმმართველი აპარატიდან 1 წყალი შედის მუშა თვალში 2 ტურბინის ღერძის 3 მართობულ სიბრტყეებში და გამოდის ღერძის მიმართულებით. შემდეგ წყალი შედის გამწოვ მილში 4, საიდანაც ენერგია დაკარგული გადის ქვედა ბიეფში. რადიალურ-ღერძული ტურბინის საკმაოდ რთული მოხაზულობის ფრთები ხისტადაა დამაგრებული მუშა თვლის შიგა და გარე ფერსოებზე.

ზოგადად ჰიდროტურბინა შეიძლება იყოს ჰორიზონტალური ან ვერტიკალური ლილვით, რომელსაც შესაბამისად ეწოდება ჰორიზონტალური ან ვერტიკალური ჰიდროტურბინა.

თუ რეაქტიული ჰიდროტურბინის სიმძლავრე დაახლოებით 5 000 კვტ-ს აღემატება, უფრო ეკონომიკურია იგი მხოლოდ ვერტიკალური ღერძით დამზადდეს. უფრო ნაკლები სიმძლავრის რეაქტიული ტურბინა შეიძლება დამზადდეს როგორც ჰორიზონტალური, ისე ვერტიკალური ლილვით.

ადრეულ წლებში ჩამჩიანი ტურბინები, როგორც წესი, მზადდებოდა ჰორიზონტალური ლილვით ბოლო წლებში, საშუალო და დიდი სიმძლავრის ტურბინები ხშირად მზადდება ვერტიკალურღერძიანი, რომელიც კონკრეტულ პირობებში რიგი უპირატესობით გამოირჩევა.

თუ **N≈5** ათასი კვტ, მაშინ გენერატორის მქ კოეფიციენტი $\eta_г$**=0,95÷0,96**, თუ **N>50** ათას კვტ. $\eta_г$**=0,97÷0,98;** $\eta_а$ – აგრეგატის მქ კოეფიციენტი.

$$\eta_а=\eta_т\eta_г.$$

მიახლოებითი გაანგარიშებისას, შეგვიძლია ავიღოთ

$$N=aQH \text{ კვტ}. \qquad (4.3)$$

მცირე სიმძლავრის აგრეგატებისათვის **a** აიღება 7,8÷8,0; საშუალო სიმძლავრის აგრეგატებისათვის 8,2÷8,4, ხოლო ზემძლავრი აგრეგატებისათვის 8,6÷8,8.

ჰიდროელექტროსადგურის მიერ გამომუშავებული ენერგია შეიძლება გამოსახულ იქნეს, როგორც სიმძლავრის და დროის ნამრავლი

$$\mathbf{E = NT}. \qquad (4.4)$$

ელექტროენერგეტიკაში ენერგიის ერთეულად ჩვეულებრივ მიღებულია კილოვატსაათი (კვტ·სთ).

4.5. ჰესის ტურბინების ავტომატური რეგულირება

ჰიდროელექტროსადგურის ტურბინა და გენერატორი ერთმანეთთან უშუალოდ არის შეერთებული. როგორც წესი, ჰიდროელექტროსადგურებში ძირითადად გამოიყენება ცვლადი დენის სამფაზა გენერატორები, რომელთა ხარისხიანი მუშაობის ძირითადი პირობა დენის სიხშირის მუდმივობა ან რაც იგივეა, ბრუნთა რიცხვის მუდმივობა. ტურბინა ქმნის ბრუნვით მომენტს და აბრუნებს გენერატორის როტორს. გენერატორში მისი დატვირთვისას იქმნება წინააღმდეგობის მომენტი, ე.ი. გენერატორის დატვირთვის შეცვლისას ტურბინის სიმძლავრე რჩება იგივე, მაშინ აგრეგატის ბრუნთა რიცხვიც შეიცვლება. კერძოდ, თუ გენერატორს დატვირთვა მოემატა, ბრუნთა რიცხვი (დენის სიხშირე) კლებას დაიწყებს და პირიქით. ტურბინის სიმძლავრე ძირითადად დამოკიდებულია დაწნევასა და წყლის ხარჯზე, ამიტომ სიმძლავრე შეიძლება შეიცვალოს ანუ შესაბამისობაში მოვიდეს მომხმარებელთან, ერთ-ერთი მათგანის ცვლილებით. კერძოდ, უფრო მოსა-

ხერხებელია ხარჯის შეცვლა, რომელსაც ასრულებს ტურბინის სიჩქარის რეგულატორი. აგრეგატის დატვირთვის მოხსნისას ტოლობა ტურბინისა და გენერატორის მომენტებს შორის ირღვევა, რის გამოც როტორის ბრუნთა რიცხვი (სიხშირე) იწყებს ზრდას, შესაბამისად ავტომატური რეგულატორი იწყებს ტურბინის მიმმართველი აპარატის მიკეტვას და პირიქით. აგრეგატის ბრუნთა რიცხვის ნაზრდის ფარდობას მის ნორმალურ ბრუნთა რიცხვთან, რეგულირების დროებითი უთანაბრობის კოეფიციენტი ეწოდება და აღინიშნება **β**-თი, რომლის მნიშვნელობა 40%-ზე მეტი მიუღებელია, ე.ი.

$$\beta = \frac{\mathbf{n}_{\text{მაქ}} - \mathbf{n}}{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{\Delta n}}{\mathbf{n}} \leq \mathbf{0{,}4 = 40\%}\,. \qquad (4.5)$$

თუ აგრეგატის როტორის ინერციის მომენტი მცირეა, მაშინ დატვირთვის სწრაფი მოხსნისას მისი ბრუნთა რიცხვი უფრო სწრაფად გაიზრდება, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როდესაც როტორს დიდი ინერციის მომენტი ექნება. ამიტომ რეგულირების დროებითი უთანაბრობის **β** კოეფიციენტი დასაშვებ სიდიდეს რომ არ აღემატოს, პირველ შემთხვევაში ტურბინის მიმმართველი აპარატი უფრო ჩქარა უნდა დაიკეტოს, ვიდრე მეორე შემთხვევაში.

ტურბინის მიმმართველი აპარატის უფრო ჩქარი დაკეტვა იწვევს დანადგარში მეტ ჰიდრავლიკურ დარტყმას, რომლის მნიშვნელობა ნორმებით დასაშვებ სიდიდეს არ უნდა აღემატებოდეს.

თუ ტურბინის სტატიკური დაწნევა $\mathbf{H_0}$ იყო, ხოლო სრული დატვირთვის სწრაფი მოხსნის შემდეგ მიმმართველი აპარატის სწრაფი დაკეტვის შედეგად $\mathbf{H_{max}}$ გახდა, მაშინ დაწნევის მაქსიმალური ფარდობითი ზრდა ტურბინის მიმმართველი აპარატის წინ, რომელიც ξ აღინიშნება, იქნება

$$\zeta = \frac{\mathbf{H_{max} - H_0}}{\mathbf{H_0}} . \qquad (4.6)$$

ეკონომიკური გამოთვლების შედეგად ამჟამად დადგენილია შემდეგი ნორმები:

ζ=0,15÷0,3, როდესაც ტურბინის დაწნევა 100 მეტრს აღემატება;

ζ=0,3÷0,5, როდესაც დაწნევა 100÷40 მ-ის ფარგლებშია;

ζ=0,5÷0,7, როდესაც დაწნევა 40 მ-ზე ნაკლებია (მეტი სიდიდე აიღება ნაკლები დაწნევის დროს).

დატვირთვის სწრაფი მომატების შემთხვევაში, ტურბინის მიმმართველი აპარატი ჩქარა უნდა გაიღოს. ტურბინის მიმმართველი აპარატის ჩქარი გაღება იწვევს დანადგარში უარყოფით ჰიდრავლიკურ დარტყმას, ე.ი. ტურბინის დაწნევის შემცირებას. თუ მიმმართველი აპარატის ჩქარი გაღებისას უქმი სვლის გაღებიდან მთლიანი დატვირთვის შესაბამის გაღებამდე ტურბინის დაწნევა $\mathbf{H_{min}}$ გახდა, მაშინ დაწნევის მაქსიმალური ფარდობითი

შემცირება, რომელიც **η**-თი აღინიშნება, გამოითვლება ფორმულით

$$\eta = \frac{H_0 - H_{min}}{H_0}. \qquad (4.7)$$

მისი მნიშვნელობა 60%-ს არ უნდა აღემატოს, ე.ი. $\eta \le 0{,}6$. ამ შემთხვევაში იმის მიხედვით, თუ რა სიდიდის ინერციის მომენტი აქვს აგრეგატის როტორს, მისი ბრუნთა რიცხვი გარკვეულ სიდიდემდე შემცირდება. თუ ამ ბრუნთა რიცხვს აღვნიშნავთ n_{min}-ით, მაშინ ბრუნვის შემცირების სიდიდე $\Delta n = n - n_{min}$ იქნება და რეგულირების დროებითი უთანაბრობის კოეფიციენტი, მთელი დატვირთვის სწრაფი მომატებისას, იქნება

$$\beta' = \frac{n - n_{min}}{n} = \frac{\Delta n}{n}. \qquad (4.8)$$

4.6. ჰიდროაგრეგატების ექსპლუატაცია ნორმალურ და განსაკუთრებულ შემთხვევაში

ჰიდროაგრეგატების, მათი სიჩქარის ავტომატური რეგულატორისა და დამხმარე მოწყობილობების მონტაჟის დამთავრების შემდეგ ტარდება მათი მუშაობის მოწესრიგება და მისაღები გამოცდები. თუ გამოცდის შედეგები დამაკმაყოფილებელი აღმოჩნდა, მაშინ მთელი მოწყობილობა საექსპლუატაციოდ გადაეცემა. გამოცდები უნდა ჩატარდეს ჰესის საექსპლუატაციოდ გადაცემის შემდეგ, ერთი წლის განმავლობაში.

მისაღები გამოცდები გულისხმობს მოწყობილობების დათვალიერებას გასინჯვას და გამოცდას სპეციალური ნორმებით განსაზღვრული პროგრამით.

გამოცდები ტარდება შემდეგი თანამიმდევრობით:

1. გამოცდები, როდესაც ჰიდროტურბინისა და მისი დამხმარე მოწყობილობის არც ერთი ნაწილი არ იმყოფება წყლის დაწნევის ქვეშ;
2. გამოცდები, როდესაც ჰიდროტურბინა იმყოფება დაწნევის ქვეშ, მისი მიმმართველი აპარატი კი დაკეტილია;
3. გამოცდები ჰიდროაგრეგატების უქმი მუშაობისას;
4. გამოცდები ჰიდროაგრეგატების დატვირთვისას.

როდესაც ჰიდროაგრეგატის მუშაობა ყოველმხრივ მოწესრიგებულია და იგი დასაშვები დაწნევის დროს ნომინალურ დატვირთვაზე მუშაობს, შესაძლებელი ხდება მისი გამოცდა დატვირთვების სწრაფი მოხსნისა და მომატების შემთხვევისათვის, ე.ი. რეგულირების გარანტიების გასასინჯად.

ყველა გამოცდის დადებითი შედეგის მიღების შემდეგ ჰიდროაგრეგატი განუწყვეტლივ სრული დატვირთვით უნდა მუშაობდეს 72 საათის განმავლობაში შეუფერხებლად და თითო საათით სრული დატვირთვის 25,5% და 75%-ით. აგრეგატის ყველა მექანიკური და ელექტრული მოწყობილობის ტემპერატურა უნდა იყოს დასაშვებ ზღვრებში.

ნატურაში ტურბინის ნამდვილი განსაზღვრა მოითხოვს მისი ენერგეტიკული გამოცდის ჩატარებას. ამ დროს უნდა დადგინდეს ტურბინის მარგი ქმედების კოეფიციენტსა და სიმძლავრეს შორის დამოკიდებულება საანგარიშო დაწნევისა და ნორმალურ ბრუნთა რიცხვისათვის. ტურბინის მქ კოეფიციენტი ფორმულით ზუსტად რომ განისაზღვროს

$$\eta = \frac{102N}{\gamma Q H} \qquad (4.9)$$

საჭიროა ზუსტად გაიზომოს **H** დაწნევა, **Q** წყლის ხარჯი და **N** სიმძლავრე. ჰიდროელექტროსადგურის ექსპლუატაციისას ერთ-ერთი ძირითადი საკითხია ისე მილსადენებისა და ჰიდროტურბინების წყლის ნატანითა და კავიტაციით ცვეთის შესწავლა, რათა სწორად დაიგეგმოს ცვეთის საწინააღმდეგო ღონისძიებები.

მცირე ამპლიტუდის მაღალი სიხშირის რყევებს ჩვეულებრივ, ვიბრაცია ეწოდება. ასეთი რყევები ძირითადად დამახასიათებელია მანქანების და მათ შორის ჰიდროაგრეგატებისათვის. ვიბრაციები ჰიდროაგრეგატებში შეიძლება იყოს, როგორც განივი ისე ვერტიკალური. ვიბრაციები ჰიდროაგრეგატებისათვის დასაშვებია, მაგრამ მისი სიდიდე არ უნდა აღემატებოდეს ნორმით დადგენილ მაქსიმალურ სიდიდეს.

ჰიდროაგრეგატების დამყარებული მოძრაობისას, ე.ი. მუდმივი რიცხვითი ბრუნვის დროს, მისი ვიბრაციის მი-

ზეზი შეიძლება იყოს მექანიკური, ჰიდრავლიკური და ელექტრული ძალები, რომლებიც სათანადო მეთოდიკით ცალ-ცალკე უნდა იქნეს შესწავლილი.

განსაკუთრებულ შემთხვევებში, ჰიდროელექტროსადგურის საერთო დანიშნულების ნაგებობების ფუნქციის ხელოვნურად მოშლა განხილული იყო წინა თავებში. აქ მოკლედ შევჩერდეთ ჰესის სპეციალური დანიშნულების ნაგებობისა და მოწყობილობების საექსპლუატაციო მახასიათებლების ხელოვნურად მოშლაზე.

ჰიდროელექტროსადგურის ძალური კვანძი არატიპურ (ინდივიდუალურ) ნაგებობათა და მოწყობილობათა შეთანწყობაა, ამიტომ განსაკუთრებულ შემთხვევაში მისი ფუნქციის ეფექტურად მოშლა, აგრეთვე ინდივიდუალურია და სპეციალისტისაგან მოითხოვს მაღალ კვალიფიკაციას. მარტივია თუ გენერატორს გარკვეული დროით ვამუშავებთ გაქცევაზე ანუ თუ დატვირთვას მოვხსნით გენერატორზე და მას ვამუშავებთ წყლის ნაკადის ქვეშ, მაშინ მისი ბრუნთა რიცხვი ნომინალურთან შედარებით ≈2-ჯერ გაიზრდება. ამ ბრუნთა რიცხვით გენერატორი მწყობრიდან გამოდის ≈1÷3 წუთში, რომლის ადგილზე აღდგენა თითქმის შეუძლებელია და მოითხოვს დიდ დროს. თუ შესაძლებელია ტურბინის მიმმართველი აპარატის უფრო სწრაფად დაკეტვა, ვიდრე ეს საექსპლუატაციო წესებითაა განსაზღვრული, მაშინ

სატურბინო მილსადენში წნევა სწრაფად მოიმატებს და განხორციელდება სწრაფი დადებითი ჰიდრავლიკური დარტყმა, რომელიც შეიძლება პირდაპირიც გახდეს, თუ დაკეტვის დრო **T≤2L/V (L** არის სატურბინო მილსადენის სიგრძე, **V** – ტალღის გავრცელების სიჩქარე V≈1000 მ/წმ). ასეთმა დარტყმამ უნდა გამოიწვიოს მილსადენის გახეთქვა, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, თუ მისი სისქე შემცირებულია ნატანის ცვეთით ან კოროზიით. ჰიდრავლიკური დარტყმით გამოწვეულმა წნევის ნაზრდმა შეიძლება გამოიწვიოს ანკერული საყრდენების მდგრადობის მოშლაც, განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, როდესაც გეგმაში ან ვერტიკალურ სიბრტყეში სატურბინო მილსადენი მკვეთრად გადატყდება.

V განყოფილება.

ჰიდროტექნიკური ნაგებობები მელიორაციულ სისტემაში

5.1. მორწყვითი მელიორაციის ზოგადი საკითხები

წყალი ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ფაქტორია ნიადაგის ნაყოფიერებისათვის. ნიადაგი მიწის ზედაპირის ის ფენაა, რომელზეც სხვადასხვა სახის მცენარეული იზრდება. იგი წარმოიშობა მთის ქანების ზედაპირული ფენების დაშლით, წყლის, ჰაერისა და სხვადასხვა სახის მიკროორგანიზმების ზემოქმედების შედეგად. ნიადაგის მთავარი მახასიათებელი თვისებაა მისი ნაყოფიერება, რომელიც განაპირობებს სასოფლო-სამეურნეო წარმოების დონეს, ადამიანებისათვის საჭირო პროდუქტებით უზრუნველყოფის საქმეს.

ბუნებაში სხვადასხვაგვარი ნიადაგები გვხდება. ეს სხვადასხვაობა გაპირობებულია ნიადაგის მინერალური შედგენილობით და ე.წ. ჰუმუსის რაოდენობით, რომელიც ნიადაგში წარმოიშობა ორგანული ნარჩენების, უმთავრესად მცენარეულის დაშლისა და მიკროორგანიზმების გავლენით განვითარებული სინთეზური პროცესების შედეგად.

ნიადაგების პირველი კლასიფიკაცია მოცემული იყო რუსი მეცნიერის ვ. დოკუჩაევის მიერ. აკადემიკოს მ. საბაშვილს თავის ნაშრომში „საქართველოს ნიადაგები“,

მოცემული აქვს ნიადაგების კლასიფიკაცია, რომლის მიხედვითაც საქართველოს ნიადაგები 14 ტიპისა და 5 ქვეტიპისგან შედგება. მათ შორისაა წითელმიწა, შავმიწა, ყავისფერი, წაბლა ნიადაგები და სხვ.

მცენარის ნორმალური განვითარებისათვის ნიადაგს უნდა ჰქონდეს ნორმალური ტენიანობა, რომლის დეფიციტის დასაფარავად მორწყვაა საჭირო. ნიადაგში არის ისეთი მინიმალური ტენიანობა, რომელიც მცენარის ფესვთა სისტემისათვის მიუწვდომელია. ასეთ ტენიანობას, ჭკნობის ტენიანობა ან ჭკნობის კოეფიციენტი ეწოდება. მეორე მხრივ, შესაძლებელია ნიადაგის ყველა ფორი მთლიანად იყოს შევსებული წყლით. მაშინ ნიადაგის მაქსიმალურ ტენიანობასთან გვაქვს საქმე. ამ შემთხვევაში წყლის იმ რაოდენობას, რომელიც ამ ფორებშია მოქცეული, ნიადაგის ზღვრული ტენტევადობა ეწოდება და იგი დამოკიდებულია ნიადაგის მექანიკურ შედგენილობაზე, მის სტრუქტურაზე, მარილების რაოდენობაზე და სხვ. ცხრილში 5.1 მოცემულია ტენიანობის სიდიდეები სხვადასხვა მექანიკური შედგენილობის ნიადაგებისათვის (%-ობით აბსოლუტურად მშრალი ნიადაგის წონასთან შეფარდებით)

მაქსიმალური ტენიანობის პირობებში ნიადაგი გუავალი ხდება თითქმის ყველა სახის ტრანსპორტისათვის. ნიადაგის ოპტიმალური ტენიანობის მნიშვნელობა, რომლის დროსაც მაქსიმალური მოსავლის მიღებაა შესაძ-

ლებელი სხვადასხვა კულტურებისათვის, მოცემულია ცხრილში. 5.2

ცხრილი 5.1

ნიადაგები	ჭკნობის ტენიანობა	ზღვრული ტენიანობა
მსხვილი ქვიშები	0,9	23,4
წვრილი ქვიშები	2,6	28,0
მსუბუქი ქვიშები	4,8	33,4
მძიმე ქვიშები	9,7	47,2
მძიმე თიხები	16,2	64,6

ცხრილი 5.2

კულტურების დასახელება	ოპტიმალური ტენიანობა. პროცენტობით ზღვრული ტენტევადობიდან
მარცვლეული	20-40
პარკოსნები	40-50
ტექნიკური მცენარეები	50-60
კომბოსტო	70-85
კიტრი	60-85
ლობიო	65-75
ხახვი	75-80

მორწყვის ნორმა ეწოდება წყლის იმ რაოდენობას, რომელიც მიეწოდება ერთ ჰექტარ ფართობს ერთი რწყვის დროს. მისი ოდენობა სხვადასხვა კულტურისათვის სხვადასხვაა.

მორწყვის ნორმა ითვალისწინებს საჭირო ტენიანობის შექმნას ნიადაგის აქტიურ ფენაში, რომლის სიღრმე დამოკიდებულია როგორც თვით კულტურაზე, ისე ნიადაგის მექანიკურ შედგენილობაზე. ასე, მაგალითად, ნიადაგის აქტიური ფენის საშუალო სიღრმედ ითვლება:

ბოსტნეული კულტურებისათვის – 0,3÷0,5 მ;

მინდვრის კულტურებისათვის - 0,6÷0,8 მ;

მრავალწლიანი მცენარეებისათვის – 0,7÷0,8 მ.

ამჟამად პრაქტიკაში ყველაზე მეტად გავრცელებულია ზედაპირული მორწყვა, რომელიც ხორციელდება მიშვებით, დროებითი სარწყავი ქსელის საშუალებით. გარდა აღნიშნულისა, გავრცელებულია მორწყვა დაწვიმების წესით და ნიადაგქვეშა მორწყვა. თითოეულს აქვს თავისი დადებითი და უარყოფითი მხარეები და შესაბამისად, გამოყენების სფერო.

გარდა მორწყვის ნორმისა, არსებობს მეორე ცნება – სარწყავი ნორმა, რომელიც განსაზღვრავს წყლის იმ რაოდენობას, რაც სჭირდება მცენარეს მთელი ვეგეტაციის პერიოდში. მორწყვის რაოდენობა ვეგეტაციის პერიოდში სხვადასხვა კულტურისათვის სხვადასხვაა; ასე მაგალითად, ბოსტნეულისათვის 5÷8ჯერ, პურეულისათვის 3÷4ჯერ, ბაღებისათვის 3÷6ჯერ, ბამბისათვის 8÷10 – ჯერ. ადგილობრივი პირობების მიხედვით მორწყვის პერიოდებს შორის ხანგრძლივობა საშუალოდ 5÷12 დღემდე მერყეობს. საშუალოდ სარწყავი ნორმა სხვადასხვა კულტურისათვის ცვალებადია. მაგალითად მარცვლეულისათვის იგი შეადგენს 2700÷3500 მ^3/ჰა, ბოსტნეულისათვის – 2000÷5000 მ^3/ჰა, ბამბისათვის – 4500÷7000 მ^3/ჰა-ს. თუ ნიადაგის აქტიურ ფენაში მორწყვის შედეგად შექმნილ

წყლის მარაგს, რომელიც ამ ნიადაგის ოპტიმალურ ტენტევადობას შეესატყვისება, ავღნიშნავთ W_1-ით, მორწყვის დაწყებამდე არსებულ მარაგს კი W_0-ით, მაშინ მორწყვის ნორმა ფართობის ერთეულზე უნდა იყოს

$$m_1=W_1-W_0. \quad (5.1)$$

გრუნტის ტენიანობა უნდა განისაზღვროს ტენსაზომით, რომლითაც ზუსტდება რწყვის ვადები. სარწყავ სისტემებზე განთავსდება მანაწილებელი და სარეგულაციო ნაგებობანი.

5.2. მდინარიდან წყლის აღება და მისი გამოყენება სარწყავად

მიწების მელიორაცია ანუ გაუმჯობესება მოიცავს საინჟინრო, აგროტექნიკურ სატყეო-ტექნიკურ ღონისძიებათა ფართო წრეს. იგი ტარდება გამოყენებული და ახლად ასათვისებელი ტერიტორიების კეთილმოწყობისათვის.

საინჟინრო მელიორაცია წარმოადგენს რაციონალურად ორგანიზებულ მიწათმოქმედების შემადგენელ ნაწილს, რომელიც ნიადაგის ფიზიკური და ქიმიური თვისებების შესაცვლელად იყენებს წყლის ფაქტორს. იგი აგროტექნიკასთან ერთად, ხელს უწყობს სასოფლო-სამეურნეო კულტურების უხვი და მყარი მოსავლის მიღებას. საინჟინრო მელიორაციას მიეკუთვნება: მიწების მორწყვა ანუ ირიგაცია, მიწების დაშრობა ღია არხებითა და მიწისქვეშა დრენაჟებით, მიწის მასივების დაცოცების

(მეწყრების) და ნიადაგის წალეკვის ანუ ეროზიის წინააღმდეგ ბრძოლა.

ჰიდრომელიორაციული ნაგებობები წარმოადგენს ჩვეულებრივ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს, რომელთაც სხვადასხვა დანიშნულება აქვს. ეს ნაგებობები შეიძლება დავყოთ ორ ძირითად ჯგუფად: 1) სამდინარო და 2) შიგასასისტემო ანუ ქსელის ნაგებობებად.

ზოგად შემთხვევაში, სამდინარო ანუ სათავე ნაგებობათა ჯგუფში შეიძლება შედიოდეს (ნახ. 5.1): ა) წყალსაშვები და ყრუ კაშხალი, სანაპირო ჯებირები; ბ) წყალმიმღები ნაგებობა (რეგულატორი) ან წყალსაწევი დანადგარი; გ) ჰიდროელექტროსადგურის ნაგებობები; დ) სანაოსნო რაბი, ტივსავალი, მორსაშვები; ე) ნაგებობები ნატანთან საბრძოლველად (სალექარი, გამრეცხი, ჭავლმიმართველი სისტემები); ვ) თევზსავალი და თევზამწები; ზ) ნაპირსამაგრი და გამასწორებელი ნაგებობები.

აღნიშნულ ნაგებობათა საერთო კომპლექსს, რომლებიც ურთიერთშორის დაკავშირებულია როგორც დანიშნულებით, ისე მოძრაობის პრინციპით, სამდინარო ჰიდროკვანძი ეწოდება.

ჰიდროსისტემა ეწოდება წყალსამეურნეო ობიექტების მთელ ტერიტორიაზე განლაგებულ ყველა ჰიდრონაგებობისა და ჰიდროკვანძის სისტემას.

შიგასასისტემო ანუ ქსელის ნაგებობებს მიეკუთვნება: ა) მარეგულირებელი ნაგებობები – წყალგამშვები რაბები

(ანუ რეგულატორები), წყალგამყოფები, წყალსაზომები, რომელთა დანიშნულებაა წყლის ხარჯების რეგულირება, შემტბორავი რაბები წყლის დონეთა რეგულირებისათვის, წყალსაგდები რაბები წყლის გადასაგდებად სარწყავი სისტემის ავარიის ან ჭარბი წყლის მოვარდნის შემთხვევაში; რაბები ერთიანდება საერთო კომპლექსში, რომელსაც რაბების კვანძი ეწოდება (ნახ. 5.2);

ბ) წყალსატარები – არხები, აკვედუკები, დიუკერები, გვირაბები, ღარები, მილსადენები, ღვარსაშვები;

გ) ბიეფების შემაუღლებელი ნაგებობები – ვარდნილები, სწრაფდენები, კონსოლები, მილები და სხვ.;

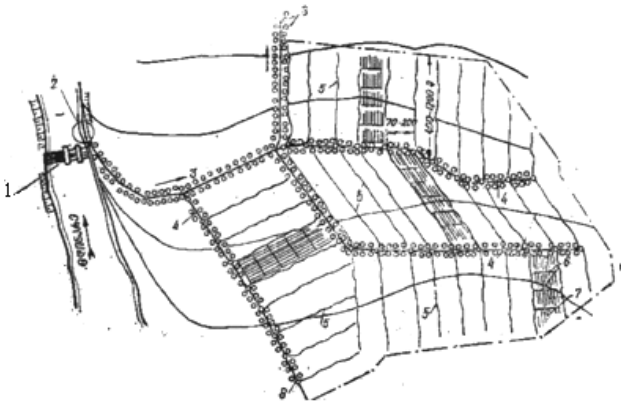
დ) სალექარი და გამრეცხი ნატანის დასალექად და მოსაცილებლად;

ე) სანაოსნო რაბები და ხე-ტყის დასაცურებელი ნაგებობები;

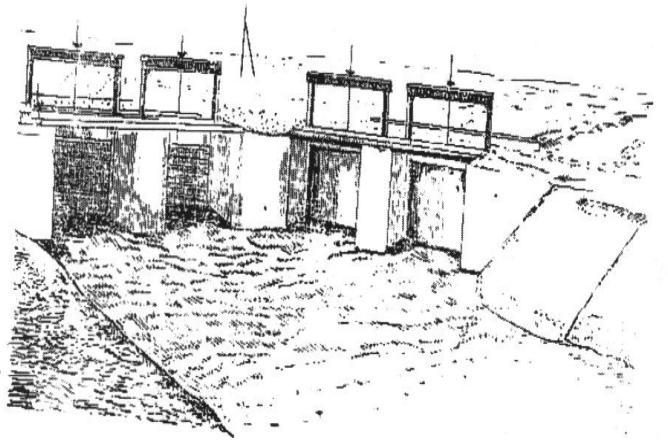
ვ) ჰიდროელექტროსადგურები არხებზე;

ზ) ხიდები და მილები არხებზე;

თ) სარწყულებლები.



ნახ. 5.1. წყალმიმღები ჰიდროკვანძის და თვითმდენი სარწყავი სისტემის სქემა:
1–წყალსაშვები კაშხალი; 2–წყალმიმღები ნაგებობა; 3–მაგისტრალური არხი; 4–მანაწილებელი არხები; 5–დროებითი სარწყავები; 6–გამომყვანი კვლები; 7–სარწყავი კვლები; 8–ნარგავები არხების გაყოლებით



ნახ. 5.2 რაბების კვანძი მაგისტრალურ არხზე

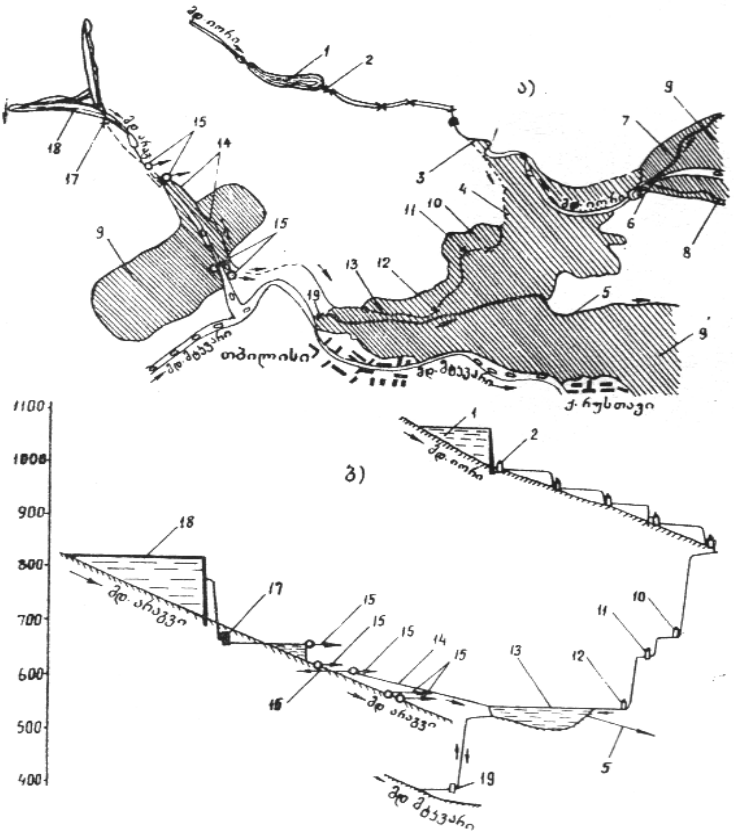
მნიშვნელობის მიხედვით, ჰიდრომელიორაციულ სისტემებშიც განარჩევენ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სამ სახეობას – ძირითადს, მეორეხარისხოვანს და დამხმარეს. ძირითადს მიეკუთვნება ნაგებობები, რომელთა ავარია ან რემონტი მნიშვნელოვნად ამცირებს მელიორაციული სისტემის ეფექტიანობას ან მთლიანად გამოჰყავს იგი მწყობრიდან.

მეორეხარისხოვან ნაგებობათა მუშაობიდან გამორთვა (დაზიანება) არ იწვევს სისტემის მუშაობის შეწყვეტას და მისი მოქმედების ეფექტიანობის მნიშვნელოვან შემცირებას, მაგრამ შეუძლია გაართულოს ექსპლუატაცია.

დამხმარე ნაგებობებს მიეკუთვნება დროებითი ნაგებობები, რომლებიც საჭიროა ძირითად და მეორეხარისხოვან ნაგებობათა მშენებლობისა და რემონტის დროს.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სახეობანი, რომლებიც ზემოთ იყო ჩამოთვლილი, გვხდება როგორც ირიგაციულ და დამშრობ სისტემებში, ისე ჰიდროკვანძებში, რომლებიც ხშირ შემთხვევაში ემსახურება სხვადასხვა წყალსამეურნეო მიზნებს.

ნახ-ზე 5.3 მოცემულია კომპლექსური დანიშნულების სამგორის და ჟინვალის ერთობლივი ჰიდროსისტემის სქემა.



ნახ. 5.3. სამგორის და ჟინვალის ერთობლივი ჰიდროსისტემის კომპლექსის ზოგადი სქემა

ა–გეგმა; ბ–კასკადის გრძივი ჭრილი. 1–სიონის წყალსაცავი; 2–სიონჰესი, 3–ზემო მაგისტრალური არხის სათავე ნაგებობა; 4–ზემო მაგისტრალური არხი; 5–ქვემო მაგისტრალური არხი; 6–ქვემო სამგორის სათავე ნაგებობა; 7–მდ. იორის მარცხენა ნაპირის არხი; 8–მდ. იორის მარჯვენა ნაპირის არხი; 9–სარწყავი ფართობი; 10–საცხენჰესი; 11–მარტყოფჰესი; 12–თეთრიხევჰესი; 13–თბილისის წყალსაცავი; 14– მდინარე არაგვის წყლის მიყვანა თბილისის წყალსაცავთან; 15–წყალსადენის წყალმიმღები; 16–სარწყავი სისტემის წყალმიმღებები; 17–ჟინვალჰესი; 18–ჟინვალჰესის წყალსაცავი; 19–ღრმაღელის ტუმბო-ტურბინული ჰესი

5.3. სარწყავი სისტემის ექსპლუატაციის საკითხები, ნორმალურ და განსაკუთრებულ შემთხვევებში

სარწყავი სისტემის მშენებლობის დამთავრების შემდეგ, მთავარი საკითხია სარწყავი მიწების სწორად და დაუყოვნებლივ ათვისებისა და სისტემის მოვლა-პატრონობის ორგანიზაციის საქმე.

სისტემის ტექნიკური ექსპლუატაციის საორგანიზაციო-სამეურნეო ფირმამ უნდა უზრუნველყოს:

მაღალი და მყარი მოსავლის მიღება; მიწების ნორმალური მელიორაციული მდგომარეობის შენარჩუნება; ნიადაგის დაჭაობების და დამლაშების გამომწვევი მიზეზების ლიკვიდაცია; წყლის ნორმალური ხარჯვა ფართობზე; არხებისა და ნაგებობათა ნორმალური მდგომარეობა წმენდისა და რემონტების სისტემატურად ჩატარების შედეგად.

ჩვენს ქვეყანაში წყალსამეურნეო სისტემების ექსპლუატაციის მიზნით, თავის დროზე შეიქმნა მელიორაციისა და წყალთა მეურნეობის 30 სამმართველო, რომლებიც მოვლა–პატრონობას ახორციელებდნენ და ახორციელებენ როგორც სარწყავ, ისე დამშრობ და საძოვრების გამაწყლოვანებელ სისტემებზე. სარწყავი სისტემების ნორმალური ექსპლუატაციისათვის საჭიროა წინასწარ შედგენილ იქნეს წყალსარგებლობის გეგმა ცალკეული მეურნეობისათვის, რისთვისაც საჭიროა შემდეგი მონაცემები: სარწყავი კულტურების განლაგების გეგმა

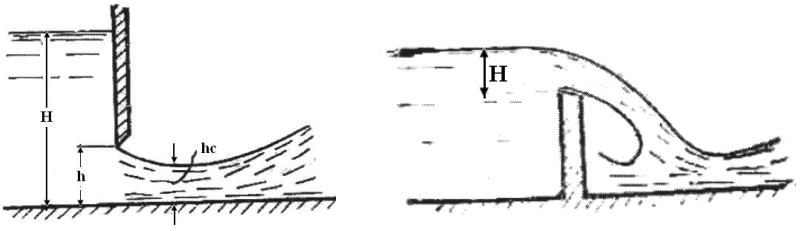
მოცემული სამეურნეო წლისათვის; მათი მორწყვის რეჟიმი; სარწყავი ფართობის ნიადაგობრივ-მელიორაციული პირობები, რომელთა მიხედვით გაიანგარიშება მეურნეობისათვის საჭირო სარწყავი წყლის რაოდენობა ვეგეტაციის მთელ პერიოდში.

სარწყავი სისტემა ექსპლუატაციის პერიოდში უნდა აღიჭურვოს წყალსაზომი მოწყობილობებით.

საექსპლუატაციო სამსახურის მოვალეობაა რწყვის პროცესის მექანიზაციაზე ზრუნვა, მეცნიერების სიახლეთა დანერგვა, ცალკეულ ნაგებობათა ექსპლუატაციაში ხარვეზების გამოვლენა, რომელიც შემდგომ იქნება გათვალისწინებული საპროექტო პრაქტიკაში.

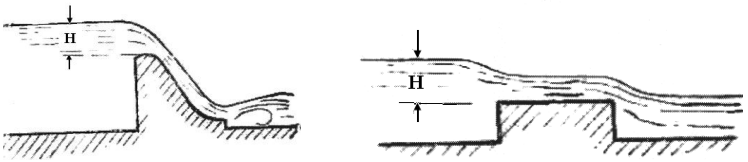
განსაკუთრებულ შემთხვევებში, თავდაცვითი ოპერაციების ჩატარებისას ზოგჯერ საჭირო ხდება წყალსაცავიდან (აუზიდან) გადაგდებული მძაფრი წყლის ნაკადის იმ დინამიკური მახასიათებლების გამოყენება, რომლის დარტყმის ძალა წყალსაგდები ნაგებობის ტიპისა (ნახ. 5.4) და დაწნევის სიდიდის მიხედვით მნიშვნელოვან სიდიდეს აღწევს. თუ ჰიდროკვანძის შემადგენლობაში შედის ადგილობრივი მასალის კაშხალი, მაშინ შესაძლებელია წყალმიმღებ და წყალსაგდებ ნაგებობათა ჩაკეტვით, ხელოვნურად აიწიოს წყლის დონე წყალსაცავში, რომელიც გარკვეული დროის შემდეგ კაშხალს გადაუვლის ზემოდან და გამოიწვევს მის ნგრევას. აღნიშნული ღონისძიებები, გარდა დინამიკური დარტყმისა,

ტბორავს ქვედა ბიეფში განთავსებულ ფართობებს და სამხედრო ტექნიკისათვის გაუვალს ხდის მას. ამასვე ემსახურება სარწყავი ფერდობების ზღვრულ მნიშვნელობაზე მეტი სიდიდით დატენინება. თავდაცვისათვის დასმული ამოცანის შესაბამისად, შეიძლება განხორციელდეს წყალსატარი დერივაციის (არხი, გვირაბი, ღარი, მილსადენი) ლოკალურ უბანზე გარღვევა, რაც გამოიწვევს სათანადო ტერიტორიის დატბორვას. დატბორვის შეწყვეტა შესაძლებელი იქნება სათავე ნაგებობის წყალმიმღებში საკეტების ჩაკეტვით.



ა. წყლის გამოდინება ფარის ქვეშიდან

ბ. თხელკედლიანი წყალსაგდები



ვ. პრაქტიკული პროფილის წყალსაგდები

გ. ფართოზღურბლიანი წყალსაგდები

ნახ. 5.2 წყალსაგდები

VI განყოფილება.
სანაოსნო გზები და ნავსადგურები

6.1. წყლის ტრანსპორტის როლი საერთო სატრანსპორტო სისტემაში

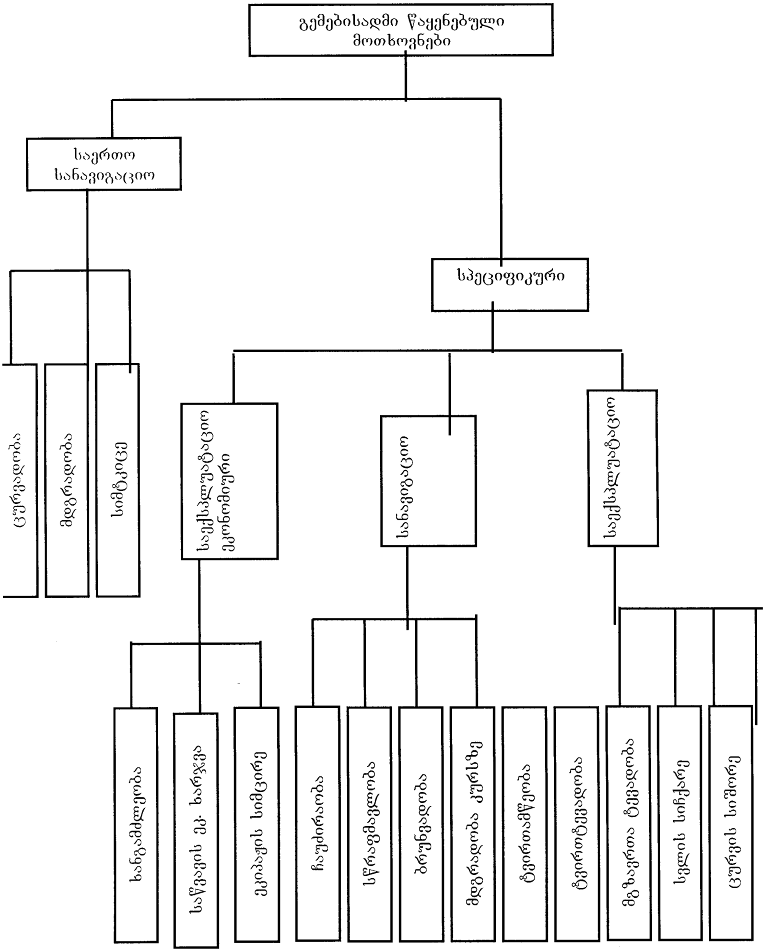
ქვეყნის ეროვნულ მეურნეობას მომსახურებას უწევს სარკინიგზო, საავტომობილო, წყლის (საზღვაო და სამდინარო), სამილსადენო და საჰაერო ტრანსპორტი. ტვირთები მიზანშეწონილად ნაწილდება ტრანსპორტის ცალკეულ სახეობათა შორის. ჩვენი ქვეყნის ერთიან სატრანსპორტო სისტემაში წყლის ტრანსპორტი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს. სრულყოფილ ტრანსპორტს ჩვეულებრივ, შემდეგ მოთხოვნებს უყენებენ:

ა) გადაზიდვის სიიაფე; ბ) სიჩქარე; გ) გადასაზიდი ტვირთებისა და მგზავრების უსაფრთხოება; დ) გადაზიდვის მასობრიობა ანუ ტრანსპორტის მოხერხებულობა ნებისმიერი ტვირთის გადასაზიდად; ე) გადაზიდვის მუდმივობა და რეგულარობა ანუ ნაოსნობის დამოკიდებულება კლიმატურ (მაგალითად მდინარეებისა და ზღვების გაყინვა) პირობებზე, აგრეთვე სამდინარო ტრანსპორტის ტვირთზიდვის რეგულირების შეფერხება წყალმცირობის გამო. ამ უკანასკნელი მოთხოვნებისა და გადაზიდვის (როგორც ტექნიკური, ისე კომერციული) სიჩქარის გარდა, წყლის ტრანსპორტი ყველა სხვა

სახის ტრანსპორტისაგან მნიშვნელოვანი უპირატესობით გამოირჩევა.

სანაოსნო გზებზე მგზავრების გადაყვანა და ყველა სახის ტვირთის გადაზიდვა გემებით ხდება. გამონაკლისია მხოლოდ ხე-ტყის დაცურება შიგაწყლის გზებზე (მდინარეებზე). იმის მიხედვით, თუ რა დანიშნულებისაა გემი, იგი უნდა პასუხობდეს მთელ რიგ სპეციფიკურ მოთხოვნებს, მაგრამ არსებობს ზოგიერთი საერთო სანავიგაციო მოთხოვნა, რომელსაც ყველა გემი უნდა აკმაყოფილებდეს (იხ. ნახ. 6.1).

თანამედროვე გემების კლასიფიკაცია შეიძლება მრავალი ნიშნის მიხედვით. ნახ-ზე 6.2. ნაჩვენებია გემების კლასიფიკაცია მისი ძირითადი მახასიათებლებით.


გემებისადმი წაყენებული მოთხოვნები
საერთო სანავიგაციო
სპეციფიკური
ცურვადობა
მდგრადობა
სიმტკიცე
საექსპლუატაციო ეკონომიური
სანავიგაციო
საექსპლუატაციო
ხანგამძლეობა
საწვავის ეკ. ხარჯვა
ეკიპაჟის სიმცირე
ჩაუძირაობა
სწრაფმავლობა
ბრუნვადობა
მდგრადობა კურსზე
ტვირთამწეობა
ტვირთტევადობა
მგზავრთა ტევადობა
სვლის სიჩქარე
ცურვის სიშორე

ნახ. 6.1

ვეფხვის
კლასიფიკაცია
ფორმის
მიხედვით
ფერის
მიხედვით
ადგილსამყოფელის
მიხედვით
ზომის
მიხედვით
ხალი
ლაქოსანი
ზოლ-ლაქოსანი
ზოლიანი (ორფერა)
ყავისფერი
ყვითელი
ალბინოსი
თეთრი
ბრინჯაოსფერი
ჩრდილოეთ ჩინეთი
ამურის მხარე
ინდოეთი
ინდოჩინეთი
ინდონეზია
ზომიერი ზონის
ტყეები
ტროპიკული ტყეები
ბამბუკის ტყეები

ნახ. 6.2.

6.2. მდინარის სანაოსნოდ მომზადებისა და სანაოსნო პიროგების გაუმჯობესების ღონისძიებანი

ნორმალური ნაოსნობისათვის მდინარე უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ ძირითად მოთხოვნებს:

1. წყალმცირობის დროს მდინარეს უნდა ჰქონდეს ნაოსნობისათვის საკმარისი სიღრმის უწყვეტი ზოლი-ფარვატერი, რომლის სიგანე საკმარისი უნდა იყოს გემების გვერდაქცევისათვის, ხოლო მოხვევის რადიუსი არ უნდა ზღუდავდეს გემების მოძრაობას;
2. მდინარეზე არსებული ნაგებობანი არ უნდა ზღუდავდეს ფარვატერზე გემების მოძრაობას;
3. ნავიგაციის პერიოდში მდინარის სიჩქარე ხელს არ უნდა უშლიდეს დინების საწინააღმდეგოდ გემების მოძრაობას;
4. ფარვატერის ფარგლებში მდინარის კალაპოტი არ უნდა იყოს ჩახერგილი სხვადასხვა საგნებით;
5. მდინარეში წყალმცირობა ხანგრძლივი დროით არ უნდა იწვევდეს ნავიგაციის შეწყვეტას.

მდინარეზე ნორმალური ნაოსნობისათვის საჭიროა მრავალი მოსამზადებელი ღონისძიების განხორციელება. ასეთ ღონისძიებებს შორის ძირითადია დამანაგვიანებელი ლოდებისა და საგნებისაგან კალაპოტის გაწმენდა და შესაფერისი ნიშნებით (სპეციალური სანავიგაციო მორთულობა) ფარვატერის აღჭურვა.

მდინარეებზე ნაოსნობის ძირითადი ხელშემშლელი მიზეზი მდინარის ფსკერის ცალკეულ ჩქერებზე არსებული მცირე სიღრმეებია. ამიტომ სანაოსნო პირობების გაუმჯობესების ძირითად ღონისძიებებად ჩქერებზე სიღრმეთა გადიდება უნდა ჩაითვალოს. ეს ღონისძიება შესაძლებელს ხდის გადიდდეს გემების წყალშიგი და, მაშასადამე, ტვირთამწეობაც. ტვირთამწეობის გადიდება კი თავის მხრივ მნიშვნელოვნად ამცირებს გადაზიდვის თვითღირებულებას.

მდინარეებზე სანაოსნო სიღრმეების გადიდება შეიძლება ფსკერის გაღრმავებით, კალაპოტისა და ჩანადენის რეგულირებით და მდინარეთა დარაბვით. ფსკერის გაღრმავების მეთოდი და შესაბამისი სიღრმე შერჩეულ უნდა იქნეს სათანადო ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშების საფუძველზე.

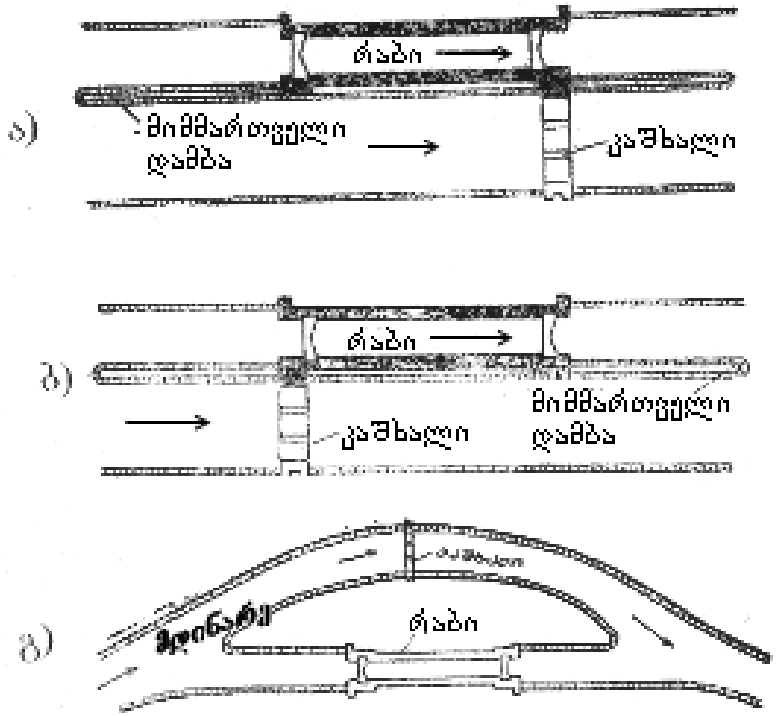
მდინარეთა დარაბვა გულისხმობს მასზე განსაზღვრული მანძილით ერთმანეთისაგან დაცილებული კაშხლების მოწყობას. ამასთანავე ყოველი კაშხალი იგება მის ქვემოთ მდებარე კაშხლის შეტბორვის მრუდის ფარგლებში იქ, სადაც სიღრმე საკმარისია ნაოსნობისათვის. კაშხლების მიერ წარმოქმნილი ბიეფები ერთმანეთს რაბების ან გემთამწეების მეშვეობით უკავშირდებიან, ანუ გემების გადასვლა ერთი ბიეფიდან მეორეში ხორციელდება სპეციალური ნაგებობების მეშვეობით, რომლებიც

ეწყობა ან თვით სამდინარო კვანძში (ნახ. 6.3. ა, ბ), ან განსაკუთრებულ შემოსასვლელ არხში (ნახ. 6.3., გ).

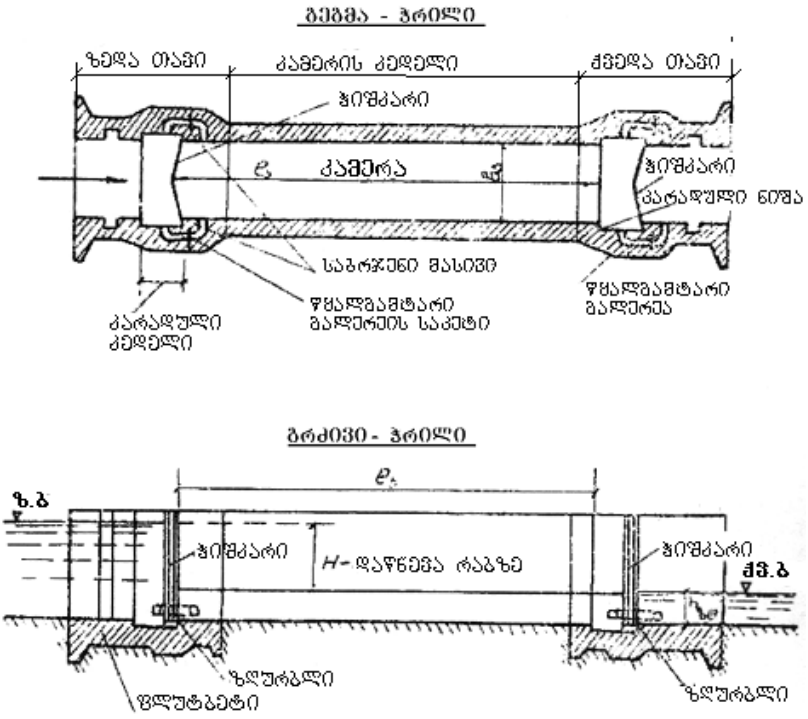
რაბებიდან პრაქტიკაში ყველაზე მეტად გავრცელებულია კამერული რაბი (ნახ. 6.4), რომლის პირველი სქემატური ნახაზი ლეონარდო და ვინჩის ეკუთვნის (1452-1519 წწ.).

ზედა ბიეფიდან ქვედა ბიეფში გემის ან ტივის გადასვლა ხდება შემდეგნაირად: რაბის ზედა და ქვედა ჭიშკრების დაკეტილ მდგომარეობაში ყოფნის დროს ხდება კამერის წყლით ავსება ზედა ბიეფის ჰორიზონტამდე (ნახ. 11.4), რისთვისაც საჭიროა ქვედა (დამცლელი) გალერეების დაკეტვა და ზედა (ამვსები) გალერეების საკეტების გაღება. ამის შემდეგ იღება ზედა ჭიშკარი და გემი კამერაში შედის. შემდეგ იკეტება ზედა ჭიშკარი და ზედა გალერეები. ქვედა გალერეების გაღებით იცლება რაბის კამერა და მასში ჰორიზონტი ეშვება ქვედა ბიეფის დონეზე. კამერასა და ქვედა ბიეფში დონეთა გათანაბრების შემდეგ, იღება რაბის ქვედა ჭიშკარი და გემი კამერიდან ქვედა ბიეფში გადის. ამის შემდეგ, ქვედა ჭიშკარი იკეტება და შეიძლება მთელი ციკლის განმეორება. ანალოგიურად ხდება გემის გადასვლა ქვედა ბიეფიდან ზედა ბიეფში. რაბები შეიძლება იყოს ერთ და მრავალკამერიანი, რომელთა კამერები მდინარის დინების გასწვრივ თანამიმდევრულადაა განლაგებული, მათ რაოდენობას განსაზღვრავს დონეთა სხვაობა ზედა და ქვედა

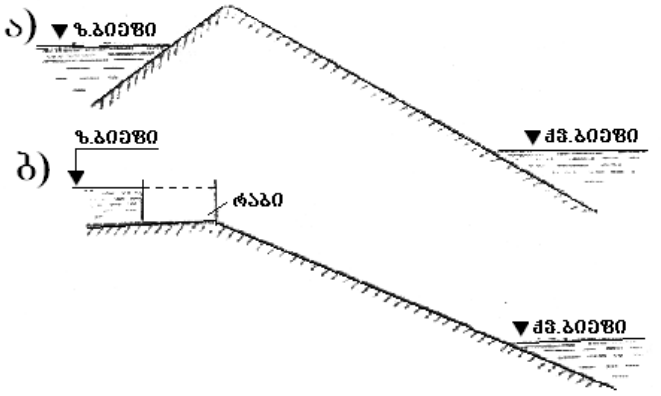
ბიეფს შორის. სანაოსნო რაბების კონსტრუქციის შერჩევა, მათი ჰიდრავლიკურ და სტატიკურ დატვირთვებზე გაანგარიშების მეთოდიკა დეტალურადაა მოცემული სათანადო ლიტერატურაში.



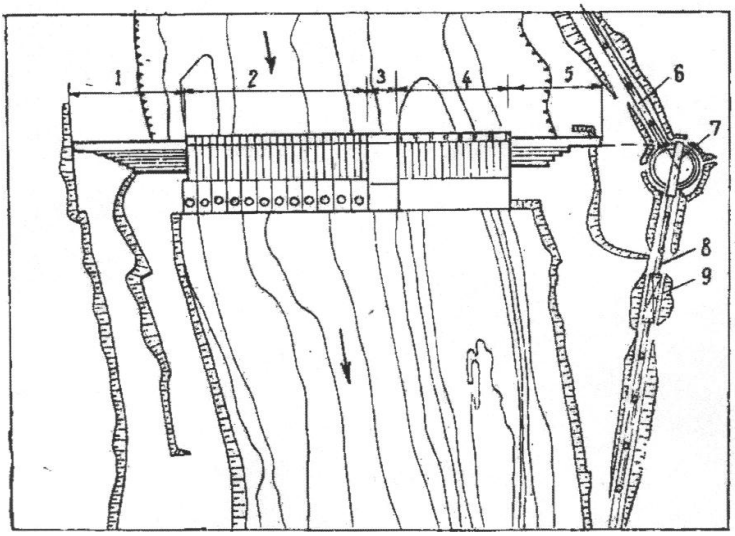
ნახ. 6.3. ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა კვანძში რაბის განლაგების სქემები



ნახ. 6.4. სანაოსნო რაბის სქემა

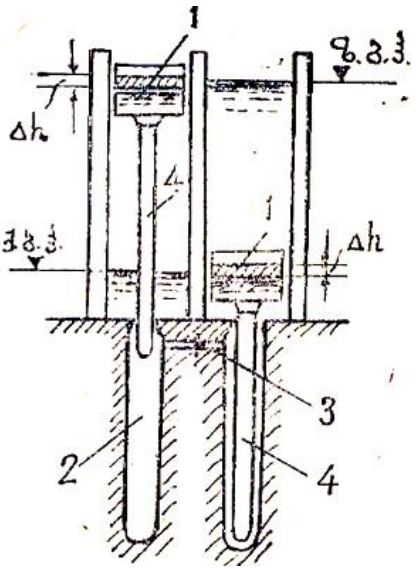


ნახ. 6.5 დახრილი გემთამწეების სქემები

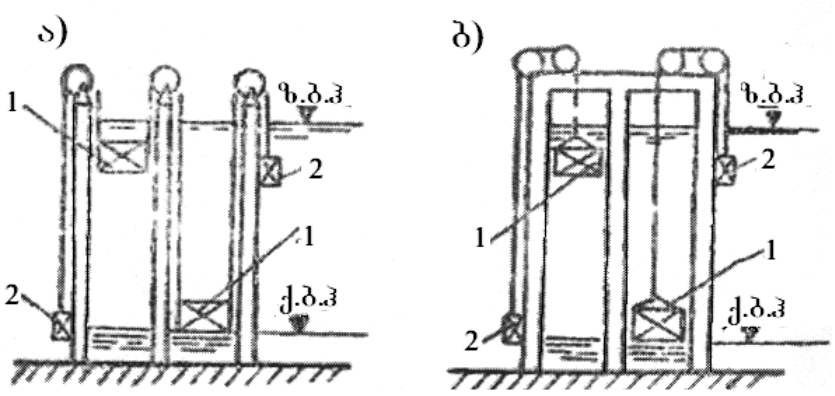


ნახ. 6.6. კრასნოიარსკის ჰიდროკვანძის გეგმა
1.3.5.–კაშხლის ყრუ ნაწილები; 2–ჰიდროელექტროსადგური, 4–წყალსაშვები; 6–ზედა გემთსაზიდი გზა; 7–გემის მოსაბრუნებელი წრე; 8–ქვედა გემთსაზიდი გზა; 9–გემთსაზიდი კამერა.

რაბის ანალოგიურ ფუნქციას ასრულებს გემთამწეები, რომლებიც შედარებით დიდი დაწნევების პირობებში გამოიყენება. გემთამწეები შეიძლება იყოს დახრილი, რომლის დროს გემი მშრალ ან კამერულ გემთსაზიდ ურიკასთან ერთად მოძრაობს გვერდით რელსებიან დახრილ სიბრტყეზე (ნახ. 6.5; 6.6), ან ვერტიკალური. აწევის მეთოდის მიხედვით, ვერტიკალურ გემთამწეებს ასხვავებენ ჰიდრავლიკური წნეხებით (ნახ. 6.7); უკუტვირთებით (ნახ. 6.8); ტივტივებით, უკუტვირთებითა და ტივტივებით ერთად.



ნახ. 6.7. ჰიდრავლიკურწნეხებიანი ვერტიკალური გემთამწე
1–კამერა’ 2–ვერტიკალური ცილინდრები; 3–საკეტები



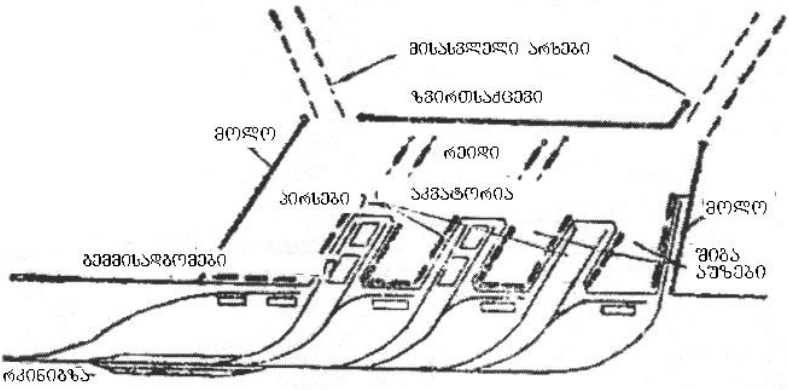
ნახ. 6.8. უკუტვირთებიანი გემთამწე
1– კამერა; 2–უკუტვირთი

6.3. ნავსადგურები

საზღვაო ნავსადგურის ძირითადი დანიშნულებაა ღელვის დროს გემებისათვის თავშესაფრის მიცემა, ტვირთებისა და მგზავრების გადაცემა საზღვაო მიმოსვლის საშუალებებიდან სახმელეთო მიმოსვლის საშუალებებისათვის და შიგა წყლის გზებზე მცურავი გემებისათვის ან პირიქით, აგრეთვე გემების შეკეთებისა და სათბობით, პროდუქტებითა და ყველა იმ საშუალებით მომარაგების უზრუნველყოფა, რომლებიც მათ ესაჭიროება ცურვის დროს.

ზოგ შემთხვევაში საზღვაო, ტბისა და წყალსაცავის ნავსადგურები მხოლოდ გემების თავშესაფრის მოვალეობას ასრულებენ. უმეტეს შემთხვევაში კი საზღვაო ნავსადგური სატრანსპორტო კვანძია, სადაც თავს იყრის

მიმოსვლის სხვადასხვა სახეები: საზღვაო, სამდინარო, სარკინიგზო, საავტომობილო, სამილსადენო და საჰაერო. ამასთანავე, იგი წარმოადგენს ნაგებობებისა და მოწყობილობების რთულ კომპლექსს, რომელიც განკუთვნილია ერთი სახის ტრანსპორტიდან მეორეზე გადატვირთვის სამუშაოების მოხერხებული და სწრაფი შესრულებისათვის.



ნახ. 6.9. ნავსადგურის სქემა

ყოველი ნავსადგური უნდა პასუხობდეს ძირითად მოთხოვნას – დატვირთვა-გადმოტვირთვისა და სამგზავრო ოპერაციები ტარდებოდეს სწრაფად, მოხერხებულად და მცირე დანახარჯებით.

საზღვაო ნავსადგურს განვითარების ადრინდელ ეტაპზე აშენებდნენ ზღვის ღელვისაგან ბუნებრივად დაცულ ყურეში ან მდინარის შესართავში გემების მისადგომად და დატვირთვა-გადმოტვირთვის ოპერაციები-

სათვის მოხერხებულ ნაპირზე. შემდგომში იმ ადგილზე, სადაც საჭირო იყო გემების ნაპირთან მისვლა, თუ ბუნებრივად დაცული არ იყო ღელვისაგან, დაიწყეს ხელოვნური დამცავი ნაგებობების აშენება.

ნავსადგური შედგება აკვატორიისა და სანავსადგურო ტერიტორიისაგან. იგი აერთიანებს სხვადასხვა საინჟინრო ნაგებობებსა და მოწყობილობებს – ჰიდროტექნიკურს, სამოქალაქოს, სარკინიგზოს და მექანიკურს (ნახ. 6.9).

ნავსადგურის აკვატორიაში შედის: 1) ნავსადგურთან მისასვლელები; 2) გემების სადგომი შიგა აუზები და გემმისადგომი (მისაბმელი) ხაზები, სადაც სრულდება დატვირთვა-გადმოტვირთვის სამუშაოები; 3) რეიდები.

ნავსადგურთან მისასვლელების სიღრმე და სიგანე გემების თავისუფლად მოძრაობას უნდა უზრუნველყოფდეს. მისასვლელები შეიძლება იყოს ბუნებრივი (საკმაო სიღრმის ზღვის ან მდინარის უბნის სახით) ან ხელოვნური (სპეციალურად მოწყობილი მისასვლელი საზღვაო არხები). ნავსადგურთან მისასვლელების ფარგლებში გემების სწორი ორიენტაციისათვის ეწყობა სპეციალური სანავიგაციო ნიშნები, რომლებიც ფარვარტერის მიმართულებასა და საზღვრებს უჩვენებენ.

ზღვის მცირე სიღრმის ნაპირზე ნავსადგურის განლაგების შემთხვევაში, მისასვლელი საზღვაო არხის სიგრძე ათეულ კილომეტრებს აღწევს. მდინარის შესართავში ნავსადგურის განლაგების დროს კი – ასეულ კი-

ლომეტრებსაც. მაგალითად, ასტრახანის საზღვაო ნავსადგურის გარე საზღვაო რეიდთან შემაერთებელი ვოლგა-კასპიის არხის სიგრძე 200 კმ-ს აღემატება. მონრეალის (კანადა) საზღვაო ნავსადგური აგებულია მდინარე წმინდა ლავრენტიზე მისი შესართავიდან 1300 კმ-ის დაცილებით.

რეიდები ეწოდება ძლიერი ღელვისაგან დაცულ აკვატორიის იმ უბნებს, სადაც გემებს შეუძლია ღუზაზე დგომა (როცა გემმისადგომი ხაზები დაკავებულია) ან დატვირთვა-გადმოტვირთვის სამუშაოთა შესრულება მცურავ მდგომარეობაში (როცა ნავსადგურს არა აქვს ასეთი დიდი გემის შესაბამისი ღრმაწყლიანი მისაბმელი ხაზი). რეიდებზე წარმოებს აგრეთვე გემთა ქარავნების შედგენა.

მცურავ მდგომარეობაში დატვირთვა-გადმოტვირთვის სამუშაოები სპეციალური მცირე გემების (ლიხტერების და ბარჟების) მეშვეობით სრულდება. ისეთ ნავსადგურებს, სადაც არ არის ღრმაწყლიანი გემმისადგომი ხაზები და სადაც ყველა სატვირთო და სამგზავრო ოპერაცია დამხმარე მცირე ფლოტის მეშვეობით ხდება, რეიდული ნავსადგურები ეწოდება. რეიდული ნავსადგურები არაეკონომიურია, ამიტომ მათ აგებენ მხოლოდ მცირე ტვირთბრუნვის შემთხვევაში. დიდი ტვირთბრუნვისათვის კი უფრო მიზანშეწონილია ნავსადგურში სათანადო გემმისადგომი ხაზების აგება.

ასხვავებენ გარე და შიგა რეიდებს. გარე რეიდები ნავსადგურის ღელვისაგან დამცავ ნაგებობათა ფარგლებს გარეთ მდებარეობს, ბუნებრივად ნაწილობრივ დაცულ ადგილას. შიგა რეიდები ღელვისაგან ნავსადგურის დამცავი ნაგებობით შემოფარგლულ აკვატორიაზე მდებარეობს. რეიდებს გასატარებელი მაქსიმალური გემის წყალშიგის შესაბამისი სიღრმე უნდა ჰქონდეს, რეიდების ფართობი კი დამოკიდებულია მათზე ერთდროულად მყოფი გემების რიცხვსა და გაბარიტებზე. რეიდების ფართობი ისეთი უნდა იყოს, რომ რეიდზე მყოფ გემებს თავისუფალი მოძრაობის (მანევრირების) შესაძლებლობა ჰქონდეთ. რეიდის ფარგლებში გრუნტი ისეთი უნდა იყოს, რომ კარგად იჭერდეს გემის ღუზას. ზოგჯერ რეიდებზე აკეთებენ გემის მისაბმელ სპეციალურ მოწყობილობას ერთ ღუზებზე დამაგრებულ მისაბმელ კასრებს ან მისაბმელ პაალებს გრუნტში ჩამაგრებულ (გრავიტაციული ან ხიმინჯის ტიპის) ცალკეულ საყრდენებს.

რეიდის ფარგლებში დასაშვები ტალღის სიმაღლე დამოკიდებულია რეიდზე შესასრულებელ სამუშაოთა ხასიათზე და იმ გემების ზომასა და ტიპზე, რომლებზედაც გაანგარიშებულია რეიდი.

ნავსადგურის შიგა აკვატორია (შიგა აუზები) უშუალოდ ესაზღვრება ნავსადგურის ტერიტორიას და ამ უკანასკნელთან შეუღლებულია გემმისადგომი ნაგებობებით.

ნავსადგურის აუზების მოხაზულობა და მისაბმელი ხაზების განლაგება გეგმაში მეტად სხვადასხვაგვარია. შიგა აუზების ფართობები და სიღრმეები ისე უნდა შეირჩეს, რომ გემებს თავისუფალი მოძრაობის შესაძლებლობა მიეცეთ.

ნავსადგურის შიგა აკვატორიაზე განლაგებულია სატვირთო და სამგზავრო გემების, ტექნიკური და ადმინისტრაციული ფლოტის გემმისადგომები, გემთსაშემკეთებლო მისაბმელი ხაზები.

საზღვაო ნავსადგურის ტერიტორიაზე განლაგებულია სარკინიგზო, საავტომობილო და შიგა სანაოსნო გზები, სამილსადენო ტრანსპორტის მოწყობილობა, საწყობები, გადასატვირთი მოწყობილობები, სახელოსნოები, სამოსამსახურო ნაგებობანი, ელექტროქვესადგურები, წყალსადენი, კანალიზაცია და სხვ.

ნავსადგურის შემადგენლობაში შედის დამცავი და მისაბმელი ჰიდროტექნიკური ნაგებობები.

დამცავ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა რიცხვს ეკუთვნის მოლები, ზღვარსაქცევები, დამბები და ყინულსაჭრელები. მათი დანიშნულებაა ნავსადგურის აკვატორიის დაცვა ღელვის, ნატანისა და ყინულის მოქმედებისაგან.

მისაბმელი ნაგებობების დანიშნულებაა გემების ნაპირთან მისვლისა და მიბმის უზრუნველყოფა, რათა შესაძლებელი იყოს ტვირთების გადაცემა გემიდან ნაპირზე

და პირიქით. მისაბმელ ნაგებობებს მიეკუთვნება ნავსადგურის სანაპირო კედლები და პირსები.

ნავსადგურის ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა რიცხვს მიეკუთვნება, აგრეთვე, გემების წყლიდან ამოსაწევი მოწყობილობანი და გემთსაშენებელი ნაგებობანი (ელინგები და დოკები).

საზღვაო ნავსადგური საზღვაო მიმოსვლის საშუალებათა და ქვეყნის შიგა სატრანსპორტო გზების შემაერთებელი რგოლია. სამდინარო ნავსადგური კი, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ერთმანეთთან აკავშირებს წყლის სატრანსპორტო საშუალებებს და სახმელეთო სატრანსპორტო გზებს.

საზღვაო ნავსადგური როგორც საზღვაო გზების, ისე შიგა სამიმოსვლო საშუალებების საბოლოო პუნქტია და წარმოადგენს შუალედურ გადამცემ სადგურს შერეული გადაზიდვის საერთო სისტემაში. აქ ხდება როგორც საექსპორტო და საიმპორტო ტვირთების, ისე იმ ტვირთების გადატვირთვა, რომლებიც ერთი და იმავე ქვეყნის ორ ნავსადგურს შორის გაივლის.

შერეული ცურვის (მდინარე-ზღვა) გემების გამოყენების შემთხვევაში, საზღვაო ნავსადგური უკვე აღარ წარმოადგენს ტრანსპორტის მოძრაობის საბოლოო პუნქტს, მაგრამ ასეთი გემების ზღვებში ცურვის სიშორე ჯერჯერობით მაინც შეზღუდულია, დიდ საზღვაო გემებს კი შიგა წყლის გზებზე ცურვა არ შეუძლიათ. ამრიგად,

ზემოთ მოყვანილი განმარტება ძირითადად მაინც ძალაში რჩება.

ნავსადგურის ზომების ძირითადი განმსაზღვრელი ფაქტორებია ტვირთბრუნვა და მგზავრების რაოდენობა.

ნავსადგურის ტვრთბრუნვა ეწოდება ტვირთების იმ საერთო რაოდენობას, რომელიც დროის გარკვეულ პერიოდში გადმოიტვირთება გემებიდან და ჩაიტვირთება გემებში მოცემული ნავსადგურის მისაბმელ ხაზებთან და მცურავ მდგომარეობაში. ამრიგად, შეიძლება განვიხილოთ წლიური (სანავიგაციო) თვიური და სადღეღამისო ტვირთბრუნვა. საერთო ტვირთბრუნვა ჩვეულებრივ, იყოფა საზღვაო გადაზიდვებისა და ტვირთების სახეობათა მიხედვით.

ნავსადგურის გამტარუნარიანობა ეწოდება მთელი წლის განმავლობაში მასში გამავალი ტვირთების ნაკადს, ანუ ტვირთების იმ რაოდენობას, რომელსაც ნავსადგური ზღვით გზავნის და ზღვითივე იღებს მთელი წლის განმავლობაში.

VII განყოფილება

წყალმომარაგების სისტემები და ნაგებობები

7.1. ზოგადი ცნობები

წყალმომარაგების სისტემა ეწოდება ნაგებობათა და ქსელების ერთობლიობას, რომლის დანიშნულებაა ბუნებრივი წყლების მიღება, გაწმენდა (საჭიროების მიხედვით) და მომხმარებლისათვის მიწოდება.

დასახლებულ ადგილებში წყალი ძირითადად გამოიყენება სასმელ-სამეურნეო, საწარმოო და ხანძარსაწინააღმდეგო მიზნებისათვის. იმის მიხედვით, თუ როგორ ხორციელდება მომხმარებლების მოთხოვნების დაკმაყოფილება, არჩევენ სხვადასხვა ტიპის წყალსადენებს:

1. წყალსადენები დანიშნულების მიხედვით: ა) სასმელ-სამეურნეო; ბ) სამრეწველო და გ) ხანძარსაწინააღმდეგო. ზოგჯერ სამივე დანიშნულების წყალსადენი ერთ სისტემაში ერთიანდება, ზოგჯერ კი ერთიანდება რომელიმე ორი დანიშნულების წყალსადენი.
2. სათავიდან წყლის მიწოდების ხერხის მიხედვით: ა) თვითდინებითი წყალსადენები; ბ) წყალსადენები წყლის მექანიკური მიწოდებით, როდესაც წყალი მიეწოდება ტუმბოებით, პნევმატიკური დანადგარებით ან სხვა ჰიდრავლიკური მანქანებით; გ) შე-

რეული ტიპის წყალსადენები, როდესაც წყალსადენების ნაწილი მუშაობს მექანიკური წესით, ხოლო ნაწილი – თვითდენით.

3. დაწნევების სიდიდის მიხედვით: ა) დაბალდაწნევიანი წყალსადენები-ჩვეულებრივ, ქსელში დაწნევა არ უნდა აღემატებოდეს 10 ატმ-ს; ბ) მაღალდაწნევიანი, როდესაც დაწნევები სისტემაში აღემატება 10 ატმ-ს, ზოგჯერ კი 30-40 ატმ-ს და მეტსაც აღწევს.
4. წყალმომარაგების წყაროს მიხედვით: ა) გრუნტის წყლების წყალსადენი, რომლებიც იკვებება მიწისქვეშა წყლების ბაზაზე (არტეზიული, სუბარტეზიული და უდაწნეო მიწისქვეშა წყლები, მდინარის ფილტრატები, კარსტული წყლები, წყაროები და სხვ.). ბ) ზედაპირული წყლების წყალსადენები, რომელთა კვების წყაროს წარმოადგენს მდინარეები, წყალსაცავები, ტბები, ზოგჯერ ზღვები და ოკეანეები.
5. წყალმომარაგების ობიექტის რაოდენობის მიხედვით: ა) ინდივიდიალური წყალსადენები, როდესაც ერთი ან რამდენიმე წყალმომარაგების სისტემა ემსახურება ერთ ობიექტს, ერთ ქალაქს, ერთ დასახლებულ ადგილს, ერთ საწარმოს; ბ) ჯგუფური წყალსადენები, როდესაც ერთი არ რამდენიმე წყალმომარაგების სისტემა გაერთიანებულია და

წყლით მოსამარაგებელ რამდენიმე ობიექტს ემსახურება; გ) წყალმომარაგების რაიონული სისტემები, როდესაც წყალმომარაგების ერთი ან რამდენიმე სისტემა მთელ რეგიონს ემსახურება.

წყალსადენის სისტემები შედგება რამდენიმე შემადგენელი ელემენტისაგან. ზოგიერთი ძირითადი სახის ელემენტი შედის ყველა წყალსადენის შემადგენლობაში, ხოლო ზოგიერთის საჭიროებას განსაზღვრავს ადგილობრივი პირობები. ეს ელემენტებია:

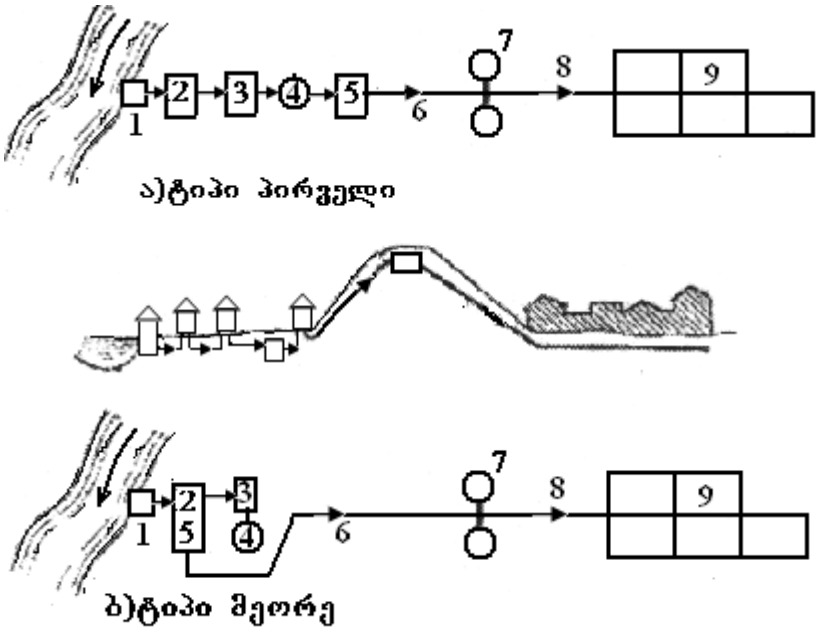
1. წყალმიმღები – მისი დანიშნულებაა საჭირო რაოდენობის წყლის მიღება;
2. სატუმბო სადგური – მასში დამონტაჟებული ტუმბოებით ხდება წნევის გაზრდა მილსადენებში;
3. წყლის გამწმენდი სადგური – მასში შემავალ ნაგებობებზე ხდება წყლის ხარისხის გაუმჯობესება;
4. რეზერვუარები ძირითადად ორი სახისაა: სუფთა წყლის რეზერვუარი – მაგალითად გამწმენდ სადგურსა და II საფეხურის სატუმბ სადგურს შორის, და სადაწნეო რეზერვუარები – მისი დანიშნულებაა შეინახოს წყლის მარაგი სასმელ-სამეურნეო, სახანძრო და საწარმოო მიზნებისათვის, და ქსელში მოთხოვნილებისამებრ მიაწოდოს. თუ რეზერვუარის საჭირო საანგარიშო ნიშნულს მიწის ზედაპირის ნიშნულები ვერ უზრუნველყოფს, ეწყობა კოშკური ტიპის რეზერვუარი;

5. წყალდენი წარმოადგენს მილდენს, რომლის საშუალებით ხდება წყლის ტრანზიტი ერთი ადგილიდან მეორეზე. შეიძლება იყოს თვითდენითი (დაწნევიანი და უდაწნეო) და მექანიკური გადატუმბვით;
6. ქსელი შედგება მაგისტრალური და მანაწილებელი მილებისაგან, თავისი არმატურით, ხელოვნური ნაგებობებით (ჭები და სხვ.) და განშტოებებით. ქსელის დანიშნულებაა წყლის მიწოდება ყველა მომხმარებელთან.

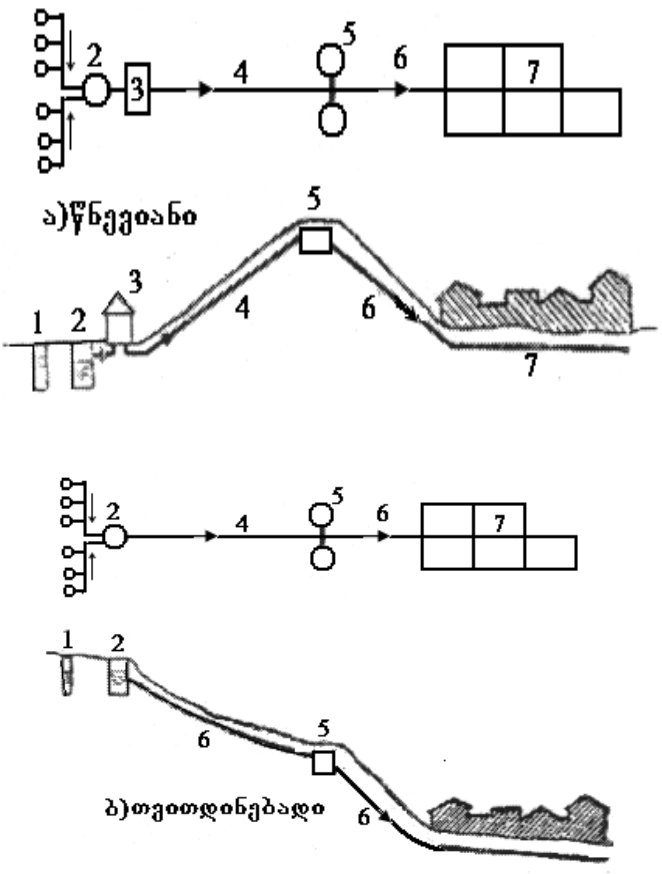
წყალსადენების სქემები მეტად მრავალფეროვანი და ნაირსახოვანია. სქემას ქმნის სისტემაში შემავალი ელემენტების სახეები, რაოდენობა, ურთიერთგანლაგება და მდებარეობა. სქემის სახე დამოკიდებულია ადგილობრივ ტექნიკურ და ეკონომიკურ ფაქტორებზე. წყალსადენის სისტემა და სქემა ყველა ცალკეული შემთხვევისათვის უნდა იქნეს შერჩეული და დასაბუთებული (დაყვანილი ღირებულების მინიმიზაციის გზით).

არსებობს წყალსადენის შემდეგი სქემები: 1. მდინარის წყალსადენი; 2. გრუნტის წყალსადენი; 3. რეზერვუარული სისტემის წყალსადენი – როდესაც სადაწნეო რეზერვუარი მოთავსებულია სათავე ნაგებობასა და ქსელს შორის. 4. კონტრრეზერვუარული სისტემის წყალსადენი, როდესაც ქსელი მოთავსებულია სათავე ნაგებობასა და სადაწნეო რეზერვუარს შორის; 5. წყალსადენი რამდენიმე მკვებავი წყაროთი – როდესაც დასახლებული ადგილი

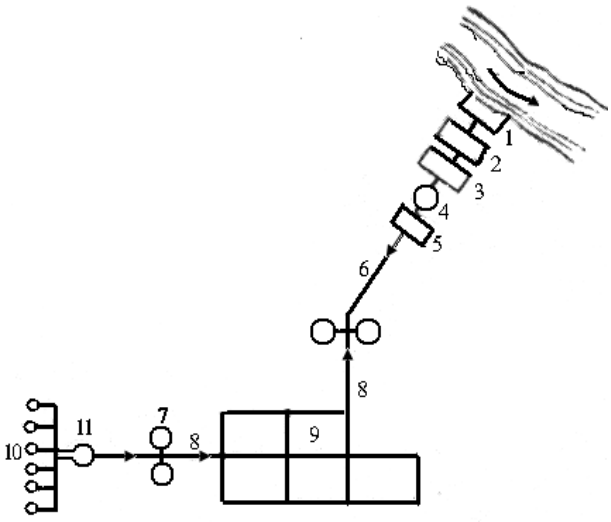
მარაგდება სხვადასხვა მხრიდან. ასეთი სქემა განსაკუთრებით ხელსაყრელია სამოქალაქო თავდაცვის თვალსაზრისითაც; 6. წყალსადენი ზონირებული ქსელებით – როდესაც ქსელში დაწნევები ნორმას აჭარბებს, საჭირო ხდება ქსელის დაყოფა რამდენიმე ზონად; 7. ჯგუფური წყალსადენი (იხ. ზემოთ); 8. კომპლექსური წყალსადენი – როდესაც წყალმიმღები შეთავსებულია ჰიდროტექნიკურ ელემენტთან მაგალითად კაშხალთან; 9. საწარმო წყალსადენი – ყოველ კერძო შემთხვევაში შეარჩევენ ოპტიმალურ სქემას. ფართოდაა გავრცელებული საცირკულაციო წყალმომარაგების სქემები. მაგალითისათვის მოგვყავს მდინარის წყალსადენის სქემა, რომელშიც წყალსადენის თითქმის ყველა ელემენტი შედის (ნახ. 7.1); გრუნტის წყლების წყალსადენის სქემა წნევიანი და თვითდენითი (უდაწნეო) (ნახ. 7.2), აგრეთვე წყალსადენის სქემა ორი მკვებავი წყაროთი (ნახ. 7.3).



ნახ. 7.1. მდინარის წყალსადენის სქემა
1. წყალმიმღები ნაგებობანი; 2. პირველი საფეხურის სატუმბი სადგური; 3. გამწმენდი სადგური; 4. სუფთა წყლის რეზერვუარი; 5. მეორე საფეხურის სატუმბო სადგური; 6. წნევიანი წყალსადენი; 7. სადაწნეო რეზერვუარი; 8. თვითდენითი წყალდენი; 9. ქსელი



ნახ. 7.2 გრუნტის წყლების წყალსადენის სქემა
1. წყალმიმღები ჭები; 2. შემკრები ჭა; 3. სატუმბი სადგური; 4. წნევიანი წყალსადენი; 5. საწნეო რეზერვუარი; 6. თვითდენი წყალსადენი; 7. ქსელი.



ნახ. 7.3. წყალსადენის სქემა ორი მკვებავი წყაროთი
1. მდინარის წყალმიმღები; 2. I საფეხურის სატუმბი სადგური;
3. გამწმენდი სადგური; 4. სუფთა წყლის რეზერვუარი; 5. II საფეხურის სატუმბი სადგური; 6. წნევიანი წყალსადენი; 7. საწნეო რეზერვუარი;
8. თვითდენითი წყალდენი; 9. ქსელი; 10. გრუნტის წყლების მიმღები ჭები; 11. შემკრები ჭა.

წყალსადენის ელემენტების ძირითადი პარამეტრების გასაანგარიშებლად უნდა ვიცოდეთ საჭირო წყლის რაოდენობა და მოხმარების რეჟიმი. წყლის ხარჯვის გასაგებად უნდა ვიცოდეთ ერთი მხრივ, მომხმარებლების რაოდენობა და მეორე მხრივ თითოეული მომხმარებლისთვის საჭირო წყლის კუთრი ხარჯი ე.ი. ნორმა. ეს ნორმები მოცემულია საცნობარო ლიტერატურაში (სამშენებლო ნორმები და წესები, სამრეწველო საწარმოთა ნორმები და სხვ.). მაგალითად, მოსახლეობის სასმელ-

სამეურნეო წყლის საშუალო დღეღამური ნორმის ზედა ზღვარი კეთილმოწყობის უმაღლესი კატეგორიის შენობისათვის ამჟამად შეადგენს 700÷800 ლიტრს 1 კაცზე დღეღამეში.

საცნობარო ლიტერატურაში მოცემულია აგრეთვე წყლის მოხმარების რეჟიმი დღეღამური და საათობრივი უთანაბრობის კოეფიციენტების მეშვეობით. ეს კი საშუალებას იძლევა გავიანგარიშოთ მაქსიმალური, მინიმალური და საშუალო ხარჯები. სადაწნეო რეზერვუარამდე მოთავსებული წყალსადენის ელემენტები, გაანგარიშდება საშუალო ხარჯზე, ხოლო რეზერვუარის შემდეგ – მაქსიმალურზე.

წყალსადენის ქსელის გაანგარიშების მიზანია მისი ძირითადი პარამეტრების დადგენა, რაც ეტაპობრივად ხორციელდება: მაგისტრალური ქსელის კონფიგურაციის, საანგარიშო კვანძების და უბნების გამოვლენა; ნაკადების წინასწარი განაწილება, უბნების მაქსიმალური საანგარიშო ხარჯების გამოთვლა; ნაკადების ჭეშმარიტი განაწილების დადგენა; საჭირო პიეზომეტრული ნიშნულებისა და თავისუფალი დაწნევის განსაზღვრა; სადაწნეო რეზერვუარის ძირის ნიშნულის განსაზღვრა; შემოწმებითი გაანგარიშება რეჟიმისათვის, როცა მაქსიმალური საანგარიშო ხარჯს ემატება ხანძარსაწინააღმდეგო წყლის ხარჯი; სატუმბი დანადგარების აწევის სიმაღლის განსაზღვრა.

მინიმალური საჭირო თავისუფალი დაწნევა მაქსიმალური ხარჯის რეჟიმისას დამოკიდებულია შენობების სართულიანობაზე და 10 მ-ს შეადგენს ერთსართულიანი შენობებისათვის; ყოველ დამატებით სართულზე ემატება 4 მ. ხანძარზე რეჟიმისათვის მინიმალური საჭირო თავისუფალი დაწნევა მიიღება 10 მ.

მილდენების დიამეტრის შერჩევაც ხდება საანგარიშო ხარჯისა და ე.წ. ეკონომიკურად ხელსაყრელი სიჩქარის მიხედვით, სპეციალური ცხრილების მეშვეობით. ხელსაყრელი სიჩქარის ზღვრებია 0,6-დან 0,9 მ/წმ, როცა **d<300** მმ და 0,9-დან 2,5 მ/წმ-მდე, როცა **d≥300** მმ.

წყალსადენის ქსელებისა და წყალდენებისათვის იყენებენ ფოლადის, თუჯის, რკინაბეტონის, პლასტმასის და ა.შ. მილებს.

7.2. ძირითადი ნაგებობები და მოწყობილობები

წყალმიმღები ნაგებობები ძირითადად ორ ჯგუფად იყოფა: 1. გრუნტის წყლების მიმღები ნაგებობები და 2. მდინარის წყლის მიმღები ნაგებობები.

გრუნტის წყლების მიმღებ ნაგებობებში შედის: მილოვანი ჭები; შახტური ჭები; ჰორიზონტალური გალერეა, წყაროს წყლის კაპტაჟი და ა.შ. ცალკე უნდა აღინიშნოს მიწისქვეშა წყლების ხელოვნურად გამდიდრების ხერხი, რომელიც წარმატებით გამოიყენება ბოლო ხანებში.

მდინარის წყლების მიმღები ნაგებობებია: ფანჯრებიანი წყალმიმღები; სანაპირო ჭა თვითდინებითი მილით; სანაპირო ჭა სიფონური მილით; კრიბი (მდინარის კალაპოტში ჩადგმული წყალმიმღები); ხიდის ბურჯში ჩაშენებული წყალმიმღები; პირველი საფეხურის სატუმბი სადგურთან შევსებული წყალმიმღები; „ფსკერული“ ტიპის წყალმიმღებები მთის მდინარეებისათვის და სხვ.

ა) სატუმბი სადგურები

სატუმბი სადგურები ფუნქციური თვალსაზრისით, ძირითადად ორი სახისაა: I საფეხურის და II საფეხურის. I საფეხურის სატუმბი სადგურები წყალს იღებენ წყალმიმღები ნაგებობებიდან და აწვდიან გამწმენდ ნაგებობებს. II საფეხურის სატუმბი სადგურები წყალს იღებენ სუფთა წყლის რეზერვუარიდან და აწვდიან სადაწნეო რეზერვუარს, წყალსადენის ქსელს და ა.შ.

ბ) წყლის გამწმენდი სადგურები

წყლის გამწმენდი სადგურის დანიშნულებაა მასზე მიწოდებული წყლის ხარისხის გაუმჯობესება. გაწმენდის საჭირო ხარისხისა და წყლის რაოდენობის მიხედვით, გამწმენდი სადგურების შემადგენლობა ძალზე მრავალფეროვანია. ამიტომ მოგვყავს ერთ-ერთი სანიმუშო სადგურის ნაგებობების ჩამონათვალი: სარეაგენტო მეურნეობა;

შემრევი; კორიდორული ტიპის გამკამკამებელი ჩქარი ფილტრი და სუფთა წყლის რეზერვუარი.

წყლის გაწმენდა გულისხმობს აგრეთვე მის გაუსნებოვნებას. მისი ხერხებია: დაქლორვა, ოზონირება, ბაქტერიოციდული სხივებით დასხივება და ა.შ. აქედან, ყველაზე მეტად გავრცელებულია დაქლორვა.

7.3. სამხედრო დანაყოფების დროებითი წყალმომარაგების სისტემები საველე პირობებში

სამხედრო ოპერაციების წარმოებისას დიდი მნიშვნელობა აქვს საჯარისო დანაყოფების დროებითი წყალმომარაგების სისტემების ფუნქციონირებას საველე პირობებში (ნახ. 7.4). გარდა სასმელ-სამეურნეო მიზნებისა, სამხედრო ნაწილში წყალი გამოიყენება ტანკების, ავტომობილების და სხვა სამხედრო ტექნიკის გასამართად.

დიდი მნიშვნელობა აქვს წყლის მოხმარების რეჟიმს. წყლის დღეღამური რაოდენობა, რომელიც უნდა შესვას ერთმა ჯარისკაცმა საველე პირობებში, დაახლოებით შეადგენს 3 ლიტრს. მიზანშეწონილია ეს რაოდენობა განაწილდეს დღეღამის განმავლობაში გარკვეული წესით.

სასმელ-სამეურნეო წყლის მოხმარების საშუალო ნორმა ბანაკში ერთ ჯარისკაცზე შეადგენს დაახლოებით 40 ლიტრს, იგი შეიძლება იცვლებოდეს ყოველ კერძო შემთხვევაში ადგილობრივი პირობების გათვალისწინებით.

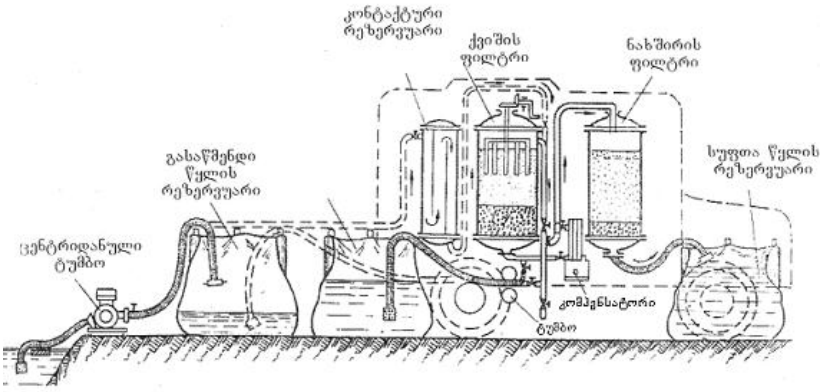
წყლის მიმართ წაყენებული მოთხოვნები შემდეგია: წყალი უნდა იყოს გამჭვირვალე, უფერო, არ უნდა ჰქონდეს არასასიამოვნო სუნი და გემო, არ უნდა შეიცავდეს ავადმყოფობის გამომწვევ მიკრობებს. სასმელი მიზნებისათვის გამოყენებული წყალი მუდმივად უნდა მოწმდებოდეს სამხედრო შენაერთის სანიტარული სამსახურის მიერ.

იმისათვის, რომ საჯარო შენაერთები საველე პირობებში ნორმალურად მარაგდებოდნენ საჭირო წყლით, ეწყობა წყალმომარაგების პუნქტები.

წყალმომარაგების წყაროებად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს: გრუნტის წყლები მილოვანი და შახტური ჭების მოწყობით, წყაროს კაპტაჟი და ზედაპირული წყლები შესაბამისი გაწმენდის შემდეგ.

თუ ჯარების მოძრაობის მიმართულებით არ არის უზრუნველყოფილი საჭირო ხარისხის წყლის წყაროს არსებობა, წყლის მარაგის ტრანსპორტირება უნდა ხდებოდეს საჯარისო შენაერთებთან ერთად.

როდესაც წყალი არ აკმაყოფილებს საჭირო მოთხოვნებს აუცილებელია მისი გაწმენდა. გაწმენდა გულისხმობს მის დალექვას, გაფილტრვას, გაუვნებელყოფას და საჭიროების შემთხვევაში, დეზაქტივაციას. თუ წყალს არასასიამოვნო გემო და სუნი არ მოსცილდა, მისი გამოყენება შეიძლება მხოლოდ განსაკუთრებულ შემთხვევაში. მოყვანილია გადამტანი საფილტრავი სქემა 7.4 ნახ-ზე.



ნახ. 7.4 ავტოფილტრი სადგურის (АФС-500) სქემა

7.4. წყლის გაუსნებოვნება და გაუვნებლობა

გაუსნებოვნება ნიშნავს წყალში არსებული ავადმყოფობის გამომწვევი ბაქტერიების მოსპობას. გაუსნებოვნება ხდება ძირითადად წყლის მოდუღებით და რეაგენტების (ქლორის) მეშვეობით. წყლის გაუვნებლობა ნიშნავს წყლის გაწმენდას მომწამლავი ნივთიერებისა და შხამებისგან. ამ მიზნით იყენებენ წყლის ადუღებას, წყლის გაფილტას გააქტიურებელი ნახშირით და სხვ.

ზოგჯერ შეიძლება საჭირო გახდეს წყლის დარბილება და გამტკნარება. დარბილებას აწარმოებენ უმთავრესად რეაგენტული მეთოდით, ხოლო გამტკნარება – აორქლებით.

რადიოაქტიური ნივთიერებებით გაბინძურებული წყლის დეზაქტივაციისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს შემდეგი მეთოდები:

- იონური ცვლა;
- გამოხდა;
- გაფილტრა კარბოფაროგელის ფილტრში წინასარი კოუაგულაციით;
- კოაგულაცია და დალექვა შემდგომი ფილტ-აციით.

წყლის შენახვისა და ტრანსპორტირებისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ხელთარსებული (ადგილობრივი) ტარა: კასრები, ავზები, როფები, ლითონის რეზერვუარები, ცისტერნები და ა.შ. აგრეთვე სპეციალური რეზერვუარები მორეზინებული ქსოვილებისაგან.

მოხმარების წინ, ტარა საგულდაგულოდ უნდა გაირეცხოს და გაუკეთდეს დეზინფექცია. უნდა ჩატარდეს ღონისძიებანი ზამთარში წყლის გაყინვის თავიდან ასაცილებლად.

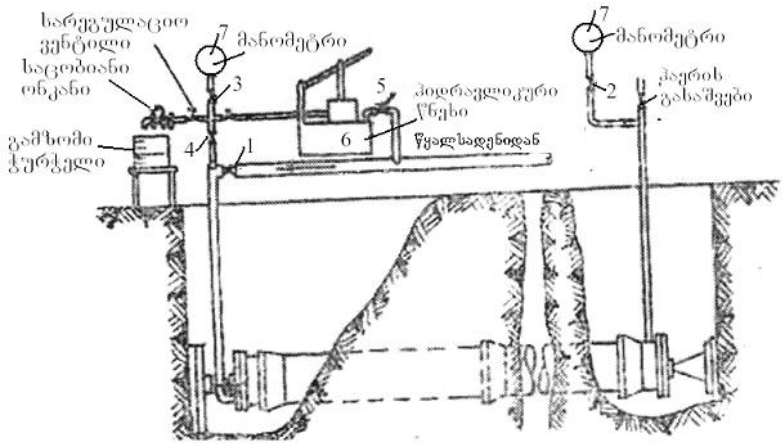
7.5. მილსადენების გამოცდა და ტექნიკური ექსპლუატაცია

მილების ჩაწყობის შემდეგ, ექსპლუატაციაში გაშვებამდე საჭიროა მათი გამოცდა სიმტკიცესა და უჟონვადობაზე. თუ გამოცდისას აღმოჩნდა რაიმე დეფექტი, საჭიროა მისი გამოსწორება. გამოცდას აწარმოებენ წი-

ნასწარ – ღია თხრილების დროს, და საბოლოოდ, როდესაც თხრილები მიწით ამოივსება.

გამოცდა წარმოებს უბნობრივად. ერთი გამოსაცდელი უბნის სიგრძედ მიიღება არა უმეტეს 1,0 კმ. თითოეული უბნის ორივე ბოლო გამოცდისათვის ჰერმეტულად იხურება ყრუ მილტუჩით და (რომ გამოცდის დროს მილტუჩი არ გამოიგლიჯოს) მაგრდება საბრჯენებით. ორივე ბოლოში კეთდება ვერტიკალური დგარები, მცირე დიამეტრის მილებისაგან. დგარს, რომელიც უბნის უფრო მაღალ ბოლოშია, უკეთდება ონკანი ჰაერის გასაშვებად და მანომეტრი, ხოლო უფრო დაბალ მხარეზე მოწყობილ დგარს უერთდება წყალსადენის ხაზი, ჰიდრავლიკური წნეხი (რომლის საშუალებითაც ტარდება გამოცდა), მანომეტრი, სარეგულაციო ონკანი, საცობიანი ონკანი და ჩამკეტი ვენტილები. გამოსაცდელი დანადგარის სქემა ნაჩვენებია 7.5 ნახ-ზე.

მილსადენს ავსებენ წყლით, რისთვისაც წყალსადენის ხაზზე აღებენ ვენტილს 1, ამ დროს ჰაერის გამშვები 2 უნდა იყოს ღია. როდესაც მილი წყლით აივსება, ჰაერის გამშვები და წყლის მიმწოდებელ ხაზზე ვენტილები იკეტება, იხსნება ვენტილები 3, 4 და 5. ჰიდრავლიკური წნეხის 6 საშუალებით, მილსადენში წნევა აყვანილი უნდა იქნეს გამოსაცდელ სიდიდემდე. წნევის სიდიდეს იგებენ მანომეტრებით 7.



ნახ. 7.5. მილსადენების გამოსაცდელი სქემა

წინასწარი გამოცდა მდგომარეობს იმაში, რომ წნეხის ქვეშ მყოფი მილსადენი კარგად უნდა დათვალიერდეს, რათა გამოვლინდეს რაიმე დეფექტი (ცუდად გაკეთებული პირაპირი, გაბზარული მილი და სხვ., რის გამოც ადგილი ექნება ჟონვას). საბოლოო გამოცდის დროს გაინსაზღვრება ჟონვა.

საერთოდ, მილსადენების გამოცდას აწარმოებენ ჰიდრავლიკური წესით (წყლით), მაგრამ ფოლადის მილების გამოცდა შეიძლება პნევმატიკური წესითაც (ჰაერის დაწნეხით).

გამოცდა უნდა ხდებოდეს მოქმედი ტექნიკური პირობების მიხედვით. ტექნიკური პირობების მიხედვით უნდა იქნეს მიღებული გამოსაცდელი წნევის სიდიდეც.

ქსელებისა და წყალდენების ტექნიკური ექსპლუატაცია გულისხმობს შემდეგ ძირითად სამუშაოებს:

1. მუდმივი მეთვალყურეობა მილსადენების და მისი არმატურის მუშაობასა და მდგომარეობაზე, ურდულებზე, სახანძრო ჰიდრანტებზე, ქუჩის შადრევნებზე, დამხარჯ ონკანებზე და სხვ.;
2. ქსელისა და წყალდენის შემჩნეული დეფექტების გასწორება;
3. მიმდინარე რემონტის წარმოება;
4. ავარიის ლიკვიდაცია;
5. მილსადენების გარეცხვა და დეზინფექცია;
6. შენობებში არსებული განშტოებების მოვლა და ახალი განშტოებების მოწყობა.

ქსელისა და წყალდენების მდგომარეობის მეთვალყურეობისათვის, პერიოდულად, წელიწადში რამდენჯერმე ხდება ყველა ჭის, არმატურისა და ნაგებობის დათვალიერება.

მილებისა და არმატურის ავარია შეიძლება გამოწვეულ იქნეს სხვადასხვა მიზეზით, ასეთებია: ჰიდრავლიკური დარტყმები, გარეგანი მექანიკური დაზიანებები, ტემპერატურის გავლენა, კოროზიის შედეგები და სხვ. ყველაზე ხშირად ავარიის მიზეზი ჰიდრავლიკური დარტყმა ხდება.

ძალიან მნიშვნელოვანია ავარიის დროული აღმოჩენა და ლიკვიდაცია. მნიშვნელოვანი ავარიის დროს, გარდა

წყლის დიდი რაოდენობით დაკარგვისა, საშიშია ახლომდებარე ნაგებობათა დაზიანებაც. შეიძლება გამოირეცხოს შენობის საძირკვლები, რკინიგზის ლიანდაგები; ნიადაგის გამორეცხვის შედეგად შესაძლებელია ქუჩის სავალი ნაწილის უეცარი ჩანგრევა და სხვ.

დაზიანებული არმატურა და მილები სწრაფად უნდა შეკეთდეს ან შეიცვალოს.

საავარიო სამუშაოების წარმოება ევალება წყალსადენის სამმართველოსთან არსებულ სპეციალურ საავარიო ბრიგადას.

ლ ი ტ ე რ ა ტ უ რ ა

1. ბობოხიძე შ. „სანაოსნო გზები და ნავსადგურები“. თბილისი: განათლება, 1972.
2. გედენიძე ზ. „თაღოვანი კაშხლების სიმტკიცეზე გაანგარიშება სეისმური ზემოქმედების გათვალისწინებით“. თბილისი, სტუ, 1997.
3. გედენიძე ზ. „სანაოსნო რაბის კონსტრუირება და გაანგარიშება“. თბილისი, 1986.
4. კიკაჩეიშვილი გ. ნაცვლიშვილი ნ. „წყალმომარაგება“ (ქსელი და მისი ნაგებობები). სტუ, 1999წ.
5. მაღლაკელიძე ვ. „ჰიდროლოგია, ჰიდრომეტრია და ჰიდროტექნიკური ნაგებობები“. თბილისი, განათლება, 1990.
6. მოროზოვი ა. „წყლის ენერგიის გამოყენება“. თბილისი: განათლება, 1973.
7. მოწონელიძე ნ. „ჰიდროტექნიკური ნაგებობები“. ნაწ. I. თბილისი: განათლება, 1977.
8. მოწონელიძე ნ. „ჰიდროტექნიკური ნაგებობები“. ნაწ. II. თბილისი, განათლება, 1982.
9. პაპაშვილი ა. „ჰიდრავლიკა“. თბილისი: განათლება, 1988.
10. ქობულია გ. „საინჟინრო მელიორაცია“. თბილისი: განათლება, 1971.
11. ქუთათელაძე ნ. „ჰიდრავლიკის საფუძვლები“. თბილისი: განათლება, 1981.
12. შენგელია პ. „ჰიდროელექტრული სადგურები“. თბილისი: განათლება, 1967.
13. Абрамов Н.Н. «Водоснабжения». Н: Строиздат, 1967.
14. Алтунин С.Т. «Регулирование русел». М: Сельхозиздат, 1962
15. Гришина М.М. М: Высшая школа, 1979.

16. Железняков Г.В. «Гидравлика и гидрология». М: Транспорт, 1989 .
17. Иванов А.И., Наговская Г.А. «Гидрология и регулирование стока». М., 1979.
18. Константинова Ю.М. «Гидравлика». Киев: Высшая школа, 1988 .
19. «Гидроэлектрические станции», под редакцией Ф.Ф. Губина. М: Энергия, 1972.
20. Михайлов А.В. «Внутренние водные пути». М.: Стройиздат, 1973 г.
21. Михайлов А.В. Левачёв С.Н. «Водные пути и порты». М.: Высшая школа, 1982 .
22. Пособие к разд.5: Гидротехнические сооружения СНиП II - 7-81. Учёт сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. Л., 1986 .
23. Руководство по расчёту параметров волн возникающих в водохранилищах при обвально-оползневых явлениях (научный руководитель – Т.Л. Гвелесиани) Тбилиси: ГОССТРОЙ ГССР. 1986.
24. Смирнов И.Н. «Гидравлические турбины и насосы». М.: Высшая школа, 1969 .
25. СНиП II -7-81 «Строительство в сейсмических районах». Нормы проектирования. . М.: Строиздат, 1982 .
26. Сунгарски С. «Водно дело». Софиа: Техника, 1969 .

კომპიუტერული უზრუნველყოფა: თამარ არუნაშვილი
მანონ კოდუა