

კონსტანტინე იორდანიშვილი, ირინა იორდანიშვილი,
ინგა ირემაშვილი, ნოდარ კანდელაკი

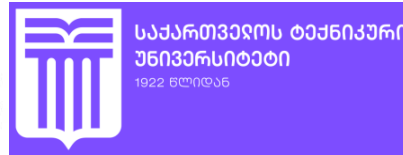
მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების
საინჟინრო-ეკოლოგიური პრობლემების
თავისებურებანი



თბილისი

2023

საქართველოს განათლებისა და მეცნიერების სამინისტრო
შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ცოტნე მირცხულავას
სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი



კონსტანტინე იორდანიშვილი, ირინა იორდანიშვილი,
ინგა ირემაშვილი, ნოდარ კანდელაკი

მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების
საინჟინრო-ეკოლოგიური პრობლემების
თავისებურებანი

გამომცემლობა „საჩინო“

თბილისი 2023

მონოგრაფიაში განხილულია საქართველოს მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების ჰიდროლოგიურ-ტექნიკური მაჩვენებლები და ჰიდროლოგიურ-ეკოლოგიური მახასიათებლების საპროგნოზო გაანგარიშებების თავისებურებანი. მოყვანილია სტატისტიკური მასალა, რომელიც შესრულებულია საქართველოს მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავებზე ბოლო წლების მანძილზე ავტორების მიერ ჩატარებული დაკვირვებების, შესწავლისა და მიღებული შედეგების გაანალიზების და განზოგადების საფუძველზე. განხილულია წყალსაცავების აგების აუცილებლობის, მათი სახალხო მეურნეობაში გამოყენებისა და გარემოზე ზემოქმედების საკითხები. დაზუსტებულია წყალსაცავების კლასიფიკაცია, შეფასებულია მათი წყლის ხარისხი, ეკონომიკური და სოციალური მნიშვნელობა.

ნაშრომი განკუთვნილია ახალგაზრდა მეცნიერების, საინჟინრო-ტექნიკური დარგის მუშაკებისა და ჰიდროტექნიკოსებისათვის.

მონოგრაფიის გამოცემა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით (საგრანტო პროექტი №FR-21-2942).

ავტორები გულითად მადლიერებას გამოხატავენ საგრანტო პროექტის ძირითადი და დამხმარე პერსონალის - **მარინე მღებრიშვილის, ირმა ქუფარაშვილის, ლალი ბილანიშვილისა და ელენე ხოსროშვილის მიმართ** სავსე და სამეცნიერო ინფორმაციის მოძიება-შეგროვება-დამუშავების პროცესსა და ექსპერიმენტული კვლევების ჩატარებაში დახმარებისათვის.

განსაკუთრებულ მადლობას კი ავტორები უხდიან აკადემიკოს **გივი გავარდაშვილს** ხელნაწერის გაცნობისას მოცემული რიგი სასარგებლო შენიშვნებისათვის.

მონოგრაფია განხილული და დამტკიცებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ცოტნე მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო-სასწავლო მეთოდური ლიტერატურის სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭოს მიერ 2023 წლის 15 მარტს (სხდომის ოქმი #24).

საგრანტო პროექტის ხელმძღვანელი – ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი

კონსტანტინე იორდანიშვილი

სამეცნიერო რედაქტორი – საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის

აკადემიკოსი გივი გავარდაშვილი

რეცენზენტები:

სს „საქწყალპროექტის“ გენერალური დირექტორი **გ. ბაქრაძე**

მთავარი სპეციალისტი, ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი **პ. ტულუში**

მთავარი სპეციალისტი, ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი **ლ. ჯავახიშვილი**

რედაქტორისაგან

მონოგრაფიის „მთის წყალსაცავების საინჟინრო-ეკოლოგიური პრობლემების თავისებურებანი“ ავტორთა კვლევების მასალების საფუძველზე შეფასებულია მთის წყალსაცავების ძირითადი მონაცემები და პრობლემების კომპლექსი. განხილულია მთიანი რეგიონების პირობებში წყალსაცავების აგების, სახალხო მეურნეობაში მათი გამოყენებისა და გარემოზე ზემოქმედების საკითხები. მოყვანილია საქართველოს წყალსაცავების კლასიფიკაცია, მთის წყალსაცავებში შიდა წყალსატევური, ფსკერზე და ნაპირებზე სედიმენტაციური და აბრაზიული პროცესების დინამიკა და პროგნოზირება; ჰიდრაულიკურ ლაბორატორიაში დამუშავებული და შემოწმებულია აბრაზიული ნაპირების წარეცხვისაგან დამცავი ბეტონის ბლოკების ახალი კონსტრუქციები.

წარმოდგენილია ჰიდრაულიკური პროცესების მოდელირებისა და ექსპერიმენტების ჩატარების რაციონალური მეთოდოლოგია, განხილულია წყალსაცავების გარემოზე ზემოქმედების ფაქტორების სისტემური ანალიზი დომინირებული ფაქტორების გამოვლენით. მონოგრაფია ეფუძნება ავტორების მიერ მრავალი წლების განმავლობაში ჩატარებულ საველე-სამეცნიერო სამუშაოების ანალიზსა და მათ შეფასებას.

ნაშრომი განკუთვნილია გარემოს დაცვის მიმართულებით მომუშავე სამეცნიერო და ტექნიკური დარგის სპეციალისტების, ახალგაზრდა მეცნიერებისა და ინჟინერ-ჰიდროტექნიკოსებისათვის.

სამეცნიერო რედაქტორი გივი გავარდაშვილი,
საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის აკადემიკოსი

წინასიტყვაობა

წყალსაცავები – წყლის რესურსების რეგულირების, ჰიდროენერგეტიკის, ირიგაციისა და დასახლებული ტერიტორიების წყლით მომარაგების; რეკრეაციის განვითარების; წყალმომარაგებისა და ღვარცოფების წინააღმდეგ ბრძოლის ეფექტური საშუალება არის.

წყალსაცავების შექმნას მოჰყვება წყლის ახალი ეკოსისტემის წარმოშობა. „წყალსაცავების ეკოსისტემის“ შესწავლა შეიძლება დავყოთ ოთხ ეტაპად: 1) წყალსაცავიანი სისტემის მშენებლობის ტექნიკურ-ეკონომიკური დასაბუთება; 2) პროექტის შედგენა და მშენებლობა; 3) წყალსაცავის წყლით შევსების ეტაპი (ამ ეტაპზე იწყება ეკოსისტემების არამდგრადობა); 4) ეკოსისტემის ე.წ. ეკოლოგიური გაურკვევლობა.

მონოგრაფიის ავტორების მიზანია განიხილონ საქართველოს მთისა და მთის-წინეთის წყალსაცავები, როგორც გეოგრაფიული ბუნებრივ-ტექნიკური ობიექტები, რომელიც ქვეყნის ლანდშაფტის განუყრელი ნაწილი და ეროვნული სიმდიდრის ერთ-ერთი ძირითადი ელემენტია. მთის წყალსაცავების ექსპლუატაციის პირობების

და მათი გარემოსთან ურთიერთქმედების ანალიზმა გვიჩვენა მათი მნიშვნელოვანი განსხვავება ვაკის წყალსაცავებისგან. ეს განსხვავებები, ძირითადად, აიხსნება ჰიდროლოგიური მოვლენების გენეზისით, მათი გამოვლინების სპეციფიკით, წყლის მოცულობის ფორმირების თავისებურებით და სხვ. ეს განსხვავებები განაპირობებს მთის წყალსაცავების შიდაწყალსატევური პროცესების განვითარების შესწავლის აუცილებლობას. ძირითადი პირობები და ფაქტორები ამ პროცესების შემდეგია:

- წყლის მასების მცირე მოცულობა და აკვატორიის მცირე ფართობი განაპირობებს ტალღების სწრაფ წარმოქმნას, განვითარებას და ჩაქრობას, რაც ხელს უწყობს ტალღების პარამეტრების მნიშვნელოვან ცვალებადობას და მათი განვითარების პროგნოზის სირთულეს;
- წყალსაცავების დონური რეჟიმის არასტაბილობა ხელს უწყობს ტალღური რეჟიმის მკვეთრ ცვალებადობას დროში;
- სანაპირო ზონაში სიღრმის მკვეთრი ცვალებადობა განაპირობებს ტალღების ტრანსფორმაციის განვითარების ინტენსივობას;
- ქარისეული რეჟიმის სპეციფიკა განაპირობებს ღელვის მახასიათებლების ცვალებადობას დროში მიმართულების მიხედვით.

მიუხედავად იმისა, რომ წყალსაცავები – ადამიანის მიერ შექმნილი ობიექტებია, ისინი განიხილება, როგორც ბუნებრივი ობიექტები, სადაც მიმდინარეობს გაყინვის, სანაპირო ზონაში წარეცხვის, ფილტრაციის, ტაფობის მოსილვის, დატბორვისა და შეტბორვის პროცესები. ამიტომ, ყველა ამ პროცესების შესწავლა და პროგნოზირება – ბუნების შეცნობისას მეტად მნიშვნელოვანი ამოცანაა ჰიდროენერგეტიკის, მორწყვისა და წყალმომარაგების საკითხების გადაწყვეტაში, ასევე უდიდესი როლი უკავია მიწოდებული წყლის მოცულობასა და ხარისხს. ამ ამოცანების გადაწყვეტა ხორციელდება მხოლოდ წყალსაცავების შექმნით. მონოგრაფიაში მოყვანილია მთის წყალსაცავებში მიმდინარე პროცესების დინამიკის საკითხები, რომლებიც მნიშვნელოვანი და სასარგებლოა მათთვის, ვინც დაკავებული ან დაინტერესებულია წყალსაცავიანი სისტემების დაპროექტებითა და ექსპლუატაციით.

სამეცნიერო დებულებები დაფუძნებულია ავტორების მიერ ჩატარებული სავსე სამუშაოების ანალიზის შედეგებზე, ხოლო ცალკეული შედეგები შემოწმებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის ჰიდრავლიკურ ლაბორატორიაში.

აღსანიშნავია, რომ წყალსაცავების თემატიკაზე მსოფლიოში გამოქვეყნებულია 35 ათასზე მეტი ნაშრომი, მაგრამ მთის წყალსაცავების აგებისა და ექსპლუატაციის აქტუალობაზე არსებობს მცირე რაოდენობის სამეცნიერო ნაშრომები ცნობილი მეცნიერებისა, ესენია: აწ გარდაცვილი აკადემიკოსები ცოტნე მირცხულავა და ოთარ ნათიშვილი, პროფესორები ნინო ვარაზაშვილი და გიგლა გობეჩია, ხოლო ამჟამად აქტიურად მუშაობენ აკადემიკოსი გივი გავარდაშვილი, პროფესორები გიორგი მეტრეველი, ლია მაჭავარიანი და ზაზა გულაშვილი.

სარჩევი

წინასიტყვაობა	3
I. წყალსაცავების ფონდი დედამიწაზე	8
II. მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების ფონდი დედამიწაზე	12
III. საქართველოს წყალსაცავების საერთო ფონდი	20
III.1. საქართველოში მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების ფონდი	20
III.2. საქართველოში მთის წყალსაცავებისა და მათი კასკადების ჰიდრო- ენერგორესურსების გამოყენების ეფექტურობა	33
III.3. საქართველოს ჰიდრორესურსების მართვა გლობალური დათბობის პირობებში.....	46
III.4. მთის წყალსაცავების და პროექტებისა და ექსპლუატაციის სპეციფიკა	62
IV. მთის წყალსაცავების გარემოზე ზემოქმედების ზოგადი დებუ- ლებების სპეციფიკა და პროგნოზირება.	68
IV.1. „წყალსაცავი-გარემოს“ ურთიერთდამოკიდებულების ზოგადი დებულებები	68
IV.2. „მთის წყალსაცავი-გარემოს“ ურთიერთდამოკიდებულების სპეციფიკა და პროგნოზირება	74
IV.2.1. მთის „წყალსაცავი-გარემოს“ ურთიერთდამოკიდებულების სპეციფიკა..	74
IV.2.2. წყალსაცავებში შიდაწყალსატევური პროცესების არსებული კვლევე- ბის ანალიზი	93
IV.2.3. მთის წყალსაცავებში შიდაწყალსატევური პროცესების პროგნოზირება	102
V. სედიმენტაციური პროცესები მთის წყალსაცავების ფსკერზე	108
V.1. წყალსაცავების ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების დინამიკის არსებული კვლევების ანალიზი	108
V.2. საქართველოს მთის წყალსაცავების ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების დინამიკა და პროგნოზირება	111
VI. აბრაზიული პროცესები მთის წყალსაცავების ნაპირებზე	136
VI.1. მთის წყალსაცავების ნაპირებზე აბრაზიული პროცესების დინამიკის არსებული კვლევების ანალიზი	136
VI.2. საქართველოს მთის წყალსაცავების ნაპირებზე აბრაზიული პროცესების დინამიკის კვლევები	139
VI.3. მთის წყალსაცავების ნაპირებზე აბრაზიული პროცესების პროგნოზირება ..	150

VI.3.1. მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვის ზედა (a_1) საზღვრის ანგარიში	150
VI.3.2. მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვის ქვედა (a_2) საზღვრის ანგარიში	154
VII. საქართველოს მთის წყალსაცავებში წყლის ხარისხის ფორმირება და თვითწმენდითი პროცესები	160
VII.1. წყალსაცავებში წყლის ხარისხის ფორმირება	160
VII.2. თვითწმენდითი პროცესები მთის წყალსაცავებში	167
VII.3. ჟინვალის წყალსაცავის წყლის ხარისხის შეფასება	172
VII.4. წყალსაცავების დაბინძურების ეკოლოგიური შეფასება	180
VIII. მთის წყალსაცავების ეკოლოგიური წონასწორობის შენარჩუნების მეთოდები	183
VIII.1. მთის წყალსაცავების დაცლის და შევსების დროის განსაზღვრა	183
VIII.2. სედიმენტაციური პროცესების განვითარების საწინააღმდეგო ღონის- ძიებები და ფსკერის გაწმენდის ზოგადი რეკომენდაციები მთის წყალ- საცავებში	188
VIII.3. მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვისაგან დამცავი ღონისძიებები	192
VIII.4. მთის წყალსაცავების სანაპირო ზოლისა (ს. ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) განსაზღვრის მეთოდოლოგია	203
VIII.4.1. წყალსაცავების სანაპირო ზოლისა (ს. ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) სიგანის განსაზღვრის ზოგადი პრინციპები	203
VIII.4.2. წყალსაცავზე ფოსფორის დატვირთვის სიდიდის განსაზღვრის ზოგადი პრინციპები	204
VIII.4.3. სიონის წყალსაცავის სანაპირო ზოლისა (ს. ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) სიგანის განსაზღვრის მაგალითი	206
IX. ჰიდრაულიკური პროცესების მოდელირება და ექსპერიმენტების ჩატარების რაციონალიზაცია ღია ნაკადებზე	212
IX.1. ჰიდრაულიკური პროცესების მსგავსების თეორიის ძირითადი საფუძვლები ღია ნაკადებზე	212
IX.2. ჰიდროდინამიკური მსგავსების უგანზომილებო კრიტერიუმები და მოდელირების ძირითადი დებულებები	213
IX.3. ტალღური პროცესების მოდელირება	217
IX.4. ექსპერიმენტების ჩატარების დაგეგმარების რაციონალური მეთოდი	220

X. წყალსაცავების გარემოზე ზემოქმედების ფაქტორების სისტემური ანალიზის მეთოდები	222
X.1. ალბათობის თეორია	222
X.2. დაკვირვებების ხდომილობების შეფასება	223
X.3. ფაქტორების მოწყვლადობის შეფასება	225
X.4. ფაქტორების ექსპერტული შეფასების (დელფის) მეთოდი	229
X.5. ფაქტორული ანალიზის მეთოდი	236
X.6. სახეთა გარჩევის მეთოდი	241
XI. წყალსაცავიანი სისტემების ძირითადი ელემენტების მოწყვლადობის შეფასება და პროგნოზირება.....	246
XI.1. არსებული კაშხლების ავარიებისა და კატასტროფების ანალიზი	246
XI.2. კაშხლების უსაფრთხოების შეფასება	257
XI.3. კაშხლების ნაპირსამაგრი ნაგებობების საიმედოობის შეფასება	259
XI.4. წყალსაცავების ექსპლუატაციის პერიოდის ეკოლოგიური საიმედოობის შეფასება	262
ბოლოთქმა	266
გამოყენებული ლიტერატურა	268
ფოტოალბომი	284

I. წყალსაცავების ფონდი დედამიწაზე

მსოფლიოს უძველესი წყალსაცავების გაანალიზებული ძირითადი მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილში I.1 [Авакян А.Б., Яковлева В.Б., 1999; Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н., 2002; იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2010; იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2015; კუპრეიშვილი შ., სიჭინავა პ., ლობჯანიძე ზ., 2015; Jia-ging, Li W., Zhang Sh., Ndukeva H., 2009; Иванов В.М., 2012].

აღსანიშნავია, რომ ჯერ კიდევ ჩვ.წ. 3000 წლის წინ ძველ ეგვიპტეში შეიქმნა ერთ-ერთი პირველი წყალსაცავი (კომიში).

ცხრილი I.1

მსოფლიოს უძველესი წყალსაცავების და კაშხლების მახასიათებლები

№	წყალსაცავის დასახელება	მდინარე	ადგილმდებარეობა	ქვეყანა	შექმნის დრო (საორიენტაციო)	კაშხლების პარამეტრები	ექსპლუატაციის დრო	მწყობრიდან გამოსვლის მიზეზები
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	კსოსხაიში (კომიში)	ნილოსი	მემფისის ზევით 20 კმ-ზე	ეგვიპტე	3000 წ. ჩვ.წ.აღმდე	მიწის კაშხალი $L = 415$ მ; $H = 17,5$ მ.	3000 წ.	მონაცემები არ არის
2	სად-ელ-კაფარი	ნილოსი	ქაიროს სამხრეთით 29 კმ-ზე	ეგვიპტე	2900 წ. ჩვ.წ.აღმდე	ყორე წყობის კაშხალი ხსნარის გარეშე $L = 121$ მ; $H = 13$ მ; $V_{სრ} = 568$ ათ. მ ³	ერთი სეზონი	კაშხლის გარღვევა წყალმოვარდნისგან
3	ნიმრუდი	ტიგროსი	ქალაქ სამარასთან	ახლო აღმოსავლეთი	2500 წ. ჩვ.წ.აღმდე	ქვაყრილის კაშხალი $H = 13$ მ.	VII ს-მდე ჩვ.წ.აღმდე	მონაცემები არ არის
4	მერისი	ნილოსის აუზი	ქაიროს სამხრეთ-დასავლეთით 8 კმ-ზე	ეგვიპტე	1800 წ. ჩვ.წ.აღმდე	$V_{სრ} = 1$ კმ ³ $L_{საპირის} = 177$ კმ	ჩვ.წ.აღმდე 102 წლამდე	მონაცემები არ არის
5	ხომსი (კატინახი)	ნარ-ელ-ასი (ორონტი)	ს. ხომსი	სირია	ჩვ.წ.აღმდე 1315 წ.	ქვაყრილის კაშხალი $L = 2,29$ კმ; $H = 7$ მ.	დღემდე	–

ცხრილი I.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	კასირი	ხოსრი	ქ. ნინევიას ზევით	ასურეთი	ჩვ.წ.აღ.- მდე 703 წ.	მონაცემები არ არის	-	-
7	მარიბი (სუდ-ელ-არიმი)	ვადი-ჯანა	ქალაქ მარიბიდან 64 კმ-ზე	იემენი (საბა)	ჩვ.წ.აღ.- მდე 800 წ.	მიწის კაშხალი $L = 670$ მ; $H = 11,5$ მ.	575 წლამდე ჩვ.წ.აღ.-ით	რღვეული კაშხლის ტანში. საბოლოოდ დაინგრა 670 წელს
8	ჯებელ-ბაშიკახი	ხოსრი	ქალაქ ნინევიასთან	ასურეთი	699 წ. ჩვ.წ.აღ.- მდე	ორი კაშხალი ქვის კვადრატული ფილებისაგან	მონაცემები არ არის	-
9	არტუმ-გომელი	არტუმ-გომელი	ბავიანის ხეობა	ასურეთი	690 წ. ჩვ.წ.აღ.- მდე	გამყვანი არხი 56 კმ. მოპირკეთებული კირქვის ფილებით	მონაცემები არ არის	-
10	მურლაბი	მურლაბი	-	სპარსეთი	600 წ. ჩვ.წ.აღ.- მდე	სამი კაშხალი	1258 წლამდე ჩვ.წ.აღ.-ით	დანგრეულია
11	კარნალბო	ალბარე-გასი	-	იბერია (ესპანეთი)	ჩვ.წ.აღ.- მდე II ს.	წყალსაცავი $V_{სრ} = 10$ მლნ მ ³	დღემდე	-
12	სავეხი	ფავრეხანი	-	სპარსეთი	880 წ. ჩვ.წ.აღ.- ით	ქვაყრილის კაშხალი $L = 120$ მ; $H = 40$ მ.	100 წელი	დანგრეულია წყალმოვარდნისგან
13	ბანდე-ემირი	-	ქ. შირაზის რაიონში	სპარსეთი	II ს. ჩვ.წ.აღ.- ით	-	დღემდე	-
14	ჟურურია	-	-	ლათინური ამერიკა	VII-VIII ს. ჩვ.წ.აღ.- ით	წყალსაცავი $V_{სრ}=220$ მლნ მ ³ $F = 96$ კმ ²	დღემდე	-

XX საუკუნის მეორე ნახევარი ხასიათდება წყალსაცავების შექმნის დინამიკური ტემპებით მთელ მსოფლიოში. 1950 წლისათვის მათი ჯამური მოცულობა 8-ჯერ გაიზარდა. თანამედროვე ეტაპზე წყალსამეურნეო ობიექტების მშენებლობა მსოფლიოს ყველა ქვეყანაში სწრაფი ტემპით მიმდინარეობს (ცხრ. I.2, ნახ. I.1). დარეგულირებული ჩამონადენის მოცულობის ზრდა შეინიშნება მსოფლიოს ყველა ქვეყანაში [ყრუაშვილი ი., ინაშვილი ი., კუპრაიშვილი მ., ბზიავა კ., 2008; Барабанова Е.А., 2012; Фаттулаев Г.Ю., 2000].

ცხრილი I.2

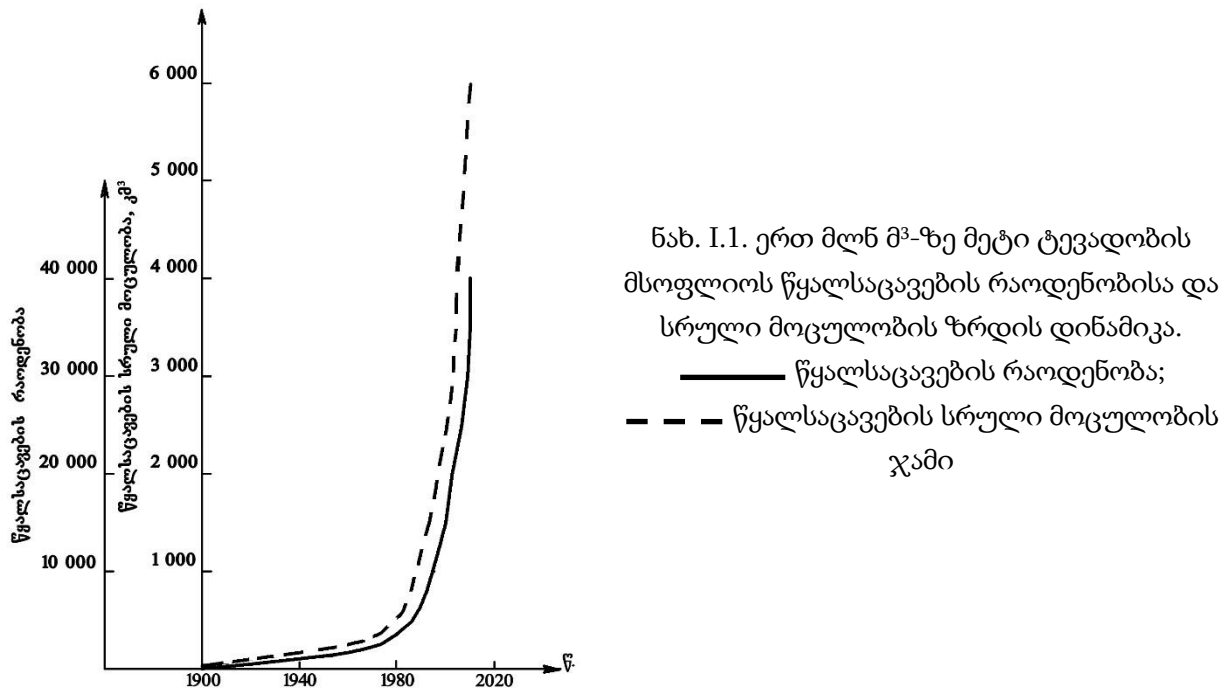
**მსოფლიოს უდიდესი წყალსაცავების ძირითადი მაჩვენებლები
(სრული მოცულობით 50 კმ³-ზე მეტი, სარკის ფართობით – 5 000 კმ²-ზე მეტი)**

№	წყალსაცავის დასახელება	ქვეყანა	მდინარე, ტბა	კაშხლის სიმაღლე	წყალსაცავის მოცულობა, კმ ³		წყლის სარკის ფართობი, კმ ²			წყალსაცავის სიგრძე, კმ	გამოყენება
					სრული	სასარგებლო	სრული	მკვდარ	დონეზე		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	ბრატსკის	რუსეთის ფედერაცია	ანგარა	106	169,3	48,2	5470	–	565	ე, ნ, ბ, თ, მ	
2	ვადი-ტარტარი	ერაყი		–	72,8	43,5	2000	–	100	წ, ი	
3	ვიქტორია (ოჟენ-ფოლსი)	უგანდა, კენია, ტანზანია	ვიქტორია, ნილოსი, ტბა ვიქტორია	31	–	204,8	76000	68000	320	ე, თ, ი	
4	ვოლტა (აკოსომბო)	განა	ვოლტა	70	198,0	90,0	8480	–	400	ე, ნ, ი, თ, წ	
5	გორდონი (მდ. ხრუმი)	კანადა	პისი	165	70,1	37,0	1683	–	360	ე, წ, ნ	
6	გური (ელ-მანტეკო)	ვენესუელა	კარონი	136	111,2	55,0	1500	–	70	ე, მ	
7	ზეისკის	რუსეთის ფედერაცია	ზეა	98	68,4	32,1	2419	–	225	წ, ე, ნ, ბ, თ	
8	კაბორა-ბასა	მოზამბიკი	ზამბეზი	65	63,0	–	2700	–	137	ე, წ, ნ, ბ, თ	
9	კრასნოიარსკის	რუსეთის ფედერაცია	ენისეი	100	73,3	70,4	2000	–	388	ე, ნ, ბ, მ, წ, თ	
10	კუიბიშევის	რუსეთის ფედერაცია	ვოლგა	29	58,0	34,6	6450	–	650	ე, ნ, ი, მ, თ	
11	ლა-გრანდი-2	კანადა	ლა-რანდი	150	60,8	28,8	4085	–	120	ე	

ცხრილი I.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	ნასერი (ასუანი)	ეგვიპტე, სუდანი	ნილოსი	95	157,0	74,0	5120	-	500	ო, ე, წ, ნ, თ
13	ირკუტსკის	რუსეთის ფედერაცია	ანგარა, ბაიკალის ტბა	30	-	47,6	32966	31500	700	ე, ნ, ხ, თ, მ
14	ვენერნი	შვედეთი	ვენერნის ტბა	-	-	7,2	5550	5500	140	ე, ნ, მ
15	ონეგის (ზემო სვირის)	რუსეთის ფედერაცია	სვირი, ონეგის ტბა	17	-	13,1	9930	9700	100	ე, ნ, ხ, თ, მ
16	ონტარიო (იროკუეი)	კანადა, აშშ	მდ. წმ. ლავრენტი, ონტარიოს ტბა	23	-	30,0	19544	19500	310	ე, ნ, წ, მ, კ
17	ჩერჩილი	კანადა	ჩერჩილი	14	32,3	28,0	5698	2849	140	ე
18	ენგურის (ჯვრის)	საქართველო	ენგური	271,5	1,092	0,66	13,48	7,0	3,0	ე

* ფრჩხილებში მითითებულია წყალსაცავის ან ჰიდროკვანძის სხვა დასახელება.
 პირობითი აღნიშვნები: ე – ენერგეტიკა; ი – ირიგაცია; წ – წყალმოვარდნებთან ბრძოლა;
 ნ – ნაოსნობა; ხ – ხე-ტყის დაცურება; მ – წყალმომარაგება; თ – თევზის მეურნეობა;
 კ – წყლის კონსერვაცია სხვადასხვა მიზნებისათვის.



2022 წლისათვის დედამიწაზე 40 ათასამდე წყალსაცავია არსებითად განსხვავებული პარამეტრებით, რეჟიმული მახასიათებლებით, სამეურნეო გამოყენების მიმართულებითა და გარემოზე ზემოქმედებით. ამჟამად დედამიწაზე არსებობს და შენდება 35 ათასზე მეტი ერთ მლნ მ³-ზე მეტი მოცულობის წყალსაცავი, რომლებზეც მოდის ყველა წყალსაცავის ჯამური მოცულობის 95%.

II. მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების ფონდი დედამიწაზე

მთისა და მთისწინა რეგიონებში შექმნილი წყალსაცავიანი სისტემები და მათი ძირითადი მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილში II.1.

ცხრილი II.1

მსოფლიოში 100 მ-ზე მეტი სიღრმის მთის მსხვილი წყალსაცავების მაჩვენებლები

№	წყალსაცავის დასახელება	ქვეყანა	მდინარე, ტბა	წყლის სიღრმე კაშხალთან, მ	სრული მოცულობა, კმ ³	წყლის სარკის ფართობი, კმ ²	წყალსაცავის სიგრძე, კმ	გამოყენების სახეობა
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	როგუნის	ტაჯიკეთი	ვახში	306,0	11,0	160	65	ე, ი, წ
2	ნურეკის	ტაჯიკეთი	ვახში	300,0	11,0	100	70	ე, ნ, ი
3	ბარუკა	კოსტა-რიკა	ფერაბა	260,0	15,0	6,2	220	ე
4	მიკა	კანადა	კოლუმბია	235,0	25,0	445	225	ი, ე, ა
5	გრანდ-დიკსანსი	შვეიცარია	დიკსანსი	227,0	401,0	4	2,5	ე
6	გობინდ საგარი	ინდოეთი	სათლეჯი	200,0	10,9	176	85	ი, ე, წ, ნ
7	პოუელი	აშშ	კოლორადო	200,0	34,0	645	300	წ, ი, ე, ა
8	ელ-კახოი	ჰონდურასი	უმუია	200,0	5,6	95	70	ე, ი, წ
9	დაბალკამი	ავსტრია	დორფერბახი	200,0	236,0	–	–	ე
10	კეზანი	თურქეთი	ევფრატი	190,0	31,0	675	125	ი, ე
11	ტოკტოგულის	ყირგიზეთი	ნარინი	180,0	20,0	285	65	ე, ი, ნ, ა
12	ათათურქი	თურქეთი	ევფრატი	175,0	48,7	138	–	ე, ი
13	ბეკმე	ერაყი	დიდი ზაბი	170,0	12,0	–	35	ი, ა, ე
14	კოლიმის	რუსეთი	კოლიმა	170,0	16,0	440	150	ე
15	მიდ-გუვერი	აშშ	კოლორადო	170,0	38,0	630	185	წ, ი, მ, ნ, ე
16	მაუთინ-გორდონი	კანადა	პისი	165,0	70,0	1680	360	ე, წ, ნ
17	იტაიპუ	ბრაზილია	პარანა	165,0	29,0	1350	170	ე
18	პელიგრე	ჰაიტი	არტიბონიტი	160,0	610	480	–	ი, ე
19	ყარაყაია	თურქეთი	ევფრატი	155,0	10,0	300	400	ე, ი
20	მაგარინი	იორდანია	იარმუკი	155,0	486,0	–	–	ი, მ
21	დანიელ-ჯონსონი	კანადა	მანიკუაგანი	154,0	142,0	1950	1575	ე, ნ, წ
22	ბჰუმბოლი	ტაილანდი	პინგი	150,0	15,4	320	125	ე, ი
23	გური-მანეკო	ვენესუელა	კარონი	150,0	135,0	4250	250	ე

ცხრილი II.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	ლა-გრანდ 2	კანადა	ლა-გრანდ	150,0	62,0	4085	120	ე
25	ემბარკაკაუ	ბრაზილია	პარანაიბა	150,0	18,0	475	68	ე
26	ფოს-დუ-არია	ბრაზილია	იგუასუ	145,0	8,0	195	–	ე
27	შესტა	აშშ	საკრამენტო	145,0	5,6	120	55	წ, ი, ე
28	ანგოსტურა	მექსიკა	გრიჰალვა	140,0	10,2	340	140	ე, ი
29	ინფერნილო	მექსიკა	ბალსასი	140,0	12,0	400	130	ე, ი, წ
30	კენიირი	მალაიზია	ტრემტანუ	140,0	16,0	–	–	ე
31	კრემასტა	საბერძნეთი	აკელოსი	140,0	4,8	80	30	ე, ი
32	ლიუცზიასია	ჩინეთი	ხუანხე	140,0	6,0	130	200	ე, ხ, ი
33	ოკუტადამი	იაპონია	ტადამი	140,0	600,0	10	–	ე
34	შრისალამ	ინდოეთი	კრიშტა	135,0	8,7	755	160	ი, ე
35	გორდონის (1974)	ავსტრალია	გორდონი	130,0	12,8	320	35	ე
36	ტარბელა	ინდოეთი	ინდი	130,0	14,0	260	80	ე, წ, ი
37	კაბორა-ბასა	მოზამბიკა	ზამბეზი	127,0	65,0	2700	270	ე, ი, ნ, რ
38	ბანჩაონენი	ტაილანდი	მებლონგი	125,0	18,0	420	120	ე, ი, წ
39	ბიასი	ინდოეთი	ბიასი	125,0	8,10	260	42	ი, ე
40	ბილ-ელ- ვიდანი	მაროკო	ალ-აბადი	125,0	1500	1160	34	ი, ე
41	ბურიეს	რუსეთი	ბურეა	124,0	23,0	800	150	ე, წ
42	ნაგარჯუნასარ	ინდოეთი	კრიშნა	120,0	12,0	265	40	ე, წ, ი
43	საიანის	რუსეთი	ენისეი	120,0	29,0	633	290	ე, ი, ნ, ხ, მ
44	უტარდ-4	კანადა	უტარდი	120,0	20,0	655	95	ე
45	ფუტალეუფუ	არგენტინა	ფუტ-ფუ	120,0	7,0	90	–	ე
46	ხაობინი	ვიეტნამი	და	120,0	–	–	–	ე, ი
47	ლა-გრანდ 4	კანადა	ლა-გრანდ	119,0	21,0	805	50	ე
48	მანგლა	პაკისტანი	ჯელამი	116,0	7,5	280	75	ე, ი
49	მალპასო	მექსიკა	გრიხალვა	110,0	13,0	300	80	წ, ე, ი, ნ
50	სან-სიმანი	ბრაზილია	პარანაიბა	110,0	13,0	600	–	ე
51	ალკანტარა	ესპანეთი	ტახო	110,0	3137	105	–	ე, ი
52	ბრატსკის	რუსეთი	ანგარა	106,0	170,0	5470	565	ე, ნ, ხ, მ, რ
53	გრან-კული	აშშ	კოლუმბია	105,0	12,0	320	240	ი, ე
54	დოკანი	ერაყი	მცირე ზაბი	100,0	7,8	270	25	ი, ე
55	ზეიას	რუსეთი	ზეია	100,0	69,0	2420	225	წ, ე, ნ, ხ, რ
56	კარიბა	ზამბია	ზამბეზი	100,0	161,0	4450	300	ე, ნ, ი, რ, წ
57	კრასნოიარსკის	რუსეთი	ენისეი	100,0	74,0	2000	390	ე, ხ, მ, ნ, წ, რ
58	ნეჩაკო	კანადა	ნეჩაკო	100,0	22,0	800	235	ე
59	სინ-ან-იანი	ჩინეთი	სინ-იანი	100,0	22,0	580	–	ე, ა

ცხრილი II.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
60	სინფინიანი	ჩინეთი	სინფინი	100,0	14,0	390	–	ე, ა
61	სირიკიტი	ტაილანდი	მას ნანი	100,0	11,0	680	90	ე, ი, ა
62	კაშტელუ-ბოლი	პორტუგალია	ზეზირი	100,0	1100	30	120	ე, წ
63	ანვალდი	იორდანია	ჯამუკი	100,0	200	12,2	–	ი, ე
64	ბენმორი	ახ. ზელანდია	უაიტაკი	100,0	2480	2000	78	ე
65	პუებლო-ვიეხო	გვატემალა	ჩიხოი	100,0	460	350	–	ე

პირობითი აღნიშვნები: ე – ენერგეტიკა; ი – ირიგაცია; წ – წყალმოვარდნებთან ბრძოლა; ხ – ხე-ტყის დაცურება; მ – წყალმომარაგება; რ – რეკრეაცია; ნ – ნაოსნობა; ა – წყლის აკუმულაცია კომპლექსური მიზნით.

მთის წყალსაცავების შექმნა განპირობებულია მათი მნიშვნელოვანი სიღრმით (H) და ტერიტორიის მცირე დატბორვით, მაგალითად:

– ამიერკავკასიის რეგიონის წყალსაცავები: ენგურის – $H=225$ მ; ჩერკეისის – $H=215$ მ; ჟინვალისა და სარხანანის – $H=110\div 115$ მ; ირგანაის – $H=95$ მ; მინგეჩაურის, სიონის, შამქორის, ახერიაანის – $H=50\div 75$ მ;

– შუა აზიის წყალსაცავები: ნურეკის – $H=300$ მ, ტოქტოგულის – $H=180$ მ, ჩარვაკის – $H=170$ მ;

– ციმბირის წყალსაცავები უპირატესად ველის ტიპისაა: საიანის წყალსაცავის წყლის სიღრმე $H=220$ მ-ს; უსტ-ილიმსკის, ზეისკისა და ხანაისკის წყალსაცავების – $H=40\div 50$ მ.

განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენს ალპების ქვეყნების წყლის რესურსების გამოყენების გამოცდილება. ალპების ერთ-ერთი მდინარე – პოს (ტიჩინო) აუზი მდებარეობს იტალიისა და შვეიცარიის ტერიტორიაზე, მისი ჰიდროგრაფიული სქემა წყლის რესურსების ენერგეტიკისა და ირიგაციისათვის ღრმა წყალსაცავების გამოყენების თვალსაჩინო მაგალითია. შვეიცარიასა და ავსტრიაში წყალსაცავების მასობრივი შექმნა დაფიქსირდა XX საუკუნის დასაწყისიდან. 1980 წლისათვის ამ რეგიონებში წყალსაცავების საერთო რაოდენობამ 200-ს გადააჭარბა. შვეიცარიის ტერიტორიაზე ($F=41,29$ კმ²) წყალსაცავების რაოდენობა 160-ზე მეტია, რომლებიც, ძირითადად, განლაგებულია $\nabla 500,0$ მ ნიშნულზე მაღლა (ცხრ. II.2; II.3; რუკა II.1). აქ მდინარეული წყლის პოტენციალის 95%-მდე უკვე დარეგულირებულია, რამაც უზრუნველყო ქვეყნის სრული ელექტროფიკაცია და ელექტროენერჯის ექსპორტი ნეგატიური პროცესების განვითარების გარეშე. სწორედ მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების აგებამ განაპირობა შვეიცარიაში ელექტროენერჯის თვითღირებულების შემცირება, ტურისტების დიდი ნაკადი და საკურორტო ზონების განვითარება.



რუკა II.1. შვეიცარიის წყალსაცავებისა და მდინარეების რუკა

ცხრილი II.2

შვეიცარიის მთისა და მთისწინეთის მსხვილი წყალსაცავების ნუსხა

№	წყალსაცავის დასახელება	წყალსაცავის სიღრმე, H, მ	ეკსპლუატაციაში შესვლის წელი	წყალსაცავის სრული მოცულობა V _{სრ} , მლნ მ ³	წყალსაცავის ადგილმდებარეობა
1	2	3	4	5	6
1	Grande Dixence	285	1961	401,00	Valais/Wallis
2	Mauvoisin	250	1957	211,50	Valais/Wallis
3	Luzzone	225	1963	108,00	Ticino
4	Locarno, Contra (Uersasco)	220	1965	105,00	Ticino
5	Emosson	180	1974	227,00	Valais/Wallis
6	Zeuzier	156	1957	51,00	Valais/Wallis
7	Göscheneralp	155	1960	76,00	Uri
8	Curnera	153	1966	41,10	Graubünden/Grigioni
9	Zervreila	151	1957	100,50	Graubünden/Grigioni
10	Moiry	148	1958	78,00	Valais/Wallis
11	Gigerwald	147	1976	35,60	St. Gallen
12	Limmern	146	1963	93,00	Glarus
13	Valle di Lei	141	1961	197,00	Graubünden/Grigioni
14	Punt dai Gall	130	1968	164,60	Graubünden/Italia

ცხრილი II.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6
15	Sambuco	130	1956	63,00	Ticino
16	Nalps	127	1962	45,00	Graubünden/Grigioni
17	Hongrin Nord	125	1969	53,20	Vaud
18	Gebidem	122	1967	9,20	Valais/Wallis
19	Mattmark	120	1967	101,00	Valais/Wallis
20	Santa Maria	117	1968	67,30	Graubünden/Grigioni
21	Albigna	115	1959	71,00	Graubünden/Grigioni
22	Spitalamm	114	1932	101,00	Bern
23	Cavagnoli	111	1968	29,00	Ticino
24	Schräh	111	1924	150,00	Schwyz
25	Oberaar	100	1953	61,00	Bern
26	Raterichsboden	94	1950	27,00	Bern
27	(Castiletto)	91	1954	60,00	Graubünden/Grigioni
28	Hongrin Sud	90	1969	53,20	Vaud
29	Rossens	83	1947	220,00	Fribourg/Freiburg
30	Schiffenen	47	1963	65,00	Fribourg/Freiburg
31	Seeuferega	42	1932	101,00	Bern
32	In den Schlagen	33	1936	96,50	Schwyz
33	Rhodannenberg	30	1910	56,40	Glarus
34	Piora	27	1920	53,90	Ticino
35	Proz-Riond	20	1957	51,00	Valais/Wallis
36	Huhnermatt	17	1937	96,50	Schwyz

ცხრილი II.3

შვეიცარიის ტბებისა და წყალსაცავების ნუსხა
ჰიდრომეტრიული ნიშნულების მიხედვით

№	სახეობა	ადგილობრივი სახელები	კანტონები, მოსაზღვრე ქვეყნები	სიმაღლე ზღვის დონიდან \pm , მ	ფართობი F , კმ ²	წყალსაცავის მაქს. სიღრმე H , მ
1	2	3	4	5	6	7
დაბლობის წყალსაცავები $\pm < 400,0$ მ						
1		Lago Maggiore	ტიჩინო, იტალია	193,5	210,12	372,0
2		Ceresio, Lago di Lugano	ტიჩინო, იტალია	270,5	48,67	288,0
3	↑	Klingnauer Stausee	არგაუ	318,0	1,16	8,5
4		Lac Léman, Lac de Geneve	ვაუდი, ვალისი, საფრანგეთი	372,0	580,03	310,0

ცხრილი II.3 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7
5		Bodensene	სენტ-გალენი, თურგაუ, ავსტრია, გერმანია	395,6	536,00	252,0
მთისწინეთის წყალსაცავები † 401,0÷ 800,0 მ						
1		Zürichsee	სენტ-გალენი, შვიცი, ციურიხი	405,9	88,17	136,0
2		Zugersee	ლუცერნი, შვიცი, ცუგი	413,6	38,41	198,0
3		Walensee	გლარუსის კანტონა, სენტ-გალენი	419,0	24,16	150,0
4		Lac de Bienne, Bielersee	ბერნი, ნევშატელი	429,1	39,51	74,0
5		Murtensee, Lac de Morat	ფრიბურგი, ვაუდი	429,2	22,80	46,0
6		Lac de Neuchâtel, Neuenburgersee	ბერნი, ფრიბურგი, ნევშატელი, ვაუდი	429,4	215,20	153,6
7		Vierwaldstättersee	ლუცერნი, ნიდვალდენი, ობვალდენი, შვიცი, ური	433,6	113,72	214,0
8		Grefensee	ციურიხი	435,1	8,17	34,0
9		Lauerzersee	შვიცი	447	3,1	14,0
10		Hallwilersee	არგაუ, ლუცერნი	448,7	10,21	47,0
11		Baldeggersee	ლუცერნი	463,0	5,24	66,0
12		Samensee	ობვალდენი	468,4	7,38	52,0
13	↑	Lago di Vogomo	ტიჩინო	470	1,68	204,0
14	↑	Wohlensee	ბერნი	480	29,81	20,0
15		Sempachersee	ლუცერნი	503,8	14,36	87,0
16	↑	Schiffenensee, Lac de Schiffenen	ფრიბურგი	532	4,25	38,0
17		Pfäffikersee	ციურიხი	536	3,3	35,0
18		Thunersee	ბერნი	557,8	47,74	215,0
19		Bienzersee	ბერნი	563,7	3,65	260,0
20	↑	Lac de la Geuère	ფრიბურგი	677	9,60	75,2
21	*	Lungerersee	ობვალდენი	688	2,01	68,0
22		Agerisee	ცუგი	723,9	7,25	82,0

ცხრილი II.3 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7
მთის წყალსაცავები \pm 810,0-1200,0 მ						
1	↑	Klöntalersee	გლარუსი	847	3,29	47,0
2		Sihisee	შვიცი	889	10,72	23,0
3	↑	Wägitalersee	შვიცი	900	4,18	65,0
4	*	Lago di Poschiavo	გრისონსი	962	1,98	85,0
5	*	Lac Brenet	ვაუდი	1004		34,0
მაღალმთიანი წყალსაცავები \pm > 1200,0 მ						
1	↑	Lac de l'Hongrin	ვაუდი	1255	1,60	105,0
2	↑	Lago del Sambuco	ტიჩინო	1461	1,11	124,0
3	↑	Oeschinensee	ბერნი	1578	1,11	56,0
4	↑	Lago di Luzzone	ტიჩინო	1606	1,27	125,0
5	↑	Lai da Marmorera	გრისონსი	1680	1,41	65,04
6		Silvaplauenrsee, Lej da Silvaplauna	გრისონსი	1790	3,1	77,04
7	↑	Göscheneralpsee	ური	1792	1,32	106,0
8		Silsersee, Lej da Segl	გრისონსი	1797	4,1	71,0
9	↑	Lafo di Livigno	იტალია, გრისონსი	1805	4,71	119,0
10	*	Lago Ritom	ტიჩინო	1850	1,49	69,0
11	↑	Limmensee	გლარუსი	1857	1,36	146,0
12	↑	Zervreilasee	გრისონსი	1862	1,61	151,0
13	↑	Grimensee	ბერნი	1908	2,63	100,0
14	↑	Lai da Sontga Maria	გრისონსი	1908	1,77	86,0
15	↑	Lac de Salanfe	ვალაისი	1925	3,27	48,0
16	↑	Lac d'Emosson	ვალაისი	1930	1,62	161,0
19	↑	Lago di Lei	იტალია, გრისონსი	1931	4,12	133,0
20	↑	Lac de Mauvoisin	ვალაისი	1961	2,08	250,0
19	↑	Lago da l'Albigna	გრისონსი	2163	1,13	108,0
20	↑	Mattmaksee	ვალაისი	2197	1,76	93,0
21	*	Lago Bianco	გრისონსი	2234	1,50	53,0
22	↑	Lac de Moiry	ვალაისი	2249	1,40	148,0
23	↑	Oberaarsee	ბერნი	2300	1,47	90,0
24	↑	Lac des Dix	ვალაისი	2365	3,65	285,0

აღნიშვნები: ↑ – წყალსაცავები;

* – ბუნებრივი ტბები, გამოიყენება როგორც წყალსაცავი

ნორვეგიაში, რომლის ტერიტორია 324 220 კმ² და მოსახლეობა 5,3 მლნ-ია, ექსპლუატაციაში 1660-ზე მეტი რაოდენობის ჰიდროელექტროსადგურია, აქედან 1000-ზე მეტი – წყალსაცავიანია. ნორვეგია ჰიდროგენრაციით ევროპაში პირველ, ხოლო მსოფლიოში – მეექვსე ადგილზეა (რუკა II.2).



რუკა II.2. ნორვეგიის ჰიდროელექტროსადგურების განლაგების რუკა

ნორვეგია – ქვეყანა, რომელსაც აქვს ბუნებრივი აირის უდიდესი მარაგი, მაქსიმალურად ცდილობს ეს რესურსი ქვეყნის შიგნით მინიმალურად გამოიყენოს, ამიტომ 143 მლრდ კვტსთ მოდის ჰიდროენერგეტიკაზე. სავარაუდოდ, შვედეთსა და ფინეთში მნიშვნელოვნად გაიზრდება ნორვეგიის ჰიდროელექტროენერჯის გამოყენების წილი.

ამრიგად, მთის წყალსაცავების აგება მეტად ეფექტური და ხელსაყრელია. რეგულირებადი წყალსაცავიანი ჰიდროელექტროსადგურების აშენებით, ქვეყნებს მიეცემა შესაძლებლობა შეამციროს და აღმოფხვრას მეზობელ ქვეყნებზე ენერგოდამოკიდებულების მაჩვენებელი.

III. საქართველოს წყალსაცავების საერთო ფონდი

III.1. საქართველოში მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების ფონდი

კომპლექსურ ჰიდრონაგებობას – წყალსაცავს კაშხლით, რომლის მიზანია ხელოვნური წყალსატევის შექმნა წყლის დასაგროვებლად ჩამონადენის რეგულირება და სარწყავი მიწების „საკომანდო“ სიმაღლის მიღწევა, საქართველოში წინაისტორიული ფესვები აქვს.

სარწყავ მიწათმოქმედებას საქართველოში უძველესი ტრადიცია გააჩნია. პირველი ცნობები ირიგაციის შესახებ გვხვდება ძველი წელთაღრიცხვის I საუკუნეში. ბერძენი მოგზაური და გეოგრაფი სტრაბონი ახალი წელთაღრიცხვის I საუკუნეში წერდა: „ეს ქვეყანა (საქართველო) უფრო მეტად ირწყვის მდინარეთა და სხვა წყლებით, ვიდრე თვით ბაბილონი და ეგვიპტე“. ე. თაყაიშვილი ამბობდა, რომ მსხვილი არხების გაყვანა საქართველოში დაწყებული უნდა იყოს პირველი ათასწლეულის მეორე ნახევარში. განვითარების ყველა ეტაპზე ქვეყანა სარწყავ სისტემებს ისე იცავდა, როგორც ციხე-სიმაგრეებს.

ჰიდროგრაფიული ქსელის სიხშირემ და მდებარეობის მთიანმა პირობებმა ისტორიულად განაპირობა საქართველოში მცირეხარჯიანი არხების შექმნა [იორდანიშვილი ი.კ., 2010]. საქართველოს ჰიდროგრაფიული ქსელის სიხშირემ განაპირობა მცირეხარჯიანი არხების შექმნა, რაც აადვილებდა მათ გაყვანასა და აღდგენას.

არქეოლოგიური მონაცემებითაც დასტურდება ქართლში ფართო მასშტაბის საირიგაციო მშენებლობა. ანტიკურ ხანასა და ადრე შუასაუკუნეების დასაწყისში მოეწყო „რუსხმულები“ შიდა ქართლის ვაკის სამივე ველზე: დოღლიაურის, ტირიფონისა და მუხრანის. „რუსხმულები“ გამოიტანეს დიდი კავკასიონიდან გამომდინარე, მტკვრის მარცხენა შენაკადი მდინარეებიდან (ფრონე, ფცა, დიდი და პატარა ლიახვი, მეჯუდა, ლეხურა, ქსანი). ქსნიდან რუს გამოღებას „მოქცევაჲ ქართლისაჲ“ ალექსანდრე მაკედონელს მიაწერს: „დასცა ვენახი და რუჲ გამოიღო ქსნით“.

ანტიკურ ხანასა და ფეოდალიზმის ადრეულ საფეხურებზე იქმნება მსხვილი სარწყავი სისტემები კახეთშიც (ივრის და ალაზნის აუზში). მიწის გასარწყავება ხდებოდა მთაშიც, სადაც კი რელიეფი იძლეოდა ამის საშუალებას (თიანეთის რაიონში – ერწოს ველი, არტაანი და სხვ.).

IV-VI საუკუნეებს უკავშირდება ქართლში მნიშვნელოვანი სარწყავი სისტემების შექმნა და მსხვილი არხების გაყვანა, რასაც სახელმწიფო ხელისუფლება და საეკლესიო ეპარქიები ახორციელებდნენ. ამ მხრივ ნიშანდობლივია რუსთავის, მუხრანის, გაჩიანის, რუის-ურბნისის, წილკნისა და სხვა არხების გაყვანა.

მელიორაცია განსაკუთრებით განვითარდა თამარ მეფის მეფობის დროს (XII ს.). ამ პერიოდში მდ. არაგვიდან გაუყვანიათ 20 კმ სიგრძის არხი – „თამარის არხი“, რომელიც სოფელ ჟინვალიდან იწყებოდა და გარდაბნის ველამდე აღწევდა. აღნიშნული არხით ირწყვებოდა მდ. არაგვის მარცხენა სანაპირო ზოლი, საგურამოს, ავჭალის და თბილისის ზემო მინდვრები. თამარის ბრძანებითვე გაუყვანიათ 119 კმ

სივრცის ალაზნის არხი. დღემდე შემორჩენილია ამ არხების ცალკეული ფრაგმენტები. შოთა რუსთაველის „ვეფხისტყაოსანი“ ადასტურებს ამ ცნობებს. მართალია, პოემის სიუჟეტი გაშლილია ისეთ დიდ სივრცეში, რომელიც მოიცავს ინდოეთს, არაბეთს, სპარსეთს (ხვარაზმს) და ჩრდილოეთ ჩინეთს (ხატაეთს) და ავტორის ფანტაზიით შექმნილ გეოგრაფიულ დასახლებებს: მულღაზანზარს (ფრიდონის სამეფო), გულანშაროს ანუ ვაჭართა სამეფოს და ა.შ., მაგრამ ყველგან იგულისხმება საქართველო. პოემაში არაერთხელაა აღწერილი აყვავებული ბაღჩები და ბაღები, რომლებიც ირწყვება (სტროფი 337):

„ბაღჩა ვნახე უტურფესი ყოვლისავე სალხინოსა,
მფრინველთაგან ხმა ისმოდა უამესი სირინოსა,
მრავლად იყო **სარაჯები** ვარდის წყლისა იბანოსა,
კარსა ზედა მოჰფარვიდა ფარდაგები ოქსინოსა“.

ამ შემთხვევაში „სარაჯი“ – ღარია, მილი ან წყლის აუზი*).

705-ე სტროფში ავტორი პირდაპირ მიუთითებს მორწყვის აუცილებლობაზე:

„რა სჯობს, რა კაცმან გიშერი ბროლ-ლოდსა თანა ახიოს,
ანუ ბაღს ალვა საროსა ახლო რგოს, მორწყოს, ახიოს,
მისსა სჭვრეტელსა ალხინოს, ვერ-მჭვრეტსა ავაგლახიოს!
ვაი მოყვრისა გაყრილსა, ახი ოს ეყოს, ახი ოს!“

წყლის ფასი მაშინაც იცოდნენ და უფრთხილდებოდნენ მას (სტროფი 911):

„სწყუროდეს, წყალსა ვინ დაღვრის კაცი უშმაგო, ცნობილი?
მე თვალთა ჩემთა მით მიკვირს, რად ვარ ცრემლითა ლტობილი!
უწყლობა ჰკლავს და წყალი სდის, აროდეს არ გახმობილი!
ვა, წახდა ვარდი პობილი, ვა, მარგალიტი წყობილი!“

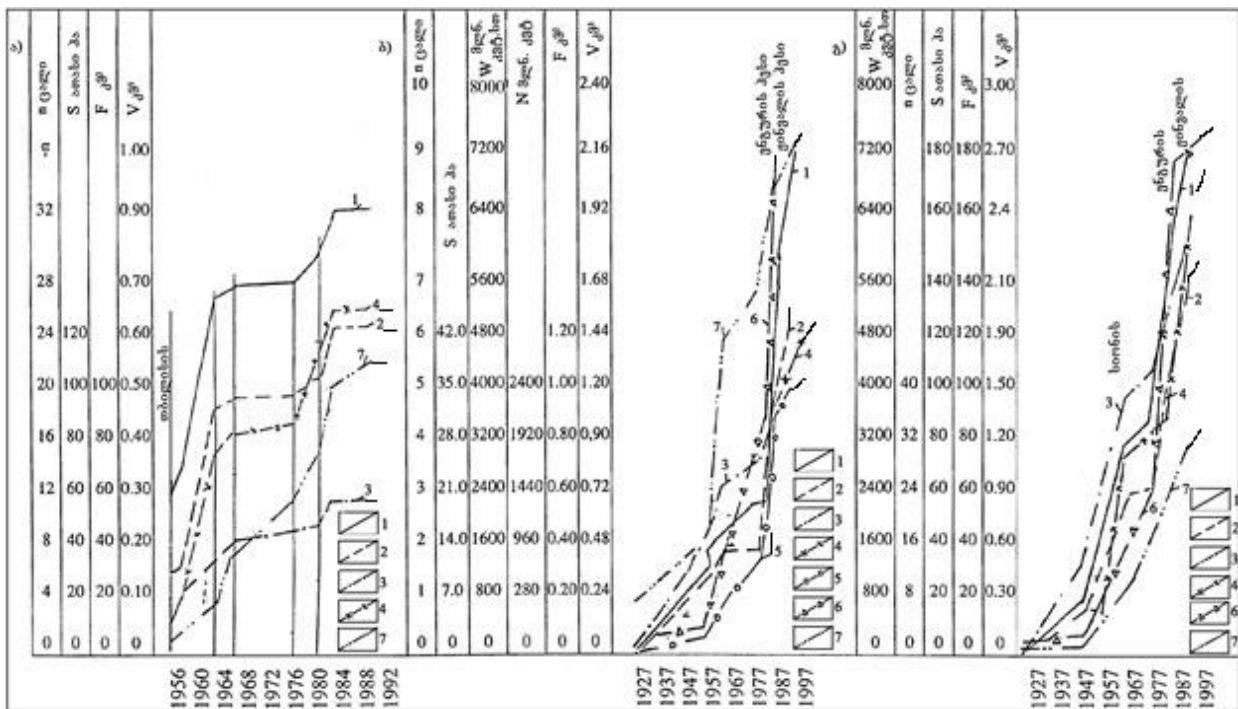
თამარ მეფის დროს შექმნილი არხები დღემდე არსებობს, მათ შორისაა ე.წ. „თამარ მეფის“ არხი გურჯაანის რაიონში. მონღოლთა ურდოებისა (XIII ს.) და შაჰ-აბასის (XVII ს.) თავდასხმების დროს საქართველოში სრულიად განადგურდა ჰიდროტექნიკური ნაგებობანი. ვახტანგ VI-მ (XVIII ს.) ნაწილობრივ აღადგინა დანგრეული არხები – რუსთავის, ურბნისის და ხან-არხი. საქართველოში ცენტრალიზებული ხელისუფლების დასუსტებასთან ერთად, სუსტდებოდა და ეცემოდა ჰიდროტექნიკური ნაგებობების განვითარებაც. XIX საუკუნის მეორე ნახევრიდან უკვე შეინიშნება ჰიდრონაგებობათა მშენებლობის შემდგომი განვითარების პერსპექტივა. ინჟინერიის ბოლო მიღწევების საფუძველზე, ინგლისელი ინჟინრების ბელის და გაბის პროექტით, 1864-1867 წლებში აშენდა მარიინის (ახლანდელი გარდაბნის) სარწყავი ქსელი

* უნდა ვივარაუდოთ, რომ ეს პირველი მითითებაა ხელოვნური წყალსაცავის არსებობაზე საქართველოში (XII ს.)

ჯანდარის წყალსაცავის შექმნით, რომელიც მალე დაილამა. 1957 წელს მოხდა მისი გაწმენდა და მიერთება ახალ სარწყავ საირიგაციო ქსელთან.

1920-1941 წწ. აღდგენილ იქნა და აშენდა მსხვილი საინჟინრო სარწყავი სისტემები: მაშველის (1924 წ.), ტირიფონის (1928 წ.), ალაზნის (1931 წ.), დილომი-I (1928 წ.), სოლანლულის (1936 წ.).

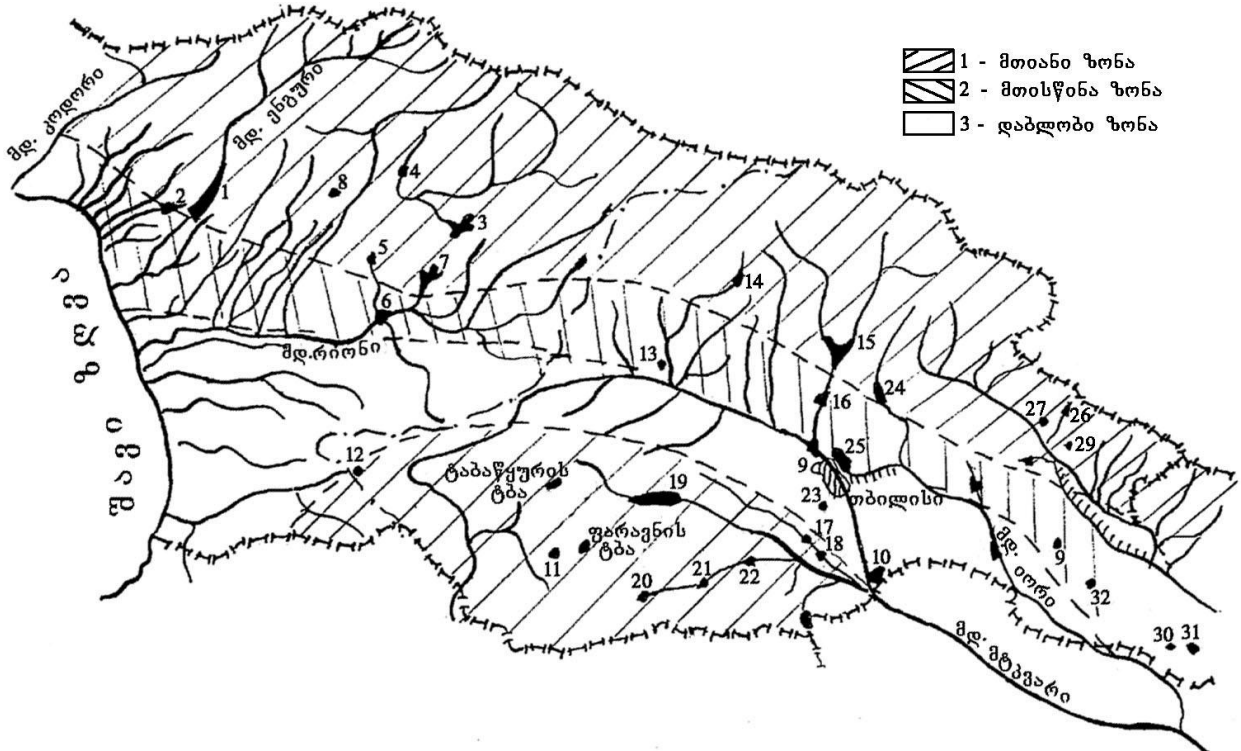
წყალსაცავების შექმნის ახალი ეტაპი დაიწყო მეორე მსოფლიო ომის დამთავრების შემდეგ (1945 წ.). მდინარის ჩამონადენის რეგულირებამ ტრადიციულ ამოცანებთან ერთად, გადაწყვიტა წყალუზრუნველყოფის ახალი საირიგაციო სისტემების და ეკოლოგიური მდგომარეობის გაუმჯობესების ამოცანები. მსხვილი კომპლექსური წყალსაცავებიანი ჰიდროსისტემების ინტენსიური მშენებლობის დასაწყისი აღინიშნება თბილისის (1952 წ.), შაორის (1954 წ.), ტყიბულის (1956 წ.), გუმათის (1958 წ.) და რიგი სხვა წყალსაცავების ექსპლუატაციაში შეყვანით, რომელთა შორის უნდა აღინიშნოს ისეთი მსხვილი წყალსაცავები, როგორცაა სიონის (1964 წ.), ხრამის (1966 წ.), ჯვრის (ენგურის) (1976 წ.), ჟინვალის (1985 წ.) და სხვ. (ნახ. III.1.1, III.1.2).



ნახ. III.1.1. საქართველოს წყალსაცავების ფონდის განვითარების დინამიკა:
 ა) ირიგაციული; ბ) ენერგეტიკული; გ) საერთო ფონდი; 1 – $V_{სრ.}$, კმ³; 2 – $V_{სასარ.}$, კმ³;
 3 – F, კმ³; 4 – S ათასი ჰა; 5 – N ათასი კვტ; 6 – W მლნ კვტ სთ; 7 – n ცალი.

ჰიდროენერგეტიკის მიზნებისათვის შეიძლება გამოყენებული იყოს 320-მდე მდინარე, რომელთაც აქვთ სიმაღლის მნიშვნელოვანი ვარდნა. საქართველოს მდინარეების პოტენციური სიმძლავრეა 18,2 მლნ კვტ, რაც შეესაბამება 60 მლრდ კვტ საათს წელიწადში. საქართველოს ტერიტორიის 75% მთისა და მთისწინეთის ზონაშია, იგი გამოირჩევა ბუნებრივი ლანდშაფტისა და კლიმატური ზონების მრავალფეროვნებით, რთული რელიეფით, რაც განაპირობებს წყლის მარაგის რაციონალურ გამოყენებას,

განაწილებას და წყალსაცავიანი სისტემების განლაგებას, ცხრ. III.1.1-III.1.9 [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2008, 2009, 2010; ფანჩულიძე ჯ., მეტრეველი გ., 2015].



ნახ. III.1.2. საქართველოს წყალსაცავების განლაგება ($V_{სა} > 1$ მლნ მ³)
(წყალსაცავების დასახელება ნუმერაციის მიხედვით მოყვანილია ცხრილებში III.1.4; III.1.5)

ცხრილი III.1.1

საქართველოს წყლის „მარაგის“ კომპონენტები

წყლის მარაგის მაჩვენებლები	წყლის მოცულობა, კმ ³			%
	აღმოსავლეთ საქართველოში	დასავლეთ საქართველოში	სულ საქართველოში	სულ საქართველოში
1	2	3	4	5
მდინარეები	14,7	51,13	65,83	61,83
ტბები	0,422	0,30	0,72	0,69
წყალსაცავები	1,9929	1,4891	3,461	3,26
მეიწვარეები	5,08	18,740	23,82	22,37
მიწისქვეშა წყლები	6,4	4,2	10,6	9,96
ჭაობები	–	1,86	1,86	1,75
თერმული წყლები	0,04	0,02	0,06	0,06
მინერალური წყლები	0,001	0,1	0,101	0,09
სულ	28,64	77,84	106,46	100,0

ცხრილი III.1.2

საქართველოს მდინარეული წყლის მარაგის კრეზსითი მონაცემები

№	რეგიონი	წყალშემკრების ფართობი, ათ. კმ ²	რეგიონის ფართობი, ათ. კმ ²	წყლის ადგილობრივი ჩამონადენი, კმ ³ /წელი	წყლის ჩამონადენი მეზობელი ტერიტორიიდან, კმ ³ /წელი	წყლის მოცულობა სულ, კმ ³ /წელი
1	2	3	4	5	6	7
1	საქართველო	99,26	69,7	56,33	9,50	65,83
2	დასავლეთ საქართველო	52,60	32,42	43,69	7,44	51,13
3	აღმოსავლეთ საქართველო	46,66	37,28	12,64	2,07	14,71
4	აფხაზეთი	23,18	8,60	15,40	–	15,40
5	აჭარა	8,60	3,0	3,42	6,48	9,90
6	მდ. მტკვრის აუზი	44,12	34,74	9,39	2,07	11,46

ცხრილი III.1.3

საქართველოში წყალსაცავების წყლის ჩამონადენის დარეგულირების მახასიათებლები

№	წყალსაცავის დასახელება	წყალსაცავების წყლის მოცულობა, მლნ მ ³		50%-იანი ჩამონადენი, მლნ მ ³ W _{ჩამ}	დარეგულირების მახასიათებელი		წყალსაცავიდან სასარგებლო წყალგაცემა, W _{წყმ} , მლნ მ ³ (წელიწადში)	ჩამონადენის გამოყენების კოეფიციენტი, W _{წყმ} /W _{ჩამ}
		V _{სრ}	V _{სას}		$\frac{V_{სრ}}{W_{ჩამ}}$	$\frac{V_{სას}}{W_{ჩამ}}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
მდ. ენგურის აუზი								
1	ენგურის	1090,0	662,0	4640,0	0,235	0,143	4523,9	0,975
2	გალის	145,0	26,0	4850,0	0,0298	0,0056	4833,4	0,996
სულ მდ. ენგურის აუზში		1235,0	688,0	9490,0	0,2649	0,1486	9356,3	1,971
მდ. რიონის აუზი								
3	შაორის	90,0	87,0	128,0	0,703	0,679	121,0	0,945
4	ტყიბულის	84,0	62,0	216,5	0,388	0,286	209,0	0,965
5	გუმათის	39,0	13,0	5100,0	0,0077	0,00255	4228,0	0,829
6	ლაჯანურის	39,0	13,0	5100,0	0,0077	0,00255	4228,0	0,829
7	ვარციხის	24,6	17,6	1510,0	0,0163	0,0116	1509,0	0,999
8	კუხის	14,6	2,4	8600,0	0,0017	0,00028	8600,0	0,784
სულ მდ. რიონის აუზში		266,8	186,85	15556,4	0,017	0,012	12816,0	0,823

ცხრილი III.1.3 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
მდ. მტკვრის აუზი								
9	ქინვალის	1,9	1,85	2,89	0,657	0,64	2,0	0,692
10	თბილისის	520,0	370,0	1373,7	0,378	0,269	1373,7	0,983
11	სიონის	308,0	155,0	–	–	–	172,5	–
12	დალის მთის	325,0	300,0	342,0	0,95	0,877	333,6	0,974
13	თელეთ-წყლის	140,0	120,0	–	–	–	110,0	–
სულ მდ. იორის აუზში		774,6	576,2	–	–	–	1994,55	–
14	ალგეთის	1,6	1,20	4,80	0,333	0,25	4,75	–
15	მარაბდის	1,20	0,20	2,0	0,60	0,10	1,60	0,800
სულ მდ. ალგეთის აუზში		66,20	60,20	130,0	0,509	0,463	61,3	0,472
16	ზონკარის	40,0	39,0	302,4	0,132	0,129	105,0	0,347
17	ხრამის (წალკის)	312,0	292,2	308,0	1,01	0,948	246,0	0,799
18	ზაჰესი	12,0	3,0	5610,0	0,0021	0,00053	4220,1	0,752
19	დმანისის	11,0	11,0	–	–	–	14,8	–
20	ლაფიანის	3,5	3,5	–	–	–	4,75	–

დღეისათვის საქართველოს ტერიტორიაზე მოქმედებს სულ 32 წყალსაცავი (მოცულობით 1 მლნ მ³-ზე მეტი), მათ შორის აღმოსავლეთ საქართველოში – 24 წყალსაცავი, ხოლო დასავლეთ საქართველოში – 8 წყალსაცავი (ცხრ. III.1.4; III.1.5); სულ დაბლობის ზონაში (წ < 400,0 მ) – 7, მთისწინეთის ზონაში (წ < 400,0÷800 მ) – 14, მთიან ზონაში (წ < 800,0÷1200 მ) – 5, ხოლო მაღალმთიან ზონაში (წ > 1200 მ) – 6 წყალსაცავი (ცხრ. III.1.4; III.1.5; III.1.6).

ცხრილი III.1.4

აღმოსავლეთ საქართველოს წყალსაცავების კლასიფიკაცია სიღრმის მიხედვით

№	ნახ.III.1.2-ის მიხედვით	წყალსაცავის დასახელება	სიღრმე, H, მ		მორფომეტრიული მაჩვენებელი, H/F · 10 ⁻³	მოცულობის ნამატი 1 მ სიღრმეზე, V _{სრ} /H, მლნ მ ³
			H _{მაქს}	H _{მინ}		
1	2	3	4	5	6	7
ღრმა (H=100÷40 მ)						
1	15	ქინვალის	98,0	50,0	0,22	5,30
2	17	ალგეთის	72,5	28,2	0,35	0,89
3	24	სიონის	68,6	31,4	0,086	4,73
4	14	ზონკარის (პატარა ლიახვის)	62,0	29,0	0,60	0,64

ცხრილი III.1.4 (გაგრძელება)

5	25	თბილისის (საპროექტო)	45,0	26,2	0,12	6,84
6	16	ნარეკვავის	40,3	18,8	0,60	0,16
საშუალო სიღრმის ($H=100\div 40$ მ)						
7	19	ხრამის (წალკის)	25,0	9,3	0,0057	12,48
8	29	თელეთწყლის	25,0	12,0	1,030	0,06
9	9	ზაჰესის	23,0	14,0	0,007	0,52
10	32	თავწყაროს	22,4	6,5	0,165	0,04
11	27	ლაფიანის (კუდიგორას)	20,0	12,0	0,048	0,17
მცირე სიღრმის ($H=20\div 10$ მ)						
12	31	კუმისხევის	18,0	7,0	0,075	0,22
13	21	პანტიანის	15,0	10,0	0,16	0,36
14	30	კრანჭისხევის	14,0	8,0	0,24	0,09
15	22	დმანისის (იყუბლოს)	11,5	5,6	0,016	0,95
16	13	ნადარბაზევის	11,0	7,0	0,025	0,74
17	12	ცხენისის-ჭის (უდე)	10,5	5,9	0,12	0,14
18	26	ჭალის	10,0	6,0	0,10	0,17
უმცირესი სიღრმის ($H < 10$ მ)						
19	18	მარაბდის	8,0	4,0	0,070	0,15
20	20	მთისძირის	7,2	3,7	0,017	0,46
21	10	ჯანდარის	7,0	4,6	0,0017	7,42
22	28	ოქტომბრის	8,5	4,2	0,077	0,21
23	23	კუმისის	4,7	2,0	0,0007	2,34
24	11	ზრესის	3,8	1,8	0,0006	0,54

ცხრილი III.1.5

დასავლეთ საქართველოს წყალსაცავების კლასიფიკაცია სიღრმის მიხედვით

№	ნახ.III.1.2-ის მიხედვით	წყალსაცავის დასახელება	სიღრმე, H , მ		მორფომეტრიული მაჩვენებელი $H/F \cdot 10^{-3}$	მოცულობის ნამატი 1 მ სიღრმეზე $V_{სრ}/H$, მლნ მ ³
			$H_{ბაჟს}$	$H_{ბინ}$		
1	2	3	4	5	6	7
ძალიან ღრმა ($H > 100\div 40$ მ)						
1	1	ჯვრის (ენგურის)	230,0	115,0	0,98	4,74
ღრმა ($H = 100\div 40$ მ)						
2	4	ლაჯანურის	67,8	36,0	0,93	0,35
3	2	გალის	52,0	26,0	0,086	2,78
საშუალო სიღრმის ($H=40,0\div 12,0$ მ)						
4	7	ტყიბულის	32,0	16,0	0,0042	5,25

ცხრილი III.1.5 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7
5	5	გუმათის	30,0	17,0	0,12	1,30
6	8	კუხის	19,4	6,3	0,13	0,10
7	3	შაორის	12,3	6,8	0,035	5,77
უმცირესი სიღრმის ($H < 10$ მ)						
8	6	ვარციხის	8,0	4,0	0,03	1,83

ცხრილი III.1.6

აღმოსავლეთ საქართველოს მოქმედი წყალსაცავების
ჰიდრომეტრიული მონაცემები

№	წყალსაცავის დასახელება	დონის ნიშნულები, \pm , მ		რელიეფის კოეფიციენტი, „ა“
		ნშდ, მ	მმდ, მ	
1	2	3	4	5
დაბლობის ზონა $\pm < 400$ მ				
1	ცხენისის ჭის	103,5	95,0	–
2	ჯანდარის	291,50	289,50	0,601
3	ოქტომბრის	341,50	334,50	0,541
მთისწინა ზონა $\pm 400 \div 800$ მ				
4	ლაფიანის	429,00	417,00	0,404
5	ზაჰესის	448,00	446,50	0,358
6	კუმისის	471,35	469,92	0,320
7	კრანჭისხევის	480,00	477,60	0,441
8	კუშისხევის	490,00	475,00	0,459
9	ჭალის	495,00	487,00	0,455
10	თბილისის (საპროექტო)	548,00	535,00	0,598
11	მარაბდის	555,00	547,00	0,368
12	თავწყაროს	616,00	610,00	0,371
13	თელეთწყლის	720,00	705,00	0,402
14	ალგეთის	792,50	745,00	0,349
მთიანი ზონა $\pm 800 \div 1200$ მ				
15	ჟინვალის	810,00	770,00	0,384
16	ნადარბაზევის	862,00	855,40	0,344
17	ნარეკვავის	893,80	875,30	0,320
18	სიონის	1 068,00	1 014,00	0,259
მაღალმთიანი ზონა $\pm > 1200$ მ				
19	ზონკარის (პატარა ლიახვის)	1 217,00	1 167,00	0,262
20	დმანისის	1 360,00	1 350,00	0,361

ცხრილი III.1.6 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5
21	პანტიანის	1 368,80	1 358,00	0,271
22	ხრამის (წალკის)	1 512,00	1 497,50	0,203
23	მთისძირის	1 650,00	1 644,00	0,251
24	ზრესის	1 721,82	1 721,07	0,283

ცხრილი III.1.7

დასავლეთ საქართველოს მოქმედი წყალსაცავების
ჰიდრომეტრიული მონაცემები

№	წყალსაცავის დასახელება	წყლის დონის ნიშნულები, †, მ		რელიეფის კოეფიციენტი, „ა“
		ნშდ, მ	მმდ, მ	
1	2	3	4	5
დაბლობის ზონა † < 400 მ				
1	ვარციხის	87,00	86,50	0,558
2	გალის	100,550	97,00	0,685
3	კუხის	170,00	158,00	0,650
4	გუმათის	200,00	96,00	0,554
მთისწინა ზონა † 400÷800 მ				
5	ლაჯანურის	494,00	478,00	0,352
6	ჯვრის (ენგურის)	510,00	440,00	0,404
7	ტყიბულის	522,50	515,00	0,322
მთიანი ზონა † 800÷1200 მ				
8	შაორის	1132,00	1124,00	0,249

საქართველოს რეგიონული პირობების სპეციფიკის მიხედვით რელიეფის მთიანობის კოეფიციენტის (α) მნიშვნელობა გამოთვლილია შემდეგი ფორმულით [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2010]:

$$V_{\text{სრ}} = K_W \cdot H^\alpha, \quad \text{(III.1.1)}$$

სადაც K_W – წყალსაცავის მოცულობის კოეფიციენტია (მთის წყალსაცავებისათვის $K_W = 1,6 \div 2,5$); α – კოეფიციენტის მნიშვნელობები ($\alpha = 0,2 \div 1,0$) რელიეფის მთიანობის ტიპის მიხედვით მოყვანილია ცხრილში III.1.8 და ნახაზზე III.2.1.

საქართველოში წყალსაცავების აგების აქტუალობა მთისა და მთისწინეთის რეგიონებში, ისევე როგორც შვეიცარიაში, განპირობებულია: წყლის მნიშვნელოვანი რესურსებით და მაღალი ენერგეტიკული პოტენციალით; წყალსაცავების აგებით მაღალი ნიშნულების მდინარეების სათავე ნაწილში; მათი გამოყენების ეფექტურობის უფრო მაღალი მაჩვენებლებით, გარემოზე დაბალი ნეგატიური ზემოქმედებით, ბუნებრივი ლანდშაფტების გამდიდრებით, რეკრეაციის და ტურისტების რაოდენობის ზრდით, მორწყული მიწების მწარმოებლურობის ამაღლებით.

ცხრილი III.1.8

წყალსაცავების კლასიფიკაცია რელიეფის მთიანობის ტიპის მიხედვით

№	რელიეფის მთიანობის ტიპი	„ა“-ს საშუალო მნიშვნელობები	„ა“-ს ცვლილებების ზღვრები
1	2	3	4
1	დაბლობი	0,78	1,0÷0,65
2	ტბური ^{*)}	0,51	0,64÷0,45
3	მთისწინეთის	0,37	0,44÷0,29
4	მთიანი	0,27	0,28÷0,23
5	მაღალმთიანი	0,16	<0,23
*) ტბური ტიპი არ არის დამოკიდებული ტერიტორიის ნიშნულზე			

ჩატარებული კვლევების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ მდინარის წყლის რეგულირებისათვის, გარემოზე ზემოქმედებისა და მიწების დატბორვის შემცირებისათვის (რაც განპირობებულია მთის წყალსაცავების მნიშვნელოვანი მოცულობითა და სიღრმით) ყველაზე ეფექტურია მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავები.

ახლო მომავალში საქართველოში შესაძლებელია რიგი მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების აგება (ცხრ. III.1.9).

ცხრილი III.1.9

საქართველოს პერსპექტიული წყალსაცავები

№	წყალსაცავის დასახელება	მდინარე	V _{ს.} , მლნ მ ³	„ა“
1	2	3	4	5
1	ტიხის	კოდორი	2,50·10 ³	0,176
2	ფშიცის	ბზიფი	1,35·10 ³	0,278
3	ცაგერის	ცხენისწყალი	1,18·10 ³	0,306
4	თუშეთის	თუშეთის	0,96·10 ³	0,176
5	ონის ჰესების კასკადი: I წყალსაცავი II წყალსაცავი	რიონი	0,04·10 ³	0,280
		რიონი	0,4·10 ³	0,280
6	ტობარის	ენგური	0,58·10 ³	0,231
7	კოდორის	ჩხალთა	0,53·10 ³	0,344
8	აგარას	მტკვარი	0,45·10 ³	0,258
9	ბზიფის	ბზიფი	0,24·10 ³	0,336
10	ჩხალთის	ჩხალთა	0,23·10 ³	0,222
11	წყნარის	ხრამი	0,20·10 ³	0,414
12	თეძამის	თეძამი	0,03·10 ³	0,280

უარყოფითად განწყობილი მოსახლეობის ცალკეული ჯგუფების პროტესტმა გამოიწვია საქართველოში წყალსაცავების აგების შეწყვეტა, რასაც მოჰყვა საქართველოს ეკონომიკური განვითარებისა და ეკოლოგიური პრობლემების გაუარესება. საბედნიეროდ, ამჟამად დაიწყო რიგი წყალსაცავების აგება – ხუდონის ($V_{სრ} = 365,0$ მლნ მ³) და ნენსკრას ($V_{სრ} = 176,0$ მლნ მ³).

საქართველოს ტერიტორიაზე, რომლის ფართობია $F=69.7კმ^2$, განლაგებულია 26 060 მდინარე [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ. 2015] (ცხრ. III.1.10; III.1.11).

ცხრილი III.1.10

საქართველოს ძირითადი მდინარეები

№	მდინარის აუზის დასახელება	მდინარეთა რაოდენობა აუზში	№	მდინარის აუზის დასახელება	მდინარეთა რაოდენობა აუზში
1	2	3	4	5	6
აღმოსავლეთ საქართველო					
1.	მტკვარი	4882	3.	ალაზანი	1803
2.	იორი	509	4.	თერგი, ასა, ანდაგი, არღუნი, პირიქითა ალაზანი, თუშეთის ალაზანი	575
სულ აღმოსავლეთ საქართველოში					7951
დასავლეთ საქართველო					
1.	ყვირილა	2906	13.	რიონი	384
2.	სუფსა	1428	14.	ხობისწყალი	333
3.	ხობი	1418	15.	ღალიძგა	317
4.	ძირულა	1386	16.	ჭირუხისწყალი	305
5.	კოდორი	1307	17.	ამტყელი	274
6.	ცხენისწყალი	897	18.	დიდი ერისწყალი	271
7.	ნატანები	727	19.	გუმისთა	244
8.	ბზიფი	614	20.	ენგური	242
9.	ტეხურა	503	21.	ჯუმი	234
10.	ხანისწყალი	413	22.	ჯრუჭულა	225
11.	ჩოლაბური	402	23.	ყველა დანარჩენი	2945
12.	ჩოლოქი	334			
სულ დასავლეთ საქართველოში					18109
სულ საქართველოში					26060

აღსანიშნავია, რომ საქართველოს ძირითადი სარწყავი ფართობები განლაგებულია საქართველოს აღმოსავლეთ არიდულ რეგიონში – ტრანსსასაზღვრო მდ. მტკვრის აუზში, სადაც წყლის რესურსების განაწილება და მათი გამოყენება ირიგაციისათვის შეზღუდულია წყალმომარაგების პირობებით საქართველოს და მის მოსაზღვრედ განლაგებულ ქვეყნებთან.

სამხრეთ კავკასიონის მსხვილი მდინარის მტკვრის აუზის ფართობი (198300 კმ²), განლაგებულია თურქეთის, ირანის, აღმოსავლეთ საქართველოს, სომხეთისა და აზერბაიჯანის ტერიტორიაზე და წარმოადგენს ტრანსსასაზღვრო მდინარე მტკვრის წყლის ნაკადის განაწილების მაგალითს, ნახ. III.1.3, ცხრ. III.1.10 [Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., 2015; Дорожкина О.П., 2013; Духовный В.А., Соколов В.П., Зиганишина Д.Р., 2015; Иманов Ф.А. 2016].

ცხრილი III.1.11

წყლის მარაგი საქართველოს მდინარეებში

რეგიონი	რეგიონის ფართობი ათ. კმ ²	წყალშემკრების ფართობი, ათ. კმ ²	ყოველწლიური საშუალო ადგილობრივი ჩამონადენი, კმ ³	ყოველწლიური საშუალო ჩამონადენი მეზობელი ტერიტორიიდან, კმ ³	ყოველწლიური საშუალო ჩამონადენი, კმ ³	%
აღმოსავლეთ საქართველო	37,28	46,66	12,64	2,07	14,70	22,3
დასავლეთ საქართველო	32,42	52,60	43,60	7,44	51,13	77,7
სულ					65,84	100



ნახ. III.1.3. მდ. მტკვრის წყალშემკრები აუზი

მდ. მტკვრის აუზში წყლის რესურსების განაწილება

№	მდინარე - გასწორი	წყლის ჩამონადენის ჯამი, მლნ მ ³	მათ შორის, მლნ მ ³				
			აზერბაიჯანის	სომხეთის	საქართველოს	ირანის	თურქეთის
1	2	3	4	5	6	7	8
1	მტკვარი – საქართველოს სახელმწიფო საზღვარი	975	–	–	–	–	975
2	მტკვარი – აზერბაიჯანის საზღვარი	7250	–	–	6276	–	975
3	ალაზანი – შესართავი	4000	1595	–	2405	–	–
4	ხრამი – შესართავი	1920	–	1073	847	–	–
5	იორი-უჯარმა	670	–	–	670	–	–
6	კიროვობად - ყაზახის მდინარეები	1590	999	591	–	–	–
7	მტკვარი - მინგეჩევირის წყალსაცავი	15430	2994	1664	10197	–	975
8	ყარაბახ- შირვანის ზონიდან	1920	1920	–	–	–	–
9	მტკვარი – ჩამკეტი გასწორი	17350	4514	1664	10197	–	975
10	არაქსი- სახელმწიფო საზღვარი	2854	–	330	–	–	2594
11	არაქსი- ხუდოფერინი	8340	923	4257	–	535	2625
12	არაქსი- ჰიდროკვანძი „არაქსი“	5940	270	2913	–	132	2625
13	არაქსი- ბაგრამტაფა	9100	1218	4257	–	1000	2625

ცხრილი III.1.12 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8
14	მტკვარი-შესართავი	26456	5732	5921	10197	1000	3600
			21850				
15	ჩამოდინება სევანის ტბაში	827	–	827	–	–	–
16	სულ ზედაპირული ჩამონადენი	27277	5732	6748	10197	1000	3600
			22677				
სულ, მიწისქვეშა წყლების გათვალისწინებით		30525	7952	1256	16723	1000	3600

მდ. მტკვრის აუზის წყლის რესურსების ეფექტური გამოყენებისათვის საჭიროა 3,0 კმ³-დე მოცულობის წყალსაცავების აგება.

ტრანსსასაზღვრო წყლის რესურსების განაწილების კონცეფციის დასამუშავებლად საჭიროა მოსაზღვრე ქვეყნების – საქართველო, სომხეთი, აზერბაიჯანი, თურქეთი, ირანი – წყლის მარაგის მონაცემების ბანკის გაანალიზება. ამისათვის საჭიროა ინფორმაციის ერთიანი მეთოდის დამუშავება და შემდეგ ტრანსსასაზღვრო წყლების განაწილების კონცეფციის შედგენა წყალმოთხოვნილების და ეკოლოგიური პრობლემების გათვალისწინებით. ტრანსსასაზღვრო ქვეყნებმა უნდა უზრუნველყონ წყლის გამოყენება იმ მოთხოვნებით – ვინც აბინძურებს, ის იხდის.

III.2. საქართველოში მთის წყალსაცავებისა და მათი კასკადების ჰიდროენერგორესურსების გამოყენების ეფექტურობა

ქვეყნების ეკონომიკის განვითარებამ განაპირობა წყლის მოხმარების ზრდა. წყალსაცავები – წყლის რესურსების მართვის ყველაზე ეფექტური მეთოდია [მეტრეველი გ., მაჭავარიანი ლ., გულაშვილი ხ., 2022; Losk S.P, 2017; Marco I.B., Salas I.D., 2012]. წყლის რესურსების გამოყენების გადაწყვეტილების მიღებისას, აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ ტერიტორიის რეგიონალური მახასიათებლების სპეციფიკა. ამ პრობლემის აქტუალობა მთისწინეთისა და მთის ზონების პირობებში განისაზღვრება მრავალი მიზეზით [Иордანიшвили И.К., Иордანიшвили К.Т., 2012; Беднарук С.Е., Меговиллов Ю.Г., 2017; Matchavariani L., Metreveli G., Lagidze L., Paichadze N., 2016]:

- ვაკის ტერიტორიებზე წყლის საშუალო წლიური ჩამონადენი 1,0 კმ²-დან არ აღემატება 200-300 ათას მ³-ს, მაღალმთიან რეგიონებში – 350-500 ათას მ³-ს;

- მაღალმთიანი წყალსაცავების გამოყენებისას 1,0 მ-ის დაწნევის უზრუნველსაყოფად საჭიროა მიწის რესურსების დანაკარგები 0,16 კმ²-მდე, ხოლო წყლის აკუმულაციის 1,0 კმ³-ის უზრუნველსაყოფად – 35,0 კმ²-მდე, ვაკის წყალსაცავების ამ

მაჩვენებლების უზრუნველსაყოფად 1,0 მ დაწნევაზე საჭიროა მიწის რესურსების დანაკარგები 142,0 კმ²-მდე, ხოლო წყლის აკუმულაციის 1,0 მ³-ის უზრუნველსაყოფად – მიწის რესურსების 138,0 კმ²-მდე.

საქართველოს მთისა და მთისწინეთის რეგიონების წყლის რესურსების ეფექტური გამოყენება დამოკიდებულია ორ მთავარ ფაქტორზე – მდინარის ქსელის ხშირ განშტოებასა და რელიეფის ჰიფსომეტრიული სიმაღლეების განსხვავებაზე. ეს ფაქტორები განსაზღვრავს: ელექტროენერჯის წარმოების ზრდას, ტერიტორიების გაწყლოვანებას სარწყავი არხებითა და ტურიზმის რეკრეაციის განვითარებას. საქართველოში მთის წყალსაცავების აგება განპირობებულია მდინარის კალაპოტის მნიშვნელოვანი დახრილობით, წყალსაცავების დიდი სიღრმით, ფერდობების შემადგენელი ქანების მაღალი სიმტკიცითა და წყალგაუმტარობით, დატბორვის მცირე მაჩვენებლებითა და, როგორც წესი, გარემოზე მცირე უარყოფითი გავლენით.

საქართველოში მდინარეები წყლის მოხმარების მთავარი წყაროა. მის ტერიტორიაზე 26 060 მდინარეა, რომელთა ძირითადი მაჩვენებლები მოცემულია ცხრილში III.2.1 [Иорданишвили И. К., Гавардашвили Г.В., Иремашвили И.Р., Вартанов М. В., Иорданишвили К.Т., 2018].

ცხრილი III.2.1

საქართველოს მდინარეთა ძირითადი მაჩვენებლები

ტერიტორიის ფართობი, ათ. კმ ²	მდინარეთა რაოდენობა (მრიცხველი), სიგრძე (მნიშვნელი), კმ					მდინარეთა ქსელის სიხშირე, კმ/კმ ²
	ძალიან პატარა, L ≤ 25კმ	პატარა, L ≥ 26÷100 კმ	საშუალო, L=100÷500 კმ	მსხვილი, L>500 კმ	სულ	
აღმოსავლეთ საქართველო						
37 214	$\frac{8869}{19544}$	$\frac{77}{3\ 020}$	$\frac{4}{971}$	$\frac{1}{513}$	$\frac{7951}{23925}$	1,14
დასავლეთ საქართველო						
32 434	$\frac{18036}{30946}$	$\frac{64}{2723}$	$\frac{9}{1373}$	–	$\frac{18109}{35042}$	1,07
სულ					$\frac{26060}{58967}$	

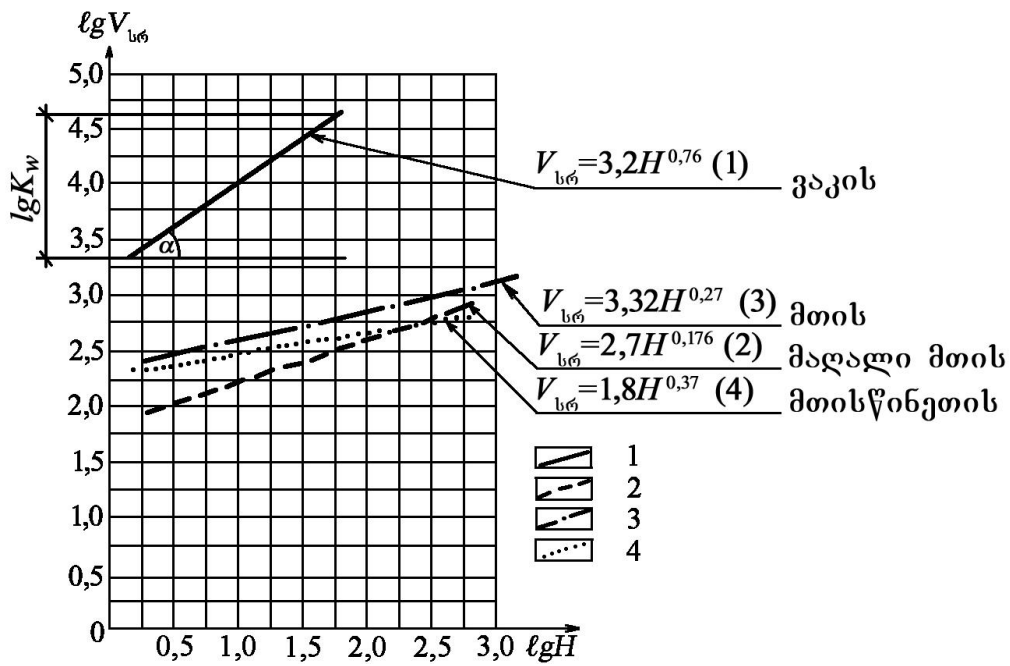
საქართველოს ტერიტორიაზე სულ 51 წყალსაცავია, რომელთაგან 36 ფუნქციონირებს. ძირითადი წყალსაცავების განლაგება მოყვანილია ნახაზზე III.1.2.

სხვადასხვა ტიპის წყალსაცავების რაოდენობრივი საშუალო მაჩვენებლები მოცემულია ცხრილში III.2.2 [Варазашвили Н.Г., Гобечия Г. Н., 1996].

რელიეფის მთიანობის მაჩვენებლების მნიშვნელობა (a) მოყვანილია ცხრილში III.1.8 და ნახ. III.2.1.

წყალსაცავების ძირითადი მაჩვენებლები

№	ძირითადი მაჩვენებლები	აღნიშვნა	განზომილების ერთეული	განზომილების ერთეული		
				ვაკის წყალსაცავები	მთისწინეთის წყალსაცავები	მთის წყალსაცავები
1	2	3	4	5	6	7
1	რელიეფის მაჩვენებელი	“ <i>a</i> ”		1,0÷0,6	0,6÷0,29	0,29÷0,1
2	მორფომეტრიული მაჩვენებლები	H/F		$9 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10$
3	წყლის დონის მერყეობის ამპლიტუდა	A	მ	< 6	6÷20	> 20
4	წყალსაცავის წყლის მოცულობის გამოყენება	$V_{სრ}/V$		0,4÷0,6	0,5÷0,7	0÷0,95
5	მოცულობის მატება 1 მ დაწნევაზე	$V_{სრ}/H$	მლნ მ ³ /მ	500÷2000	50÷500	1,0÷50,0
6	სრული მოცულობისა და სარკის ფართობის თანაფარდობა	$V_{სრ}/F$	მლნ მ ³ /კმ ²	5÷15	20÷50	50÷120
7	დატბორვის ფართობის და სასარგებლო მოცულობის თანაფარდობა	$S_{დატ}/V_{სარ}$	კმ ² /მლნ მ ³	120÷150	50÷110	25÷46
8	დატბორვის ფართობი 1,0 მ დაწნევაზე	$S_{დატ}/H$	კმ ² /მ	65÷250	3÷50	0,08÷0,2
9	დატბორვის ფართობის და სარწყავი ფართობების დანამატის თანაფარდობა	$S_{დატ}/S_{სარ}$		0,024	0,025÷0,1	0,46÷0,9
10	ელექტროენერჯის გამომუშავება წყლის მოცულობის ერთეულზე	$W_{მლნ ენ}/V_{სრ}$	კვტ სთ/კმ ³	0,115÷0,65	0,60÷0,80	0,80÷2,0
11	ელექტროენერჯის გამომუშავება დატბორილი ფართობის ერთეულზე	$W_{მლნ ენ}/S_{დატ}$	მლრდ კვტ სთ/კმ ²	0,50÷0,65	0,65÷0,80	0,80÷1,0
12	წყალმარჩხი ფართობის პროცენტი წყლის სარკის საერთო ფართობიდან ნშდ-ზე	$F_{წყალმარჩხ.}/F$	%%	15÷20	6÷10	4÷6
13	წყალსაცავის ტიპი დამოკიდებული ჰიდრომეტრიაზე (♣)	♣	მ	<400,0	400-800	მთის წყალსაცავები- 800-1200; მაღალი მთის - >1200



ნახ. III.2.1. წყალსაცავის სრული მოცულობის ($V_{სრ}$), სიღრმის (H), მთიანობის კოეფიციენტის (a) და მოცულობის კოეფიციენტის (K_w) დამოკიდებულება

1 – ვაკის წყალსაცავების მოცულობის მრუდი ($a=0,76$, $K_w=3,2$); 2 – იგივე მთისწინეთის წყალსაცავების ($a=1,8$, $K_w=0,37$); 3 – იგივე მთის წყალსაცავების ($a=0,27$, $K_w=3,32$); 4 – იგივე მაღალმთიანი წყალსაცავების ($a=0,176$, $K_w=2,7$); ხაზების - $a=\log V_{სრ}/\log H=\text{tg}\alpha$ - დახრილობის კუთხის ტანგენსია, $\lg K_w$ - ღერძზე ($\lg V_{სრ}$) მონაკვეთი.

ყველაზე ეფექტური მეთოდი მთის მდინარეებზე მცირე და საშუალო ჰიდროელექტროსადგურების აგებაა, რაც ხელს უწყობს ქვეყნების ეკონომიკურ განვითარებას. საქართველოში 320-მდე მდინარეა, რომელთაც აქვს მნიშვნელოვანი სხვაობა სათავისა და შესართავის ნიშნულებს შორის, ამიტომაც მათი გამოყენება შესაძლებელია ჰიდროენერგეტიკის მიზნით (სქემა III.2.1).



სქემა III.2.1. ა) ჰიდროელექტროსადგური; ბ) ქარისმიერი ელექტროსადგური; გ) თბოელექტროსადგური; დ) მზის ელექტროსადგური; ე) ატომური ელექტროსადგური

საქართველოს მდინარეების ჰიდროპოტენციური სიმძლავრე 25,0 მლნ კვტ-ს შეადგენს, რაც შეესაბამება პოტენციურ ჰიდროელექტროგამომუშავებას 220,0 მლრდ კვტსტ წელიწადში. 2020 წლისათვის საქართველოს ჰიდროენერგეტიკა წელიწადში 9,691 მლრდ კვტსტ-ს აწარმოებდა, იგი ჰიდროენერგეტიკის პოტენციური ჰიდროელექტროენერჯის გამომუშავების მხოლოდ 5%-ს შეადგენს (ცხრ. III.2.3).

ცხრილი III.2.3

საქართველოში ელექტროენერჯის ფაქტიური გამომუშავების მონაცემები (2018 წ.)

ელექტროენერჯის ჯამური გამოყენება, მლრდ კვტს/წელიწადში	ადგილობრივი გამომუშავებული ჰიდროელექტრო- ენერჯია, მლრდ კვტს/წელიწადში	ელექტროენერჯის იმპორტი, მლრდ კვტს/წელიწადში	ადგილობრივი ალტერნატიული ელექტროენერჯია, მლრდ კვტს/წელიწადში
13,191	9,691	2,0	1,5

საქართველოში **ქარისმიერი** პოტენციური ენერჯის მნიშვნელობა შეფასებულია 130,0 მლრდ კვტ სთ/წელიწადში [Сванидзе Г.Г., Гагуа В.П., Сухишвили Э.Б., 1987]. საქართველოს ტერიტორიაზე ამჟამად 6 ქარის ელექტროსადგურია, რომელთა საერთო სიმძლავრეა 0,018 მკვტ. ქარის ელექტროსადგურის მუშაობისათვის საჭიროა სულ მცირე 4-6 მ/წმ სიჩქარის ქარები (10,0 მ სიმაღლეზე) და თავისუფალი ტერიტორიები. აუცილებელია, გავითვალისწინოთ გარემოზე არასასურველი ზემოქმედებას, ესენია: ხმაურის ეფექტები (20 ჰც-მდე); ჰაერის არეკვლის ეფექტი - ცვლის ტერიტორიის ქარის სიტუაციას; სატელევიზიო მაუწყებლობის გაუარესება; ფრინველების გადასაფრენ ტრასებზე ზემოქმედება; ტურბინების ფრთების მოწყვეტა; ქარის ელექტროსადგურის არათანაბარი მუშაობა ქარის სიძლიერისა და მიმართულების დიდი ცვალებადობის გამო; მნიშვნელოვანი ტერიტორიების გამოყოფა ქარის ელექტროსადგურებისათვის; ქარისმიერი ეროზიის ზრდა. ამჟამად საქართველოში ქარის ელექტროსადგურების აგება არ არის აუცილებელი.

თბოელექტროსადგურებიც ასევე უარყოფით გავლენას ახდენს ბუნებრივი გარემოს მთელ რიგ ელემენტებზე: სახნავ-სათესებზე (გასხვისება, დაბინძურება); წყლის წყაროებზე (ტემპერატურის ცვლილება, წყლის დანაკარგები); ბინძურდება ატმოსფერო და ბიოსფერო (აირი და მტვერი, საწვავის ნარჩენები და წიდა). საქართველოში თბოელექტროსადგურების ექსპლუატაციისას ატმოსფეროში მავნე ნივთიერებების კონცენტრაციის გამო, ქ. რუსთავსა და გარდაბანში მავნე ნივთიერებებით დაბინძურების კონცენტრაცია მაქსიმალურ დასაშვებ კონცენტრაციაზე 4-12-ჯერ მეტია. საწვავის წვისა და ატმოსფეროს გასუფთავების ახალი ტექნოლოგიების დანერგვის მიუხედავად, თბოელექტროსადგურების მშენებლობა და გარემოს მდგომარეობის გაუმჯობესება უახლოეს მომავალში არ არის შესაძლებელი (ცხრ. III.2.4).

საქართველოში **მზის ენერჯის** განვითარება გართულებულია დიდი ტერიტორიების დაჩრდილვით, ჰაერისა და წყლის დათბობით, ქარის

მიმართულების ცვლილებით, სამშენებლო მასალების დიდი მოცულობის მოთხოვნილებით და ა. შ. საქართველოში მზის ელექტროენერჯის გამოყენება ჯერ ადგილობრივი ხასიათისაა და საექვოა მისი განვითარება. თუმცა, ამჟამად დგას 50 მგვტ სიმძლავრის მზის ელექტროსადგურის მშენებლობის საკითხი (ცხრ. III.2.4).

ელექტროენერჯის მიღება შესაძლებელია დერივაციის და მცირე სარწყავი არხების გამოყენებით. საქართველოს მაგისტრალური არხების პოტენციური წლიური ენერგეტიკული შესაძლებლობა აღწევს 0,15 მლრ კვტ/წელიწადში. ასეთი მცირე ჰიდროელექტროსადგურების ზეგავლენა გარემოზე უმნიშვნელოა (ცხრ. III.2.4).

ცხრილი III.2.4

ელექტროენერჯის სხვადასხვა წყაროს გამოყენების რისკ-ფაქტორები

ენერჯის წყაროს სახეობები	შესაძლო რისკ-ფაქტორები
თბური ელექტროსადგურები	ატმოსფეროს და წყალთა მეურნეობის ობიექტების დაბინძურება.
მზის ელექტროსადგურები	ელექტრომოწყობილობების ავარიები, მათი შესაძლო გადახურების და ანთებადობის გამო
ქარის ელექტროსადგურები	ტურბინების ფრთების მოწყვეტის რისკი და მათი 800,0 მ-დე გადაადგება ძლიერი ქარის დროს
ელექტროსადგურები ირიგაციულ სისტემებზე	–
ჰიდროელექტროსადგურები	კაშხლების დანგრევა გარღვევის ტალღებით

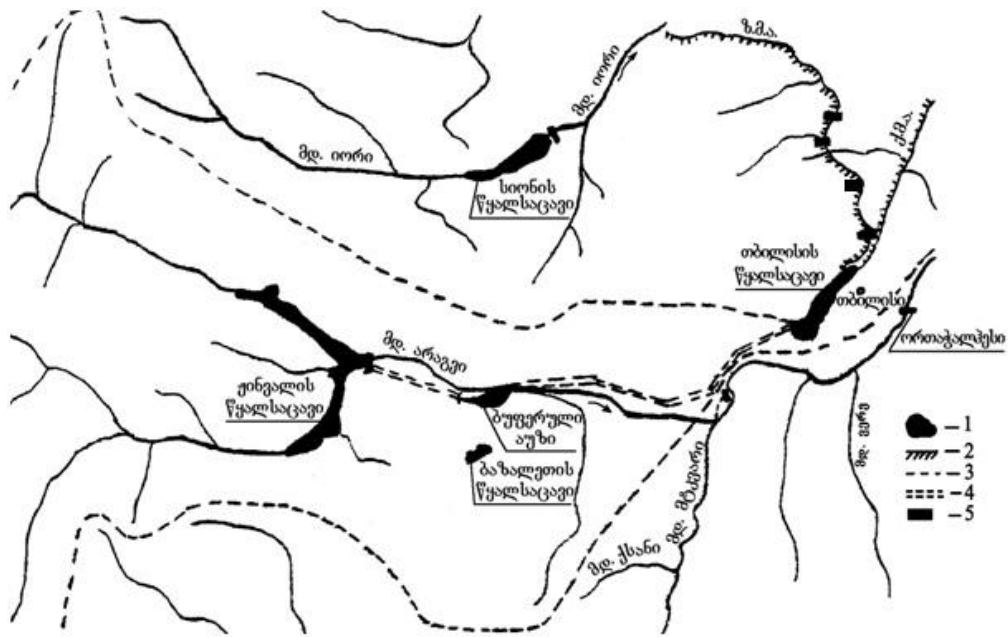
წყალსაცავების კასკადებზე ჰიდროელექტროსადგურების შექმნისას ყალიბდება ენერგეტიკული კავშირები. ამ შემთხვევაში, ზედა წყალსაცავი ზრდის ელექტრო-ენერჯის გარანტირებულ სიმძლავრეს და გამომუშავებას არა მხოლოდ ამ ჰიდრო-ელექტროსადგურის, არამედ კასკადის ქვედა საფეხურებზეც კი. ყოველივე ზემო-თქმულიდან გამომდინარეობს, რომ მდინარის ზედა ნაწილში მარეგულირებელი წყალსაცავებისა და მათი კასკადების შექმნა ენერგეტიკულად მიზანშეწონილი და ეკოლოგიურად მორგებულია. წყალსაცავებზე კასკადების მშენებლობა ითვლება წყალთა მეურნეობის განვითარების კანონზომიერ პროცესად. მაღალმთიან რეგიონებში შექმნილი კასკადის ტიპური მაგალითია მდ. რაზდანზე აგებული ჰიდრო-ელექტროსადგურის სევან-რაზდანის კასკადი, იგი მოიცავს 9 ჰიდროელექტროსადგურს, რომელთა საერთო სიმძლავრეა 900 მგვტ. კასკადზე მოქმედებს 17 სარწყავი არხი, რომელიც რწყავს 100 000 ჰა მიწის ნაკვეთს. ამ კასკადის ეკოლოგიური პრობლემა მხოლოდ სევანის ტბაში წყლის დონის შემცირება და მდ. რაზდანის ჰიდროლოგიური რეჟიმის შეცვლაა. წყალსაცავების კასკადების აგების პრაქტიკა ფართოდ გამოიყენება მთელ მსოფლიოში (ცხრ. III.2.5).

საქართველოში აგებულია ჰიდროელექტროსადგურების მთელი რიგი კასკადი, ესენია: მტკვრის, რიონის, ხრამის, შაორის, შაორი-ტყიბულის, ენგურის (ნახ. III.2.2÷III.2.6).

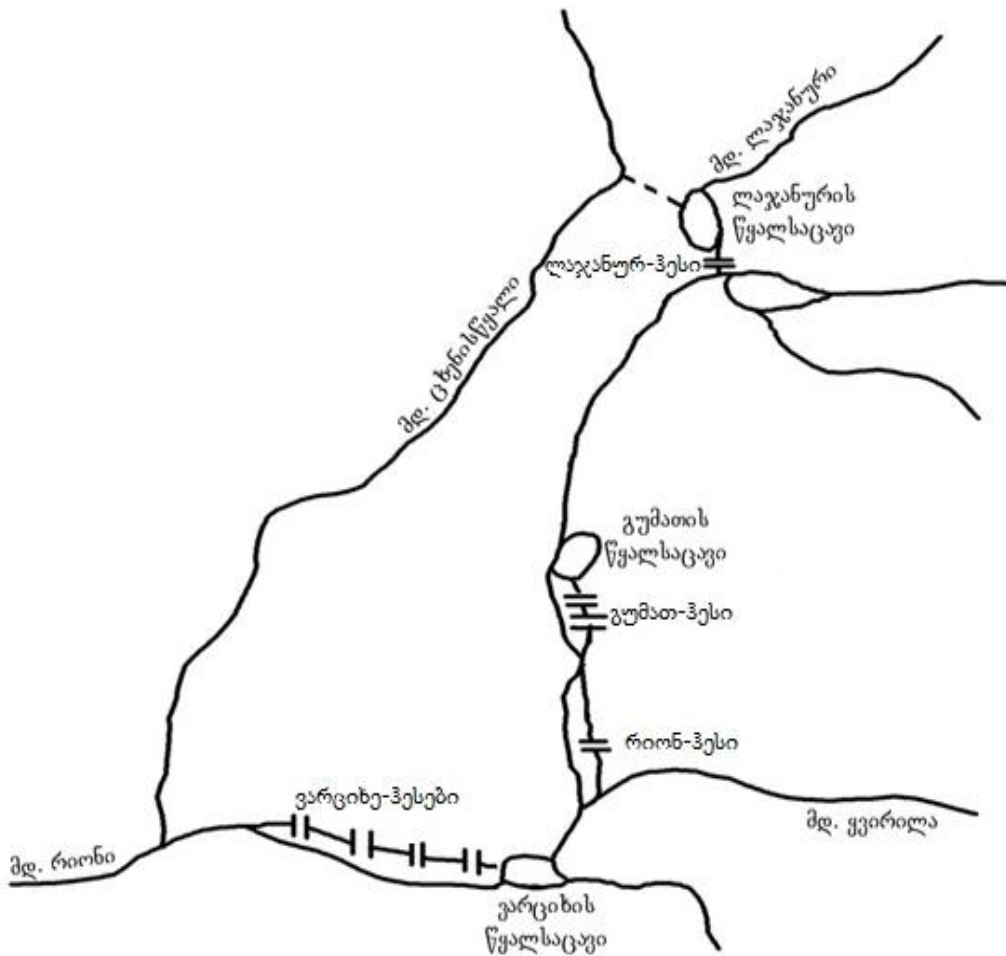
მსოფლიოში 100 მ-ზე მეტი სიღრმის მთის მსხვილი წყალსაცავების კასკადების
მახასიათებლები

#	მდინარე	ქვეყანა	საფეხურების რაოდენობა	მოცულობა, კმ ³		წყლის სარკის ფართობი, ათ. კმ ²	კასკადის სიგრძე, კმ	გამოყენების სახეობა
				სრული	სასარგებლო			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ევროპის კასკადები								
1	ტახო	ესპანეთი	11	7,6	6,0	0,3	500	ი, ე
2	ვოლგა	რუსეთი	10	143,8	71,6	20,7	3000	ე, ნ, ი, ხ, ა
3	ვლტავა	ჩეხეთი	7	1,3	0,9	0,1	200	ე, ნ, წ, მ
4	დნეპრი	უკრაინა	6	43,8	18,4	7,0	900	ე, ნ, ი, ხ, თ
5	არდა	ბულგარეთი	5	1,6	1,0	0,1	100	ე, ი
6	დუერო	ესპანეთი	5	2,3	1,1	0,2	300	ე, ი, წ, მ
7	სულაკი	დაღესტანი	4	3,6	1,7	0,1	60	ე, ი
აზიის კასკადები								
8	ევფრატი	თურქეთი, სირია, ერაყი	7	138,6	55,0	5,5	–	ი, ე, წ
9	ნარინი-სირ-დარია	ყირგიზეთი	6	30,1	21,4	1,8	250	ი, ე, წ
10	ანგარა	რუსეთი	3	276,3	97,4	40,3	1500	ე, ნ, ხ
ჩრდილოეთ ამერიკის კასკადები								
11	კოლუმბია	აშშ	15	56,3	20,0	1,5	1500	ე, ა, ნ
12	ტენესი	აშშ	15	32,4	16,0	3,5	1290	წ, ე, ნ, მ
13	კოლორადო	აშშ	11	78,2	66,6	1,8	1400	ი, ე, წ
14	მისური	აშშ	9	97,6	83,4	4,9	500	წ, ი, ე, ნ
15	ლა-გრანდი	კანადა	5	168,6	68,6	9,6	650	ე
16	მანიკუაგანი	კანადა	5	156,7	–	2,5	400	ე
სამხრეთ ამერიკის კასკადები								
17	რიო-გრანდე	ბრაზილია	10	51,8	–	3,3	–	ე
18	პარანა	ბრაზილია	8	118,4	–	6,2	–	ე

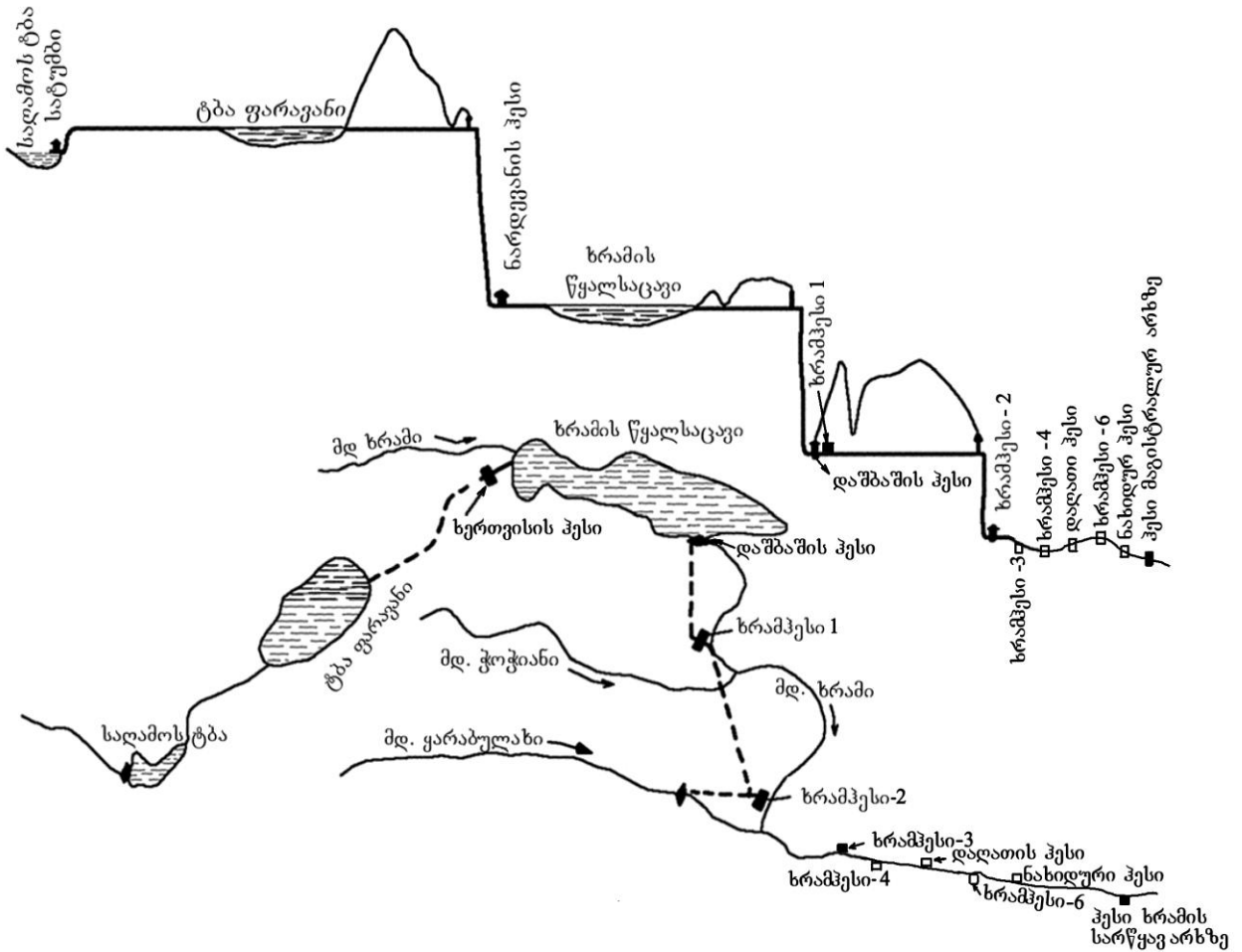
პირობითი აღნიშვნები: ე – ენერგეტიკა; ნ – ნაოსნობა; ხ – ხე-ტყის დაცურება; მ – წყალმომარაგება; ი – ირიგაცია; წ – წყალმოვარდნებთან ბრძოლა; ა – წყლის აკუმულაცია კომპლექსური მიზნით.



ნახ. III.2.2. მდ. მტკვრის გამოყენების სქემა (საქართველოს ტერიტორიაზე)
 1 - წყალსაცავები; 2 - არხები; 3 - მდინარეთა აუზების წყალგამყოფი;
 4 - წყალსატარები; 5 - ჰეს-ები.

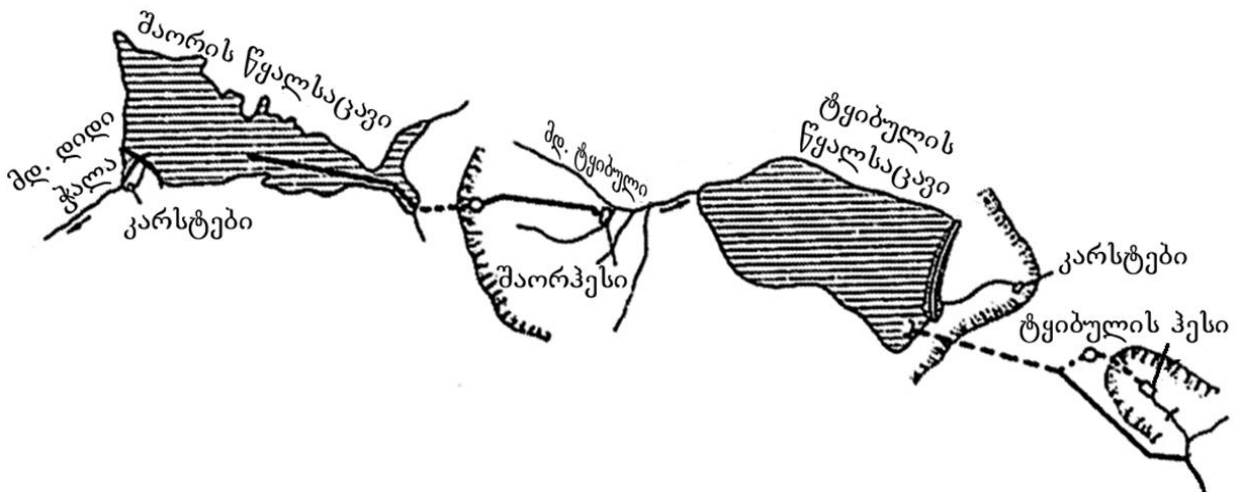


ნახ. III.2.3. მდ. რიონის გამოყენების სქემა



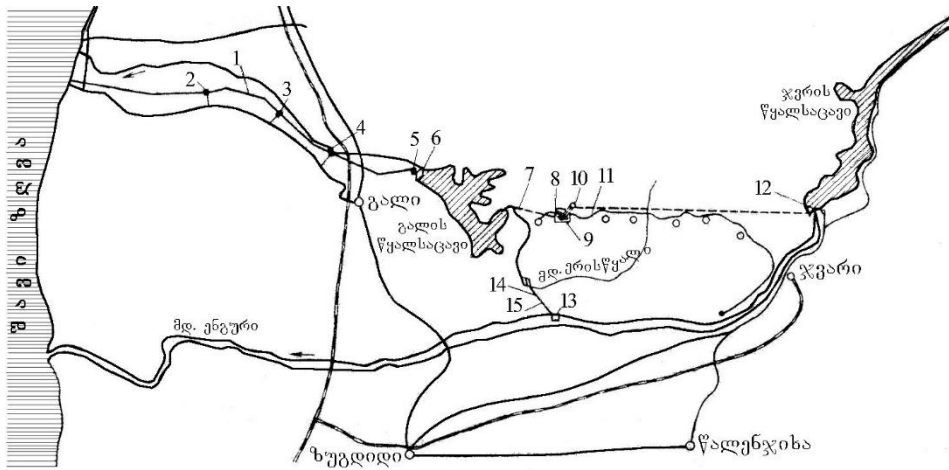
ნახ. III.2.4. მდ. ხრამის გამოყენების სქემა

■ - არსებული ჰესები; □ - საპროექტო ჰესები



ნახ. III.2.5. მდ. შაორი-ტყიბულის გამოყენების სქემა

საქართველოს მაღალმთიანი და მთისწინეთის მდინარეები ხასიათდება მნიშვნელოვანი ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალით, მდინარეების ჯამური პოტენციური სიმძლავრე 25,0 მლნ კვტ-მდეა, რაც შეესაბამება 220,0 მლრდ კვტსთ წელიწადში. ამავე დროს 45% (96 მლრდ კვტსთ/წელ) კონცენტრირებულია ხუთ მთავარ მდინარეზე (ცხრ. III.2.6).



ნახ. III.2.6. ენგურის ჰეს-ზე განლაგებული ჰიდროტექნიკური ნაგებობების განლაგების საერთო სქემა.

1 – გამომყვანი არხი; 2 – ვარდნილ-ჰესი IV; 3 – ვარდნილ-ჰესი III; 4 – ვარდნილ-ჰესი II; 5 – ვარდნილ-ჰესი I; 6 – ვარდნილ-ჰესი I-ის კაშხალი; 7 – გამყვანი არხი; 8 – ღია გამანაწილებელი მოწყობილობა – 500 კვტ; 9 – ენგურ-ჰესის მიწისქვეშა შენობა; 10 – გამათანაბრებელი რეზერვუარი; 11 – დერივაციული გვირაბი; 12 – თაღოვანი კაშხალი; 13 – მდ. ენგურის ჩამონადენის მდ. ერისწყალში გადამდები ნაგებობები (წყალსაშვი კაშხალი, წყალმიმღები გამრეცხი რაბი); 14 – იგივე, არხები №1 და №2; 15 – იგივე, უდაწნეო გვირაბი.

ცხრილი III.2.6

საქართველოს 5 მთავარი მდინარის ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალი

№	მდინარის აუზი	წყალშემკრები ფართობი, კმ ²	მდინარეების საშუალო წლიური პოტენციური ენერჯის გამომუშავება, მლრდ კვტს/წელიწადში
1	მტკვარი	18243	22,605
2	რიონი	13418	30,556
3	ენგური	4062	21,039
4	კოდორი	2036	13,509
5	ბზიფი	1502	8,153
	სულ	39261	95,863

ჰიდროელექტროენერჯის ასეთი კონცენტრაცია განსაზღვრავს ამ მდინარეებზე ჰიდროენერგეტიკული სისტემის შექმნის მიზანშეწონილობას. საქართველოს მდინარეების ენერგეტიკული პოტენციალი იცვლება მდინარის აუზის მთიანობის შესაბამისად, როგორც წესი, პოტენციური ენერჯის 80% კონცენტრირებულია მდინარეების ზედა და შუა ნაწილებში.

რაც შეეხება ჰიდროელექტროსადგურებს, რომელთა აგებაც არის დაგეგმილი, მათი ელექტროენერჯის ჯამურმა გამომუშავებამ შესაძლებელია წელიწადში 11,0 მლრდ კვტს-ს მიაღწიოს. მათი ექსპლუატაციაში შეყვანა გადაწყვეტს როგორც საქართველოს ენერგომოთხოვნილებებს, ასევე ელექტროენერჯის გაყიდვის შესაძლებლობას (ცხრ. III.2.7).

საქართველოს პერსპექტიული ჰიდროელექტროსადგურების მონაცემები

№	დასახელება	სიმძლავრე, მლნ კვტ
1	ხუდონის	0,700
2	ტობარის	0,600
3	ჩხალტის	0,480
4	ორბელის	0,460
5	ნამახვანის	0,400
6	ნენსკრა	0,280
7	ონის ჰეს-ების კასკადი (ონი I და ონი II)	0,206
8	ცაგერის	0,180
9	პარის	0,140
10	ახალციხის	0,120
სულ		3,566

ბოლო წლებში საქართველოში გაჩნდა წინააღმდეგობები ჰიდროელექტროსადგურების მშენებლობასთან დაკავშირებით, რაც სრულიად არაგონივრული და დილეტანტური ხასიათისაა. არ არის საჭირო გამოცხადდეს „ჯვაროსნული ომები“ ჰიდროენერგეტიკის მშენებლობისა და მისი განვითარების წინააღმდეგ.

აღპების, კერძოდ, შვეიცარიის ენერგორესურსების გამოყენების პრაქტიკის ანალიზისას გაირკვა, რომ მდინარეების ჰიდროენერგეტიკული პოტენციალის 95% უკვე გამოყენებულია. ექსპლუატაციაშია 200-ზე მეტი მთის წყალსაცავი, სადაც აშენებულია 450-ზე მეტი ჰიდროელექტროსადგური, ხოლო ჰიდროენერგეტიკის გამომუშავება აღწევს 35,0 მლრდ კვტ/სთ/წელიწადში [Kandelaki N., Kupreishvili Sh., 2018]. ამან განსაზღვრა ელექტრიფიკაციით ქვეყნის სრული უზრუნველყოფა. მცირე წყალსაცავების მასობრივი აგება შვეიცარიასა და ავსტრიაში დაფიქსირდა XX საუკუნის დასაწყისიდან, ხოლო წყალსაცავებისა და ჰიდროელექტროსადგურების აგება დღემდე გრძელდება. ექსპერტები აღნიშნავენ, რომ მთის წყალსაცავების ექსპლუატაცია ძალზე მნიშვნელოვანია მთისწინეთისა და მთის რეგიონების ენერგომომარაგების, ბუნებრივი ლანდშაფტების გამდიდრების-რეკრეაციის გაფართოების-თვის და ა.შ. წყალსაცავების აგება შვეიცარიაში განსაზღვრავს ელექტროენერჯის ღირებულების შემცირებას, ტურისტების შემოდინებასა და საკურორტო ტერიტორიების განვითარებას. შვეიცარიაში, რომლის ტერიტორია თითქმის 2-ჯერ მცირეა, ვიდრე საქართველოს ტერიტორია, მდებარეობს წყალსაცავები 500 მ სიმაღლეზე ზღვის დონიდან (ცხრ. III.2.8, ნახ. III.2.7).

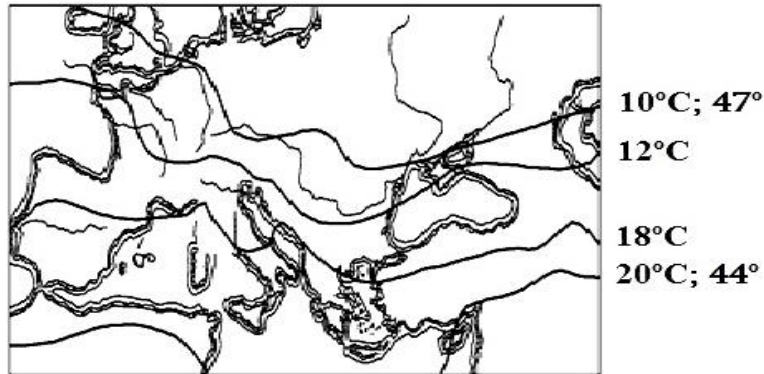
საქართველოსა და შვეიცარიის წყალსაცავების განაწილება ჰიდრომეტრიული ნიშნულების მიხედვით ($V_{სრ} > 50.0$ მლნ მ³)

წყალსაცავების მაჩვენებლები	მაჩვენებლის განზომილება	ნშდ-ს ჰიდრომეტრიული ნიშნული, \pm მ				
		<400 მ	400-1000 მ	1000-1500 მ	1500-2000 მ	>2000 მ
1	2	3	4	5	6	7
წყალსაცავების რაოდენობა	რაოდენობა					
– შვეიცარია		2	11	6	24	14
– საქართველო		6	17	5	3	0
წყალსაცავების სრული მოცულობის ჯამი, $\Sigma V_{სრ}$						
– შვეიცარია	მლნ მ ³	91,0	516,0	204,0	1475,0	1090,00
– საქართველო	მლნ მ ³	254,25	2148,68	471,6	317,38	0,0
წყალსაცავების ზედა- პირის ფართობის ჯამი, ΣF						
– შვეიცარია	მ ²	4,8	47,3	14,3	38,3	18,6
– საქართველო	მ ²	28,5	66,86	28,62	36,54	0
$\Sigma V_{სსს} / \Sigma V_{სრ}$						
– შვეიცარია	%	80,0	68,0	63,0	92,0	98,0
– საქართველო	%	27,0	64,0	91,0	93,0	0

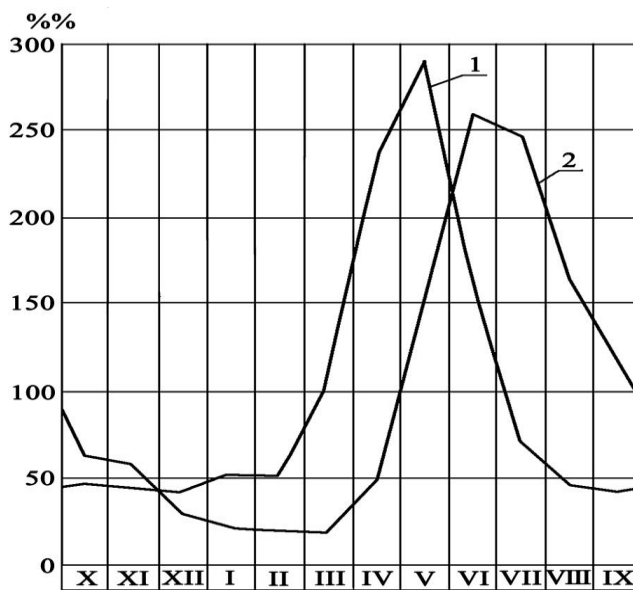
შვეიცარიის მაღალმთიანი წყალსაცავების (გრანდ დიქსანი, ემოსონი, გეპაჩი, ზამერნზოდენი და ა.შ.) სარკის ფართობის ჯამი აღწევს 4,5 კმ²-ს, წყალსაცავის მაქსიმალური სიგრძე 25 კმ, წყალსაცავის ზედაპირის დონის დამუშავება - 300 მ-მდეა. მთის წყალსაცავების სიღრმე 300 მ-ს აღწევს. შვეიცარიელი მკვლევარების აზრით, მთის წყალსაცავების ზემოქმედება ბუნებრივ გარემოზე შემოიფარგლება სანაპიროზე ვიწრო ზოლით და მდინარის ხეობის მონაკვეთებით წყალსაცავის ქვედა ბიეფში. ზოლის დატბორვის პროცესი სუსტადაა განვითარებული. ამ მონაცემების თანახმად, მთისწინეთი და მთის წყალსაცავები აუმჯობესებს ბუნებრივ გარემოს. მაგალითად, მდ. ენზე აგებულია კასკადი, რომელმაც გააუმჯობესა წყლის ხარისხი, შეამცირა ნიადაგის ეროზია და გაამდიდრა სანაპირო მცენარეული საფარი.

მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში მთის წყალსაცავები ითვლება ყველაზე ეფექტურად, როგორც მდინარის ჩამონადენის რეგულირების მახასიათებლების თვალსაზრისით, ასევე გარემოზე მცირე ზემოქმედებით და მიწის ნაკლები დანაკარგებით, რაც დაკავშირებულია წყალდიდობებთან. მთის წყალსაცავების ეფექტურობის განსაზღვრისას განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენს ალპების ჰიდრორესურსების გამოყენების პრაქტიკა, რომლის ტერიტორიის ექსპოზიცია აღმოსავლეთ საქართველოს იდენტურია, კერძოდ: ორივე ჰიდროსისტემა მდებარეობს დედამიწის ერთსა და

იმავე ნახევარსფეროზე – განედებს შორის 44°-48°, იდენტური იზოთერმებით 10°C-20°C. ალპებისა და აღმოსავლეთ საქართველოს მთის მთავარი მთათა სისტემების მიმართულებები, მდინარეების მტკვრისა და პოს მიმართულებაც დასავლეთიდან აღმოსავლეთისკენაა და მათი ჰიდროლოგიური რეჟიმიც იდენტურია (ნახ.III.2.8; III.2.9).



ნახ. III.2.8. ალპებისა და საქართველოს ტერიტორიების განედების და იზოთერმების მნიშვნელობები



ნახ. III.2.9. მდ. მტკვრის და პო-ს საშუალო თვიური ხარჯები (საშუალო წლიური ხარჯებისგან პროცენტებში). 1 - მდ. პო (ქ. ბელინსონთან); 2 - მდ. მტკვარი (ქ. თბილისთან)

საქართველოს მთის მდინარეებზე წყალსაცავების ჰიდროსისტემის აგება მეტად ეფექტური მეთოდია წყლის რესურსების ირიგაციისა და ჰიდროენერგეტიკის მართვისთვის. საქართველოში ენერგორესურსებზე მოთხოვნა წლიდან წლამდე იზრდება, ამიტომ ჰიდროენერგეტიკის განვითარებისათვის მნიშვნელოვანია ჰიდრო-ელექტროსადგურების მშენებლობა. საქართველო მიეკუთვნება ქვეყანას, რომელსაც თავად შეუძლია წყლით უზრუნველყოს ელექტროენერგიისა და ირიგაციის საჭიროებები [იორდანიშვილი ი., ვართანოვი მ., იორდანიშვილი კ., ირემაშვილი ი., ბილანიშვილი ლ., 2022; იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ხოსროშვილი ე.,

ნატროშვილი გ., ფოცხვერია დ., ბილანიშვილი ლ., 2019; Иорданишвили И., Иремашвили И., Иорданишвили К., Поцхверия Д., Биланишвили Л., 2016].

მაღალმთიან რეგიონებში ელექტროენერჯის გამომუშავების ყველაზე რაციონალური სქემაა – მთავარი მდინარისა და მისი შენაკადების ზედა ნაწილებში მაღალი ჰიდროელექტროსადგურების აგება, ხოლო მდინარის ქვედა მონაკვეთებში – ირიგაციული სისტემების აგება. საქართველოს მთის მდინარეების ზედა ნაწილი მდებარეობს ღრმა ხეობებში, ამიტომ აქ სასურველია, მაღალი კაშხლების შექმნა ხოლო ქვედა ნაწილი გამოიყენება ირიგაციისათვის.

შვეიცარიისა და საქართველოს ოროჰიდროგრაფიული პირობების შედარებამ გამოავლინა მათი იდენტურობა, საქართველოს მთისა და მთისწინეთის პირობებში წყალსაცავების მშენებლობის ეფექტურობა, რაც მოხსნიდა ზამთრის პიკებს. ყოველწლიურად საქართველო 2,0 მლრდ კვტს ელექტროენერჯიას ყიდულობს, რაზეც იხარჯება 60,0-100,0 მლნ აშშ დოლარი.

საქართველოს მთის მდინარეებზე ჰიდროელექტროსადგურების აგება ეკოლოგიურად და ეკონომიურად ეფექტურია, რადგან გამოირჩევა მოქნილი მენეჯმენტი და შეუძლიათ სწრაფად შეცვალონ და დაფარონ ელექტროენერჯის პიკური დატვირთვები.

2023 წლიდან ევროკავშირში ნახშირბადის გადასახადი ამოქმედდება, რომლითაც ევროპარლამენტი დამატებით მოსაკრებელს დააწესებს სხვადასხვა ქვეყანაში წარმოებულ პროდუქციაზე.

საქართველოში აქცენტი განახლებად ენერჯიაზე უნდა გაკეთდეს. ამით ქვეყანა კონკურენტუნარიანობას შეიძენს და დაბალი კარბონემისის ფონზე მრეწველობაში ახალ ინვესტიციებსაც მოიზიდავს. თუ პროდუქცია დამზადებული იქნება იმ ელექტროენერჯის გამოყენებით, რომელიც გენერირებულია თბოელექტროსადგურებზე, ამ პროდუქციაზე დაწესებული იქნება ნახშირბადური გადასახადი, რომელიც გადაირიცხება სპეციალურ გლობალურ ფონდში, რაც გაზრდის ნებისმიერი პროდუქციის თვითღირებულებას და ელექტროენერჯის საშუალებით დამზადებული ნებისმიერი პროდუქცია იქნება გაცილებით ძვირი. ნახშირბადური გადასახადის შემოდებით საქართველოს აქვს უდიდესი პერსპექტივა მიაღწიოს ეკონომიკის სწრაფ განვითარებას, სიღარიბის დაძლევის და საერთო კეთილდღეობას.

III.3. საქართველოს ჰიდრორესურსების მართვა გლობალური დათბობის პირობებში

ბოლო 90 წლის მანძილზე დედამიწაზე შეინიშნება გლობალური დათბობის მოვლენა, რაც ტექნოლოგიების განვითარების შედეგია. ანთროპოგენური ზემოქმედებისაგან დედამიწაზე გლობალური დათბობით გამოწვეული უარყოფითი შედეგებია – წყალდიდობები, წყალმოვარდნები, ეროზია, გაუდაზნოება და სხვ. [იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ფოცხვერია დ., კანდელაკი ნ.,

ბილანიშვილი ლ., 2017; იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ხოსროშვილი ე., ხუბულავა ი., 2008; Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Хубулава И.В., 2009; დიაკონიძე რ., 2005; Джакели Х.И., 1986; Фаттулаев Г.Ю., 2000; Machavariani L., Lagidze L., 2012; Mehta V.M. და სხვ., 2000; Solomon S. და სხვ., 2011; Lagidze L. და სხვ., 2017; Karoly D., Stott P., 2006; Brohan P. და სხვ., 2006; Tompson D., Wallace I., 2001; Zhang R. და სხვ., 2007; Zhenkin B., Guobin და სხვ., 2012; Parker D. და სხვ., 2007; Metreveli G., Metreveli M., 2001; Metreveli G., Metreveli L., 2016; Basilashvili Ts., 2011; Beritashvili B., 2011; „საქართველოს პირველი და მეორე ეროვნული შეტყობინება“ ..., 1999, 2009].

კლიმატის გლობალური ცვლილებების მიზეზად მიჩნეულია ყინულის მსოფლიო მარაგის (30 მლნ კმ³) უფრო სწრაფი დნობა, ვიდრე ეს მოსალოდნელი იყო. გაეროს გარემოს დაცვის პროგრამის მონაცემებით, რომელიც წარმოდგენილი იყო ტრომსში (ნორვეგია, 2007 წ.), დედამიწის მოსახლეობის 40% აღმოჩნდება ყინულის მსოფლიო მარაგის გაძლიერებული დნობის გავლენის ქვეშ. ყინულის დნობა გამოიწვევს მსოფლიო ოკეანის დონის აწევას, რაც გამოიწვევს სასოფლო-სამეურნეო მიწების დატბორვას, კუნძულების ჩაძირვას და სხვადასხვა დანიშნულების ნაგებობების ნგრევის რისკის ზრდას. ასე მაგალითად, ყინულის დნობის შედეგად ჩინეთის ტერიტორიაზე მყინვარების მოცულობა უახლოეს დროში შემცირდება 50%-ით, ციმბირსა და კოლხეთში გაიზრდება დაჭაობებული ტერიტორიები, კავკასიაში მთის მყინვარების დნობის შედეგად საგრძნობლად იკლებს მყინვარული წყლის მარაგი. ასეთივე შედეგი ელის ანტარქტიდისა და გრენლანდიის ყინულის სახით არსებულ მტკნარი წყლის მარაგსაც, რომლის მოცულობა დედამიწის წყლის მარაგის 98%-ია (გრენლანდიის მყინვარული წყლის მარაგი მცირდება 150 კმ³/წელიწადში). მხოლოდ გრენლანდიის ყინულის სრული დადნობა გამოიწვევს მსოფლიო ოკეანის დონის აწევას 7-8 მ-ით. საფრთხეშია ყინული ალპების, პირინეის, ანდების და კავკასიის მთებში, სადაც ტემპერატურის 1°C -ით მომატებამ უკვე გამოიწვია მყინვარული ენების 100-150 მ-ით დამოკლება. მსოფლიო ოკეანის დონის აწევა მხოლოდ 1 მ-ით გამოიწვევს იმ მიწების დატბორვას, რომელზედაც 150 მლნ ადამიანი ცხოვრობს. ეს ძირითადად, ეხება მდინარეების – განგის, კონგოს, ნილოსის, მეკონგის დელტებს, ასევე შავი ზღვის აღმოსავლეთ სანაპიროს ტერიტორიას, კერძოდ, კოლხეთს, რომელიც მდებარეობს მსოფლიო ოკეანის დონეზე. გასაგებია, რა ხარჯები იქნება საჭირო მოსახლეობის უფრო მაღალ ადგილებში გასახლებისათვის.

ყინულების დნობის ძირითადი თანამედროვე მიზეზი დედამიწაზე ტემპერატურის მატებაა. იგი დაკავშირებულია ნახშირორჟანგითა და მეთანით ატმოსფეროს დაბინძურებასთან, ასევე ატმოსფეროში სითბური ენერჯის გამოფრქვევასთან, რაც გამოწვეულია როგორც ანთროპოგენური* ზემოქმედებით, ისე ბუნებრივი პროცესებით (ვულკანები, გეიზერები) და მზის აქტივობის გაზრდით [Kutuzov S. და სხვ., 2016].

* ტერმინი „ანთროპოგენური“ შეესაბამება გეოლოგიური პერიოდის აღნიშვნისათვის და არსებითად განსხვავდება ტერმინ „ანთროპოგენურისგან“, რომელიც დაკავშირებულია ადამიანის საქმიანობასთან.

ბოლო 2500 წლის განმავლობაში დედამიწაზე აღინიშნებოდა გამყინვარების და დათბობის რამდენიმე ციკლი [Будыко Т.И., 1980; Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., 1992; Марков Г.И., Лазуков В.А., Николаев В.Н., 1967; Флинт Р.Ф., 1963].

სხვადასხვა მონაცემებით გამყინვარებისა და დათბობის ხანგრძლივობა განსხვავებულია. უნიფიცირებული სქემის მიხედვით, ევროპისა და ციმბირის ტერიტორიაზე ეოპლეისტოცენში (250÷2500 ათასი წლის წინათ) აღინიშნება 4-მდე გამყინვარება და 3 გამყინვარებათშორისი ხანა (თითოეული მათგანის ხანგრძლივობით – 280 000 წელი); მეზოპლეისტოცენში (75÷250 ათასი წლის წინათ) – 2 გამყინვარება და 2 გამყინვარებათშორისი ხანა (თითოეულის ხანგრძლივობა – 45000 წელი); ნეოპლეისტოცენში (10÷75 ათასი წლის წინათ) – 2 გამყინვარება და 2 გამყინვარებათშორისი ხანა (თითოეულის ხანგრძლივობა-16000 წელი) (ცხრ. III.3.1).

ცხრილი III.3.1

კლიმატის გლობალური ცვლილებები დედამიწაზე

2500		1000		600		250				75				10		60		ათასი წელი	
მეთხუთხუთეული (პლეისტოცენი)														ჰოლოცენი		პერიოდი			
ეოპლეისტოცენი (ქვედა პლეისტოცენი)						მეზოპლეისტოცენი (საშუალო პლეისტოცენი)				ნეოპლეისტოცენი (ზედა პლეისტოცენი)				თანამედროვე		ეპოქა			
+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	გამყინვარების (+) და დათბობის (-) პროცესები	

გამყინვარებისას აღინიშნებოდა მკვეთრი აცივების ფაზები დედამიწის ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში. ეკვატორულ სარტყელში კლიმატი სუსტად იცვლებოდა, მაქსიმალური აციება შეინიშნებოდა შუა პლეისტოცენში, როდესაც მყინვარების საერთო ფართობი 3-ჯერ გაიზარდა.

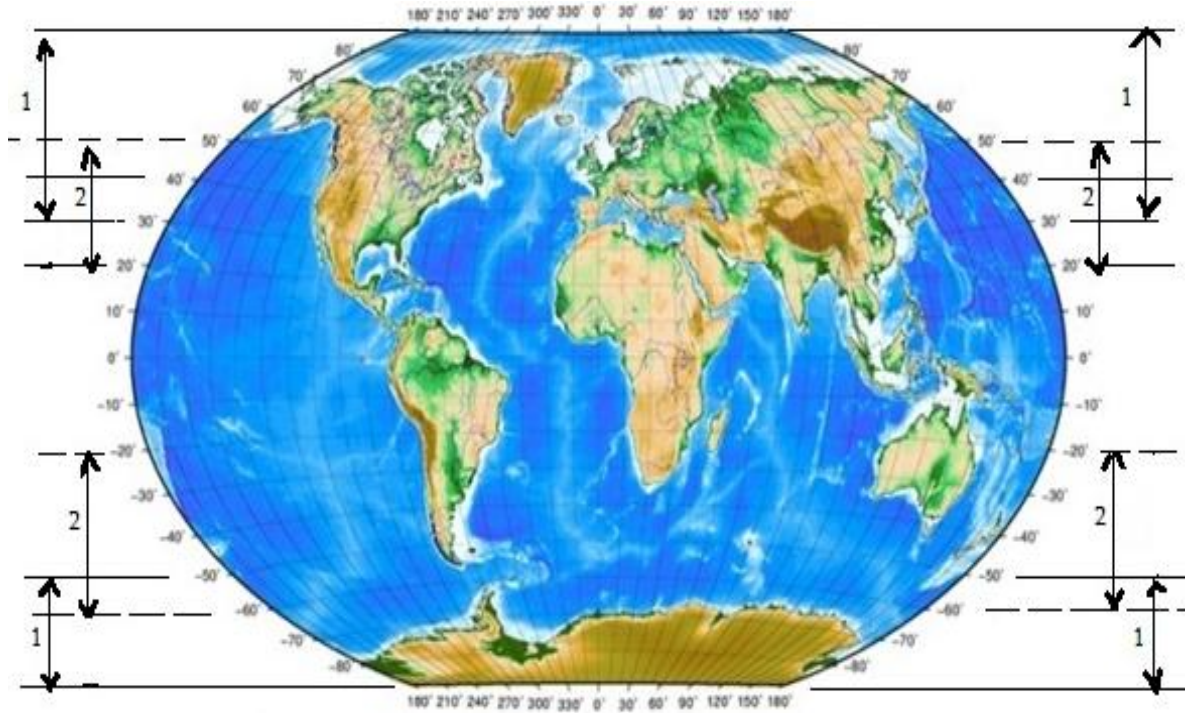
ანთროპოგენურ პერიოდში გამყინვარებას თან ახლდა ფლორისა და ფაუნის ცვლილებები, რაც გამოწვეული იყო ტემპერატურის 6-8%-ით შემცირებით (ნახ. III.3.1). ამასთან, დედამიწის ქვედა სარტყელებში შეინიშნებოდა კლიმატის მნიშვნელოვანი დატენიანება (პლუვიალუმი).

გამყინვარებათშორის პერიოდებში მიმდინარეობდა ზონალობის აღდგენა, ხოლო კლიმატი ხდებოდა თანამედროვეზე თბილიც კი.

ბოლო 10000 წლის მანძილზე (ჰოლოცენი), რომელიც მიღებულია გამყინვარების შემდგომ ეპოქად, მოხდა რამდენიმე დათბობა. კლიმატის შედარებით დიდი დათბობა ევროპაში შეინიშნებოდა 6000 წლის წინათ, რასაც შემდეგ მოჰყვა ერთგვარი აციება.

გამყინვარების თითოეული ციკლის ხანგრძლივობა მცირდება თანამედროვე ეპოქასთან მოახლოებისას (280 000; 45000; 16000; 6000 წელი). გამყინვარებისა და გამყინვარებათშორისი ეპოქების კვლევისა და დაზუსტებისას გამოიყენებოდა დანალექი ქანების აბსოლუტური ასაკის მონაცემები. ბოლო 25-30 ათასი წლისათვის საფუძვლად აღებულია რადიონახშირბადული, ხოლო უფრო შორეული ეპოქისათვის

- კალიუმ-არგონული რადიომეტრული გამოკვლევები. მიუხედავად ამისა, ძნელია ობიექტურად იქნეს შეფასებული გამყინვარების პერიოდები. რიგი მკვლევარი ასახელებს გამყინვარების განსხვავებულ რიცხვებს, ხოლო ზოგი მათგანი მიიჩნევს, რომ იყო ერთი ანთროპოგენური გამყინვარება, მაგრამ გამყინვარებისა და გამყინვარებათშორისი ეპოქების არსებობის ფაქტი უდავოა.



ნახ. III.3.1. დედამიწის გამყინვარების რუკა






1 — გამყინვარების გავრცელების საზღვრები შუა პლეისტოცენში; 2 - - - გამყინვარების გავრცელების საზღვრები ზემო პლეისტოცენში

ამჟამად არსებული ბუნებრივი ზონები - სამყაროს ხანგრძლივი ევოლუციის შედეგია, რაც განპირობებულია კლიმატური და ოროგენეზის ფაქტორებით. კლიმატურ პირობებზე ბუნებრივი ზონების განლაგების დამოკიდებულების შესწავლის ისტორია 100 წელზე მეტს ითვლის.

თბილი ეპოქების მონაცემებზე დაყრდნობით (როდესაც კლიმატი თანამედროვეზე გაცილებით თბილი იყო) შეიძლება ითქვას, რომ მომავალი დათბობა ეკოსისტემის მნიშვნელოვან ცვლილებებს გამოიწვევს. მაგალითად, 2°C-ით დათბობისას საგრძნობლად შეიცვლება კავკასიის მცენარეული ზონების განლაგება და ფართობები (ნახ. III.3.2).



ნახ. III.3.2. ბუნებრივი მცენარეული ზონების განლაგება კავკასიის ტერიტორიაზე დღეს (ა) და 2°C-ით დათბობისას (ბ).

 – სტეპი;  – ფართოფოთლოვანი ტყე;  – ნახევრადუდაბნო; ++ – უდაბნო;
 – წიწვოვანი ტყე;  – შერეული ტყე

ბორჯომის ხეობაში წიწვოვანი ტყეების ფართობი შემცირდება 3-ჯერ, ხოლო ფართოფოთლოვანი ტყეების ფართობი გაიზრდება 10-ჯერ და მათი არეალი გაფართოვდება ჩრდილოეთისკენ. ეს ცვლილებები გარდაუვალია, თუ ადამიანი არ ჩაერევა დათბობის ბუნებრივ პროცესებში.

მნიშვნელოვანი ბუნებრივი ცვლილებები მოხდება დედამიწის ჩრდილოეთ ნახევარსფეროს ზედა განედებში. კავკასიაში, განსაკუთრებით კი კოლხეთის ზონაში, ხელსაყრელი კლიმატური პირობები შეიქმნება ტყეების ზრდისათვის. ამგვარად, კლიმატის მოსალოდნელი ცვლილებები კატასტროფულად არ უნდა აისახოს კავკასიის მცენარეულობაზე.

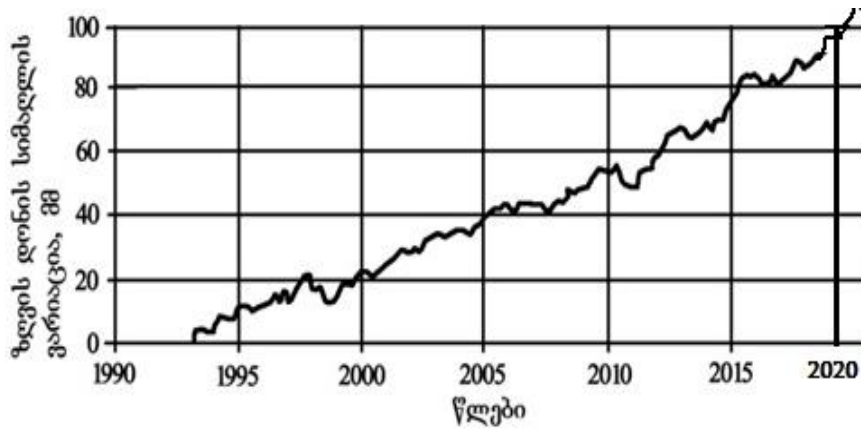
აცოცხლების ხანაში წყლის მნიშვნელოვანი რაოდენობა იხარჯებოდა მცენარეების წარმოქმნაზე, რომელთა დნობის შემდეგ წყალი ბრუნდებოდა ოკეანეებში და ხდებოდა ზღვის დონის ევსტატიური აწევა. გამცენარეების ხანაში მსოფლიო ოკეანის დონე იკლებდა 120 მ-ით, თანამედროვე დონესთან შედარებით.

შავ ზღვაზე ამჟამად შეიმჩნევა როგორც რეგრესიისა (დონის დაწევა) და ტრანსგრესიის (დონის აწევა) მოვლენები, ასევე დედამიწის ქერქის ტექტონიკური მოძრაობა. რეგრესია ხდება ვარნის ყურეში და ბურგასში. შესაბამისად, კოლხეთთან შეიმჩნევა ტრანსგრესიის მოვლენა, რომელიც შავი ზღვისათვის შეიძლება აიხსნას „თასის“ ეფექტით. დონის ამ რხევების სიდიდე რამდენიმე ათეულ სანტიმეტრს აღწევს.

დედამიწის ქერქში მიმდინარე გეოლოგიური პროცესები იწვევდა შავი ზღვის სანაპირო ხმელეთის ჩამორვას და აწევას. ასე, ქალაქი დიოსკურია, რომელიც ჩვ. წ. აღრ.-მდე მე-VI საუკუნეში დაარსდა და იარსება 12 საუკუნე, შემდეგ ზღვის დონიდან 4 მ-ის სიღრმეზე აღმოჩნდა. ასეთივე ბედი ეწია ქ. ფაზისს და ახლა ფოთიც თანდათან იძირება.

ჰოლოცენის პერიოდში ბოლო დათბობა აღინიშნა 6 000 წლის წინათ, რასაც

უნდა მოჰყოლოდა აციება, რომელიც უნდა გაგრძელებულიყო დღემდე, მაგრამ დედამიწაზე მიმდინარე გლობალური დათბობის ანთროპოგენური გავლენის შედეგად მსოფლიო ოკეანის დონე მატულობს 1,8 მმ/წელიწადში სიჩქარით [Гаварდაшвили Г.В., Иордანიшвили И.К., Вартанов М.В., Иремашვილი И.Р., 2020], ნახ (III.3.3).



ნახ. III.3.3. მსოფლიო ოკეანის დონის აწევა 1993 წლის შემდეგ

გლობალური დათბობის შედეგად დამდნარი მყინვარული წყლის მოცულობა მიაღწევს 920 კმ³/წელიწადში. მაშინ დრო, რომლის განმავლობაშიც მყინვარული წყალი (27 მლნ კმ³) დაფარავს მსოფლიო ოკეანის ზედაპირს და ხმელეთის შესაბამის ნაწილს, იქნება 29400 წელიწადი. ამასთან, მსოფლიო ოკეანის დონე აიწევს 50 მ-ით!

დედამიწაზე თანამედროვე გლობალური დათბობის მიზეზები შეიძლება დავყოთ ორ ჯგუფად: **ეგზოგენური** (გარე) და **ენდოგენური** (შიდა) ფაქტორების მოქმედებით [იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ფოცხვერია დ., კანდელაკი ნ., ბილანიშვილი ლ., 2017]:

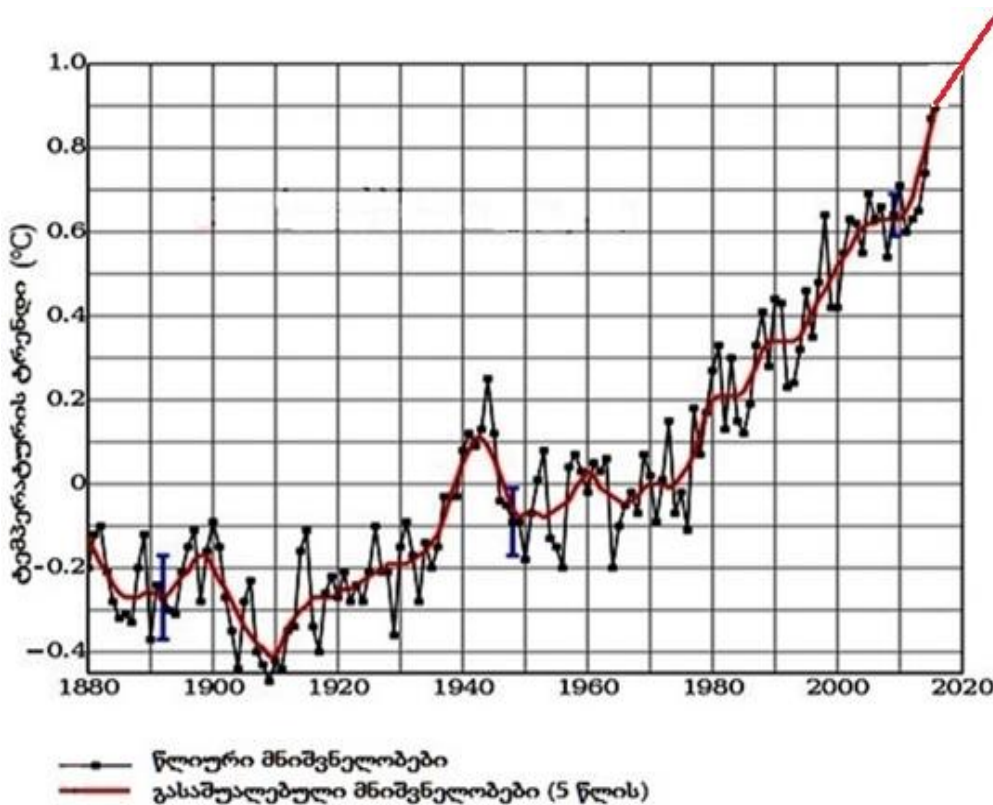
ეგზოგენური (გარე) მიზეზებია – მზის გააქტიურება; იუვენილური (სიღრმული) წყლების დიდი მოცულობის დედამიწის ზედაპირზე ამოსვლა გეიზერებისა და ვულკანური მინერალური წყლების სახით; მზის გარშემო დედამიწის ორბიტალური მოძრაობის ცვლილებები, რომელიც ნელი ვარიაციის ათეული ათასწლეულის ხანგრძლივობის პროცესია. ეს პროცესი თანამედროვე აციების ტრენდშია, რომელსაც შეიძლება მოეყვანა ახალი გამყინვარება, რომ არა ანთროპოგენური მოქმედების ეფექტი.

ამერიკის ცენტრალური ნაწილის ტერიტორიაზე ჩრდილოეთიდან მოდის ცივი ჰაერის მასები, ხოლო კარიბის ზღვიდან – ცხელი ჰაერის მასები. კარიბის ზღვიდან ცხელი დინება – „გოლფსტრიმი“ მიდის ჩრდილოეთით, კანადისა და ამ შტატების სანაპიროებზე კი ლაბრადორის ცივი დინების შეჯახება იწვევს სხვადასხვა ანომალიებს, მაგალითად, ქარიშხალი „ირმა“. თბილი დინება არქტიკისკენ მიემართება, რისი დამსახურებაცაა, რომ ყინულოვანი გრენლანდიის კუნძულს სამხრეთ სანაპიროს სიმწვანე გასდევს და არხანგელსკის პორტიც კი არ იყინება მაშინ, როცა შავ ზღვაში ოდესისა და სიმფეროპოლის პორტები იყინება. ამ დროს ოკეანეში ხდება ცივი და ცხელი ნაკადების გადაადგილება, რაც ქარიშხლების წარმოქმნის ერთ-ერთი მთავარი

მიზეზია. ევროპაში, ატლანტის ოკეანიდან შედის დაბალი წნევის ცენტრები ციკლონების სახით და აღმოსავლეთისაკენ მიემართება, იგი გაჯერებულია წყლის ორთქლით, რაც იწვევს ნალექს, უხვთოვლიანობას, თავსხმა წვიმებსა და წყალდიდობებს.

ენდოგენური (შიდა) ფაქტორებია – ანთროპოგენური ტექნოლოგიების განვითარება და ნავთობპროდუქტების გადამუშავება, ტყის საფარის განადგურება, სასოფლო-სამეურნეო სავარგულების ათვისების აგროტექნიკური ღონისძიებების უგულვებლყოფა, გზებისა და მილგამყვანი ნაგებობების მშენებლობა და ა.შ; სითბური და ატომური ელექტროსადგურების ფუნქციონირება; ნახშირორჟანგის, მეთანისა და სხვა სამრეწველო შხამიანი აირების წარმოქმნა, რის შედეგად იზრდება ატმოსფეროში გამოფრქვეული სითბური ენერჯია, წყლის ორთქლისა და ნახშირორჟანგის (CO₂) რაოდენობა. დედამიწაზე „სითბური ეფექტის“ მაჩვენებლებია: CO₂-გან – 65%, CH₄-გან – 20%, ჰალოგენების აირებისაგან – 10%, N₂O-გან – 4.5%. ატმოსფეროში XXI საუკუნის ბოლოს CO₂-ის რაოდენობა გაიზრდება 2-ჯერ.

გაერთიანებული ერების ორგანიზაციის მონაცემებით, გახშირებული სტიქიური მოვლენებისგან ეკონომიკის სხვადასხვა დარგისთვის მსოფლიოში მიყენებული ზარალი ყოველწლიურად რამდენიმე ასეულ მლრდ დოლარს შეადგენს. ადამიანთა მსხვერპლი 250000-ს აღემატება. XXI საუკუნის მეორე ნახევრიდან დედამიწაზე საშუალო ტემპერატურა იმატებს 0,6°C-ით (ნახ. III.3.4). თუ ეს პროცესი ასეთი ტემპით განვითარდება, XXI საუკუნის შუა პერიოდში დედამიწაზე ტემპერატურა 4°C-ით მოიმატებს [МГЭИ, 2013].



ნახ. III.3.4. დედამიწაზე ჰაერის საშუალო ტემპერატურის გადახრის ტრენდი საშუალო ტემპერატურიდან 1880-2020 წლებში

ნახშირბადის ჟანგის ძირითადი კომპონენტია წყლის ორთქლი, რომლის კონცენტრაცია ატმოსფეროში იზრდება ჰაერის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად [Соловьѳв Л.П., 2014].

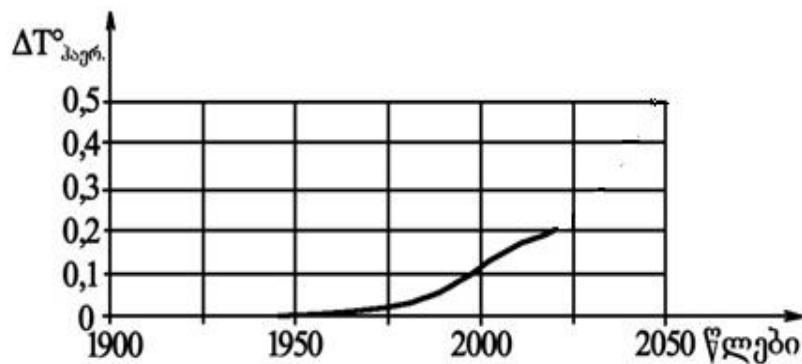
კლიმატური მოვლენების კატასტროფულმა ზრდამ და სიხშირემ შეცვალა ნალექების რაოდენობა და სოფლის მეურნეობის მოსავლიანობა; შეამცირა მყინვარებში წყლის რაოდენობა; გადაშენდა ცოცხალი ორგანიზმების ზოგიერთი სახეობა; გაიზარდა დაავადებათა რიცხვი და ა. შ. მაგალითად, 2017 წლის ზაფხულში გლობალური დათბობის გამო ანტარქტიდის ყინულის დიდი მასა ჩამოიშალა, მოწყვეტილი ყინულის წონა იყო 10^{12} ტონა, ხოლო სიგრძე – 175 კმ.

მყინვარები ყველაზე ინტენსიურად დნება ტროპიკულ და სუბტროპიკულ ქვეყნებში. ალპებში, ბოლივიაში, აღმოსავლეთ აფრიკაში, ტანზანიაში. კლიმანჯაროს მთაზე, რომელიც აფრიკის უმაღლესი მწვერვალია, ყინულის საფარი მთლიანად გაქრა.

მიუხედავად იმისა რომ, ჩრდილოეთიდან წამოსული ანომალური მეტეოროლოგიური მოვლენები შერბილებულია კავკასიონის ქედით, საქართველოს ტერიტორიაზეც შეიმჩნევა გლობალური დათბობით გამოწვეული შედეგები:

– მთელ ტერიტორიაზე შეიმჩნევა ჰაერის ტემპერატურის აწევის ტრენდი (ნახ. III.3.5) [Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., Иремашвили И.Р., 2020];

– შეიმჩნევა მყინვარების დნობა და შავი ზღვის დონის აწევა, გახშირებული შტორმები, წყალდიდობები და წყალმოვარდნები, მეწყერულ-გრავიტაციული და ღვარცოფული მოვლენები, ძლიერი ქარი, სეტყვა, ზვავი, ბიოლოგიური საფრთხეები, ხანძარი და სხვ.

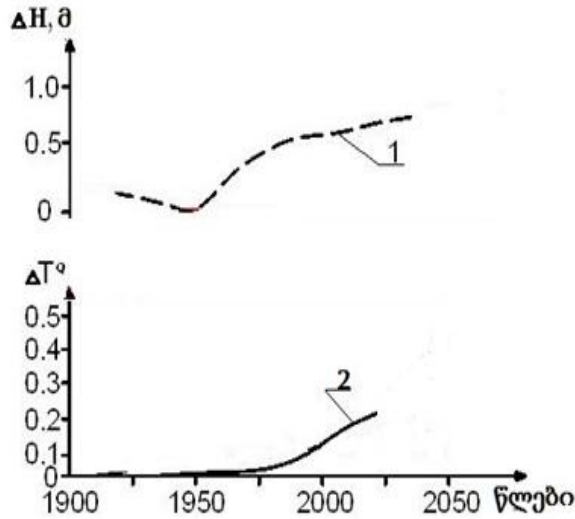


ნახ. III.3.5. საქართველოს ტერიტორიაზე ტემპერატურის თანამედროვე გასაშუალებული ტრენდი

შავი ზღვის შტორმები და დონური რეჟიმი. შავი ზღვის 1200 კმ-ზე გაწოლილ ზედაპირზე ქარებს აქვთ მნიშვნელოვანი გარბენა, რის გამოც წარმოიქმნება მაღალი, ციცაბო ტალღები. ზღვიდან გადმოსული ჰაერის მასები დიდი რაოდენობით წყლის ორთქლს შეიცავენ, რაც უხვ ნალექს იწვევს დასავლეთ საქართველოში.

გლობალური დათბობისა და ანთროპოგენური მოქმედების გამო (ჰეს-ების მშენებლობა შავი ზღვის აუზის ტერიტორიებზე, სამშენებლო მასალის დაუზოგავი ამოღება ჯამში 40 მლნ მ³-მდე, ნაპირდაცვის არაეფექტურობა და ა.შ) კოლხეთის სანაპირო მონაკვეთი ირეცხება (ნახ. III.3.6) [Summary, 1996]. 2017 წლის შემოდგომაზე, შტორმისას ქ. ბათუმის ბულვარს მოწყდა 4 მ სიგანის მონაკვეთი – ბულვარის 7 მ

სიგანიდან დარჩა მხოლოდ 3 მ და დაინგრა ნაპირსამაგრი ნაგებობები.



ნახ. III.3.6. კოლხეთის სანაპირო ზონაში შავი ზღვის დონის (ΔH) (1) და ჰაერის ტემპერატურის (ΔT) (2) ტრენდი

ნატანის მოცულობის შემოტანა მდ. ენგურიდან მდ. ჭოროხამდე 3-ჯერ შემცირდა და ზღვა შტორმებისას ისევ ნაპირს აწყდება (ცხრ. III.3.2).

ცხრილი III.3.2.

მდინარეებით ჩამოტანილი ნატანის მოცულობა შავი ზღვის კოლხეთის სანაპიროსთან

№	მდინარის დასახელება	ნატანის მოცულობა მ ³ /წელიწადში	
		1980-იან წლებში	2010-2018 წლებში
1	ენგური	370 000	29 000
2	რიონი	2 066 000	1 350 000
3	ჭოროხი	5 330 000	1 060 000
სულ		7 760 000	2 439 000

მცინვარების დნობა. ქართველი გლაციოლოგების კვლევების თანახმად საქართველოში: კოდორის ხეობაში XIX საუკუნის მეორე ნახევარში 145 მცინვარი იყო, 2014 წელს კი – 118; ენგურის აუზში იყო – 299, 2014 წელს კი – 269; თერგის აუზში 1960 წელს 99 მცინვარი იყო, 2014 წელს კი დარჩა – 58. ზოგიერთი მცინვარი დნობისას, ზომასი დაპატარავების გარდა, იყოფა კიდევ. მაგალითად, უშბა 1960 წელს ერთი რთული ხეობის ტიპის მცინვარი იყო, 2012-2013 წლებში უკვე ორად არის გაყოფილი.

წყალდიდობები და წყალმოვარდნები საქართველოს თითქმის ყველა მდინარისთვის არის დამახასიათებელი. განსაკუთრებით მაღალი რისკით გამოირჩევა იმერეთის, სამეგრელოს, გურიის, მცხეთა-მთიანეთის მდინარეები, მტკვარი და ალაზანი. 1995 წლამდე ინტენსიური წყალმოვარდნები ყოველ 5-6 წელიწადში მეორდებოდა, 1995-2017 წლებში კი ეს მოვლენები თითქმის ორჯერ გახშირდა (ყოველ 2-3 წელიწადში). 2015 წლის 13 ივნისს მდ. ვერეს აუზში მომხდარი წყალდიდობა ამ სტიქიის საფრთხისა და მისი შედეგების ნათელი მაგალითია, როდესაც წყლის ხარჯი 500 მ³/წმ-მდე დაფიქსირდა.

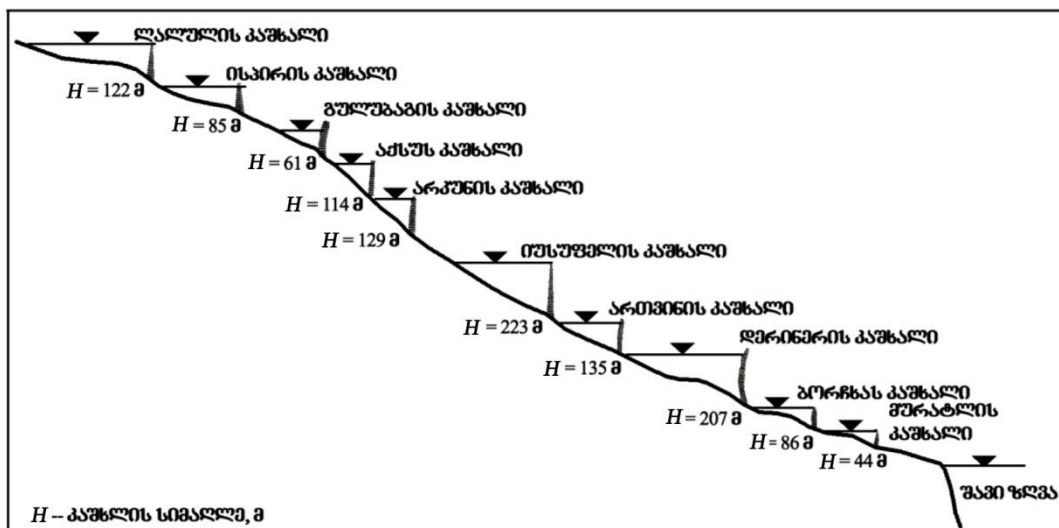
საქართველოს მდინარეებზე გლობალური დათბობის გამო წყალდიდობების მაჩვენებლები მოყვანილია III.3.3 ცხრილში [გრიგოლია გ., კერესელიძე დ., ტრაპაიძე ვ., ბრეგვაძე გ., 2013, 2014]. დასავლეთ საქართველოს მდინარეებზე წყალდიდობების მაქსიმალური ხარჯები გაიზარდა, ხოლო აღმოსავლეთ საქართველოს მდინარეებზე წყალდიდობების მაქსიმალურ ხარჯებს აქვს უმნიშვნელო, მაგრამ დადებითი ტრენდი. ასეთი მდგომარეობა აისახა აღმოსავლეთ საქართველოს წყალსაცავებში დაგროვილი წყლის სწრაფი ხარჯვით ცხელ ზაფხულში სარწყავი წყლის გაზრდილი მოთხოვნის გამო.

ცხრილი III.3.3

საქართველოს მდინარეებზე წყალდიდობების მაჩვენებლები

№	მდინარე	წყალშემკრების ფართობი, კმ ²	დაკვირვების წლების პერიოდი	მაქსიმალური ხარჯი, მ ³ /წმ	წელი
1	2	3	4	5	6
1.	ენგური, (ს. ჯვარი)	3170,0	1928-1965	1000,0	1941
2.	–“–	–“–	1966-1970	1540,0	1970
3	ხოზი (ს. ლეგარხე)	310,0	1937-1965	418,0	1962
4	–“–	–“–	1966-1982	850,0	1982
5.	რიონი (ს. საქოჭახიძე)	13300,0	1928-1965	3000,0	1963
6.	–“–	-//-	1966-1977	3520,0	1977
7.	ყვირილა (ქ. ზესტაფონი)	2490,0	1930-1965	883,0	1933
8.	–“–	–“–	1966-1982	1030,0	1982
9.	ჭოროხი (ს. ერგე)	22000,0	1930-1968	3840,0	1942
10.	–“–	–“–	2002-2012	500,0	2012
11.	მტკვარი (ლიკანთან)	21000,0	1968-1977	800,0	1977
12.	–“–	–“–	1978-1986	1500,0	1984
13.	ვერე (თბილისი)	152,7	1963-1992	140,0	1963
14.	–“–	–“–	1993-2015	468,0	2015

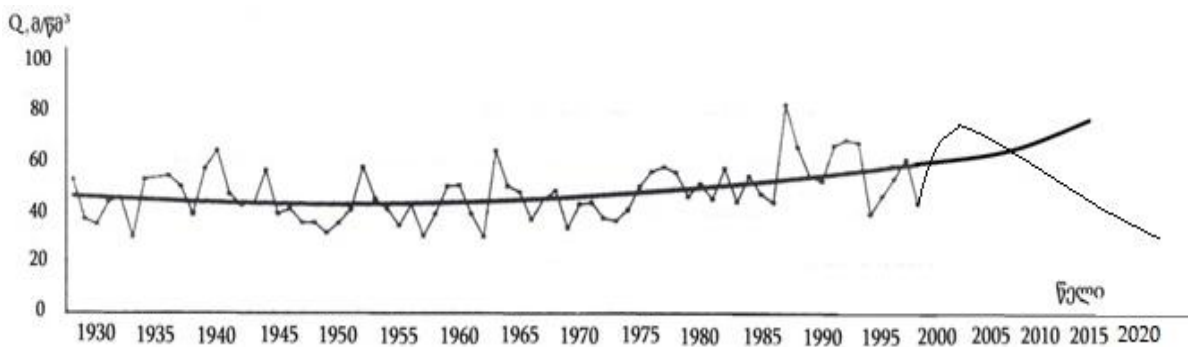
მდ. ჭოროხზე თურქეთის ტერიტორიაზე უკვე აშენებულია 10 წყალსაცავი, რაც საგრძნობლად შეამცირებს წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების რისკებს (ნახ. III.3.7).



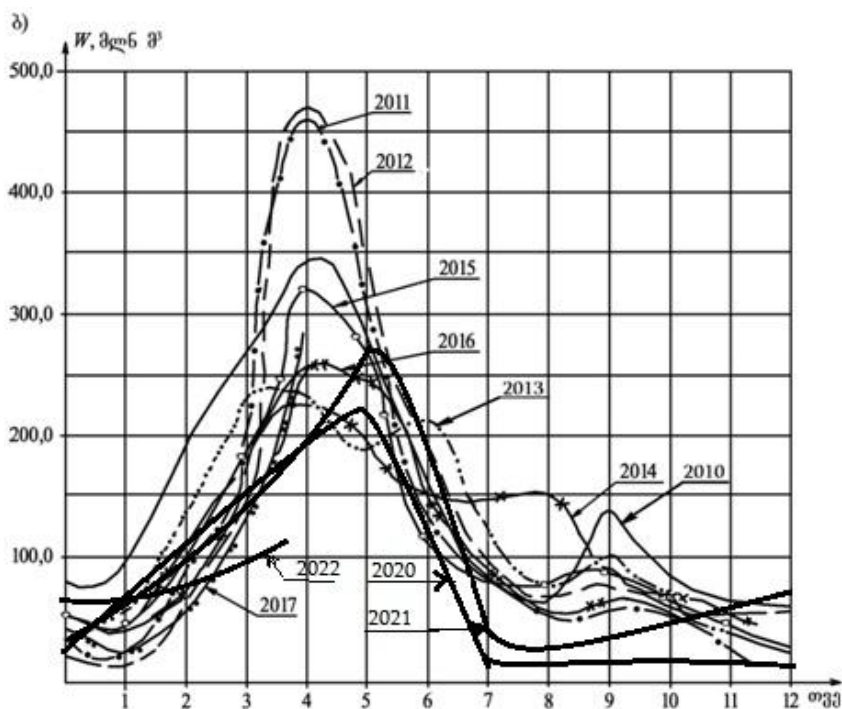
ნახ. III.3.7. თურქეთის წყალსაცავების კასკადი მდ. ჭოროხზე

უნდა აღვნიშნოთ, რომ ამ წყალსაცავებში გროვდება პლაჟამგები მასალა, რომელიც მიეწოდებოდა ბათუმის სანაპიროს. ამიტომ, ბათუმის სანაპირო ხელოვნურად უნდა შეივსოს პლაჟამგები მასალით, კერძოდ, განიხილება გუმითის წყალსაცავში არსებული ნატანის გამოყენებით.

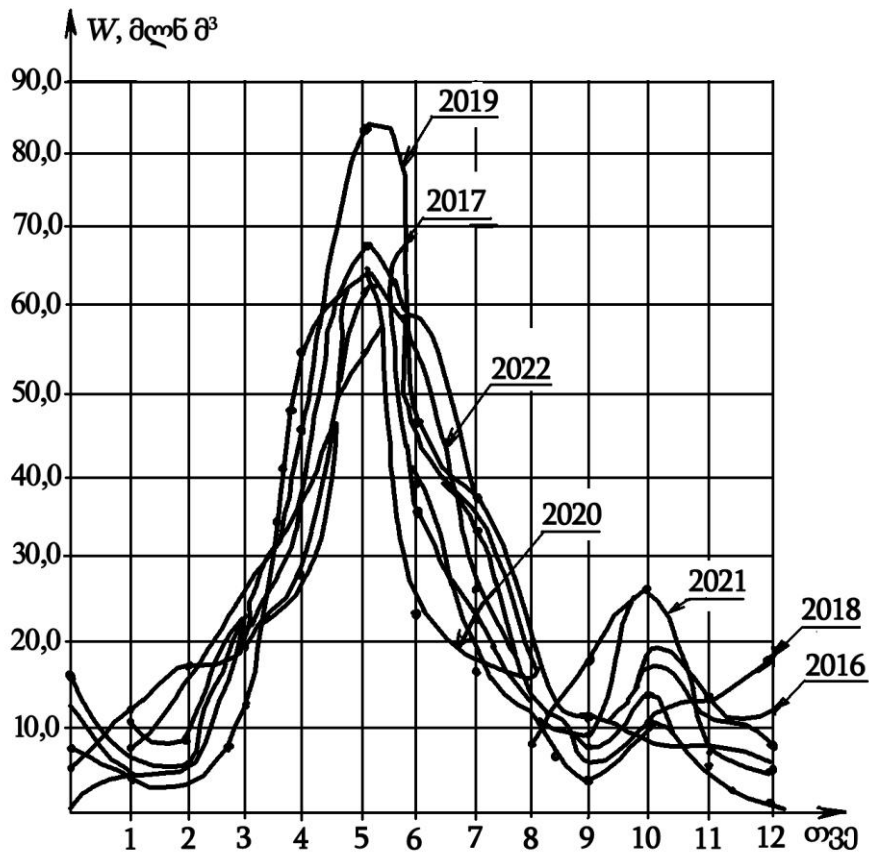
ბოლო წლებში რიგ წყალსაცავში შემოდინებული წყლის მოცულობა ნაკლებია, ვიდრე წინა წლებში (ნახ. III.3.8; III.3.9.ა; III.3.9.ბ; III.3.9.გ). ჩამოტანილი ნატანის მოცულობაც მომატებულია. მაგალითად, ჟინვალის წყალსაცავი არის სეზონური რეგულირების, მის მიერ დარეგულირებული სეზონური ჩამონადენი ელექტროენერჯის ქრონიკული დეფიციტის გამო ყოველწლიურად თითქმის მთლიანად მოიხმარება. წყალსაცავის დონის შიდა წლიურ რყევას განსაზღვრავს მდ. არაგვის წლიური ჩამონადენი და მოთხოვნა ელექტროენერჯიაზე. ამის გამო, მისი ავსების ფაზა გრძელდება 20 მარტიდან 20 ივლისამდე, ხოლო დაცლის – ივლისიდან წყალდიდობამდე.



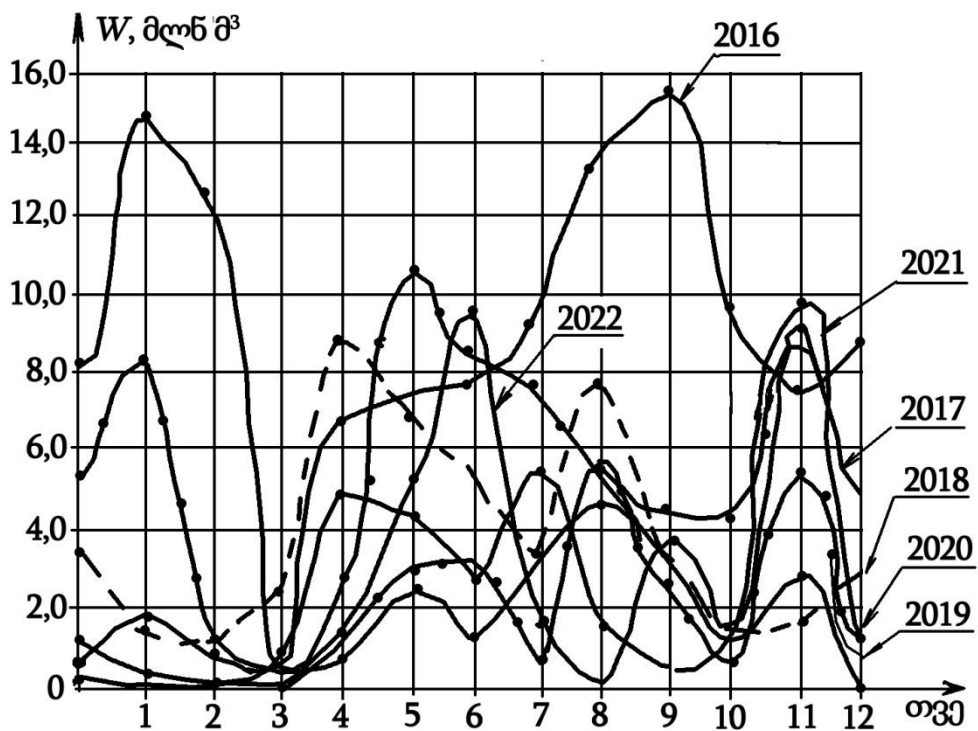
ნახ. III.3.8. მდ. არაგვის წყლის წლიური საშუალო ხარჯების რყევის გრაფიკი ჟინვალის წყალსაცავის სათავეში



ნახ. III.3.9.ა. ჟინვალის წყალსაცავში შემოდინებული წყლის მოცულობის გრაფიკი



ნახ. III.3.9.ბ. იონის წყალსაცავში შემოდინებული წყლის მოცულობის გრაფიკი



ნახ. III.3.9.გ. თბილისის წყალსაცავში შემოდინებული წყლის მოცულობის გრაფიკი

შენიშვნა: 2019 წლის 25 სექტემბრიდან განხორციელდა პატარა ზღვის დაცლა წყალმიმღების წმენდით სამუშაოებთან დაკავშირებით.

კლიმატის გლობალური დათბობისა და მდ. არაგვის ჩამონადენის ბუნებრივი ციკლური მატების გამო, ჟინვალის წყალსაცავის წყლის ბალანსის შემოსავალი ნაწილი 1990-1998 წლებში 1950-1960 წლების საშუალო სიდიდესთან შედარებით 30%-ით გაიზარდა. წყალდიდობის პერიოდში ეს ნაზრდი უფრო მეტია – 33%-ით, წყალმცირობის პერიოდში მატება უმნიშვნელოა, ოქტომბერში კი პირიქით – ჩამონადენი მცირდება. ჟინვალის წყალსაცავის პროექტში მკვდარი მოცულობის დალექვისათვის გათვალისწინებული იყო 120-140 წელიწადი, ხოლო წყალსაცავის მთლიანად ამოსავსებად – 400-500 წელიწადი. 2017 წლისათვის ჟინვალის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილი იყო 121,54 მლნ მ³ ნატანი. 2010 წლამდე დალექვის პროცესი ნაკლებად ინტენსიურია (2,6÷2,9 მლნ მ³/წელიწადში), ხოლო 2010 წლის შემდეგ – გახშირებული, წყალუხვი წყალდიდობებისა და წყალსაცავში წყლის მომატებული მოცულობის გამო – იზრდება ნატანის დაგროვების ინტენსივობა – $W_{ნატ.}/t=8.08$ მლნ მ³/წელიწადში. თუ ასეთი დინამიკა შენარჩუნდება, 2025 წლისათვის ჟინვალის წყალსაცავში მყარი ნატანის მოცულობა გაუტოლდება წყალსაცავის მკვდარ მოცულობას ($W_{ნატ.}=V_{მკვდ.}\approx 150,0$ მლნ მ³).

ასეთივე მდგომარეობაა სიონის წყალსაცავშიც: 2020 წლისთვის სიონის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილი იყო 4,30 მლნ მ³ ნატანი.

ღვარცოფული მოვლენები გვხვდება საქართველოს ყველა კლიმატურ ზონაში – ზღვისპირეთიდან მაღალმთიან ალპურამდე. ღვარცოფული მოვლენების გააქტიურება გამოწვეულია ინტენსიური ატმოსფერული ნალექებით, წყალმოვარდნებით, თოვლისა და ყინულის დნობით, ჯებირების გარღვევით, მყინვარებისა და მეწყრების ჩამოშლით, ტყის ჭრით, ინერტული მასალების მოპოვებით, ჭარბი საძოვრებით, უსისტემო ურბანიზაციით (მშენებლობები მაღალი რისკის ზონებში) და სხვ.

ღვარცოფები ემუქრება მდინარეთა ხეობებში დასახლებულ პუნქტებს. მაღალი საშიშროების წინაშეა ქალაქები – თბილისი, ყვარელი, თელავი, საგარეჯო, ლაგოდეხი, ონი, ბორჯომი, მესტია, ლენტეხი, ადიგენი, მცხეთა, ცაგერი და სხვ.

საქართველოში 532 მდინარეა, რომელთაც ღვარცოფის ტრანსპორტირება შეუძლია (ცხრ. III.3.4) [დიაკონიძე რ., 2005; ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., 2017].

ცხრილი III.3.4

საქართველოს ღვარცოფული რაიონები

№	რაიონის დასახელება	ღვარცოფული აუზების რაოდენობა
1	2	3
1	კოდორი-ბზიფი	109
2	ენგური-ხობის	56
3	რიონის	122
4	ყვირილა-ძირულას	29
5	აჭარა-გურიის (ჭოროხი-სუფსა)	40

ცხრილი III.3.4 (გაგრძელება)

1	2	3
6	თერგი-არლუნის	99
7	ლიახვისა და არაგვის	106
8	ცივ-გომბორის (იორის)	44
9	ალაზნის	80
10	ჯავახეთისა და მესხეთის (მტკვრის – ზედა ბორჯომამდე)	160
11	შიდა ქართლის (მტკვრის მარჯვენა ნაპირი თბილისამდე)	53
12	ლოქის (ალგეთი-ხრამის)	29
სულ		920

კვლევების შედეგად დადგენილია, რომ საქართველოში ყველაზე მეტად გავრცელებულია წვიმის გენეზისის მქონე ღვარცოფები. გარემოს ეროვნული სააგენტოს მონაცემების თანახმად 1995-2012 წლებში მხოლოდ ღვარცოფებით გამოწვეულმა ზარალმა შეადგინა 358 მლნ ლარი და იმსხვერპლა 35 ადამიანი. ღვარცოფების მუდმივი საშიშროების ქვეშაა მოქცეული კავკასიონის ქედის ძირში განლაგებული კახეთის დასახლებული პუნქტების მოსახლეობა და პირველ რიგში – ქ. ყვარელი, ასევე რაჭისა და ზემო სვანეთის დასახლებული პუნქტები. ბოლო 100 წლის მანძილზე მდ. დურუჯის ხეობაში ღვარცოფების შედეგად 150-ზე მეტი ადამიანი დაიღუპა და დიდი ზარალი მიაღწა ქ. ყვარლის მოსახლეობას. ქ. თბილისიც ღვარცოფული კატასტროფების მაღალი რისკის ზონაშია მოქცეული. 2012 წლის მაისში უხვი ნალექის შედეგად ქ. თბილისში ტრანსფორმირებული ღვარცოფის შედეგად დაიღუპა 5 ადამიანი და დაინგრა რამდენიმე სახლი. მიყენებულმა ზარალმა 20 მლნ აშშ დოლარს გადააჭარბა. 2015 წლის 13 ივნისს მდ. ვერეს ხეობაში განვითარდა სტიქიური მოვლენა, რომელიც უკავშირდება მიმდინარე ძლიერ თავსხმას 4-5 საათის განმავლობაში, მოხდა მდინარის სწრაფად ადიდება და კალაპოტში ღვარცოფული ნაკადის ჩამოყალიბება. ასევე, არ შეიძლება არ აღინიშნოს, ბოლო წლებში გლობალური დათბობის ფონზე, საქართველოში გახშირებული ძლიერი ქარები, სეტყვა, ზვავები, შტორმები, ტყის ხანძრები და სხვ. [გავარდაშვილი გ., 2017].

საქართველოში ძლიერი ქარების განმეორების სიხშირე ბოლო 20 წელიწადში გაორმაგდა და მეორდება ყოველ 4-5 წელიწადში. ძლიერი, 25-30 მ/წმ სიჩქარის ქარები წელიწადში 5-7-ჯერ ქრის, 30 მ/წმ-ზე მეტი ქარები ქუთაისი-ზესტაფონის მონაკვეთსა და თბილისის გარე უბნებში – წელიწადში 1-2-ჯერ, ხოლო ქვეყნის სხვა რეგიონებში, საშუალოდ, ხუთ წელიწადში ერთხელ მეორდება. ძლიერი ქარები აზიანებს კავშირგაბმულობასა და ელექტროგადამცემ ხაზს. იწვევს ზღვის ძლიერ ღელვას, მტკრიან ქარიშხალს, ქარბუქსა და თოვლის არათანაბარ განაწილებას, რასაც მოსდევს ნამქერების წარმოქმნა, ნიადაგის ტენისგან გაღარიბება, წყალსაცავებისა და ზღვის ნაპირების აბრაზიული მოვლენების გააქტიურება.

საქართველოს მთელ ტერიტორიაზე გახშირებულია **სეტყვის მოვლენები**. სეტყვის ინტენსივობა და სიხშირე განსაკუთრებით მაღალია აღმოსავლეთ საქართველოში. ყოველთვიურად აღინიშნება 5-დან 15-მდე შემთხვევა. სეტყვას შეუძლია მთლიანად გაანადგუროს ნათესები, მოსავალი, დახოცოს საქონელი და ფრინველი. როცა სეტყვის ცალკეული მარცვლის წონა 100-200 გრამზე მეტია, შესაძლებელია ადამიანთა დაღუპვაც. ბოლო 13 წელიწადში ქვეყნისთვის სეტყვით მიყენებულმა ზარალმა 140 მლნ ლარს გადააჭარბა.

ქვეყანაში გახშირებულია **ზვავებიც**. თოვლის ზვავებს იწვევს ძლიერ დანაწევრებული და დახრილი რელიეფი, ინტენსიური თოვა, თოვლის საფარის სიმაღლის სწრაფი დნობა, ქარბუქი, ტემპერატურის მკვეთრი ცვლილება და წვიმა. ამ სტიქიის სიხშირე და ინტენსივობა გაიზარდა 1970 წლიდან. ზვავები მასიურად შეიმჩნეოდა 1970-1971, 1975-1976, 1986-1987, 1991-1992, 1996-1997, 2004-2005 წლებში.

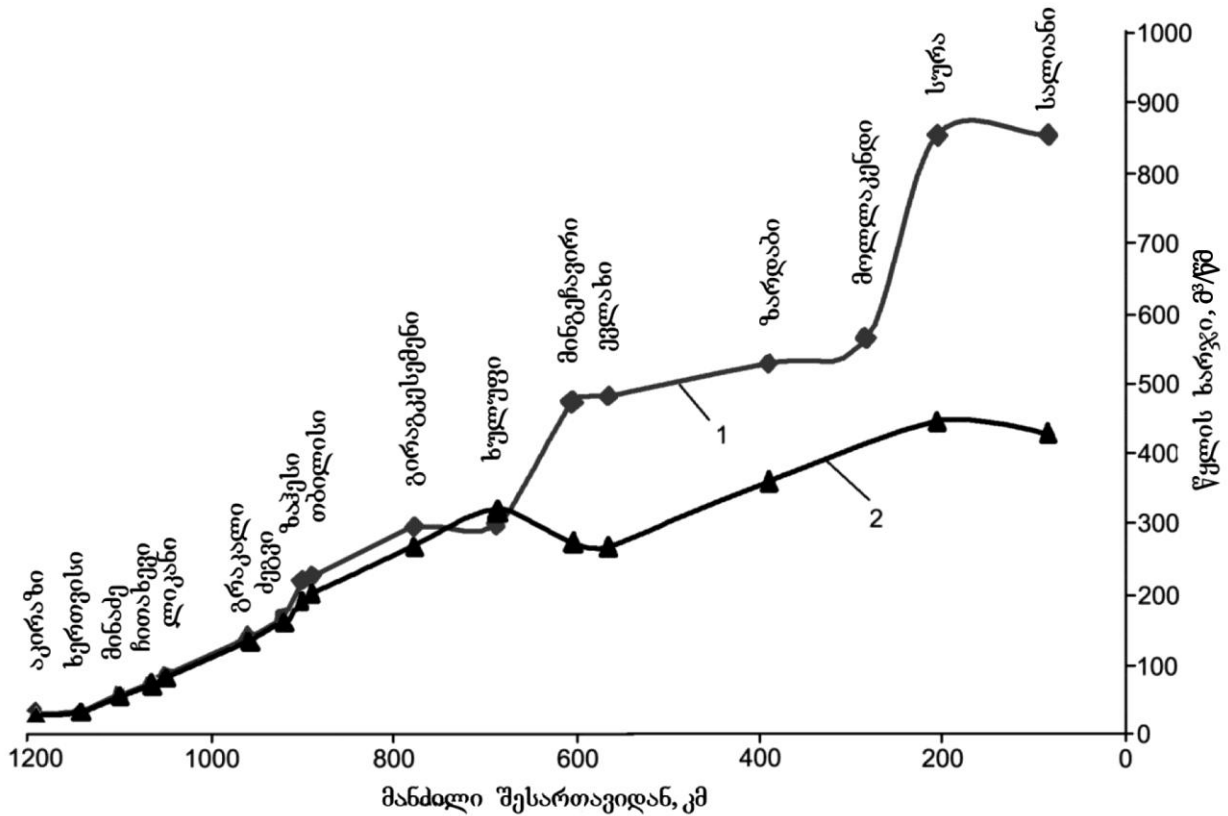
თოვლის ზვავი დიდ ზიანს აყენებს ადამიანთა სამეურნეო საქმიანობას, დასახლებებს, იწვევს მსხვერპლს, ნგრევას, გზების ჩახერგვასა და ტრანსპორტის მოძრაობის შეწყვეტას, მწყობრიდან გამოჰყავს ელექტროგადამცემი ხაზების ბოძები.

არახელსაყრელი კლიმატური პირობების შემთხვევაში (გვალვა, თბილი ზამთარი და ცხელი ზაფხული) იზრდება ვეტერინარული და **ფიტოსანიტარული საფრთხეები**. საქართველოში აღრიცხულია სხვადასხვა დაავადების გამომწვევი 2500-მდე სახეობის სოკო და 1500 სახეობის მავნე მწერი. საქართველოს სოფლის მეურნეობას დიდი ზიანი მიაყენა კალიების მასობრივმა გავრცელებამ, რასაც 200 ათას ჰექტარამდე სასოფლო-სამეურნეო დანიშნულების მიწის ფართობის დაზიანება მოჰყვა (გავრცელების ეპიცენტრი იყო აღმოსავლეთ საქართველო).

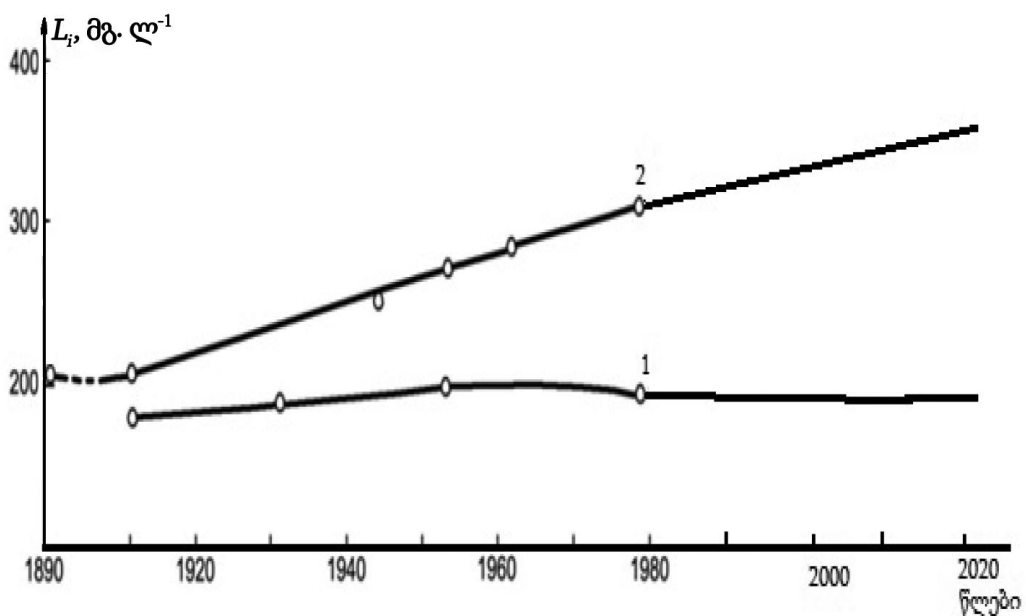
სასოფლო-სამეურნეო კულტურების მასობრივი დაზიანება ასევე შეიძლება გამოიწვიოს სხვა მავნე ორგანიზმებმა (სოკო, ვირუსი, ბაქტერია, მღრღნელი და სხვ.). საქართველოში გახშირდა ცხოველთა (თურქული, ცოფი, ღორის კლასიკური და აფრიკული ჭირი, ჯილეხი, ბრუცელოზი) და ფრინველთა (ფრინველთა ნიუკასლის დაავადება, ლურჯი ენა, ყვავილი, ფრინველის მაღალპათოგენური გრიპი და სხვ.) დაავადებები.

ხანგრძლივი გვალვა და მაღალი ტემპერატურა ზრდის ტყეში **ხანძრის საფრთხეს**. ხანძრის გამომწვევი ბუნებრივი ფაქტორებიდან უმთავრესია მეხის დაცემა, ძლიერი ჭექა-ქუხილი. საქართველოში ყველაზე მასშტაბური ხანძრები გაჩნდა 2017 წელს თბილისის მიმდებარე რაიონებში – ბორჯომსა და დუშეთში. დამწვარია 100 ჰექტარზე მეტი უნიკალური ტყის ფართობი, შემცირებულია ჟანგბადის მარაგი, რომ არაფერი ვთქვათ ნიადაგის განადგურებაზე, რომლის აღდგენას დასჭირდება რამდენიმე ათეული წელი. თუ გავითვალისწინებთ, რომ 1 ჰა ტყე ერთი წლის განმავლობაში შთანთქმავს 10,0 ტ ნახშირორჟანგს და გამოყოფს 20,0 ტ ჟანგბადს, 2017 წელს მომხდარი ხანძრის გამო რეგიონს დააკლდა 2000 ტ ჟანგბადი და მოემატა 1000 ტ ნახშირორჟანგი. წვის დროს გამოყოფილი იყო დიდი რაოდენობის სითბური ენერჯია, რის გამოც გაუსაძლისი პირობები შეიქმნა ახლომდებარე მოსახლეობისათვის.

საქართველოს ზედაპირული წყლების ქიმიური შემადგენლობაც განპირობებულია გლობალური დათბობით. მდინარეულ წყლებში მთავარი იონების რაოდენობა დამოკიდებულია ბუნებრივ და ანთროპოგენურ ფაქტორებზე (ნახ. III.3.10; III.3.11).



ნახ. III.3.10. მდ. მტკვრის წლიური ჩამონადენის ბუნებრივი და ანთროპოგენული ტრანსფორმაცია (1991-2012 წწ.). 1 - პირობითი ბუნებრივი ჩამონადენი; 2 - შესწავლილი ჩამონადენი



ნახ. III.3.11. მთავარი იონების (L_t) ცვლილებები მდ. არაგვისა (1) და მტკვრის (2) წყალში

ამგვარად, განხილული საკითხები გლობალური დათბობის შედეგების შესახებ წარმოადგენს განსაკუთრებით საშიშ პრობლემას და საჭიროებს დროულ გაანალიზებასა და შეფასებას.

III.4. მთის წყალსაცავების დაპროექტებისა და ექსპლუატაციის სპეციფიკა

საქართველოს მთის რეგიონებში წყალსაცავების აგებისათვის საჭიროა შემდეგი მონაცემების გაანალიზება და საპროგნოზო ფაქტორების სპეციფიკის გათვალისწინება: მთის წყალსაცავების ადგილმდებარეობის შერჩევა; მთის წყალსაცავების წყლის ბალანსის სპეციფიკა; მთის წყალსაცავების სარკის ფართობისა და მოცულობის განსაზღვრა; მთის წყალსაცავების გეოეკოლოგიური ფაქტორების რისკი.

მთის წყალსაცავების ადგილმდებარეობის შერჩევის სპეციფიკა

გაერთიანებული ერების ორგანიზაციის (გაერო) მონაცემებით, დედამიწის ტერიტორიაზე განვითარებულია 50-ზე მეტი რაოდენობის ბუნებრივი და ტექნოგენურად საშიში პროცესი, ყოველწლიურად იღუპება 150000-ზე მეტი ადამიანი, ხოლო ეკონომიკური ზარალი 100 მლრდ დოლარზე მეტია. თანამედროვე ეტაპზე ანთროპოგენული ზემოქმედება შეესაბამება ბუნებრივ პროცესებს, რომლებიც ვითარდება ლითოსფერო, ჰიდროსფეროსა და ატმოსფეროში. ეს ტენდენციები მკვეთრად იზრდება მთის რეგიონებში, რომლებიც გამოირჩევა ბუნებრივ-ლანდშაფტური კომპონენტების მნიშვნელოვანი ცვლილებებით, ბუნებრივი ეკოსისტემების არასტაბილურობითა და ბუნებრივ-ტექნოგენური სახიფათო პროცესების ფორმირების რისკების გაზრდით. ამიერკავკასიის ბუნებრივ პირობებში წყლის რესურსების გამოყენება გართულებულია მათ ტერიტორიაზე წყლის ჩამონადენის არათანაბარი განაწილებით.

მთის წყალსაცავის აგების ადგილმდებარეობის შერჩევა ხდება შემდეგი პირობების გათვალისწინებით:

– ტერიტორიის დარაიონების ბუნებრივ-ტექნოგენური, გეოლოგიური და სხვა სახიფათო პროცესების განვითარების მიხედვით;

– ეგზოგენური (გარე მიზეზებით გამოწვეული) - დედამიწის ქერქის ზედა ფენებში უარყოფითი პროცესების ანალიზით, ესენია: სეისმური აქტივობა; დედამიწის ქერქის თანამედროვე მოძრაობები; ნალექები; ზედა და ქვედა ჰიდროსფეროს რეჟიმი.

მთის წყალსაცავების წყლის ბალანსის სპეციფიკა

მთის რეგიონებში წყალსაცავების წყლის ჩამონადენის რეჟიმის რეგულირება, ძირითადად, სეზონური ტიპისაა, წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობისა ($V_{სს}$) და

მდინარის წყლის (წლიური) ჩამონადენის ($W_{წაშ}$) თანაფარდობის მნიშვნელობა მაღალია – $V_{წაშ}: W_{წაშ} \geq 0,3$. მთის წყალსაცავების წყლის ბალანსი ხასიათდება მნიშვნელოვანი ცვალებადობით, რომელიც განპირობებულია მდინარეების ჩამონადენის რეგულირების სპეციფიკით წლიურ და სეზონურ კრილში.

წყლის ბალანსის ტოლობა მთის წყალსაცავის დროის ნებისმიერ მონაკვეთზე (t) მომენტისთვის ასე ჩაიწერება:

$$V_{\delta} - V_{\delta-1} = -Q_1 \sum_{\delta-1}^{\delta} t + Q_2 \sum_{\delta-1}^{\delta} t + V_{\delta\delta} + V_{წაშ} - V_{აორ} \pm V_{მოწ.ფილ} \pm V_{შეუს.}, \quad (III.4.1)$$

სადაც V_{δ} – წყლის მოცულობა საანგარიშო პერიოდის ბოლოს; $V_{\delta-1}$ – წყლის მოცულობა საანგარიშო პერიოდის დასაწყისში; Q_1 და Q_2 – ზედა და ქვედა კვეთში წყლის საშუალო ხარჯები; $\sum_{\delta-1}^{\delta} t$ – დროის პერიოდები (წამებში); $V_{\delta\delta}$ – გვერდითი ჩამონადენიდან წყლის მოცულობა (მონაკვეთის პერიმეტრიდან); $V_{წაშ}$ – წყალსაცავის ზედაპირზე ნალექების მოცულობის რაოდენობა; $V_{აორ}$ – წყალსაცავის ზედაპირიდან აორთქლებული წყლის მოცულობა; $V_{მოწ.ფილ}$ – მიწისქვეშა წყლების ჩამონადენის ან ფილტრაციაზე დანაკარგების მოცულობა; $V_{შეუს.}$ – ბალანსის შეუსაბამობა.

მთის წყალსაცავის ზედაპირზე ატმოსფერული ნალექებისა და აორთქლების მნიშვნელობები პრაქტიკულად არ ცვლის წყლის ბალანსის მაჩვენებლებს, რაც განპირობებულია ზედაპირის მცირე ფართობით და განისაზღვრება მთის წყალსაცავის მნიშვნელოვანი სიღრმით.

მთის წყალსაცავების ჰიდროლოგიური მახასიათებლების სპეციფიკა.

მთის წყალსაცავების ექსპლუატაციის ჰიდროლოგიური ანგარიშების შემადგენლობაშია: ოროჰიდროგრაფია; კლიმატი; წყლის რეჟიმი.

მთის წყალსაცავის ჰიდროლოგიური დახასიათებისთვის საჭირო მასალა: ჰიდროლოგიური მონაცემები; საპროექტო კვეთებში წყლის ჩამონადენისა და ხარჯების მრუდები, მათი მერყეობისა და წლის შიდა განაწილება; საგაზაფხულო წყალუხვობის მაქსიმალური ხარჯები; წვიმისმიერი წყალმოვარდნების მაქსიმალური ხარჯები, საანგარიშო ჰიდროგრაფები; წყლის და მყარი ჩამონადენის მაქსიმალური მნიშვნელობები; წყალსაცავის წყლისა და ფილტრატების ჰიდროქიმია.

მთის წყალსაცავის ექსპლუატაციის პერიოდში ჰიდრომეტეოროლოგიური მომსახურების მონაცემები გრაფიკებისა და ცხრილების სახით:

გრაფიკები და სქემები - მდინარის აუზის, ჰიდროგრაფიული ქსელისა და დასახლებული პუნქტების, ჰიდროლოგიური და მეტეოროლოგიური სადგურების, მშენებარე და აშენებული ჰიდროკვანძების, წყლის ჩამონადენის გადანაწილების ტრასების და სხვ.; წყალშემკრები ფართობის ცვლილებების გრაფიკი; მდინარის გრძივი პროფილი; მეტეოროლოგიური ელემენტების (ტემპერატურა, ტენიანობა, რადიაცია და სხვ.) საშუალო და მაქსიმალური მნიშვნელობების გრაფიკები; ქარის ვარდების სქემები; მდინარის მრუდები: $Q=f(H)$, $W=f(H)$, $V_{წაშ}=f(H)$; მდინარის კალაპოტის ხორკლიანობის კოეფიციენტის ცვლილებების გრაფიკი; მდინარის მთელ

სიგრძეზე წლების მიხედვით გაერთიანებული დამახასიათებელი ჰიდროგრაფები; განსახილველ და ანალოგი პუნქტებზე მდინარის საშუალო წლიური და მაქსიმალური ხარჯების კორელაციური დამოკიდებულებების გრაფიკები; წყლის საშუალო წლიური ხარჯების ქრონოლოგიური გრაფიკები (არა ნაკლებ ბოლო 20 წლისა); წყლის მაქსიმალური და მინიმალური საშუალო წლიური ხარჯების უზრუნველყოფის მრუდები; წყალსაცავის ზედა და ქვედა ბიეფის კვეთებში წყლის ხარჯების მრუდები; წყალსაცავის რაიონში ჰიდრომეტეოროლოგიური ქსელის განლაგების სქემა.

საჭირო ცხრილების ნუსხა. ჰიდრომეტეოროლოგიური მონაცემების ცხრილები; წყლის ხარჯების საშუალო-თვიური, წლიური, მინიმალური და მაქსიმალური მონაცემები საანგარიშო კვეთებში (დაკვირვებების პერიოდში); წყლის რეტრანსფორმირებული ჩამონადენის ცხრილები; ჰიდროკვანძის ზედა ნაწილიდან და გვერდითი ჩამონადენიდან წყალდიდობებისა და წყალუხვობების ჰიდროგრაფების ცხრილები; მდინარის გაყინვის რეჟიმის მონაცემების ცხრილები; მდინარის მყარი ჩამონადენის (საშუალო წლიური და თვიური) მნიშვნელობების ცხრილები; წყალსაცავის არეალის ჰიდრომეტეოროლოგიური ქსელის ცხრილი.

მთის წყალსაცავების სარკის ფართობის მოცულობის განსაზღვრის სპეციფიკა: წყალსაცავის სარკის ფართობი და წყლის მოცულობა ინიშნება წყალსაცავის სარკის წინასწარ განსაზღვრული ნიშნულების მიხედვით. წყალსაცავის სარკის ზედაპირის ნიშნულებია: ფორსირებული შეტბორვის დონე (ფ.შ.დ.) – დონე, რომლის დაშვებაც შესაძლებელია მცირე დროის განმავლობაში კატასტროფული ხარჯების (წყალდიდობებისა და თავსხმა წვიმების) შემთხვევაში; ნორმალური შეტბორვის დონე (ნ.შ.დ.) – დონე, რომელზეც იანგარიშება სადაწნეო ნაგებობების ნორმალური მუშაობა; მკვდარი მოცულობის დონე (მ.მ.დ.) – წყალსაცავის უმდაბლესი დონე; სასარგებლო მოცულობა ($V_{სს}$) – წყალსაცავის ნშდ-სა და მმდ-ს შორის წყლის მოცულობა; მკვდარი მოცულობა ($V_{მდ}$) – წყალსაცავის მკვდარი მოცულობის დონის ქვემოთ წყლის მოცულობა; სრული მოცულობა ($V_{სრ}$) – წყალსაცავის სასარგებლო და მკვდარი მოცულობების ჯამი; რეზერვუარული მოცულობა ($V_{რეზ}$) – ნშდ-სა და ფშდ-ს შორის მოცულობა, რომელიც გამოიყენება წყალდიდობისა და წყალმოვარდნის დროს.

მთის წყალსაცავების გეო-ეკოლოგიური ფაქტორების რისკი

ბუნებრივი პროცესები, რომლებიც ვითარდება თანამედროვე ეტაპზე ლითონ-სფეროში, ჰიდროსფეროსა და ატმოსფეროში, თანაზომადია ანთროპოგენურ ზემოქმედებასთან. ეს ტენდენციები ძლიერდება მთის რეგიონებში.

მთის წყალსაცავების ექსპლუატაციისას ვითარდება გეოლოგიური და ფერდობული პროცესები; წყალსაცავის მიმდებარე ტერიტორიებზე – სეისმური მოვლენები; მიმდებარე ტერიტორიის შეტბორვით და დატბორვით გამოწვეული ახალი მიწისქვეშა წყალგაჯერებული ჰორიზონტების წარმოშობა და სხვ.

კვლევების შედეგების სისტემიზაციისა და განზოგადების საფუძველზე, სხვადასხვა ტიპის წყალსაცავებზე ფერდობული პროცესების განვითარებაზე

არსებითად განსხვავდება ძირითადი ფაქტორების მოქმედება (ცხრ. III.4.1).

ცხრილი III.4.1

ფერდობულ პროცესებზე მოქმედი ფაქტორების რანჟირება

რანჟირების ხარისხი	წყალსაცავების ტიპის მიხედვით ფაქტორების რანჟირება				აღნიშვნები	განზომილების ერთეული
	ვაკის წყ-ბი	მთისწინეთის წყ-ბი	მთის წყ-ბი	მაღალი მთის წყ-ბი		
1	ე	ე	ა	$V_{გად}$	E-ტალღების ენერჯია	ტმ
2	B	A	$V_{გად}$	A	A-წყლის დამუშავების ამპლიტუდა	მ
3	m	m	A	I	B-მეჩქრის სიგანე	მ
4	$K_{წარ}$	$K_{წარ}$	m	m	$m=ctg\alpha$ - ფერდის დახრილობა	-
5	$H_{ნაპ}$	B	I	E	$K_{წარ}$ -ქანების წარეცხვის კოეფიციენტი	მ ³ /ტ
6	A	$H_{ნაპ}$	$K_{წარ}$	$K_{წარ}$	I-გრუნტის წყლების გრადიენტი	-
7	$V_{გად}$	$V_{გად}$	$H_{ნაპ}$	$H_{ნაპ}$	$H_{ნაპ}$ – ნაპირის სიმაღლე	მ
8	I	I	B	B	$V_{გად}$ – წყლის კიდის გადაადგილების სიჩქარე დონის დამუშავების დროს	მ/დღელამეში

ამრიგად, მთის წყალსაცავების წყლის დონის ამპლიტუდის ფაქტორის ზემოქმედების მნიშვნელობა (A) – ბევრად მაღალია ამავე მაჩვენებელზე ვაკის წყალსაცავებისათვის.

პრობლემები, რომელიც ვითარდება მთის წყალსაცავების წყლის დონის დაწვევისას არის:

- მცირდება სარწყავი მიწების ფართობები, რომლებიც თვითდინებით ირწყვებოდა;
- მცირდება ჰიდროელექტროსადგურებით ენერჯიის გამომუშავება;
- მწყობრიდან გამოდის არსებული რეკრეაციული ობიექტები (პლაჟები, ნავსადგურები), წყალმიმწოდებელი და წყალგამყვანი სისტემები;
- იზრდება მდინარეების დაბინძურება, რადგან ირღვევა ჩამდინარე წყლების დაწმენდის და განზავების პირობები;
- წყლისგან გათავისებული მიწები, დალექვის გამო, ლამისებურ დანალექებში ბინძურდება ბიოგენური ელემენტებით;
- დეგრადაციას განიცდის წყლის ბიოცენოზი და იქთიოფაუნა.

პრობლემები, რომელიც ვითარდება წყალსაცავების წყლის დონის აწვევისას ექსპლუატაციის გაუთვალისწინებელი პირობებით:

- იცვლება მცენარეების წყალუზრუნველყოფის პირობები გრუნტის წყლების დონის აწვევის გამო;
- სანაპირო ფერდობებსა და მიწის კაშხლების ფილტრაციის საწინააღმდეგო

ელემენტების (ბირთვი, ეკრანი, პონური) გამომშრალ ნაპრალებში ვითარდება დეფორმაციები;

- ირღვევა მიწის მასივების სტრუქტურა ეროზიული ხრამების განვითარების გამო;
- იცვლება ბუნებრივი და ხელოვნური ხრამების ზედაპირის გატყიანება და სხვ.

წყლის დონის დაწვევის ან აწვევისას უარყოფითი პროცესების განვითარება მჭიდროდ არის დამოკიდებული წყლის დონის გადაადგილების სიჩქარეზე ($V_{გაღ}$), დამუშავების პრიზმის სიმაღლესა ($H_{დაბ}$) და ქანების კომპლექსის თავისებურებებზე.

მთის რეგიონებში წყალსაცავების აგებით გამოწვეული რისკ-ფაქტორების ანალიზის საფუძველზე დადგინდა ძირითადი ფაქტორი, რომელიც ხელს უწყობს ნეგატიური პროცესების განვითარებას, ეს არის წყალსაცავის წყლის დონის აწვევის (დაწვევის) გაუთვალისწინებელი რეჟიმი.

ბუნების დაზიანებების რისკის შეფასება პირველად იყო მოხსენებული 1997 წელს საერთაშორისო კონფერენციაზე, სადაც მონაწილეობდა საქართველოს, ამერიკის შეერთებული შტატების, უკრაინის, რუსეთის ფედერაციისა და აზერბაიჯანის მეცნიერებები (ცხრ. III.4.2) [Международная конференция... 1997].

ცხრილი III.4.2

რისკების ძირითადი ჯგუფები

№	კლასიფიკაციის მაჩვენებლები	რისკების ძირითადი ჯგუფები	
1	2	3	
1	რისკის გენეზისი	ბუნებრივი	ტექნოგენური
2	განვითარების სფერო	ლითოსფერო, ჰიდროსფერო, ატმოსფერო, ბიოსფერო,	საინჟინრო-გეოლოგიური, საინჟინრო-ჰიდროლოგიური, საინჟინრო-მეტეოროლოგიური, ეკოლოგიური, კომპლექსური
3	გავრცელების მასშტაბი	ლოკალური, რაიონული, რეგიონალური, სახელმწიფოებრივი, გლობალური	
4	ზემოქმედების დახასიათება	ხანმოკლე მოქმედების (ერთჯერადი, მრავალწლიური), პერმანენტული (მუდმივად მოქმედი)	
5	ზემოქმედების ფორმა	პირდაპირი, ირიბი, კომბინირებული, მეორადი	
6	ზემოქმედების გარემო	ეკონომიკური, სოციალური, ეკოლოგიური, კომბინირებული	
7	ზემოქმედების მასშტაბი	სუსტი, საშუალო, მნიშვნელოვანი, კატასტროფული	
8	შეფასების მაჩვენებლები	ტერიტორიის განადგურება, ჰა/წელი, კმ ² /წელი; სამეურნეო ობიექტების განადგურება, ლარი/წელ; მოსახლეობის მსხვერპლი, ადამ/წელ, ადამ/კმ ² ; ბიოსფეროს განადგურება, ინდივიდი/კმ ² , ტყის ფართობი, ჰა.	
9	წყალსაცავიანი სისტემების ექსპლუატაციისას რისკების სახეობანი	სეისმური, მეწყერული, აბრაზიული, ეროზიული, ჩამოქცევის და სხვ.	დაყვანილი სეისმურობა, წყალსაცავების ნაპირების გადამუშავება
		ჰიდროლოგიური	მდინარეული ჩამონადენის ცვლილებები
		ეკოლოგიური	მიწების შეტბორვა და დატბორვა
		ბიოლოგიური	ქანების თვისებების ცვლილებები

ტერიტორიების დაზიანების რისკის $R(H)$ შეფასება შეიძლება ჩაიწეროს ზოგადი განტოლების სახით:

$$R(H) = R_x(H)X, \quad (\text{III.4.2})$$

სადაც X შესაძლო დანაკარგების სიმკვრივის მაჩვენებელი. მაგალითად, წყალსაცავის ნაპირების გადამუშავების პროცესის განვითარებისას ძირითადი რისკებია: ეკონომიკური, სოციალური და ეკოლოგიური.

ეკონომიკური რისკი $R_y(H)$:

$$R_y(H) = R_t(H)d_{\text{ტერ}}, \quad (\text{III.4.3})$$

სადაც $d_{\text{ტერ}}$ არის შესაძლო მატერიალური დანაკარგები – ტერიტორიის, სამეურნეო და სამშენებლო ობიექტების (ლარი/ჰა, ლარი/კმ²) და სხვ.

სოციალური რისკი - $R_b(H)$ (მოსახლეობის დაზიანება):

$$R_b(H) = R_t(H)d_a, \quad (\text{III.4.4})$$

სადაც d_a არის მოსახლეობის სიმჭიდროვე (ადამ/კმ²).

ეკოლოგიური რისკი - $R_{\text{გ}}(H)$:

$$R_{\text{გ}}(H) = R_t(H)d_{\text{გ}}, \quad (\text{III.4.5})$$

სადაც $d_{\text{გ}}$ ცხოველთა ან მცენარეთა დაზიანების რაოდენობაა (რაოდენობა/კმ²).

მთის რეგიონებში წყალსაცავების ექსპლუატაცია განსაზღვრავს **ფიზიკა-გეოლოგიური** პროცესების ინტენსიფიკაციას. ეს პროცესები გამოწვეულია ქანების წყალგაჯერებით (კარსტი, მეწყერი, სუფოზია), ტალღებისა და დინებების ენერგეტიკული ზემოქმედებით (აბრაზია, ჩამოქცევა, ფერდების გამორეცხვა) და წყალსაცავის ჰიდროლოგიური ციკლით (წყლის დონის გადაადგილება).

მთის წყალსაცავების გეოლოგიური რისკი, რომელიც იწვევს ქანების შემადგენლობის მკვეთრ ცვლილებებს, ყველაზე მნიშვნელოვანი ფაქტორია სახიფათოს ფორმირებაში. გეოლოგიური რისკი განსაზღვრავს ეკონომიკურ, სოციალურ და ეკოლოგიურ რისკებს. წყალსაცავების აგებისა და მათი გარემოზე შესაძლო ზემოქმედება უნდა შეფასდეს სახელმწიფო დონეზე, რათა ავიცილოთ სახიფათო რისკები პროფილაქტიკის მეშვეობით და არა მათი შედეგების ლიკვიდაციით. პროფილაქტიკა ტარდება ბუნებრივ-გეოლოგიური შესაძლო რისკების პერმანენტული პროგნოზირებით, რისკების შეფასებითა და დამცავი ღონისძიებების ჩატარებით.

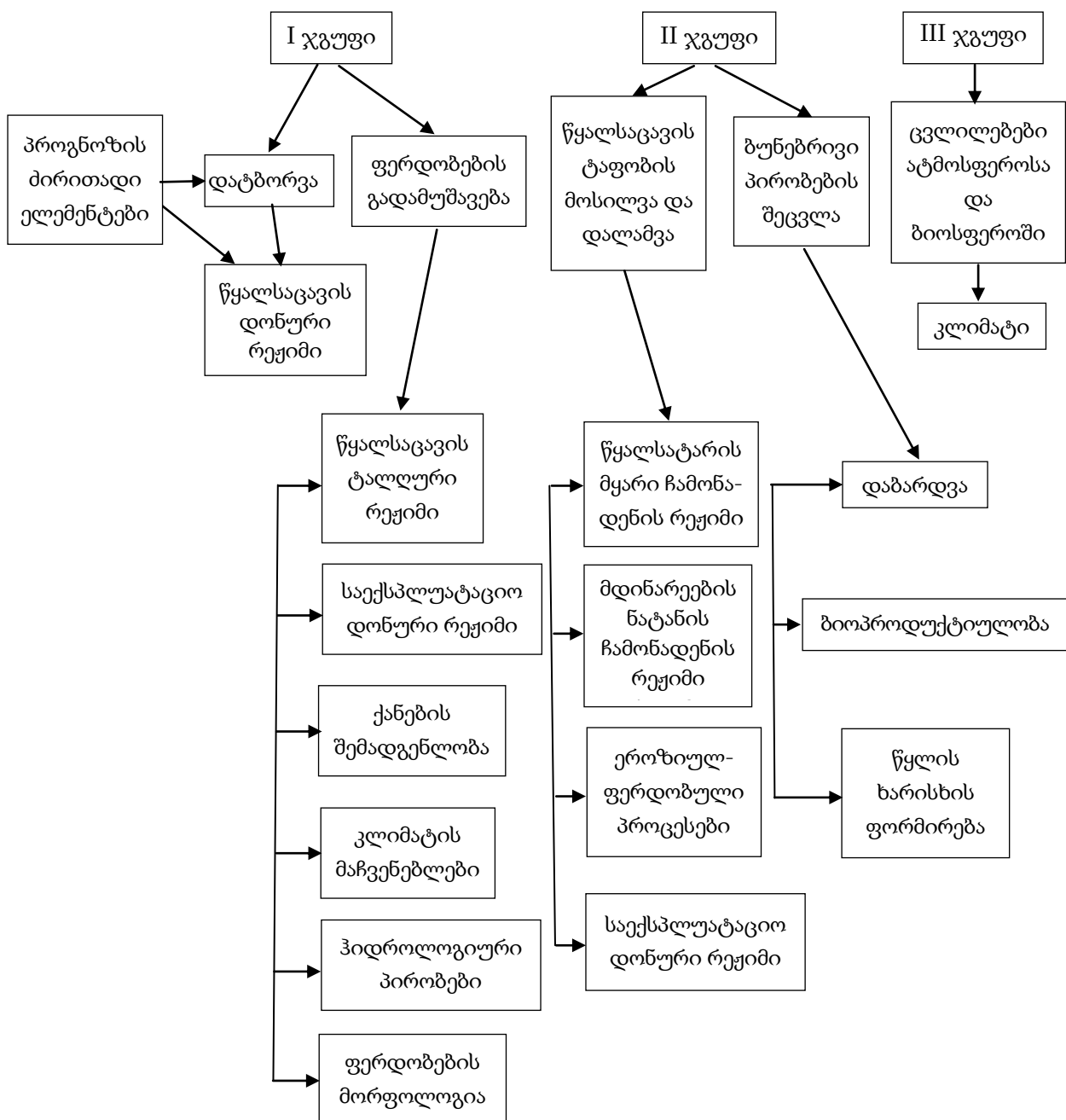
IV. მთის წყალსაცავების გარემოზე ზემოქმედების ზოგადი დებულებები, სპეციფიკა და პროგნოზირება

IV.1. „წყალსაცავი - გარემოს“ ურთიერთდამოკიდებულების ზოგადი დებულებები

„წყალსაცავები – გარემოს“ განვითარება მიმდინარეობს ორ ზონაში – წყალსაცავის ზედა და ქვედა ბიეფში (ცხრ. IV.I.1; IV.I.2).

ცხრილი IV.I.1

ზედა ბიეფში „წყალსაცავი - გარემოს“ სისტემის განვითარების ზოგადი სქემა

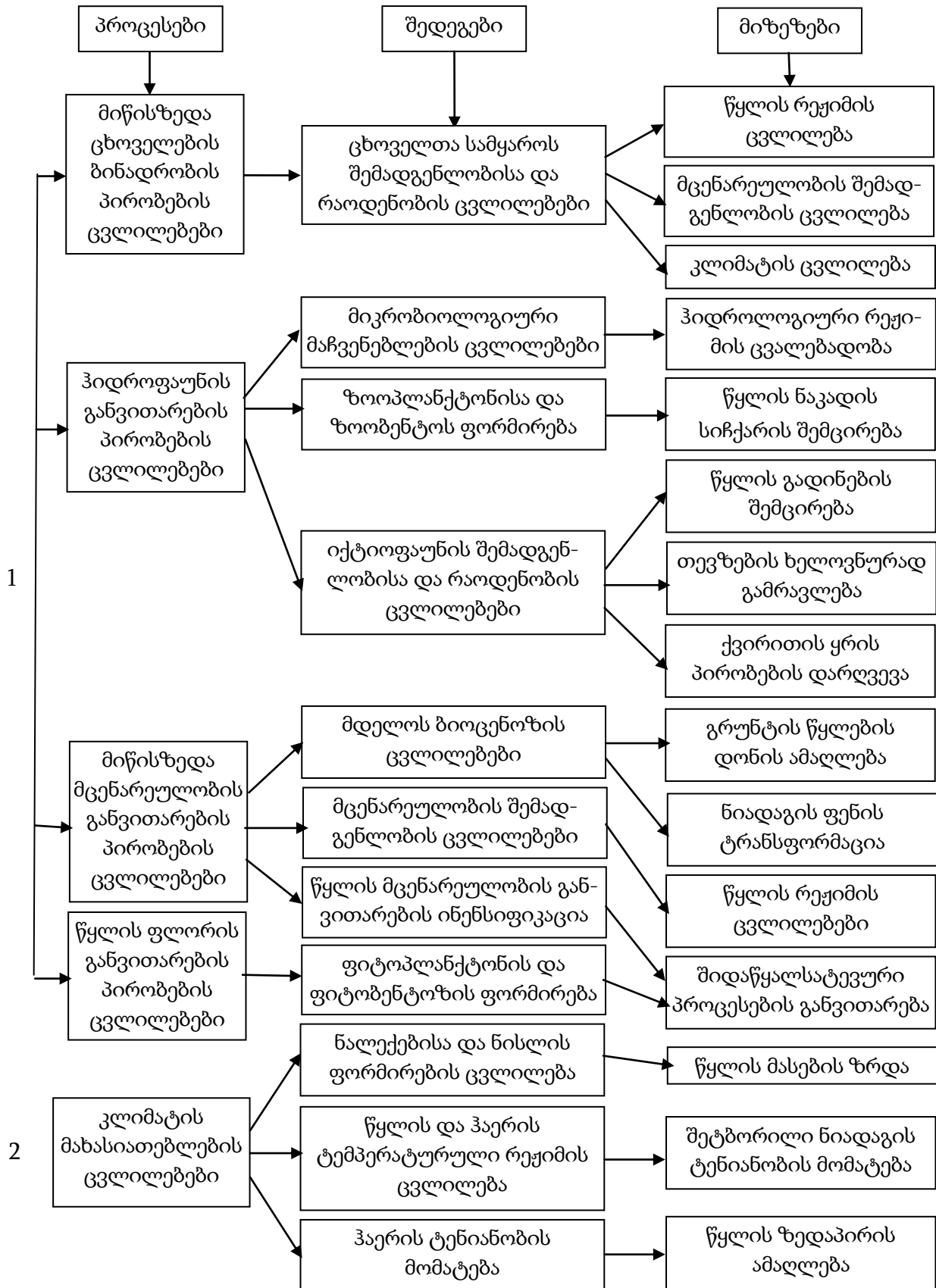


ქვედა ბიეფში „წყალსაცავი - გარემოს“ სისტემის განვითარების ზოგადი სქემა

ზემოქმედების ტიპი	ზემოქმედების შედეგები	
	დადებითი	უარყოფითი
1	2	3
1. კალაპოტის წარცხვა კაშხლის ქვედა ბიეფში და დონის დაწევა	მდინარის მეორადი შენაკადების გაქრობა, მდინარის კალაპოტის დაკლაკნილობის შემცირება.	დონის დაწევის გამო წყალმიმღებების მუშაობის პირობების გაუარესება. მდინარეზე მოწყობილი ხიდების საყრდენების გამორეცხვა. დაბალდაწნევიანი კაშხლების აგების საჭიროება. წყალგამშვები ნაგებობების შემდეგ ბიეფების შეუღლებების პირობების გაუარესება.
2. მაღალ ეროზიულ ნაპირებსა და მდინარის ხეობაში ახალ მონალექ მიწებს შორის ბალანსის დარღვევა		ნაპირების წარცხვის პროცესი გრძელდება და ძლიერდება, ხოლო აღდგენის პროცესი – ნელდება. ნატანის რაოდენობა მცირდება და წყალმოვარდნების ხარჯების გამო ხეობაში იკარგება მიწები.
3. წყალმოვარდნების პიკების შემცირება და წყალმცირობის ხარჯების ამალევა	ხეობის დაცვა დატბორვისაგან წყალმოვარდნების პერიოდში.	ხეობის დაბარდვა და მისი წყალგამტარიანობის შემცირება. მდინარის კალაპოტის მოსილვა გვერდითი შენაკადებიდან.
4. სოფლის მეურნეობის პროდუქციაზე და ეკოლოგიაზე ზემოქმედება	ტემპერატურის ცვალებადობა მცირდება, ხოლო მინიმალური ტემპერატურა – მაღლდება.	ჩამოტანილი ლამის რაოდენობა კლებულობს, რის გამოც ნიადაგის ნაყოფიერება მცირდება.

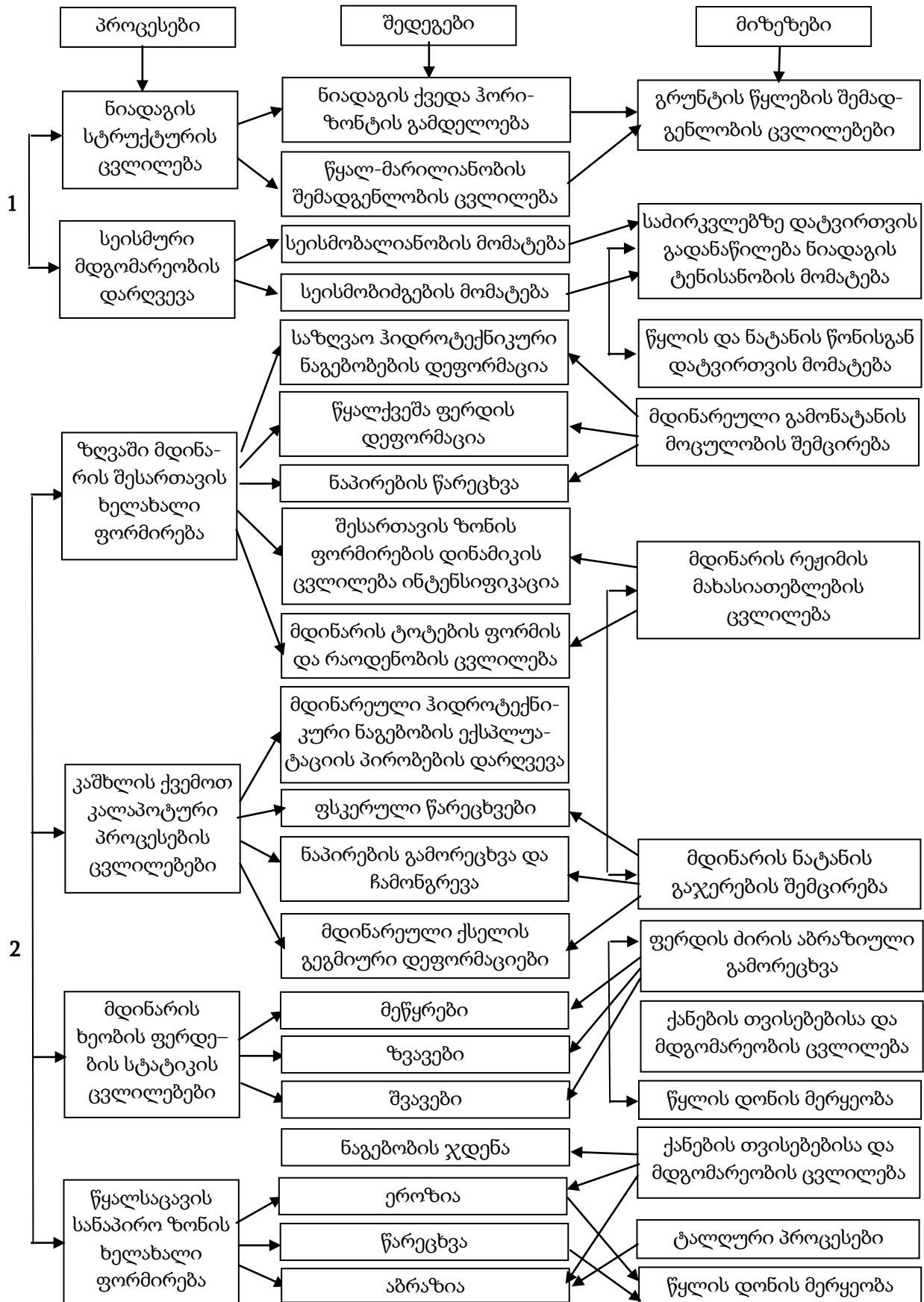
„წყალსაცავი - გარემოს“ ზოგადი ურთიერთმოქმედებები განისაზღვრება ცვლილებებით, რომელიც მიმდინარეობს ატმოსფეროში, ბიოსფეროში, ლითოსფეროსა და ჰიდროსფეროში (ცხრილი IV.1.3 - IV.1.6).

ატმოსფეროსა და ბიოსფეროში „წყალსაცავი – გარემოს“ სისტემის ფორმირების ზოგადი სქემა

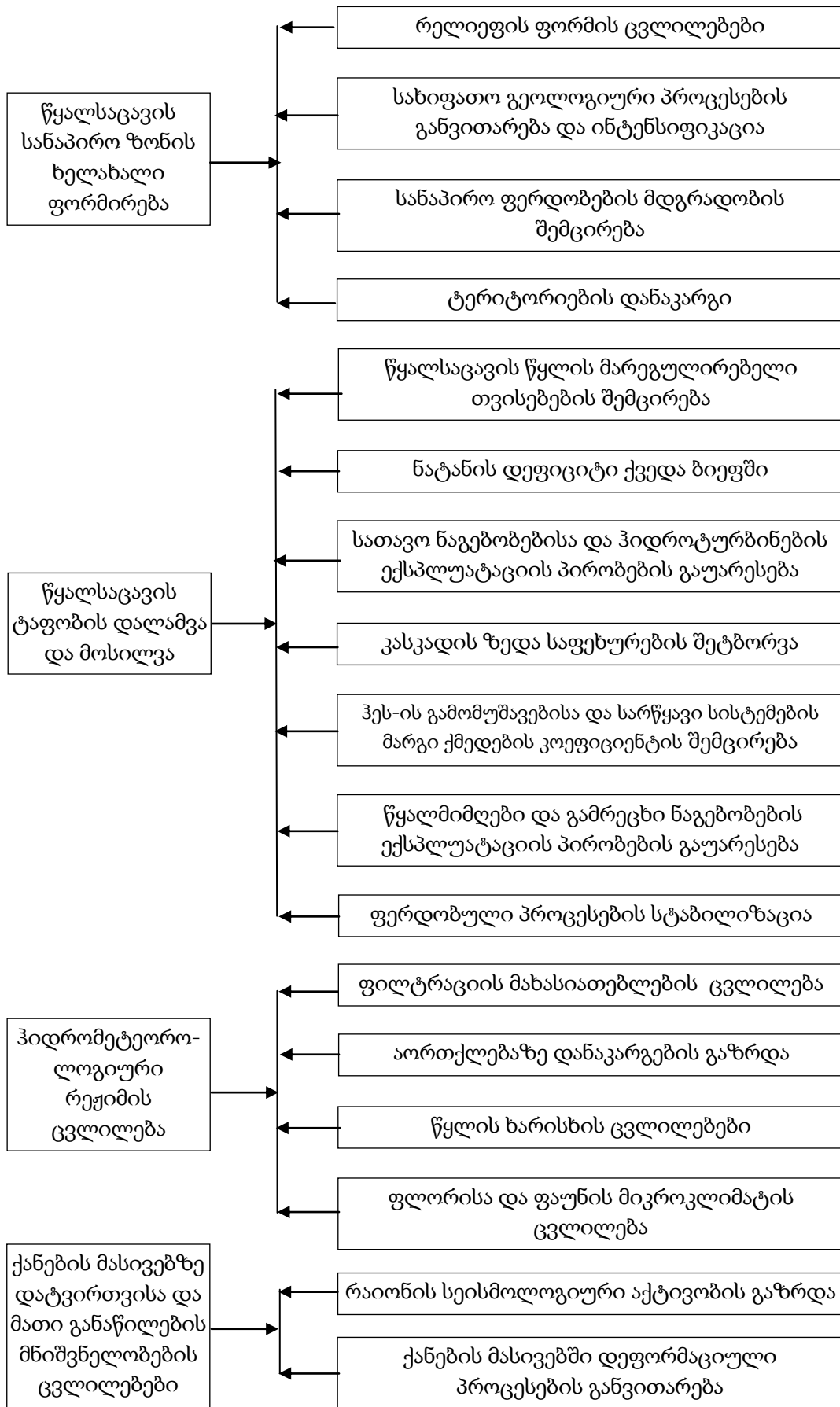


აღნიშვნები: 1. საერთო ცვლილებები ბიოსფეროში; 2. საერთო ცვლილებები ატმოსფეროში

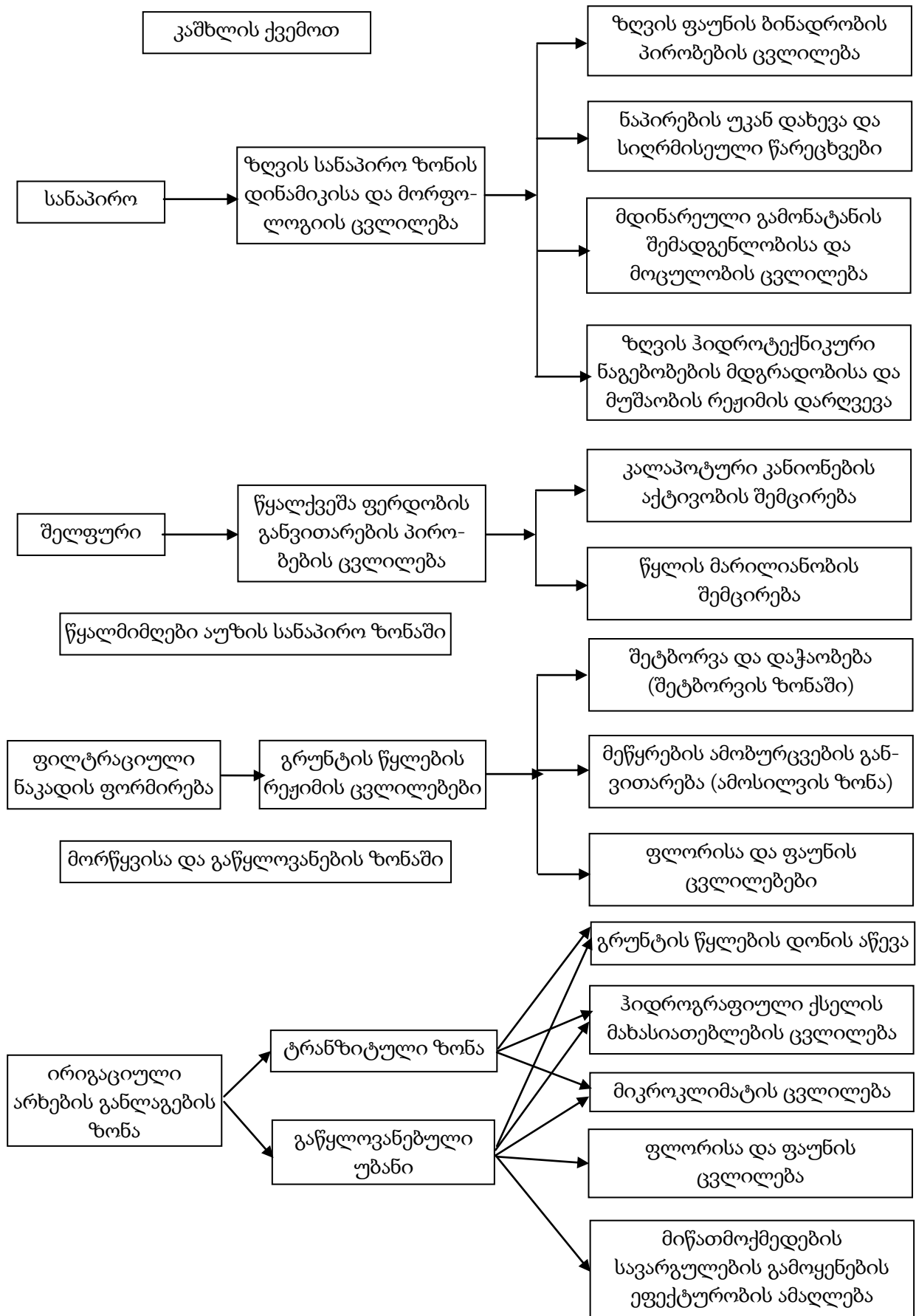
ლითოსფეროსა და ჰიდროსფეროში „წყალსაცავი-გარემოს“
სისტემის ფორმირების ზოგადი სქემა



„წყალსაცავი-გარემოს“ სისტემის საერთო მოქმედების ზოგადი სქემა



ჰიდროსფეროში „წყალსაცავი – გარემოს“ სისტემის ფორმირების ზოგადი სქემა



IV.2. მთის „წყალსაცავი-გარემოს“ ურთიერთდამოკიდებულების სპეციფიკა და პროგნოზირება

IV.2.1. მთის „წყალსაცავი-გარემოს“ ურთიერთდამოკიდებულების სპეციფიკა

მთის რეგიონებში წყალსაცავების აგების მიზანშეწონილობა განისაზღვრება მდინარეული წყლის ჩამონადენის ეფექტური გამოყენებით. ჩამოდინებული წყლის შეკავება ღრმა, მცირე ზედაპირის მქონე წყალსაცავებში განსაზღვრავს წყლის აორთქლებაზე უმნიშვნელო დანაკარგს – 1-3%, რაც წყალსამეურნეო ბალანსში შეიძლება პრაქტიკულად არ ჩაითვალოს.

მთის რეგიონებში შექმნილი წყალსაცავების ჰიდროლოგიური რეჟიმის ნეგატიური ზემოქმედება გარემოზე – ბევრად სუსტია (ცხრ. IV.2.1).

ცხრილი IV.2.1

მთის წყალსაცავების ჰიდროლოგიური რეჟიმით გამოწვეული ცვლილებების ზემოქმედება გარემოზე

ჰიდროლოგიური რეჟიმის ცვლილებები	გარემოზე ზემოქმედების შედეგები		ზემოქმედების ზონა
	პირდაპირი	არაპირდაპირი	
წყალსაცავში წყლის დონის ამაღლება	დატბორვა და შეტბორვა	ფლორისა და ფაუნის განვითარების პირობების ცვლილება	ნმდ-ის და 1,5 მ ნიშნულებს შორის
ნაკადის დინების სიჩქარის შემცირება	წყალცვლის შენელება	წყლის ხარისხის გაუარესება	წყალსაცავის ფსკერზე
	დალამვა და მოსილვა	წყალსაცავის მარეგულირებელი უნარის შემცირება	-,-
წყლის მასის მოცულობის გაზრდა	ფილტრაციის სიჩქარის გაზრდა		-,-
	თერმული რეჟიმისა და ყინულის საფარის ცვლილებები	მიკროკლიმატის ცვლილება	წყალსაცავის ირგვლივ 3 კმ-ის რადიუსით
	წყალსაცავის ფსკერზე დატვირთვის გაზრდა	დაყვანილი სეისმურობის შესაძლო განვითარება	გეოლოგიურ ზონაში
წყლის ნაკადის სტრუქტურის ცვლილებები	წყალსაცავის ზედაპირის დონის რხევები, ტალღური მოვლენებისა და დინებების განვითარება	ნაპირების სტატიკის დარღვევა	წყალსაცავის განლაგების ზონაში
მყარი ჩამონადენის მოცულობის შემცირება	წარეცხვები ქვედა ბიეფში, ტრანზიტულ და შესართავ ზონებში, დელტის დეგრადაცია	გარემოს განვითარების პირობებისა და ბუნებრივი ლანდშაფტის ფორმირების ცვლილება	კაშხლიდან მდინარის შესართავამდე
გაზაფხულსა და შემოდგომის წყალდიდობების პერიოდში წყალსაცავებში წყლის მოცულობის შეკავება	ჩამოდინებული წყლის მოცულობის ხარჯვა წყალმცირობისას	წყალმოხმარების პირობების გაუმჯობესება	კაშხლის ქვედა ბიეფში
	წყლის მაქსიმალური ხარჯების შემცირება	წყალდიდობების საფრთხის შემცირება	
		მდინარის ჭალების ათვისება	

მთის წყალსაცავები – ხარისხობრივად წყლის ახალი ობიექტებია, რომლებს-
თვისაც დამახასიათებელია სხვადასხვა პროცესების ფორმირება, რაც განაპირობებს
მათი პროგნოზირების განსაკუთრებულ მიდგომას.

ეგზოგენური (გარე) და ენდოგენური (შიდა) მიზეზებით გამოწვეული სხვადა-
სხვა პროცესების აქტივიზაციის მიუხედავად, მთისა და ვაკის წყალსაცავების
გარემოზე ზემოქმედება ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავდება.

მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავებზე **ფერდობული პროცესების** განვითარე-
ბაზე წყლის დონის დამუშავების ამპლიტუდის ფაქტორის წონითი მნიშვნელობა (A)
მაღალია, რაც განპირობებულია წყლის დონის დამუშავების (ამპლიტუდის $H > 20$ მ)
და შესაბამისად, წყლის დონის გადაადგილების სიჩქარის ($V_{დონ} > 0,5$ მ/დღეღამეში)
დიდი მნიშვნელობებით (ცხრ. IV.2.2).

ცხრილი IV.2.2

წყალსაცავებზე ფერდობულ პროცესებზე მოქმედი ფაქტორების რანჟირება

მოქმედი ფაქტორების რანჟირება	რანჟირება წყალსაცავის ტიპის მიხედვით			
	ვაკის	მთისწინეთის	მთის	მაღალი მთის
1	E	E	A	$V_{დონ}$
2	B	A	$V_{დონ}$	A
3	m	m	A	I
4	$K_{წარ}$	$K_{წარ}$	m	m
5	H	B	I	E
6	A	H	$K_{წარ}$	$K_{წარ}$
7	$V_{დონ}$	$V_{დონ}$	H	H
8	I	I	B	B

სადაც: E არის ტალღების ენერგია, ტმ; A – წყლის დონის დამუშავების ამპლიტუდა, მ;
 B – მეჩეჩის სიგანე, მ; $m = ctg\alpha$ – ფერდის დახრილობა; $K_{წარ}$ – ფერდობის ქანის წარეცხ-
ვის კოეფიციენტი, მ³/ტ; I – ფერდის გრუნტის წყლების გრადიენტი; H – ნაპირის სი-
მაღლე, მ; $V_{დონ}$ – წყლის დონის გადაადგილების სიჩქარე, მ/დღეღამეში.

მთის წყალსაცავებზე წყლის დონის დამუშავების ამპლიტუდისა (A) და გადა-
ადგილების სიჩქარის ($V_{დონ}$) მაღალი მნიშვნელობები განაპირობებენ:

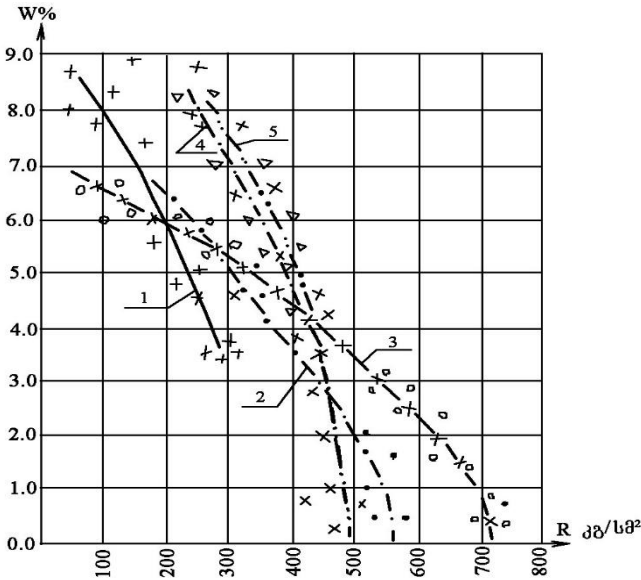
– გრუნტის წყალგაჯერებისა და გამოშრობის გამო, ნაპირების გრუნტის თვისე-
ბების ცვლილებას დროში; ნაპირისა და წყლის ურთიერთმოქმედების ზონის გაფარ-
თობას; ფერდობების სტატიკური მდგრადობის არახელსაყრელი პირობების განვი-
თარებას, რაც განპირობებულია ქანების „შეტივტივებით“ წყლის დონის ამაღლებისას
და „დამძიმებით“ – დონის დაწვევისას; აკუმულაციური მეჩეჩების არარსებობას.

ჩამოთვლილი პირობები იწვევს გამოფიტვის, მეწყრული და ჩამოქცევის პრო-
ცესების ინტენსივობას; შესაბამისად, იცვლება ნაპირების სხვადასხვა გენეტიკური
ტიპის თანაფარდობა წყლის დონის დამუშავებისა და ტალღური ღელვის
მახასიათებლებს შორის.

მთის წყალსაცავებზე წყლის დონის ცვალებადობის დროს წყალსაცავში შეიმჩ-
ნევა ქანის სიმტკიცის კლება. ქანის მდგომარეობის ხარისხი განისაზღვრება მისი

შემადგენლობით, სტრუქტურით, ნაპრალიანობით, გამოფიტულობით. გეოლოგიური პროცესების განვითარება დამოკიდებულია როგორც ენდოგენურ (შიდა), ისე ეგზოგენურ (გარე) პროცესებზე.

დაცემენტებული ჯდომადი ქანის (კონგლომერატი, ქვიშაქვა, ალევროლიტი, არგილიტი) შერბილების კოეფიციენტის მნიშვნელობა უფრო ძლიერ კლებულობს, ვიდრე მეტი შემცველობის (თიხა-ცემენტი) მაღალი ფორიანობის დროს (ნახ. IV.2.1).



ნახ. IV.2.1. ქვიშაქვების სიმტკიცის მახასიათებლების ცვალებადობა ტენიანობასთან დამოკიდებულებით.
 1 - გამოფიტული გრაუვაკული ქვიშაქვები; 2 - გამოუფიტავი გრაუვაკული ქვიშაქვები; 3 - გრაუვაკული ქვიშაქვები; 4 - გამოფიტული არკოზული ქვიშაქვები; 5 - გამოუფიტავი არკოზული ქვიშაქვები.

მთის წყალსაცავის მიმდებარე ტერიტორიაზე გეოდინამიკური პროცესები უფრო სწრაფად ვითარდება. ეს მდგომარეობა უფრო რთულდება გეოლოგიური პროცესებით, რომლებიც განპირობებულია წყალსაცავში წყლის დონის პერიოდული ცვალებადობით [Гогელიანი Л.Д., 2000; ლუტიძე პ., 1997; 2000].

მსოფლიოს ჰიდრომშენებლობაში ცნობილია მთის წყალსაცავებით გამოწვეული სეისმური მოვლენები (ე.წ. „ადრული სეისმურობა“) ცხრ. IV.2.3.

ცხრილი IV.2.3

მსოფლიოს წყალსაცავების შექმნის შედეგად მიწისძვრების წარმოქმნა

კაშხალი (წყალსაცავი)	მდინარე	ქვეყანა	წყ-ის აგების წელი (ნ.შ.დ.-მდე)	წყ-ის მოცულობა, კმ³	წყალსაცავის მაქსიმალური სიღრმე, მ	მიწისძვრის თარიღი	მაგნიტუდა
1	2	3	4	5	6	7	8
კონია (შივა-ისაღარი)	კონია	ინდოეთი	1961	2,8	100	10.12.1967	7,0
კრემასტა	აქელოსი	საბერძნეთი	1965	4,8	120	24.01.1966	6,3
კასირაკონი	კრიკელიო-ტიკოს	საბერძნეთი	1969	1,0	100	1969	6,3
კარიბა	ზამბეზი	ზამბია-ზიმბაბვე	1958–1963	175,0	122	23.09.1963	6,25
სინფინიანი	სინფინიანი	ჩინეთი	1961	13,9	105	1961	6,1

ცხრილი IV.2.3-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8
ოროვილი	ფეტერი	აშშ	1968	4,4	204	01,08,1975	5,7
უარაგამბა	უარაგამბა	ავსტრალია	1960	2,0	104	09,03,1973	5,4
აკოსომბო (ვოლტა)	ვოლტა	განა	1964-1967	165,0	109	11,1964	5,3
პორტო კოლუმბია	რიუ-გრანდე	ბრაზილია	1973	1,5	50	24,02,1974	5,1
ვოლტა გრანდე	რიუ-გრანდე	ბრაზილია	1973	2,3	31	24,02,1974	5,1
ბენმორი	უაიტაკვი	ახალი ზელანდია	1963-1966	2,0	96	07,07,1968	5,0
ეუკუმბენე	ეუკუმბენე	ავსტრალია	1958	4,8	106	18,05,1959	5,0
ჰუვერი (მიდი)	კოლორადო	აშშ	1935-1936	36,7	191	10,03,1940	5,0
მონტეინარი	დრაკი	საფრანგეთი	1962	0,3	125	25,04,1963	4,9
ბაინა-ბაშტა	დრინა	იუგოსლავია	1965-1966	0,3	80	03,07,1967	4,8
კაჟურუ	პარა	ბრაზილია	1953-1959	0,2	21	23,01,1972	4,7
კანელიესი	ნოგუერა	ესპანეთი	1960	0,7	132	09,01,1962	4,7
სეფიდრუდი	სეფიდრუდი	ირანი	1962	1,8	80	02,08,1968	4,7
პუკაკვი	პუკაკვი	ახალი ზელანდია	1976	10,0	108	1978	4,6
ნურეკი	ვანში	ტაჯიკეთი	1972-1984	11,0	285	27,11,1972	4,5
კაფუე-გოჯი	კაფუე	ზამბია	1973-1978	5,0	62	13,05,1978	4,2
მანიკუაგან-3	მანიკუაგანი	კანადა	1975	10,4	96	23,10,1975	4,1
ჯვრის	ენგური	საქართველო	1957	0,23	100	12.1979	4,4

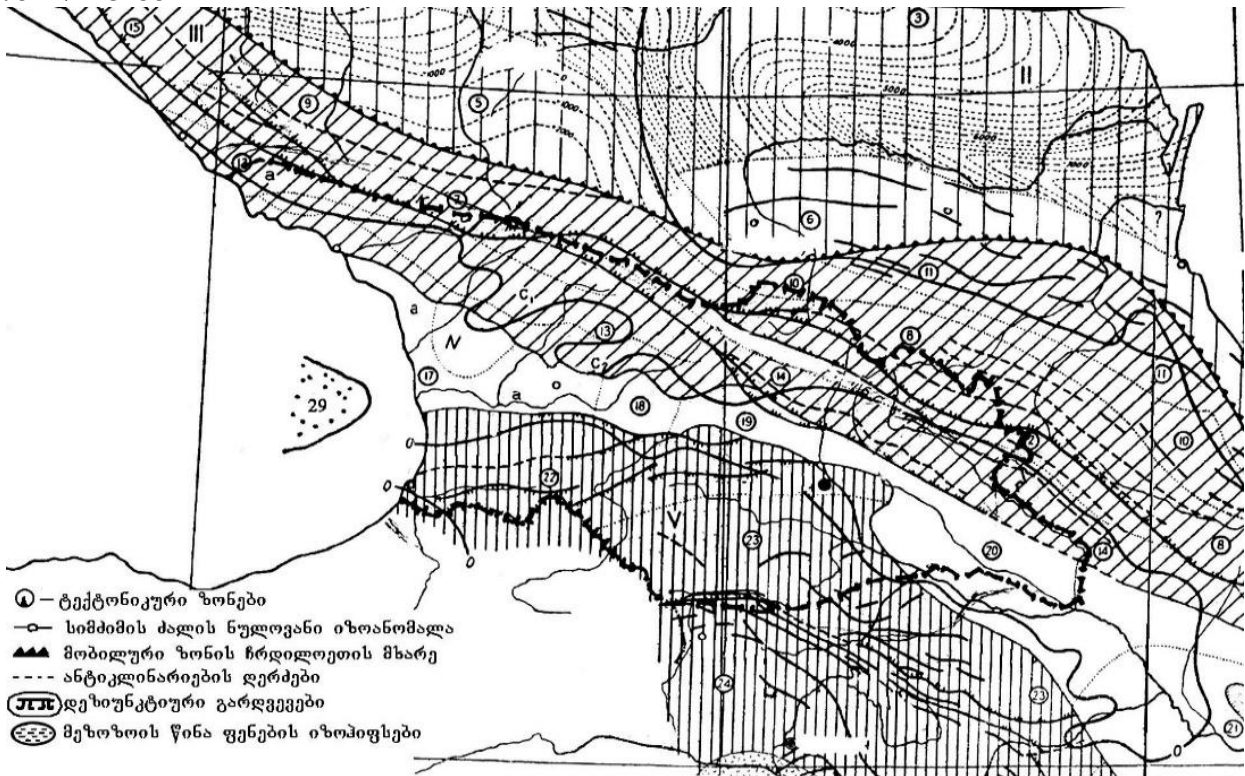
ტექტონიკური მდგომარეობის ცვლილებები დაკავშირებულია ჰიდროკვანძის ტერიტორიის გეოლოგიური აგებულების თავისებურებებთან. წყალსაცავით გამოწვეული სეისმური პროცესების განვითარება დამახასიათებელია მაღალდაწნევიანი და მნიშვნელოვანი მოცულობის წყალსაცავებისათვის.

ექსპლუატაციის რეჟიმის დარღვევის პირობებში განვითარებული დეფორმაციები, რომლებიც დაფიქსირებულია მთელ რიგ წყალსაცავებზე, მოიცავს: კაშხლის ფილტრაციის საწინააღმდეგო ელემენტებში (გული, ეკრანი, პონური) გამოშრობის ნაპრალების წარმოშობას; სადამკვირვებლო ქსელის პიეზომეტრული ჭაბურღილების დეფორმაციას; კაშხლის ტანსა და ჰიდროკვანძის ნაგებობებს შორის სიცარიელების წარმოშობას; კაშხლის ტანისა და წყალსაცავის ფერდობების შეუღლების გარღვევას.

ტერიტორიის **სეისმური ცვლილება**, რომელიც თან ახლავს წყალსაცავების შექმნას, სხვადასხვანაირად ფასდება: მიწისძვრის დამოკიდებულება წყალსაცავის მოცულობასთან შეფარდებით, სეისმური მდგომარეობის ცვლილება წყალსაცავის შევსებისა და ექსპლუატაციის პერიოდში.

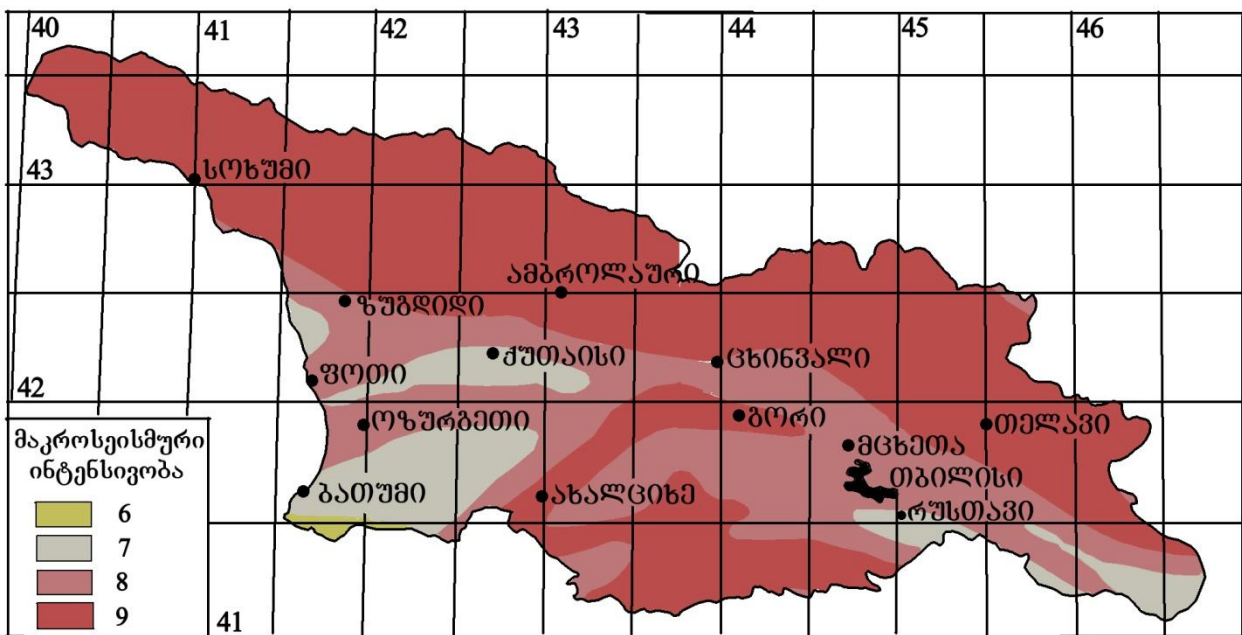
საქართველოს ტერიტორიაზე განლაგებულია დიდი კავკასიონის ანტიკლინარული რიონი-მტკვრის დეპრესიის მთათაშორისი ჩაღრმავებისა და მცირე კავკასიონის ანტიკლინარული რაიონები (ნახ. IV.2.2). სეისმური პირობების მიხედვით, საქართველოს ტერიტორია მდებარეობს 6-9 ბალიან ზონაში (ნახ. IV.2.3). 9 ბალიან ზონაში განლაგებულია ჯვრის, ალგეთის, ჟინვალის, ნადარბაზევის, ნარეკვავის, სიონის, შაორის, ზონკარის, დმანისის, პანტიანის, ხრამის, მთისძირისა და ზრესის

წყალსაცავები.



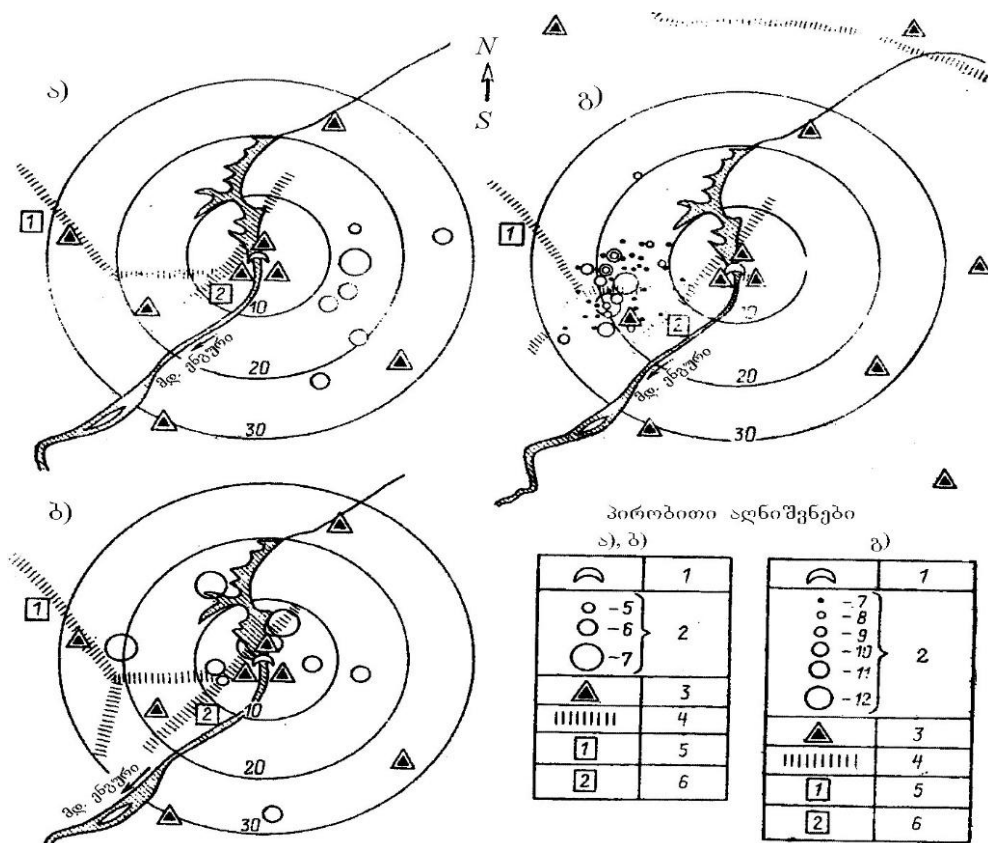
ნახ. IV.2.2. საქართველოს სტრუქტურულ-ტექტონიკური დარაიონების რუკა

აღნიშვნები: II — წინა კავკასიონი; III — დიდი კავკასიონის ანტიკლინარიუმი; 10 — მთავარი ქედის ჩრდილოეთის ფერდის აღმოსავლეთის ზონა; 13 — მთავარი ქედის სამხრეთის ფერდის დასავლეთის ზონა: a — აფხაზეთის; ნ — სვანეთის; ხ — სოხუმი-დუშეთის (ჩრდილოეთის); c — კახეთის ზონა; IV — რიონი-მტკვრის დებრესიის ზონები: 17 — კოლხეთის ზონა (— კოლხეთის ველის და — ცენტრალური სინკლინარი); 18 — ძირულის ზონა; 19 — მოლასოვის ზონა; 20 — საგარეჯო-შირაქი-აჯინაურის ზონა; V — მცირე კავკასიონის ზონები: 22 — აჭარა-თრიალეთის ზონა; 23 — სომხეთი-განჯიანი-ყარაბაღის ზონა; VII — ამაღლებები.



ნახ. IV.2.3. საქართველოს ტერიტორიის სეისმური ზონირება

ენგურის (ჯვრის) წყალსაცავზე დაკვირვებათა ანალიზისას აღმოჩნდა, რომ წყლის დონის 130 მ-მდე აწევისას მიწისძვრათა საერთო რაოდენობა ჰიდროკვანძის რაიონში, ფონურ სეისმურობასთან შედარებით, ამაღლდა მცირებადიანობის პირობებში (4 ბალამდე). წყალსაცავებით გამოწვეული სეისმურობის პროცესი შესწავლილ იქნა სეისმოდაზვერვის დაკვირვებებით წყალქვეშა გეოფიზიკური პროფილის აგებით [Чоговадзе Г.Н., Мchedlishvili И.М., Ломов И.Е., 1987; იორდანიშვილი კ., იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., კანდელაკი ნ., ბილანიშვილი ლ., 2022]. 1978 წლის აპრილში, როდესაც წყალსაცავი აივსო ∇ 345 მ ნიშნულამდე (სიღრმე – 105 მ), სეისმური რეჟიმი გააქტიურდა (ნახ. IV.2.4).



ნახ. IV.2.4. სეისმური ბიძგების ეპიცენტრების რუკა ენგურის (ჯვრის) წყალსაცავის თალოვანი კაშხლის 30 კმ-იან რადიუსში

ა) წყალსაცავის შევსების საწყისი პერიოდი, აპრილი, 1978 წ.; ბ) იგივე – მაისი, 1978 წ.; გ) ერთი წლის შემდეგ წყალსაცავის პირველი რიგის შევსებიდან, 21-31 დეკემბერი, 1979 წ.; 1 – თალოვანი კაშხალი; 2 – სხვადასხვა კლასის მიწისძვრების ეპიცენტრები; 3 – სეისმური სადგურები; 4 – სეისმოგენერირებადი სტრუქტურები; 5 – ტყვარჩელის ფლექსურა; 6 – ინგირის რღვევა; 10, 20, 30 – კაშხლიდან დაცილების მანძილები (კმ)

დატბორვის, შეტბორვისა და ფილტრაციის პროცესები

ტერიტორიების დატბორვის ზონა მოთავსებულია მდინარეში წყლის წყალმცირე დონიდან წყალსაცავის ნშდ ნიშნულამდე. წლის განმავლობაში, მთის რეგიონის პირობებში, მუდმივი დატბორვა მნიშვნელოვან საზღვრებში იცვლება და ნშდ-ს ნიშნულზე სტაბილურდება წელიწადში არა უმეტეს 30-60 დღისა. მთის რეგიონებში დატბორვის შედეგად მიწების დანაკარგი მნიშვნელოვნად ნაკლებია, ვიდრე ვაკის

რეგიონებში. თუ ვაკის წყალსატევებში 1 კმ² ფართობის ტერიტორიის დატბორვისას საშუალოდ აკუმულირდება 4 მლნ მ³-მდე მდინარის ჩამონადენი, მთის რეგიონებში ეს მაჩვენებელი 45 მლნ მ³-მდე აღწევს (ცხრ. IV.2.4).

ცხრილი IV.2.4

საქართველოს წყალსაცავების ეფექტურობის მაჩვენებლები

№	წყალსაცავი	ადგილმდებარეობა (რაიონი)	მდინარე	სრული მოცულობა, V _{სრ} , მლნ მ ³	დატბორვის ფართობი, (მ.შ. სს სავარგულები), S/სადაზ. კმ ²	წყალმარბობის ფართობი, F _{წყალმ.} , კმ ²	დატბორვა			წყალმომარბობის ფართობის დატბორვის %
							1 მლნ მ ³ მოცულობის შესაქმნელად V _{სრ} /სადაზ., მლნ მ ³ /კმ ²	1 კმ ² სავარგულების მოსარწყვად, S _{მოსარწყვ.} /სადაზ.	1 მლნ კვტსტ ენერჯის გამომუშავების უზრუნველსაყოფად, W _{გამ/სადაზ.}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ჟინვალის	დუშეთის	არაგვი	520,0	11,60/5,20	0,08	44,82	32,85	43,10	0,75
2	სიონის	თიანეთის	იორი	325,0	11,40/3,90	0,05	28,47	46,84	9,21	3,73
3	ხრამის	წალკის	ხრამი	312,0	34,0/25,0	2,896	9,18	0,048	6,38	3,23
4	თბილისის	ქ. თბილისი	იორი	308,0	12,50/-	0,66	24,64	12,00	-	-
5	დაღის მთის	დედოფლის-წყაროს	იორი	140,0	15,01/-	0,05	9,33	4,00	-	0,70
6	ალგეთის	თეთრიწყაროს	ალგეთი	65,0	2,50	0,06	26,00	58,00	-	0,77
7	ჯანდარის	გარდაბნის	გარდაბნის მ.ა.	52,0	12,50	2,70	4,16	6,00	-	-
8	პატარა ლიახვის	ცხინვალის	ლიახვის	40,0	1,40	0,20	28,57	150,00	-	0,52
9	წყალსაცავები V _{სრ} =40±10 მლნ მ ³	სამი წყალსაცავი	მდ. მტკვრის აუზი	32,0	4,65	-	6,88	39,78	4,44	-
10	წყალსაცავები V _{სრ} =10±1 მლნ მ ³	თექვსმეტი წყალსაცავი	მდ. მტკვრის აუზი	47,86	11,61	-	4,12	1,72	-	-
11	წყალსაცავები V _{სრ} <1 მლნ მ ³	ცხრამეტი წყალსაცავი	მდ. მტკვრის აუზი	2,21	11,38	-	1,60	1,16	-	-
სულ მდ. მტკვრის აუზი (აღმოსავლეთ საქართველო)				1834,07	118,54/34,1	7,21	საშ. 14,47	საშ. 14,94	საშ. 8,63	საშ. 0,354
1	ჯვრის	წალენჯიხის	ენგური	1090,0	13,50/1,46	0,16	80,74	-	309,63	0,425
2	გალის	გალის	ენგური, ერისწყალი	145,0	8,0/-	0,10	18,13	-	117,50	0,045
სულ მდ. ენგურის აუზი				1235,5	21,50/1,46	0,26	50,35	-	238,14	0,52
3	შაორის	ამბროლაურის	შარაულა	90,0	13,20/-	1,00	6,89	-	9,09	10,50
4	ტყიბულის	ჩხარის	ტყიბული	84,0	11,50/-	1,72	7,30	-	13,13	0,94
5	გუმათის	წყალტუბოს	რიონი	39,0	1,40/-	0,04	16,25	-	67,92	0,065
6	წყალსაცავები V _{სრ} <40მლნ მ ³	სამი წყალსაცავი	რიონი	41,10	6,77/-	0,76	6,07	0,33	176,96	-
სულ მდ. რიონის აუზი				254,10	32,87	3,52	საშ. 7,73	საშ. 0,33	საშ. 49,65	საშ. 0,00007
სულ დასავლეთ საქართველოში				1489,0	54,37/72,92	3,78	საშ. 27,39	-	საშ. 124,99	საშ. 0,166
სულ საქართველოში				3323,1	172,9/37,0	10,99	საშ. 19,12	საშ. 19,22	საშ. 16,87	საშ. 0,248

ენგურის მიწისძვრების მაკროსეისმური ენერგია მთლიანად თავსდება სეისმური აქტიურობის იმ შეფასებაში, რომელიც მიღებული იყო ენგურის წყალსაცავის დაპროექტებისას (ფონური სეისმურობა შეფასებული იყო 8 ბალად). წყალსაცავის შევსებამ მხოლოდ მოახლოვა მიწისძვრების ინიცირება, რაც მომზადებული იყო რაიონის ტექტონიკური განვითარების წინა პერიოდში. საქართველოს სხვა მსხვილ და ღრმა წყალსაცავებზე მათ მიერ გამოწვეული მიწისძვრის პროცესები არაა შესწავლილი.

დღეისათვის ძნელია ცალსახად აიხსნას სეისმური აქტივიზაციის ბუნება დიდი სიღრმისა და მოცულობის წყალსაცავების შექმნასთან კავშირში. ნათელია, რომ ის დაკავშირებულია ქანების დამაბულობის ცვლილებასთან, დამაბულობის კონცენტრაციასთან რღვევის ზონაში, რომელიც წარმოიშობა წყალსაცავის შექმნით განპირობებული დატვირთვის ზემოქმედებით, მიწისქვეშა წყლების მზარდი ჰიდროსტატიკური დაწნევით, ქანების თბური რეჟიმის ცვლილებით და ა.შ.

მიწისქვეშა წყლების **შეტბორვის** შეფასებისას აუცილებელია მათი კვებისა და ჩამონადენის პირობების განსაზღვრა ბუნებრივ პირობებში და წყალსაცავის ექსპლუატაციაში შესვლის შემდეგ; ასევე აუცილებელია რეგიონის კლიმატური დახასიათება. ამ ასპექტში, წყალსაცავში წყლის დონის მერყეობა არსებით გავლენას ახდენს წყალგამტარი ჰორიზონტების დონეებზე და საერთო პროცესის დინამიკაზე.

წყალსაცავის შექმნისას, მდინარეში წყლის შეტბორვის გამო, გრუნტის წყლების დონე მატულობს იმ ნიშნულამდე, რომლის დროსაც წყალი შეიძლება ჩაედინოს ისევ წყალსაცავში. გრუნტის წყლების დონის აწევა საკმაოდ ნელი და ცვალებადია. ფორმირების ხანგრძლივობა შეიძლება გრძელდებოდეს რამდენიმე თვიდან რამდენიმე წლამდე, განსაკუთრებით, წყალსაცავში წყლის დონის მნიშვნელოვანი ცვლილებისას. წყლის დონის დამუშავება იწვევს წყალსაცავში გრუნტის წყლების დონის დაწევას, რაც გრძელდება მანამ, სანამ არ დაიწყება წყლის დონის ახალი აწევა წყალსაცავში. მთის წყალსაცავებში წყლის დონის მნიშვნელოვანი სიჩქარით გადაადგილების გამო გრუნტის წყლების დონის ცვლილება ჩამორჩება წყალსაცავის წყლის დონის გადაადგილებას, რაც იწვევს მიმდებარე ტერიტორიების გაწყლოვანებას. გრუნტის წყლების შეტბორვის ზონის სიგანე შეიძლება შეიცვალოს რამდენიმე ათეული კილომეტრის ფარგლებში.

მიწისქვეშა წყლების შეტბორვის უდიდესი სიმაღლე აღინიშნება წყალსაცავის კაშხალთან და თანდათან მცირდება მის სათავესთან. ასევე თანდათან ვიწროვდება შეტბორვის გავრცელების ზონა.

გრუნტის წყლების შეტბორვის სიჩქარე და მისი მოცულობა დამოკიდებულია ქანების ფილტრაციულ თვისებებზე, მათი წყლით გაჯერების ხარისხზე, მდინარეში წყლის შეტბორვის სიმაღლეზე და წყალსაცავის წყლის დონის რეჟიმზე. გრუნტის წყლების დონის აწევის სიჩქარე და მისი გავრცელების სიდიდე, ძირითადად, განისაზღვრება გეოლოგიური სიტუაციით.

მთის წყალსაცავების ფსკერიდან **ფილტრაცია** დამოკიდებულია გეოლოგიურ პირობებსა და წყალსაცავის წყლის დონის რეჟიმზე.

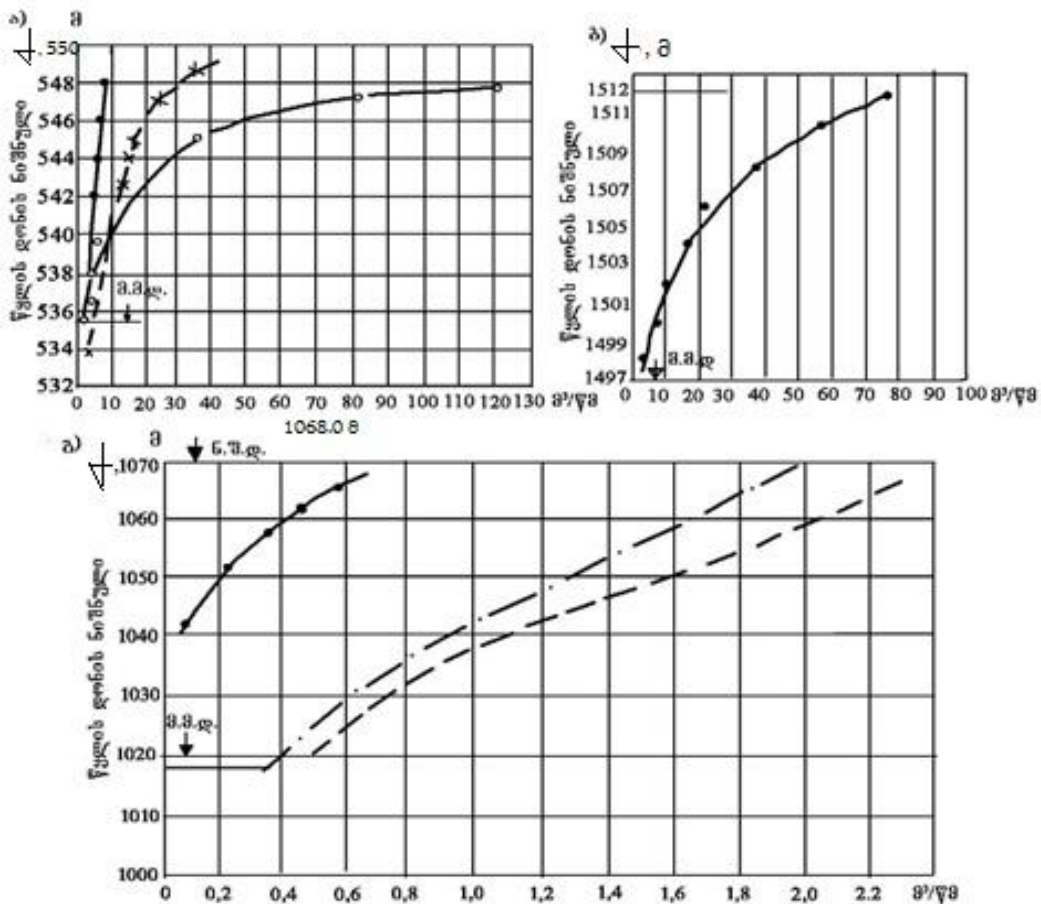
დაკვირვებების თანახმად, წყალსაცავში წყლის დონის მნიშვნელოვანი მერყეობისას ფილტრაციის განვითარება არათანაბარი ხასიათისაა და შეიძლება გავრცელდეს რამდენიმე ათეული კილომეტრის მანძილზე.

წყალსაცავის ავსებისას ფილტრაციული ხარჯი შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ფორმულით:

$$q_{\text{ფ}} = q_0 + 2h_0 K_{\text{ფ}} \bar{V} \sqrt{tma}, \quad (\text{IV.2.1})$$

სადაც h_0 – გრუნტის წყლების საწყისი დონეა; m – გრუნტის ფენის სიმძლავრის საშუალო მნიშვნელობა; $a = K_{\text{ფ}} m / \mu$; μ – წყლის გაცემის კოეფიციენტი; $K_{\text{ფ}}$ – ფილტრაციის კოეფიციენტი; t – დრო.

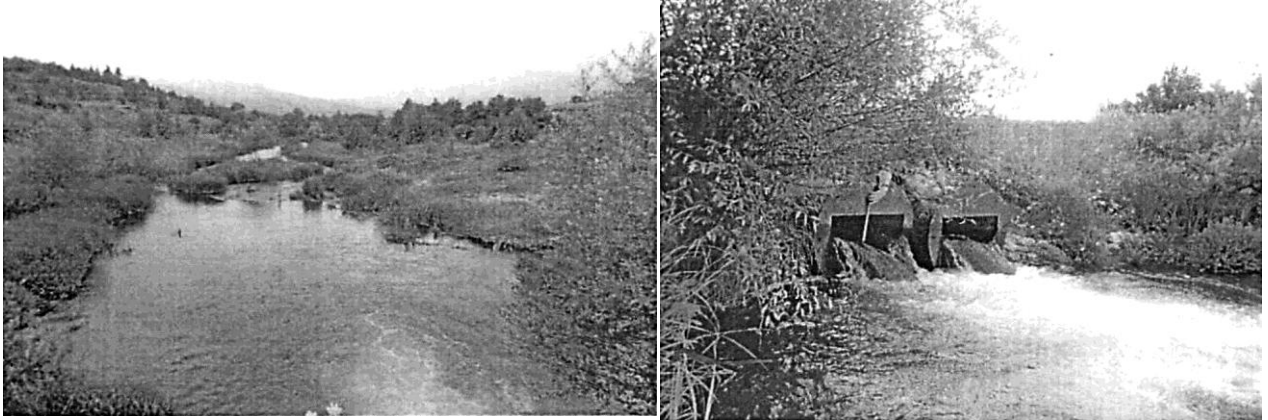
საქართველოს რიგ მთის წყალსაცავებში დადგენილია კავშირი ფილტრაციის ხარჯსა და წყალსაცავში წყლის დონეს შორის (ნახ. IV.2.5). თბილისის წყალსაცავზე ფილტრაციული ნაკადებით მარილების გამოტანამ გამოიწვია ორი ბეტონის კაშხლის დეფორმაცია, რამაც განაპირობა ნაგებობების საძირკველში ქანების ცემენტაციის აუცილებლობა და სანაპირო ფერდობის გამაგრება ქვის კონტრბანკეტით.



ნახ. IV.2.5. ფილტრაციაზე წყლის დანაკარგების დამოკიდებულება წყალსაცავის დონეზე

ა) თბილისის წყალსაცავი: ——— – ექსპლუატაციაში შესვლიდან 2 წლის შემდეგ; x – ექსპლუატაციაში შესვლიდან 15 წლის შემდეგ; 0 – ანათვლების წერტილები ცემენტაციის შემდეგ; ბ) ხრამის წყალსაცავი: • – ანათვლების წერტილები; გ) სიონის წყალსაცავი: ——— – ფილტრაცია კაშხალში; —●— – სხვა წლიური დანაკარგები; - - - - - საერთო დანაკარგები ფილტრაციაზე.

შაორის წყალსაცავის ქვედა ბიეფში მოქმედებს 4 ფილტრაციული ნაკადი, რომელთა შორის 2 ნაკადის საერთო ხარჯია 0,5 მ³/წმ (ფოტო IV.2.1).



ფოტო IV.2.1. ფილტრაციული ნაკადები შაორის წყალსაცავის ქვედა ბიეფში

თბილისის წყალსაცავიდან ფილტრაციული ნაკადებისა და ქ. თბილისის გლდანის რაიონის შეტბორვის გამო წყალსაცავის დონის ნიშნული დაწეულია 10, 0 მ-ით. ამის გამო წყალსაცავის სრული მოცულობა $V_{სრ} = 215,2$ მლნ მ³, მკვდარი მოცულობა – $V_{მკ} = 150,17$ მლნ მ³, შესაბამისად, სარკის ფართობი - $F = 108,0$ მ², მაქსიმალური სიღრმე – $H_{max} = 37,0$ მ (საპროექტო – $V_{სპ} = 308,0$ მლნ მ³, $F_{სპ} = 11,0$ კმ², $H_{სპ} = 45,0$ მ).

სიონის კაშხლის ქვედა ბიეფში, წყალსაცავში წყლის დონის მაღალ ნიშნულებზე, კაშხლის მარცხენა ნაპირზე მდებარე ტერიტორიაზე მაცხოვრებლების სარდაფებსა და მიმდებარე მიწის ნაკვეთებზე დაფიქსირებულია გრუნტის წყლების დონის ამაღლება და რამდენიმე ფილტრაციული ნაკადის წარმოშობა (ფოტო IV.2.2).

ა)



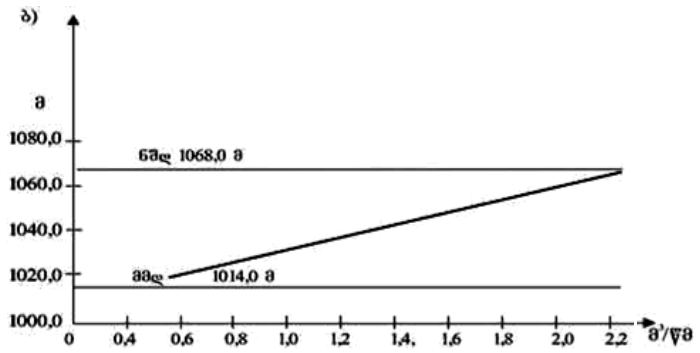
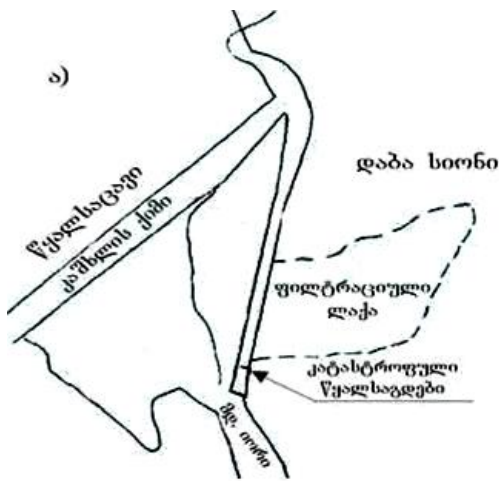
ბ)



ფოტო IV.2.2. სიონის წყალსაცავიდან ფილტრაციული წყლების გამონაჟონი

ა) კატასტროფული წყალსაგდების მარცხენა ნაპირზე, ბ) – კატასტროფული წყალსაგდების მარჯვენა ფერდზე

ერთი და იმავე დროს ჩატარებული მონიტორინგის საფუძველზე დადგინდა, რომ პიეზომეტრებში წყალი ძლიერ მინერალიზებული ჰიდროკარბონატ-ნატრიუმ-კალიუმია. დეპრესიული მრუდის ნიშნული კაშხლის ტანში იზრდება მარცხენა ნაპირისკენ, რაც იმაზე მეტყველებს, რომ კაშხლის ბირთვში მიმდინარეობს სუფოზიის გაძლიერებული პროცესები. ფილტრაციული წყლების ლაქა და დანაკარგები მოყვანილია IV.2.6 ნახაზზე.



ნახ.IV.2.6. წყლის ფილტრაციული ხარჯები სიონის წყალსაცავიდან:
 ა - ფილტრაციული ლაქა; ბ - ფილტრაციაზე წყლის დანაკარგების დამოკიდებულება წყალსაცავის წყლის ზედაპირის დონეზე

მთისწინეთისა და მთიანი რეგიონების წყლის დონის მკვეთრად ცვალებად წყალსაცავებზე შეტბორვა ვითარდება სანაპირო ტერიტორიების ზედაპირულ ნაწილებში შეუქცევადი ცვლილებებით.

შეტბორვის პროცესის სხვადასხვა ინტენსივობა განისაზღვრება გრუნტის წყლების დონის მდებარეობით. შეიძლება გამოიყოს: ძლიერ შეტბორილი ზონები (გრუნტის წყლების დონე 1 მ სიღრმეზეა); ზომიერი შეტბორვის ზონები (გრუნტის წყლების დონე 1÷2 მ სიღრმეზეა); სუსტი შეტბორვის ზონები (გრუნტის წყლების დონე 2÷3 მ სიღრმეზეა); შეუტბორავი მონაკვეთები, რომლებიც აგებულია სუსტად შეღწევადი დანალექებით (მძიმე თიხნარი, თიხა) წყალსაცავის ნშდ-დან ტერიტორიის 3-4 მ-ით ზევით.

ტერიტორიის სიგრძე, რომელზეც ვრცელდება გრუნტის წყლების შეტბორვა, დამოკიდებულია შეტბორვის სიმაღლეზე, წყალსაცავის წყლის დონის შევსებისა და დამუშავების რეჟიმზე, სანაპიროს ქანების მორფოლოგიასა და მექანიკურ შედგენილობაზე, მისი განლაგების ხასიათზე, გრუნტების ფილტრაციულ თვისებებსა და სხვა ფაქტორებზე. წყალსაცავიდან წყლის დანაკარგი შეიძლება განისაზღვროს, როგორც დაბრუნებული ან დაუბრუნებელი (ცხრ. IV.2.5).

ცხრილი IV.2.5

წყალსაცავიდან ფილტრაციაზე წყლის დანაკარგების
 საანგარიშო მნიშვნელობები

№	წყალსაცავი	დაწნევა, მ	დანაკარგი ფილტრაციაზე, მ³/წმ
1	ხრამის (წალკის)	25	0,8-3,75
2	ჯვრის (ენგურის)	230	2,0
3	სიონის	68	2,0
4	თბილისის	45	0,12

მთის წყალსაცავებზე ფილტრაციის პროცესების ძირითადი თავისებურებებია: წყალსაცავების გავსებისას ფილტრაციის დაუმყარებელი ხასიათი, რის გამოც

სტაბილიზაციის პროცესი ხანდახან 10-20 წელი გრძელდება; წყალსაცავის ექსპლუატაციის პერიოდში ავსებისა და დონის დამუშავების დროს ნშდ-ს და მმდ-ს ნიშნულებს შორის ფილტრაციული დანაკარგები ნიშან-ცვლადი ხდება, რაც ფილტრაციისა და შეტბორვის პროცესების მართვის საშუალებას განაპირობებს.

წყალსაცავში ჩადინებული გრუნტის წყლების მოცულობა ($W_{\text{გ}}$) შეიძლება გამოითვალოს შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$W_{\text{გ}} = \sum_{k=1}^n l_{\text{გ}} h_{\text{საშ}} L_{\text{წ}} \mu, \quad (\text{IV.2.2})$$

სადაც $l_{\text{გ}}$ ფილტრაციის ზონის სიგრძეა წყალსაცავში წყლის ნორმალურ დონეზე; $h_{\text{საშ}}$ – გრუნტის წყლების დონის საშუალო ცვლილება წყალსაცავში წყლის დონის მერყეობისას, ნშდ-მმდ დონეების დამუშავების საზღვრებში; $L_{\text{წ}}$ – წყალსაცავის მახასიათებელი უბნის სიგრძე; $\Sigma(L_{\text{წ}})$ – წყალსაცავის პერიმეტრის სიგრძე; μ – გრუნტის აქტიური ფორიანობა (წყლის გაცემის კოეფიციენტი) საშუალო გამოსაკვლევ უბნის საზღვრებში; n – უბნების რაოდენობა.

მთის წყალსაცავებში შიდა წყალსატევური პროცესების კვლების ამოცანები შეიძლება ასე ჩამოყალიბდეს: არსებული მეთოდების ინტერპრეტაცია და გაანგარიშების ახალი მეთოდების დამუშავება მთის წყალსაცავების გენეტიკური ტიპის სპეციფიკის გათვალისწინებით; ზონალური და აზონალური ფაქტორების გათვალისწინებით; შიდაწყალსატევური პროცესების კომპლექსური შესწავლა.

შიდა წყალსატევური პროცესების განვითარების არსებული მეთოდების ანალიზის საფუძველზე გამოყოფილია შემდეგი დებულებები: წყლის ბალანსის ელემენტების განსაზღვრის მეთოდიკა, პრაქტიკულად იდენტურია ყველა ტიპის წყალსაცავებისთვის. გეოგრაფიული ზონალობა არ მოქმედებს წყლის ბალანსის შემადგენლობების თანაფარდობაზე; წყლის დანაკარგები აორთქლებაზე – პრაქტიკულად შეიძლება არ გაითვალისწინებოდეს; შემოსული და გადინებული წყლების რაოდენობა დამოკიდებულია ორ რეჟიმზე – წყალსაცავის შევსებასა და დაცლაზე; წყალსაცავის დონური რეჟიმზე დამოკიდებულია ტალღების ფორმირება, ნაპირების წარეცხვისა და ტაფობში ნატანის დაგროვების ინტენსივობა, წყლის ხარისხის მაჩვენებლების ცვლილება.

წყალსაცავში წყალცვლის პროცესების ცვლილებების პროგნოზირება მეტად რთული ამოცანაა.

დინებები წყალსაცავში – განისაზღვრება დაკვირვებების მონაცემებზე ტალღური პროცესების ერთობლიობაში.

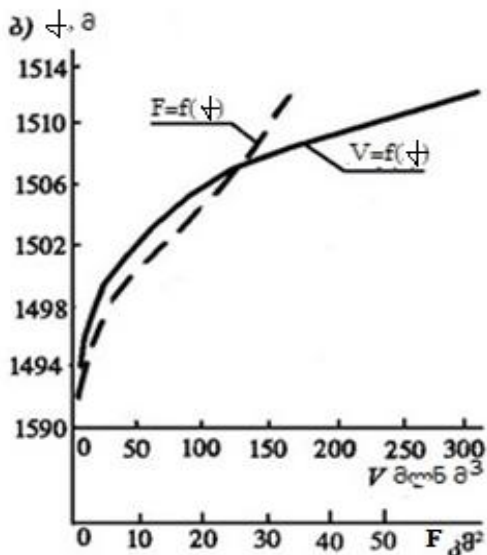
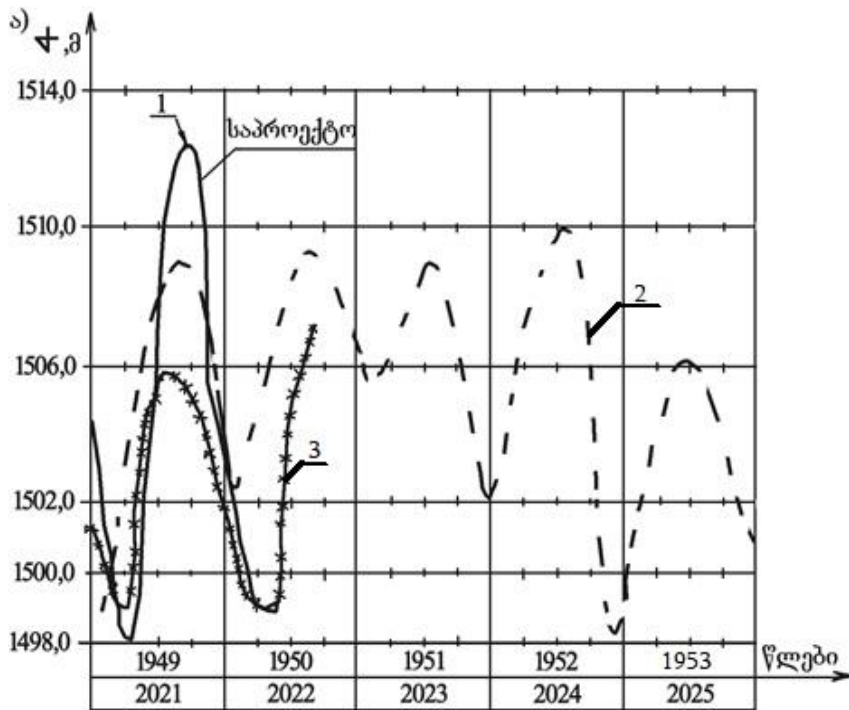
ტალღური პროცესები – ყველაზე მნიშვნელოვანი ფაქტორებია წყალსაცავისა და გარემოს ურთიერთდამოკიდებულებაში.

მთის წყალსაცავებზე ტალღების განვითარება რთული პროცესია, იგი დამოკიდებულია სანაპიროს რთულ მორფოლოგიასა და მნიშვნელოვან დახრილობაზე, ტალღების გაქანების მცირე მანძილზე და სხვ.

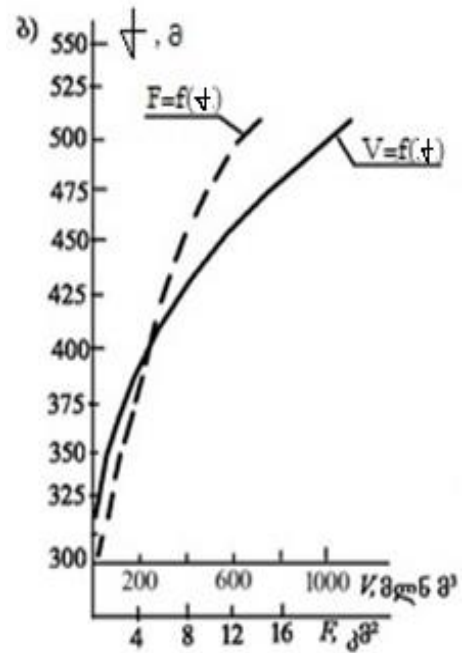
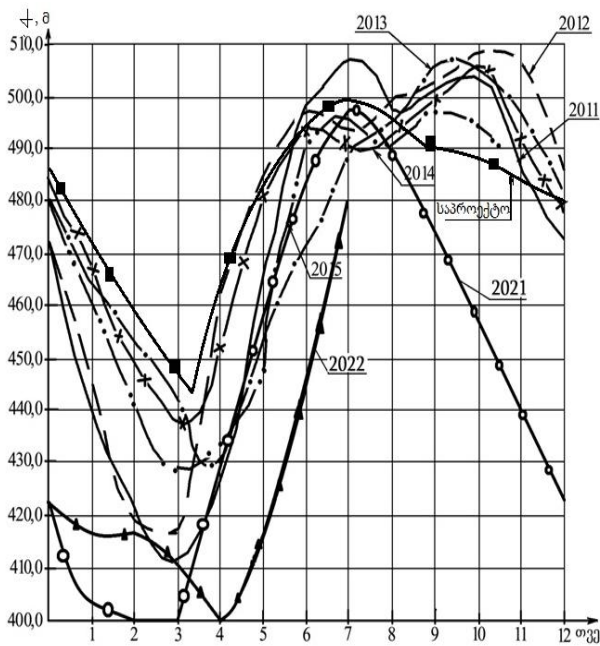
ვაკის წყალსაცავებისგან განსხვავებით მთის წყალსაცავზე ღელვის პროცესები

დამოკიდებულია შემდეგ პირობებზე: სანაპიროს რთული კონფიგურაცია და დასერილობა, რომლის გამო ზედაპირზე წარმოიშობა სამგანზომილებიანი ღელვა; აკვატორიის მცირე ფართობისა და წყლის მცირე მოცულობის გამო მთის წყალსაცავების ზედაპირზე ტალღები სწრაფად წარმოიქმნება და ქრება; წყლის დონის მნიშვნელოვანი დამუშავების პირობები განსაზღვრავს ტალღების ფორმირების სპეციფიკას; ქარების სიჩქარისა (სიძლიერის) და მიმართულების ცვალებადობა განსაზღვრავს ტალღების პარამეტრების მკვეთრ ცვალებადობას დროში.

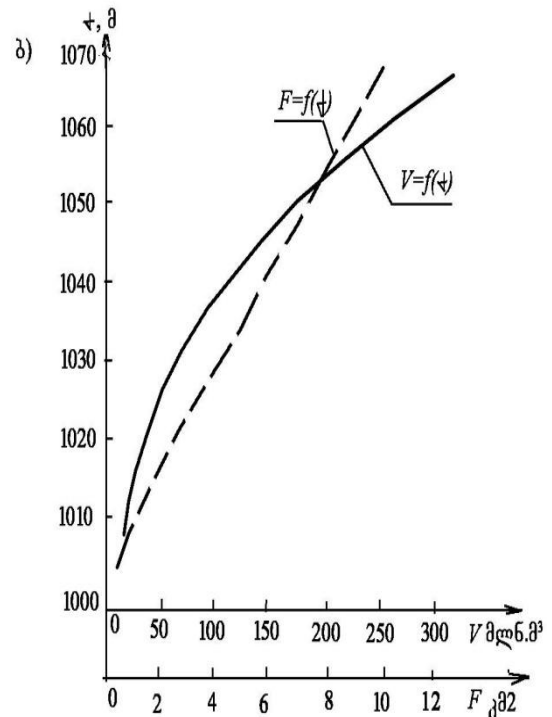
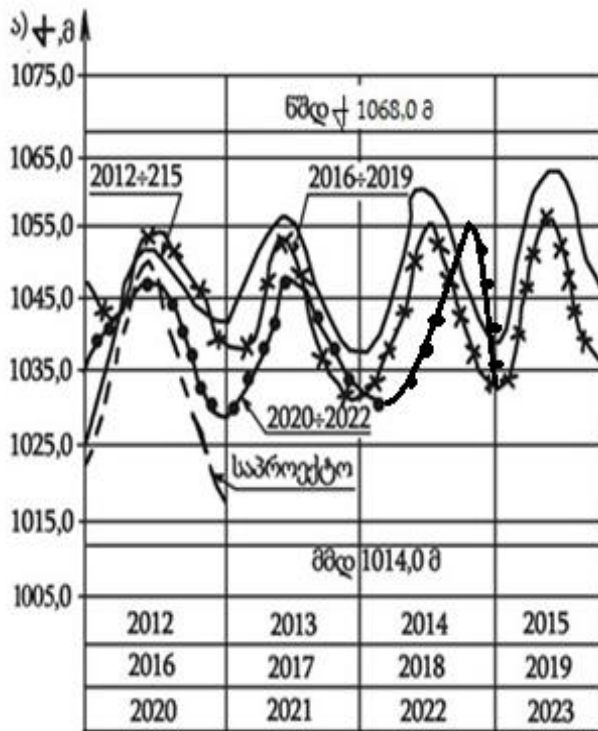
მთის წყალსაცავებში შიდაწყალსატევური პროცესების თავისებურებები განპირობებულია დონური და მოდენითი რეჟიმით, წყალცვლის პროცესებით, დინებებით, ქარის რეჟიმითა და ქარისმიერი ტალღური ღელვით. მთის წყალსაცავების დონურ რეჟიმს ახასიათებს საერთო თვისებები – წყალსაცავის შევსება და დაცლა (ნახ. IV.2.7÷IV.2.14).



ნახ. IV.2.7. ხრამის (წალკის) წყალსაცავის დონური რეჟიმის დამახასიათებელი ელემენტები
 ა) დონის ცვალებადობის კრონოლოგიური გრაფიკები 1) — საპროექტო; 2) 1949-1953 წწ.; 3) —x—x— 2021-2022წწ.; ბ) მოცულობისა (V) და ზედაპირის სარკის ფართობის (F) დამოკიდებულება სიღრმესთან (H)

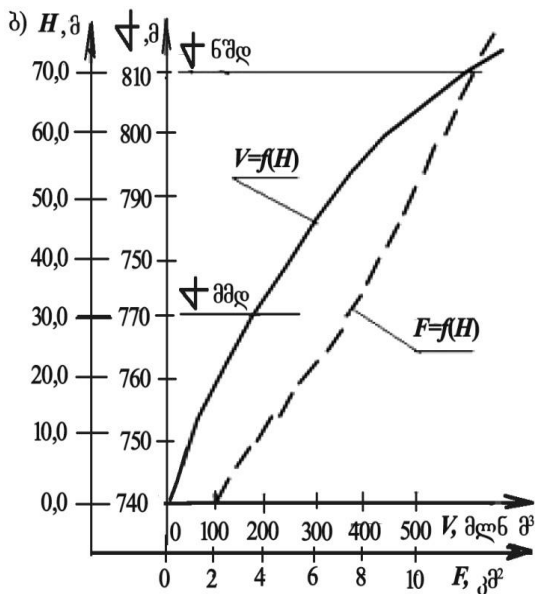
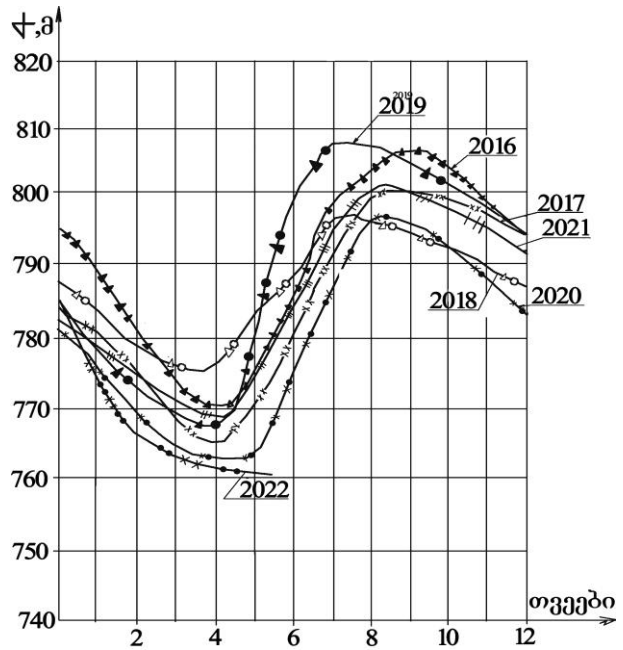
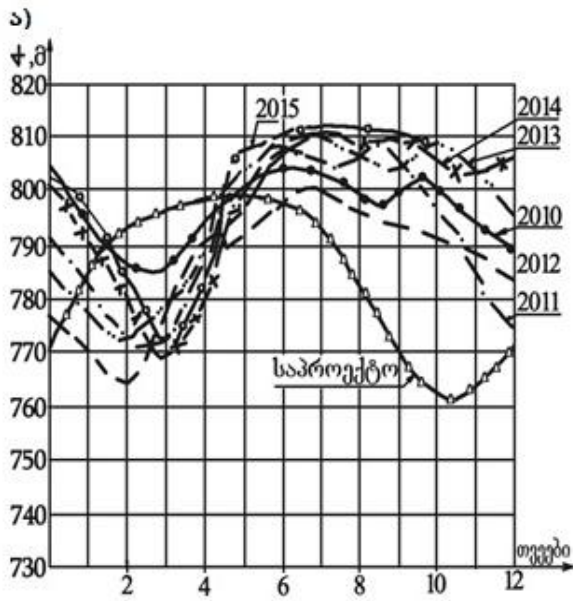


IV.2.8. ენგურის (ჯვრის) წყალსაცავის დონური რეჟიმის დამახასიათებელი ელემენტები
 ა) დონის ცვალებადობის ქრონოლოგიური გრაფიკი; 1- ■ - საპროექტო; 2— 2011 წ.; 3 - - - 2012 წ.; 4 -●- 2013 წ.; 5 -x- 2014 წ.; 6 -●●- 2015 წ.; 7 — o — 2021წ.; 8 -▲- 2022 წ. ბ) მოცულობისა (V) და ზედაპირის სარკის ფართობის (F) დამოკიდებულება სიღრმესთან (ϕ)



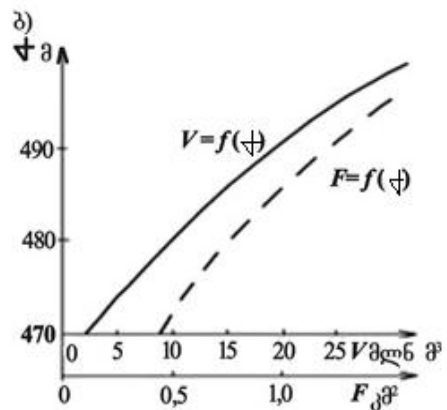
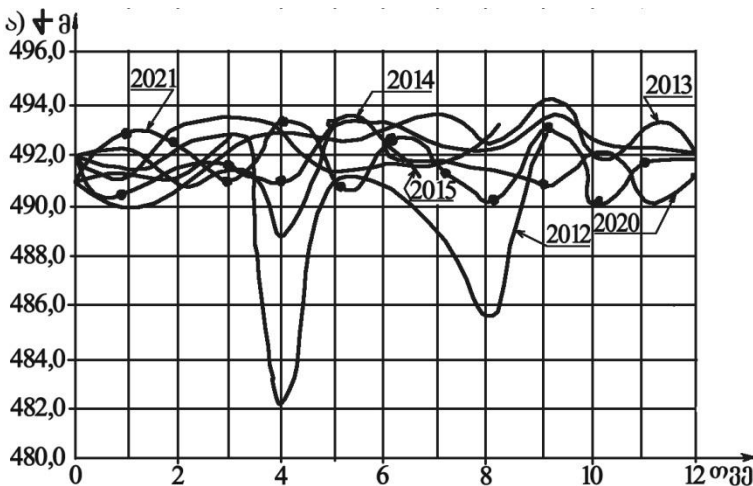
ნახ. IV.2.9. სიონის წყალსაცავის დამახასიათებელი ელემენტები

ა) დონის რხევის ქრონოლოგიური გრაფიკები: 1) — — საპროექტო; 2) — 2012-2015წწ.; 3) —x—x—x 2016-2019 წწ.; 4) —●●●●● 2020-2022 წწ., ბ) წყალსაცავის მოცულობისა (V) და ზედაპირის სარკის (F) დამოკიდებულება სიღრმესთან (ϕ)

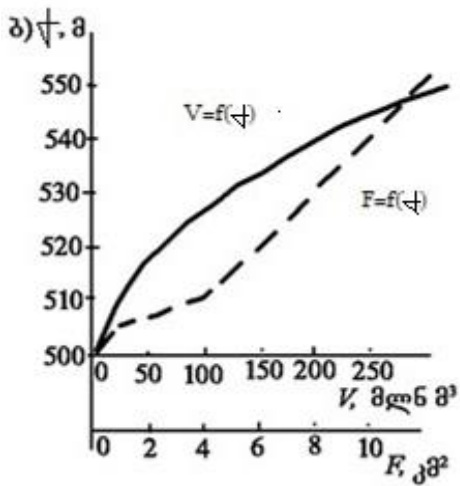
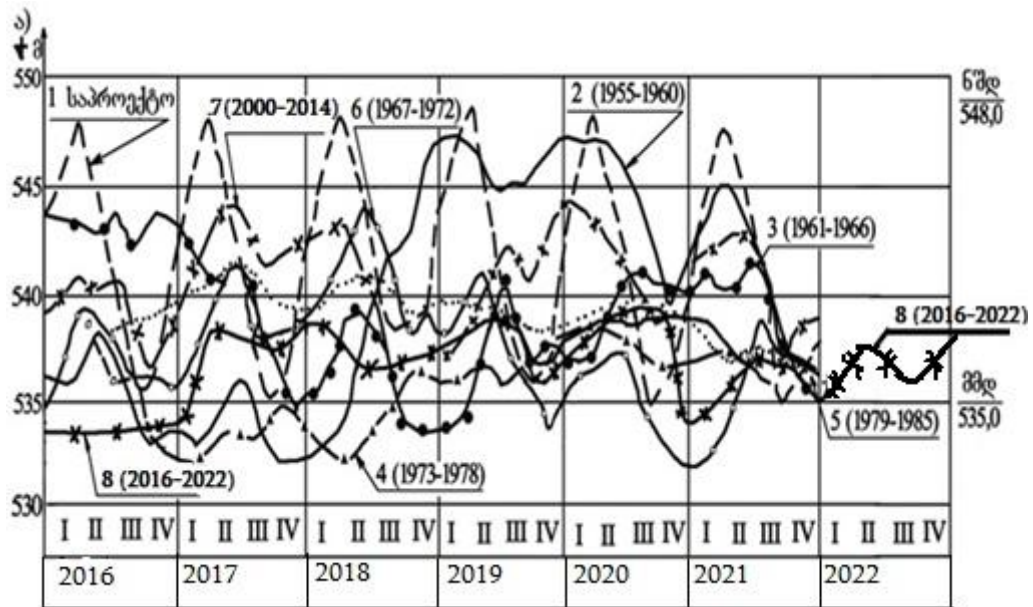


ნახ. IV.2.10. ჟინვალის წყალსაცავის დონური რეჟიმის დამახასიათებელი ელემენტები

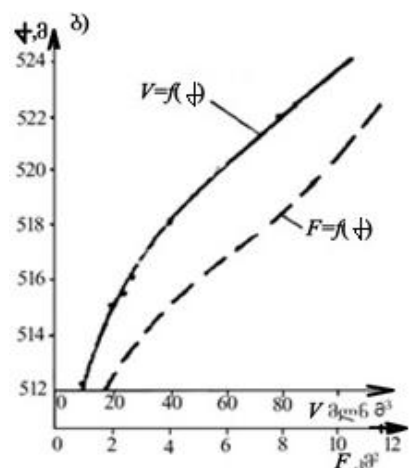
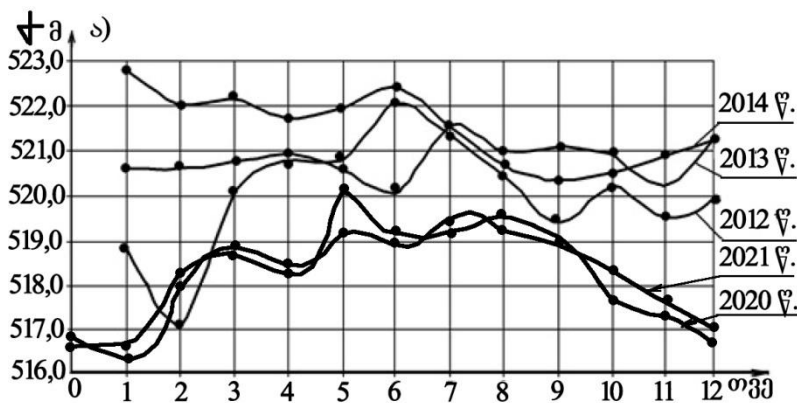
ა) დონის ცვალებადობის ქრონოლოგიური გრაფიკები 1) Δ - Δ - Δ საპროექტო, 2) \bullet - \bullet - \bullet 2010 წ.; 3) \bullet -2011წ.; 4) --- 2012წ.; 5) \bullet - \bullet -2013 წ.; 6) \times -2014 წ.; 7) \circ -2015წ., 8) \blacktriangle 2016 წ.; 9) \times \times - 2017 წ.; 10) Δ \circ - 2018 წ.; 11) \blacktriangle \bullet - 2019 წ.; 12) \bullet \times - 2020 წ.; 13) --- 2021 წ.; 14) \bullet \times - 2022 წ. ბ) მოცულობისა (V) და ზედაპირის სარკის ფართობის (F) დამოკიდებულება სიღრმესთან (ψ).



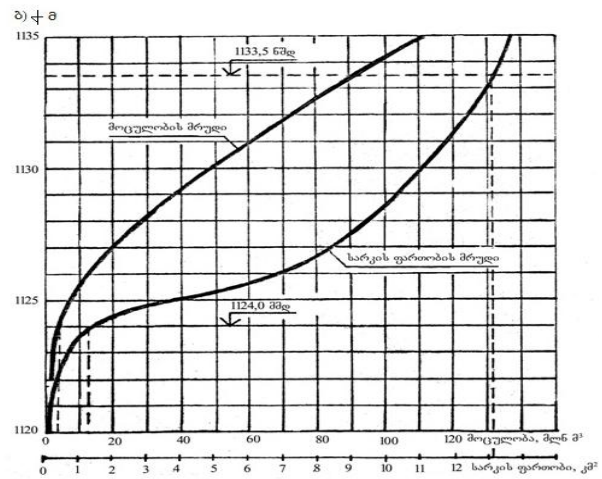
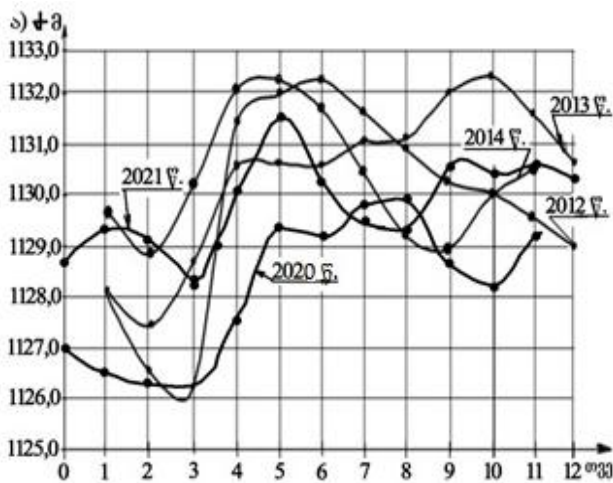
ნახ. IV.2.11. ლაჯანურის წყალსაცავის დონური რეჟიმის დამახასიათებელი ელემენტები
ა) დონის ცვალებადობის ქრონოლოგიური გრაფიკები. ბ) მოცულობისა (V) და სარკის ფართობის (F) დამოკიდებულება სიღრმესთან (ψ)



ნახ. IV.2.12. თბილისის წყალსაცავის დონური რეჟიმის დამახასიათებელი ელემენტები
 ა) დონის ცვალებადობის ქრონოლოგიური გრაფიკები (1- საპროექტო; 2 - 1955-1960 წწ.; 3 - 1961-1966 წწ.; 4 - 1973-1978 წწ.; 5 - 1979-1985 წწ.; 6 - 1967-1972 წწ.; 7 - 2009-2014 წწ.; 8-2016-2022 წწ.) ბ) მოცულობის (V) და სარკის ფართობის (F) დამოკიდებულება სიღრმესთან (∇)



ნახ. IV.2.13. ტყიბულის წყალსაცავის დონური რეჟიმის დამახასიათებელი ელემენტები
 ა) დონის ცვალებადობის ქრონოლოგიური გრაფიკები; ბ) მოცულობის (V) და სარკის ფართობის (F) დამოკიდებულება სიღრმესთან (∇).



ნახ. IV.2.14. შაორის წყალსაცავის დონური რეჟიმის დამახასიათებელი ელემენტები ა) დონის ცვალებადობის ქრონოლოგიური გრაფიკები; ბ) მოცულობისა (V) და სარკის ფართობის (F) დამოკიდებულება სიღრმესთან

წყალსაცავში წყლის საშუალო საანგარიშო სიღრმე ($H_{საშ}$) შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$H_{საშ} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i t_i}{nT}, \quad (IV.2.3)$$

სადაც H_i წყალსაცავში წყლის სიღრმის მნიშვნელობაა სხვადასხვა პერიოდში; t_i – წყლის დონის დგომის დრო; n – დონის ცვლილების შემთხვევების რაოდენობა; T – გასაშუალებული პერიოდი.

წყალსაცავის მოცულობა (V) და წყლის სარკის ფართობი (F) წყლის კიდის დგომისას ცალკეულ ნიშნულებზე განისაზღვრება დამოკიდებულებებით:

$$V = K_V H^{a_p} \quad (IV.2.4)$$

$$F = K_V \cdot a H^{a_p - 1}, \quad (IV.2.5)$$

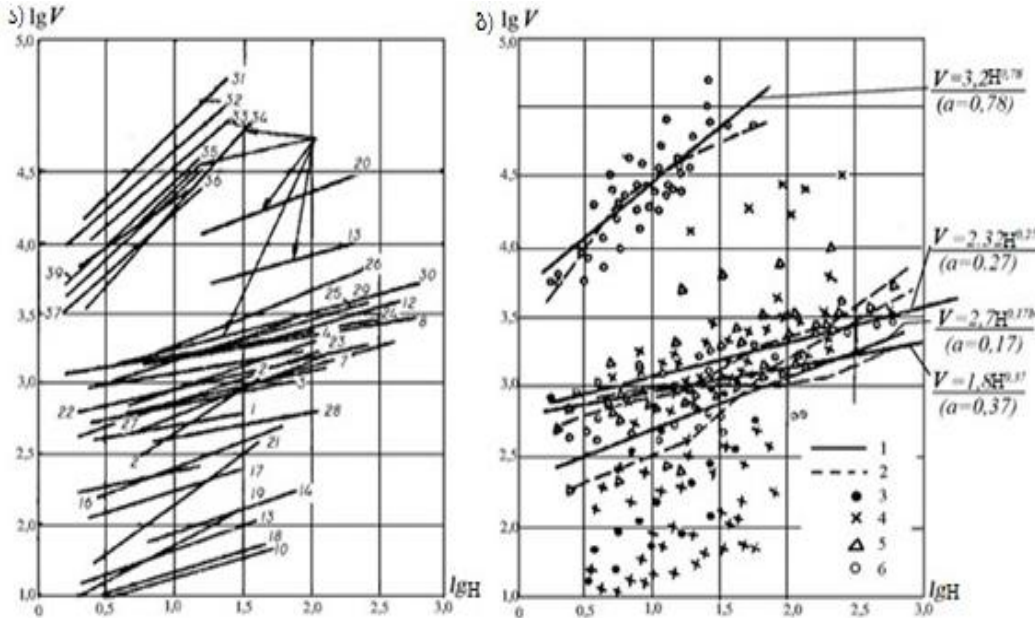
სადაც K_V მოცულობის კოეფიციენტია ($K_V = 1,6 \div 2,5$); a_p – რელიეფის კოეფიციენტი.

რელიეფის კოეფიციენტის მნიშვნელობა (a_p) განისაზღვრა რიგი წყალსაცავების მონაცემების დამუშავებით (ნახ. IV.2.15). დამოკიდებულება (IV.2.4) შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს შემდეგი სახით:

$$\lg V = \lg K_V + a_p \lg H \quad (IV.2.6)$$

წყალსაცავის სიღრმის მიხედვით IV.2.6 ფორმულის პირველადი წარმოებულ საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ წყალსაცავის სარკის ფართობი $F = K_V \cdot a_p H^{a_p - 1}$, რომელიც შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს შემდეგი სახის წრფივი განტოლებით: $\lg F = (\lg K_V + \lg a_p) \cdot (a_p - 1) \lg H$, სადაც ორდინატა (\lg) ღერძიდან ჩამოჭრილ მონაკვეთს წარმოადგენს სიდიდე ($\lg K_V + \lg a_p$), ხოლო წრფის დახრილობის კუთხის ლოგარითმს გრაფიკზე აქვს მნიშვნელობა ($a_p - 1$) (ნახ. IV.2.15). a_p -ს მნიშვნელობის ცვლილება დამოკიდებულია წყალსაცავის ადგილმდებარეობის რელიეფზე. წყალსაცავის

მთიანობის ზრდასთან ერთად, მრუდების $V = f(H)$ და $F = f(H)$ დახრილობა მატულობს. ეს მაჩვენებლები შეიძლება მიღებულ იქნეს წყალსაცავის დამახასიათებლად რელიეფის ტიპის მიხედვით. (K_V) და (a_p)-ს მნიშვნელობების კავშირი ადგილმდებარეობის რელიეფთან იძლევა წყალსაცავების მიახლოებითი კლასიფიკაციის საშუალებას „მთიანობის“ ხარისხის მიხედვით (იხ. ცხრ III.1.8).



ნახ. IV.2.15. წყალსაცავების მოცულობისა (V) და სიღრმის (H) დამოკიდებულება.

ა) 1÷30 – მთის წყალსაცავები; 31÷39 – ვაკის წყალსაცავები (წყალსაცავების დასახელება მოყვანილია ცხრ. IV.2.6); ბ) 1 - რეგრესიის ემპირიული ხაზები; 2 - რეგრესიის თეორიული ხაზი; 3 - ვაკისა და ტბის ტიპის წყალსაცავები; 4 - მთის წყალსაცავები; 5 - მთისწინა წყალსაცავები; 6 - მაღალმთიანი წყალსაცავები.

მოდენითი ცვლილებები მთის წყალსაცავებზე საკმაოდ უმნიშვნელოა. გაქანების მაქსიმალური სიგრძეებისთვისაც კი, რომლებიც საქართველოს მთის წყალსაცავებზე არ აღემატება 10 კმ-ს, შტორმული მოდენის სიდიდემ (ქარისმიერისა და ტალღისმიერის ჯამი) შეიძლება მიაღწიოს 0,5 მ-ს (ცხრ. IV.2.6).

გარე წყალცვლა, ძირითადად, დამოკიდებულია წყალშემკრებიდან ჩამოდინებული წყლის რაოდენობაზე.

შიდა წყალცვლა განპირობებულია თვით წყალსატევში განვითარებული სხვადასხვა პროცესებით – დინებებით, შერევით, ტალღებით.

მთის წყალსაცავებში **დინებების ძირითადი** ტიპებია: გამდინარე დინებები – შეინიშნება წყალსატევის შუა ნაწილში და განპირობებულია მდინარეთა წყლის დიდი მოცულობის ჩამონადენით; ტალღური დინებები - გამოწვეულია ტალღების ზემოქმედებით და განსაზღვრავს წყლის მასების გადაადგილებას ნაპირის გასწვრივ; ფსკერთან ახლომდებარე ფენებში წარმოქმნილი დინებები - გამოწვეულია ნაკადში წვრილფრაქციული ლამის ნაწილაკების არსებობით.

ბაროგრადიენტული, სეისმური, ინერციული დინებები – მორფომეტრიის თავისებურებების გამო, მთის მცირე წყალსაცავებში, პრაქტიკულად, არ აღინიშნება.

შტორმული მოდენის მნიშვნელობები საქართველოს მთის წყალსაცავებზე

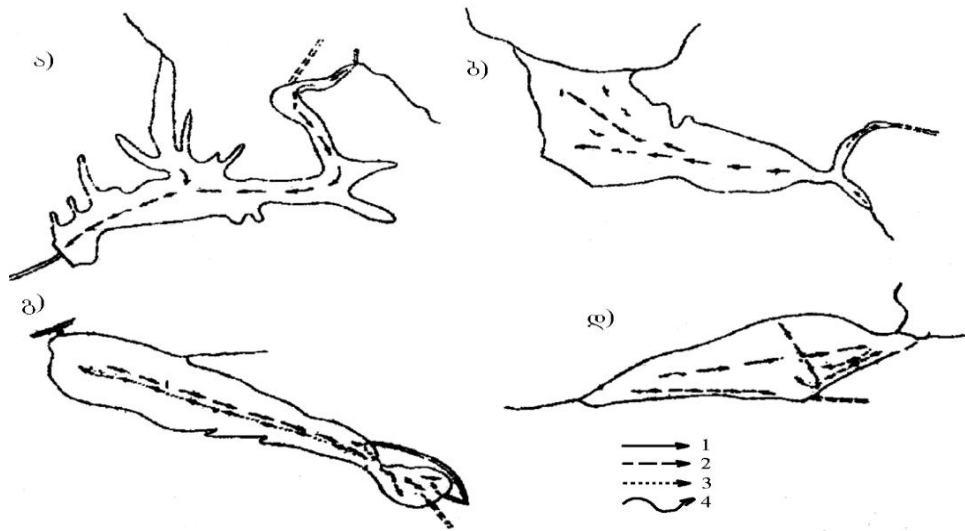
წყალსაცავი	ტალღასაში მიმართულება, რუმბები	ქარის უდიდესი სიჩქარე, მ/წმ	ტალღის გაქანების სიგრძე, კმ	გასშუალებული სიღრმე ტალღის გაქანების გასწვრივ	ტალღის დაფიქსირებული უდიდესი სიმაღლე, მ	1%-ანი უზრუნველყოფის ტალღის საანგარიშო სიმაღლე, მ		შტორმული მოდენის სიმაღლე, მ
						ღრმა წყალზე	ჩამოქცევის ზონაში	
გალის	აღმ.	20	6,0	30	0,8	1,2	1,0	0,25
შაორის	სამხ.დას.	20	5,0	10	0,8	1,2	1,0	0,34
ტყიბულის	ჩრდ.აღმ.	30	6,0	16	1,0	1,5	1,2	0,40
სიონის	ჩრდ.დას.	20	6,0	33	0,5	1,1	0,8	0,30
თბილისის	ჩრდ.დას.	30	9,0	20	1,3	1,6	1,4	0,51
ხრამის	ჩრდ.დას.	28	8,7	11	1,1	1,5	1,2	0,41

ჰორიზონტალური მიმართულების დინებები აღინიშნება წყალდიდობების დროს. დინებები განვითარებულია შეტბორვის დონის გაქონვის რაიონებსა და მდინარეთა კალაპოტების ყოფილი შეჭრის ადგილების გასწვრივ. ამ ტიპის დინებების ძირითადი ზემოქმედებაა სუსპენზიური ნაკადების ფორმირების შესაძლებლობის გაზრდა, რაც ხელს უწყობს ნატანის დანალექების გადაადგილებას და მის თავმოყრას კაშხალთან ასევე ნატანის წვრილი ფრაქციის გამოტანას გამორეცხვების მეშვეობით ჰიდროკვანძის ქვედა ბიეფში.

ქარისძიერი დინებები წარმოიქმნება ძლიერი ქარების დროს, შემოდგომა-ზამთრის პერიოდში. მთის წყალსაცავებში ისინი საკმაოდ იშვიათია. დინების მიმართულება ემთხვევა ქარის მიმართულებას, ხოლო სიჩქარე არ აღემატება ქარის სიჩქარის 0,5-1%-ს. ეს დინებები შეინიშნება მხოლოდ წყლის ზედაპირულ, არა უმეტეს 1,5 მ სისქის ფენაში.

ნაპირის გასწვრივი ქარების განვითარებისას ფორმირდება **ნაპირის გასწვრივი დინებები**. მთის წყალსაცავებში სანაპირო ხაზის ძლიერი დასერილობის გამო, ნაპირის გასწვრივ დინებებს არ აქვს ფართო გავრცელება და, პრაქტიკულად, არსებით როლს არ ასრულებს მის ფორმირებაში. საქართველოს რიგ წყალსაცავებში გამოყოფილია დინებების ძირითადი თავისებურებანი, რომლებიც შეიძლება დავიყვანოთ შემდეგზე (ნახ. IV.2.16).

მთიანი რეგიონების ქარის რეჟიმი ხასიათდება დროში დიდი ცვალებადობით, როგორც სიძლიერით, ისე მიმართულებით. ქარების სიჩქარე და მიმართულება იცვლება ყოველგვარი კანონზომიერების გარეშე, დღე-ღამის განმავლობაში 14-დან 40 მ/წმ-მდე საზღვრებშიც კი.



ნახ. IV.2.16. დინებები გალის (ა), შაორის (ბ), თბილისის (გ) და ხრამის (დ) წყალსაცავებში.

1 - დრეიფული დინება; 2 - ჰორიზონტალური მიმართულების დინება; 3 - კომპენსაციური დინება; 4 - გრადიენტული დინება

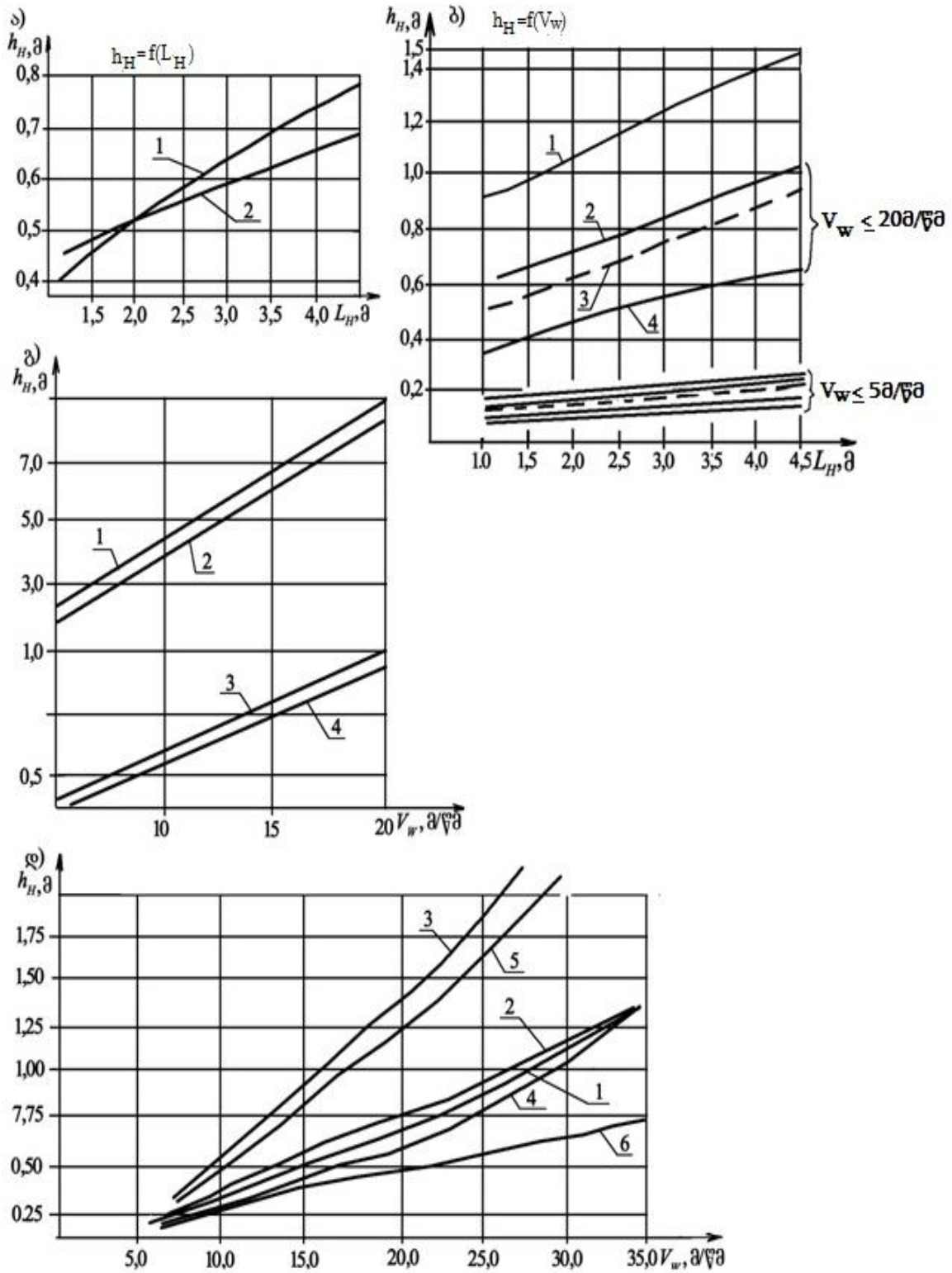
ქარების განმეორადობის ვარდი გაჭიმულია გაბატონებული ქარების მიმართულებით და ემთხვევა წყალსაცავის სიგრძეს. 20 მ/წმ-ზე მეტი სიჩქარე, ძირითადად, ახასიათებს ჩრდილო-დასავლეთის მიმართულების ქარებს. მაქსიმალური სიჩქარეები იცვლება 15-დან 40 მ/წმ-მდე, უდიდესი უზრუნველყოფა (30%-მდე) აქვს ქარებს 11-15 მ/წმ სიჩქარის ინტერვალში; წყნარი ამინდის პროცენტი არ აღემატება 10-15%-ს.

საველე კვლევების მონაცემებით მთის წყალსაცავებში შეიმჩნევა დიდი სიმაღლის ტალღების წარმოქმნა, დროში სწრაფი გარდაქმნის უნარით.

წყლის სარკის მცირე ფართობებისა და დიდი სიღრმეების გამო ტალღების სიმაღლე იცვლება წყლის დონის ცვლილებისას. მაგალითად, თბილისის წყალსაცავში წყლის დონის დაწევისას 8-10 მ-ით, ტალღების სიმაღლე მცირდება 10-15%-ით. დაკვირვებების მონაცემებით, რიგ წყალსაცავებში ტალღების სიმაღლეთა ცვლილება 30-40%-ს აღწევდა. ქარსა და ღელვას შორის კავშირი უფრო მჭიდროა, ვიდრე მსხვილ ვაკის წყალსაცავებში. ძირითადად, ფორმირდება მნიშვნელოვანი დახრილობის ტალღები (1/6-1/12-მდე), რაც განაპირობებს ტალღის ქიმის მკვეთრ და ნაადრევ ჩამოქცევას. ქარისმიერი ღელვა არის ძირითადი შიდაწყალსატევური პროცესი.

IV.2.2. წყალსაცავებში შიდაწყალსატევური პროცესების არსებული კვლევების ანალიზი

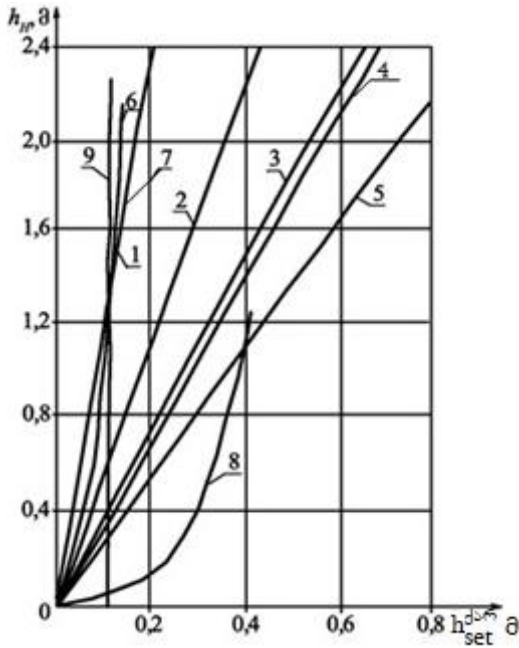
წყალსაცავების „ღრმა წყალზე“ ($H > \lambda/2$) ტალღების ელემენტების გაანგარიშების არსებული მეთოდების ანალიზი გრაფიკული შედარების სახით მოყვანილია ნახაზზე IV.2.17.



ნახ. IV.2.17. წყალსაცავების „ღრმა წყალზე“ ($H > \lambda/2$) ტალღების სიმაღლის (h_H) გაანგარიშების ანალიზი ქარის გაქანების სიგრძის (L_H) და სიჩქარის (V_w) მიხედვით.

- ა) 1 – Марьин В.А., 1939; 2 – Стивенсон; ბ) 1 – Андреанов В.Г., 1939; 2 – Браславский А.П., 1952; 3 – Никитин И.К., 1959; 4 – Лабзовский Н.А., 1956; გ) 1 – Циммерманн; 2 – Берже, 3 – Соловьев; Божич П.К.; 1949; დ) 1 – დაკვირვებები თბილისის წყალსაცავზე, ვარაზაშვილი ნ.გ., იორდანიშვილი ი. კ., 2004-2010 წწ.; 2 – Никитин И.К., 1959; 3 – Андрианов В.Г., 1939; 4 – დაკვირვებები ცილიანის წყალსაცავზე (რუსეთი); 5 – Браславский А.П., 1952; 6 – Лабзовский Н.А., 1956.

წყალსაცავების „ღრმა წყალზე“ ტალღური მოდენის განმსაზღვრელი ფაქტორები შემოისაზღვრებოდა ქარის სიჩქარის (V_w), ტალღების გაქანების სიგრძისა (L) და წყალსაცავის სიღრმით (H). ტალღური მოდენის სიმაღლის ($h_{set}^{ქარ}$) პრაქტიკული გაანგარიშებისას საკმარისი იყო ქარისეული გაქანების სიგრძისა (L) და ქარის სიჩქარის (V_w) გათვალისწინება (ნახ. IV.2.18).



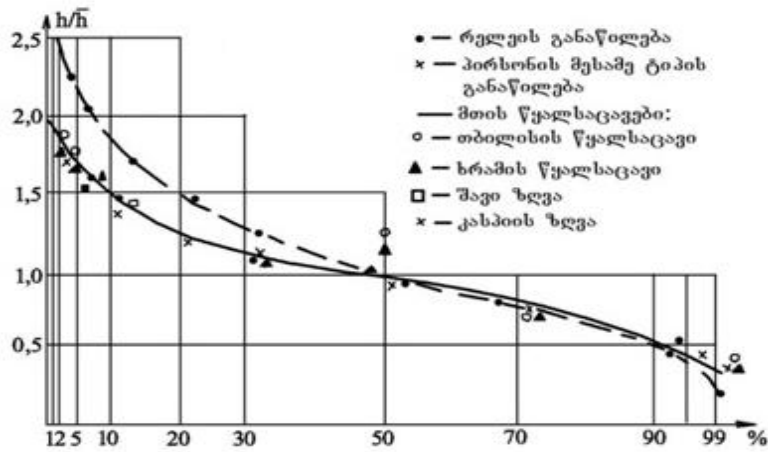
ნახ. IV.2.18. ქარით გამოწვეული ტალღური მოდენის სიმაღლის ($h_{set}^{ქარ}$) ტალღის სიმაღლეზე „ღრმა წყალზე“ (h_H) დამოკიდებულებების შედარება
 – ზღვებზე: 1 – Деррестейн Р.; 2 – Savill V.T., 1950; 3 – Culling W., 1965; 4 – Hansen A., 1978; 5 – Ionson D.W., 1966;
 – წყალსაცავებზე (რუსეთი): 6 – Караушев А.В., 1977; 7 – СНиП 2.06.04-82; 8 – Лабзовский Н.А., 1956; 9 – Рост Г., *) 6,7,8,9 – აგებულია მუდმივი სიდიდეებისას – $V_w=20$ მ/წ; $H=10,0$ მ, $L=20\ 000$ მ.

ქარით გამოწვეული ტალღური მოდენის სიმაღლის მნიშვნელობა $h_{set}^{ქარ} \geq 0,8$ მ-ზე დამახასიათებელია ზღვებისა და ოკეანეებისათვის; ვაკის ტიპის წყალსაცავებზე ქარით გამოწვეული მოდენის ტალღური სიმაღლე $h_{set}^{ქარ} \leq 0,5$ მ; ხოლო მთის წყალსაცავებზე, რომელთა სიგრძე $L < 10$ კმ-ზე - ნაკლებია, ამიტომ ტალღური მოდენის სიმაღლის სიდიდე უმნიშვნელოა - $h_{set}^{ქარ} \leq 0,001 h_H$ და მისი გათვალისწინება პრაქტიკული გაანგარიშებისას შეიძლება არ იყოს საჭირო.

ტალღური მოდენის სიმაღლის ($h_{set}^{ტალღ}$) მნიშვნელობა მთის წყალსაცავებზე შეიძლება განისაზღვროს დამოკიდებულებით:

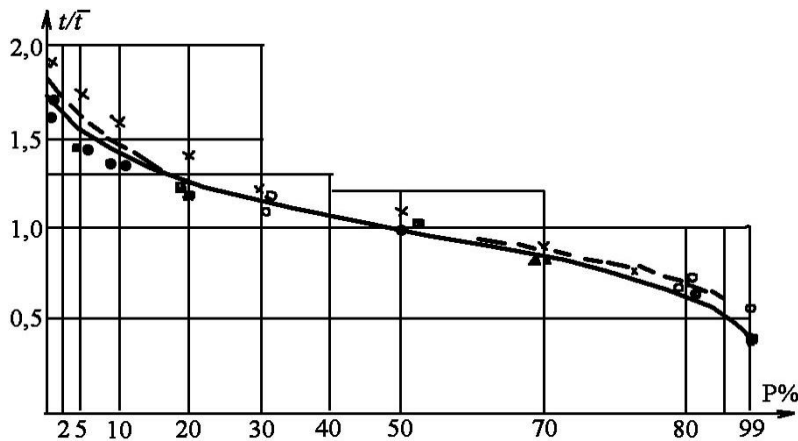
$$h_{set}^{ტალღ} = 0,1h_{runup} + \frac{0,5}{m} \text{ მ}, \quad (IV.2.7)$$

მისი მაქსიმალური მნიშვნელობაა $h_{set}^{ტალღ} \leq 0,5h_{runup}$ ($m = ctg \alpha$ – ფერდის დახრილობა). კვლევების ანალიზმა აჩვენა, რომ ტალღების სიმაღლის გაანგარიშებები „ღრმა წყალზე“ არ ითვალისწინებს ტალღების არარეგულარობას და უზრუნველყოფას. პრაქტიკული გაანგარიშებისათვის შესაძლებელია ინტეგრალური დამოკიდებულებების გამოყენება, რომლებიც აკავშირებს ტალღების საშუალო პარამეტრებს საანგარიშო ტალღაწარმომქმნელი ფაქტორების ძირითად სიდიდეებთან. ტალღების სიმაღლეების უზრუნველყოფის მნიშვნელობების მომატება აღინიშნება 2%-მდე და 95%-ზე მეტ საზღვრებში (ნახ. IV.2.19).



ნახ. IV.2.19. ტალღების ფარდობითი სიმაღლეების რელეის და პირსონის თეორიული განაწილება და მათი შედარება შავი და კასპიის ზღვებსა და საქართველოს მთის წყალსაცავებზე დაკვირვებების მონაცემებთან.

ტალღების პერიოდის უზრუნველყოფა მთის წყალსაცავებზე თითქმის ზუსტად ემთხვევა ვაკის წყალსაცავების მონაცემებს. ეს დამთხვევა შეიმჩნევა თეორიული განაწილების მონაცემებთან შედარებისას (ნახ. IV.2.20).

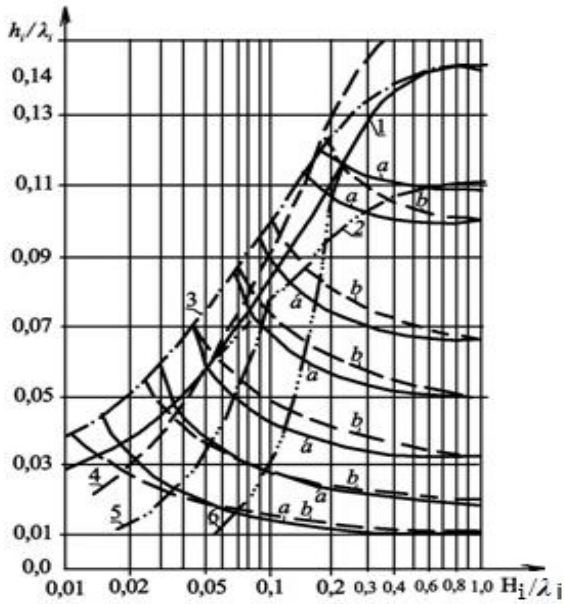


ნახ. IV.2.20. ტალღების ფარდობითი პერიოდის განაწილება

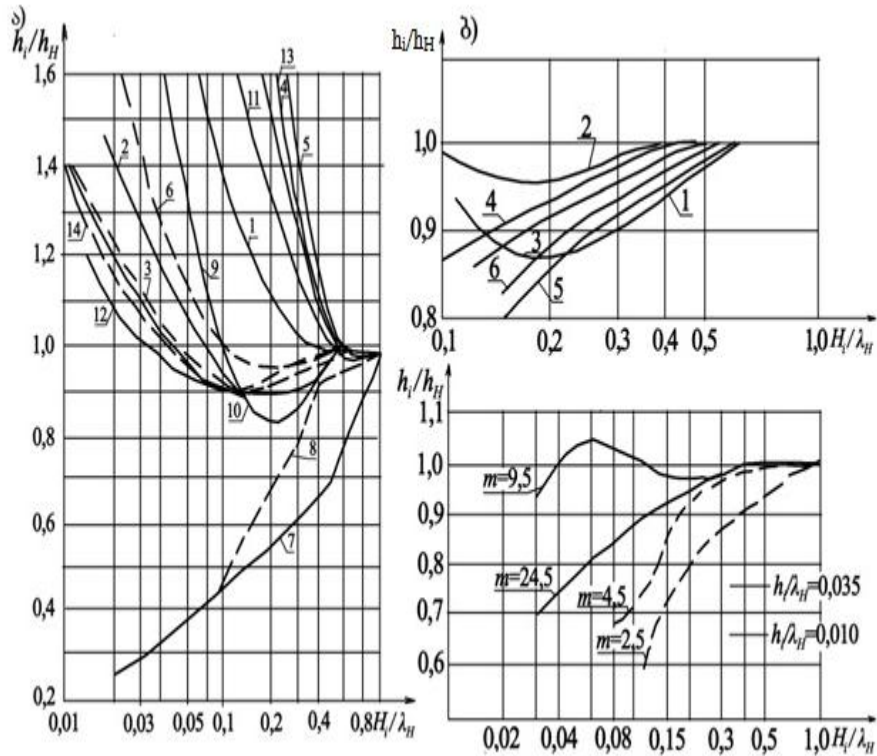
აღნიშვნები: ○ – დაკვირვებები კახოვსკის წყალსაცავზე; ▲ – დაკვირვებები ზღვაზე (ГОИН); × – დაკვირვებები ზღვაზე (Корнеева Л.А., 1969); --- – Титов Л.Ф. (1969); —●— – დაკვირვებები თბილისისა და ხრამის წყალსაცავებზე; ■ – Глуховский Б.Х. (1968)

მთის წყალსაცავებზე ტალღების წარმოქმნა რთულდება ქარის გაქანების მცირე სიგრძეებისა და სანაპირო ზოლის დასერილობის შედეგად, რაც ქმნის ადგილობრივ შეზღუდვებს. ეს მდგომარეობა განსაზღვრავს ტალღების პარამეტრების მკვეთრ განსხვავებას – წყალსაცავის პერიმეტრზე ფერდის ექსპოზიციის შემცირებისა და სწრაფი ჩაღრმავების გამო. როგორც წყალსაცავებზე ტალღების სიმაღლეებს შორის სხვაობა ნაპირის სხვადასხვა უბნებზე აღწევდა 30-40%-ს.

წყალმარჩხ ზონაში ტალღების ელემენტების ფერდზე ტრანსფორმაციის გაანგარიშების შედეგები გრაფიკული შედარების სახით მოყვანილია ნახაზებზე: IV.2.21; IV.2.22; IV.2.23.

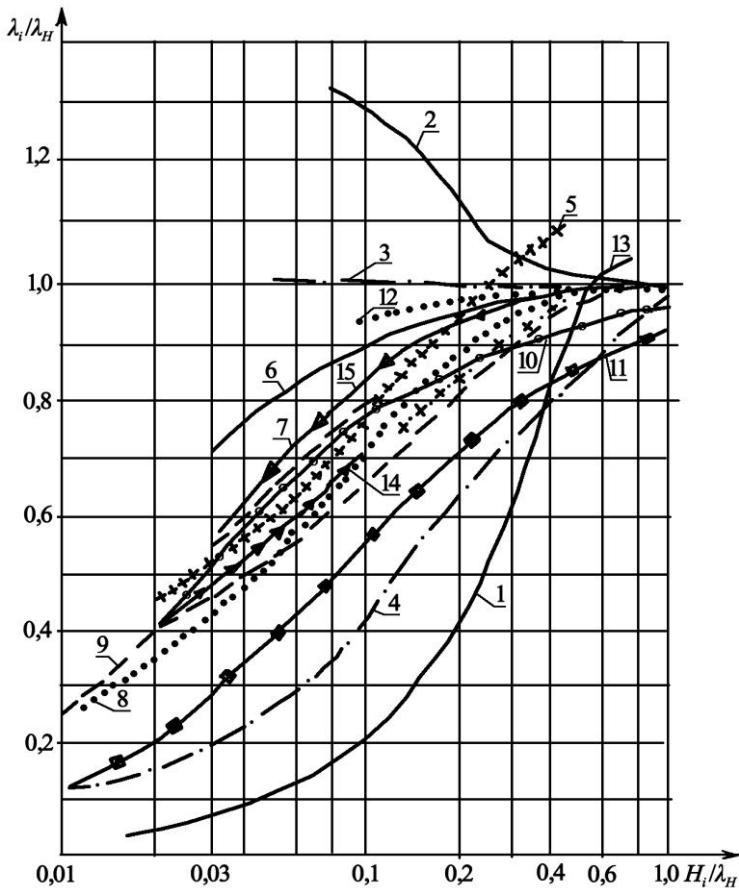


ნახ. IV.2.21. „წყალმარჩხ ზონაში“ ტრანსფორმირებული ტალღის დახრილობის (h_i/λ_i) ცვალებადობის შედარება სხვადასხვა მკვლევარების მიერ ($H_i < H_{cr}$) სიღრმეზე.
a – Miche M., 1954; *b* – Крылов Ю.М., 1962;
 1 – Bretschneider C.L., 1960; 2 - წრფივი თეორიის მიხედვით, $k=1/9$; 3 – იგივე, $k=1/7$;
 4 – Попов И.Я., 1972; Логинов В.Н., Мунк В.,
 5 - ერთეული ტალღების თეორიის მიხედვით,
 6 – იგივე – Макс Коуэн.



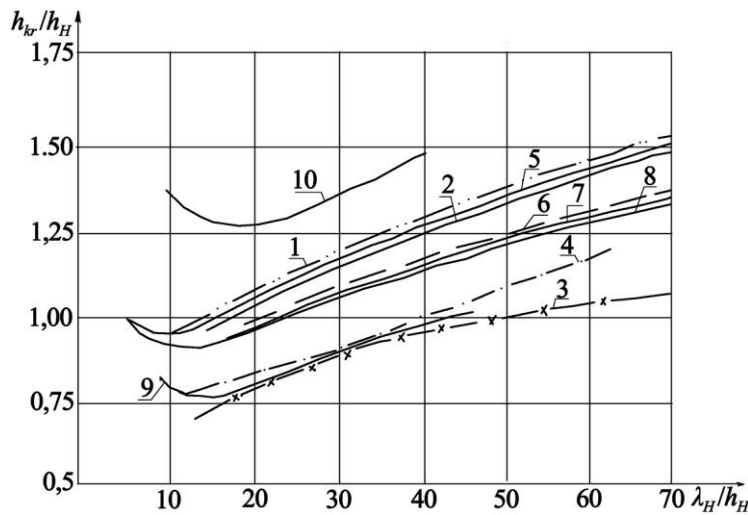
ნახ. IV.2.22. სხვადასხვა მკვლევარების მიერ წყალმარჩხ ზონაში ტალღების სიმაღლის (h_i) ტრანსფორმაციის შედეგების შედარება

- ა) $m=5$, $h_H/\lambda_H=0,06,1$ – Airy G.B., 1976; 2 – Смирнов А.А., 1960; 3 – Крылов Ю.М., 1948; Miche M.B., 1954; 4 – Шишов И.Д., 1952; Гайар Д.Д., 1904; 5 – Логинов В.Н., 1958; 6 – Stoker G.G., 1847; 7 – Иванов А.А., 1955; 8 – Красножон Г.Ф., 1961; СНИП II - 57-75; Божич П.К., 1949; 9 – Кожевников М.П., 1959; 10 – Андрианов В., 1939; 11 - იორდანიშვილი ი.კ., $m=3,5$, 12 – იორდანიშვილი ი.კ., $m=5,0$ (ექსპერიმენტული მონაცემები); 13 - იორდანიშვილი ი.კ., $m=3,5$, (თეორიული მონაცემები); 14 - იორდანიშვილი ი.კ., $m=3,5$, (თეორიული მონაცემები); б) $m=10\div 30$, 1 – Кожевников М.П., $h_H/\lambda_H=0,10$, 1972; 2 – Кожевников М.П., $h_H/\lambda_H=0,08$, 1972; 3 – СН 92-68, $h_H/\lambda_H=0,10$; 4 – СН 92-68, $h_H/\lambda_H=0,08$; 5 – Гоин $h_H/\lambda_H=0,10$, 1956; 6 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,035$, $m=9,7$, 1956; 7 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,035$, $m=5,7$, 1956.



ნახ. IV.2.23. სხვადასხვა მკვლევარების მიერ წყალმარჩხ ზონაში ტალღების სიგრძის ტრანსფორმაციის შედეგების შედარება
 1 – Крылов Ю.М., 1948; (დამრეცი მეჩეზი); 2 – ГОИН ($\lambda_{90\%}$); 3 – ГОИН ($\lambda_{70\%}$); 4 – Лабзовский Н.А., 1956; 5 – Смирнов А.А., 1960; Брегшнейдер К.Л., 1970; 6 – Жуковец А. М., $h_H/\lambda_H=0,035$, $m=9,7$, 1959; 7 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,035$, $m=5,7$, 1959; 8 – Miche MB., 1954; 9 – ГОИН ($\lambda_{1\%}$); 10 – Иванов И.А М., $m=25$, 1992; 11 – Иванов И. А., $m=120,0$, 1992; 12 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,11$, $m=9,7$, 1956; 13 – Жуковец А.М., $h_H/\lambda_H=0,11$, $m=24,5$; 14 – იორდანიშვილი ი.კ., $h_H/\lambda_H=0,053$, $m=20$, 15 – იორდანიშვილი ი.კ., $h_H/\lambda_H=0,053$, $m=8,0$.

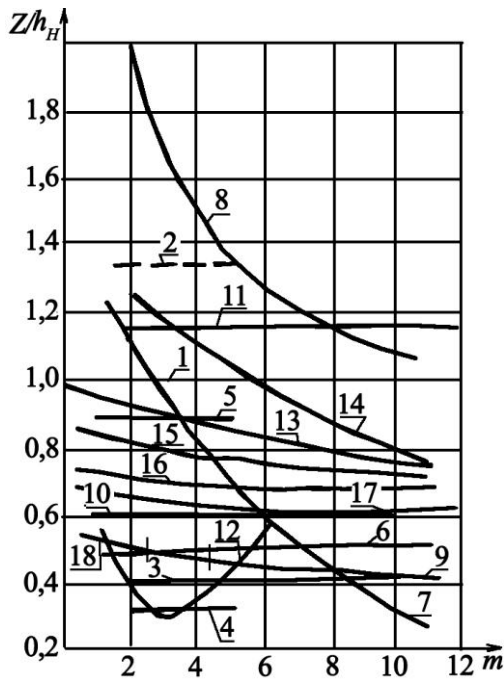
კრიტიკულ ზონაში ტალღების კრიტიკული სიმაღლის (h_{kr}) გაანგარიშების შედეგები მოყვანილია გრაფიკული შედარების სახით (ნახ. IV.2.24).



ნახ. IV.2.24. სხვადასხვა მკვლევარების მიერ კრიტიკულ ზონაში ტალღების კრიტიკული სიმაღლის (h_{kr}) გაანგარიშების შედეგება

- 1 – Nikamira (იაპონია), $m=10$, 1985; 2 – Nikamira, $m=20$, 1985; 3 – Nikamira, $m=50$, 1985; 4 – Мунк Н., 1969; 5 – Смирнов А.А., $m=5$, 1983; 6 – Комар; 7 – ნატურული კვლევები, აშშ; 8 – Алтунин Д.Н., $m=10$; 9 – იორდანიშვილი ი. კ., $m=10$; 10 – იორდანიშვილი ი.კ., $m=2,5$.

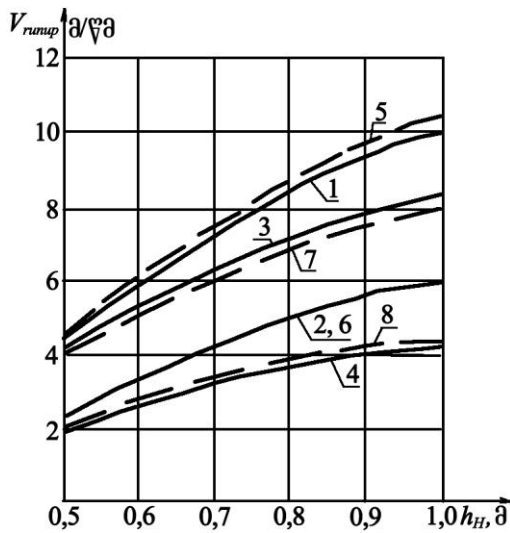
ჩამოქცევის ზონაში ტალღის ჩამოქცევის სიღრმის (Z) გაანგარიშების შედეგები მოყვანილია გრაფიკული შედარების სახით (ნახ. IV.2.25).



ნახ. IV.2.25. სხვადასხვა მკვლევარების მიერ ჩამოქცევის ზონაში ტალღების ჩამოქცევის სიღრმის (Z) ცვალებადობის შედარება

- 1 – Божич П.К., Джунковский Н.Н., 1949; Шайтан В.С., 1974;
- 2 – Миче М.В., 1954;
- 3 – Шанкин П.А., 1958;
- 4 – Курлович Е.В., 1957;
- 5 – Хасхачих Г.Д., 1957;
- 6 – Пышкин Б.А., 1973;
- 7 – Салуквадзе Н.И., 1981;
- 8 – Кульчицкий А.В., 1961;
- 9 – Юрков Ю.Ю., 1965;
- 10 – Лупинский М.И., 1953;
- 11 – Смирнов А.А., 1961;
- 12 – СНИП II 57-75;
- 13 – იორდანიშვილი ი.კ., $h_H/\lambda_H=17$, 2004-2020;
- 14 – იორდანიშვილი ი.კ., $h_H/\lambda_H=20$;
- 15 – იორდანიშვილი ი.კ., $h_H/\lambda_H=14$;
- 16 – იორდანიშვილი ი.კ., $h_H/\lambda_H=13$;
- 17 – იორდანიშვილი ი.კ., $h_H/\lambda_H=10$;
- 18 – იორდანიშვილი ი.კ., მასშტაბური კოეფიციენტების გათვალისწინებით.

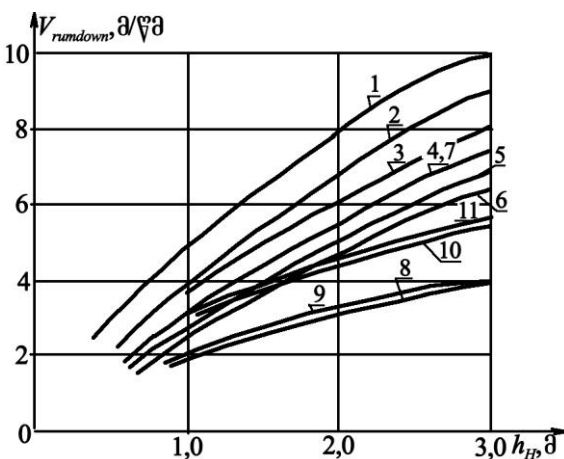
ტალღების ფერდზე აგორების სიჩქარის (V_{runup}) გაანგარიშების შედეგები მოყვანილია გრაფიკული შედარების სახით (ნახ. IV.2.26).



ნახ. IV.2.26. სხვადასხვა მკვლევარების მიერ ($m=3, K=1$) ფერდზე ტალღის აგორების სიჩქარის (V_{runup}) გაანგარიშების შედეგების შედარება

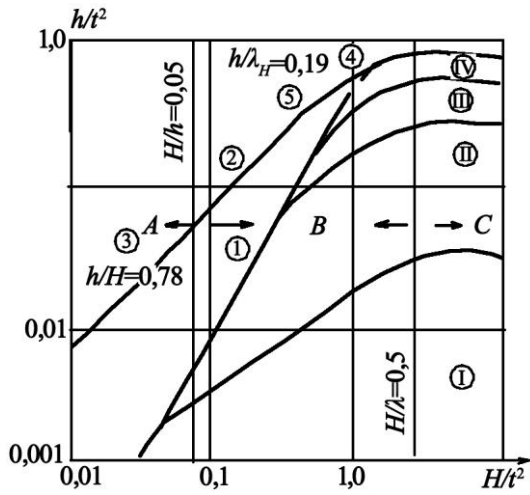
- 1 – Джунковский Н.Н., 1940, $h_H=3,0$ მ, $\lambda_H/h_H=20$; 1940;
- 2 – Джунковский Н.Н., $h_H=1,0$ მ, $\lambda_H/h_H=20,0$; 1940;
- 3 – Джунковский Н.Н., $h_H=3,0$ მ, $\lambda_H/h_H=10$, 1940;
- 4 – Джунковский Н.Н., $h_H=1,0$ მ, $\lambda_H/h_H=10$, 1940;
- 5 – Пышкин Б.А., $h_H=3,0$ მ, $\lambda_H/h_H=20$, 1979;
- 6 – Пышкин Б.А., $h_H=1,0$ მ, $\lambda_H/h_H=20$, 1979;
- 7 – Пышкин Б.А., $h_H=3,0$ მ, $\lambda_H/h_H=10$, 1979;
- 8 – Пышкин Б.А., $h_H=1,0$ მ, $\lambda_H/h_H=10$, 1979.

ტალღების ფერდზე ჩამოგორების სიჩქარის ($V_{run down}$) გაანგარიშების შედეგები მოყვანილია ნახაზზე IV.2.27.



ნახ. IV.2.27. სხვადასხვა მკვლევარების მიერ ფერდზე ტალღების ჩამოგორების სიჩქარის ($V_{run down}$) ცვალებადობის შედეგების შედარება $H=h_H/2$ სიღრმეზე, K - ფერდის ხორკლიანობა; 1-6 – Шайтан В.С., $K=0,5$; 7 – სალუქვაძე ნ., $K=0,96$, $m=3,0$, $\lambda_H/h_H=20$; 8 - იორდანიშვილი ი.კ., $K=0,5$, $\lambda_H/h_H=10$; 9 - იორდანიშვილი ი.კ., $K=0,5$, $\lambda_H/h_H=20$; 10 - იორდანიშვილი ი.კ., $K=1,0$, $\lambda_H/h_H=10$; 11 - იორდანიშვილი ი.კ., $K=1,0$, $\lambda_H/h_H=20$

წყალსაცავის წყალმარჩხ ზონაში ტალღების პარამეტრების გაანგარიშებების სხვადასხვა მეთოდების ანალიზისას გამოვლინდა მათი შედეგების მნიშვნელოვანი განსხვავებები და წინააღმდეგობები. ტალღების სხვადასხვა თეორიებმა გამოიწვია განსხვავებები და ანგარიშის გამოყენების საზღვრები (ნახ. IV.2.28).



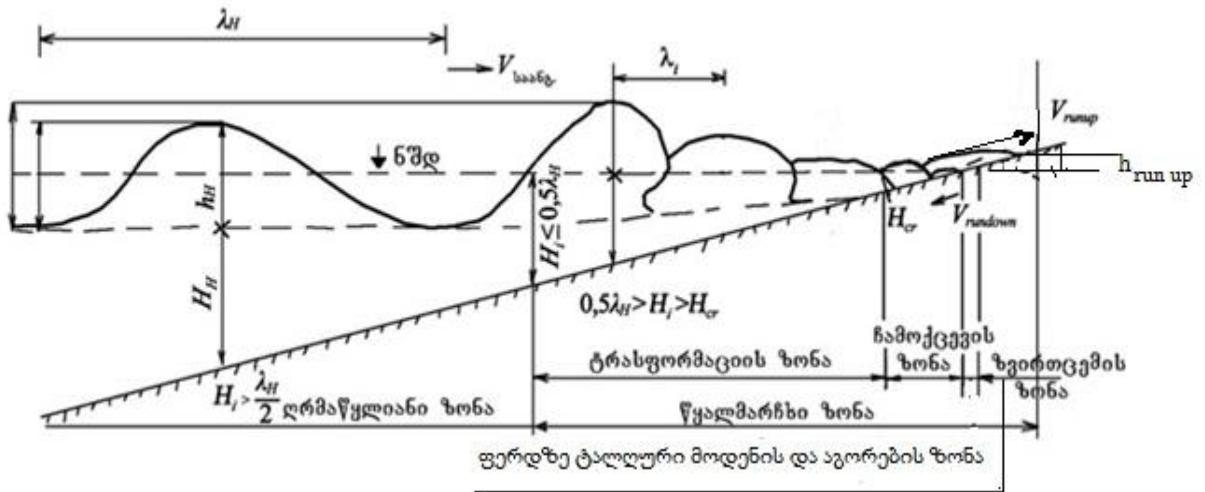
ნახ. IV.2.28. ტალღური თეორიების გამოყენების საზღვრები
 A - ტალღები წყალმარჩხ ზონაში; B - ტალღები შუალედურ სიღრმეზე; C - ტალღები „ღრმა წყალზე“; I – წრფივი თეორია (ჟრი); II – მეორე მიახლოებითი თეორია (სტოკს), III – მესამე მიახლოებითი თეორია (სტოკს), IV – მეოთხე მიახლოებითი თეორია (სტოკს), 1 – ტალღების კნოიდალური თეორია; 2 – ტალღები მსხვერვის ზონაში; 3 – ზღვრული განცალკევებული ტალღა, 4 – განცალკევებული ტალღა „ღრმა წყალზე“; 5 - Mich-ის ფორმულა.

ამრიგად, მთის წყალსაცავებზე განვითარებული ტალღური მოვლენები მრავალფაქტორიანი და რთული პროცესებია. ეს პროცესები მოითხოვს მოქმედი ფაქტორების რაოდენობრივი ზემოქმედების გარკვევით, რაც განხილულია შემდეგ თავში მოყვანილი კვლევის შედეგებში.

IV.2.3. მთის წყალსაცავებში შიდაწყალსატევური პროცესების პროგნოზირება

ტალღური პროცესების პროგნოზირება მთის წყალსაცავის „ღრმა წყალზე“

მთის წყალსაცავების ციკაბო ფერდები განაპირობებს წყალმარჩხზე სიღრმის მკვეთრ ზრდას, სადაც ტალღური პროცესები განვითარდება 5 ზონის მიხედვით (ნახ. IV.2.29) [Иорданишвили И.К., 2003; 2004].



ნახ. IV.2.29. ტალღების ტრანსფორმაციის ზონები

– პირველი ზონა (ღრმა წყლიანი ზონა) – ტრანსფორმაციის $H_H > 0,5\lambda_H$ სიღრმეზე;

– მეორე ზონა (ტალღების ტრანსფორმაციის ზონა) – მოთავსებულია $0,5\lambda_H > H_i > H_{cr}$ სიღრმეებს შორის, ეს არის სტატიკური დატვირთვების მოქმედების ზონა;

– მესამე ზონა (ტალღების ჩამოქცევის ზონა) – მოთავსებულია $h_{run up} < H_{cr} < H_i$ სიღრმეებს შორის, $h_{run up}$ - ეს არის დინამიკური დატვირთვების მოქმედების ზონა;

– მეოთხე ზონა (ტალღური მოდენის ზონა) – მოთავსებულია $\Delta_{max} \geq H_i \geq h_{ტალღ.}^{set}$ სიღრმეებს შორის;

– მეხუთე ზონა (ზვირთცემის ზონა) – მოთავსებულია $H_i \geq h_{ტალღ.}^{set}$ სიღრმეებს შორის.

ფერდის დახრილობის ($\alpha < 6^\circ$) ტრანსფორმაციის ზონაში ტალღის სიმაღლე იზრდება ტალღის დამრეცობის (h/λ) ზრდასთან ერთად.

ჩამოქცევის ზონაში ტალღები კრიტიკულ მდგომარეობაშია. ამ ზონაში ფერდის ხორკლიანობის გამო ტალღის სიმაღლე იზრდება და მისი გავლენა ფასდება შეფარდებით $K_{ხორკ.}'' = \frac{h_{ხორკ.}}{h_{გლუვ.}}$. ფერდის ქანობის ზრდა ყველაზე ძლიერ ვლინდება

ზვირთცემის ზონაში.

ფერდის ხორკლიანობა და ფორიანობა ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ფაქტორია, რომელიც გავლენას ახდენს წყალმარჩხ ზონაში ტალღების ელემენტების ცვლილებაზე.

ტრანსფორმაციის ზონაში ხორკლიანი ფერდი ხელს უწყობს ტალღის დამრეცობისა და სიმაღლის ზრდას, ასევე მისი მდგრადობის შემცირებას.

ზვირთცემის ზონაში ზვირთცემის ტალღა შეიძლება მთლიანად ჩაქრეს და მიიღოს ფერდზე მოსრიალე ნაკადის სახე. ხორკლიანობის ელემენტები ახდენს რა ზვირთცემის ნაკადზე „დამუხრუჭების“ ეფექტს, იწვევს ტალღების აგორების სიჩქარისა და ფერდზე აგორების სიმაღლის შემცირებას, ამასთან, ტალღური მოდენა მაქსიმალურია.

ამ ზონაში ხორკლიანობის (სიმქისის) გავლენა ფასდება ხორკლიანობის კოეფიციენტით (ტალღების აგორების სიმაღლეთა ფარდობა ხორკლიან და გლუვ ფერდებზე) – $K_r = \frac{(h_{run up})_{ხორკლ.}}{(h_{run up})_{გლუვი}}$.

ამრიგად, მთის წყალსაცავების სხვადასხვა ზონაში ტალღების ელემენტების პროგნოზირებისას გასათვალისწინებელია ფაქტორების სიუხვე.

წყალსაცავების „ღრმა წყალზე“ ტალღური პროცესების პროგნოზირება

საქართველოს მთის წყალსაცავების „ღრმა წყალზე“ ჩატარებული საველე დაკვირვებების ანალიზის საფუძველზე შემოთავაზებულია ტალღის საშუალო

სიმაღლის (h_H) საანგარიშო დამოკიდებულება:

$$h_H = A_W \cdot V_W^{1,2} \cdot L^{0,4}, \quad (IV.2.8)$$

სადაც $A_W = (0,022 \div 0,016)a_p$; a_p – წყალსაცავის მთიანობაზე დამოკიდებული კოეფიციენტი; V_W და L - ქარის სიჩქარე (მ/წმ) და ქარისეული ტალღების გაქანების სიგრძე (კმ); a_p -სა და A_W -ს მნიშვნელობები განისაზღვრება ცხრ. IV.2.7-ის მიხედვით:

ცხრილი IV.2.7

a_p და A_W კოეფიციენტების მნიშვნელობები

a_p	0,78	0,51	0,37	0,27	0,16
A_W	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018

1%-იანი უზრუნველყოფის ტალღის ელემენტების სიმაღლე და სიგრძე განისაზღვრება ტალღის დამახასიათებელი ელემენტის საშუალო მნიშვნელობის გამრავლებით (k) კოეფიციენტზე (ცხრ. IV.2.8).

ცხრილი IV.2.8

ტალღის ელემენტების (i) უზრუნველყოფის საანგარიშო გადამყვანი (k) კოეფიციენტების მნიშვნელობები

ტალღის ელემენტების თანაფარდობები	ტალღის ელემენტების თანაფარდობების მნიშვნელობები სხვადასხვა (n) უზრუნველყოფისათვის									შენიშვნა
	1%	2%	5%	10%	20%	30%	50%	70%	95%	
$\lambda_i / \bar{\lambda}_H$	1,82	1,69	1,61	1,50	1,32	1,13	0,98	0,70	0,41	–
t_i / \bar{t}_H	1,64	1,59	1,49	1,38	1,22	1,10	0,96	0,82	0,38	–
h_i / h_H ($h_H / H = 0,05$ სიღრმეზე)	2,12	1,97	1,88	1,77	1,48	1,23	0,95	0,61	0,23	მაქს.
–`–	1,59	1,48	1,43	1,35	1,25	1,13	0,97	0,71	0,45	მინ.
–`–	1,79	1,68	1,57	1,47	1,31	1,18	0,96	0,81	0,38	საშ.
h_i / h_H ($h_H / H = 0,25$ სიღრმეზე)	2,01	1,87	1,71	1,55	1,36	1,21	0,98	0,71	0,40	მაქს.
h_i / h_H ($h_H / H = 0,50$ სიღრმეზე)	1,63	1,51	1,46	1,37	1,25	1,16	1,01	0,86	0,63	მაქს.

– ტალღის პერიოდი (t) „ღრმა წყალზე“ განისაზღვრება ნატურული დაკვირვებების საფუძველზე დამოკიდებულებით:

$$t = 4,08 h_H^{0,59} \quad (IV.2.9)$$

– ტალღის საშუალო სიგრძე ($\bar{\lambda}_H$) იანგარიშება ფორმულით:

$$\bar{\lambda}_H = \frac{0,42 t^2}{2\pi} \quad (IV.2.10)$$

**ტრანსფორმაციის ზონაში წყალსაცავების ფერდზე
ტალღური პროცესების პროგნოზირება**

ტრანსფორმაციის ზონაში n -უზრუნველყოფის ტალღის შეფარდებითი სიმაღლე $\left(\frac{h_i}{h_H}\right)$ განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$\frac{h_i}{h_H} = K \cdot K_r \cdot K_n \cdot f\left(m, \frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right), \quad (IV.2.11)$$

სადაც $K = 0,7 \div 0,8$; K_r – ფერდის ზედაპირის ხორკლიანობის კოეფიციენტი; K_n – ტალღური რეჟიმის უზრუნველყოფის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობებია $-K_n^{0.1\%} = 0,89, K_n^{1.0\%} = 0,71, K_n^{2\%} = 0,69, K_n^{5\%} = 0,63, K_n^{10\%} = 0,59, K_n^{30\%} = 0,52, K_n^{70\%} = 0,39$; $f\left(m, \frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$ მნიშვნელობები იანგარიშება ნომოგრამების ან საანგარიშო ფორმულების გამოყენებით (ცხრ. IV.2.9) [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2010].

ცხრილი IV.2.9

**ფერდზე ტრანსფორმირებული ტალღის შეფარდებითი სიმაღლის (h_i / h_H)
კრებსითი საანგარიშო დამოკიდებულებები**

K	m	H/λ_H	h_H/λ_H	h_i/h_H
1	2	3	4	5
0,8	9,51÷6,31	0,05÷0,21	0,03÷0,05	$K \cdot K_r \cdot K_n \cdot f_1\left(m, H_i / \lambda_H, h_H / \lambda_H\right)$
0,8	6,30÷3,08	0,05÷0,20	0,03÷0,05	$K \cdot K_r \cdot K_n \cdot f_2\left(m, H_i / \lambda_H, h_H / \lambda_H\right)$
0,7	9,5÷0,9	0,03÷0,10	0,03÷0,05	$K \cdot K_r \cdot K_n \cdot f_3\left(m, H_i / \lambda_H, h_H / \lambda_H\right)$
0,7	3,1÷0,9	0,02÷0,1	0,06÷0,1	$K \cdot K_r \cdot K_n \cdot f_4\left(m, H_i / \lambda_H, h_H / \lambda_H\right)$

ტალღის სიგრძე (λ) და პერიოდი (t) ტრანსფორმაციის ზონაში მთის წყალსაცავებზე უმნიშვნელოდ იცვლება, ამიტომ:

$$\lambda_i = \lambda_H, \quad t_i = t_H. \quad (IV.2.12)$$

**„კრიტიკულ“ ზონაში წყალსაცავების ფერდზე
ტალღური პროცესების პროგნოზირება**

ტალღების ჩამოქცევის ზონაში წყლის შეფარდებითი კრიტიკული სიღრმე (H_{cr}/λ_H) განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$H_{cr}/\lambda_H = K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f(m) \cdot f\left(h_H / \lambda_H\right), \quad (IV.2.13)$$

სადაც $K = 2.9 \div 7,0$ მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში IV.2.10; $a_r = 1,5$ –

მასშტაბური კოეფიციენტი; K_r - ფერდის ზედაპირის ხორკლიანობის კოეფიციენტი; $f(m) \cdot f(h_H / \lambda_H)$ მნიშვნელობები იანგარიშება ნომოგრამების ან საანგარიშო ფორმულების გამოყენებით.

ცხრილი IV.2.10

ფერდზე ტრანსფორმირებული ტალღის შეფარდებითი კრიტიკული სიღრმის (H_{cr}/λ_H) კრებსითი საანგარიშო დამოკიდებულებები

K	m	h_H/λ_H	H_{cr}/λ_H
7,0	9,51÷1,5	0,03÷0,055	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_1(m, h_H / \lambda_H)$
7,0	6,30÷3,08	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_2(m, h_H / \lambda_H)$
3,0	3,07÷1,54	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_3(m, h_H / \lambda_H)$
2,9	9,51÷6,21	0,06÷0,1	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_4(m, h_H / \lambda_H)$

კრიტიკულ ზონაში ტალღის შეფარდებითი კრიტიკული სიმაღლე (h_{cr}/h_H) განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$\frac{h_{cr}}{h_H} = K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right), \quad (IV.2.14)$$

სადაც K -ს მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში IV.2.11; $a_r = 1,5$ – მასშტაბური კოეფიციენტი; K_r – ფერდის ხორკლიანობის კოეფიციენტი; $f(m) \cdot f(h_H / \lambda_H)$ – იანგარიშება ნომოგრამების ან საანგარიშო ფორმულების გამოყენებით (ცხრ. IV.2.11).

ცხრილი IV.2.11

ფერდზე ტრანსფორმირებული ტალღის კრიტიკული სიმაღლის (h_{cr}/h_H) კრებსითი საანგარიშო დამოკიდებულებები

K	m	h_H/λ_H	h_{cr}/h_H
1,8	9,5÷6,31	0,03÷0,055	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_1(m, h_H / \lambda_H)$
1,9	6,30÷3,08	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_2(m, h_H / \lambda_H)$
1,1	3,10÷1,540	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_3(m, h_H / \lambda_H)$
1,3	9,5÷1,54	0,06÷0,	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_4(m, h_H / \lambda_H)$

წყალსაცავების ფერდზე ჩამოქცევის ზონაში ტალღური პროცესების პროგნოზირება

ფერდზე ტალღების ჩამოქცევის შეფარდებითი სიღრმე Z/h_H იანგარიშება დამოკიდებულებით:

$$Z/h_H = K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f(m) \cdot f(h_H / \lambda_H), \quad (IV.2.15)$$

სადაც K -ს მნიშვნელობები მოყვანილია IV.2.12 ცხრილში; $a_r = 1,5$ – მასშტაბური კოეფიციენტი; K_r – ფერდობის ხორკლიანობის კოეფიციენტი; $f(m) \cdot f(h_H / \lambda_H)$ – იანგარიშება ნომოგრამების ან საანგარიშო ფორმულების გამოყენებით (ცხრ. IV.2.12).

ფერდზე ტრანსფორმირებული ტალღის შეფარდებითი ჩამოქცევის
სიღრმის (Z/h_H) კრებსითი საანგარიშო დამოკიდებულებები

K	m	h_H/λ_H	Z/h_H
1,0	3,00÷6,31	0,03÷0,055	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_1(m, h_H / \lambda_H)$
1,2	3,0÷0,9	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_2(m, h_H / \lambda_H)$
1,1	6,31÷9,5	0,03÷0,05	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_3(m, h_H / \lambda_H)$
1,2	9,5÷0,9	0,05÷0,1	$K \cdot a_r \cdot K_r \cdot f_4(m, h_H / \lambda_H)$

ზვირთცემის ზონაში წყალსაცავების ფერდზე
ტალღური პროცესების პროგნოზირება

ზვირთცემის ზონაში ტალღის ფერდზე აგორების შეფარდებითი სიმაღლე (h_{runup}/h_H) იანგარიშება ფორმულით:

$$h_{runup}/h_H = K \cdot K_r \cdot K_{გამჭ} \cdot f(m) \cdot f(h_H / \lambda_H). \quad (IV.2.16)$$

სადაც K_r არის ფერდობის ხორკლიანობის კოეფიციენტი; $K_{გამჭ}$ – ფერდობის გამჭოლიანობის კოეფიციენტი; $f(m) \cdot f(h_H / \lambda_H)$ იანგარიშება ნომოგრამების ან საანგარიშო ფორმულების გამოყენებით (ცხრ. IV.2.13); K -ს მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში IV.2.13.

ფერდზე ტრანსფორმირებული ტალღის აგორების შეფარდებითი
სიმაღლის h_{runup}/h_H საანგარიშო კრებსითი დამოკიდებულებები

K	m	h_H/λ_H	h_{runup}/h_H
1,0	9,51÷6,31	0,02÷0,06	$K \cdot K_r \cdot K_{გამჭ} \cdot f_1(m, h_H / \lambda_H)$
0,5	6,30÷3,08	0,02÷0,06	$K \cdot K_r \cdot K_{გამჭ} \cdot f_2(m, h_H / \lambda_H)$
0,4	3,07÷0,90	0,03÷0,06	$K \cdot K_r \cdot K_{გამჭ} \cdot f_3(m, h_H / \lambda_H)$

ფერდზე ტალღის აგორების სიჩქარე (V_{runup}) იანგარიშება ფორმულით:

$$V_{runup} = K \cdot f(H) \cdot f(K_r) \cdot f(h_H) \cdot f(m) \cdot f(\lambda_H / h_H), \quad (IV.2.17)$$

სადაც $K \cdot f(H) \cdot f(K_r) \cdot f(h_H) \cdot f(m) \cdot f(\lambda_H / h_H)$ იანგარიშება IV.2.14 ცხრილში მოყვანილი ფორმულების გამოყენებით; K -ს მნიშვნელობები მოყვანილია ამავე ცხრილში; K_r - ფერდის ხორკლიანობის კოეფიციენტია.

ფერდზე ტალღების აგორების სიჩქარის (V_{runup}) საანგარიშო ფორმულები

K	m	$K \cdot f(H) \cdot f(K_r) \cdot f(h_H) \cdot f(m) \cdot f(\lambda_H / h_H)$
1	2	3
4,33	9,5÷6,1	<p>წყნარი დონის ზევით:</p> $\left(0,3 - \frac{L_i}{\sqrt{1+m^2}}\right) \cdot [-0,24 + 3,11K_r - 1,67K_r^2] \cdot [0,5 + 3,5h_H - 4,36h_H^2] \times$ $\times [12,57 - 222,48(1/m) + 1068,18(1/m)^2] \cdot [-1,50 + 0,35(\lambda_H / h_H) - 0,01 \cdot (\lambda_H / h_H)^2]$
0,58	9,5÷6,1	<p>წყნარი დონის ქვევით:</p> $[1,3 + 10,8z_i] \cdot [-0,24 + 3,11K_r - 1,67K_r^2] \cdot [0,5 + 3,5h_H - 4,36h_H^2] \times$ $\times [12,57 - 222,48(1/m) + 1068,18(1/m)^2] \cdot [-1,50 + 0,35(\lambda_H / h_H) - 0,01(\lambda_H / h_H)^2]$
0,76	6,15÷3,1	<p>წყნარი დონის ზევით:</p> $1,67 \left(0,6 - \frac{L_i}{\sqrt{1+m^2}}\right) \cdot [0,50 + 1,70K_r - K_r^2] \cdot [1,1 + 1,25h_H - 1,25h_H^2] \times$ $\times [0,90 + 8,78(1/m) - 15,69(1/m)^2] \cdot [0,65 + 0,28(\lambda_H / h_H) - 0,01 \cdot (\lambda_H / h_H)^2]$
0,76	6,15÷3,1	<p>წყნარი დონის ქვევით:</p> $[1,0 + z_i] \cdot [0,50 + 1,70K_r - K_r^2] \cdot [1,1 + 1,25h_H - 1,25h_H^2] \times$ $\times [0,9 + 8,78(1/m) - 15,69(1/m)^2] \cdot [-0,65 + 0,28(\lambda_H / h_H) - 0,01(\lambda_H / h_H)^2]$
0,85	3,0÷0,9	<p>წყნარი დონის ზევით:</p> $0,92 \left(1,2 - \frac{L_i}{\sqrt{1+m^2}}\right) \cdot [0,52 + 1,71K_r - 0,97K_r^2] \cdot [0,84 + 1,75h_H - 1,87h_H^2] \times$ $\times [0,88 + 0,90(1/m) - 0,54(1/m)^2] \cdot [0,86 + 0,04(\lambda_H / h_H) - 0,01(\lambda_H / h_H)^2]$
0,85	3,0÷0,9	<p>წყნარი დონის ქვევით:</p> $[1,1 + 3,0z_i] \cdot [0,52 + 1,71K_r - 0,97K_r^2] \cdot [0,84 + 1,75h_H - 1,87h_H^2] \times$ $\times [0,88 + 0,90(1/m) - 0,54(1/m)^2]$

ფერდზე ტალღების ჩამოგორების სიჩქარე ($V_{rundown}$) იანგარიშება დამოკიდებულ-
ლებით:

$$V_{rundown} = V_{runup} / 1,3 \tag{IV.2.18}$$

ტალღური ელემენტების საანგარიშო კრებსითი მონაცემები მოყვანილია ცხრილში IV.2.15.

ტალღების ელემენტების საანგარიშო ფორმულები

საანგარიშო ზონა	საანგარიშო ფორმულები
ტრანსფორმაციის ზონა	$\frac{h_i}{h_H} = K \cdot K_r \cdot K_n \cdot f\left(m, \frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H}\right)$ $\lambda_i = \lambda_H, t_i = t_H$
კრიტიკული ზონა	$\frac{h_{cr}}{h_H} = K \cdot K_r \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right)$ $H_{cr}/\lambda_H = K \cdot K_r \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right)$
ჩამოქცევის ზონა	$Z/h_z = K \cdot K_r \cdot f(m) \cdot f\left(h_H/\lambda_H\right)$
ზვირთცემის ზონა	$h_{runup}/h_H = K \cdot K_r \cdot K_{ფაფ} \cdot f(m) \cdot f\left(\frac{h_H}{\lambda_H}\right)$ $V_{rundown} = V_{runup}/1,3$

$n\%$ -იანი უზრუნველყოფის სამგანზომილებიანი ტალღის სიმაღლე „ღრმა წყალზე“ ორგანზომილებიანი ექვივალენტური ღელვის გადაანგარიშება ხორციელდება შესაბამისი K_h და K_λ კოეფიციენტებისათვის (ცხრ. IV.2.16).

ცხრილი IV.2.16

K_h და K_λ კოეფიციენტების მნიშვნელობები

უზრუნველყოფა, %	0,1	1	2	5	10	20	30	40	50	70
K_h	0,83	0,71	0,69	0,63	0,59	0,53	0,52	0,48	0,43	0,39
K_λ	1,04	0,88	0,84	0,76	0,71	0,60	0,58	0,54	0,49	0,40

ტალღების სიმაღლის განაწილებას ტრანსფორმაციის ზონაში აქვს სახე:

$$F\left(\frac{h_i}{h_H}\right) = \exp\left[-\frac{\pi}{1 + 4\left(\frac{1+h_h}{\sqrt{2\pi}}\right)}\left(\frac{h_i}{h}\right)^{\frac{2}{1-h_x}}\right], \tag{IV.2.19}$$

სადაც $h_x = h/H$.

ტალღის ჩამოქცევის ზონაში ($H=2h$) განაწილებას აქვს სახე:

$$F\left(\frac{h_i}{h_H}\right) = \exp\left[\frac{\pi}{4.8}\left(\frac{h_i}{h_H}\right)^4\right] \tag{IV.2.20}$$

V. სედიმენტაციური პროცესები მთის წყალსაცავების ფსკერზე

V.1. წყალსაცავების ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების დინამიკის არსებული კვლევების ანალიზი

ვაკის ტიპის წყალსაცავების ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესის დალექვის განსაზღვრის მეთოდის წარმოდგენილია ზოგადი დამოკიდებულებით [Караушев А.В., 1977]:

$$t_{\text{პორ.}} = (V_{\text{სრ}} - W_{\text{კალ.წყ.}}) / V_{\text{საშ.}} \text{ (წელი)}, \quad (\text{V.I.1})$$

სადაც $t_{\text{პორ.}}$ - წყალსაცავის მთლიანად დალექვის პირობითი პერიოდი (წლები); $V_{\text{სრ}}$ - წყალსაცავის სრული მოცულობა ნ.შ.დ.-ზე, მ³; $W_{\text{კალ.წყ.}}$ - მდინარის კალაპოტის მოცულობა; $V_{\text{საშ.}}$ - ნატანის პირობითი საშუალო წლიური ჩამონადენი, მ³/წელი.

იმ შემთხვევაში, თუ $W_{\text{კალ.წყ.}} \ll V_{\text{სრ}}$, მაშინ:

$$t_{\text{პორ.}} = V_{\text{სრ}} / V_{\text{საშ.}} \text{ (წელი)} \quad (\text{V.I.2})$$

იმ შემთხვევაში, თუ $t_{\text{პორ.}} < 200$ წელი, მაშინ წყალსაცავის დალექვის პერიოდის ანგარიში ტარდება ქვედა ბიეფში ნატანის ჩამოვადების გათვალისწინებით და ანგარიში რეკომენდებულია ჩატარდეს დალექვის ორი სტადიის მიხედვით. დალექვის პირობითი პირველი სტადიის პერიოდი $t_{\text{პორ.1}}$ განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$t_{\text{პორ.1}} = (V_{\text{სრ}} - 8,33W_{\text{კალ.წყ.}}) / V_{\text{საშ.}} \text{ (წელი)}, \quad (\text{V.I.3})$$

სადაც $W_{\text{კალ.წყ.}} = L \cdot \omega_{\text{კალ.წყ.}}$, L - წყალსაცავის სიგრძე, $\omega_{\text{კალ.წყ.}}$ - კალაპოტის კვეთის ფართობი. პირველი სტადიის განმავლობაში დალექვის მოცულობა იანგარიშება დამოკიდებულებით:

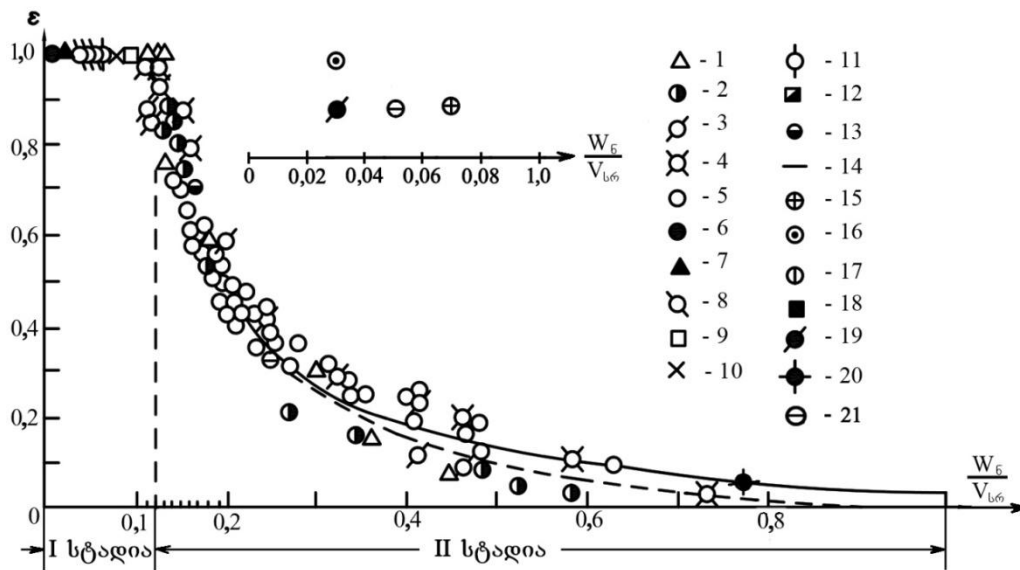
$$V_{\text{საშ.1}} = V_{\text{საშ.}} \cdot t_{\text{პორ.1}} \text{ (მ}^3\text{)}, \quad (\text{V.I.4})$$

სადაც $V_{\text{საშ.1}}$ ნატანის საშუალო წლიური მოცულობა, $t_{\text{პორ.1}}$ - დალექვის პირველი სტადიის პერიოდი.

წყალსაცავის დალექვის პირველი სტადიიდან მეორე სტადიაში გადასვლისას დალექვის ქრონოლოგიის ანგარიში ტარდება გ.ი. შამოვის დამოკიდებულებით [Шамов Г.И., 1969].

სედიმენტაციური პროცესების პროგნოზირება რთულდება მყარი და თხევადი ნატანის მნიშვნელოვანი უთანაბრობით, ნატანის გრანულომეტრიული შემადგენლობის ცვალებადობით, წყლის დონის დიდი რხევებით, ღვარცოფული ნაკადების, ნაპირების აბრაზიული გადამუშავებისა და სხვა პროცესების აქტივიზაციით [Patriadia A., Soemitro R., Warnana D., 2021; Li D., Lux., Overeem I. და სხვ., 2021.; Ran L., Lu X., Xinz., Yang X., 2013; Copinath A., და სხვ., 2014; Mansikkamaki H., 2013; Hosseinjanzadeh. H. და სხვ., 2015; Andredaki M., და სხვ., 2014; Bennett S., და სხვ., 2013, Хмаладзе Г.Н., 1978; Гвелесиანი Л.Г., Шмальцель И.П., 1988; 2014; Метревели Г.С., 1973; Петров Т.Н., 2008; Сванидзе Г., 1988; Скрыльников В.А., 1988; Мамедов А.Ш., Мамедли А.А., 2016; Хаширова Т.Ю., 2007] .

რუსეთის, აშშ-ს, უზბეკეთისა და საქართველოს მთის წყალსაცავებზე ჩატარებული კვლევების თანახმად, წყალსაცავის „ამღვრევის“^{*)} ხარისხი შეიძლება გაიყოს ორ - I და II სტადიად (ნახ. V.1.1).



ნახ. V.1.1. წყალსაცავების დალექვის პროცესის ანალიზის გრაფიკი

1 – ფარხადის ბიეფი, 1949 წ.; 2 – იგივე, 1951 წ.; 3 – იგივე, 1952 წ.; 4 – ხიშრაუსის ბიეფი, 1958 წ.; 5 – ლაბორატორიული მონაცემები; 6 – ყარა-ყუმის წყალსაცავი; 7 – ტაშკერპინის წყალსაცავი (1939-1961 წწ.); 8 – ტეჯენის წყალსაცავი (1950-1959 წწ.); 9 – ბოზ-სუსის ბიეფი; 10 – ლაბორატორიული ბიეფი №1; 11 – ოსტინის წყალსაცავი (აშშ); 12 – ბოსენი (აშშ); 13 – უჩკურგანის ჰესის ბიეფი; 14 – ფორმულა (V.1.4); 15 – სიონის წყალსაცავი (2022 წ.); 16 – თბილისის წყალსაცავი, 2022 წ.; 17 – ჟინვალის წყალსაცავი (2022 წ.); 18 – ხრამის წყალსაცავი (2022 წ.); 19 – შაორის წყალსაცავი (2022 წ.); 20 – ლაჯანურის წყალსაცავი (2022 წ.); 21 – ტყიბულის წყალსაცავი (2022 წ.)

პირველ სტადიაში „ამღვრევის“ ხარისხი მუდმივი რჩება და 1-ის ტოლია ($\varepsilon = W_{\text{საანგ.}} / W_6 = 1$);

მეორე სტადიაში, იმის მიხედვით, თუ როგორ იზრდება $W_6 / V_{\text{სრ.}}$, „ამღვრევის“ ხარისხი მცირდება 1-დან 0-მდე. თუ არ გავითვალისწინებთ ჩარეცხვებს ზედა ბიეფიდან, მაშინ პირველ სტადიაში ხდება ნატანის სრული დალექვა, ე.ი. $\varepsilon = 1$. მეორე სტადიაში გადასვლისას იწყება შეტივტივებული ნატანის ქვედა ბიეფში გამოტანა. ნატანის დალექვის პირველი სტადიიდან მეორე გადასვლის მაჩვენებელია (ნახ. V.1.1):

$$W_6 / V_{\text{სრ.}} \leq 0,12 \quad (\text{V.1.5})$$

ანუ
$$V_{\text{სრ.}} \geq 8,22 W_6, \quad (\text{V.1.6})$$

მაშინ, წყალსაცავის დალექვის პერიოდი პირველი სტადიის განმავლობაში იქნება:

$$t = V_{\text{სრ.}} / Q_6, \quad (\text{V.1.7})$$

სადაც Q_6 ნატანის საშუალო წლიური ხარჯია.

წყალსაცავის დალექვის მეორე (კრიტიკულ) სტადიაში „ამღვრევის“ ხარისხის

^{*)} ტერმინი „ამღვრევა“, ჩვენი აზრით, უფრო შეესაბამება განსახილველ მოვლენას, ვიდრე ტერმინი „გალიავება“, რომელიც მიღებულია რიგი მკვლევარების მიერ.

(ε) ცვლილება შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$\varepsilon = 0,041(W_{\text{საანგ.}}/W_6)^{1,5} \quad (\text{V.1.8})$$

რომელიც წარმოდგენილია V.1.1 ნახაზზე უწყვეტი ხაზით.

მეორე სტადიის დალექვის პერიოდი (t'') იქნება:

$$t'' = \frac{48,8W_{\sigma}^{1,5}}{Q_{\sigma}} \left(\frac{1}{\sqrt{W'_{\sigma} - W''_{\sigma}}} - \frac{1}{\sqrt{W'_6}} \right). \quad (\text{V.1.9})$$

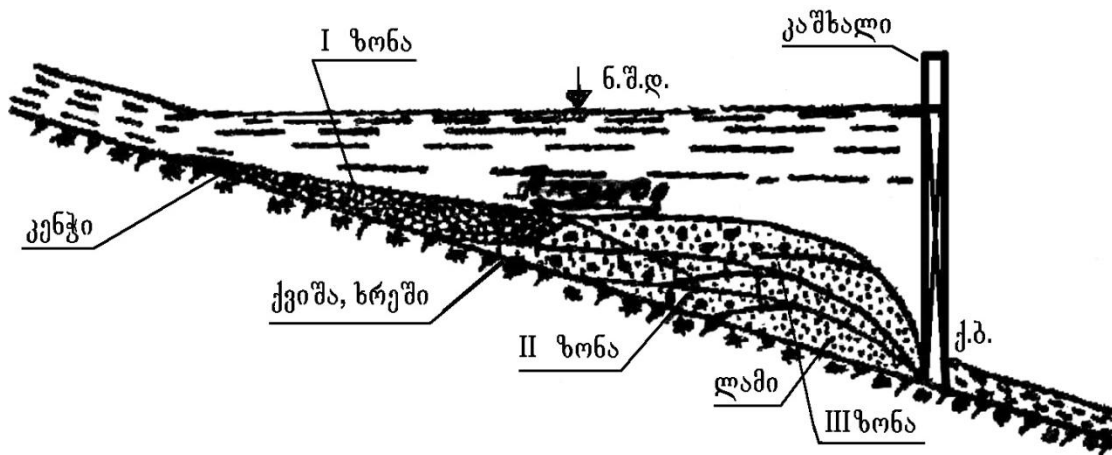
შესაბამისად, დანაღების მოცულობა იქნება:

$$W''_{\sigma} = W'_{\sigma} - \frac{1}{\left(\frac{tQ_{\sigma}}{48,8W_{\text{საანგ.}}^{1,5}} + \frac{1}{W'_{\sigma}} \right)}. \quad (\text{V.1.10})$$

მთის წყალსაცავის დალექვის პროცესი შეიძლება დავყოთ სამ ეტაპად:

- პირველი ეტაპის განმავლობაში შეინიშნება ფსკერის მონოტონურად დალექვა;
- მეორე ეტაპზე დალექვის პროცესის ინტენსივობა მცირდება, რადგან ხდება ნატანის ნაწილის ჩამოგდება ქვედა ბიეფში;
- მესამე ეტაპზე აღინიშნება ნატანის მთლიანად ჩამოგდება ქვედა ბიეფში და პროცესი სტაბილურ ხასიათს იღებს.

მთის წყალსაცავების ფსკერის საზღვრებში ნალექის განაწილების შესაბამისად გამოიყოფა სამი ზონა (ნახ. V.I.2) [Варазашვილი Н.Г., 2001; Варазашვილი Н.Г., Тевзадзе Т.Б., 1999; Воропаев Г.В., Авакян А.Б., 1986; Iordanishvili I.K., Iordanishvili K.T., Iremashvili I. R., 2009; იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ჭარბაძე ზ., ჯავახიშვილი ლ., 2011; Iordanishvili K., Qigely B., Matcharadze C., 2014].



ნახ. V.I.2. მთის წყალსაცავების ფსკერზე ნატანის აკუმულაციის სქემა

I – წყალსაცავის ზემო ნაწილში, სადაც ტბური რეჟიმი პერიოდულად იცვლება კალაპოტურით, ნატანი განსხვავებული ფრაქციულობისაა; II – წყალსაცავის შუა ნაწილში ერთდროულად წარმოიქმნება დალექვის ორი პრიზმა: ერთი – მსხვილი, შეტივტივებული და წვრილი ფსკერული ნატანის და მეორე – მსხვილი ფსკერული ნატანისაგან. აღინიშნება პრიზმების გადაადგილება როგორც ზევით, ისე ქვევით, დინების მიმართულებით; III – კაშხლის მიმდებარე ნაწილში გროვდება ნატანის ძირითადი მასა, კაშხალთან მიახლოებისას ნალექის შემადგენლობის არაერთგვაროვნება ქვეითდება და შრეების სიმკვეთრე ირღვევა.

როგორც ვხედავთ, სედიმენტაციური პროცესების პროგნოზირების არსებული მეთოდები არასრულყოფილია. შემდეგ თავში მოყვანილია საქართველოს რიგ მთის წყალსაცავში სედიმენტაციური პროცესების მასშტაბების, დინამიკისა და პროგნოზირების კვლევის შედეგები.

V.2. საქართველოს მთის წყალსაცავების ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების დინამიკა და პროგნოზირება

კლიმატის გლობალური ცვლილებებით გახშირებულმა სტიქიურმა მოვლენებმა საქართველოს წყალსაცავებში გამოიწვია სედიმენტაციური პროცესების გააქტიურება [იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., ფოცხვერია დ., კანდელაკი ნ., ბილანიშვილი ლ., 2017].

საქართველოს რიგი წყალსაცავების (ჟინვალის, სიონის, თბილისის, ხრამის, შაორის, ლაჯანურის და ტყიბულის) ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების დინამიკისა და პროგნოზირების კვლევის ძირითადი შედეგები მოყვანილია შრომებში [Уйма А., Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Вартанов М.В., Канделаки Н.В., Иорданишвили К.Т., 2019; Kandelaki N., Iordanishvili I., Yjma A., Iremashvili I., Iordanishvili K., Kupreishvili Sh., Shurgaia V., Natroshvili G., 2019; Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Канделаки Н.В., 2012; Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Канделаки Н.В., 2016; კანდელაკი ნ., სილაგამე ა., 2017; კანდელაკი ნ., 2019].

ჟინვალის წყალსაცავი

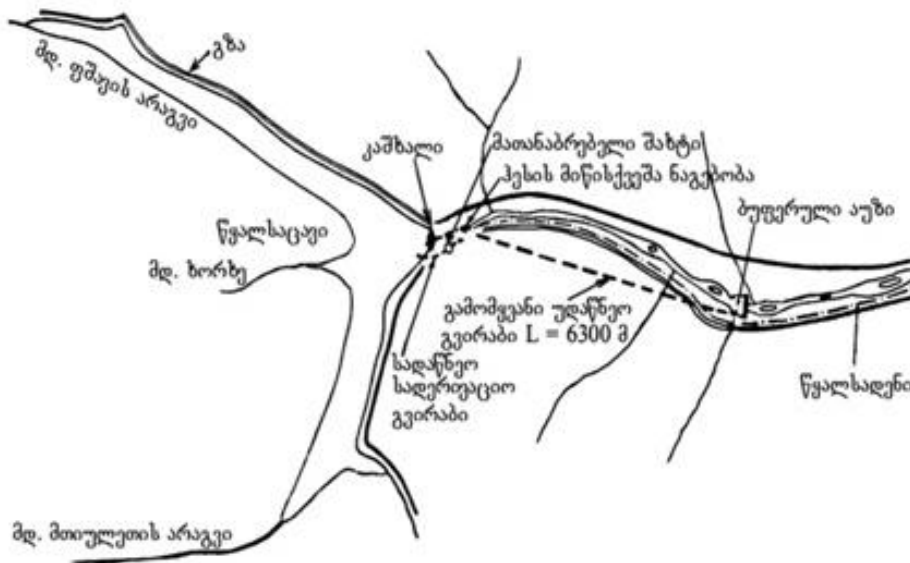
ჟინვალის წყალსაცავიანი სისტემის მოკლე აღწერა

ჟინვალის წყალსაცავი ($V_{სრ} = 510,0$ მლნ მ³, $V_{გვ} = 150$ მლნ მ³) მდებარეობს მდინარეების – მთიულეთის არაგვის, ფშავის არაგვისა და ხორხეს შეერთების რაიონში. წყალსაცავი სეზონური რეგულირებისაა და გამოიყენება ენერგეტიკის, სასმელი წყლით მომარაგებისა და მორწყვისთვის. ამ მიზნით წყალი აიღება ბუფერული აუზიდან, რომლის მოცულობა 1 მლნ მ³-ია და მდებარეობს ჰეს-ის წყალსაცავ ტრაქტზე. წყლის ნაწილი (12,0 მ³/წმ) ჩაედინება თბილისის წყალსაცავში და ხმარდება მორწყვას, ნაწილი კი (5,2 მ³/წმ) ხმარდება ქ. თბილისის სასმელი წყლით მომარაგებას (ნახ. III.2.2; V.2.1).

წყალსაცავის ფსკერი მეზოზოური და კაინოზოური დანალექების უძველესი ცარცული ასაკის ქანებია. ახალგაზრდა ფენები მეოთხეულ ასაკამდე – კონგლომერატებია. კალთებზე ჭარბობს ფლიშეული ფაციების ქანები, ფიქალისებრი მერგელიტებით, კირქვებით, თიხოვანი ფიქლებით და არგილიტებით. მეოთხეული ასაკის ქანები წარმოდგენილია მდინარე არაგვის ჭალების ალუვიებით და პროლუვიალურ-დელუვიალური დანალექების ფენებით.

წყალსაცავი მდებარეობს ტექტონურ ზონაში, ხეობის მარჯვენა კალთაზე ტექტონიკა შედარებით წყნარია. წყალსაცავი კალაპოტური ტიპისაა, გაჭიმულია ორი

მდინარის ხეობის გასწვრივ. მაქსიმალური სიგრძე 12,0 კმ-ია, მაქსიმალური სიგანე – 1,0 კმ, საშუალო - 0,70 კმ. სათავე ნაგებობა წარმოდგენილია ნაყარი კენჭნარი 102,0 მ სიმაღლისა და 415,0 მ სიგრძის კაშხლით, კომპლური წყალმიმღებით, მარცხენა ნაპირზე ხარჯის ადებით (100 მ³/წმ) და სიღრმული წყალსაგდები ხარჯით (1000 მ³/წმ). წყალმიმღებიდან წყალი ტურბინებთან მიედინება 625,0 მ სიგრძის მიწისქვეშა გვირაბით. ჰეს-ის მიწისქვეშა დარბაზში 4 ჰიდროაგრეგატია სიმძლავრით 232,5 ათასი კვტ, დერივაციის საერთო სიგრძე 9,7 კმ და უდაწნეო გვირაბი, რომელიც უერთდება არხს. იგი ახორციელებს წყლის გადაგდებას ბუფერულ (ბოდორნა) აუზში.



ნახ. V.2.1. ჟინვალის წყალსაცავის სქემა

დონური რეჟიმი არასტაბილურია. წყალსაცავის მაქსიმალური სიღრმეა 94,0 მ, საშუალო - 50,0 მ, წყლის დონის მერყეობის ამპლიტუდა - 40,0 მ.

ქარისმიერი ღელვა განვითარებულია წყალსაცავის გაფართოებულ ნაწილში და ხასიათდება არარეგულარობით. ყველაზე ძლიერი ღელვა შეინიშნება ხეობებში.

სედიმენტაციური პროცესები ჟინვალის წყალსაცავის ფსკერზე

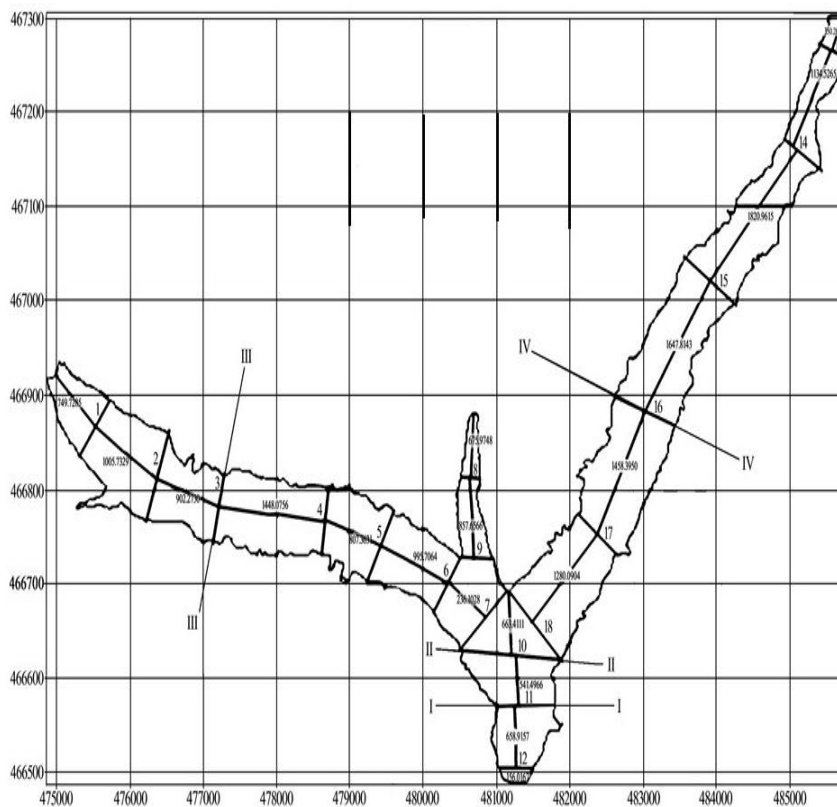
ჟინვალის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილი ნატანის მოცულობის რაოდენობა დადგინდა წყალსაცავის ფსკერის შედარებით შესაბამისი ადგილმდებარეობის ტერიტორიების სახელმწიფო რუკებთან, რომლებიც გადაღებული იყო წყალსაცავის შევსებამდე (1985 წ), ნახ. V.2.2. ნატანის მოცულობის ცვლილებებიდან გამომდინარე იკვეთება შემდეგი კანონზომიერებანი: დანალექი ნატანის ფენის სიმაღლე ყველაზე მაღალია კაშხლის სიახლოვეს. აქ ფენის სიმაღლე 30,0 მეტრამდეა. დალექვის პროცესი ყველაზე ინტენსიურად მიმდინარეობს წყალსაცავის უბანზე მდინარეების ბუნებრივი ფსკერის $\pm 740-765$ მ ნიშნულებს შორის, რომლის სიგრძეა 2000÷2200 მ. წყალსაცავში შესვლის შემდეგ მდინარის წყლის დინების სიჩქარე იკლებს წყლის სიღრმისა და მასთან ერთად ნაკადის ცოცხალი კვეთის მატების გამო, რაც განაპირობებს ჯერ მსხვილი ფრაქციების, შემდეგ კი ნაკლები სიმსხოს ნაწილაკების დალექვას. ეს პროცესი მიმდინარეობს ფსკერის ± 770 მ ნიშნულს ქვევით.

2012–2022 წლებში ჩატარებული საველე კვლევების შედეგად დაფიქსირდა გეოდეზიური წერტილები კოორდინატთა სისტემაში, ხოლო ბათომეტრიული რუკების გამოყენებით დაინიშნა ძირითადი - I, II, III და IV კვებები. პროფილები შედარებული იყო 2010 წელს „ჰიდროსფეროს“ მიერ ჩატარებული საველე კვლევის მონაცემების შედეგებთან (ნახ. V.2.3).

დალექილი ნატანის ჯამური მოცულობა წყალსაცავის პირველი 25 წლის ექსპლუატაციის პერიოდში (1985-2010 წწ.) შეადგენდა $W_{ნატ.}=63,0$ მლნ მ³, 2017 წლისთვის $W_{ნატ.}=121,54$ მლნ მ³, ხოლო 2019 წლისთვის $W_{ნატ.}=125,0$ მლნ მ³, [კანდელაკი ნ., 2019], 2022 წლისთვის $W_{ნატ.}=126,0$ მლნ მ³.

თუ წყალსაცავის დალექვა გაგრძელდება ასეთი დინამიკით, საპროგნოზო გათვლებით, კრიტიკულ $\pm 760,0$ მ ნიშნულს დალექვის ზედაპირი მიაღწევს 2025 წელს, ამ დროს დალექილი იქნება 140 მლნ მ³ ნატანი. ამ ნიშნულზე მდებარეობს ჰიდროკვანძის წყალმიმღები; დალექილი მასალის ზედაპირის მიახლოება წყალმიმღებთან გამოიწვევს წყლის სიმღვრივის მატებას, რის შედეგადაც ინტენსიური გახდება ჰიდროაგრეგატების ცვეთა და გაუარესდება სასმელი წყლის ხარისხი. ხოლო წყალსაცავი თანდათან დაკარგავს თავის წყლის მარეგულირებელ ფუნქციას.

ექსტრემალურ პირობებში, როდესაც ჰიდროკვანძზე ხორციელდება წყლის გადაგდება ფსკერული წყალსაცავები გვირაბის მეშვეობით, რომლის გამტარუნარიანობა 1000 მ³/წმ - შეადგენს, გვირაბის პორტალის წინ ვითარდება დიდი სიჩქარე, რაც გამოიწვევს დალექილი ნატანის ატივტივებას.



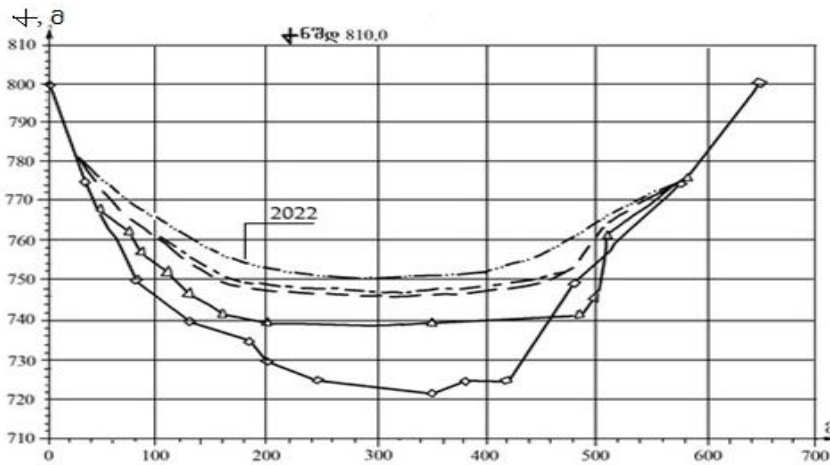
ნახ. V.2.2 ჟინვალის წყალსაცავის საანგარიშო განივი კვებები (I, II, III, IV)

იმის გამო, რომ წყალმიმღები და წყალსადენი გვირაბი ერთმანეთის ახლო მანძილზეა განლაგებული, წყალმიმღებში მოხვედრილ წყალს ექნება სიმღვრივის გაზრდილი კონცენტრაცია.

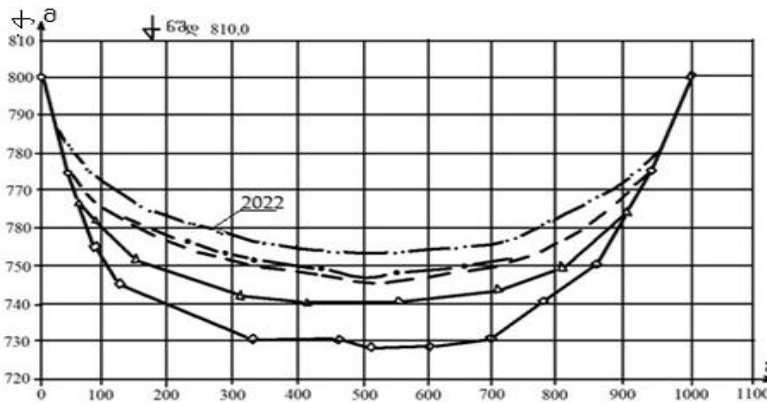
ჟინვალის წყალსაცავის პროექტში მკვდარი მოცულობის დალამვისათვის საჭირო პერიოდია 120-140 წელი, ხოლო წყალსაცავის მთლიანად ამოსავსებად – 400-500 წელიწადი (ნახ. V.2.3; V.2.4; ცხრ. V.2.1).

როგორც ჩანს, ნატანის დალექვის ფაქტობრივი პერიოდი 2,5 - ჯერ უფრო მცირეა, ვიდრე ეს იყო გათვალისწინებული პროექტით. ჟინვალის წყალსაცავის ჰიდროლოგიური საგუშაგოს კვეთში ფსკერული ნატანის საშუალო მრავალწლიური ხარჯი შეფასებულია, როგორც ტიპტივა ნატანის 20%.

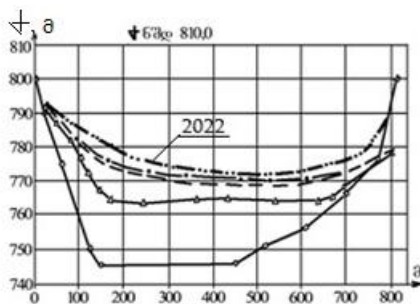
I-I



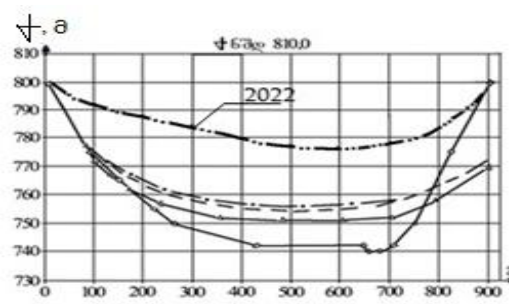
II-II



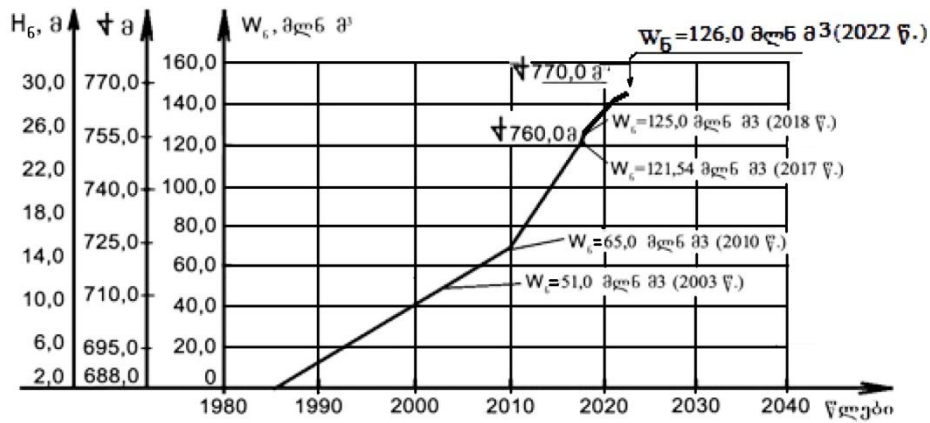
III-III



IV-IV



ნახ. V.2.3. ჟინვალის წყალსაცავის განივკვეთების მოსილვის დინამიკა
 —○— — საპროექტო; —Δ— — 2003 წ.; — — — — 2011 წ.; — · — — — 2017 წ.; — · · — — — 2022 წ.



ნახ. V.2.4. ჟინვალის წყალსაცავის ფსკერის საანგარიშო მოსილვის დინამიკა ექსპლუატაციის დაწყებიდან დღემდე (1985-2022 წწ.); (H_t – ნატანის სისქე კაშხალთან, მ)

2022 წლისათვის ჟინვალის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილია 126,0 მლნ მ³ ნატანი. 2010 წლამდე დალექვის პროცესი ნაკლებად ინტენსიურია, ხოლო 2010 წლის შემდეგ – გახშირებული წყალდიდობებისა და წყალსაცავში წყლის მომატებული მოცულობის გამო იზრდება ნატანის დაგროვების ინტენსივობა $W_{ნატ}/t=8,08$ მლნ მ³/წელიწადში.

ცხრილი V.2.1

ჟინვალის წყალსაცავის ფსკერზე
სედიმენტაციური პროცესების დინამიკა

საველე სამუშაოების ჩატარების წელი	წყალსაცავის საპროექტო სრული მოცულობა $V_{სრ}$, მლნ მ ³	ექსპლუატაციაში შესვლის წელი	ნშდ ნიშნული, მ	წყალსაცავის სიგრძე/სიგანე (L/B), კმ	წყალსაცავის მაქს. სიღრმე (H), მ (საპროექტო)	წყალსაცავის სარკის ფართობი ნშდ-ზე (F), კმ ² (საპროექტო)	ნატანის ჯამური მოცულობა ($W_{ნატ}$), მლნ მ ³	ნატანის დაგროვების ინტენსივობა ($W_{ნატ}/t$), მლნ მ ³ /წელი
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2003	520,0	1985	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	51,0	2,9
2010	520,0	1985	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	65,0	2,9
2017	520,0	1985	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	121,54	8,08
2022	520,0	1985	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	126,0	8,1

ჟინვალის წყალსაცავში დაგროვილი ნატანის ჯამური საერთო მოცულობა ნებისმიერ დროში იანგარიშება ემპირიული ფორმულით:

$$W_{ნატ} = 65,0 + 8,1 \cdot (t - 2010), \text{ მლნ მ}^3, \quad (V.2.1)$$

სადაც t არის საანგარიშო წელი (2010 წლის შემდეგ).

თუ ნატანის დაგროვების ასეთი დინამიკა შენარჩუნდება, 2025 წლისთვის ჟინვალის წყალსაცავში მყარი ნატანის მოცულობა გაუტოლდება წყალსაცავის მკვდარ მოცულობას ($W_{ნატ} = V_{მკვდ} \approx 150,0$ მლნ მ³).

სიონის წყალსაცავი სიონის წყალსაცავიანი სისტემის მოკლე აღწერა

სიონის წყალსაცავი წარმოადგენს სამგორის სარწყავი სისტემის პირველ საფეხურს ($V_{სრ.} = 325,0$ მლნ მ³, $V_{გვდ.} = 25,0$ მლნ მ³, ნახ. V.2.5). ის დაპროექტებულია მდინარეული წყლის წლიური ჩამონადენის რეგულირებით და უზრუნველყოფს სარწყავი წყლით სამგორის ხეობას და ოთხი მცირე ჰეს-ის კასკადს. წყალსაცავი მდებარეობს თიანეთის რაიონში მდ. იორზე. წყალსაცავის უბანში მდინარის ხეობა ტრაპეციული ფორმისაა, სიგანით 0,8-2,0 კმ. კალთების დახრილობაა $8^{\circ} \div 40^{\circ}$, დასერილია მრავალრიცხოვანი გვერდითი შენაკადით და მშრალი ხევებით, რომელთაც გამოაქვს ნამსხვრევი მასალა. მდ. იორის მაქსიმალური წლიური ხარჯი კაშხლის კვეთში არის 400 მ³/წმ, ნატანის საშუალო წლიური ხარჯი – 14,6 კგ/წმ, 1%-იანი უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯი – 820,0 მ³/წმ.

წყალსაცავის ქვაბულის ფორმირებაში მონაწილეობს ტექტონური და მდინარის ეროზიულ-აკუმულაციური პროცესები. მარჯვენა ნაპირი დამრეცია, კლდოვანი, ძლიერი დელუვიალური საფარით, მეწყრული მოვლენებით. მარცხენა ნაპირი აგებულია კენჭოვან-კაჭრიანი პროლუვიით.

გეოლოგიურ აგებულებაში მონაწილეობს ასაკოვანი ქანები: ქვედა ცარცული კირქვა, ეოცენის ქვიშნარი, მეოთხეული კონგლომერატები. თანამედროვე დანალექების სისქე მერყეობს 1,0-დან 4,0 მ-მდე.

წყალსაცავი კალაპოტური ტიპისაა, მიწის კაშხლის სიმაღლე 96,0 მ. წყლის აღება ენერგეტიკისა ($Q = 23,0$ მ³/წ) და ირიგაციისათვის ($Q = 24$ მ³/წ) წარმოებს წყალსაცავის მარცხენა ნაპირიდან, სიღრმული წყალმიმღებით. წყალსაცავის სიგრძეა 11,5 კმ; სიგანე – 0,8 კმ, მაქსიმალური – 2,0 კმ, საშუალო სიღრმე – 31,4 მ, მაქსიმალური – 68,6 მ [კანდელაკი ნ., სილაგაძე ა., 2017].

დონური რეჟიმი გამოირჩევა წლიური ციკლურობით, შემოდგომის მინიმუმით და გვიანი გაზაფხულის მაქსიმუმით. წყლის დონის ამპლიტუდა 55,0 მ-ია (ნახ. V.2.6).

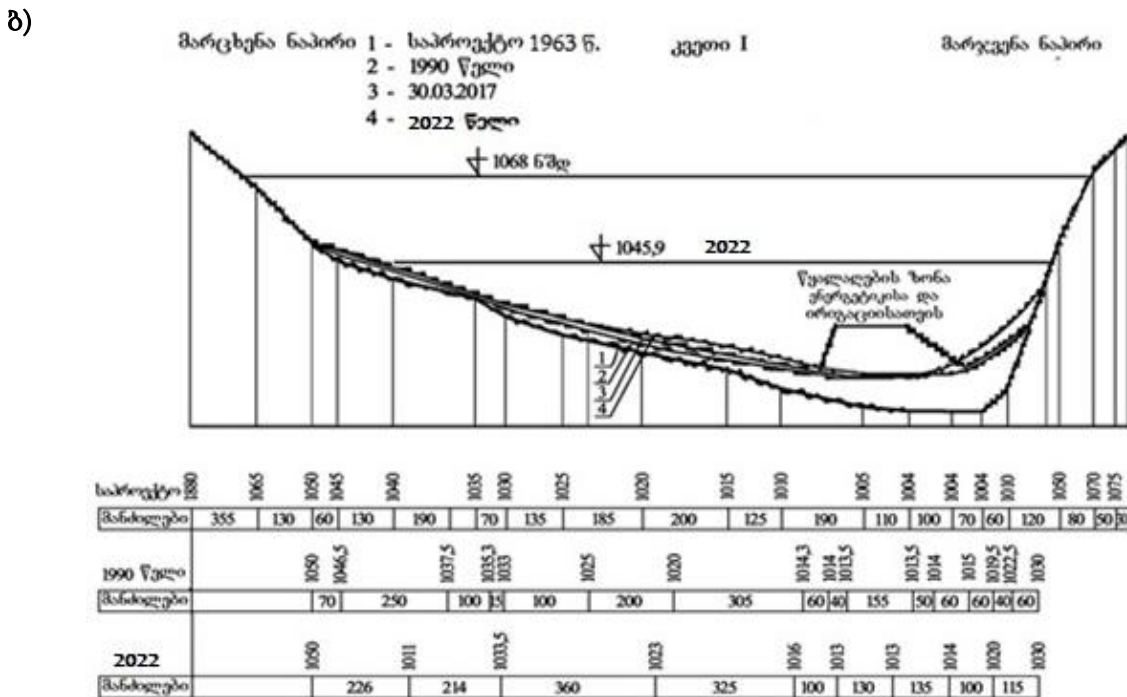
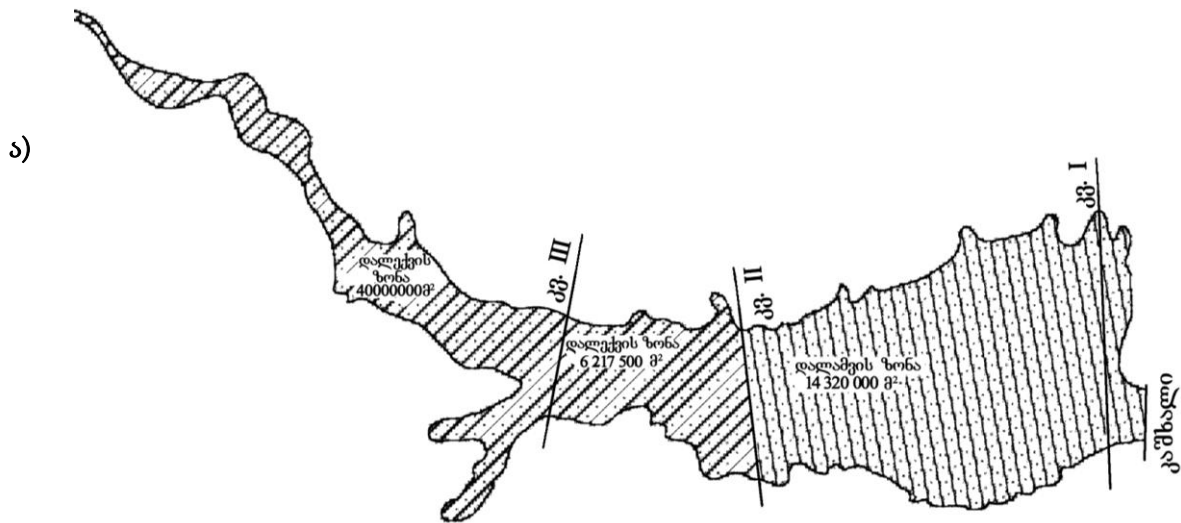


ნახ. V.2.5. სიონის წყალსაცავის სქემა

ქარის რეჟიმი გამოირჩევა ქარის ძალისა და მიმართულებების ძლიერი ცვლილებით. ქარის მაქსიმალური სიჩქარეა 26,0-28,0 მ/წმ, შტილის პროცენტი – 37%. ტალღები ვითარდება დასავლეთ და სამხრეთ-აღმოსავლეთ მიმართულებით. ტალღის მაქსიმალური სიმაღლე 1,0-1,5 მ-ია; 50%-იანი განმეორადობის ტალღის სიმაღლე – 0,6-0,7 მ. ჰეს-ის გაჩერებისას წყლის ირიგაციული დანიშნულებისათვის გაშვება სრულდება სპეციალური წყალგამშვები გვირაბის საშუალებით.

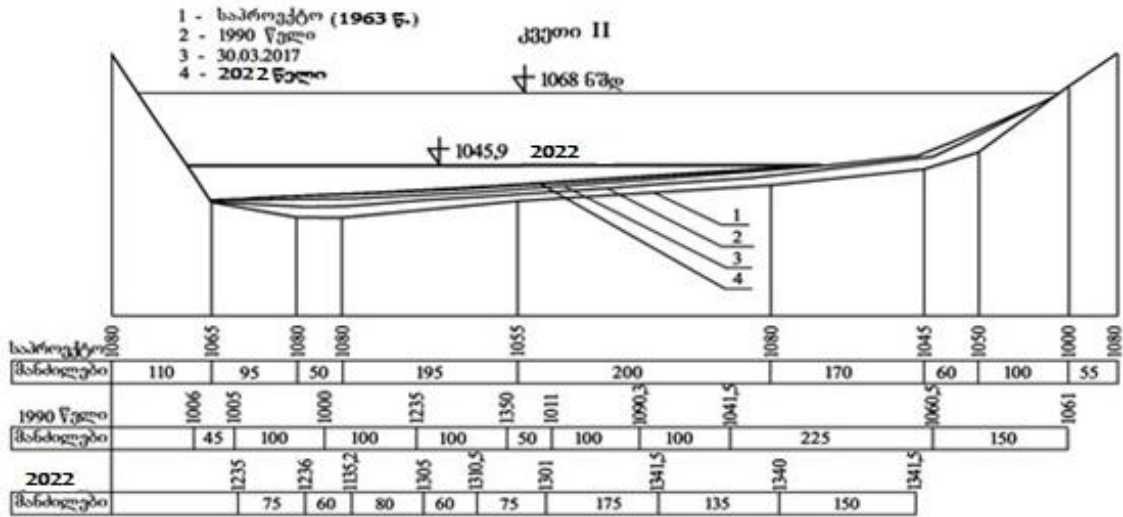
სედიმენტაციური პროცესები სიონის წყალსაცავის ფსკერზე

სიონის წყალსაცავის ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების შეფასების საკითხები მეტად მნიშვნელოვანია, რადგან ეს ობიექტი შექმნილია გასული საუკუნის შუა წლებში და უკვე „დაბერების“¹ (დაძველების) სტადიაშია. წყალსაცავში შეიმჩნევა დალეილი ნატანის მოცულობის სწრაფი ზრდა, რის გამოც მცირდება წყლის მოცულობა და წყალსაცავი კარგავს თავის მთავარ დანიშნულებას – წყლის დაგროვებისა და რეგულირების ფუნქციას. სიონის წყალსაცავზე ჩატარებული სავსე კვლევები მოიცავდა მისი ფსკერის ბათომეტრიას, რომლის აზომვებიც ჩატარდა ბათომეტრიული რუკის გამოყენებით შერჩეულ 3 კვეთში: I – დალამვის ზონაში, II და III – დალექვის ზონაში (ნახ. V.2.6).

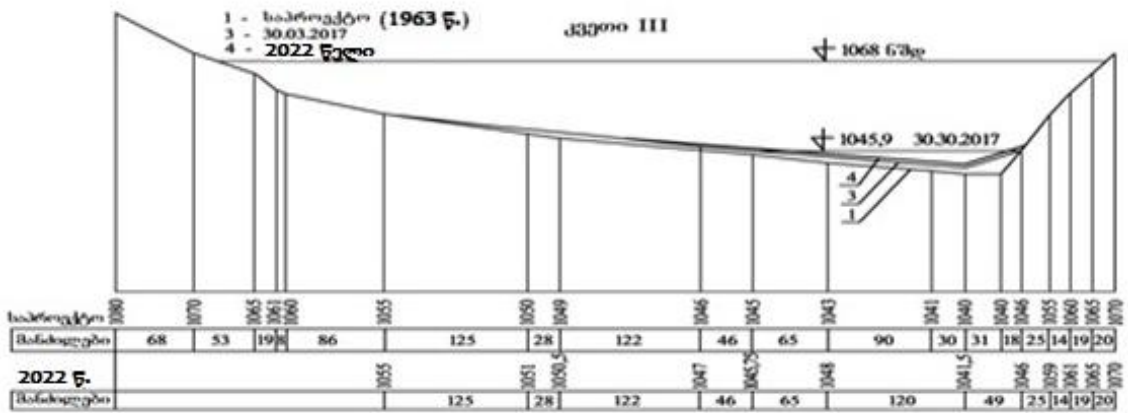


¹ ტერმინი ჰიდროტექნიკური ნაგებობების «დაბერება» (старение) პირველად იყო შემოთავაზებული აკადემიკოს ც. მირცხულავას მიერ [Мирцхулава И.Е., 1999].

გ)



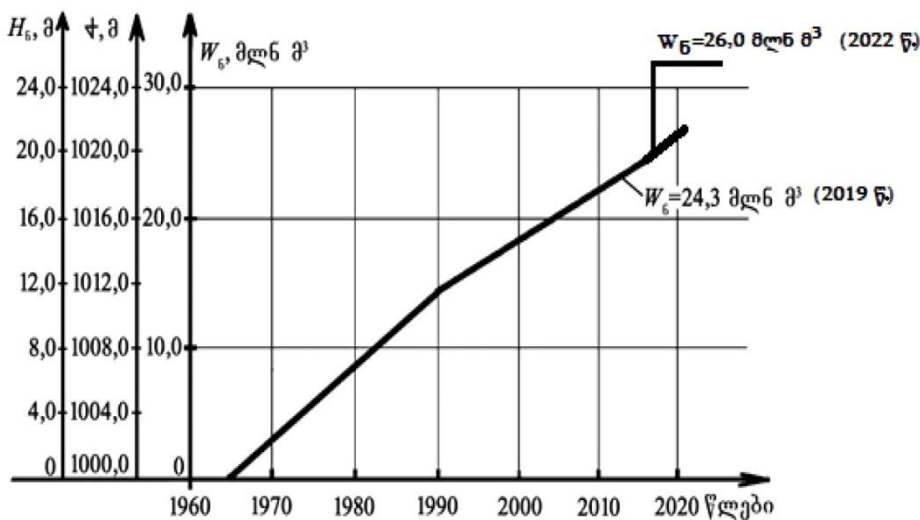
დ)



ნახ. V.2.6. სიონის წყალსაცავის განივკვეთების მოსილვის დინამიკა ექსპლუატაციის დაწყებიდან (1963-2022 წწ.):

- ა - სიონის წყალსაცავის ფსკერის დაღამვისა და დაღეკვის 2022 წლის მონაცემები;
- ბ - I კვეთი; გ - II კვეთი; დ - III კვეთი

არსებული და ჩვენ მიერ ჩატარებული საველე სამუშაოების მონაცემების ანგარიშის შედეგები მოყვანილია ნახაზზე V.2.7 და ცხრილში V.2.2.



ნახ.V.2.7. სიონის წყალსაცავის ფსკერის საანგარიშო მოსილვის დინამიკა ექსპლუატაციის დაწყებიდან (1963-2022 წწ.) (H_6 – ნატანის სისქე კაშხალთან, მ)

2022 წლისთვის სიონის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილია **26,0 მლნ მ³-მდე ნატანი**, კაშხლის მიმდებარე ნაწილში ნატანის სიმაღლე 25,0 მ-მდეა. 1963 წლიდან დაღეჟვის პროცესი თითქმის თანაბარია, ხოლო სედიმენტაციური პროცესის გამო დაგროვილი ნატანის მოცულობა (ანუ 1963 წლიდან ნებისმიერ დრომდე) შეიძლება გამოვიანგარიშოთ ემპირიული ფორმულით:

$$W_{ნატ.} = 0,45 \cdot (t - 1963), \text{ მლნ მ}^3, \quad (V.2.2)$$

სადაც t არის საანგარიშო წელი.

ცხრილი V.2.2

სიონის წყალსაცავის ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების მაჩვენებლები

საველე სამუშაოების ჩატარების წელი	წყალსაცავის საპროექტო სრული მოცულობა $V_{სრ.}$, მლნ მ ³	ექსპლუატაციაში შესვლის წელი	ნმდ ნიშნული, მ	წყალსაცავის სიგრძე და სიგანე (L/ B), კმ	წყალსაცავის მაქსიმალური სიღრმე (H), მ	წყალსაცავის სარკის ფართობი ნმდ-ზე, კმ ²	ნატანის ჯამური მოცულობა (W_6) მლნ მ ³	ნატანის დაგროვების ინტენსივობა (W_6/t) მლნ მ ³ /წელ.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1990	325,0	1963	1068,0	11,5/20	68,0	11,4	13,12	0,47
2017	—	—	—	—	—	—	24,30	0,43
2022	—	—	—	—	—	—	26,0	0,45

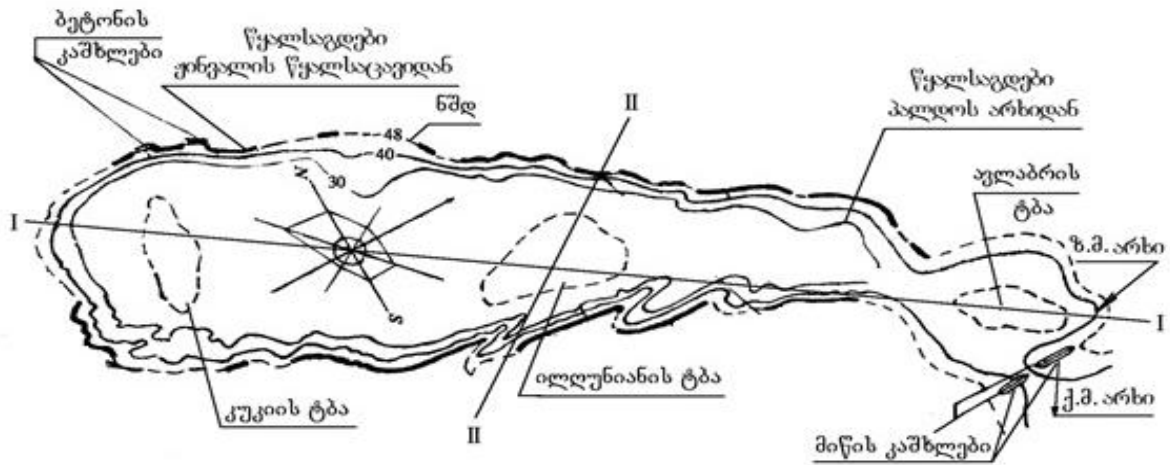
თბილისის წყალსაცავი

თბილისის წყალსაცავიანი სისტემის მოკლე აღწერა

თბილისის წყალსაცავი წარმოადგენს ძირითად კვანძს ზემო სამგორის სარწყავი სისტემის ნაგებობათა კომპლექსში, წყალსაცავი შესავსები ტიპისაა, შექმნილია სამი მარილიანი ტბის ბაზაზე და იკვებება მდ. იორის ზემო სამგორის მაგისტრალური არხით – ხარჯი 130,0 მ³/წმ და ჟინვალის წყალსაცავიდან – ხარჯი 15,0 მ³/წმ.

ტბების ქვაბულებით წარმოქმნილი ღრმული გაჭიმულია ჩრდილო-დასავლეთიდან სამხრეთ-აღმოსავლეთისაკენ, 8,0 კმ სიგრძისა და 2,0 კმ-მდე სიგანის, მაქსიმალური სიღრმე – 45,0 მ, საშუალო – 26,0 მ. მისი ფსკერი შევსებულია დელუვიალურ-პროლუვიალური დანალექებით, წარმოდგენილია თიხით და შემოსაზღვრულია ბრტყელი ტერასისებრი შემადლებებით.

წყალსაცავის საპროექტო სრული მოცულობა იყო $V_{სრ} = 308,0$ მლნ მ³, სასარგებლო მოცულობა – $V_{სს} = 155,0$ მლნ მ³. გასული საუკუნის 80-იან წლებში განვითარებული უარყოფითი მოვლენების გამო (წყლის ფილტრაცია ორი ბეტონის კაშხლის პერიმეტრიდან და თბილისის საცხოვრებელი რაიონის – თმქ – დატბორვა) წყლის დონე შეამცირეს 10,0 მეტრით – $\pm 548,0$ მ-დან $\pm 538,0$ მ-მდე. წყალსაცავის მაქსიმალური სრული მოცულობა შემცირდა და შეადგენს $V_{სრ} = 215,0$ მლნ მ³-ს, $V_{სს} = 155,0$ მლნ მ³, $V_{გვ} = 60,0$ მლნ მ³ (ნახ. V.2.8).



ნახ. V.2.8. თბილისის წყალსაცავის სქემა
I - I, II - II - საკვლევი კვეთები

წყალსაცავი შექმნილია 9,0 და 12,0 მ სიმაღლის ორი ბეტონის კაშხლით და 10,0 მ და 12,0 მ სიმაღლის ორი მიწის კაშხლით.

წყალსაცავის ფსკერის გეოლოგიურ აგებულებაში მონაწილეობს ქვიშნარები და მესამეული ასაკის ფიქალისებრი თიხები. მისი სამხრეთი ნაწილი დაფარულია მეოთხეული დანალექებით. ჩრდილოეთ ნაწილშიც კარსტული ქანებია. ძირითადი ქანები წარმოდგენილია ქვიშნარებითა და არგილითებისა და ალევრიტების ქანებით. დონური რეჟიმი არასტაბილურია. დონის დამუშავების სიმაღლეა 13,0 მ. ქარისმიერი ღელვა მიმართულია წყალსაცავის გასწვრივ. ქარის სიჩქარეა 23,0-34,0 მ/წმ, უზრუნველყოფა – 2,55%, ტალღის სიმაღლე – 1,2-1,4 მ. ღელვა გამოირჩევა ძლიერ არარეგულარობით.

წყალსაცავი გამოიყენება საირიგაციოდ და სასმელი წყლისათვის. ქვედა სარწყავ მაგისტრალურ არხში წყლის აღება ხორციელდება წყალსაცავის სამხრეთ-აღმოსავლეთ ნაწილში, კომპურა ტიპის წყალმიმღებით. ამავე რაიონში ხდება წყლის აღება თბილისისა და რუსთავის წყალმომარაგებისათვის.

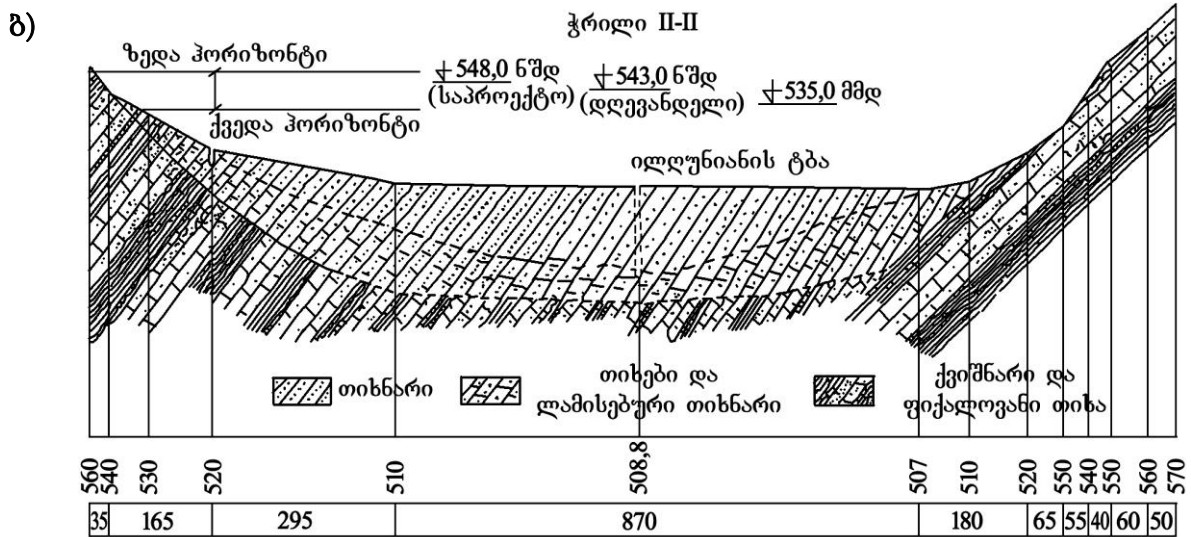
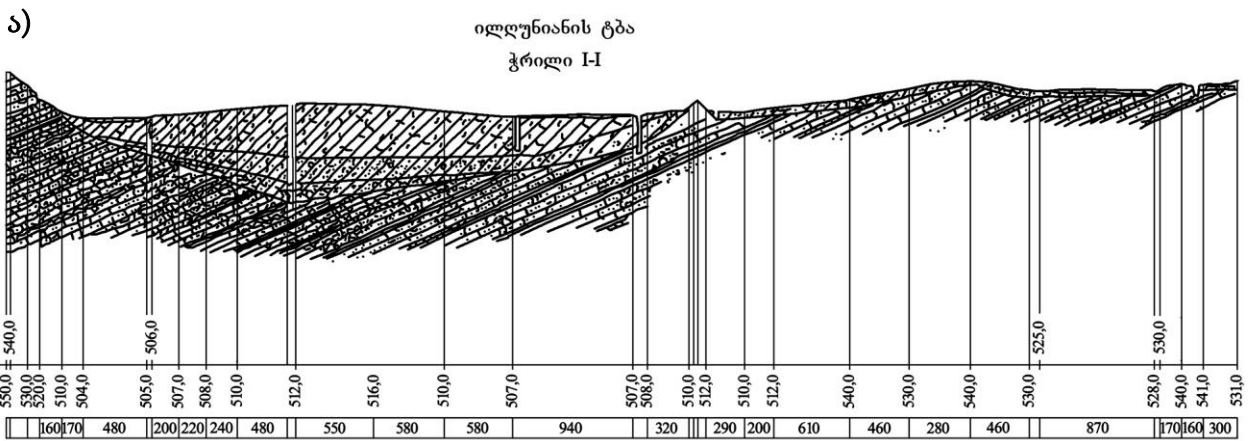
სედიმენტაციური პროცესები თბილისის წყალსაცავის ფსკერზე

თბილისის წყალსაცავის ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესები, ძირითადად, მიმდინარეობს მის ღრმულეებში არსებულ სამ ჩამირულ ტბაში – კუკიის, ილლუნიაის და აულაბრის (ნახ. V.2.8). თბილისის წყალსაცავი შექმნილია გასული საუკუნის შუა წლებში და იგი უკვე „დაბერების“ (დაძველების), ანუ მისი ფუნქციონირების საიმედოობის შემცირების სტადიაშია. თბილისის წყალსაცავზე ჩატარებული სავსე კვლევები მოიცავდა მისი ფსკერის ბათომეტრიას ორ კვეთში (I – I, II – II), ნატანი ძირითადად გროვდება ილლუნიაის ტბის ღრმულში (ნახ.V.2.8). პროცესის ასეთი თავისებურება განპირობებულია ორი ფაქტორით: 1) ძლიერი ტალღური მოქმედებით ილლუნიაის ტბისკენ, რის გამოც ნატანი ჩაედინება მის ღრმულში და 2) ამ უბნის ნაპირების ძლიერი დასერილობითა და მცირე ყურეებით (ნახ.V.2.9; V.2.10; V.2.11; ცხრ. V.2.3).

თბილისის წყალსაცავის ფსკერზე
სედიმენტაციური პროცესების მაჩვენებლები

წელი	წყალსაცავის მოცულობა, მლნ მ ³			დაგროვილი ნატანის რაოდენობა (ილლუნიაანის ტბის დრმულში), მლნ მ ³	% ($V_{სრ}$ -დან)	ერთ წელიწადში დაგროვილი ნატანის მოცულობა მლნ მ ³ /წელ.
	$V_{სრ}$	$V_{მკვდ}$	$V_{სას}$			
საპროექტო	308,0	60,0	60,0			
1970 *)	215,0	—	60,0			0,15
1978	215,0	—	60,0	3,23	1,5	0,16
2022	215,0	—	—	9,6	3,0	0,182

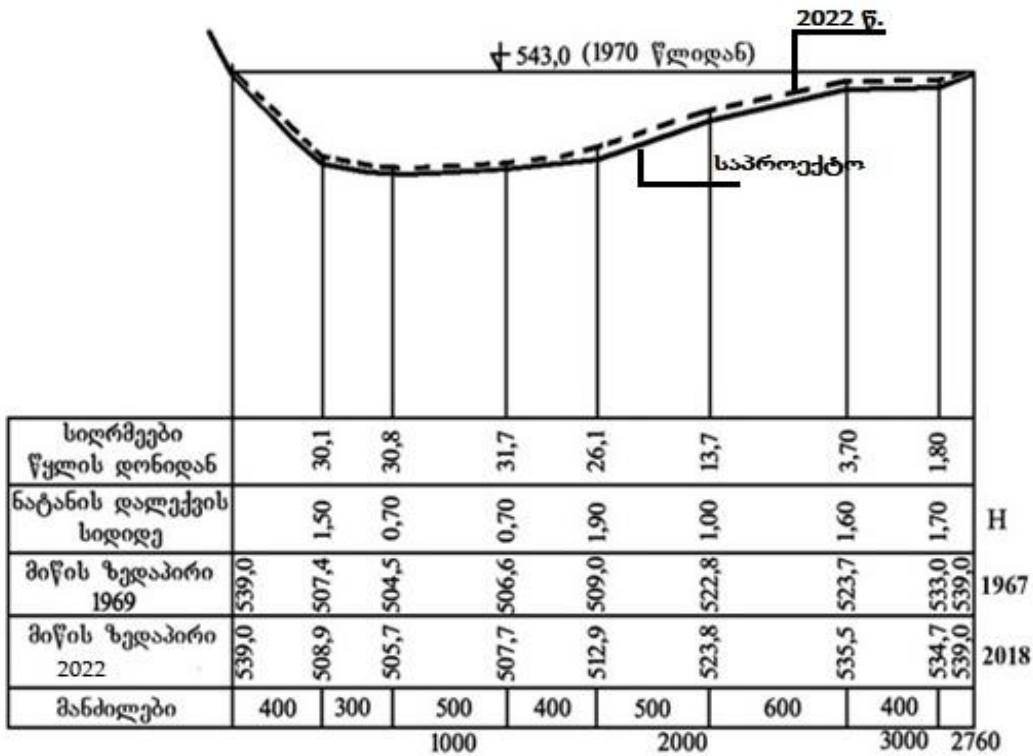
*) ფილტრაციული მოვლენების გამო 1970 წლიდან წყლის დონე არ აღემატება $\pm 543,0$ მ ნიშნულს, ხოლო $V_{სრ} \leq 215,0$ მლნ მ³.



ნახ. V.2.9. თბილისის წყალსაცავის განივკვეთების მოსილვა

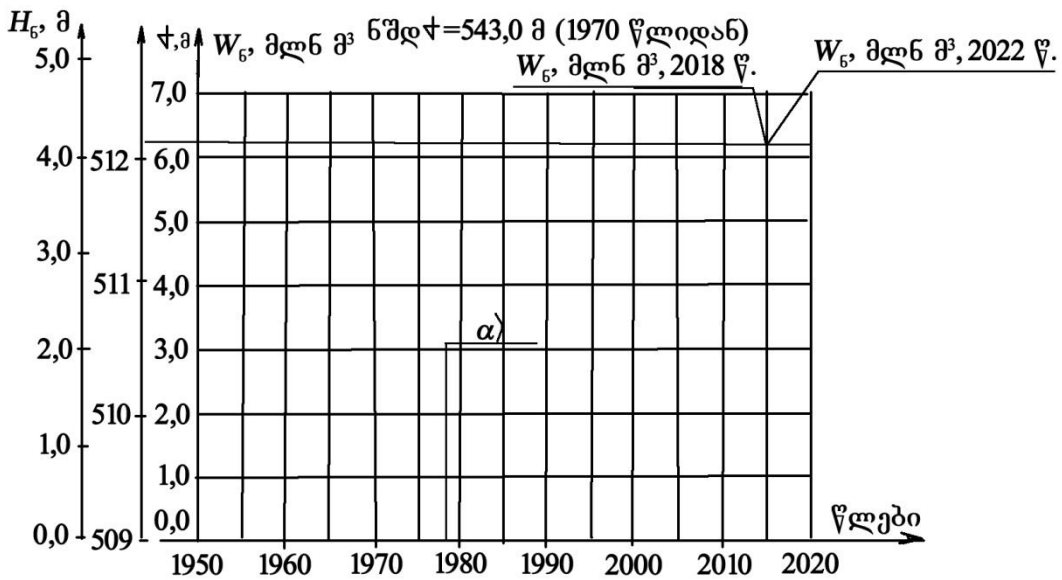
ა) ილლუნიაანის ტბის გასწვრივი ჭრილი (I-I); ბ) ილლუნიაანის ტბის გრძივი ჭრილი (II-II)

- მინერალიზებული თიხნარი
- მინერალიზებული ღამი და ღამისებური თიხა
- მინერალიზებული თიხა
- კენჭნარი კვიშოვანი შემცხებით
- კვიშნარი და ფიქალღვანი თიხა



ნახ. V.2.10. თბილისის წყალსაცავის ფსკერზე (ილღუნიანის ყოფილი ტბის ღრმულში) ნატანის მოცულობის პროფილი (მარჯვენა ნაპირთან)

— — — — — ძირის ხაზი საპროექტო
 - - - - - ძირის ხაზი 2022 წლისათვის



ნახ. V.2.11. თბილისის წყალსაცავის ფსკერის დაღამვის დინამიკა ექსპლუატაციის დაწყებიდან (H_6 -დაღამვის სისქე ილღუნიანის ტბის ფსკერზე)

2022 წლისთვის თბილისის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილია 9,6 მლნ მ³-მდე ნატანი. სედიმენტაციური პროცესის დინამიკა იანგარიშება ემპირიული ფორმულით:

$$W_6 = 3,23 + 0,18(t - 1970) \text{ მლნ მ}^3, \quad (V.2.3)$$

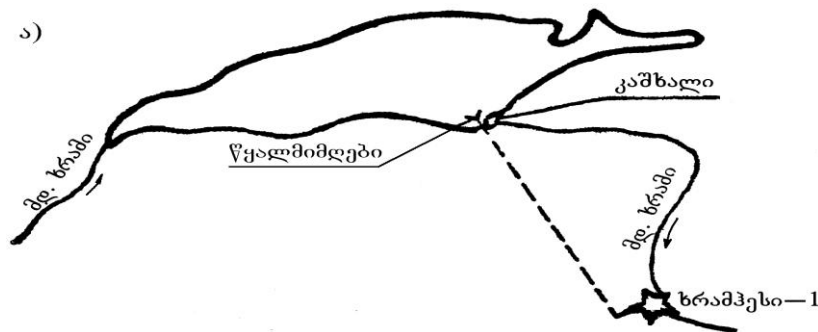
სადაც t არის საანგარიშო წელი.

ხრამის (წალკის) წყალსაცავი

ხრამის წყალსაცავიანი სისტემის მოკლე აღწერა

ხრამის (წალკის) წყალსაცავი მდებარეობს მდ. ხრამზე. წყალსაცი მდებარეობს მდინარე ხრამის მტკვართან შერთვის ადგილიდან 117,0 კმ-ზე, ნახ. III.2.4. წყალსაცავის რაიონში ხეობის სიგანე არის 0,7-0,8 კმ. მდინარის საშუალო წლიური ხარჯი კაშხლის კვეთში 9,78 მ³/წმ-ია, მას უკავია წალკის ქვაბული. ხრამის წყალსაცავის სრული მოცულობა $V_{სრ} = 312,0$ მლნ მ³.

ხრამის წყალსაცავიდან წყალი მიეწოდება არსებულ ხრამი ჰეს-1 და ხრამი-ჰეს-2-ს. ხრამის წყალსაცავიდან გამოსული გაფილტრული წყალი ამუშავებს დაშხამის მცირე ჰეს-ს, მისი სიმძლავრე 1260 კვტ-ია. არსებული ჰესების დადგმული სიმძლავრეა: ხრამი-ჰეს-1 – 112,8 მგვტ; ხრამი ჰესი-2-110,0 მგვტ; ჰესი მაგისტრალურ არხზე - 1,0 მგვტ; საპროექტო ჰესების დადგმული სიმძლავრეა: ხრამი ჰესის-3-12,0 მგვტ; ხრამი ჰესის-4-9,0 მგვტ; დაღათი ჰესის - 1,9 მგვტ; ხრამი ჰესის - 6-1,0 მგვტ; ხრამ-ჰესის-7-9,2 მგვტ; ნახიდური ჰესის-7,1 მგვტ; ბოლო წლებში ენერგეტიკული გამოყენების გარდა, წყალსაცავიდან ხდება წყლის იძულებითი გამოშვება მელიორაციული მიზნებისათვის. წყალსაცავი მაღალმთიანია, კალაპოტური ტიპის, სანაპირო კალთების დახრილობა 5°-დან 90°-დეა, სიგრძე – 14,5 კმ, საშუალო სიგანე – 2,4 კმ, მაქსიმალური – 3,5 კმ, საშუალო სიღრმე – 9,3 მ, მაქსიმალური – 25,0 მ. წყალსაცავის რაიონი ხასიათდება მკაცრი კლიმატით, წლიური ტემპერატურა მერყეობს +26°C-დან -30°C -მდე. წყალსაცავის ყინულოვანი ფენის სისქე 18-25 სმ-ია, ზამთრის ხანგრძლივობა – 2-3 თვე. დონური რეჟიმი განისაზღვრება ჰეს-ის მუშაობით: დონის დამუშავება აღწევს 14,5 მ (პროექტის მიხედვით, ნახ. V.2.12. წყლის დონის გადაადგილების სიჩქარე აღწევს 1,0-6,0 სმ/დღელამეში.



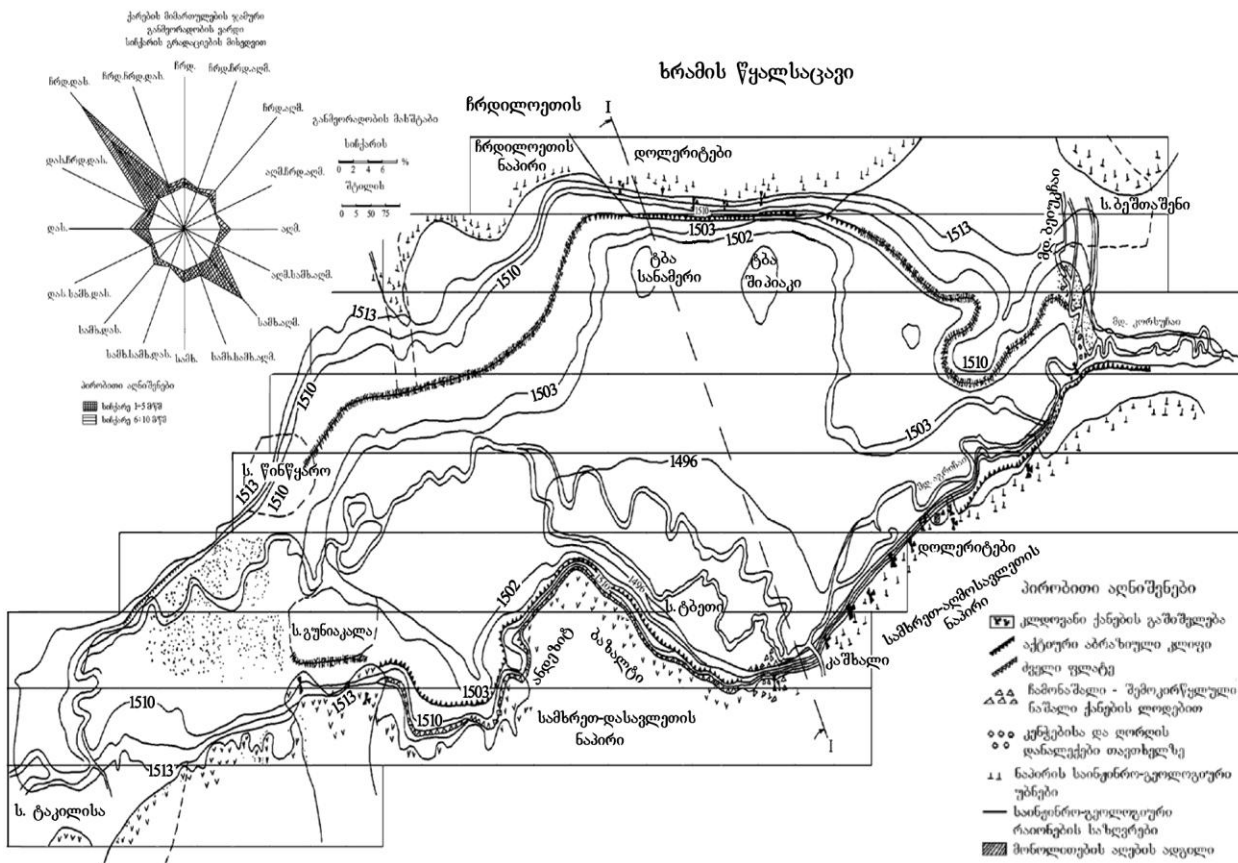
ნახ. V.2.12. ხრამის წყალსაცავის სქემა

ქარის რეჟიმი გამოირჩევა დიდი ცვლილებებით. ქარის მაქსიმალური სიჩქარეა 35,0 მ/წმ, მაქსიმალური განმეორებითობისაა ჩრდილო რუმბების ქარები. ტალღის სიმაღლე ყველაზე დიდი განმეორებითობისას (9,0-12,0 მ/წმ, უზრუნველყოფა – 40%) აღწევს 0,75-1,15 მ. შტორმული ტალღის სიმაღლე 1,5-1,8 მ-ია. მუშაობს ორი ჰესი – ხრამ-ჰესი-I და ხრამ-ჰესი-II. პირველი – წალკის წყალსაცავის ხარჯზე; მეორე – გვირაბული დერივაციის ხარჯზე, ხრამ-ჰეს I-ის ქვევით 400 მეტრი სიმაღლიდან ვარდნისას. ხრამ-ჰეს II-დან გამოშვებული წყალი გამოიყენება სარწყავად. ჰიდროკვანძის ნაგებობებში შედის 113,0 მ სიგრძისა და 32,0 მ სიმაღლის ქვის ნაყარი

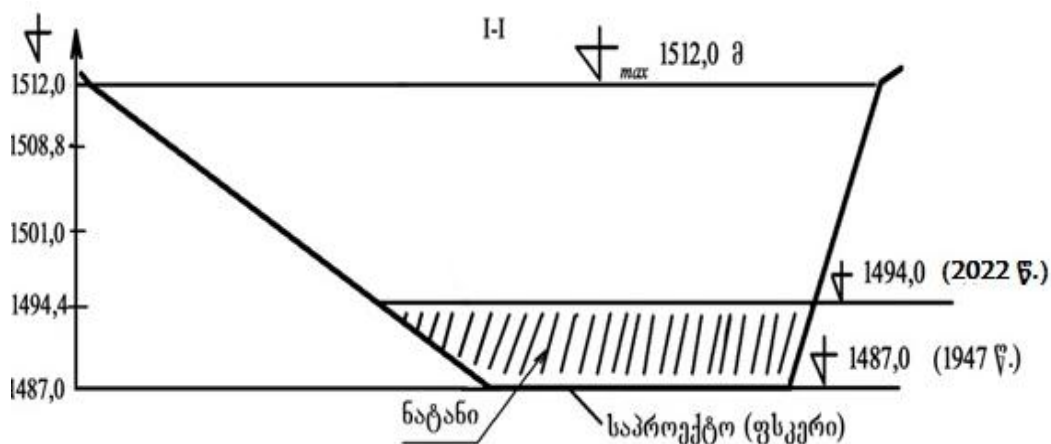
კაშხალი ფოლადის ეკრანით, წყალსაგდები და წყალგამშვები ფარებით, წყალმიმღები-სიღრმული წყალაღებით.

სედიმენტაციური პროცესები ხრამის წყალსაცავის ფსკერზე

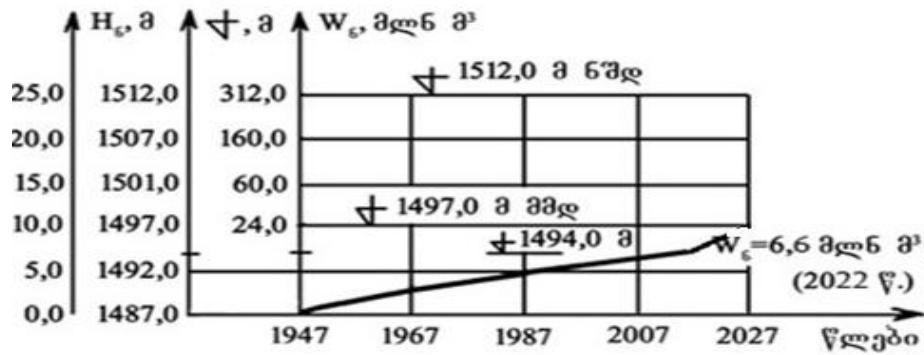
ხრამის (წალკის) წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილი ნატანის მოცულობის რაოდენობა დადგინდა წყალსაცავის ფსკერის საპროექტო რუკებისა (შედგენილი იყო წყალსაცავის შევსებამდე 1947 წ.) და ჩვენს მიერ ექოლოტირების საშუალებით მიღებული რუკების საფუძველზე (ნახ. V.2.13; V.2.14; V.2.15).



ნახ. V.2.13. ხრამის წყალსაცავის ფსკერის ტოპოგრაფია



ნახ. V.2.14. ხრამის წყალსაცავის განივკვეთის მოსილვის დინამიკა მისი ექსპლუატაციის დაწყებიდან (1947–2022 წწ.)



ნახ. V.2.15. ხრამის წყალსაცავის ფსკერის საანგარიშო მოსილვის დინამიკა ექსპლუატაციის დაწყებიდან (1947–2022 წწ.) (H_c – ნატანის სისქე კაშხალთან)

2022 წლისათვის ხრამის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილია 6,6 მლნ მ³ ნატანი. ნატანის დაგროვების ინტენსივობა $W_6/t = 0,092$ მლნ მ³/წელიწადში.

ხრამის წყალსაცავში დაგროვილი ნატანის ჯამური მოცულობა იანგარიშება ემპირიული ფორმულით:

$$W_{ნატ} \approx 0,092 \cdot (t - 1947) \text{ მლნ მ}^3, \quad (V.2.4)$$

სადაც 0,092 არის ნატანის დაგროვების ინტენსივობა წყალსაცავის აგების შემდეგ, მლნ მ³; t – საანგარიშო წელიწადი.

შაორის წყალსაცავი

შაორის წყალსაცავიანი სისტემის მოკლე აღწერა

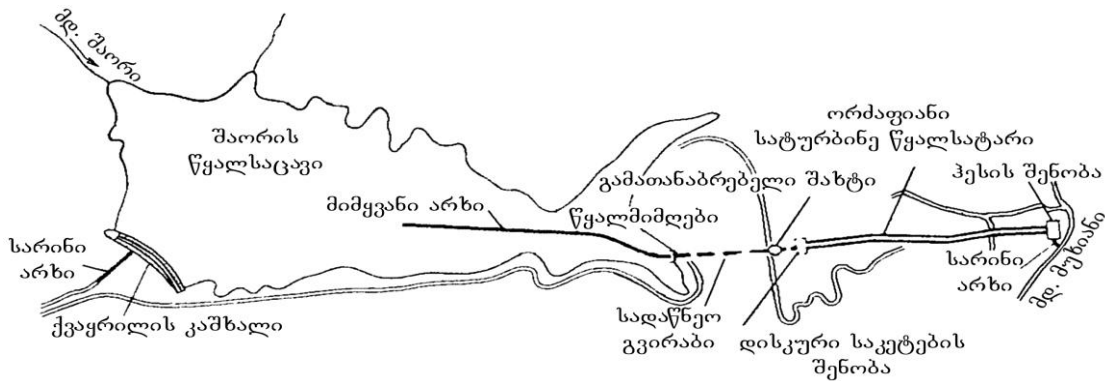
შაორის წყალსაცავი ($V_{სრ} = 90,0$ მლნ მ³) წარმოადგენს შაორი-ტყიბულის კასკადის პირველ საფეხურს, (ნახ. III.2.5). მისი განსაკუთრებულობაა კარსტულ რაიონში განლაგება. წყალსაცავის მკვებავი მდინარეები – დიდი ჭალა და ტყიბულა – ქედის ძირში კარსტულ ორმოებში ჩაედინება, შემდეგ კი მიწის ზედაპირზე გამოდის.

ამ გარემოებამ განაპირობა კასკადის ორიგინალური სქემის შექმნა. შაორის პლატოზე აშენებულია კაშხალი, რომელიც უკვეთავს წყალს კარსტულ ორმოებში მისასვლელს. წყალსაცავიდან წყლის მიწოდება ჰეს-თან ხორციელდება სადაწნეო გვირაბებით, ნარეკვავის ქედის გავლით. გეოლოგიური თვალსაზრისით, შაორის ქვაბული აგებულია მეოთხეული პერიოდის ქანებით, რომლებიც წარმოდგენილია ალუვიური და დელუვიალური დანალექებითა და თიხნარებით. წყალსაცავი მაღალმთიანია, სამკუთხა ფორმის. მისი ფერდები დამრეცი ($\alpha = 20^\circ - 30^\circ$) და დაბალია, სამხრეთ-აღმოსავლეთისა და ჩრდილო-დასავლეთის გამოკლებით, სადაც ნაპირების სიმაღლე 4,0–5,0 მ-ს აღწევს, ხოლო დახრილობა – $60^\circ - 80^\circ$ -ს, სიგრძე 7,5 კმ-ია, საშუალო სიგანე – 1,76 კმ, მაქსიმალური – 3,0 კმ, საშუალო სიღრმე – 6,3 მ, ხოლო მაქსიმალური – 12,3 მ. წყალსაცავი წლიური რეგულირებისაა. წყლის დონის დამუშავების მაქსიმალური სიმაღლე წლიურ ჭრილში 13,0 მ-ს შეადგენს, მოცულობა და სარკის ფართობი იცვლება წყლის დონის შესაბამისად.

კლიმატი ტენიანია, ცხელი ზაფხულით, ცივი ზამთრით და უხვი ნალექებით. ჰაერის ტემპერატურის ამპლიტუდა $24^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$. თოვლის საფარის სისქე 75,0 სმ-ია. ჭარბობს სამხრეთისა და აღმოსავლეთის რუმბების ქარები. ქარის მაქსიმალური

სიჩქარე 20,0 მ/წმ-მდეა (იანვარი-მარტი), შტილის უზრუნველყოფა – 52%. მთის ქედები იცავს ქვაბულს ქარის მოქმედებისაგან. ტალღების მაქსიმალური სიმაღლე 0,7-0,9 მ-ია, მაგრამ მცირე უზრუნველყოფით, რადგან ქარის მაქსიმალური სიჩქარე იმ პერიოდშია, როდესაც წყალი ყინულით არის დაფარული.

წყალსაცავი გამოიყენება ენერგეტიკული მიზნებისათვის და ქ. ტყიბულის ტექნიკური წყალმომარაგებისათვის. ჰეს-ზე საანგარიშო დაწნევა 473,0 მ-ია, საერთო სიმძლავრე – 38400,0 კვტ (ნახ. V.2.16).

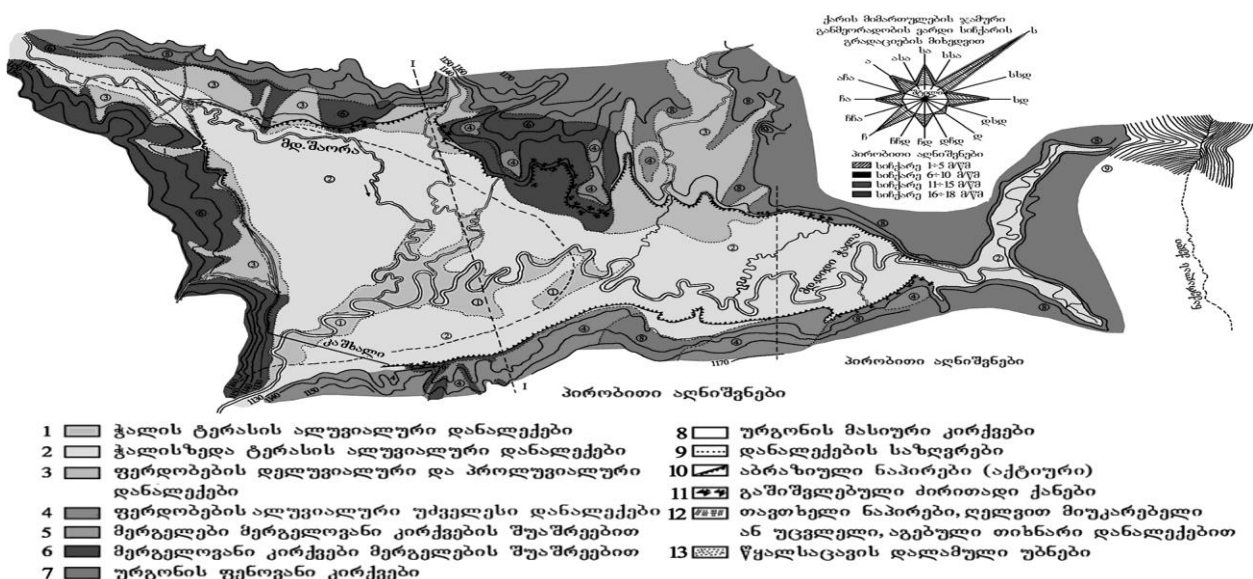


ნახ. V.2.16. შაორის წყალსაცავის სქემა

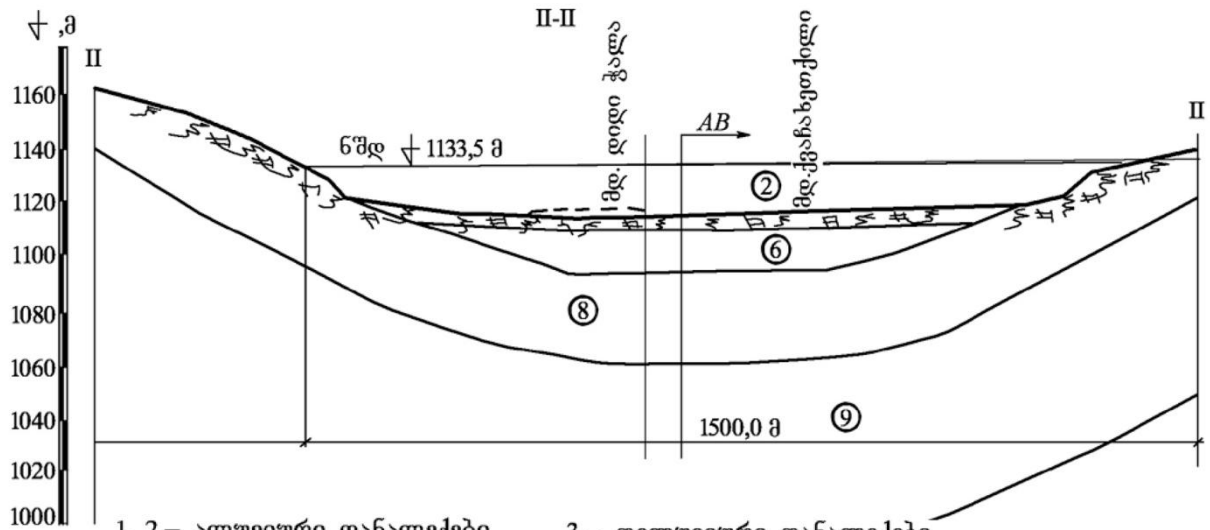
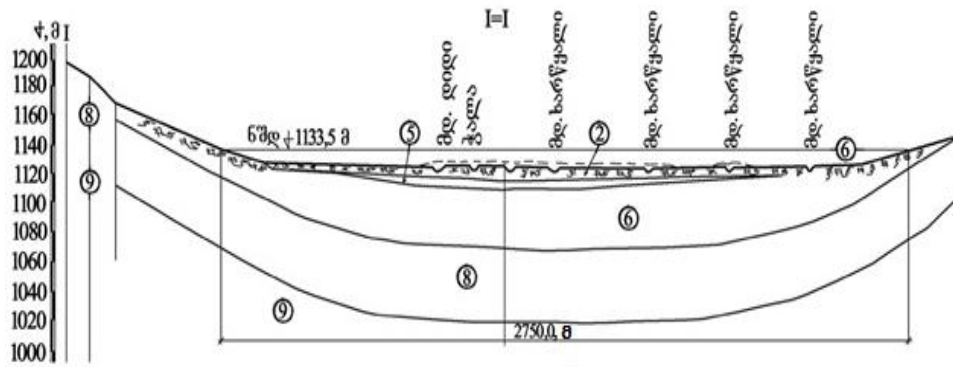
წყალსაცავის ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებში შედის: ქვაყრილი კაშხალი თიხის ეკრანით, სიგრძით 1210,0 მ და 11,5 მ სიმაღლით, ფსკერული წყალგამშვები, გათვლილია 26,0 მ³/წმ ხარჯზე, ზედაპირული წყალგადამგდები გათვლილია. 30,0 მ³/წმ ხარჯზე, წყალსაცავის ფსკერზე არსებული მიმყვანი არხი 3706,0 მ სიგრძის, 5,0 მ სიღრმის და ჰეს-ის წყალმიმღები (ნახ. V.2.16).

სელიმენტაციური პროცესები შაორის წყალსაცავის ფსკერზე

შაორის წყალსაცავის ფსკერზე ნატანის მოცულობის რაოდენობა დადგინდა წყალსაცავის ფსკერის საპროექტო რუკებისა (შედგენილი იყო წყალსაცავის შევსებამდე 1955 წ.) და ჩვენ მიერ ჩატარებული ფსკერის ექოლოტირების შედეგად (ნახ. V.2.17; V.2.18; V.2.19).



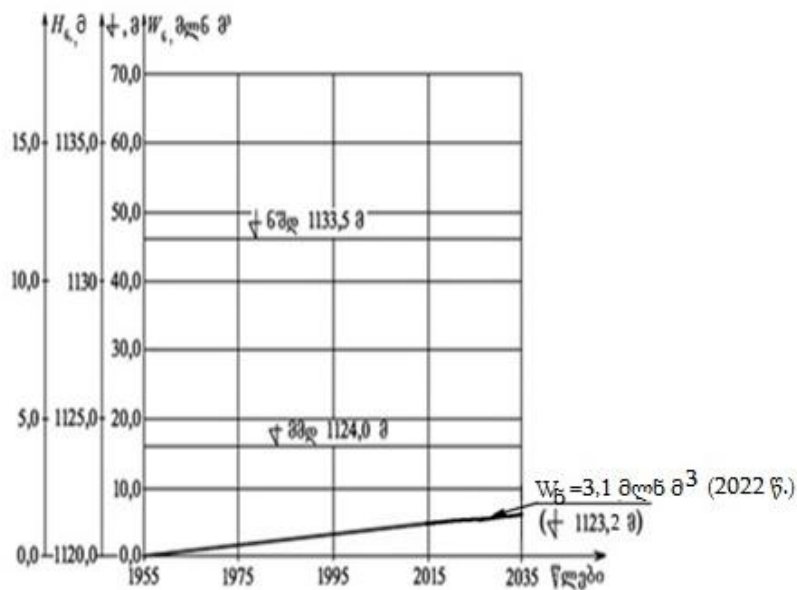
ნახ. V.2.17. შაორის წყალსაცავის ფსკერის ტოპოგრაფია



- 1, 2 – ალუმინური დანალექები 3 – ფელუვიური დანალექები
 4 – ძველი ალუმინური დანალექები 5, 6 – მერგელი
 8, 9 – კირქვა

ნახ. V.2.18. შაორის წყალსაცავის განივკვეთების მოსილვის დინამიკა მისი ექსპლუატაციის დაწყებიდან (1955–2022 წწ.)

———— საპროექტო; - - - - 2022 წლისათვის



ნახ. V.2.19. შაორის წყალსაცავის ფსკერის საანგარიშო მოსილვის დინამიკა ექსპლუატაციის დაწყებიდან (1955–2022 წწ.) (H_c – ნატანის სისქე კაშხალთან)

2022 წლისათვის შაორის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილია 3,1 მლნ მ³ ნატანი. ნატანის დაგროვების ინტენსივობა $W/t = 0,05$ მლნ მ³/წელიწადში.

შაორის წყალსაცავში დაგროვილი ნატანის ჯამური მოცულობა ნებისმიერ დროში იანგარიშება ემპირიული ფორმულით:

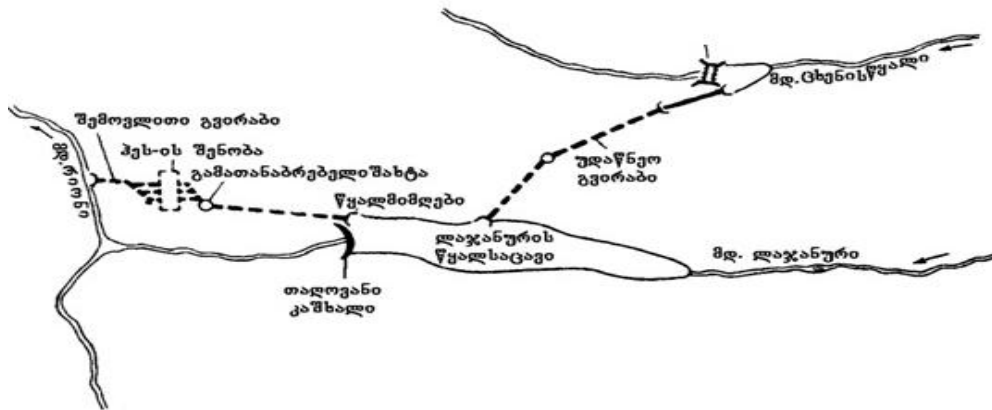
$$W_{ნატ} \approx 0,05 \cdot (t - 1955), \text{ მლნ მ}^3, \quad (V.2.5)$$

სადაც 0,05 ნატანის დაგროვების ინტენსივობაა წყალსაცავის აგების შემდეგ, მლნ მ³; t – საანგარიშო წელიწადი.

ლაჯანურის წყალსაცავი

ლაჯანურის წყალსაცავიანი სისტემის მოკლე აღწერა

ლაჯანურის წყალსაცავის სისტემის ჰიდროტექნიკური სქემა შედგება ბეტონის თაღოვანი კაშხლისაგან, სიმაღლით 69,0 მ, წყალმიმღებისა ($Q = 100,0$ მ³/წმ) და შემოვლითი გვირაბისაგან (ნახ.III.2.3; V.2.20). მდ. ცხენისწყლისა და მდ. ლაჯანურის ჩამონადენის გაერთიანებით მიღებულია 134,0 მ-ის დაწნევა, საანგარიშო ხარჯით – 420 მ³/წმ, წყალსაცავის სრული მოცულობა $V_{სრ} = 24,0$ მლნ მ³-ს. ლაჯანურის კაშხალი პირველი თაღოვანი ბეტონის კაშხალია, რომელმაც დაუდო საფუძველი საქართველოში თაღოვანი კაშხლებისა და მიწისქვეშა ჰეს-ების მშენებლობას. წყალსაცავი მდებარეობს ამოზნექილი ნაპირების მქონე ხეობაში. კალთები ხეობებით ძლიერ დანაწევრებულია. მდინარის საშუალო წლიური ხარჯი კაშხლის კვეთში არის 10,5 მ³/წმ, მაქსიმალური – 18,30 მ³/წმ, მდ. ცხენისწყლიდან ლაჯანურის წყალსაცავს მიეწოდება 60,0 მ³/წმ წყალი.



ნახ. V.2.20. ლაჯანურ-ჰეს-ის ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სქემა

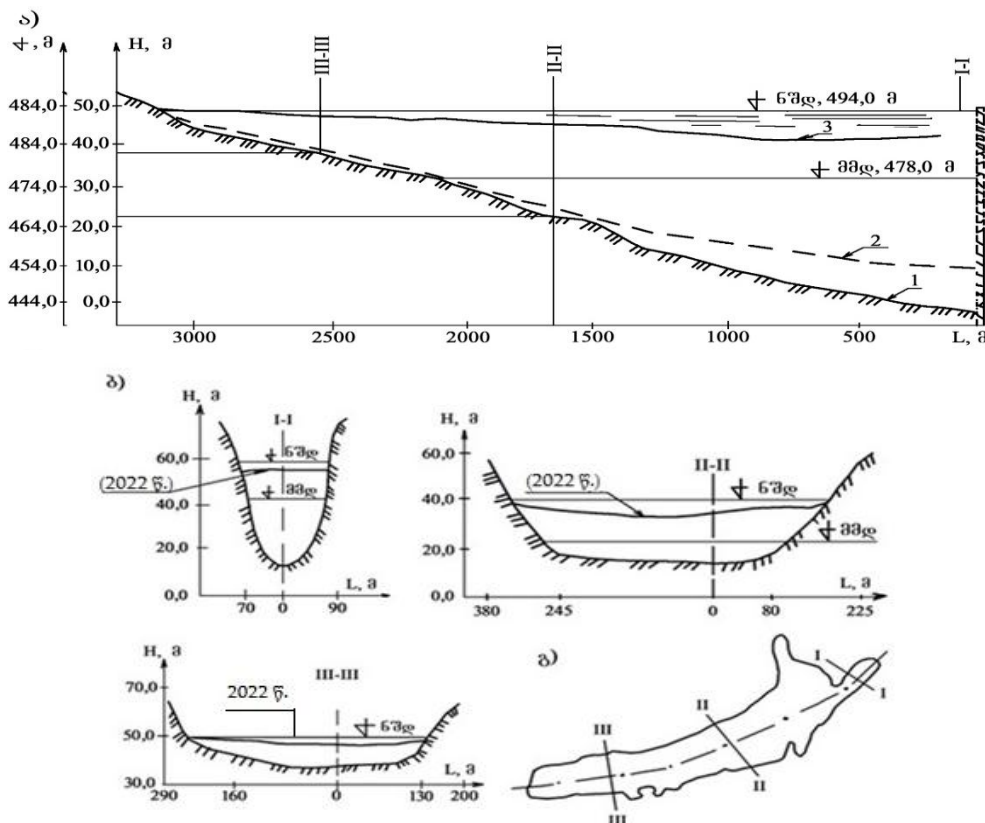
ხეობის გეოლოგიური აგებულება რთულია. კაშხლის ქვედა, ვიწრო მიმდებარე ნაწილი აგებულია სქელფენიანი, მყარი კირქვისაგან, რომელიც ეკუთვნის შუა და ქვედა ეოცენს და პალეოცენს; ჩრდილო და სამხრეთ ნაპირების ზედა უბნები შედგება ქვიშისა და მერგელისნაირი თიხებისაგან, დასავლეთით მათ ცვლის ფიქალისებრი მაიკოპის ოლიგოცენის თიხები. წყალსაცავის ორივე ნაპირი ფართოდაა წარმოდგენილი ქვიშნარებით. მასში წყლის დონის აწევამ გამოიწვია გრუნტის წყლების შეტბორვა, რის შედეგადაც გააქტიურდა მეწყერი, მთელი სამხრეთ-დასავლეთი კალთა მეწყრულია; მეწყრები ვითარდება წყალსაცავის აღმოსავლეთ ნაწილშიც მდ. ხელეშურის დელტასთან.

წყალსაცავი კალაპოტური ტიპისაა. აქვს გაწელილი ოვალური ფორმა. სიგრძე 3,2 კმ, საშუალო სიგანე – 0,28 კმ, მაქსიმალური – 0,45 კმ; საშუალო სიღრმე – 30,0 მ, მაქსიმალური – 70,0 მ. დონური რეჟიმი არასტაბილურია. დონის დამუშავება – 16,0 მ, თუმცა ტაფობის ნატანით ავსების გამო ხარჯი არ რეგულირდება და ჰეს-ი მუშაობს ჩამოდინების მიხედვით. წყალსაცავი გარშემორტყმულია მაღალი მთებით, რომლებიც იცავს მას ქარისაგან. შტილის 60%-ია, ქარის სიჩქარე – 8,0-10,0 მ/წმ. კლიმატი ტენიანია, ხშირი წვიმებით. წყალსაცავი გამოიყენება ენერგეტიკის მიზნებისათვის. დაწნევა 134,0 მ-ია. სათავო კვანძის ნაგებობებში შედის: 69,0 მ სიმაღლის თაღოვანი წყალგადასაშვები კაშხალი; წყალმიმღები ორი ხვრელით 100,0 მ³/წმ ხარჯით; ფსკერული გამრეცი გალერეებით, რომლებიც გადადის 6,0 მ დიამეტრის გამრეცხ გვირაბში. წყალგადამგდები, გათვლილი 30,0 მ³/წმ ხარჯზე; წყალსაცავის ფსკერზე არსებული მიმყვანი არხი 3706,0 მ სიგრძის და 5,0 მ სიღრმის და ჰეს-ის წყალმიმღები.

სელიმენტაციური პროცესები ლაჯანურის წყალსაცავის ფსკერზე

წყალსაცავზე ბოლო კვლევები ქართველი მკვლევარის მიერ გასული საუკუნის შუა წლებში ჩატარდა [Гвелесиანი Л.Г., Шмальцель Н.П., 1953].

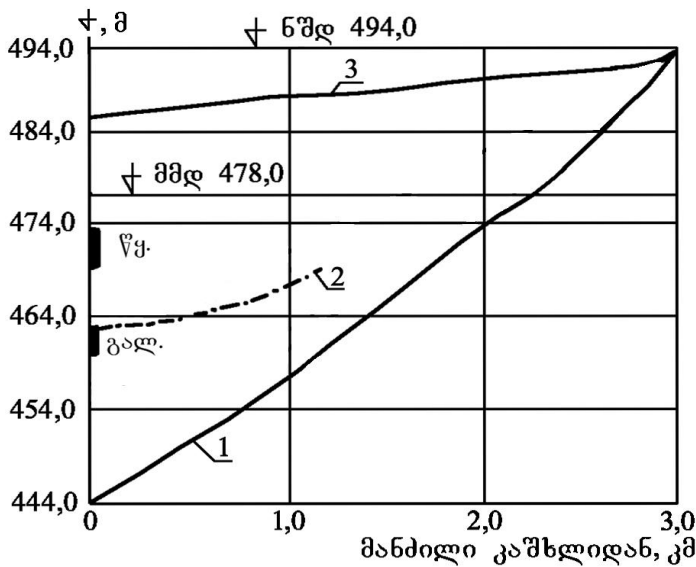
საველე სამუშაოების შედეგების საფუძველზე ლაჯანურის წყალსაცავის ფსკერზე აგებულ იქნა ამჟამინდელი განივი პროფილები (ნახ. V.2.21; V.2.22).



ნახ. V.2.21. ლაჯანურის წყალსაცავის ფსკერის მოსილვის დინამიკა

ექსპლუატაციის დაწყებიდან (1960–2022 წწ.);

- ა – გრძივი პროფილი, 1 – საპროექტო; 2 – 1963 წ.; 3 – 2022 წ.; ბ – განივი პროფილები;
- გ – პროფილების განლაგება



ნახ. V.2.22. ლაჯანურის წყალსაცავის ფსკერზე საანგარიშო მოსილვის პროცესების დინამიკა 1963 წლიდან. 1 – მდინარე ლაჯანურის კალაპოტის საპროექტო ნიშნულები; 2 – 1963 წ.; 3 – 2022 წ.

დღეისათვის ლაჯანურის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილია 18,6 მლნ მ³ ნატანი $\left(K_{\text{ნატ}} = \frac{W_{\text{ნატ}}}{V_{\text{სრ}}} = 71,0\% \right)$, სედიმენტაციური პროცესების პროგნოსტიკულ რეგრესიულ განტოლებას აქვს სახე:

$$W_{\text{ნატ}} \approx 0,32 \cdot (t - 1961) \text{ მლნ მ}^3, \quad (\text{V.2.6})$$

სადაც t საანგარიშო წელიწადია.

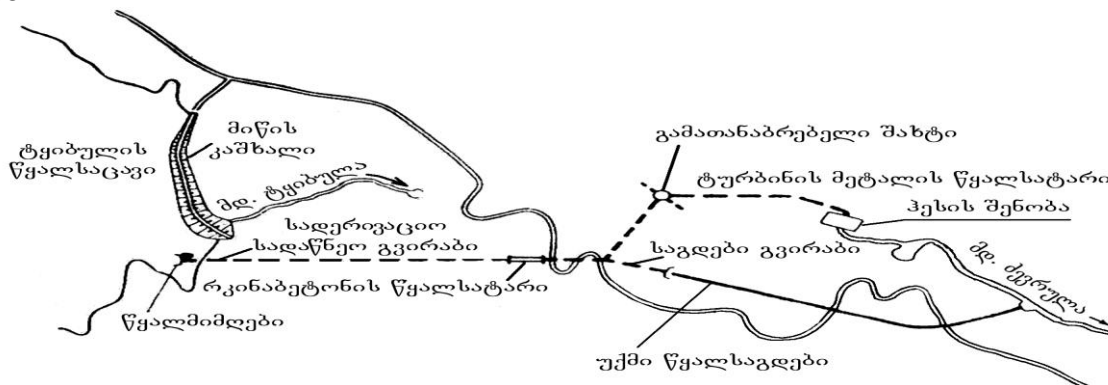
თუ წყალსაცავის სედიმენტაციური პროცესები გაგრძელდა ასეთი დინამიკით, მაშინ წყალსაცავი დაკარგავს თავის ძირითად დანიშნულებას – წყლის სასარგებლო მოცულობის დაგროვებას.

ტყიბულის წყალსაცავი

ტყიბულის წყალსაცავიანი სისტემის მოკლე აღწერა

ტყიბულის წყალსაცავი მდებარეობს მდ. ტყიბულაზე. სათავე კვანძი მდებარეობს 12,0 კმ-ში მდ. ტყიბულას სათავიდან (ნახ.V.2.23).

ტყიბულის წყალსაცავიანი სისტემა დამატებით იკვებება შაორის ჰეს-იდან გადამუშავებული წყლით. წყალსაცავი შექმნილია ახალსოფლის ქვაბულში, მდ. ტყიბულას კარსტში ჩაქცევის წინ. ქვაბული მონოკლინური სტრუქტურისაა და ეყრდნობა კირქვას.



ნახ. V.2.23. ტყიბულის წყალსაცავიანი სისტემის სქემა;

წყალსაცავის ტაფობის გეოლოგიურ აგებულებაში მონაწილეობს განსხვავებული ქანების კომპლექსი. ქვაბულის კალთები აგებულია იურული და ცარცის დანალექებით. ქანები ხასიათდება სუსტი წყალშედწევადობით და ამის გამო წყლის გასვლა წყალსაცავის ჩრდილოეთ რაიონიდან გამორიცხულია. გამონაკლისია ურგონული კირქვები, რომლებიც ნაპრალებიანი და დაკარსტულია. ფილტრაციის მხრივ უფრო საშიშია კაშხლის სამხრეთ რაიონი, რომელიც აგებულია ზემო ცარცული კარსტული კირქვებით.

წყალსაცავის ტაფობის ფსკერზე მძლავრი მეოთხეული ასაკის დანალექების ქვეშ გაწოლილია იურიული და ცარცული ძირითადი ქანები. ტბური ალუვიური დანალექები წარმოდგენილია 100,0 მ სიმძლავრის თიხნარებით, კაშხლის მხარეს მისი სიმძლავრე 350,0 მ-მდე იზრდება. წყალსაცავის დასავლეთ კალთაზე, რომელიც აგებულია ტუფის ქვიშნარებისგან, კარგადაა გამოსახული ალუვიური ზონა, სიმძლავრით 0,5-1,05 მ. კალთებზე თიხნარების დანალექებია დიდი რაოდენობის კირქვებით, სიმძლავრით 1,0-1,5 მ, იშვიათად – 4,0 მ. ნაპირების საშუალო სიმაღლეა 5,0-დან 200,0 მ-მდე, დახრილობა – 25°-30°, ზოგან – 45°-50°. აქვს ძლიერ დასერილი სანაპირო ზოლი, რომელიც ღრმად შედის მდ. ტყიბულას და გელას შესართავში და წარმოქმნის ვიწრო, გაჭიმულ ყურეებს. მისი სიგრძეა 6,0 კმ, საშუალო სიგანე – 1,9 კმ (მაქსიმალური – 3,7 კმ), საშუალო სიღრმე - 16,0 მ-ია (მაქსიმალური – 32,0 მ).

წყალსაცავი სეზონური რეგულირებისაა. დონის მაქსიმალური საპროექტო დამუშავება 6,0-7,0 მ-ია. წყალსაცავის მოცულობა და სარკის ფართობი ექსპლუატაციის პროცესში მცირედ იცვლება. ქარები, ძირითადად, აღმოსავლეთ რუმბებისაა. ქარის მაქსიმალური სიჩქარეა 34,0 მ/წმ, საშუალო – 11,0-15,0 მ/წმ, უზრუნველყოფა – 21%, შტილი – 50%. წყალსაცავის მდებარეობა ხელს უწყობს 0,8-0,1 მ სიმაღლის ტალღების წარმოქმნას.

წყალსაცავი გამოიყენება ენერგეტიკული მიზნებისათვის. საანგარიშო დაწნევა 293,0 მ-ია, სიმძლავრე – 80,0 ათასი კვტ. იგი კალაპოტური ტიპისაა, აგებულია 36,0 მ სიმაღლის მიწის კაშხლით. წყლის აღება ხდება სადაწნეო დერივაციით და ხორციელდება ორტოტიანი წყალმიმღებით, რომელიც მარჯვენა ნაპირზეა განთავსებული. წყალი მიედინება სადაწნეო გვირაბში ($Q = 34,0$ მ³/წმ) და შემდეგ წყალსატარის 4 ტოტის გავლით მიეწოდება 4 ტურბინას. წყლის გადაგდება ჰეს-იდან მდინარის კალაპოტში ხორციელდება წყალგამყვანი არხით.

სედიმენტაციური პროცესები ტყიბულის წყალსაცავის ფსკერზე

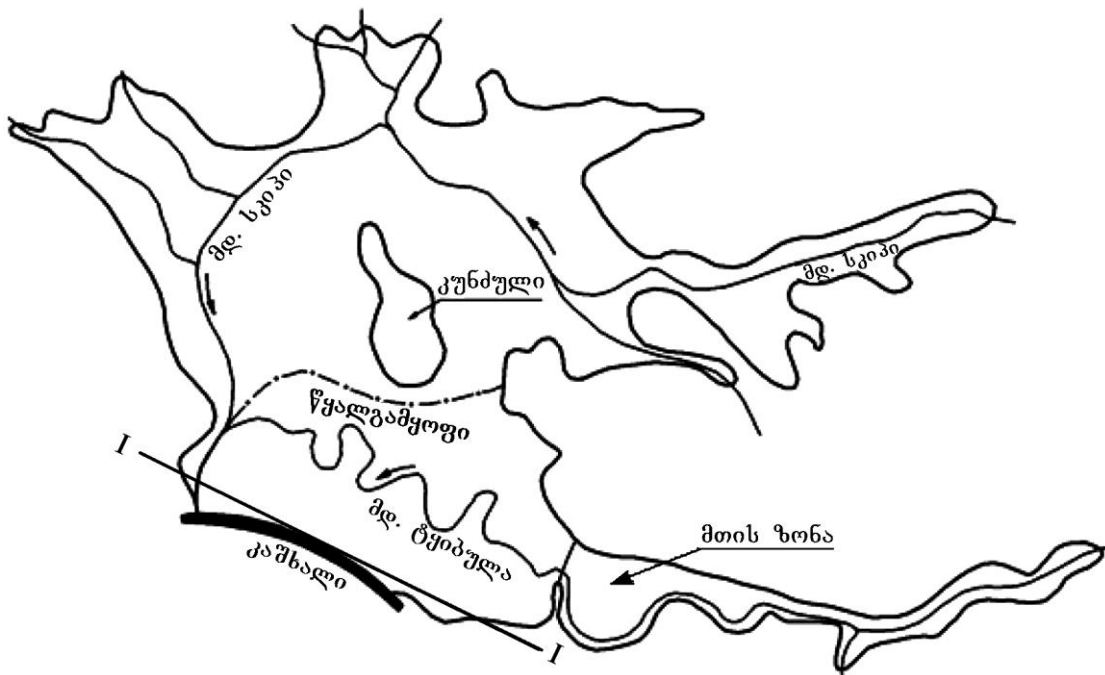
ტყიბულის წყალსაცავი (ექსპლუატაციაში შევიდა 1956 წელს, $V_{სრ} = 84,0$ მლნ მ³) მიეკუთვნება მთის წყალსაცავების ტიპს, რადგან მისი ნორმალური დონის ნიშნული (ნშდ)† 400,0 მ-ზე მაღლაა (ნახ. V.2.24; V.2.25; V.2.26).

დღეისათვის ტყიბულის წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილია $W_6 = 3,95$ მლნ მ³ ნატანი, ხოლო ნატანის დაგროვების ინტენსივობა $W_6/t = 0,063$ მლნ მ³/წელიწადში.

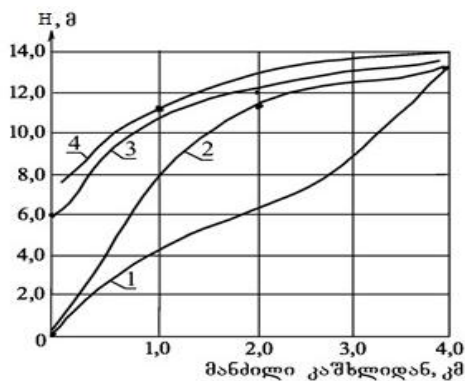
ტყიბულის წყალსაცავის ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების საპროგნოზო განტოლებას აქვს სახე:

$$W_6 = 0,063 (t - 1956) \text{ მლნ მ}^3, \quad (V.2.7)$$

სადაც t წყალსაცავის ექსპლუატაციის წელია აგების შემდეგ (1956 წ.).

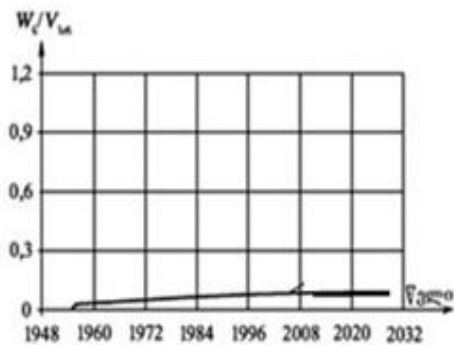


ნახ. V.2.24. ტყიბულის წყალსაცავის გეგმა



ნახ. V.2.25. ტყიბულის წყალსაცავის ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების დინამიკა (1960–2022 წწ.)

1 – მდინარე ტყიბულის კალაპოტის საპროექტო ნიშნულები, 2 – 1960 წ., 3 – 1966 წ., 4 – 2022 წ.

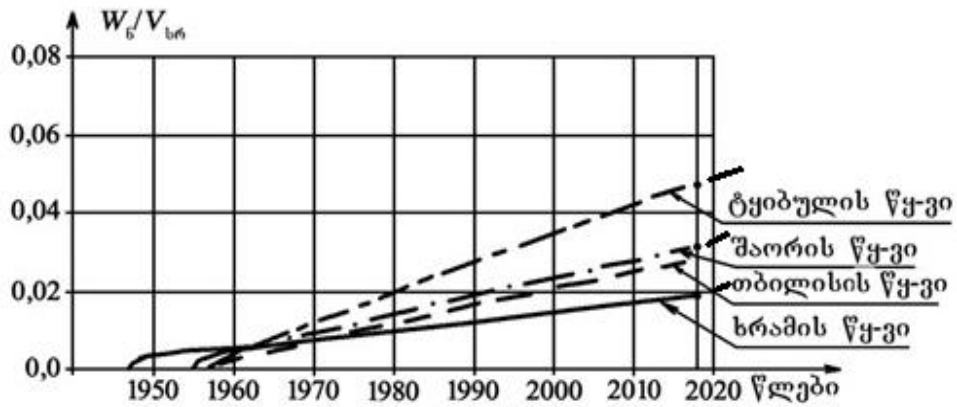


ნახ. V.2.26. ტყიბულის წყალსაცავის ფსკერზე საანგარიშო სედიმენტაციური პროცესების ინტენსივობა

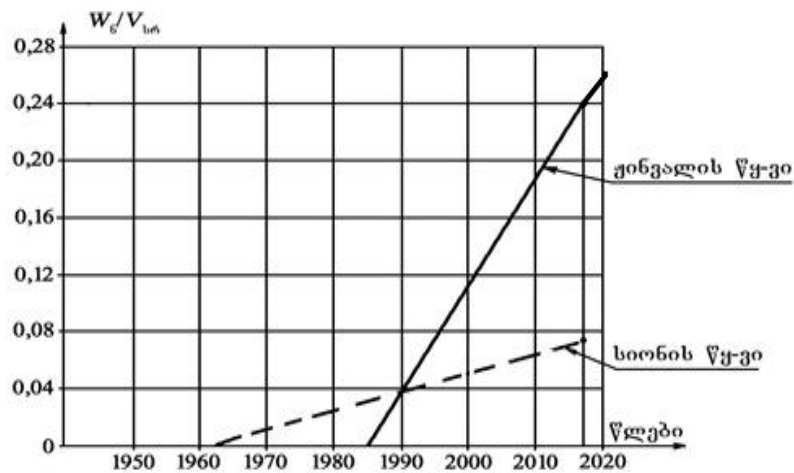
სედიმენტაციური პროცესების საპროგნოზო ჯგუფების დამუშავება – ჟინვალის, სიონის, თბილისის, ხრამის, შაორის, ლაჯანურისა და ტყიბულის წყალსაცავების ფსკერზე

საქართველოს წყალსაცავების რეგიონული თავისებურებები განსაზღვრავს სედიმენტაციური პროცესების ინტენსივობას და დანალექის განაწილებას.

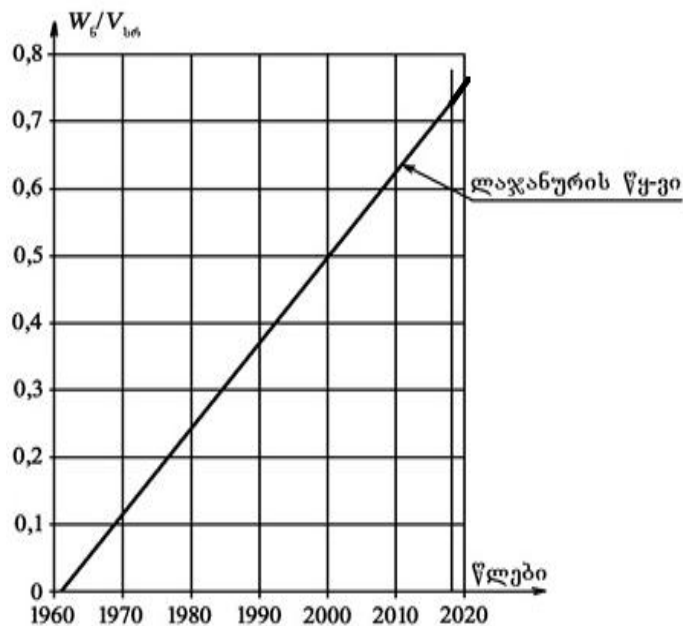
როგორც ჩვენმა კვლევებმა გვიჩვენა, მთის წყალსაცავების ფსკერის დალექვა მიმდინარეობს წყალსაცავების სამი ტიპის მიხედვით. პროგნოზი ტარდება ემპირიული დამოკიდებულებების და მრუდების გამოყენებით (ნახ. V.2.27; V.2.28; V.2.29).



ნახ. V.2.27. საქართველოს პირველი ტიპის წყალსაცავების (ტყიბულის, შაორის, თბილისის, ხრამის) ფსკერის დალექვის შედარებითი გრაფიკები (2022 წლისათვის)



ნახ. V.2.28. საქართველოს მეორე ტიპის წყალსაცავების (ჭინვალის, სიონის) ფსკერის დალექვის შედარებითი გრაფიკები (2022 წლისათვის)



ნახ. V.2.29. საქართველოს მესამე ტიპის წყალსაცავის – ლაჯანურის ფსკერის დალექვის გრაფიკი (2022 წლისათვის)

საქართველოს წყალსაცავების ფსკერის დაღეჭვის ძირითადი მაჩვენებლები (2022 წლისათვის)

№	წყალსაცავის დასახელება	ექსპლუატაციაში შესვლის წელი	წყალსაცავის სრული მოცულობა ($V_{სრ}$), მლნ მ ³	წყალსაცავის მკვდარი მოცულობა ($V_{მკვდ}$), მლნ მ ³	წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობა ($V_{სარგ}$), მლნ მ ³	$V_{სრ}/F$, კმ	კაშხლის სიმაღლე, მ	კაშხლის ტიპი	წყალსაცავის ნმდ ნიშნული 4, მ	წყალსაცავის სიგრძე (L) და სიგანე (B), კმ	წყალსაცავის მაქსიმალური სიღრმე, H , მ	წყალსაცავის სარკის ფართობი ნმდ-ზე, F , კმ ²	ნატანის დაგროვება საშუალოდ წელიწადში, $W_{წ}$, მლნ მ ³ /წელიწადში	ნატანის დანალექების მოცულობა 2022 წლისათვის, $W_{წ}$, მლნ მ ³	$W_{წ}/V_{სრ}$	დანალექის სიმაღლე კაშხალთან, მ	წყალსაცავის ტიპი დაღეჭვის მიხედვით	დანალექების დაგროვების მოცულობა პროგნოსტიკული განტოლებებით საანგარიშო (t) წლისათვის, მლნ მ ³	დაღეჭვის სტადია
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	ხრამის	1947	312,0	20,0	292,0	9,17	32,0	ქვყარილის	1512,0	14,0/3,5	25,0	34,0	0,092	6,6	0,021	7,0	I	0,092($t-1947$)	პირველი, $W_{წ}/V_{სრ} < 0,12$
2	თბილისის	1956	215,0	60,0	155,0	26,10	9,0 15,0 10,0 12,0	2 - ბეტონის 2 - მიწის	548,0	9,0/2,0	45,0	11,8	0,18	9,6	0,03	4,3	I	3,23+0,18($t-1970$)	პირველი, $W_{წ}/V_{სრ} < 0,12$
3	შაორის	1955	90,0	3,0	87,0	5,17	14,0	ქვყარილის	1132,0	7,5/3,0	12,3	13,2	0,05	3,1	0,033	2,5	I	0,05($t-1955$)	პირველი, $W_{წ}/V_{სრ} < 0,12$
4	ჟინვალის	1985	520,0	150,0	370,0	45,20	102,0	ქვა-მიწის	810,0	12,0/1,0	98,0	11,52	8,1	126,0	0,21	23,0	II	65+8,1($t-2010$)	მეორე, $W_{წ}/V_{სრ} > 0,12$
5	სიონის	1963	325,0	25,0	300,0	28,50	86,0	მიწის	1068,0	11,5/2,0	68,0	11,4	0,45	26,0	0,08	20,0	II	0,45($t-1963$)	მეორე, $W_{წ}/V_{სრ} > 0,12$
6	ლაჯანურის	1961	24,6	7,0	17,6	17,1	70,0	ბეტონის	494,0	3,2/0,45	67,8	1,4	0,32	18,6	0,73	45,0	III	0,32($t-1961$)	მესამე, $W_{წ}/V_{სრ} > 0,12$
7	ტყიბულის	1956	84,0	22,0	61,0	7,3	36,0	მიწის	522,5	6,0/3,7	32,0	11,5	0,063	3,95	0,047	14,0	I	0,063($t-1956$)	პირველი, $W_{წ}/V_{სრ} < 0,12$

პირველი ტიპის წყალსაცავები – მცირედ დალექვადია. აქ, ძირითადად, ნალექი იძირება წყალსაცავის ყველაზე ღრმა ადგილებში – კაშხალთან. ესენია - ტყიბულის, შაორის, ხრამის და თბილისის წყალსაცავები (ნახ. V.2.27). მეორე ტიპის წყალსაცავები – საშუალოდ დალექვადია. ესენია – სიონის და ჟინვალის წყალსაცავები (ნახ. V.2.28); მესამე ტიპის წყალსაცავი – ინტენსიურად დალექვადი – ლაჯანურის წყალსაცავი, (ნახ. V.2.29).

ამრიგად, ხრამის, თბილისის, ტყიბულის, შაორის წყალსაცავები ჯერ დალექვის პირველ სტადიაშია, ჟინვალის და სიონის წყალსაცავები – დალექვის მეორე სტადიაში, ხოლო ლაჯანურის წყალსაცავი დალექვის უკვე მესამე სტადიაში (ცხრ. V.2.4; ნახ.V.1.1).

VI. აბრაზიული პროცესები მთის წყალსაცავების ნაპირებზე

VI.1. მთის წყალსაცავების ნაპირებზე აბრაზიული პროცესების დინამიკის არსებული კვლევების ანალიზი

წყალსაცავების ნაპირებზე აბრაზიული (ნაპირების ტალღებით გამოწვეული წარეცხვა) მოვლენები მრავალფაქტორიანი პროცესია. ამ კვლევების პრიორიტეტი მიეკუთვნება აკადემიკოს ფ.პ. სავარენსკის. ყველა არსებული კვლევა შეიძლება დავყოთ ოთხ ეტაპად, (ნახ. VI.1.1):

– კვლევების პირველი ეტაპი (1950 წლამდე) ხასიათდება უმთავრესად გეოლოგიური მიდგომებით [Саверенский Ф.П., Поляков Б.В., Ширямов В.А.] და სხვ.;

– კვლევების მეორე ეტაპი (1960 წლამდე) ხასიათდება პროგნოზირების სხვადასხვა მეთოდის დამუშავებით. ამ პერიოდში შექმნილი ძირითადი საფუძვლები დღემდე გამოიყენება [Вендров С.Л., 1962; Золотарев Г.С., 1956; Качугин Е.Г., 1975; Кондратьев Н.Е., 1960; Пышкин Б.А., 1973; Розовский Л.Б., 1968; Ian S.K., Singh V.P., 2003] და სხვ.;

– კვლევების მესამე ეტაპი (1975 წლამდე) ხასიათდება ნაპირის დინამიკის თეორიისა და დაგროვილი სავსე დაკვირვებების მონაცემების დამუშავებით [Варазашвили Н.Г., Григорьева О.Г., Максимчук В.Л., Печеркин И.А., Судольский А.С., Финаров Д.П., Широков В.И.; Sorokina O. R., Petrova L. E.] და სხვ. ამ ეტაპზე დაიწყო მთის წყალსაცავების ნაპირების შესწავლა:

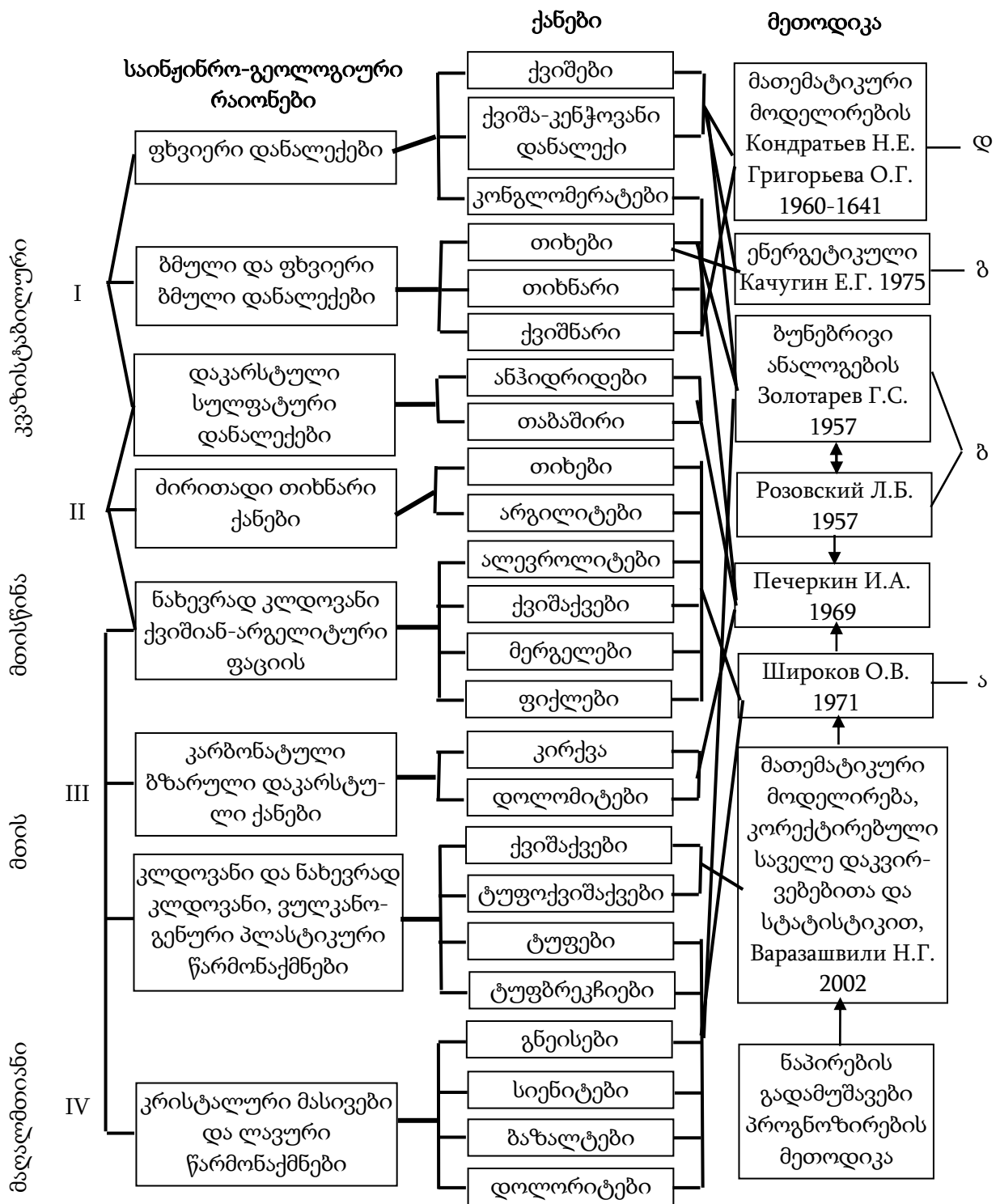
– კვლევების მეოთხე ეტაპი ხასიათდება მთის წყალსაცავებზე გარკვეული ფაქტორების: არასტაციონარული დონური რეჟიმის, რეგიონალური მახასიათებლების ფაქტორული ანალიზის გამოყენებით [Burova V. N., 2020; Reid I. R., 1992; Metreveli G. და სხვ., 2019; Starodubtsev V., Bogdanets V., 2016; Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н., 2002]. მთის წყალსაცავების ნაპირების გადამუშავების პროგნოზირება ხორციელდებოდა განსაზღვრული ჯგუფის წყალსაცავებისათვის, რომელიც დაწყებული და დამუშავებული იყო სამხრეთ კავკასიაში პირველი ქალი – მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორის, ქალბატონ ნინო ვარაზაშვილის მიერ (ცხრ. VI.1.1; VI.1.2;).

ცხრილი VI.1.1

ნაპირების გადამუშავების პროგნოზი განსაზღვრული ჯგუფის წყალსაცავებისათვის

№	წყალსაცავის ჯგუფი	წყლის დონის ცვალებადობის ამპლიტუდა (A), მ	წყლის დონის გადაადგილების სიჩქარე ($V_{დონ}$), მ/დღეღამეში	მორფომეტრიული მაჩვენებელი, H/F	რელიეფის მაჩვენებელი (საშუალო) "a"
1	კვაზისტაბილური (დაბლობის, ვაკის)	< 6	<0,03	$8 \cdot 10^{-9} \div 3 \cdot 10^{-7}$	0,84
2	არასტაბილური (მთისწინა)	6÷20	0,03÷0,08	$3 \cdot 10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-5}$	0,57
3	დონის საშუალო დამუშავების (მთის)	20÷50	0,08÷0,50	$3 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-4}$	0,36
4	დონის სწრაფი დამუშავების (მაღალმთიანი)	50÷100	0,50÷1,50	$3 \cdot 10^{-4} \div 8 \cdot 10^{-3}$	0,27
5	დონის ინტენსიური დამუშავების	> 100	>1,50	$< 8 \cdot 10^{-3}$	0,12

¹⁾ $\alpha = \lg V_{დონ} / \lg H = \text{tg} \alpha$ - წირების დახრილობის კუთხის ტანგენსის ტოლია; $\lg K_w$ - მონაკვეთი ($\lg V_{დონ}$) ღერძზე (ნახ.III.2.1). რელიეფის მთიანობის კოეფიციენტის („a“) მნიშვნელობა დამოკიდებულია წყალსაცავის მოცულობაზე ($V_{დონ}$), ე.წ. მოცულობის კოეფიციენტზე (K_w), ფართობზე (F) და სიღრმეზე (H), $V_{დონ} = K_w \cdot H^a$ (ნახ.III.2.1).



ნახ. VI.1.1. წყალსაცავების ნაპირების გადამუშავების პროგნოზირების არსებული ძირითადი მეთოდები

პირობითი აღნიშვნები: I – კვაზისტაბილური, $A < 5$ მ; $V_{დონ} < 0,03$ მ/დღე-ღამეში, ვაკის წყალსაცავები; II – დონის არასტაბილური დამუშავების, $A = 5 \div 20$ მ; $V_{დონ} = 0,03 \div 0,08$ მ/დღე ღამეში, მთისწინა წყალსაცავები; III – დონის საშუალო დამუშავების $A = 20 \div 50$ მ; $V_{დონ} = 0,08 \div 0,5$ მ/დღეღამეში, მთის წყალსაცავები; IV – დონის *სწრაფი დამუშავების* $A = 50 \div 100$ მ; $V_{დონ} = 0,5 \div 3,5$ მ/დღე-ღამეში, მაღალმთიანი წყალსაცავები. ა – მათემატიკური მოდელების ნატურული დაკვირვებებისა და სტატისტიკური მონაცემების კორექტირებით; ბ – ბუნებრივი ანალოგებით; გ – ენერგეტიკული; დ – მათემატიკური მოდელები.

მთის წყალსაცავების ნაპირების ძირითადი გენეტიკური ტიპები

ტიპების ნუმერაცია	ნაპირების გენეტიკური ტიპების დასახელება	ნაპირების გენეტიკური ქვეტიპები	ნაპირების სახეობანი
1	2	3	4
I	ჰიდროგრაფიკული ნაპირები	დენუდაციური (გასწორებული)	სუსტად დენუდაციური ძლიერ დენუდაციური
		მეწყურული	დიტრუზირი (ბლოკისებრი)
			დელაპსიური (პლასტიკური)
			მეწყურები – ნაკადისებრი
		ზვავურ-შვავური	
		სუფოზიურ- ჯდენადი	
		კარსტული	ძირითადი
ჯდენადი			
II	აბრაზიული ნაპირები	დენუდაციური (ძირითადი)	სუსტად წარეცხვადი
			საშუალოდ წარეცხვადი
			ძლიერ წარეცხვადი
		წარეცხვადი (ბმული)	ზედაპირულად ჩამორეცხვადი
			სუსტად წარეცხვადი
			საშუალოდ წარეცხვადი
			ინტენსიურად წარეცხვადი
II	აბრაზიული ნაპირები	ჩამოზვავებულ- ფლატესებრი	ლოდისებრი
			ჯდენადი
		მეწყურული	მუდმივად მოქმედი
			პერიოდულად მოქმედი
III	აკუმულაციური ნაპირები	კარსტული	
		დამრეცი	პლაჟისებრი
IV	ნეიტრალური ნაპირები	გაყინული დანალექები	შესართავის
		სიღრმული	ძირითადი
V	ლაგუნისებრი ნაპირები	თავთხელი	ძირითადი
VI	დაჭაობებული ნაპირები	ზედაპირული	ბალახით დაფარული
			გრუნტის
		ღრმად დაჭაობებული	ბუჩქოვანი

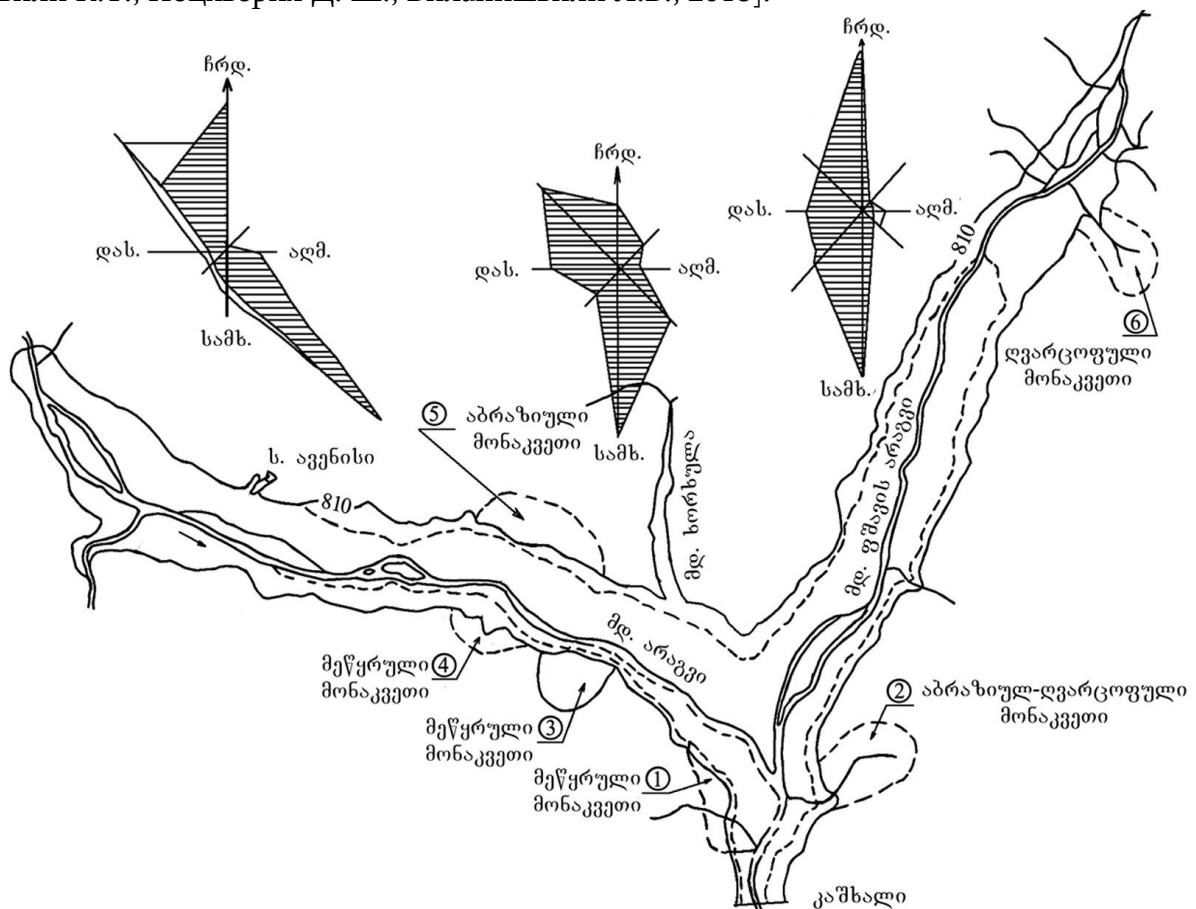
VI.2. საქართველოს მთის წყალსაცავების ნაპირებზე აბრაზიული პროცესების დინამიკის კვლევები

მთის წყალსაცავების სანაპირო ზოლის ფორმირების პროგნოზირების მეთოდიკა ითვალისწინებს: საინჟინრო-გეოლოგიურ დარაიონებას; გეოლოგიური სიტუაციის ანალიზს; სანაპირო ფერდობების გენეტიკურ კლასიფიკაციას; დონეების ცვალებადობისა და ქარ-ტალღურ რეჟიმს [ვარაშვილი ნ. გ., გობეჩია გ. ნ., 2002].

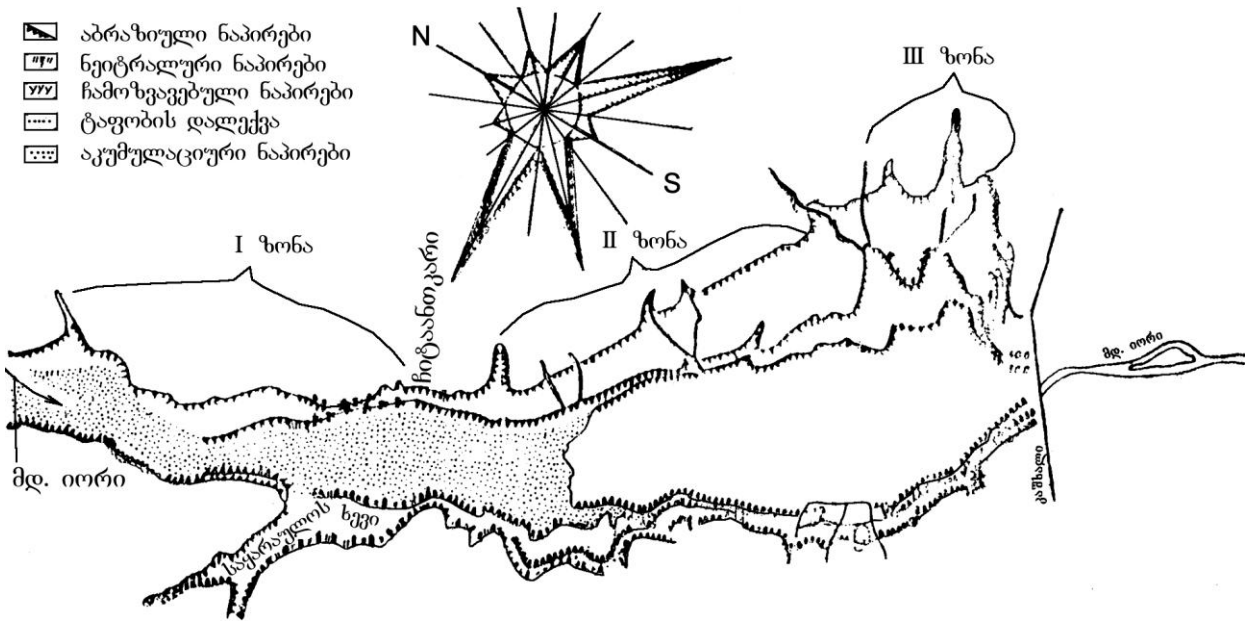
მთის წყალსაცავების ნაპირების ფორმირების პროცესები იწყება წყალსაცავების შევსებიდან. წყალსაცავების აბრაზიული პროცესების განგარიშებისას საჭიროა ნაპირების გარეცხვის ზედა (a_1) და ქვედა (a_2) საზღვრების, დახრილობისა და სიგანის დადგენა.

ჩვენი კვლევების საფუძველზე გამოვლინდა, რომ მთის წყალსაცავების ნაპირების გადამუშავების ძირითადი მოქმედი ფაქტორებია: ქარ-ტალღური რეჟიმი, დონის დამუშავება, სანაპირო ზონის კონფიგურაცია, ფერდობის დახრილობა და გრუნტების ტიპი. ნაპირების გადამუშავების გამოკვლევა განხორციელდა ნაპირების ყველა კონკრეტული უბნისათვის.

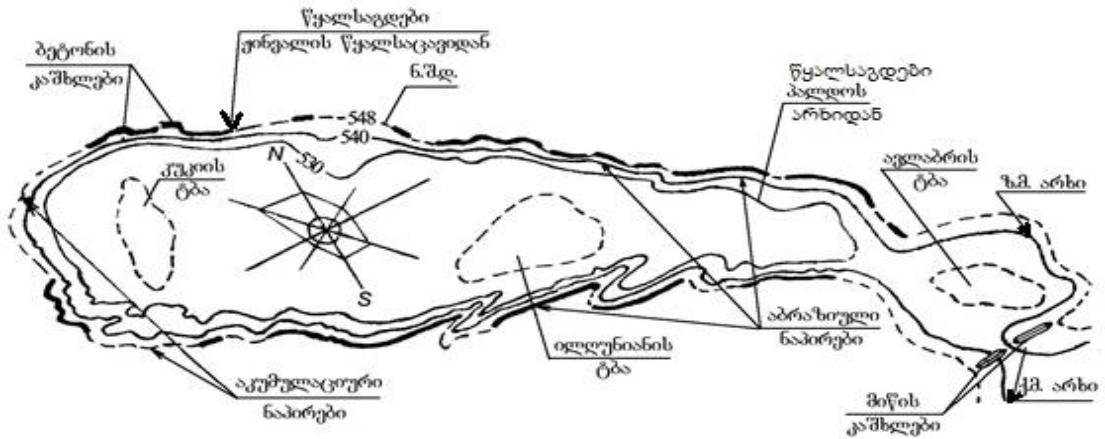
წყალსაცავების ნაპირების აბრაზიული პროცესების დინამიკა და პროგნოზირება ჩატარდა საქართველოს მსხვილ მთის წყალსაცავებზე – ჟინვალის, სიონის, თბილისის, ხრამის, შაორის, ტყიბულის და ლაჯანურის (ნახ. VI.2.1÷VI.2.7; ცხრ. VI.2.1 ÷ VI.2.11) [Iordanishvili I., Iremashvili I., Iordanishvili K., Bilanishvili L., Potskhveria D., Kandelaki N., Sukhishvili N., 2017; Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Канделаки Н.В., 2018; Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Поцхверия Д. Ш., Биланишвили Л.Б., 2018].



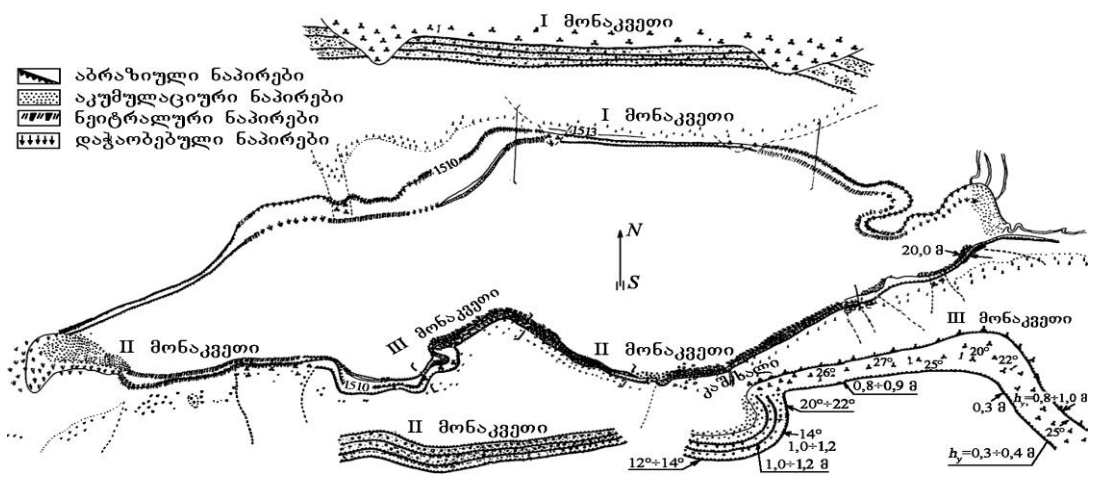
ნახ. VI.2.1. ჟინვალის წყალსაცავის პერიმეტრზე აბრაზიულ-დვარცოფული მონაკვეთების სქემა



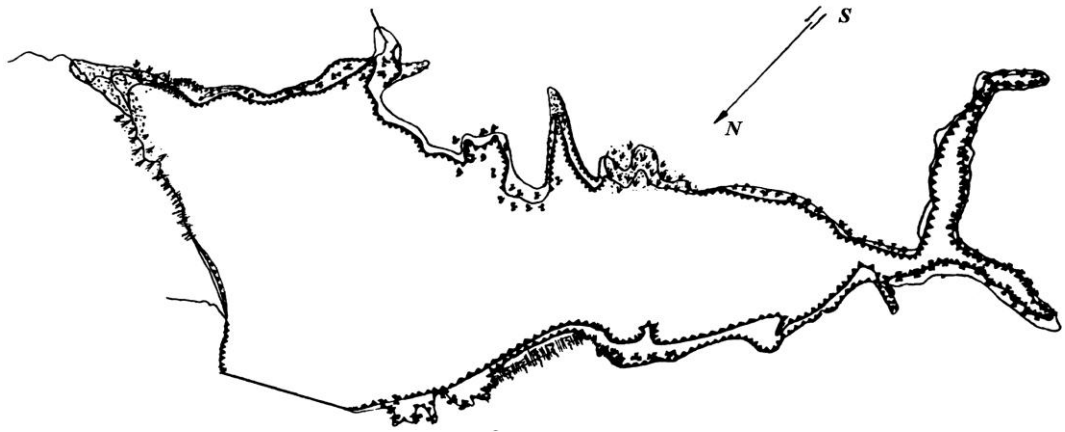
ნახ. VI.2.2. სიონის წყალსაცავის ნაპირების აბრაზიული პროცესების განვითარების სქემა








ნახ. VI.2.3. თბილისის წყალსაცავის ნაპირების განვითარების სქემა
 ————— აბრაზიული ნაპირები; — — — — აკუმულაციური ნაპირები

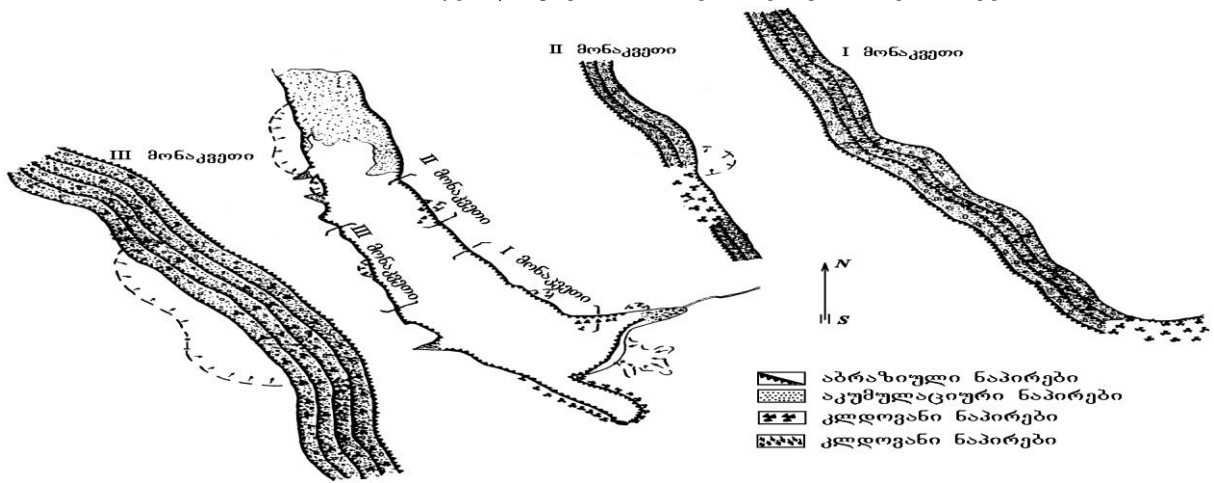






ნახ. VI.2.4. ხრამის წყალსაცავის ნაპირების განვითარების სქემა



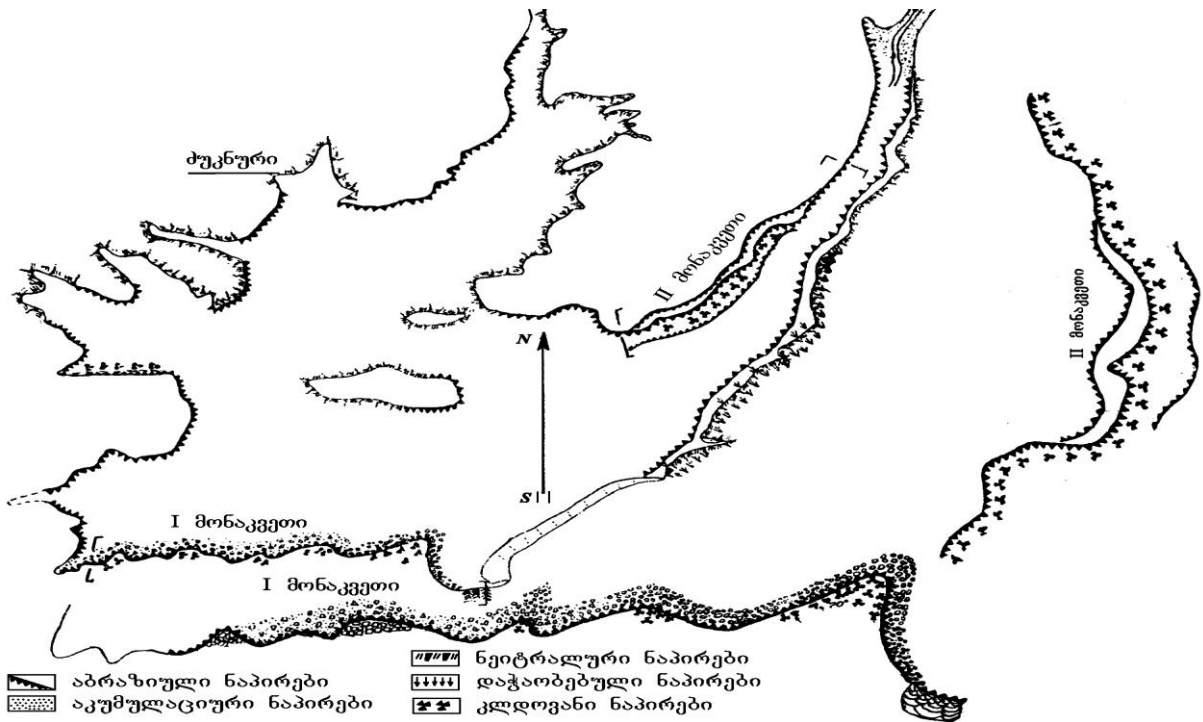
- | | |
|---|---|
|  აბრაზიული ნაპირები |  დაჯაობებუი ნაპირები |
|  აკუმულაციური ნაპირები |  კლდოვანი ნაპირები |
|  ნეიტრალური ნაპირები | |






ნახ. VI.2.5. შაორის წყალსაცავის ნაპირების განვითარების სქემა



- | | |
|---|--|
|  აბრაზიული ნაპირები |  აკუმულაციური ნაპირები |
|  კლდოვანი ნაპირები |  კლდოვანი ნაპირები |

ნახ. VI.2.6. ლაჯანურის წყალსაცავის ნაპირების განვითარების სქემა



- | | |
|---|---|
|  აბრაზიული ნაპირები |  ნეიტრალური ნაპირები |
|  აკუმულაციური ნაპირები |  დაჯაობებუი ნაპირები |
| |  კლდოვანი ნაპირები |

ნახ. VI.2.7. ტყიბულის წყალსაცავის ნაპირების განვითარების სქემა

ცხრილი VI.2.1

თბილისის წყალსაცავის ნაპირების მოკლე დახასიათება (±545,0 მ-ზე)

ინდექსი	ნაპირების გენეტიკური ტიპები	სიგრძე, კმ	ნაპირების სახეობა	თანამედროვე გეოლოგიური პროცესები	ლითოლოგია	ფერდობის საშუალო დახრილობა გრადუსებში	გადამუშავების სისქე, მ	ნაპირების ადგილმდებარეობა
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	აბრაზიული	19,8 (83%)				-		
	დენუდაციურ-აბრაზიული	1,0 (4,2%)	ა) სუსტად გადამუშავებული	გამოფიტვა	არკოზული, მკვრივი ქვიშაქვა	30-65°	-	სამხრეთ-აღმოს. ნაპირი ავლაბრის ტბამდე
	(გასწორებული)	4,51 (18,9%)	ბ) ძლიერ გადამუშავებული	გამოფიტვა-აბრაზია	ქვიშაქვა ალევროლიტები, თიხა	10-20°	1-3	სამხ.-აღმოსავლეთის და სამხ.-დას. ნაპირი
	აბრაზიული	6,37 (26,7%)	ა) სუსტად გარეცხილი	აბრაზია	ს.შ. თიხნარი	5-6°	0,2-0,3	ავლაბრის ტბასთან
		1,83 (7,7%)	ბ) საშუალოდ გარეცხილი	აბრაზია	მძიმე თიხნარი, ქვიშაქვა,	6-11°	0,5-2,0	სამხ.- აღმ. I მონაკვეთი
აბრაზიული	3,13 (13,3%)	გ) ძლიერ გადამუშავებული	აბრაზია	ალევროლიტები, თიხა	10-16°	2-4	ჩრდ.-აღმოს. ნაპირი	
I	ჩამოზვავება ჩამოშვავება	2,91 (12,2%)	-	შვავი აბრაზია	ქვიშაქვა	25-50°	1-2	ჩრდ.-დას. და სამხრეთის ნაპირები
II	აკუმულაციური	0,8 (3,3%)	მეჩეჩი	აკუმულაცია	ხრეშოვანი ქვიშაქვა	1-5°	0,3	ლოკალური მონაკვეთები ყურეს სათავეში
III	ნეიტრალური	3,3 (13,7%)	- " -	-	ხრამის ალუვიუმი	1-5°	-	მდ. კვინის-ხევის და ავლაბრის ტბასთან

ცხრილი VI.2.2

ხრამის წყალსაცავის ნაპირების მოკლე დახასიათება (± 1506,0 მ-ზე)

ინდექსი	ნაპირების გენეტიკური ტიპები	სიგრძე, კმ	ნაპირების სახეობა	თანამედროვე გეოლოგიური პროცესები	ლითოლოგია	ფერდობის საშუალო დახრილობა გრადუსებში	გადამუშავების სისქე, მ	ნაპირების ადგილმდებარეობა
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	აბრაზიული	14,5 (52%)						
	აბრაზიული კლდოვანი	0,7 (2,6%)	სუსტად გადამუშავებული	აბრაზია	დოლერიტები	5°-10°	0,2-0,3	სამხ.აღმ.; ს. წინწყაროს ზემოთ
		1,5 (5,4%)	საშუალოდ გადამუშავებული	-"-	ანდეზიტობაზალტი	10°-15°	0,2-0,3	სამხრ.-დას.
	1,2(4,3%)	ძლიერ გადამუშავებული	-"-	დოლერიტები	20-30°	5,0-6,0	კაშხლის მიმდებარე	

ცხრილი VI.2.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	აბრაზიული ბმული	1,2 (4,3%)	ზედაპირულად ჩამორეცხილი	ჩამორეცხილი	ქვიშნარი	5°-9°	0,1-0,2	სამხრ.-დას.; ჩრდ.
		2,0 (7,2%)	სუსტად წარეცხილი	აბრაზია	თიხნარი, ალუვიონი	10°-16°	0,3-0,5	სამხრ.-დას.; ჩრდ.
		2,8 (10,0%)	საშუალოდ წარეცხილი	—	—	18°-25°	0,5-3,0	სამხრ.; ჩრდ-დას.
		3,2 (11,5%)	ინტენსიურად წარეცხილი	—	—	60°-80°	3,0-12,0	სამხრ.-აღმ.
	ზვავური, ფლატისებრი	1,0 (3,5%)	დახრამული	ზვავი, ხრამები, აბრაზიული	ბმული თიხნარი	60°-70°	2,5-5,0	სამხრ.-აღმ.
	მეწყურული	0,9 (3,2%)	ტერასირებული	მეწყერი, აბრაზია	დელუვიური თიხნარი	36°-45°	1,0-3,0	სამხრ.-აღმ.
II	აკუმულაციური	3,4 (12,0%)						
	ტალღურ-აკუმულაციური	0,40 (1,5%)	პლაჟის ტიპის	აკუმულაცია	ხრეში, კენჭი	2,0°-4,0°	0,5-0,7	სამხრ. -დას; სამხრ.
	ალუვიურ-აკუმულაციური	3,0 (10,5%)	ლამისებრი	აკუმულაცია	ალუვიური ნალექი	<2°	0,6-0,8	მდინარეების შესართავები
	ლაგუნის ტიპი	2,8 (10%)	დამრეცი	—	ნატანის დანალექი	<2°	—	სამხრ. -დას; ჩრდ.
III	ნეიტრალური	6,0 (21%)	რიყისებრი		თიხნარები, ქვიშა	2°-5°	—	სამხრ.-დას; ჩრდ.-აღმ.
IV	დაჭაობებული	1,6(5%)	დაბალი		თიხნარი, ლამი	1°	—	ჩრდ. -აღმ.

ცხრილი VI.2.3

შაორის წყალსაცავის ნაპირების მოკლე დახასიათება (†1132,0მ-ზე)

ინდექსი	ნაპირების გენეტიკური ტიპები	სიგრძე, კმ	ნაპირების სახეობა	თანამედროვე გეოლოგიური პროცესები	ლითოლოგია	ფერდობის საშუალო დახრილობა გრადუსებში	გადამუშავების სისქე, მ	ნაპირების ადგილმდებარეობა
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	აბრაზიული	21 (74,6%)						
	აბრაზიულ-წარეცხვადი	3,0 (10,6%)	სუსტად გადამუშავებული	აბრაზია	თიხნარი, ალუვიური კენჭი	5°-8°	0,3-0,5	ჩრდ.-ჩრდ. დასავ.
		4,1 (14,6%)	საშუალოდ გადამუშავებული	—	დელუვიურ-თიხოვანი, ალუვიური, კენჭოვანი	8°-20°	1,0÷2,0	სამხრ. -აღმ. ჩრდ. -დას. ჩრდ. -აღმ.
		6,2 (22,1%)	ძლიერ გადამუშავებული	—	—	>20°	2,0÷4,0	ჩრდ. -დას.
	ზვავურ ფლატისებრი	0,6 (2,1%)	ციცაბო წყალქვეშა	ფლატე, ზვავი, აბრაზია	თიხნარი	40°-50°	3,0-5,0	სამხრ. - დას.

ცხრილი VI.2.3 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	მეწყრული	0,2 (0,7%)	წყალქვეშა	მეწყრული აბრაზიული	თიხნარი	>25°	1,0-2,0	სამხ. - აღმ.
	დაკარსტული	6,9 (24,5%)	წყალქვეშა	კარსტი, აბრაზია	კირქვა, მერგელი	25°-45°	0,5±2,0	სამხ. - აღმ.; ჩრდ. - დას.
II	აკუმულაციური	1,2 (4,2%)						
	ტალღურ-აკუმულაციური	0,7 (2,5%)	პლაჟისებრი	აკუმულაცია	ხრეშოვანი (d=0,5-3,02 სმ)	2°-4°	0,5±0,7	ჩრდ. - აღმ.
	ალუვიურ-აკუმულაციური	0,5(1,7 %)	დამრეცი	—	ლამისებურ- ქვიშოვანი	2°-4°	0,6-1,0	მდ. შაორის შესართავში
III	ნეიტრალური	1,9 (6,6%)						
	ძირითადი	1,1 (3,8%)	ციცაბო წყალქვეშა		კირქვა	>45°		ჩრდ. - აღმ.; სამხ. - აღმ.
	მეთხეული დანალექები	0,8 (2,8%)	დაბალი		თიხნარი	1°-3°		სამხ. - აღმ.
IV	დაჭობებული	3,4 (12,2%)						
	ფლოტო- გენური	2,1 (7,5%)	დაბალი		თიხნარი ლამისებრი	1°-1,5° <3°		ჩრდ.-აღმ.; სამხ. - აღმ.
	ჭაობები	1,3 (4,7%)	საშუალო		ლამისებრი			მდ. თეთრი- ჭალას ჩრდ. - აღმ.

ცხრილი VI.2.4

ლაჯანურის წყალსაცავის ნაპირების მოკლე დახასიათება (±496,0 მ-ზე)

ინდექსი	ნაპირების გენეტიკური ტიპები	სიგრძე, კმ	ნაპირების სახეობა	თანამედროვე გეოლოგიური პროცესები	ლითოლო- გია	ფერდობის საშუალო დახრილობა გრადუსებში	გადამუ- შავების სისქე, მ	ნაპირების ადგილმდებ- რეობა
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	აბრაზიული	6,78 (80,2%)						
	აბრაზიული (ძირითადი ქანები)	0,55 (6,5%)	საშუალოდ წარეცხვადი	აბრაზია გამოფიტვა	ქვიშაქვა, მერგელური	25°-55°	0,3-0,6	ნაპირების ორივე მხარეს კანიონები
	აბრაზიულ- გარეცხვადი (მეთხეული დანალექები)	2,77 (17,1%)	სუსტად წარეცხვადი	აბრაზია	თიხნარი, ალუვიურ- პროლუვი- ური დანალექები	7°-15°	0,4-0,6	მარჯვენა ნაპირების ზედა და საშუალო ნაწილი
	მეწყრული	3,45 (4,0%)	საშუალოდ წარეცხვადი			>20°	2,0±4,0	ჩრდ, -დას.
	მეწყრული ძირითადი ქანები	2,8 (33%)	ციცაბო საფე- ხურებიანი	მეწყერი, აბრაზია	თიხოვანი ქანები	25°-45°	1,0-3,0	აღმოსავლეთის მარჯვენა ნაპირი

ცხრილი VI.2.4 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	მეოთხეულ ქანებში	0,65 (7,8%)	—	—	დელუვიალური თიხნარი	25°-30°	1<2,0	ადმოსავლეთის ნაპირი
II	აკუმულაციური	1,18 (13,9%)	—	—				
	ალუვიურ-აკუმულაციური	0,7(8,3)	ლამოვანი	აკუმულაცია	აკუმულაციური დანალექი	<2°	1,5÷1,7	სათავეში
II	ალუვიურ-აკუმულაციური	0,48(5,6%)	ფხვიერი დანალექი	—	—	2°-3°	<1,2	კაშხლის მიმდებარე ტერიტორია
III	ნეიტრალური	0,6 (5,9%)	კლდოვანი ციცაბო		კირქვა, ქვიშაქვა		25°-60°	მარჯვენა ნაპირის კანონური ნაწილი

ცხრილი VI.2.5

ტყიბულის წყალსაცავის ნაპირების მოკლე დახასიათება (+520,0 მ-ზე)

ინდექსი	ნაპირების გენეტიკური ტიპები	სიგრძე, კმ	ნაპირების სახეობა	თანამედროვე გეოლოგიური პროცესები	ლითოლოგია	ფერდობის საშუალო დახრილობა გრადუსებში	გადამუშავების სისქე, მ	ნაპირების ადგილმდებარეობა
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	აბრაზიული	22,0 (52,6%)						
		2,0 (4,9%)	სუსტად წარეცხვადი	გამოფიტვა წარეცხვა	ქვიშაქვა, კირქვა	45°	0,20-0,4	ჩრდ. და-ჩრდ. დას. „მცირე“ კუნძული
	აბრაზიულ-წარეცხვადი, ბმული გრუნტები	3,07 (7,3%)	სუსტად წარეცხვადი	ჩამორეცხვა აბრაზია	ალუვიურ-დელუვიური, ქვიშა-თიხნარი	10°-16°	0,3-0,5	სამხრ. და დას. ჩრდ. და აღმ.
		6,4 (15,6%)	საშუალოდ წარეცხვადი	აბრაზია		17°-25°	1,0÷1,2	სამხ. აღმ. და სამხრ. ნაპირი
		5,9 (14,5%)	ძლიერ წარეცხვადი	ზვავი, ფლატე, აბრაზია	დელუვიური თიხნარი	25°-40°	>1,2	სამხ. აღმ. და სამხრ. ნაპირი
ზვავურ ფლატესებრი	1,8 (4,5%)	მაღალი	ზვავი, ფლატე, აბრაზია	დელუვიური თიხნარი	45°-55°	2,0	დას. ნაპირის სამხრეთის ნაწილი	

ცხრილი VI.2.5 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	მეწყერული	0,5 (1,2%)	ტერასირებული	მეწყერები, აბრაზია	დელუვიური თიხნარი	25°-30°	3,5-5,0	დას. ნაპირის სამხ.-ის ბოლოები
II	აკუმულაციური	5,0 (11,8%)						
	ტალღურ-აკუმულაციური	1,5 (3,5%)		აკუმულაცია ჩამორეცხვა	ნატანი	2°-4°	0,4÷0,8	სამხ.-ის ნაპირის აღმ.-ის ნაწილი
	ალუვიურ-აკუმულაციური	3,5 (8,3%)		აკუმულაცია	ნატანებურ-ხრე-შოვანი დანალექები	1°	2,0-4,0	მდ. ტყიბულას შესართავში
III	ნეიტრალური	9,1 (23,8%)		დაბალი	ხრეშოვან-თიხოვანი და თიხნარისებრი დანალექები	2°-5°		აღმ. ნაპირის მონაკვეთები და ყურეების სათავეები
IV	დაჭაობებული	5,0 (11,8%)		ძალიან დაბალი	ალუვიურ-პროლუვიური თიხნარები	1÷1.5°		აღმ. და დას. ნაპირები

ცხრილი VI.2.6

თბილისის წყალსაცავის ნაპირების გენეტიკური ტიპების კრებსითი მაჩვენებლები (†545,0 მ-ზე)

ნაპირის ტიპი	ნაპირის სიგრძე, კმ
ნაპირის საერთო სიგრძე	23,9
I. აბრაზიული	19,8
II. აკუმულაციური	0,8
III. ნეიტრალური	3,3

ცხრილი VI.2.7

ხრამის წყალსაცავის ნაპირების გენეტიკური ტიპების კრებსითი მონაცემები

ნაპირის ტიპი	სიგრძე, კმ † 1512,0 მ დონეზე		სიგრძე, კმ † 1497,0 მ დონეზე	
	კმ	%	კმ	%
ნაპირის საერთო სიგრძე	31,0	100,0	28,0	100,0
I. აბრაზიული	15,8	51,0	14,2	51,0

ცხრილი VI.2.7 (გაგრძელება)

II. აკუმულაციური	1,2	3,8	3,4	12,0
III. ნეიტრალური	7,0	22,6	6,0	21,5
IV. ლაგუნისებრი	–	–	1,6	5,5
ან დაჭაობებული	7,0	22,6	2,8	10,0

ცხრილი VI.2.8

შაორის წყალსაცავის ნაპირების გენეტიკური ტიპების
კრებსითი მონაცემები (†1132,0 მ-ზე)

ნაპირის ტიპი	ნაპირის სიგრძე, კმ
ნაპირის საერთო სიგრძე	27,5
I. აბრაზიული	21,0
II. აკუმულაციური	1,2
III. ნეიტრალური	1,9
IV. დაჭაობებული	3,4

ცხრილი VI.2.9

ლაჯანურის წყალსაცავის ნაპირების გენეტიკური ტიპების
კრებსითი მონაცემები (†496,0 მ-ზე)

ნაპირის ტიპი	ნაპირის სიგრძე, კმ
ნაპირის საერთო სიგრძე	27,5
I. აბრაზიული	6,98
II. აკუმულაციური	1,18
III. ნეიტრალური	0,6

ცხრილი VI.2.10

ტყიბულის წყალსაცავის ნაპირების გენეტიკური ტიპების
კრებსითი მონაცემები (†496,0 მ-ზე)

ნაპირის ტიპი	ნაპირის სიგრძე, კმ
I. აბრაზიული	22,0
II. აკუმულაციური	5,0
III. ნეიტრალური	9,0
IV. დაჭაობებული	5,0

მთის წყალსაცავების ნაპირების გადამუშავების ძირითადი განზოგადებული პარამეტრები 10 წლის პერიოდის განმავლობაში
(25 მ-მდე დონის თანაბარი დამუშავებისას)

იტირ ატმოსფერული დაბინი	ნაპირის ქვეტიპი	ნაპირების სახეობები	ნაპირების გრუნტების დახასიათება გადამუშავების ზონაში	ნაპირის თავდაპირ- ველი პროფილის პარამეტრები		ნაპირების საპროგნოზო პროფილის პარამეტრები			
				ნაპირის სიმაღლე, მ	ფერდობის დახრილობა, გრადუსებში	ფერდის კიდეს გადაადგილება მ	ფერდობის დახრი- ლობა (გრადუსებში) წყლის კიდეს დამუშავების ზონაში	ტალღის აგორების ზონაში	ნაპირის მსხვერვის მოცულობა, მ ³ /გრძ. მ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ატმოსფერული- ალბინი	ალბინი ატმოსფერული	სუსტი დენუდაციური (გამიშვლებული)	დოლერიტები, მეოთხეული პერიოდის, ძლიერ დაბზარული	<60,0	25-75	1,0	20-70	-	-
		ძლიერ დენუდაციური	ანდეზიტო-ბაზალტები, ძლიერ დაბზარული, პოლიოცენური	5-10	30-65	2,0	30-65	-	-
			სილაქვა და დაბზარული კირქვა ცარცული და მესამეული პერიოდისა	30-60	35-40	2,6	20-40	-	0,50
			თხელშრიანი თიხისებრი სილა-ქვა	20-40	25-50	3,0	7-10	12-18	2,30
			საშუალოდ შრიანი სილაქვა და ალევიოლიტები, ეოცენის პერიოდისა	15-30	10-20	10-18	6-9	8-14	16,50
			ფლიშესებრი დანალექები, ზედა ეოცენის პერიოდისა	10-20	12-25	10-30	5-8	6-10	38,0
	ალბინი	დეტროზიური (ბლოკისებრი)	დელუვიური თიხა-მიწა, ზედა მეოთხეული პერიოდისა	15-50	20-40	20-28	5-9	6-10	101,0
		დელავსიური (ფირფიტისებრი)	სილაქვა, თიხა (მაიკოპი)	10-25	18-35	18-25	5-6	10-12	72,5
		მეწყერული ნაკადები	ტბური-მდინარეული პროლუვიალური თიხა-მიწა საშ. და ზედა მეოთხეული პერიოდისა	8-20	20-25	ფერდის კიდის გადაადგილების სიჩქარე 3 მ/წელიწადში.			

ცხრილი VI.2.11 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
საქართველო- ალბანეთის საზღვარი	დასავლეთი	წვრილ- ფრაქციული	წვრილფრაქციული თიხა-მიწა და თიხა- მიწისებრი ნატანი, საშ. მეოთხეული პერიოდის	15-20	20-60	15-20	12-15	13-18	61,5
		მსხვილ- ფრაქციული	ფლიშესებრი დანალექები (სილაქვა და თხელშრიანი თიხები, ზედა ეოცენის პერიოდის)	12-20	10-18	12-25	8-12	8-15	35,6
		კარსტული	ბარემი (კირქვა სუსტი მერგელური)	2-5	>25	<0,3	-	-	-
		სუფოზიური	თიხა-ქვა თაბაშირისებრი	10-25	8-25	30-42	6-10	7-13	21,4
საქართველო- სომხეთის საზღვარი	დასავლეთი	სუსტად გადამუშავებული	გამოფიტული ლავური დანალექები, მეოთხეული პერიოდისა	<50	20-70	<0,4	20-70		3,20
		საშუალოდ გადამუშავებული	ძლიერ დაბზარული ანდეზიტები	5-10	37-70	<0,3	30-60		0,6
			დაბზარული ქვიშაქვა, ეოცენის პერიოდის	30-50	28-40	0,6	15-25	20-40	3,70
		ძლიერ გადამუშავებული	თიხისებრი ქვიშა-ქვა, ეოცენის პერიოდის	20-40	15-40	0,9	8-10	9-15	7,60
	ზედაპირული ჩამორეცხილი	თიხა, მიწა და კენჭოვანი დანალექები	3	6-9	2-3	3-5	5-8	38,0	
	დასავლეთი	სუსტად წარეცხილი	თიხა, მიწა და კენჭოვანი კაჭარი	3-5	10-16	3-10	6-10	11-13	9,5
		საშუალოდ წარეცხილი	დელუვიალური თიხა მიწა	15-50	20-40	10-20	10-13	12-30	53,0
			კონგლომერატები	5-20	10-20	50	6-10	8-16	105,0
		ინტენსიურად წარეცხილი	ფხვიერი დანალექები	5-18	6-18	80-110	3-8	4-10	479,0
			ალუვიური დანალექები	15-45	20-40	20-30	8-10	10-13	116,5
			ტბური მდინარეული თიხა-მიწა-ქვა საშ. მეოთხეული პერიოდის	10-20	20-25	40-55	7-13	10-15	197,0
			ფლიშესებრი დანალექები ზედა ეოცენის პერიოდის	12-23	15-28	<10	5-10	8-15	135,0
	სხვა შემადგენლობის თიხამიწა	15-20	5-15	<16	3-11	6-13	289,0		
	დასავლეთი- ჩრდილო	მუდმივად მოქმედი	დელუვიალური თიხამიწა	10-40	15-45	50-20	3-6	8-10	120,0
სილაქვა (მაკოპის ტიპის)			10-30	18-35	<35	10-18	10-20	78,0	
პერიოდულად მოქმედი		დელუვიალური თიხამიწა, საშ. და ზედა მეოთხეული პერიოდის	10-45	20-40	30-60	5-9	10-15	200-380	

VI.3. მთის წყალსაცავების ნაპირებზე აბრაზიული პროცესების პროგნოზირება

VI.3.1. მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვის ზედა (a) საზღვრის ანგარიში

საქართველოს წყალსაცავების ძირითადი რაოდენობა გასული საუკუნის შუა წლებში არის აშენებული. დღევანდელი დროისათვის არ არსებობს მთის წყალსაცავების ნაპირებზე აბრაზიული პროცესების პროგნოზირების გაანგარიშების მეთოდოლოგია.

მთის წყალსაცავების განსხვავებები ერთ-ერთმა პირველმა ქართველმა მკვლევარმა, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორმა, პროფესორ ნინო ვარაზაშვილმა გამოავლინა (ცხრ. VI.3.1) [Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н., 2002].

ცხრილი VI.3.1

სხვადასხვა ტიპის წყალსაცავების ძირითადი მორფომეტრიული რიცხობრივი მაჩვენებლები

№	ძირითადი მაჩვენებლები	აღნიშვნები	განზომილება	რაოდენობრივი მაჩვენებლები		
				ვაკის წყ-ები	მთისწინეთის წყ-ები	მთის წყ-ები
1	2	3	4	5	6	7
1	რელიეფის მთიანობის მაჩვენებელი	a	–	1,0÷0,6	0,6÷0,29	0,29÷0,1
2	მორფომეტრიული მაჩვენებელი	H^2/F	–	$9 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$
3	წყლის დონის რხევების ამპლიტუდა	ΔA	მ	<6,0	6÷20	>20
4	წყლის მოცულობის გამოყენების მაჩვენებელი	$V_{სრ}/V_{სს}$	–	0,4÷0,6	0,5÷0,7	0÷0,95
5	წყლის მოცულობის ნაზრდი 1 მ დაწნევაზე	$V_{სს}/H$	მლნ მ ³ /მ	500÷2000	50÷500	1,0÷50,0
6	წყლის მოცულობისა და წყალსაცავის ზედაპირის ფართობის თანაფარდობა	$V_{სს}/F$	მლნ მ ³ /კმ ²	5÷15	15÷50	50÷120
7	მიწების დატბორვის ფართობისა და სასარგებლო მოცულობის თანაფარდობა	$S_{დატ}/V_{სს}$	კმ ² /მლნ მ ³	150÷120	110÷50	46÷25
8	1 მ დაწნევაზე დატბორვის ფართობი	$S_{დატ}/H$	კმ ² /მ	250÷65	55÷30	0,25÷0,08
9	წყლის ზედაპირის ფართობის პროცენტი ნმდ-ის ნიშნულზე წყალმარჩხოების საერთო ფართობისგან	$F_{წყარო}/F_{სერ}$	%	20÷15	10÷6	6-4
10	$A_b=f(a)$	A_b	–	0,010	0,014	0,016÷0,018

ოთხი სხვადასხვა ტიპის – არაბმული, ბმული, ნახევრადკლდოვანი და კლდოვანი გრუნტებისგან შედგენილი ფერდებისთვის დამუშავებულია აბრაზიული ნაპირების წარეცხვის პროგნოზირების მეთოდები (ცხრ. VI.I.I) [Iordanishvili I., Iremashvili I., Iordanishvili K., Bilanishvili L., Potskhveria D., Kandelaki N., Sukhishvili N., 2017].

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვა დამოკიდებულია შემდეგ ფაქტორებზე: ნაპირთან ღელვის ტალღურ ენერგიაზე, დონურ რეჟიმზე, ფერდის გრუნტების წარეცხვის უნარსა და ამ პროცესის სიჩქარეზე, მაშინ შეიძლება გამოვყოთ გაანგარიშების ორი ძირითადი პოზიცია – წყალსაცავის დონის 6,0 მ-მდე გადაადგილებისა და წყალსაცავის დონის – 6,0 მ-ზე მეტი გადაადგილებისას.

პირველი პოზიციის გაანგარიშებისას აბრაზიული ნაპირის წარეცხვის პროგნოზირებისათვის მიღებულია ენერგეტიკული მეთოდი, რომლის დროსაც წარეცხილი გრუნტის მოცულობა იანგარიშება ქვემოთ მოყვანილი დამოკიდებულების გამოყენებით [Варазашвили Н.Г., Макацария А. П., 1974]:

$$Q = E \cdot K_{\text{წარ}} \cdot K_{\text{ნაპ}} \cdot t_{\text{წლ}}^b, \text{ მ}^3 \quad (\text{VI.3.1})$$

სადაც Q არის ნაპირის 1 მ სიგრძეზე ქანების წარეცხილი გრუნტის მოცულობა, მ^3 ; E – ნაპირის 1 მ სიგრძეზე ღელვის მრავალწლიური საშუალო ენერგია, ტ·მ; $K_{\text{წარ}}$ – მთის ქანების წარეცხვის კოეფიციენტი, $\text{მ}^3/\text{მ}$; $K_{\text{ნაპ}}$ – ნაპირის სიმაღლით განპირობებული კოეფიციენტი; $t_{\text{წლ}}^b$ – წარეცხვის მოქმედების დრო (წელი); $K_{\text{წარ}}$ და $K_{\text{ნაპ}}$ -ის მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში VI.3.2; – ხარისხის მაჩვენებლის (b) მნიშვნელობა ტოლია $b = 0,45 \div 0,95$, $b_{\text{ნაპ}} = 0,7$. მსხვილი ალუვიური ქვიშებისგან, ხრემისა და კენჭის ნარევისათვის – $b = 0,5$; საშუალო მარცვლოვანი ქვიშებისა და ხრემისათვის – $b = 0,6$; ალუვიური წვრილი და მტვრისებრი ქვიშებისა და ქვიშნარისათვის – $b = 0,8$; მსუბუქი ქვიშნარისათვის – $b = 0,9$.

ცხრილი VI.3.2

($K_{\text{წარ}}$) და ($K_{\text{ნაპ}}$) მნიშვნელობები

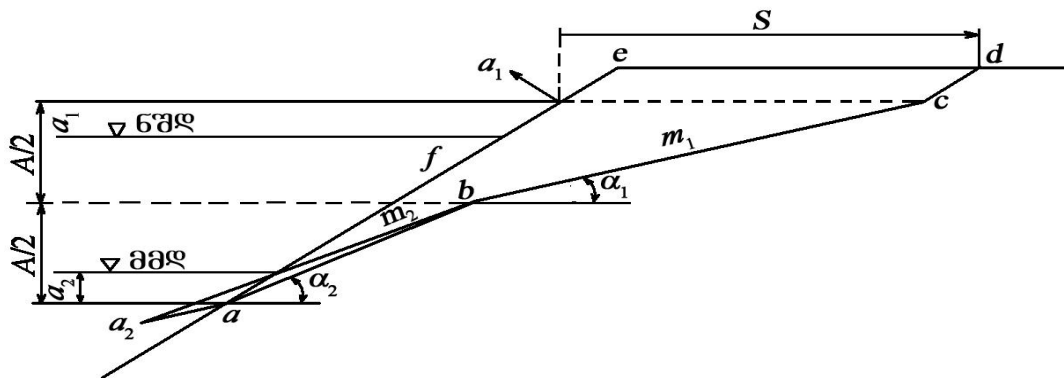
№	ქანების კლასი	$K_{\text{წარ}}$, $\text{მ}^3/\text{მ}$	$K_{\text{ნაპ}}$
1	ძლიერ წარეცხვადი ქანები	0,0065±0,003	0,03
2	სუსტად წარეცხვადი ქანები (ქვიშა, თიხამიწა, ქვიშნარი)	0,003±0,001	0,035
3	საშუალოდ წარეცხვადი (მძიმე თიხამიწა, ტბური თიხა)	0,001±0,0005	0,04
4	ძნელად წარეცხვადი (ქვიშა-ქვა, ზღვის თიხა)	<0,0005	0,05

წარეცხვის პროფილი იგეგმება საინჟინრო-გეოლოგიურ ნახაზზე, წარეცხვის ზედა და ქვედა საზღვრამდე.

საანგარიშო ჰორიზონტებია: ზედა – ნორმალური შეტბორვის დონე (ნშდ), ქვედა-მკვდარი მოცულობის დონე – (მმდ). ანგარიშის ძირითადი ელემენტებია: a_1 – წარეცხვის ზედა საზღვარი და a_2 – წარეცხვის ქვედა საზღვარი; $m = \text{ctg } \alpha$ – მდგრადი ფერდის გასაშუალებული კუთხის კოტანგენსი.

წარეცხვის საბოლოო (ინტეგრალური) პროფილი განისაზღვრება მისი ცალკეული ცვლილებების ჯამის სახით.

მეორე პოზიციის გაანგარიშება (დონის გადაადგილება 6,0 მ-ზე მეტი გადამუშავებისას) ჩატარდა გრაფო-ანალიტიკური მეთოდის გამოყენებით. ფერდის ერთგვაროვანი გრუნტებისგან აგებული ნაპირის წარეცხვის საბოლოო სიგანე (S) განისაზღვრება VI.3.1 ნახაზის მიხედვით.



ნახ. VI.3.1. ერთგვაროვანი გრუნტისგან აგებული ნაპირის წარეცხვის საბოლოო სიგანის განსაზღვრა
 ae – ბუნებრივი ფერდის ზედაპირი, $abcd$ – წარეცხილი ფერდის ზედაპირი

ფერდის წარეცხვის ზედა ზღვარი (a_1) დამოკიდებულია ფერდზე ტალღების აგორების სიმაღლეზე (h_{runup}), ფერდზე ტალღურ ($h_{\text{ტალ.მოდ}}$) და ქარისეულ ($h_{\text{ქარ.მოდ}}$) მოდენაზე:

$$a_1 = h_{\text{runup}} + h_{\text{ტალ.მოდ}} + h_{\text{ქარ.მოდ}}, \text{ მ} \quad (\text{VI.3.2})$$

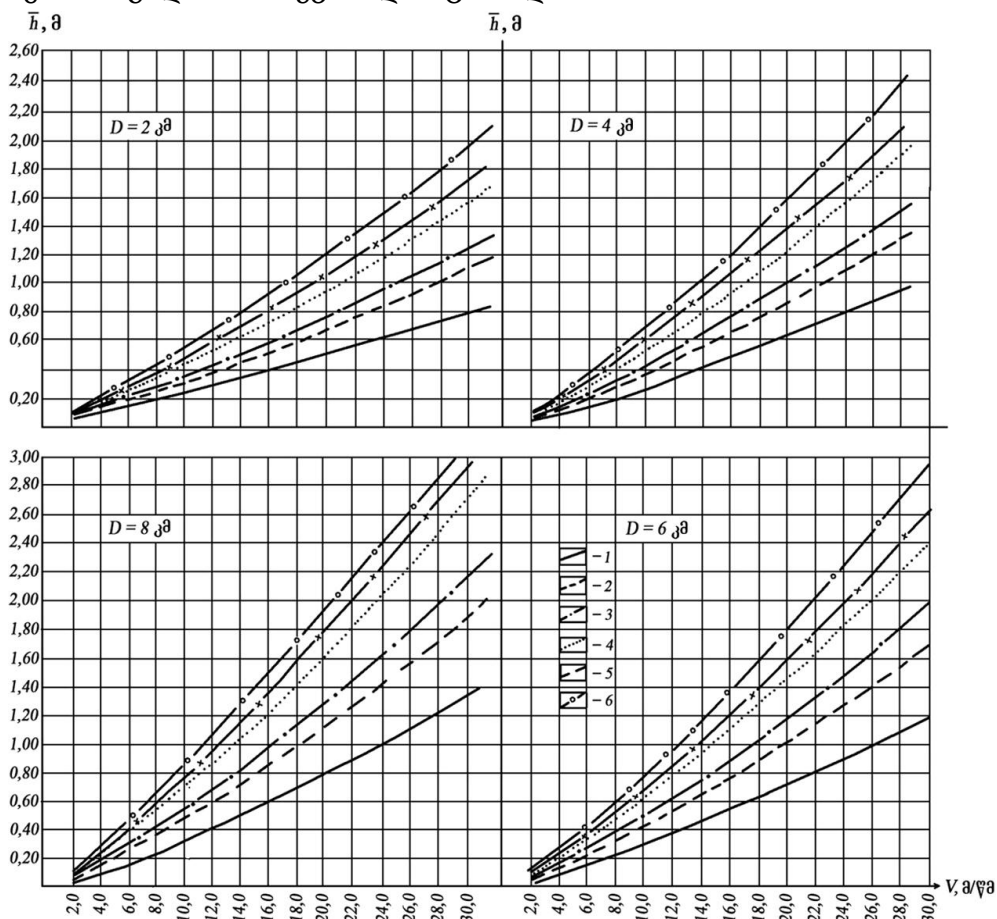
სადაც $h_{\text{runup}} = 1,1 h_{1\%} \cdot K_r \cdot K_{\text{run}}$, მ; $h_{\text{ტალ.მოდ}} = 0,5 h_{1\%}$, მ; $h_{\text{ქარ.მოდ}} = 0,0010 h_{1\%}$, მ.

ქარისეული მოდენის მნიშვნელობა მთის წყალსაცავების პირობებში, ტალღის გაქანების მცირე სიგრძის გამო ($D \leq 10,0$ კმ) ტოლია $h_{\text{ქარ.მოდ}} = 0,001 h_{1\%}$, პრაქტიკული გაანგარიშებისათვის $h_{\text{ქარ.მოდ}}$ -ის მნიშვნელობას უგულებელყოფთ; $h_{1\%}$, $\lambda_{1\%}$ (მ) – ტალღის 1%-იანი უზრუნველყოფის სიმაღლე და სიგრძეა „ღრმა“ წყალზე. სტატისტიკური მონაცემების არარსებობისას $h_{1\%}$ იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით – $h_{1\%} = \bar{h}_{\text{ღრმ}} \cdot P_{1\%}$, სადაც $\bar{h}_{\text{ღრმ}} = A_b \cdot V_c^{1,2} D^{0,4}$ მ; საანგარიშო მრუდები $h_{\text{ღრმ}} = f(A_b \cdot V_c \cdot D)$ ნაჩვენებია ნახაზზე VI.3.2; $A_b = 0,010 \div 0,018$, A_b -ს მნიშვნელობები რელიეფის მაჩვენებლის (a) შესაბამისად, მოყვანილია ცხრილში VI.3.1; V_c – არის ქარის სიჩქარე, მ/წმ; D – ტალღის გაქანების სიგრძე, კმ; $P_{1\%} = 1,1$ – ღელვის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ღელვის 1%-იან უზრუნველყოფაზე; K_{run} – კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ფერდის ჰორიზონტთან დახრილობის კუთხეზე (α°), $K_{\text{run}} = 1,2$ – თუ $\alpha^\circ = 6 \div 18$, $K_{\text{run}} = 0,5$, თუ $\alpha^\circ = 3^\circ \div 5^\circ$, $K_{\text{run}} > 2,0$, თუ $\alpha^\circ > 13^\circ$; K_r – ფერდის ხორკლიანობის კოეფიციენტი (ცხრ. VI.3.3).

ფერდის ზედაპირის ხორკლიანობის კოეფიციენტის (K_f) მნიშვნელობები

№	ფერდის გამაგრების ტიპი	ხორკლიანობის კოეფიციენტი, K_f	ხორკლიანობის კოეფიციენტის მნიშვნელობა განგილიე-კუტერის მიხედვით, n	წრფივი ხორკლიანობა, ε
1	2	3	4	5
1	ბეტონის ფილები	0,95±1,0	< 0,014	< 1,0
2	თიხა-ბრემოვანი ფერდი	0,90±0,44	0,015±0,020	1,0±1,1
3	ნაყარი მომრგვალებული ქვისგან	0,76±0,89	0,020±0,025	1,1±6,0
4	ნაყარი ნაგლეჯი ქვისგან	0,71±0,75	0,025±0,030	6,1±50,0
5	ნაყარი ბეტონის ბლოკებისგან	0,5±0,71	≥ 0,030	> 50,0

ფერდის წარეცხვის ზედა საზღვრის (a_1)-ს გრაფო-ანალიტიკური მეთოდით გაანგარიშების მაგალითი მოყვანილია ცხრილში VI.3.5.



ნახ. VI.3.2. ტალღის გასაშუალებული სიმაღლის ($\bar{h}_{ღმ}$), სიჩქარის (V_c), ტალღის გაქანების (D) და (A_b)-ს დამოკიდებულება $\bar{h}_{ღმ} = f(A_b, V_c, D)$, სადაც 1 - $A_b = 0,01$; 2 - $A_b = 0,014$; 3 - $A_b = 0,016$; 4 - $A_b = 0,020$; 5 - $A_b = 0,022$; 6 - $A_b = 0,025$.

VI.3.2. მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვის ქვედა საზღვრის (ax) ანგარიში

მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვის ქვედა საზღვრის (ax) ანგარიშის ანალიზური მეთოდი

წყალსაცავების ბმული გრუნტებისგან შედგენილი ნაპირების წარეცხვის ქვედა საზღვრის (ax) გაანგარიშების საფუძვლად მიღებულია წყლის ნაკადის მოქმედი ($V_{საან.}$) და დასაშვები არაგამრეცხი ($V_{დას.}$) სიჩქარეების ტოლობა:

$$V_{საან.} = V_{დას.}^*), \quad (VI.3.3)$$

სადაც $V_{დას.}$ ფსკერული არაგამრეცხი სიჩქარეა, მისი მნიშვნელობა ბმული გრუნტებისათვის ყველა შესაძლო ფაქტორების გათვალისწინებით განისაზღვრება აკადემიკოს ც. მირცხულავას მიერ შემოთავაზებული ფორმულით [Мирцхулава Ц. Е., 2000]:

$$V_{დას.} = 1,25 \sqrt{\frac{2gm_p}{2,6\gamma_{\text{წყ}} n_u} (\gamma_{\text{გრ.}} - \gamma_{\text{წყ}}) d_{საან.} + 1,25 K_0 C_\gamma^H}, \quad (VI.3.4)$$

ხოლო $V_{საან.}$ – წყლის ნაკადის საანგარიშო სიჩქარე, რომლის მნიშვნელობა შეიძლება განისაზღვროს სითხეების ტალღური მოძრაობის თეორიიდან, კერძოდ, გერსტნერის ტროქოიდალური ტალღების თეორიიდან (ტალღის სიმაღლის – h , სიგრძის – λ და წარეცხვის ქვედა საზღვრის ax გათვალისწინებით) [Gerstner F. I., 1809]:

$$V_{საან.} = \frac{n_u \pi h}{\sqrt{\frac{\pi \lambda}{g} \cdot sh \frac{4\pi a_2}{\lambda}}}, \quad (VI.3.5)$$

სადაც λ , h წყალსაცავის ზედაპირზე ქარისეული ტალღის სიგრძე და სიმაღლეა, მ; $\gamma_{\text{წყ.}}$, $\gamma_{\text{გრ.}}$ – წყლისა და გრუნტის ხვედრითი წონა, კგ/მ³; n_u – მუშაობის გადატვირთვის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ნაკადის პულსაციურ მნიშვნელობას და განისაზღვრება ფორმულით [Мирцхулава Ц. Е., 2000]:

$$n_u = \left(\frac{V_{\text{max}}}{\bar{V}} \right)^2, \quad (VI.3.6)$$

სადაც V_{max} მაქსიმალური პულსაციური ფსკერული სიჩქარეა; \bar{V} – გასაშუალებული ფსკერული სიჩქარე; კვლევების არარსებობისას $n_u = n = 4$; m_p – გრუნტის ნაწილაკების მუშაობის პირობების კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს კოლოიდურ მდგომარეობაში ნატანის ზემოქმედებას, 0,1 კგ/მ³; $d_{საან.}$ – გრუნტის ნაწილაკების საშუალო დიამეტრი, მმ; $g = 9,81$ მ/წმ² – თავისუფალი ვარდნის აჩქარება; K_0 – ბმული გრუნტების ერთგვაროვნობის კოეფიციენტი, განისაზღვრება ფორმულით $K_0 = d_{საან.} / d_{95}$, სადაც $d_{საან.}$ გრუნტის დიამეტრის საშუალო მნიშვნელობაა, d_{95} – ნაწილაკების დიამეტრი, რომელთა რაოდენობა ნარევის მასის 95%-ზე ნაკლებია; $C_\gamma^H = 0,035$ ტ/მ² – ბმული გრუნტების დადლილობის ნორმატიული სიმტკიცე; C – ბმული გრუნტების საანგარიშო შეჭიდულობა.

*) ტოლობა $V_{საან.} = V_{ფსკ.}$ განპირობებულია თეორიული საანგარიშო ($V_{საან.}$) და ფსკერული ($V_{ფსკ.}$) ნატურული კვლევების შედეგად მიღებული სიჩქარეების გატოლებით.

ანგარიშის თანმიმდევრობა

ნაბიჯი 1: VI.3.4 და VI.3.5 ფორმულების გატოლებისას ($V_{\text{საწ.}} = V_{\text{ფსკ.}}$) მივიღებთ:

$$1,25 \sqrt{\frac{2gm_p}{2,6\gamma_{\text{ფს}} n_u} (\gamma_{\text{გრ.}} - \gamma_{\text{ფს}}) d_{\text{საწ.}} + 1,25K_0 C_\gamma^H} = \frac{0,75\pi h}{\sqrt{\frac{\pi\lambda}{g} \cdot sh \frac{4\pi a_2}{\lambda}}}; \quad (\text{VI.3.7})$$

ნაბიჯი 2: (VI.3.7) ტოლობის ორივე მხარე ავიყვანოთ კვადრატში

ნაბიჯი 3: არითმეტიკული გაანგარიშების შემდეგ მივიღებთ:

$$1,25^2 \left[\frac{2 \cdot 9,81 \cdot m_p}{2,6\gamma_{\text{ფს}} n_u} (\gamma_{\text{გრ.}} - \gamma_{\text{ფს}}) d_{\text{საწ.}} + 1,25K_0 C_\gamma^H \right] = \frac{0,56 \cdot 9,86 h^2}{\frac{3,14\lambda}{9,81} \cdot sh \frac{4 \cdot 3,14 \cdot a_2}{\lambda}}$$

აქედან:
$$11,77 \frac{m_p}{\gamma_{\text{ფს}} n_u} [(\gamma_{\text{გრ.}} - \gamma_{\text{ფს}}) d_{\text{საწ.}} + 1,25K_0 C_\gamma^H] = 17,25 \frac{h^2}{\lambda \cdot sh \frac{12,56 a_2}{\lambda}}$$

მაშინ:
$$sh \frac{12,56 a_2}{\lambda} = \frac{1,47 \gamma_{\text{ფს}} n_u h^2}{\gamma m_p [(\gamma_{\text{გრ.}} - \gamma_{\text{ფს}}) d_{\text{საწ.}} + 1,25K_0 C_\lambda^Y] \cdot \lambda}$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ჰიპერბოლოიდური სინუსი ტოლია: $x = Sh\gamma$,
აქედან $\gamma = Arshx$ და მაშინ:

$$\frac{12,56 a_2}{\lambda} = Arsh \frac{1,47 \gamma_{\text{ფს}} n_u h^2}{\gamma m_p [(\gamma_{\text{გრ.}} - \gamma_{\text{ფს}}) d_{\text{საწ.}} + 1,25K_0 C_\lambda^Y] \cdot \lambda}$$

აქედან **ბმული** გრუნტებისგან შედგენილი ნაპირის წარეცხვის ქვედა საზღვრის (a_2) მნიშვნელობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$a_2 = 0,796 \cdot \lambda \cdot Arsh \frac{1,47 \gamma_{\text{ფს}} n_u h^2}{\gamma m_p [(\gamma_{\text{გრ.}} - \gamma_{\text{ფს}}) d_{\text{საწ.}} + 1,25K_0 C_\lambda^Y] \cdot \lambda} \quad (\text{VI.3.8})$$

წყალსაცავების წარეცხილი ნაპირის ქვედა საზღვრის (a_2)

ანალიზური მეთოდით გაანგარიშების მაგალითი

(ბმული გრუნტები)

გრუნტის ხვედრითი წონა – $\lambda_{\text{გრ}} = 2600$ კგ/მ³; წყლის ხვედრითი წონა – $\lambda_{\text{წყ}} = 1000$ კგ/მ³; კოეფიციენტი – $m_u = 0,4$; მუშაობის პირობების კოეფიციენტი – $m_p = 1,0$; ბმული გრუნტების ერთგვაროვნობის კოეფიციენტი – $K_0 = 0,4$; ბმული გრუნტების დაღლილობის ნორმატიული სიმტკიცე – $C_\gamma^H = 0,035C$, სადაც $C = 0,01 \div 0,06$. ამ პირობებისათვის, ბმული მსხვილი გრუნტებისათვის ($d_{\text{საწ.}} = 0,000008$ მ) იქნება:

$$a_2 = 0,796 \cdot \lambda \cdot Arsh \frac{1,47 \gamma_{\text{ფს}} n_u h^2}{\gamma m_p [(\gamma_{\text{გრ.}} - \gamma_{\text{ფს}}) d_{\text{საწ.}} + 1,25K_0 C_\lambda^Y] \cdot \lambda}$$

$$a_2 \approx 0,08 \cdot \lambda \cdot \operatorname{Arsh} \frac{1,47 \cdot 0,4 \cdot n_u h^2}{\lambda [1,0 \cdot (2,6 - 1,0) \cdot 0,000008 + 1,25 \cdot 0,4 \cdot 0,0001]} \quad (\text{VI.3.9})$$

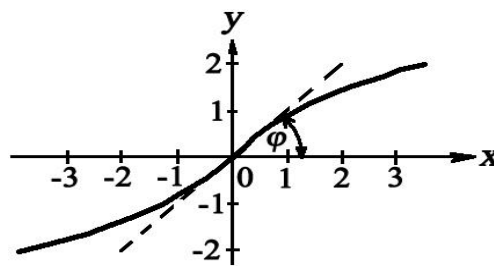
აქედან: **ბმული მსხვილი** გრუნტებისაგან შედგენილი წყალსაცავის ნაპირის წარეცხვის ქვედა საზღვრის დამოკიდებულება ჩაიწერება:

$$a_2 = 0,08 \cdot \lambda \cdot \operatorname{Arsh} 1152,90 \frac{h^2}{\lambda} \quad (\text{VI.3.10})$$

მაგალითად, თუ $h = 1,4$ მ, $\lambda = 6,0$ მ, $d_{\text{სა}} = 0,008$ მმ, მაშინ

$$a_2 = 0,08 \cdot 6 \cdot \operatorname{Arsh} \frac{1152,9 \cdot 1,96}{6} = 0,48 \cdot \operatorname{Arsh} 400,0 = 0,48 \cdot 2,1 = 1,01 \text{ მ}, \quad a_2 = 1,01 \text{ მ},$$

სადაც $\operatorname{Arsh} 400 = 2,1$ ჰიპერბოლოიდური შებრუნებული სინუსის $y = \operatorname{Arsh} x$ მნიშვნელობაა (ნახ. VI.3.3).



ნახ. VI.3.3. ჰიპერბოლოიდური შებრუნებული სინუსის მნიშვნელობა

ბმული წვრილი გრუნტებისათვის ($d_{\text{სა}} \leq 0,001$ მმ = $0,000001$ მ) ფორმულა (VI.3.8) მიიღებს სახეს:

$$a_2 = 0,08 \cdot \lambda \cdot \operatorname{Arsh} \frac{0,58 h^2}{\lambda (1,6 \cdot 0,000001 + 1,25 \cdot 0,4 \cdot 0,0001)} =$$

$$= 0,48 \operatorname{Arsh} 8787,0 = 0,48 \cdot 2,3 = 1,1 \text{ მ}.$$

მაშასადამე, **ბმული წვრილი** გრუნტებისაგან შედგენილი წყალსაცავის ნაპირის წარეცხვის ქვედა საზღვრის (a_2) დამოკიდებულება ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$a_2 = 0,08 \cdot \lambda \cdot \operatorname{Arsh} \frac{h^2}{\lambda \cdot 0,000076} = 0,08 \cdot \lambda \cdot \operatorname{Arsh} 13157 \frac{h^2}{\lambda} \quad (\text{VI.3.11})$$

მაგალითად, თუ $h = 1,4$ მ, $\lambda = 6,0$ მ

$$a_2 = 0,08 \cdot 6 \cdot \operatorname{Arsh} \frac{1,96}{6 \cdot 0,000076} = 1,02 \text{ მ}.$$

როგორც ვხედავთ, ფორმულა (VI.3.8) მრავალფაქტორიანი და რთულია, სადაც გასათვალისწინებელია ცხრა ფაქტორი, ამიტომ საჭირო გახდა ამ მეთოდის ოპტიმიზაცია.

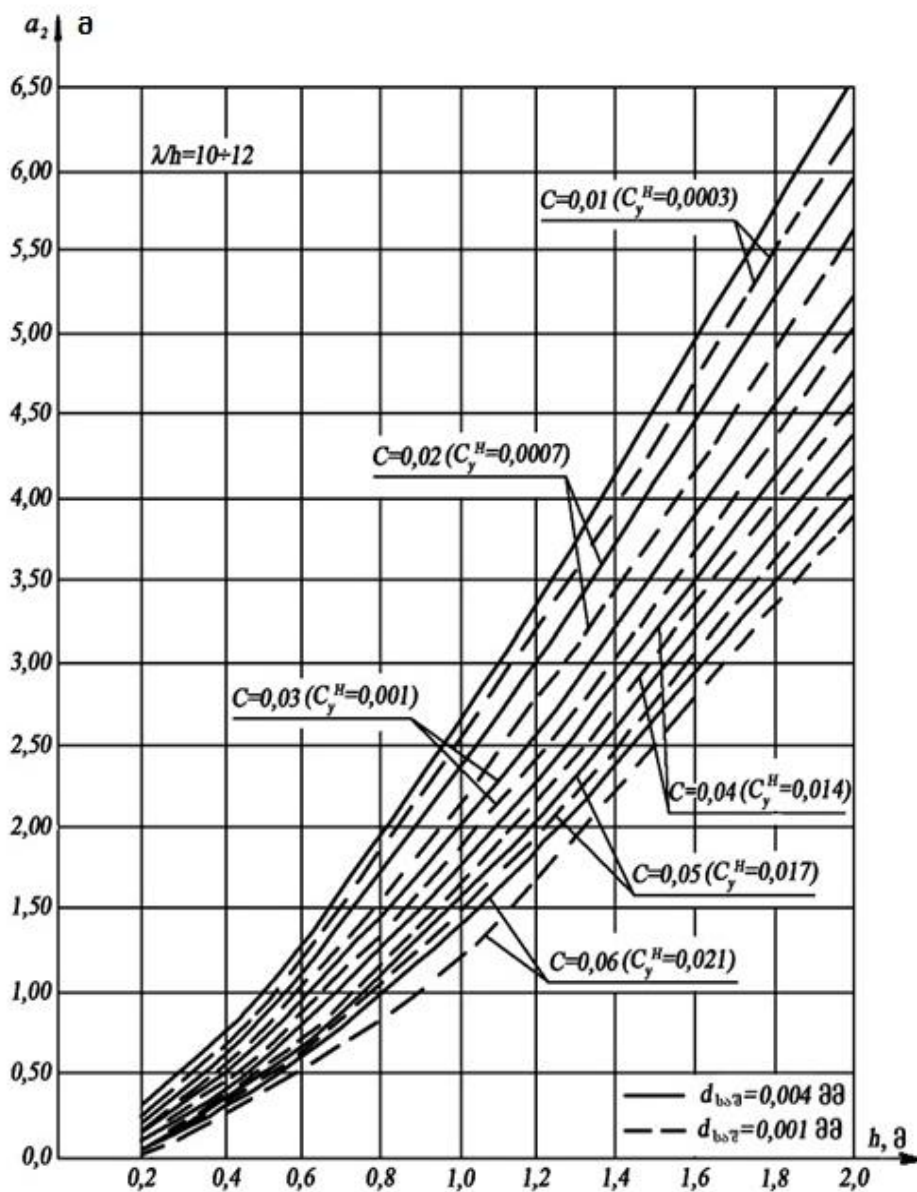
ბმული გრუნტებისგან შედგენილი ნაპირის წარეცხვის ქვედა საზღვრის (a_2) ანგარიშის ოპტიმიზაცია

ბმული გრუნტებისგან აგებული ფერდის წარეცხვის ქვედა საზღვრის (a_2) გაანგარიშება შეიძლება გამარტივდეს VI.3.4 ნახაზის გამოყენებით.

წყალსაცავის ერთგვაროვანი გრუნტებისგან წარეცხილი ფერდის საბოლოო

საპროგნოზო პროფილის აგებმვა ტარდება შემდეგი მიმდევრობით (ნახ.VI.3.4):

- 1) a წერტილიდან ტარდება წრფე, რომელიც დახრილია ჰორიზონტთან α_2 კუთხით - b წერტილამდე. b წერტილი მდებარეობს k წერტილიდან გატარებული ჰორიზონტალური kb და ab წრფეების გადაკვეთაზე. k წერტილი ჰყოფს f a მანძილს ორ ტოლ $A/2$ ნაწილად; α_2 კუთხის მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში VI.3.4;
- 2) მიღებული b წერტილიდან ტარდება ხაზი, რომელიც დახრილია ჰორიზონტთან α_1 კუთხით;
- 3) მიღებული c წერტილიდან, რომელიც მდებარეობს ჰორიზონტალურ fc ხაზზე, ტარდება ხაზი fc , იგი (a) ხაზის პარალელურია;
- 4) მიღებული (d) მონაკვეთი - წარეცხილი ნაპირის საპროგნოზო სიგანეა.



ნახ. VI.3.4. ბმული გრუნტებისგან აგებული ფერდის წარეცხვის ქვედა საზღვრის (a_2) დამოკიდებულება ტალღის სიმაღლეზე (h), ფერდის გრუნტების შეჭიდულობასა (C) და გრუნტის საშუალო დიამეტრზე ($d_{საშ}$) ($1 - d_{საშ} = 0,004$ მმ; $2 - d_{საშ} = 0,001$ მმ; $\lambda/h = 10-12$)

მდგრადი ფერდის დახრილობის კუთხე (α)

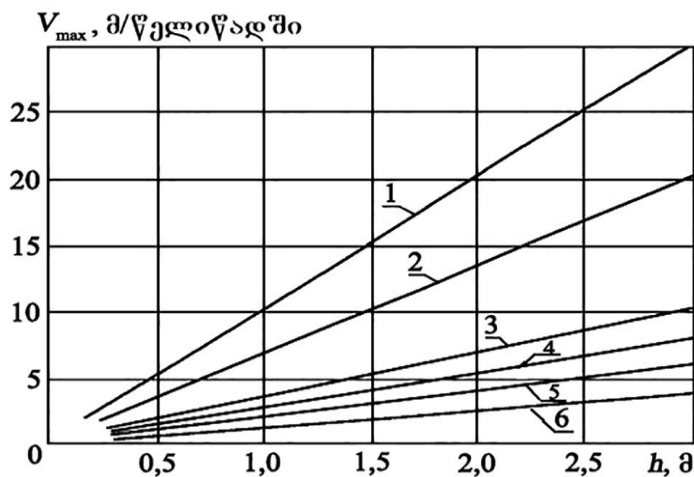
გრუნტის ტიპი		პირობები	
		წყლის დონის ზევით	წყალქვეშა
1	ხრემოვან-კენჭოვანი	30° $m = \text{ctg} \alpha = 1,73$	25° $m = \text{ctg} \alpha = 2,1$
2	მსხვილ და წვრილმარცვლოვანი ქვიშა	26°÷28° $m = \text{ctg} \alpha = 2,1 \div 1,9$	1.5°÷20° $m = \text{ctg} \alpha = 3,7 \div 2,7$
3	ქვიშნარი და თიხნარი	15°÷23° $m = \text{ctg} \alpha = 3,7 \div 2,4$	6°÷14° $m = \text{ctg} \alpha = 9,5 \div 1,1$
4	თიხა	> 20°	5° - 10°

პერიოდი ($T_{\text{ველ.}}$), რომლის მანძილზე წყალსაცავის ნაპირი საბოლოო პროფილს მიიღებს, იქნება:

$$T_{\text{ველ.}} = 2 \frac{S}{V_{\text{max}}} \text{ წელიწადი,} \tag{VI.3.12}$$

სადაც V_{max} ფერდის წარეცხვის მაქსიმალური სიჩქარეა, მ/წელიწადში (ნახ.VI.3.5).

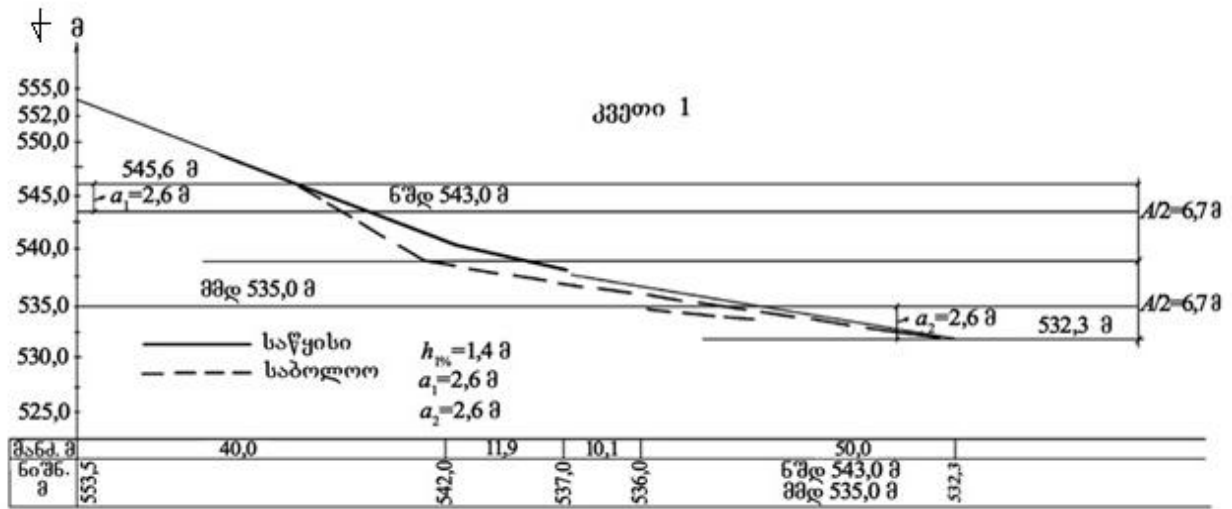
პრაქტიკული, საორიენტაციო გაანგარიშებისას დასაშვებია, რომ თიხნარით აგებული ფერდის წარეცხვის ზედა საზღვარი $a_1 \approx h$, მ; ხოლო ქვედა საზღვარი $a_2 = 1,3 h$ მ, სადაც h – ტალღის სიმაღლეა (მ).



ნახ. VI.3.5. გრაფიკი $V_{\text{max}} = f(h)$

- 1 – ლიოსი; 2 – წვრილმარცვლოვანი ქვიშა; 3 – საშუალო მარცვლოვანი ქვიშა;
- 4 – თიხნარი; 5 – თიხა; 6 – მსხვილმარცვლოვანი ქვიშა

თბილისის წყალსაცავის აბრაზიული პროგნოსტიკული ნაპირის აგების მაგალითი მოყვანილია ნახაზზე VI.3.6 და ცხრილში VI.3.5.



ნახ. VI.3.6. თბილისის წყალსაცავის აბრაზიული ნაპირის განივი პროფილი

ცხრილი VI.3.5

თბილისის წყალსაცავის წარეცხვის ზედა (a_1) და ქვედა (a_2) საზღვრების გაანგარიშება (განივკვეთი 1; $\lambda/h = 10$, $d_{საშ} = 0,004$ მმ; $C = 0,06$)

$A_b = f(a)$ (ცხრილი VI.3.1)	ტალღების გაქანების სიგრძე ქარის ჩ/დ-ის მიმართულებისას, კმ	ჩ/დ-ის მიმართულების ქარის სიჩქარე V_c , მ/წმ	h , მ	P , %	h_1 , მ	K_r ; ცხრ. VI.3.3	$K_{რთ}$ ($\alpha = 12^\circ$)	$h_{რთარ}$, მ	$h_{სალოდ}$, მ	$h_{სარმოდ}$, მ	a_1 (ფორმულა VI.3.2)	a_2 (ნახ. VI.3.4)	ბუნებრივი ფერდის დახრილობის კუთხე (წყლის დონის ზევით) α°_1	ბუნებრივი ფერდის დახრილობის კუთხე (წყალქვეშა) α°_2
0,014	3,5	37,0	1,4	1,1	1,54	0,9	1,2	1,83	0,77	0,01	1,6	2,7	20,0	10,0
											1,3	1,5		

VII. საქართველოს მთის წყალსაცავებში წყლის ხარისხის ფორმირება და თვითწმენდითი პროცესები

VII.1. წყალსაცავებში წყლის ხარისხის ფორმირება

წყალსაცავების წყლის ხარისხი – ერთ - ერთი უმთავრესი მაჩვენებელია, რომელიც განსაზღვრავს წყალსაცავებისა და მდინარეების წყლის რესურსების ეფექტურ და რაციონალურ გამოყენებას [ჰიგიენური მოთხოვნები, 2001; Уйма А., Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., Канделаки Н.В., Иорданишвили К.Т, 2019].

წყალსაცავების შექმნა და ექსპლუატაცია დაკავშირებულია პოტენციური მომხმარებლის ინტერესებთან, როგორცაა სასოფლო-სამეურნეო და ურბანული ტერიტორიების სასმელი წყლით უზრუნველყოფა; სამრეწველო და თევზის მეურნეობის განვითარება, სანაპირო ზონის რეკრეაციული მიზნით ათვისება და ა.შ.

გასათვალისწინებელია ის ფაქტი, რომ ნებისმიერი მომხმარებელი, უპირველეს ყოვლისა, დაინტერესებულია წყალსაცავის წყლის ხარისხით, ვინაიდან მხოლოდ წყლის დასაშვები ხარისხის მაჩვენებლები გვამლევს მათი აქტიური მართვის საშუალებას [თევზაძე თ., იორდანიშვილი ი., ფოცხვერია დ., 2012].

წყალსაცავებში წყლის ხარისხი დამოკიდებულია ბუნებრივი და სამეურნეო ჩამონადენის ფორმირების პირობებზე. მაგალითად, წყლის სასმელ-სამეურნეო მოხმარებისათვის ნორმატივების მალიმიტირებელს წარმოადგენს ეპიდემიური უსაფრთხოება, ფიზიკური თვისებები (სუნი, გემო, მჟავიანობა და ა. შ.), ქიმიური შემადგენლობის უვნებლობა. უდიდესი მნიშვნელობა ენიჭება წყლის შემადგენლობას თევზის მეურნეობის დანიშნულებისათვის. სამრეწველო მიზნებისათვის გამოყენებული წყლის მაჩვენებელია მინერალიზაციის ხარისხი, სიხისტე და შეტივანარებული მასალის არსებობა.

წყალსაცავებში წყლის ხარისხი განისაზღვრება მდინარეული ჩამონადენის ჰიდროქიმიური თვისებებურებით. წყლის ქიმიურ შემადგენლობას წყალსაცავში განსაზღვრავს მისი ქვაბულისა და გარემომცველი ტერიტორიის გეოლოგიური აგებულება. წყლის შეტბორვის შემდეგ წყალსაცავის გეოგარემოში ვითარდება მთელი რიგი პროცესები: ნაპირგადამუშავება, ქვაბულში ჩამდინარე დროებითი და მუდმივ-მოქმედი ნაკადების გააქტიურება, ნიადაგის დამარილიანება სანაპირო ზოლში და სხვ. მელიორაციული დანიშნულების წყალსაცავებში ვეგეტაციის პერიოდში წყლის ინტენსიური მოხმარებისა და მაღალი აერაციის პირობებში, შეტბორვის დონის დაწევასთან ერთად ადგილი აქვს მინერალიზაციის მნიშვნელოვან ამაღლებას.

წყლის ხარისხი განისაზღვრება მაჩვენებლების ხუთი ჯგუფით [დიაკონიძე რ., ჩახაია გ., წულუკიძე ლ., ვარაზაშვილი ზ., კუპრეიშვილი შ., სუპატაშვილი თ., მთიულშიშვილი ნ., 2013]:

1. წყლის ფიზიკური მაჩვენებლები და რიგი ნივთიერებების კონცენტრაცია (მგ/ლ); ტემპერატურა; *PH* სიდიდე; გახსნილი ჟანგბადის, შეტივტივებული და გახსნილი ნივთიერებების რაოდენობა; სიხისტე; ქლორიდების, სულფატების, რკინის,

მარგანეცის, ამონიუმის, ნიტრატების რაოდენობა და სხვ.

2. ორგანული ნივთიერებების კონცენტრაცია: პერმანგანატული და ბიქრომატული ჟანგვადობა (მგ O₂/ლ), ჟანგბადის ბიოქიმიური გამოყენება (მგ O₂/ლ), ექსტრაჰირებული ნივთიერებები, ორგანული ნახშირბადი და ორგანული აზოტი;

3. არაორგანული ნივთიერებების კონცენტრაცია: ვერცხლისწყალი, კადმიუმი, ტყვია, დარიშხანი, ქრომი, ნიკელი, ციანიდები, სულფიდები, ფტორიდები (მგ/ლ);

4. სამრეწველო ორგანული დამაბინძურებელი ნივთიერებების კონცენტრაციის მაჩვენებლები: ანიონ-აქტიური დეტერგენტები, მქროლავი ფენოლები, ნავთობის წარმოებულები (მგ/ლ);

5. ბიოლოგიური მაჩვენებლები: საპრობილობა, მიკროორგანიზმების რაოდენობა და სპეციფიკური მაჩვენებლები: ფერი; სუნი; ბარიუმის, ბორსა და მოლიბდენის არსებობა და სხვ.

წყალსაცავების წყლის სისუფთავის ხარისხის განსაზღვრისას გამოიყენება კლასიკური ჰიდრობიოლოგიური მაჩვენებლები, კერძოდ, მათი ტროფიულობის შეფასება. წყალსაცავის **ოლიგოტროფულობას** შეესაბამება საკმაოდ სუფთა წყალი, **მეზოტროფულობას** – სუფთა, **სუსტ ევტროფულს** – საკმაოდ უმნიშვნელოდ დაბინძურებული, **ძლიერ ევტროფულს** – უმნიშვნელოდ დაბინძურებული, **პოლიტროფულს** – ძლიერ დაბინძურებული, **ჰიპერტროფულს** – საკმაოდ მაღალი ხარისხის დაბინძურებული.

წყალსაცავების წყლის ხარისხის დასაშვები ნორმატიული მაჩვენებლები გამოყენების მიხედვით მოყვანილია ცხრილში VII.1.1.

ცხრილი VII.1.1

სხვადასხვა მიზნებისათვის გამოყენებული წყლის ხარისხის მაჩვენებლების სასურველი და დასაშვები სიდიდეები

წყლის ხარისხის მაჩვენებლები	სიდიდე	
	სასურველი	დასაშვები
1	2	3
სასმელი წყალმომარაგებისათვის		
ა ჯგუფი		
ტემპერატურა °C	15,0	20,0
pH სიდიდე	6,5-8,0	6,5-8,5
გახსნილი ნივთიერებების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ	400,0	800,0
საერთო სიხისტე (H°)	15,0	20,0
ქლორიდები, მგ/ლ	100,0	300,0
სულფატები, მგ/ლ	100,0	400,0
რკინა (საერთო), მგ/ლ	0,3	0,5
მანგანუმი (საერთო), მგ/ლ	0,05	0,1
ამონიუმი, მგ/ლ	0,05	1,0
ნიტრიტები, მგ/ლ	0,0	0,002
ნიტრატები, მგ/ლ	5,0	10,0

ცხრილი VII.1.1 (გაგრძელება)

1	2	3
ბ ჯგუფი		
პერმანგანატული ჟანგვალობა (მგ/ლ)	5,0	10,0
ბიქრომატული ჟანგვალობა (მგ/ლ)	15,0	25,0
ჟანგბადის ბიოქიმიური მოხმარება (მგ/ლ)	3,0-4,0	5,0
ექსტრაგირებული ნივთიერებები (მგ/ლ)	0,2	0,5
ბ ჯგუფი		
ვერცხლისწყალი, მგ/ლ	–	1,0
კადმიუმი, მგ/ლ	–	10,0
ტყვია, მგ/ლ	–	50,0
დარიშხანი, მგ/ლ	–	50,0
სპილენძი, მგ/ლ	–	1100,0
ქრომი (საერთო), მგ/ლ	–	–
ნიკელი, მგ/ლ	–	100,0
თუთია, მგ/ლ	–	5,0
ადვილად განთავისუფლებადი ციანიდები, მგ/ლ	–	0,05
ციანიდების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ	–	–
ფტორიდები, მგ/ლ	1,0	1,5
დ ჯგუფი		
ანიონ-აქტიური დეტერგენტები, მგ/ლ	–	–
აქროლებადი ფენოლები, მგ/ლ	–	–
ნავთობის წარმოებულები, მგ/ლ	–	–
სპეციფიკური მაჩვენებლები		
შეფერილობა, მგ Pt/ლ	10	20-30
სუნი	–	–
ბარიუმი, მგ/ლ	0,1	1-4
ბორი, მგ/ლ	0,5	1,0
სელენი, მგ/ლ	–	10,0
ვერცხლი, მგ/ლ	–	50,0
ვანადიუმი, მგ/ლ	–	–
სოფლის მეურნეობაში სარწყავად გამოყენებული წყლისათვის		
ა ჯგუფი		
pH სიდიდე	6,0-8,5***	5,9-9,0
გახსნილი ნივთიერებების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ	500,0	1200,0
ქლორიდები, მგ/ლ	300,0	400,0
რკინა (საერთო), მგ/ლ	1,5	10,0
მანგანუმი (საერთო), მგ/ლ	0,2	0,8
ბ ჯგუფი	რეგლამენტირებული არ არის	

ცხრილი VII.1.1 (გაგრძელება)

1	2	3
გ ჯგუფი		
ვერცხლისწყალი, მგ/ლ	5,0	5,0
კადმიუმი, მგ/ლ	–	30,0
ტყვია, მგ/ლ	–	200,0
დარიშხანი, მგ/ლ	–	200,0
სპილენძი, მგ/ლ	–	500,0
ქრომი (საერთო), მგ/ლ	–	500,0
კობალტი	–	500,0
ნიკელი, მგ/ლ	–	500,0
თუთია, მგ/ლ	–	10,0
ფტორიდები, მგ/ლ	1,5	3,0
სპეციფიკური მაჩვენებლები		
ნატრიუმის პროცენტული ეკვივალენტი	35,0	35,0
ალუმინი, მგ/ლ	–	20,0
ბერილიუმი, მგ/ლ	–	200,0
ბორი, მგ/ლ	0,5	1,0
ლითიუმი, მგ/ლ	0,0	2,0
მოლიბდენი, მგ/ლ	–	50,0
სელენი, მგ/ლ	–	20,0
ვანადიუმი, მგ/ლ	–	1000,0
წყლის ხარისხის მაჩვენებლები, რომლებიც უზრუნველყოფს გამდინარე წყლების იქტიოფაუნის შენარჩუნებას		
ა ჯგუფი		
0,1 სალმონიტების თევზების გამრავლებისათვის საჭირო ზაფხულის მაქსიმალური ტემპერატურა, °C	–	20,0
pH სიდიდე	6,5-8,0	6,5-8,5
გახსნილი ჟანგბადის რაოდენობა, მგ/ლ	>6,0	4,0
გახსნილი ნივთიერებების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ	400,0	800,0
შეტვივებული ნივთიერებების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ	–	–
რკინა (საერთო), მგ/ლ	–	–
ამონიუმი, მგ/ლ	0,1	0,5
ფოსფატები, მგ/ლ	0,05	0,2
საერთო ფოსფორი (PO ³⁻⁴ , მგ/ლ)	0,1	0,5
ბ ჯგუფი		
ბიქრომატული დაჟანგულობა (მგ/ლ)	<15,0	25,0
ჟანგბადის ბიოქიმიური მოხმარება (მგ/ლ)	<2,0	3,0
ორგანული ნახშირბადი, მგ/ლ	<2,0	6,0
ორგანული აზოტი, მგ/ლ	–	2,0

ცხრილი VII.1.1 (გაგრძელება)

1	2	3
ბ ჯგუფი		
ვერცხლისწყალი, მგ/ლ	–	0,2-1,0
კადმიუმი, მგ/ლ	–	5,0
ტყვია, მგ/ლ	–	100,0
დარიშხანი, მგ/ლ	–	50,0
ქრომი (საერთო), მგ/ლ	–	–
ნიკელი*, მგ/ლ	–	–
თუთია, მგ/ლ	–	–
ადვილად განთავისუფლებადი ციანიდები, მგ/ლ	–	0,002
ციანიდების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ	–	0,02-0,05
დ ჯგუფი		
ანიონ-აქტიური დეტერგენტები, მგ/ლ	–	0,1-0,5
აქროლებადი ფენოლები, მგ/ლ	–	0,01
ნავთობის წარმოებულები, მგ/ლ	–	0,05

* – დგინდება „ეროვნული სტანდარტების“ თანახმად.

** – სხვა სპეციფიკური ნივთიერებები, მათ შორის პესტიციდები, რომლებიც ცხრილში არაა მითითებული, განისაზღვრება „ეროვნული სტანდარტების“ მიხედვით.

*** – ტუტე ნიადაგებისათვის შეიძლება გამოყენებულ იქნეს წყალი, რომლის pH <6,0.

ევროპის ქვეყნების ურთიერთდახმარების ეკონომიკური საბჭოს (CЭB) რეკომენდაციების („წყლის ხარისხის საერთო კრიტერიუმები“) თანახმად წყლის ხარისხის ეკოლოგიური ნორმატივების მაჩვენებლები (კლასი) მოყვანილია ცხრილში VII.1.2.

ცხრილი VII.1.2

**ზედაპირული წყლების ხარისხის ნორმატივები
ეკოლოგიური პოზიციების მიხედვით**

მაჩვენებლები	წყლის ხარისხის კლასი*)					
	I	II	III	IV	V	VI
1	2	3	4	5	6	7
ა – არაორგანული ნივთიერებების მაჩვენებლები						
ტემპერატურა, °C	<20	25	25	30	>30	>30
pH სიდიდე	6,5-8,0	6,5-8,5	6,5-8,5	6,0-8,5	6,0-9,0	6,0-9,0
გახსნილი ჟანგბადი, O ₂ მგ/ლ	>8	6,0	5,0	3,0	2,0	<2,0
გაჯერებული O ₂ (გაჯერებულობის %)	>90,0	75,0	60,0	40,0	20,0	<20,0
გახსნილი ნივთიერებების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ	<300,0	500,0	800,0	1000,0	1200,0	>1200,0
შეტივტივებული ნივთიერებების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ	<20,0	30,0	50,0	100,0	200,0	>200,0
საერთო სიხისტე (H°)	<15,0	20,0	30,0	40,0	50,0	>50,0

ცხრილი VII.1.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7
ქლორიდები, მგ/ლ	<50,0	150,0	200,0	300,0	500,0	>500,0
სულფატები, მგ/ლ	<50,0	150,0	200,0	300,0	400,0	>400,0
რკინა, საერთო, მგ/ლ	<0,5	1,0	1,0	5,0	10,0	>10,0
მანგანუმი (საერთო), მგ/ლ	<0,05	0,1	0,3	0,8	1,5	>1,5
ამონიუმი, მგ/ლ	<0,1	0,2	0,5	2,0	5,0	>5,0
ნიტრიტები, მგ/ლ	<0,002	0,0035	0,02	0,05	0,1	>0,1
ნიტრატები, მგ/ლ	<2,0	3,0	5,0	10,0	20,0	>20,0
ფოსფატები, მგ/ლ	<0,025	0,2	0,5	1,0	2,0	>2,0
საერთო ფოსფორი, მგ/ლ	<0,05	0,4	1,0	2,0	3,0	>3,0
ბ – ორგანული ნივთიერებების საერთო მაჩვენებლები						
ქიმიური მოთხოვნილება ჟანგბადზე (ΠΟ – O ₂ , მგ/ლ)	<5,0	10,0	20,0	30,0	40,0	>40,0
ქიმიური მოთხოვნილება ჟანგბადზე (ΒΟ – O ₂ , მგ/ლ)	<15,0	25,0	50,0	70,0	100,0	>100,0
ბიოქიმიური მოთხოვნილება ჟანგბადზე (БПК ₅ – O ₂ , მგ/ლ)	<2,0	4,0	8,0	15,0	25,0	>25,0
ორგანული ნახშირბადი, მგ/ლ	<3,0	5,0	8,0	12,0	20,0	>20,0
ექსტრაგირებული ნივთიერებები, მგ/ლ	<0,2	0,5	1,0	3,0	5,0	>5,0,0
ორგანული აზოტი, მგ/ლ	<0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	>10,0
გ – არაორგანული სამრეწველო დაბინძურების მაჩვენებლები						
ვერცხლისწყალი, მგ/ლ	<0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	>5,0
კადმიუმი, მგ/ლ	<3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	>30,0
ტყვია, მგ/ლ	<10,0	20,0	50,0	100,0	200,0	>200,0
ქრომი (საერთო), მგ/ლ	<0,0	20,0	20,0	50,0	100,0	>100,0
დარიშხანი, მგ/ლ	<10,0	20,0	50,0	110,0	200,0	>200,0
სპილენძი, მგ/ლ	<20,0	50,0	100,0	200,0	500,0	>500,0
კობალტი, მგ/ლ	<10,0	20,0	50,0	100,0	500,0	>500,0
ნიკელი, მგ/ლ	<20,0	50,0	100,0	200,0	500,0	>500,0
თუთია, მგ/ლ	<0,2	1,0	2,0	5,0	10,0	>10,0
ციანიდების საერთო რაოდენობა:						
თავისუფალი ქლორი, მგ/ლ	0,0	0,0	0,0	<0,005	0,1	>0,1
სულფიდები, მგ/ლ	0,0	0,0	0,0	0,01	0,02	>0,02
დ – სამრეწველო დამაბინძურებელი ორგანული ნივთიერებების მაჩვენებლები						
ანიონ-აქტიური დეტერგენტები, მგ/ლ	0,0	<0,5	1,0	2,0	3,0	>3,0
აქროლებადი ფენოლები, მგ/ლ	<0,002	0,01	0,05	0,1	1,0	>1,0
ნავთობის წარმოებულები, მგ/ლ	0,0	<0,05	0,1	0,3	1,0	>1,0

ცხრილი VII.1.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7
ე – ბიოლოგიური მაჩვენებლები						
საპრობულობა (პანტლე-ბუკის ინდექსი)	<1,0	1,5	2,5	3,5	4,0	>4,0
სლადეჩეკის მოდიფიკაცია	ქსენო საპრობულობა	ოლიგო საპრობულობა	ბეტა-მეზო საპრობულობა	ალფა-მეზო საპრობულობა	პოლი საპრობულობა	ჰიპერ საპრობულობა
კოლი-ტიტრი (ფეკალური ტიპის)	1	0,1	0,01	0,001	<0,001	>0,001
მიკროორგანიზმების საერთო რიცხვი	<5·10 ⁵	<10 ⁶	<3·10 ⁶	<5·10 ⁶	<10 ⁷	>10 ⁷
ბიოქიმიური ტრანსფორმაციის ინტენსივობის შემცირება	0,0	0,0	<10%	<30%	<70%	>70%
*) I კლასის წყალი – ძალიან სუფთაა; II კლასის წყალი – სუფთაა; III კლასის წყალი – ძალიან მცირედაა დაბინძურებული; IV კლასის წყალი – მცირედაა დაბინძურებული; V კლასის წყალი – ძლიერადაა დაბინძურებული; VI კლასის წყალი – ძალიან ძლიერად დაბინძურებულია.						

წყალსაცავებში არსებული წყლის ხარისხის შეფასება წარმოებს მისი ვარგისიანობის მიხედვით. ფართოდ გამოიყენება ბუნებრივი წყლების კლასიფიკაციის შემოკლებული ვარიანტი, რომელიც ითვალისწინებს მისი ხარისხის სამ მაჩვენებელს: I ხარისხი – ვარგისი წყალი; II – წყალი, რომელიც გამოსაყენებლად დაშვებული იქნება მისი გაწმენდის შემდეგ; III – უვარგისი წყალი.

განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს წყლის ხარისხის სანიტარულ-ბიოლოგიური მაჩვენებლები, რომელიც განსაზღვრავს მის ვარგისიანობას სასმელად.

წყალსაცავებში აკუმულირდება ქიმიური ელემენტები [კერესელიძე დ., 1994; Чантладзе З.И., 1972]. ამასთან, რაც უფრო მეტია წყალსაცავის მოცულობა და წყალცვლის მაჩვენებელი, მით ნაკლებია მათი კონცენტრაცია.

წყალსაცავებში შეტბორილი წყლის ქიმიურ შემადგენლობაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს წლის სეზონი [Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Итриашвили Л.А., Иорданишвили К.Т., Натрошвили Г.Т., Хосროшвили Е.З., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б., 2019; Чантладзе З.И., 1972]:

– გაზაფხულისა და შემოდგომის წყალდიდობების სეზონში შეტბორილი წყლის მინერალიზაცია მნიშვნელოვნად მცირდება;

– ზაფხულში – ინტენსიური წყალმოხმარების პერიოდში, როდესაც აღინიშნება წყლის დონის მკვეთრი დადაბლება, ჰაერის ტემპერატურის გაზრდის გამო, იზრდება აორთქლება წყალსაცავის ზედაპირიდან, რაც განაპირობებს შეტბორილი წყლის მინერალიზაციის გაზრდას.

საქართველოს რიგი წყალსაცავების წყლის მინერალიზაციის მონაცემების საფუძველზე შეიძლება გამოვყოთ მაღალი და დაბალი მინერალიზაციის წყალსაცავები. მაღალი მინერალიზაციის წყალსაცავებს შეიძლება მივაკუთვნოთ წყალსაცავები, რომელთა მინერალიზაცია 1%-ს აღემატება.

VII.2. თვითწმენდითი პროცესები მთის წყალსაცავებში

წყალსაცავში წყლის შემადგენლობა დამოკიდებულია წყალსაცავის თვითწმენდის უნარზე, რომლის ინტენსივობა განისაზღვრება რიგი ფაქტორებით – ბაქტერიების, სოკოების, წყალმცენარეების, ცხოველების და მიკროორგანიზმების სასიცოცხლო მოქმედებით, მზის რადიაციით, წყლის მჟავიანობით, ტემპერატურით და წყლის ცვლის ინტენსივობით.

მთის წყალსაცავების წყლების თვითწმენდა უფრო ინტენსიურია მათი სუფთა წყლით მრავალჯერადი განზავებით.

მთის წყალსაცავების შუა ნაწილში (ღრმა წყალში) თვითწმენდითი პროცესები მკვეთრად შენელებულია, ეს პროცესები უფრო ინტენსიურია ნაპირებთან – ტალღების ფერდზე აგორების ზონაში. წყალსაცავებში თვითწმენდითი პროცესების დინამიკა დამოკიდებულია წყლის შერევაზე შტორმების დროს, წყალსაცავების პერიოდულ დაცლა-ავსებაზე, წყალსაცავების ჩარეცხვაზე, წყალმოვარდნებზე, ქიმიურ და ფიზიკურ-ქიმიურ პროცესებზე, ნალექის დალექვაზე, წყლის იონურ ცვლაზე, დამაბინძურებელი ნივთიერებების სორბციაზე, ბიოლოგიურ თვითწმენდაზე, თავისუფალი ჟანგბადის წარმოქმნაზე და ა.შ.

წყალსაცავის წყლის ქიმიური შემადგენლობა განიცდის ცვლილებას წლის სეზონის მიხედვით: გაზაფხულისა და შემოდგომის წყალდიდობების სეზონში შეტბორილი წყლის მინერალიზაცია მნიშვნელოვნად მცირდება, ხოლო ზაფხულში, ინტენსიური წყალმოხმარების პერიოდში, აღინიშნება წყლის დონის მკვეთრი დადაბლება, ჰაერის ტემპერატურის გაზრდის გამო წყალსაცავის ზედაპირიდან აორთქლების პროცესი იზრდება, რაც განაპირობებს შეტბორილი წყლის მინერალიზაციის გაზრდას.

მთის წყალსაცავებში წყალცვლის პროცესები ორი ტიპისაა – გარე წყალცვლა და შიდა წყალცვლა.

წყალსაცავის სრული მოცულობის ($V_{სრ.}$) გარე წყალცვლის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ($K_{სრ.}^{გარ.}$) განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$K_{სრ.}^{გარ.} = V_{სრ.დ.} / V_{სრ.}, \quad (VII.2.1)$$

სადაც $V_{სრ.დ.}$ არის წყალსაცავში ჩამოდინებული წყლის მოცულობა.

შესაბამისად, წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობის ($V_{სს.}$) გარე წყალცვლის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ($K_{სს.}^{გარ.}$) განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$K_{სს.}^{გარ.} = V_{სს.დ.} / V_{სს.} \quad (VII.2.2)$$

წყალსაცავების „მთიანობის“ (ჰიფსომეტრული ზონალობის), მოცულობის რეგულირების, წყალცვლის, წყლის გამოყენებისა და სხვა მაჩვენებლების კლასიფიცირება მოყვანილია VII.2.1 ცხრილში.

ცხრილი VII.2.1

წყალსაცავების კლასიფიცირების ძირითადი მაჩვენებლები

№	კლასიფიცირების ნიშან-თვისება	ჯგუფი	სხვადასხვა მაჩვენებლები	განმსაზღვრელი კრიტერიუმი	სარეგლამენტო კრიტერიუმი
1	2	3	4	5	6
I	წყალსაცავის გამოყენების სფერო	1	ენერგეტიკული	ელ. ენერჯის გამომუშავება	–
		2	ირიგაციული	წყლის აკუმულაცია	–
		3	კომპლექსური	შერეული	–
II	წყალსაცავის გენეზისი	1	კალაპოტური (ბარისეული)	მდინარის კალაპოტში	–
		2	ტბური (ჩასასხმელი)	ტბის ფსკერი	–
		3	დეპრესიული	დეპრესიული ღრმული	–
III	წყალსაცავის ჰიფსომეტრიული მაჩვენებელი (∇) და რელიეფის მაჩვენებელი (α)	1	ვაკის	აბსოლუტური ნიშნული (∇), მ	$\nabla < 400$ მ
				რელიეფის მაჩვენებელი, (α)	0,78
		2	მთისწინა	აბსოლუტური ნიშნული (∇), მ	400-800 მ
				რელიეფის მაჩვენებელი, (α)	0,37
		3	მთის	აბსოლუტური ნიშნული (∇), მ	800-1200 მ
				რელიეფის მაჩვენებელი, (α)	0,27
		4	მაღალმთიანი	აბსოლუტური ნიშნული (∇), მ	>1200 მ
				რელიეფის მაჩვენებელი, (α)	0,14
IV	წყალსაცავის მოცულობა, $V_{სრ}$, მლნ მ ³	1	მსხვილი	სრული მოცულობა, ($V_{სრ}$), მლნ მ ³	$V_{სრ} > 1$ მლრდ მ ³
		2	საშუალო		1 მლრდ მ ³ > $V_{სრ} > 100$ მლნ მ ³
		3	პატარა		100 მლნ მ ³ > $V_{სრ} > 10$ მლნ მ ³
		4	მცირე		10,0 მლნ მ ³ > $V_{სრ} > 1$ მლნ მ ³
		5	ძალიან მცირე		$V_{სრ} < 1$ მლნ მ ³

ცხრილი VII.2.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6
V	წყალსაცავის სიღრმე, H_{max} , მ	1	ძალიან ღრმა	მაქსიმალური სიღრმე, (H_{max}), მ	$H_{max} > 100$ მ
		2	ღრმა		$40 < H_{max} < 100$ მ
VI	წყალსაცავის რეგულირების სახეობა	1	ინტენსიური დამუშავების	დონის რხევების ამპლიტუდა (A), მ;	$A > 100$ მ $V_{\text{ღ}} > 1,0$ მ/დღელამეში
		2	სწრაფი დამუშავების		$50 < A < 100$ მ $0,5 < V_{\text{ღ}} < 1,0$ მ/დღელამეში
		3	საშუალო დამუშავების	დონის გადაადგილების სიჩქარე დღელამეში, ($V_{\text{ღ}}$), მ/დღელამეში	$20 < A < 49$ მ $0,08 < V_{\text{ღ}} < 0,49$ მ/დღელამეში
		4	არასტაბილური		$6,0 < A < 19$ მ $0,03 < V_{\text{ღ}} < 0,79$ მ/დღელამეში
		5	კვაზისტაბილური		$A < 6,0$ მ $V_{\text{ღ}} < 0,03$ მ/დღელამეში
VII	წყალსაცავის წყალცვლა,	1	განსაკუთრებულად სწრაფი წყალცვლის	წყალსაცავის წყალცვლის კოეფიციენტი $K_{\text{წ}} = \frac{V_{\text{სწ}}}{W_{\text{მღ}}}$, წელი;	$K_{\text{წ}} < 0,1\%$ $n_{\text{წ}} > 10$ -ჯერ
		2	ძალიან სწრაფი წყალცვლის		$0,24\% > K_{\text{წ}} > 0,16\%$ $2,5 < n_{\text{წ}} < 10$ -ჯერ
		3	სწრაფი წყალცვლის	მდინარის საშუალო წლიური ჩამონადენი, $W_{\text{მღ}}$, მლნ მ ³ ; წყალსაცავის სრული მოცულობა, ($V_{\text{სწ}}$), მლნ მ ³ ; წყალსაცავის წყალცვლის რაოდენობა წელიწადში $n_{\text{წ}} = 1/K_{\text{წ}}$	$0,49\% > K_{\text{წ}} > 0,25\%$ $2,5 < n_{\text{წ}} < 4,9$ -ჯერ
		4	საშუალო წყალცვლის		$0,99 > K_{\text{წ}} > 0,49\%$ $0,99 < n_{\text{წ}} < 2,5$ -ჯერ
		5	სუსტი წყალცვლის		$K_{\text{წ}} > 1\%$, $n_{\text{წ}} < 1$
VIII	წყალსაცავში ჩამოდინებული წყლის გამოყენება	1	ეფექტური გამოყენების	გამოყენების კოეფიციენტი $K_{\text{გ}} = \frac{W_{\text{საგ}}}{W_{\text{ჩამ}}}$;	$1,0 > K_{\text{გ}} > 0,9$
		2	საშუალო გამოყენების		$0,89 > K_{\text{გ}} > 0,75$
		3	ტოლწონადი გამოყენების	წყლის სასარგებლო გაცემა, ($W_{\text{საგ}}$), მლნ მ ³ ; წყლის წლიური საშუალო ჩამონადენი, ($W_{\text{ჩამ}}$), მლნ მ ³	$0,74 > K_{\text{გ}} > 0,45$
		4	დაბალი გამოყენების		$K_{\text{გ}} < 0,45$

ცხრილი VII.2.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6
IX	წყალსაცავის ტევადობის გამოყენება	1	მაღალი ტევადობის	წყალსაცავის ტევადობის კოეფიციენტი $K_{\delta} = \frac{W_{სას}}{W_{გამ}}$; გამოყენებული წყლის მოცულობა ($V_{გამ}$), მლნ მ ³ ; წყალსაცავის სასარგებლო მოცულობა ($V_{სას}$), მლნ მ ³	$1.0 > K_{\delta} > 0.5$
		2	საშუალო ტევადობის		$0.49 > K_{\delta} > 0.1$
		3	ტოლწილადი ტევადობის		$0.09 > K_{\delta} > 0.001$
		4	დაბალი ტევადობის		$> K_{\delta} < 0.001$
X	წყალსაცავი ექსპლუატაციის ვადა	1	ინტენსიურად დალექვადი წყალსაცავი	დალექვის პირობითი კოეფიციენტი $K_{\xi} = \frac{W_{ნალ}}{V_{სრ}}$; დაგროვილი ნალექის მოცულობა ($W_{ნალ}$), მლნ მ ³ ; წყალსაცავის სრული მოცულობა ($V_{სრ}$), მლნ მ ³	$K_{\xi} > 0.2$
		2	საშუალოდ დალექვადი წყალსაცავი		$0.2 > K_{\xi} > 0.04$
		3	ნაკლებად დალექვადი წყალსაცავი		$0.04 > K_{\xi} > 0.01$
		4	პრაქტიკულად არადალექვადი წყალსაცავი		$0.01 > K_{\xi} > 0.002$
		5	არადალექვადი წყალსაცავი		$K_{\xi} < 0.002$

წყალსაცავების სრული მოცულობის წყალცვლის მნიშვნელობის ($\pi_{\text{წ}}$) მიხედვით წყალსაცავები შეიძლება დავეოთ სამ ტიპად: I ტიპის წყალსაცავები – $\pi_{\text{წ}} > 3,0$; II ტიპის წყალსაცავები – $2,0 < \pi_{\text{წ}} < 3,0$; III ტიპის წყალსაცავები – $\pi_{\text{წ}} < 2,0$.

მაღალი წყალცვლის კოეფიციენტის მნიშვნელობის ($\pi_{\text{წყ}}$) მიხედვით გამოირჩევა ლაჯანურის, გუმათის, ზაჰესის და ვარციხის წყალსაცავები (ცხრ. VII.2.2).

საქართველოს წყალსაცავების გარე წყალცვლის ძირითადი მაჩვენებლები

№	წყალსაცავის დასახელება	წყალსაცავის მოცულობა		წყალსაცავის დონის ნიშნული, ∇ მ		გარე წყალცვლის კოეფიციენტები ¹⁾				წყალსაცავის ტიპი წყალცვლის მიხედვით
		სრული, $V_{სრ}$, მლნ მ ³	სასარგებლო, $V_{სსს}$, მლნ მ ³	ნშდ, ∇ მ	მმდ, ∇ მ	სრული მოცულობის		სასარგებლო მოცულობის		
						წყალცვლის კოეფიციენტი, $K_{წსრ}$	წყალცვლის რაოდენობა, წელიწადში, $n_{წსრ}$	წყალცვლის კოეფიციენტი, $K_{წსს}$	წყალცვლის რაოდენობა წელიწადში, $n_{წსს}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
აღმოსავლეთ საქართველოს წყალსაცავები										
1	თბილისის (საპროექტო)	308,0	155,0	548,0	535,0	1,69	0,59	5,61	0,18	III
1 ¹	თბილისის (ფაქტობრივი)	215,0	65,0	538,0	535,0	1,18	0,85	2,35	0,43	III
2	ხრამის	312,0	292,0	1512,0	1497,0	1,01	0,99	1,08	0,92	III
3	სიონის	325,0	300,0	1068,0	1014,0	0,95	1,10	1,00	1,00	III
4	თავწყაროს	1,3	0,96	616,0	610,0	0,78	1,29	1,05	0,95	III
5	მარაბდის	1,2	1,2	555,0	547,0	0,75	1,33	0,75	1,33	III
6	ლაფიანის	3,5	3,5	429,0	417,0	0,74	1,35	0,74	1,35	III
7	ნარეკვავის	6,8	5,6	893,8	875,3	0,72	1,39	0,87	1,15	III
8	ჯანდარის	52,0	23,0	291,5	285,5	0,72	1,39	1,62	0,62	III
9	მთისძირის	3,33	2,95	1650,0	1641,0	0,68	1,50	0,76	1,31	III
10	კუშისხევის	4,0	2,27	490,0	475,0	0,62	1,60	1,09	1,21	III
11	კრანჭისხევის	1,26	0,92	480,0	477,0	0,51	2,00	0,72	1,39	II
12	ალგეთის	65,0	60,0	792,5	745,0	0,50	2,00	0,54	1,85	II
13	ჭალის	1,70	1,40	495,0	487,0	0,37	2,70	0,45	2,22	II
14	ჟინვალის	520,0	370,0	810,0	770,0	0,37	2,70	0,52	1,92	II
15	ნადარბაზევის	8,2	7,2	862,0	855,4	0,32	2,72		2,78	II
16	ზრესის	2,08	1,28	1721,82	1721,07	0,26	3,80	0,42	2,38	I
17	ზონკარის (პატარა ლიახვის)	40,0	39,0	1217,0	1167,0	0,13	7,70	0,13	7,70	I
დასავლეთ საქართველოს წყალსაცავები										
1	შაორის	90,0	87,0	1132,0	1124,0	0,703	1,42	0,679	0,68	III
2	კუხის	1,9	1,85	170,0	158,0	0,657	1,52	0,64	1,56	III
3	ტყიბულის	84,0	62,0	522,5	515,0	0,388	2,57	0,286	0,29	II
4	გალის	145,0	26,0	100,55	97,0	0,029	3,34	0,056	0,05	I
5	ენგურის	1090,0	662,0	510,0	440,0	0,235	4,2	0,14	7,01	I
6	ლაჯანურის	24,0	16,0	494,0	478,0	0,02	62,9	62,5	94,3	I
7	გუმათის	39,0	13,0	200,0	96,0	0,008	130,7	0,0025	0,003	I
8	ზაჰესის	12,0	3,0	448,0	446,5	0,0159	466,7	62,92	94,3	I
9	ვარციხის	14,6	2,4	87,0	86,5	0,002	589	0,0003	0,0003	I

$K_{წსრ}^{ბრ} = V_{სრ} / W_{წსრ}$ - სრული მოცულობის წყალცვლის კოეფიციენტი; $n_{წსრ} = W_{წსრ} / V_{სრ}$ - სრული მოცულობის წყალცვლის რაოდენობა ერთ წელიწადში; $K_{წსს}^{ბრ} = V_{სსს} / W_{წსს}$ - სასარგებლო მოცულობის წყალცვლის კოეფიციენტი; $n_{წსს} = W_{წსს} / V_{სსს}$ - სასარგებლო მოცულობის წყალცვლის რაოდენობა ერთ წელიწადში

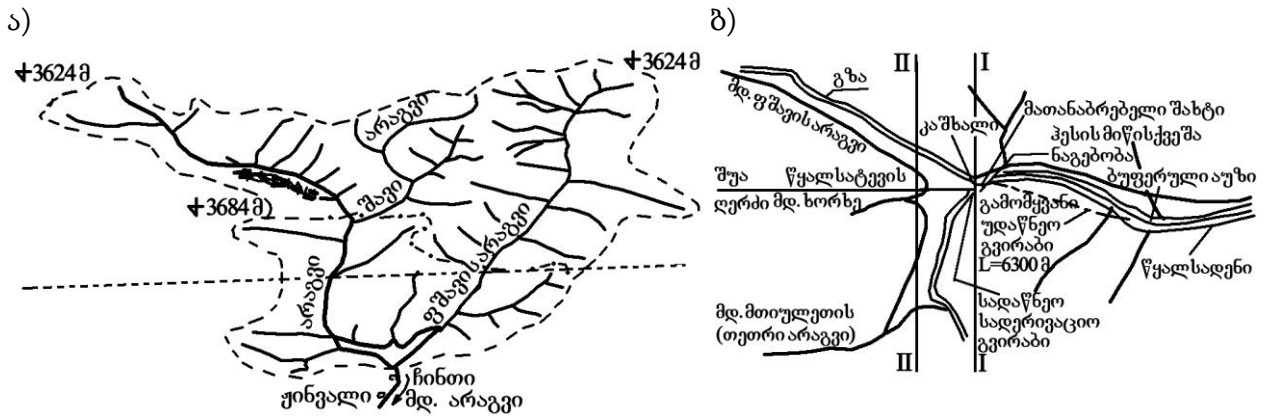
შიდა წყალცვლა განპირობებულია სხვადასხვა პროცესებით - დინებებით, შერევით, ტალღების განვითარებით თვით წყალსატევში. ამასთან, პულსაციები გამოწვეულია ჰორიზონტალური მიმართულების დინებებითა და ვერტიკალური ტალღური მოვლენებით. დაკვირვებების მონაცემებით, ჰორიზონტალური წყალცვლა უფრო ინტენსიურია, ვიდრე ვერტიკალური. ამასთან, **ვერტიკალური წყალცვლა** მცირდება სიღრმის ზრდასთან ერთად. აღნიშნულთან დაკავშირებით, ვერტიკალური წყალცვლა მოიცავს წყლის სიღრმის 5-10%-მდე (ზედა) ფენას.

მთის წყალსაცავებში **ჰორიზონტალური წყალცვლის** პროცესი მიმდინარეობს უფრო ინტენსიურად, ვიდრე ვერტიკალური. შიდა წყალცვლაზე დამოკიდებულია წყლის მასების მახასიათებლების ცვლილება წყალსაცავის მთელი მოცულობის ფარგლებში.

VII.3. ჟინვალის წყალსაცავის წყლის ხარისხის შეფასება

1950-იანი წლებიდან ქ. თბილისის წყალმომარაგების პრობლემა მსხვილი წყალსაცავების შექმნით წყდებოდა. პირველი ასეთი ღონისძიება იყო **თბილისის** (სამგორის) წყალსაცავის შექმნა 1952 წელს. 1960-იანი წლებიდან ქ. თბილისის სწრაფი ზრდის გამო კომუნალური წყლის პრობლემა გამწვავდა და აუცილებელი გახდა ახალი წყალსაცავის აგება. ამ მიზნით 1963 წლიდან ამოქმედდა **სიონის** წყალსაცავი. მომდევნო ათწლეულებში შეიქმნა მელიორაციული დანიშნულების წყლის მწვავე დეფიციტი. ამ წყალსაცავების შექმნით თითქმის მთლიანად იქნა გამოყენებული მდ. იორის ჩამონადენი ($Q=14$ მ³/წმ), რის გამოც ქ. თბილისის სასმელი და სარწყავი წყლით მომარაგების შემდგომი უზრუნველყოფისათვის აუცილებელი გახდა წყლის რესურსების მოძიება მოსაზღვრე მდინარეთა აუზებში. ამ პრობლემის გადაჭრა მოხდა 1985 წელს, **ჟინვალის** წყალსაცავის აგებით. ამ ობიექტის ამოქმედებით ჩამოყალიბდა მდ. იორი-არაგვის წყალსაცავთა კასკადი. თბილისის წყალსაცავში თავს იყრის არაგვისა და იორის სეზონური ჩამონადენის დაუხარჯავი ნაწილი, სიონისა და ჟინვალის წყალსაცავები იღებენ წყალდიდობის ჩამონადენს. ჟინვალის წყალსაცავის აგებით გადაწყდა სასმელ-სარწყავი წყლისა და ნაწილობრივ ელექტროენერჯის პრობლემებიც. ჟინვალის წყალსაცავიდან ნამუშევარი წყალი (15მ³/წმ) ბუფერული აუზის გავლით მიეწოდება მაგისტრალურ არხს, ხოლო 5,2 მ³/წმ – ჩაედინება თბილისის წყალსაცავში ქ. თბილისის სასმელი წყლით მომარაგებისათვის, ნახ. VII.3.1.

ჟინვალის წყალსაცავის წყლის ხარისხის შესაფასებლად 2022 წლის იანვარსა და ივლისში ჩატარდა საველე კვლევები, რომლის დროს ამოღებულია წყლის სინჯები წყალსაცავის აკვატორიისა და სიღრმის წინასწარ დაგეგმილი ორი პროფილიდან. ჟინვალის წყალსაცავიდან წყლის ქიმიური ანალიზის დეტალური შედეგები მოყვანილია ცხრილში VII.3.1 [იორდანიშვილი კ., იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., მღებრიშვილი მ., ქუფარაშვილი ი., კანდელაკი ნ., ხოსროშვილი ე., ბილანიშვილი ლ., 2022].



ნახ. VII.3.1. ჟინვალის წყალსაცავიდან წყლის სინჯების ამოღების ადგილმდებარეობა
 ა) ჟინვალის წყალსაცავის წყალშემკრები აუზი; ბ) ჟინვალის წყალსაცავიანი სისტემის
 ჰიდროტექნიკური ნაგებობები; I, II – წყლის სინჯების აღების ადგილმდებარეობა

ცხრილი VII.3.1

ჟინვალის წყალსაცავის წყლის ქიმიური ცვლილებების დინამიკა წლის პერიოდის მიხედვით (წყალსაცავის შუა ლერძზე, შ.დ.) (05. 01. 2022; 05.07.2022 წ.)

წყლის სინჯების აღების თარიღი (2022 წ.)	№	გამოსავლელი მაჩვენებელი	საზომი ერთეული	ნორმატიული არა უმეტეს	შედეგები განივზე I-I			შედეგები განივზე II-II	ქიმიური ელემენტების განაწილება	ნორმატიული დოკუმენტი
					კაშხლის პირში, $\nabla = 710,0$ მ	წყლის ზედაპირზე, ∇ მ	წყლის ზედაპირიდან 10,0 მ სიღრმეზე ∇ მ	წყლის ზედაპირზე, ∇ მ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ორგანოლექტიკური მაჩვენებლები										
05.01	1	სუნი 20°C, 60°C	ბალი	1,0	0					1
05.07	1 ¹			1,0	0					1
05.01	2	გემო 20°C	ბალი	1,0	0					1
05.07	2 ¹			1,0	0					1
05.01	3	ფერიანობა 20 სმ-ში	გრადუსი	15,0	<5,0					2
05.07	3 ¹		სი	15,0	<5,0					2
05.01	4	სიმღვრივე	მგ/ლ	არ არის ნორმ.	10,6					3
05.07	4 ¹			1,51						3
ზოგადი მაჩვენებლები										
05.01	5	წყალბადის მაჩვენებელი	pH	6,5-8,5	7,99	7,95 ($\nabla = 770,0$ მ)	7,90 ($\nabla = 760,0$ მ)	7,80 ($\nabla = 770,0$ მ)	წყლის სიღრმის, სიგრძის და სეზონურობის მიხედვით – უმნიშვნელოა	4
05.07	5 ¹			6,5-8,5	7,79	7,75 ($\nabla = 800,0$ მ)	7,70 ($\nabla = 790,0$ მ)	7,75 ($\nabla = 800,0$ მ)		4
05.01	6	პერმანგანატული ჟანგვადობა	მგ O ₂ /ლ	3,0	0,64					5
05.07	6 ¹			3,0	0,61					5

ცხრილი VII.3.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
05.01	7	მშრალი ნაშთი	მგ/ლ	1000	145,4	140,0 ($\nabla = 770,0$ მ)	141,0 ($\nabla = 760,0$ მ)	135,0 ($\nabla = 770,0$ მ)	იზრდება ზედაპირიდან – სიღრმეზე, და შესართავიდან – კაშხლისკენ; მაქსიმუმი – ზამთარში	6
05.07	7 ¹			1000	117,3	110,0 ($\nabla = 800,0$ მ)	115,0 ($\nabla = 790,0$ მ)	105,0 ($\nabla = 800,0$ მ)		6
არაორგანული ნივთიერებები										
05.01	8	ბარიუმი (Ba ²⁺)	მგ/ლ	0,1	0,02					7
05.07	8 ¹			0,1	0,01					7
05.01	9	ბორი (B, ჯამური)	მგ/ლ	0,5	0,27					7
05.07	9 ¹			0,5	0,1					7
05.01	10	დარიშხანი (As, ჯამური)	მგ/ლ	0,05	0,002					7
05.07	10 ¹			0,05	<0,001					7
05.01	11	ვერცხლისწყალი (Hg, არაორგანული)	მგ/ლ	0,0005	0,0004					8
05.07	11 ¹			0,0005	<0,0001					8
05.01	12	კადმიუმი (Cd, ჯამური)	მგ/ლ	0,001	<0,001					7
05.07	12 ¹			0,001	<0,001					7
05.01	13	მანგანუმი (Mn, ჯამური)	მგ/ლ	0,1	0,01					7
05.07	13 ¹			0,1	0,003					7
05.01	14	მოლიბდენი (Mo, ჯამური)	მგ/ლ	0,25	0,001					7
05.07	14 ¹			0,25	0,001					7
05.01	15	ნიკელი (Ni, ჯამური)	მგ/ლ	0,1	0,001					7
05.07	15 ¹			0,1	<0,001					7
05.01	16	ამიაკი	მგ/ლ	0,39	<0,08					9
05.07	16 ¹			0,39	<0,08					9
05.01	17	ნიტრატები (NO ₃ -ით ხანმოკლე ზემოქმედებით)	მგ/ლ	45,0	0,75					10
05.07	17 ¹			45,0	0,91					10
05.01	18	ნიტრატები (NO ₂ -ით ხანგრძლივი ზემოქმედებით)	მგ/ლ	3,3	<0,075					10
05.07	18 ¹			3,3	<0,075					10
05.01	19	სელენი (Se, ჯამური)	მგ/ლ	0,001	<0,001	<0,001 ($\nabla = 770,0$ მ)	<0,001 ($\nabla = 770,0$ მ)	<0,001 ($\nabla = 770,0$ მ)	ნორმის ზღვარზეა; არ იცვლება წყლის სიღრმის, სიგრძის და სეზონურობის მიხედვით	10
05.07	19 ¹			0,001	<0,001					10

ცხრილი VII.3.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
05.01	20	სპილენძი	მგ/ლ	1,0	0,001					7
05.07	20 ¹	(Cu, ჯამური)		1,0	0,002					7
05.01	21	ტყვია	მგ/ლ	0,03	<0,001					7
05.07	21 ¹	(Pb, ჯამური)		0,03	0,002					7
05.01	22	ფტორიდები (F)	მგ/ლ	0,05	0,09	0,08 ($\nabla=770,0\text{მ}$)		0,075 ($\nabla=770,0\text{მ}$)	ნორმას აღება, იზრდება შესართავიდან კაშხლისკენ, მცირდება სიღრმეში და შესართავისკენ	10
05.07	22 ¹			0,05	0,07	0,07 ($\nabla=800,0\text{მ}$)		0,070 ($\nabla=800,0\text{მ}$)		10
05.01	23	ქრომი (Cr ^{**})	მგ/ლ	0,1	0,001					7
05.07	23 ¹			0,1	<0,001					7
05.01	24	სტიბიუმი (Sb)	მგ/ლ	0,05	<0,001					7
05.07	24 ¹			0,05	<0,001					7
05.01	25	ციანიდები (CN)	მგ/ლ	0,1	<0,005					11
05.07	25 ¹			0,1	<0,005					11
05.01	26	სულფატები (SO ₄ ²⁻)	მგ/ლ	500	23,25					10
05.07	26 ¹			500	18,77					10
05.01	27	ქლორიდები (Cl)	მგ/ლ	350,0	5,15					10
05.07	27 ¹			350,0	2,06					10
05.01	28	საერთო სიხისტე	მგ- ეკვ/ლ	7,0	2,71					12
05.07	28 ¹		7,0	2,25						12
05.01	29	ტუტია	მგ- ეკვ/ლ	ა.ა.ნ.	2,44					13
05.07	29 ¹		ა.ა.ნ.	2,04						13
05.01	30	კალციუმი (Ca)	მგ/ლ	ა.ა.ნ.	43,89					7
05.07	30 ¹			ა.ა.ნ.	36					7
05.01	31	მაგნიუმი (Mg)	მგ/ლ	ა.ა.ნ.	6,29					7
05.07	31 ¹			ა.ა.ნ.	5,49					7
05.01	32	ნატრიუმი (Na)	მგ/ლ	ა.ა.ნ.	8,43					7
05.07	32 ¹			ა.ა.ნ.	5,64					7
05.01	33	თუთია (Zn ²⁺)	მგ/ლ	1,0	0,001					7
05.07	33 ¹			1,0	<0,001					7
05.01	34	რკინა (Fe, ჯამური)	მგ/ლ	0,3	0,14					7
05.07	34 ¹			0,3	0,06					7
05.01	35	ალუმინი (Al)	მგ/ლ	0,5	0,29					7
05.07	35 ¹			0,5	0,15					7
05.01	36	სილიციუმი (Si, ჯამური)	მგ/ლ	ა.ა.ნ.	4,3					7
05.07	36 ¹			ა.ა.ნ.	3,4					7
05.01	37	პოლიფოსფატები (PO ₄ ³⁻)	მგ/ლ	3,5	<0,2					10
05.07	37 ¹			3,5	<0,2					10
05.01	38	შეწონილი ნაწილაკები	მგ/ლ	ა.ა.ნ.	15,6					14
05.07	38 ¹			ა.ა.ნ.	<2,0					14

ცხრილი VII.3.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
05.01	39	გახსნილი ჟანგბადი	მგ/ლ	ა.ა.ნ.	8,3	9,0 ($\nabla = 770,0$ მ)	9,3 ($\nabla = 760,0$ მ)	9,5 ($\nabla = 770,0$ მ)	მცირდება ზედაპირი- დან სიღრმე- ში და შესარ- თავიდან კაშხლისკენ	15
05.07	39 ¹			ა.ა.ნ.	11,18	12,0 ($\nabla = 800,0$ მ)	12,0 ($\nabla = 790,0$ მ)	12,5 ($\nabla = 800,0$ მ)		15
05.01	40	ჟებ (ჟანგბა- დის ქიმიური მოთხოვნი- ლება)	მგ/ლ	ა.ა.ნ.	1,14					16
05.07	40 ¹			ა.ა.ნ.	1,24					16
05.01	41	ჟებ (ჟანგბა- დის ბიოქიმი- ური მოთხოვ- ნილება)	მგ/ლ	ა.ა.ნ.	0,63					17
05.07	41 ¹			ა.ა.ნ.	0,78					17
05.01	42	ელექტროგამ- ტარობა	μS/სმ	ა.ა.ნ.	283					18
05.07	42 ¹			ა.ა.ნ.	249					18
05.01	43	პესტიციდე- ბის საერთო შემცველობა	მგ/ლ	0,05	<0,0044					19
05.07	43 ¹			0,05	<0,0044					19
05.01	44	ნავთობ- პროდუქ- ტები, ჯამური	მგ/ლ	0,3	<0,04					20
05.07	44 ¹			0,3	<0,04					20
05.01	45	ზედაპირულა დ აქტიური ნივთიერებე- ბი ანიონაქ- ტიურები	მგ/ლ	0,1	<0,1					21
05.07	45 ¹			0,1	<0,1					21
მიკრობიოლოგიური მაჩვენებლები										
05.01	46	საერთო კოლიფორ- მული ბაქტერიები	MPN 1ლ-ში	10000	504					22
05.07	46 ¹			10000	417					22
05.01	47	მეზოფილუ- რი აერობები და ფაკულ- ტატური ანაერობები	კწე 1 მლ- ში, 37°C	ა.ა.ნ.	19					23
05.07	47 ¹			ა.ა.ნ.	70					23
05.01	48	მეზოფილუ- რი აერობები და ფაკულ- ტატური ანაერობები	კწე 1 მლ- ში, 22°C	ა.ა.ნ.	72					23
05.07	48 ¹			ა.ა.ნ.	291					23
05.01	49	ფეკალური სტრეტოკო- კები	MPN 100 მლ- ში	ა.ა.ნ.	5.3					24
05.07	49 ¹			ა.ა.ნ.	2.0					24
05.01	50	სალმონელა	1 ლ-ში	არ დაიშ- ვება	არ აღმოჩნდა					25
05.07	50 ¹			არ დაიშ- ვება						25

ცხრილი VII.3.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
05.01	51	კოლიფაგები	ნკწე, 1	100	არ					26
05.07	51 ¹		ლ-ში	100	აღმოჩნდა					26
პარაზიტოლოგიური მაჩვენებლები										
05.01	52	ლამბლიების ცისტები	ცისტების რაოდენობა 25 ლ-ში	არ და-იშვება	არ					26
05.07	52 ¹		არ და-იშვება	აღმოჩნდა						26
05.01	53	დიზენტერიული ამების ცისტები	ცისტების რაოდენობა 25 ლ-ში	არ და-იშვება	არ					26
05.07	53 ¹		არ და-იშვება	აღმოჩნდება						26

აღნიშვნები: ა) ა.ა.ნ. – არ არის ნორმირებული; ბ) გამოყენებული ნორმატიული დოკუმენტები: 1 – სსტ 3351-74; 2 – სსტისო 7887:2011, 3 – სსტ ისო 7027-1:2016; 4 – სსტისო 10523:2008; 5 – სსტისო 8467:1993; 6 – სსტ 18164-72; 7 – სსტ ისტ 11885:2007; 8 – AGILENT-ის მეთოდი; 9 – სსტ ისო 7150-1:1984; 10 – სსტ ისო 10304 1:2007; 11 – HACH Metod 8027; 12 – სსტ ისო 6059:1984; 13 – სსტ ისო 9963-1:1944; 14 – ISO 11923:1997; 15 – HACH Metod 81166 (ISO 5814); 16 – HACH LCK 500 მეთოდი; 17 – ISO 5815-1 მეთოდი; 18 – ISO 7888; 19-სსტ ისო 6468:1996; 20 – სსტ ისო 9377-2:2000; 21 – სსტ ისო 7875-1:1996; 22 – სსტ ისო 9308-2:2012; 23 – სსტ ისო 6222:1996; 24 – სსტ ისო 7899 1:1998 ENTEROLERTE; 25 – სსტ ისო 19250:2010; 26 – მ.მ 4.2. 1884-04.

ამრიგად, კათიონების მიხედვით ჟინვალის წყალსაცავის წყალი – კალციუმ-ნატრიუმ-მაგნიუმის ტიპისაა, ხოლო ანიონების მიხედვით – სულფატური და ნაკლებად ქლორიდური. ჟინვალის წყალსაცავი არ წარმოადგენს წყლის ხარისხის გაუარესების მიზეზს, არამედ იგი მიმდებარე ტერიტორიიდან და მდინარეების – შავი და თეთრი არაგვიდან ჩამოდინებული დაბინძურების მსხვერპლია.

ჟინვალის წყალსაცავში აიროვანი რეჟიმი, ძირითადად, განისაზღვრება ჟანგბადის რეჟიმით, რომელიც დამოკიდებულია გახსნილი ჟანგბადის მაღალ რაოდენობაზე ($0,2 > 8,3$ მგ/ლ), რაც დაკავშირებულია წყალსაცავის წყლის წყალცვლის მაღალ მნიშვნელობასთან (2,7-ჯერ წელიწადში). ჟანგბადის მაღალი მნიშვნელობა განსაზღვრავს ანაერობული პროდუქტების (ამიაკი, გოგირდწყალბადი) დაშლას და ქიმიური ელემენტების (რკინა, ფოსფორი, ცინკი, მარგანეცი და სხვ) გადანაწილებასა და დაგროვებას წყალსაცავის ფსკერზე.

ჟინვალის წყალსაცავში მინერალური და ორგანული ნივთიერებები ძირითადად შემოდის მდინარეული და ზედაპირული ჩამონადენიდან – სოფლის მეურნეობის სავარგულებიდან და სამრეწველო-ყოფითი ტერიტორიებიდან. ჟინვალის წყალსაცავი მდებარეობს მდ. არაგვის ზედა ნაწილში და მისი წყალშემკრები აუზის ტერიტორიები არ არის მნიშვნელოვნად დატვირთული სამრეწველო და სოფლის მეურნეობის სავარგულებიდან დამაბინძურებელი ნივთიერებებით. ჟინვალის წყალსაცავის წყლის ყველა ელემენტების ქიმიური მაჩვენებლები არ აღემატება ნორმას, გარდა ფტორიდების (F) მაჩვენებლის, რომლის რაოდენობაა 0,09 მგ/ლ – ზამთარში,

0,07 მგ/ლ – ზაფხულში (ნორმა – <0,05 მგ/ლ).

რიგი ელემენტების რაოდენობა ზაფხულში იმატებს, მაგრამ ნორმის ფარგლებშია, ესენია: ნიტრატების – 0,75 მგ/ლ – ზამთარში, 0,91 მგ/ლ – ზაფხულში; სპილენძის 0,001 მგ/ლ - ზამთარში, 0,002 მგ/ლ – ზაფხულში; ტყვიის – 0,001 მგ/ლ – ზამთარში, 0,002 მგ/ლ – ზაფხულში; გახსნილი ჟანგბადის – 8,3 მგ/ლ – ზამთარში, 11,8 მგ/ლ – ზაფხულში; ჟანგბადის ქიმიური მოთხოვნილების (ჟქმ) – 1,14 მგ/ლ – ზამთარში, 1,24 მგ/ლ – ზაფხულში; ჟანგბადის ბიოქიმიური მოთხოვნილებების (ჟბმ) – 0,63 მგ/ლ – ზამთარში, 0,78 მგ/ლ – ზაფხულში; მეზოფილური აერობებისა და ფაკულტატური ანაერობების 19 კწე 1 მლ-ში – ზამთარში, 70,0 კწე 1 მლ-ში – ზაფხულში; მეზოფილური აერობებისა და ფაკულტატური ანაერობების - 72 კწე 1 მლ-ში – ზამთარში, 29 კწე 1 მლ-ში – ზაფხულში. რაც შეეხება მიკრობიოლოგიურ და პარაზიტოლოგიურ ელემენტებს – ჟინვალის წყალსაცავის წყალში არ აღმოჩნდა.

წყალსაცავის ზედა ნაწილში, მარჯვენა ნაპირზე, აშენებულია აგარაკები სულ რაღაც 15 მ-ში, რაც ყოველად დაუშვებელია. ჟინვალის წყალსაცავისა და მისი წყლის სანიტარულ-ტექნიკური მდგომარეობისა და წყალსაცავში ცოცხალი ბიომის დასაცავად საჭიროა სანიტარული ზოლის (ს. ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) საზღვრების დანიშვნა და დაცვა.

საქართველოს რიგი წყალსაცავების წყლის ქიმიური ხარისხის გასაშუალებული მონაცემები მოყვანილია ცხრილში VII.3.2.

ცხრილი VII.3.2

საქართველოს რიგი წყალსაცავების წყლის ხარისხის გასაშუალებული მაჩვენებლები (2010-2022 წ.წ.)

№	წყლის ხარისხის მაჩვენებლების ჯგუფები	წყლის ხარისხის მაჩვენებლები	წყლის სეზონი	წყალსაცავი				განაწილება წყალსაცავის სიღრმის, სიგრძის და წლის სეზონის მიხედვით	დასაშვები ნორმატიული მაჩვენებლები		
				სიონის	თბილისის	ხრამის (წალკის)	ჟინვალის		სასმელი წყლისთვის	მორწყვისთვის	მეთევზეობისთვის
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	A	წყალბადის მაჩვენებელი, PH	ზაფხ.	6,75	7,87	7,51	7,79	ცვლილებები უმნიშვნელოა წყალსაცავის სიღრმის, სიგრძის და სეზონის მიხედვით. მაქს. – ზამთარში, მინ. – ზაფხულსა და შემოდგომაზე	6,5÷8,5	5,9÷9,0	6,5÷8,5
			ზამთ.	8,38	9,38	8,95	7,99				

ცხრილი VII.3.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2	A	გახსნილი ნივთიერების საერთო რაოდენობა, მგ/ლ;	ზაფხ. ზამთ.	500,0	500,0	-	117,3	იზრდება წყალსაცავის ზედაპირიდან ფსკერისკენ და სათავიდან კაშხლისკენ. მაქს. - ზამთ. მინ. - ზაფხ.	800,0	1200,0	800,0	
3	ფიზიკური საერთო მანკეზლები და არაორგანული ნივთიერებები	გახსნილი ჟანგბადი, O ₂ , მგ/ლ	ზაფხ. ზამთ.	8,42	9,31	8,50	0,61	მცირდება წყალსაცავის ზედაპირიდან ფსკერისკენ და სათავიდან კაშხლისკენ. მაქს. - ზამთარში, მინ. - ზაფხულსა და შემოდგომაზე			4,0	
4		ქლორიდები, მგ/ლ	ზაფხ. ზამთ.	8,20	21,30	12,10	2,06	მცირდება წყალსაცავის ზედაპირიდან ფსკერისკენ და სათავიდან კაშხლისკენ. მაქს. - ზამთარში, მინ. - ზაფხულსა და შემოდგომაზე	300,0	400,0		
5		სულფატები, მგ/ლ	ზაფხ. ზამთ.	26,10	166,10	17,20	18,77	ცვლილებები უმნიშვნელოა წყალსაცავის სიღრმესა და სიგრძეზე. მაქს. - ზამთარში მინ. - გაზაფხულზე	400,0			
6		რკინა, მგ/ლ	ზაფხ. ზამთ.	0,04	0,03	0,01	0,06	ცვლილებები უმნიშვნელოა წყალსაცავის სიღრმესა და სიგრძეზე. მაქს. - გაზაფხულზე (გარდა ჟინვალის წყ-ისა)	0,5	10,0	-	
7		მინერალური ფოსფორი, მგ/ლ	ზაფხ. ზამთ.	0,013	0,008	0,025	0,02	იზრდება სიღრმის მიხედვით. მაქს. - ზაფხულში მინ. - ზამთარში		0,2		
8		ნიტრატები, მგ/ლ	ზაფხ. ზამთ.	1,78	2,18	2,32	0,91	იზრდება სიღრმეზე, უმნიშვნელოა წყალსაცავის სიგრძეზე, მაქს. - გაზაფხულზე მინ. - ზაფხულში (გარდა ჟინვალის წყალსაცავისა)	10,0	-	-	

ცხრილი VII.3.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9	ორგანული ნივთიერებები B	ჟანგვადობა პერგანმან-ტული, O ₂ ,მგ/ლ	ზაფხ.	1,86	1,72		0,61	იზრდება სათავიდან კაშხლისკენ და ზედაპირიდან – ფსკერისკენ. მაქს. – ზაფხულში, მინ.– შემოდგომაზე (გარდა ჟინვალის წყალსაცავისა)	10,0		
			ზამთ.	3,48	7,21		0,64				
10	ორგანული ნივთიერებები B	ჟანგვადობა ბიქრომა-ტული, O ₂ , გ/ლ	საშ.	11,32	11,60	8,20			25,0		
			მაქს.	25,60	37,86	15,86					
11	აირისებრი რეჟიმი C	CO ₂ -ის შემცველობა, მგ/ლ	ზაფხ.	2,41	3,42	3,11		იზრდება ფსკერისკენ და კაშხლისკენ, მაქს. – ზამთარში, მინ. – ზაფხულსა და შემოდგომაზე			
			ზამთ.	11,20	12,61	6,80					
12	აირისებრი რეჟიმი C	ჰიდროკარბონატების შემცველობა HCO ₃ , მგ/ეკვ.ლ	ზაფხ.	2,48	2,68	1,62		იზრდება ფსკერისკენ და სათავიდან კაშხლისკენ, გაზაფხულზე მინ. – ზაფხულში - მაქს.			
			ზამთ.	3,57	3,12	2,15					

VII.4. წყალსაცავების დაბინძურების ეკოლოგიური შეფასება

ეკოლოგიის განვითარება დაიწყო XIX საუკუნის ბოლოს [Haeckel, 1866; Clements, 1905; Volterra, 1926]. ეკოლოგიური საკითხების განზოგადება პირველად იყო შემოთავაზებული რუსი მეცნიერის ვ.ი. ვერნადსკის მიერ (1978 წ.). XIX საუკუნის 50-იანი წლებიდან ეკოლოგიის მეცნიერება განვითარდა მათემატიკური მეთოდების, ზღვრული დასაშვები დატვირთვების, კატასტროფების მრავალგანზომილებიანი სტატისტიკური ანალიზის, ლანდშაფტის მოდელირების ალგორითმებისა და სხვა თეორიების გამოყენებით [Большаков В.Н., 1993; Израэль Ю.А., 1984; Кондратьев К.Я., 1995].

ბოლო დროს ფართოდაა გამოყენებული წყალსატევებზე დატვირთვების დამაბინძურებელი ნივთიერებების დასაშვები ნორმირების მეთოდი [Израэль Ю.А., 1984; Henriksen A., 1992; Critical loads... 1994; Кондратьев К.Я., 1995; Глазовская М.А., 1988; Евсеев А.Е., 1996; Никаноров А.М., 1990; Безель В.С., 1993 და სხვ.].

წყლის ობიექტების საფრთხის შეფასება პირველად ჩატარდა ქართული მეცნიერის, აკადემიკოს ც. მირცხულავას მიერ [Мирцхулава Ц.Е., 2000].

წყალსაცავის გამოყოფილი ზონისთვის იანგარიშება სამი ტიპის დაბინძურების ჯამური ინდექსი [Моисеенко Т.И., 1990].

– დაბინძურების პირველის ტიპის ინდექსის დასადგენად იანგარიშება ნივთიერებების დაბინძურების ხარისხი: ($X_{ტოქს.}$):

$$X_{ტოქს.} = \sum (C_i / C_{ზღვ.}), \quad (VII.4.1)$$

სადაც C_i ტოქსიკური ელემენტის კონცენტრაციაა; $C_{ზღვ.}$ – ზღვრული დასაშვები კონცენტრაცია;

– დაბინძურების მეორე ტიპის ინდექსის დასადგენად იანგარიშება წყლის ქლოროფილისა და ფოსფორის გამო ჩამოყალიბებული მეზოტროფირების მდგომარეობა, რომელიც ფასდება ეკოლოგიური რისკით ($X_{ჰტრ.}$):

$$X_{ჰტრ.} = (C_{ფოსფ.} / C_{ფოსფ(დასაშვ.)} - 1) \cdot 2. \quad (VII.4.2)$$

თუ ფოსფორისა და ქლოროფილის გამო ყალიბდება წყლის ევტროფირების მდგომარეობა, მაშინ ევტროფირების ეკოლოგიური რისკი ტოლია:

$$X_{ჰტრ.} = (C_{ფოსფ.} / C_{ფოსფ(დასაშვ.)} - 1) \cdot 3, \quad (VII.4.3)$$

სადაც $C_{ფოსფ.}$ ფოსფორის ფაქტობრივი რაოდენობის კონცენტრაციაა; $C_{ფოსფ(დასაშვ.)}$ – ფოსფორის დასაშვები რაოდენობის კონცენტრაცია.

– დაბინძურების მესამე ტიპის ინდექსი იანგარიშება წყლის საერთო მინერალიზაციითა და სულფატებით ჩამოყალიბებული მდგომარეობით, რომელიც ფასდება წყლის ფიზიკურ-ქიმიური კრიტერიუმით ($X_{ფქ.}$):

$$X_{ფქ.} = \sum (C_i / C_{დასაშვ.} - 1). \quad (VII.4.4)$$

მაშინ დაბინძურების საერთო ინდექსი ($X_{საერთო}$) იქნება:

$$X_{საერთო} = X_{ტოქს.} + X_{ჰტრ.} + X_{ფქ.} \quad (VII.4.5)$$

აბსოლუტურად სუფთა წყლის ხარისხის საერთო ინდექსის მნიშვნელობა $X_{საერთო} = 0$, ხოლო ანთროპოგენური დატვირთვის დროს – $X_{საერთო} > 0$.

ჟინვალის წყალსაცავის წყლის დაბინძურების საერთო ინდექსის ანგარიში (სასმელი წყლისათვის, ზაფხულში)

1. მეტალებით დაბინძურებული წყლის ხარისხის ანგარიში:

$$X_{ტოქს.} = \sum (C_i / C_{ზღვ.}),$$

სადაც (C_i) კაშხლის ძირში ($\nabla=7100$ მ) (იხ. ფორმულა VII.4.1) მშრალი ნაშთის რაოდენობაა, $C_i = 117,3$ მგ/ლ (ცხრ. VII.3.1); $C_{ზღვ.} = 800$ მგ/ლ – სასმელი წყლის დამაბინძურებელი ნივთიერებების ზღვრული დასაშვები კონცენტრაცია (ცხრ. VII.3.2).

მაშინ სასმელი წყლის დასაშვები მინერალიზაციის დაბინძურების ხარისხი ტოლია:

$$X_{ტოქს.} = 117,3 / 800 \approx 0,15.$$

2. ეკოლოგიური რისკის მაჩვენებლის ანგარიში (ზაფხულში)

$$X_{ჰტრ.} = (C_i / C_{i,დასაშვ.} - 1) \cdot 2 \quad (\text{იხ. ფორმულა VII.4.2}),$$

სადაც $C_i = 117,3$ მგ/ლ, $C_{i,დასაშვ.} = 1000$ mg/l (იხ. ცხრ. VII.3.1), მაშინ

$$X_{\text{კბრ.}} = (117,3/1000 - 1) = -1,9 < 0 \text{ (იხ. ფორმულა VII.4.4).}$$

3. წყლის დაბინძურების ფიზიკურ-ქიმიური კრიტერიუმის ანგარიში:

$$X_{\text{ფქ}} = \sum (C_i / C_{\text{დასაშვ.}} - 1) \text{ (იხ. ფორმულა VII.4.4),}$$

$$X_{\text{ფქ}} = 117,3/1000 - 1 = 0,12 - 1 = -0,88 < 0.$$

4. დაბინძურების საერთო ინდექსის ანგარიში:

$$X_{\text{საერთო}} = X_{\text{ტოქს.}} + X_{\text{კბრ.}} + X_{\text{ფქ}} \text{ (იხ. ფორმულა VII.4.5),}$$

$$X_{\text{საერთო}} = 0,15 + (-1,9) + (-0,88) = -2,63 < 0,1.$$

მაშასადამე, ჟინვალის წყალსაცავის წყალი აბსოლუტურად სუფთაა (ზაფხულშიც კი, როდესაც დამაბინძურებელი ნივთიერებების რაოდენობა იზრდება).

ასეთი ანგარიში მნიშვნელოვანია, რადგან ჟინვალის წყალსაცავის წყალი ქ. თბილისისათვის გამოიყენება სასმელად.

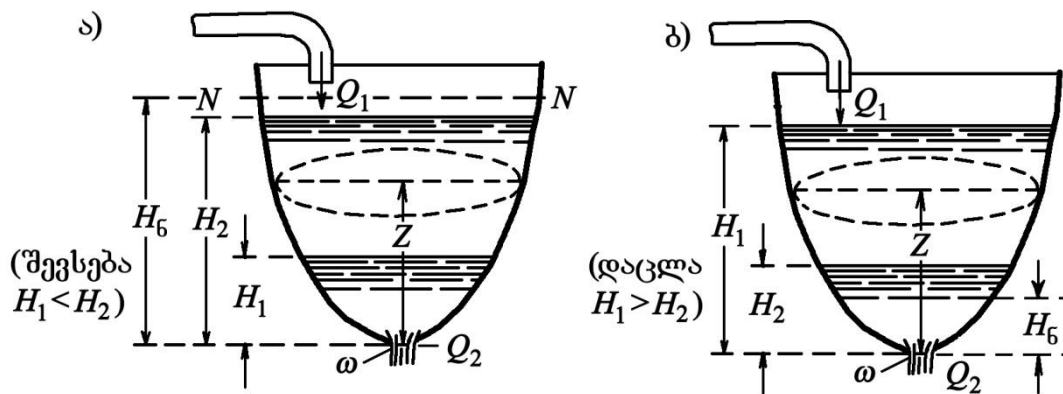
VIII. მთის წყალსაცავების ეკოლოგიური წონასწორობის შენარჩუნების მეთოდები

VIII.1. მთის წყალსაცავების დაცლის და შევსების დროის განსაზღვრა

წყალსაცავების სხვადასხვა სამუშაოების ჩატარებისათვის (ფსკერის ნატანისგან გაწმენდა, გალერეებისა და წყალგამშვები ნაგებობების სარემონტო სამუშაოები და სხვ.) საჭიროა მისი მოცულობის სრული ან ნაწილობრივი დაცლა. ამისათვის საჭიროა წყალსაცავის დაცლის (შევსების) დროის წინასწარი განსაზღვრა.

ბოლო დროს მთის წყალსაცავების დაცლის პრობლემა მეტად აქტუალურია, რადგან მის ფსკერსა და ნაპირებზე სედიმენტაციური და აბრაზიული პროცესები მნიშვნელოვნად გააქტიურდა. წყალსაცავების დაცლის (შევსების) დროის (T) გაანგარიშება ტარდებოდა მიახლოებითი მეთოდის გამოყენებით [Павловский Н.Н., 1937; Киселев П.Г., 1972].

მთის წყალსაცავის დაცლის (შევსების) დროის გაანგარიშებისას გამოვიყენეთ რეზერვუარიდან სითხის გამოდინების (ჩადინების) ჰიდრავლიკური ამოცანა ცვალებადი დაწნევის დროს. ჰიდრავლიკური ამოცანის – წყალსაცავში ცვალებადი დაწნევის დროს გამოდინების (შევსების) ამოცანის განხილვისას მივიღეთ შემდეგი აღნიშვნები (ნახ. VIII.1.1; ნახ. VIII.1.2).



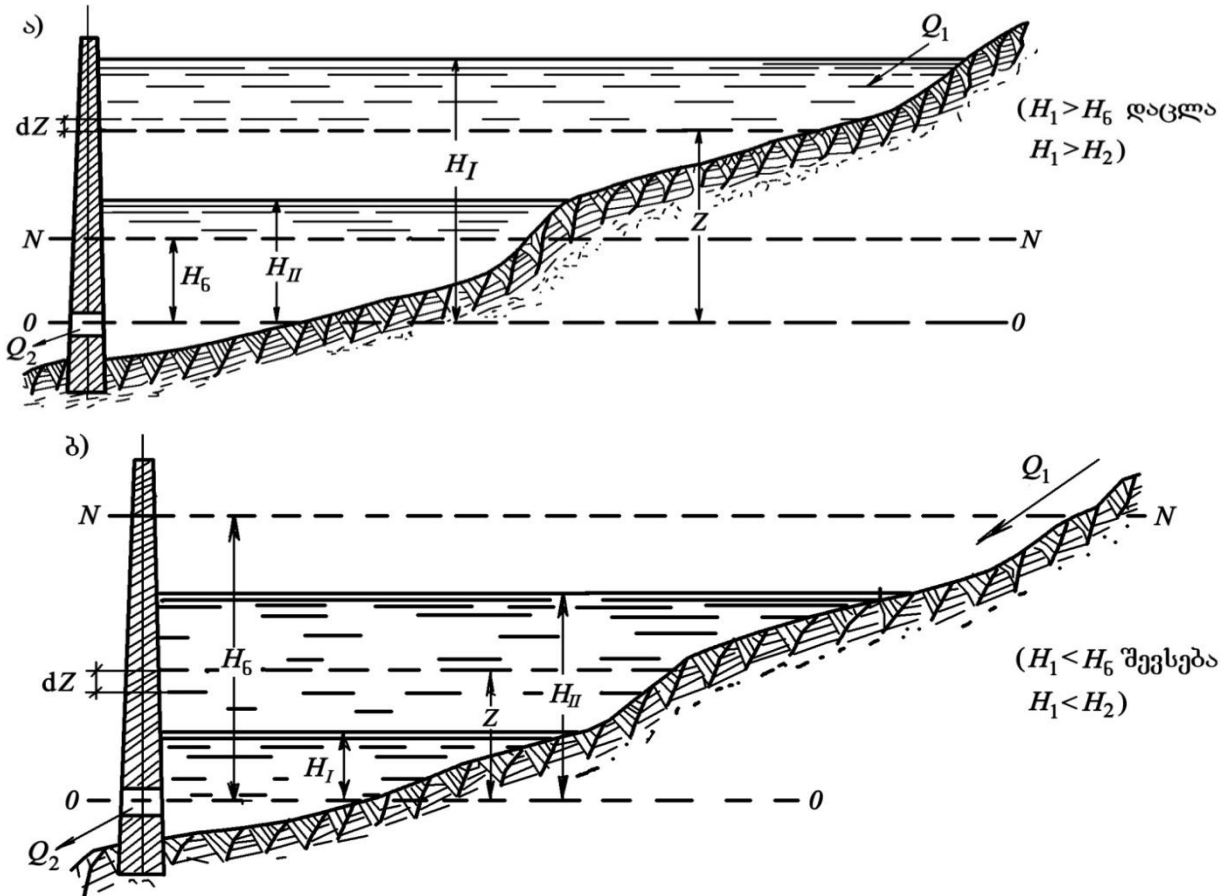
ნახ. VIII.1.1 წყალსაცავის შევსებისა (ა) და დაცლის (ბ) ჰიდრავლიკური სქემები

Z - ცვალებადი დაწნევა გამშვებ ნაგებობაზე (ლიობზე), მ; F - წყალსაცავში წყლის ზედაპირის სარკის ფართობი შესაბამისი დაწნევისას, მ²; Q - წყალსაცავში წყლის შემოდინების ხარჯი, მ³/წმ; Q_2 - წყალსაცავიდან წყლის გადინების ხარჯი, მ³/წმ; H_1 - გამშვებ ნაგებობაზე (ლიობზე) საწყისი დაწნევა, მ; H_2 - გამშვებ ნაგებობაზე (ლიობზე) სასრული დაწნევა, მ; H_3 - ე. წ. „ნორმალური“ დაწნევა, მ; t_1 , t_2 - დროის მომენტების მნიშვნელობები შესაბამისი (H_1) და (H_2) დაწნევისას, ($t_2 - t_1$) = T - წყალსაცავის დაცლის (შევსების) დრო, წმ; ω - ლიობის ფართობი, მ²; μ - 0,60-0,62 - ლიობის ხარჯის კოეფიციენტი.

წყალსაცავიდან წყლის გამოდინების ბალანსის შეფასებისას გამოყენებულია ლიობიდან წყლის გამოდინების ჰიდრავლიკური ამოცანა ცვლადი დაწნევის (dz) დროს [Большаков В. А., Константинов Ю.М., Попов В.Н., Нетюхайло А.П., Шеренков И.А., Даденко В.Ю., Клешевникова Т.П., Железняк И.А., 1984]:

$$Fdz = Q_1 dt - Q_2 dt, \quad (\text{VIII. 1.1})$$

სადაც Q_1 არის წყალსაცავში ჩამოდინებული წყლის ხარჯი, Q_2 – წყალსაცავიდან გამოდინებული წყლის ხარჯი, dz – წყლის ზედაპირის დონის ცვალებადობა (dt) დროის მანძილზე.



ნახ. VIII.1.2. წყალსაცავის დაცლისა (ა) და შევსების (ბ) პროფილის სქემები
 H_1 – საწყისი დონის სიდიდე, H_2 – საანგარიშო დონის სიდიდე,
 H_6 – „ნორმალური“ დონის სიდიდე

წყალსაცავის ზედაპირზე ცვალებადი დაწნევის, დაცლის (შევსების) ძირითად დიფერენციალურ დამოკიდებულებას აქვს სახე:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_1 - \mu\omega\sqrt{2gZ}}{F}, \quad (\text{VIII.1.2})$$

სადაც $Q_1 = f(t)$, (VIII.1.3)

$$F = f(Z), \quad (\text{VIII.1.4})$$

წყალსაცავის შევსებისას $H_2 > H_1, dZ > 0$, (VIII.1.5)

წყალსაცავის დაცლისას $H_2 < H_1, dZ < 0$. (VIII.1.6)

პრაქტიკული შემთხვევებისთვის დიფერენციალური განტოლების (VIII.1.1) ინტეგრირება ხორციელდება გამოთვლების მიახლოებითი მეთოდით, [იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., იორდანიშვილი კ., მღებრიშვილი მ., ქუფარაშვილი ი., ნატროშვილი გ., ფოცხვერია დ., კანდელაკი ნ., ბილანიშვილი ლ., 2021]

წყალსაცავიდან გამოდინების (შევსების) დროის გაანგარიშება ტარდება პირობით:

$$Q_1 = \text{const}, \quad (\text{VIII.1.7})$$

$$F = f(Z). \quad (\text{VIII.1.8})$$

განტოლება (VIII.1.2) კვადრატურის სახით ჩაიწერება:

$$t_2 - t_1 = T = \int_{H_1}^{H_2} \frac{FdZ}{Q_1 - \mu\omega\sqrt{2gz}}, \quad (\text{VIII.1.9})$$

სადაც ინტეგრალი (VIII.1.9) დამოკიდებულია მხოლოდ ცვლად (Z)-ზე. წყლის გამოდინების შემთხვევაში იანგარიშება დაწნევის ის მნიშვნელობა (H_6), რომლის დროს გამშვები ღიობი ატარებს მუდმივ ხარჯს – $Q_2 = \text{const}$, ხოლო H_6 -ის მნიშვნელობა იანგარიშება პირობიდან:

$$Q_2 = \mu\omega\sqrt{2gH_6} = \text{const}, \quad (\text{VIII.1.10})$$

საიდანაც
$$H_6 = \frac{(Q_2)^2}{2g\mu^2\omega^2}, \quad (\text{VIII.1.11})$$

სადაც H_6 ე. წ. „ნორმალური“ დაწნევაა, ხოლო N – „ნორმალური“ დონე.

H_6 -ის და H_1 -ის მნიშვნელობების შესაბამისად, გვაქვს წყალსაცავის შევსების ან დაცლის მომენტები:

შევსებისას –
$$H_1 < H_6, \quad (\text{VIII.1.12})$$

დაცლისას –
$$H_1 > H_6. \quad (\text{VIII.1.13})$$

ორივე შემთხვევისას „ნორმალური“ დაწნევა მუდმივია.

წყალსაცავის დაცლის ან შევსების დროის (T) პრაქტიკული გაანგარიშების მეთოდიკა

წყალსაცავის დაცლის დროის (T) მნიშვნელობის ანგარიში ტარდება წყალსაცავში ჰორიზონტის (H_1)-დან (H_6)-მდე დაწევისას (ნახ. VIII.1.2.ა), ხოლო შევსებისას – (H_1)-დან (H_6)-მდე აწევისას (ნახ. VIII.1.2.ბ).

განტოლება (VIII.1.9)-ში: $t_2 - t_1 = T = \int_{H_1}^{H_2} \frac{FdZ}{Q_1 - \mu\omega\sqrt{2gz}}$, ჩავსვათ Q_1 -ის მნიშვნელობა განტოლება (VIII.1.11)-დან – $H_6 = \frac{Q_1^2}{2g\mu^2\omega^2}$, საიდანაც: $Q_1^2 = H_6 \cdot 2g\mu^2\omega^2$, აქედან $Q_1 = \mu \cdot \omega \sqrt{H_6 \cdot 2g}$. მაშინ განტოლება (VIII.1.9) წყალსაცავის შევსებისას მიიღებს სახეს:

$$t_1 - t_2 = T_{\text{შვს.}} = \frac{1}{\mu\omega\sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{FdZ}{\sqrt{H_6} - \sqrt{Z}}, \quad (\text{VIII.1.14})$$

ხოლო წყალსაცავის დაცლისას:

$$t_1 - t_2 = T_{\text{დაც.}} = \frac{1}{\mu\omega\sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{FdZ}{\sqrt{Z} - \sqrt{H_6}}. \quad (\text{VIII.1.15})$$

აღვნიშნოთ
$$Z_{\text{max.}(H_2 > H_1)} = \int_{H_1}^{H_2} \frac{FdZ}{\sqrt{H_6} - \sqrt{Z}}, \quad (\text{VIII.1.16})$$

რომელიც ე.წ. წყალსაცავის შევსების „მოდულია“, ხოლო:

$$Z_{\max. (H_1 > H_2) \text{ ღაც.}} = \int_{H_1}^{H_2} \frac{FdZ}{\sqrt{H_6 - \sqrt{Z}}} \quad (\text{VIII.1.17})$$

– ე.წ. წყალსაცავის დაცლის მოდული.

მაშინ განტოლება (VIII.1.15) – შევსების „მოდულის“ ($Z_{\max. \text{შევს}}$) გათვალისწინებით, წყალსაცავის სრულად შევსების დრო (T) იქნება:

$$T_{\text{შევს}} = \frac{1}{\mu\omega\sqrt{2g}} \cdot Z_{\max. \text{შევს}}, \quad (\text{VIII.1.18})$$

დაცლის „მოდულის“ ($Z_{\max. \text{დაც}}$) გათვალისწინებით – წყალსაცავის სრულად დაცლის დრო ($T_{\text{დაც}}$) იქნება:

$$T_{\text{დაც}} = \frac{1}{\mu\omega\sqrt{2g}} \cdot Z_{\max. \text{დაც}} \quad (\text{VIII.1.19})$$

სიონის წყალსაცავის დაცლის დროის ($T_{\text{დაც}}$) ანგარიშის მაგალითი (ნორმალური შეტბორვიდან)

სიონის წყალსაცავის რეზერვუარის წყლისგან დაცლის დროის ანგარიშისთვის საჭირო საწყისი მონაცემებია:

- სიონის წყალსაცავის სქემა (ნახ. V.2.6.ა);
- წყალსაცავის დაცლის პროცესი ტარდება კატასტროფული წყალსაგდების გარეშე, რადგან მასზე წყლის გადმოდინება ხორციელდება ნ.შ. დონეზე მაღალ ნიშნულზე;
- სიონის წყალსაცავის ზედაპირის ფართობისა (F) და სიღრმის (Z) ნიშნულების გრაფიკი (ნახ. V.2.6.ბ);
- წყალსაცავში მდ. იორიდან ჩადინებული წყლის საშუალო წლიური ხარჯი $Q_1=11,6$ მ³/წმ;
- ენერგეტიკული წყალგამშვების ღიობში გადინებული წყლის ხარჯი $Q_{\text{ენ}}=23,0$ მ³/წმ;
- ირიგაციული წყალგამშვების ღიობიდან გადინების ხარჯი $Q_{\text{ორ}}=24,0$ მ³/წმ;
- ენერგეტიკული და ირიგაციული ღიობებიდან წყლის საერთო ხარჯი $Q=47,0$ მ³/წმ;
- ენერგეტიკული წყალგამშვების ღიობის ფართობი $\omega_{\text{ენ}}=6,15$ მ²;
- ირიგაციული წყალგამშვების ღიობის ფართობი $\omega_{\text{ორ}}=28,3$ მ²;
- ენერგეტიკული და ირიგაციული ღიობების საერთო ფართობი $\omega_{\text{ჯამ.ფ.}}=6,15+28,3\approx 34,5$ მ²;
- ხარჯის კოეფიციენტი $\mu=0,60$;
- წყალგამშვებ ღიობზე დაწნევის მაქსიმალური სიდიდე:
 $\nabla H_1 = 1068,3 - \nabla 1010,0 = 58,3$ მ;
- წყალგამშვებ ღიობზე საბოლოო დაწნევა: $H_2=0$.

რადგან სიონის წყალსაცავის გრაფიკი $Z=f(F)$ თითქმის სწორხაზოვანია (ნახ. V.2.6.გ), რაც შეესაბამება მთის წყალსაცავების გრაფიკს, ამიტომ დაცლის პროცესიც სწორხაზოვანია (ანუ პირდაპირ პროპორციულია). ე.წ. „ნორმალური“ დაწნევის

მნიშვნელობა (H_6) (VIII.1.11) ფორმულის გამოყენებით იქნება:

$$H_6 = \frac{(Q_2)^2}{2g\mu^2\omega^2} = \frac{47,0^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 0,60^2 \cdot 34,5^2} = 0,26\text{მ.}$$

მაშინ, (VIII.1.19) ფორმულის თანახმად, წყალსაცავის სრული დაცლის პროცესის დრო ($T_{\text{დაც.}}$) იქნება:

$$\begin{aligned} T_{\text{დაც.}} &= \frac{1}{\mu\omega} \cdot Z_{\text{max.დაც.}} = \frac{1}{\mu\omega_{\text{ჯამ.}}} \cdot \int_{H_1}^{H_2} \frac{FdZ}{\sqrt{H_6} - \sqrt{Z}} = \\ &= \frac{1}{0,6 \cdot 36,6} \cdot \int_0^{63,3} \frac{10,5 \cdot 10^6}{\sqrt{0,26} - \sqrt{Z}} dZ \approx 2100000 \text{ წმ} \approx 24 \text{ დღე-ღამე} \end{aligned}$$

ამგვარად, სიონის წყალსაცავის სრულ დაცლას ნ.შ. დონიდან ღიობების ძირის ნიშნულებამდე დასჭირდება 24 დღე-ღამე. აღსანიშნავია, რომ 2018 წელს ჩატარდა სიონის წყალსაცავის სრული დაცლა, რასაც (ჩვენი გამოთვლების საფუძველზე) დასჭირდა 24 დღე-ღამე.

იმ შემთხვევაში, თუ საჭიროა წყალსაცავის არასრულად დაცლა (ან შევსება), მაშინ საწყის და საბოლოო დონეებს შორის მანძილი დაიყოფა (n) რაოდენობის ტოლ შუალედებად, რომელთა დაცლის (შევსების) დრო (T) იანგარიშება მრავალი წევრის მათემატიკური ინტეგრალის გამოყენებით. ამ შემთხვევაში ანგარიშისთვის საჭიროა საწყის და საბოლოო დაწნევებს შორის მანძილის დაყოფა (n) რაოდენობის ტოლ შუალედებად, მაშინ (VIII.1.16) გატოლება მიიღებს სახეს:

$$Z_{\text{შვს.}} = -\sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{F}{\sqrt{H_6} - \sqrt{Z}} \right)_{k+1} + \left(\frac{F}{\sqrt{H_6} - \sqrt{Z}} \right)_k \right] \cdot \delta Z_{K_1, K+1}, \quad (\text{VIII.1.20})$$

ხოლო განტოლება (VIII.1.17) იქნება:

$$Z_{\text{დაც.}} = -\sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{F}{\sqrt{Z} - \sqrt{H_6}} \right)_{k+1} + \left(\frac{F}{\sqrt{Z} - \sqrt{H_6}} \right)_k \right] \cdot \delta Z_{K_1, K+1}, \quad (\text{VIII.1.21})$$

სადაც ფუნქციების $\left(\frac{F}{\sqrt{H_6} - \sqrt{Z}} \right)_{k+1}$ და $\left(\frac{F}{\sqrt{Z} - \sqrt{H_6}} \right)_k$ - ფორმულების (VIII.1.16)-ს და (VIII.1.17)-ს ინტეგრალების მნიშვნელობებია შესაბამისი (Z_{K+1}) და (Z_K) დაწნევისას; $K=1,2,3,\dots,n$; $Z_1=H_1$; $Z_{n+1}=H_2$; $\delta Z_{K_1, K+1}$ - დაწნევის დადებითი ან უარყოფითი ნამატია წყლის ჰორიზონტის აწევის ან დაწევის დროს დაწნევის (Z_K) ნიშნულიდან (Z_{K+1}) ნიშნულამდე.

(VIII.1.20) და (VIII.1.21) ფორმულების მნიშვნელობა ყოველთვის დადებითია.

(VIII.1.20) ფორმულის გამოყენებით, (Z)-ის გაანგარიშებული მნიშვნელობის შესაბამისად, (VIII.1.18) ფორმულის გამოყენებით შეიძლება განისაზღვროს შევსების დრო ($T_{\text{max.შვს.}}$), რომლის მანძილზე წყალსაცავის ჰორიზონტი აიწევს (H_1)-დან (H_2)-მდე:

$$T_{\text{max.შვს.}} = \frac{Z_{\text{max.შვს.}}}{\mu\omega\sqrt{2g}}, \quad (\text{VIII.1.22})$$

ხოლო (VIII.1.19) ფორმულის გამოყენებით - დაცლის დროის ($T_{\text{max.დაც.}}$) განსაზღვრა, რომლის მანძილზე წყალსაცავის ჰორიზონტი დაიწევს (H_1)-დან (H_2)-მდე:

$$T_{\max, \text{დაც.}} = \frac{Z_{\max, \text{დაც.}}}{\mu\omega\sqrt{2g}} \quad (\text{VIII.1.23})$$

წყალსაცავის დაცლის პროცესის სიჩქარე უნდა დადგინდეს წყალსაცავის ნაპირების გრუნტების შემადგენლობის გათვალისწინებით, რათა არ გააქტიურდეს ნაპირების წარეცხვა გრუნტებიდან წყლის ამოსვლის პროცესების გამო.

საქართველოში წყალსაცავის დაცლის პროცესი ჩატარდა მხოლოდ სიონის წყალსაცავზე.

VIII.2. სედიმენტაციური პროცესების განვითარების საწინააღმდეგო ღონისძიებები და ფსკერის გაწმენდის ზოგადი რეკომენდაციები მთის წყალსაცავებში

მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების ექსპლუატაციის პრაქტიკის ანალიზმა აჩვენა, რომ მათში სედიმენტაციური პროცესები უფრო მაღალი ინტენსივობით მიმდინარეობს, ვიდრე ვაკის წყალსაცავებში. ეს პრობლემა აქტუალურია ამიერკავკასიის, შუა აზიისა და სხვა მთიან რეგიონებში.

მთის წყალსაცავების დაპროექტებისას აუცილებელია წინასწარ განისაზღვროს მთის მდინარეების წლიური ჩამონადენის – როგორც მნიშვნელოვანი არათანაბრობა, ასევე წყლის მყარი ნაწილაკებით გაჯერების მაჩვენებლები. სედიმენტაციური პროცესების შემცირების ღონისძიებები შეიძლება დავეყთ ორ ჯგუფად – **გამაფრთხილებელი და საექსპლუატაციო**.

გამაფრთხილებელი ღონისძიებებია – წყალსაცავში შემოსული ნატანის მოცულობის საერთო შემცირება მდინარის აუზში ნიადაგის ეროზიის შემცირებით. ესენია, მდინარის სათავეში ტყის გაშენების ღონისძიებები, წყალსაცავისა და მდინარეების წყალდამცავი ზონისა და ზოლის მონიშვნა და სხვ.

საექსპლუატაციო ღონისძიებებია – წყალსაცავის ფსკერის ჰიდრავლიკური ჩარეცხვები ფსკერული გალერეების მეშვეობით; მექანიკური გაწმენდა; კაშხლის ქიმის ამალება წყალსაცავის მოცულობის გაზრდის მიზნით; წყლის ტრანზიტული ჩამოგდება გვერდითი წყალგამშვები მოწყობილობების – გამყვანი არხების, გვირაბის, ნატანამცილებელი მოწყობილობების მეშვეობით; ნაპირსამაგრი ნაგებობების მოწყობა და სხვ.

შვეიცარიის რიგი წყალსაცავების ექსპლუატაციის პირობების შესწავლისას გამოვლინდა, რომ კაშხლის ძირში მოწყობილი გამრეცხი გალერეები 200,0 მ სიღრმეზე დღემდე ნორმალურად მუშაობს. ამ მეთოდის მთავარი ნაკლია – წყალსაცავის ფსკერზე, კაშხალთან, ვიწრო, ღრმა კალაპოტის წარმოქმნა გამრეცხი ნაკადის მიერ, წყალსაცავის ფსკერის ძირითადი ნაწილი კი რჩება დასილული*.

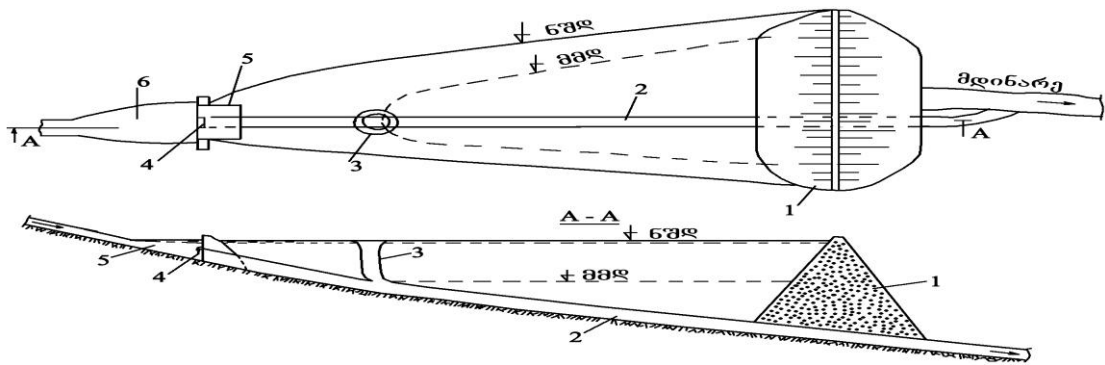
აღსანიშნავია ქართველი მეცნიერების მიერ შემოთავაზებული ნატანამცილებელი

* შვეიცარიისა და იტალიის მსხვილი მთის წყალსაცავების ეკოლოგიური პრობლემები იყო შესწავლილი ნ. კანდელაკის მიერ შვეიცარიისა და იტალიაში მივლინების დროს, რომელიც იყო დაფინანსებული რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის პროგრამით MR-2016-1-106.

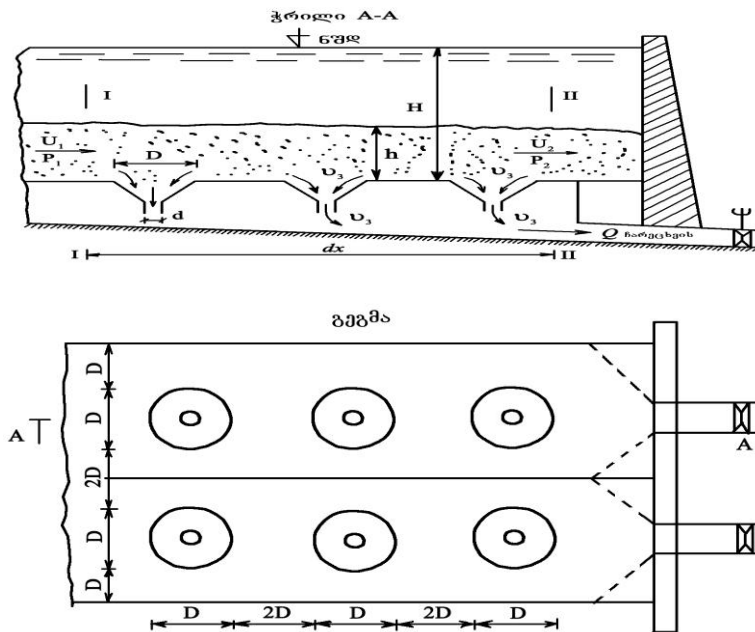
ლი ნაგებობები, რომელთა განლაგება შესაძლებელია წყალსაცავის სათავე ნაწილში [Херхеулидзе Г. И., 1972; გავარდაშვილი გ., კუხალაშვილი ე., კუპრეიშვილი შ., გავარდაშვილი ნ., 2018].

მთის წყალსაცავების ნატანისგან გაწმენდის საინტერესო შემოთავაზებაა აზერბაიჯანელი მეცნიერის მიერ წყალსაგდები ნაგებობების სათავე ნაწილის (წყალამღები კოშკის სახით) განლაგება მდინარის კალაპოტში წყალსაცავის ნორმალურ დონესა და მკვდარი მოცულობის დონეებს შორის (ნახ. VIII.2.1) [Мамедов А.Ш., Мамедли А.А., 2016]. მთის მდინარეების პირობებში, სადაც მაღალია ნატანის სიმღვრივე, ასეთი ტიპის ნატანდამჭერი ნაგებობა ძალიან მალე დაისილება.

ასევე საინტერესო შემოთავაზებაა – ნატანის ჩამოგდება კაშხლის წინ ჩაძირული სალექარის გამოყენებით (ნახ. VIII.2.2) [Мамедов А.Ш., Мамедли А.А., 2016].



ნახ. VIII.2.1. მთის წყალსაცავების ფსკერზე ნატანისგან აცილების ნაგებობა
 1 – კაშხალი, 2 – ფსკერული მილები, 3 – ზედაპირული წყალსაგდები,
 4 – ფსკერული წყალმიმღები, 5 – ნატანდამჭერი კაშხალი, 6 – ნატანის წინასწარი დალექვის აუზი.

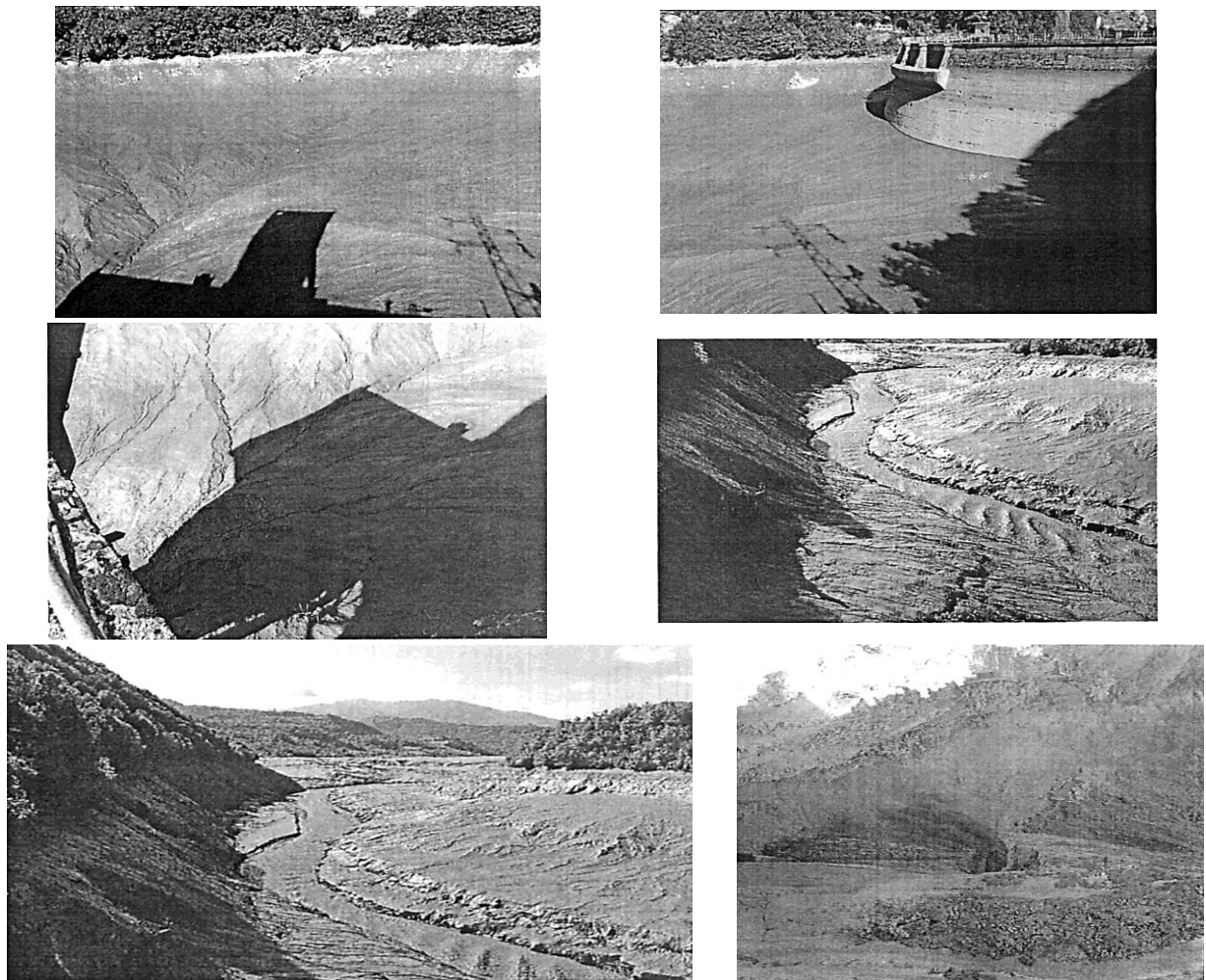


ნახ. VIII.2.2. ჩაძირული სალექარის სქემა

საქართველოს მთის წყალსაცავების კაშხლების ძირში მოწყობილია გამრეცხი გალერეები. საქართველოს წყალსაცავების რეგულარული ჰიდრავლიკური ჩარეცხვე-

ბი არ ტარდება, რის გამოც ზოგიერთი მათგანი დასილულია ფსკერული ნატანით, ესენია: გუმათის, ლაჯანურის, ვარციხის. ტყიბულის წყალსაცავის ფსკერი დასილულია ნახშირის შლამით; თბილისის წყალსაცავის წყალი, რომელსაც ვიყენებთ სასმელად – დაბინძურებულია შხამქიმიკატებითა და მინერალური სასუქებით [კუპრეიშვილი შ., სუპატაშვილი თ., დადიანი ქ., კიკნაძე ხ., მისაია ლ., 2012; დიაკონიძე რ., ჩახაია გ., წულუკიძე ლ., ვარაზაშვილი ზ., სუპატაშვილი თ., კუპრეიშვილი შ., მთიულშიშვილი კ., 2013].

ლაჯანურის წყალსაცავის ფსკერის ნატანისგან ჰიდრავლიკური წარეცხვა ჩატარდა 2012 წელს. მაგრამ დადებითი ეფექტი არ ჰქონდა, რადგან ნატანი უკვე ჩაკირული იყო და წყლის მიმართული ნაკადი მას ვერ მოერია (ფოტო VIII.2.1).



ფოტო VIII.2.1. ლაჯანურის წყალსაცავის ფსკერის ნატანისგან ჰიდრავლიკური ჩარეცხვის პროცესი, 2012 წელი.

წყალსაცავის ფსკერის ნატანისაგან გაწმენდის რეკომენდაციები

წყალსაცავის ფსკერის ნატანისაგან გაწმენდისათვის, საჭიროა შემდეგი სამუშაოების ჩატარება:

ა) მოსამზადებელი სამუშაოები:

1. წყალსაცავის ფსკერის საპროექტო გეგმისა და პროფილების მოძიება;
2. წყალსაცავის ფსკერზე დაგროვილი ნატანის მოცულობის დასადგენად უნდა

ჩატარდეს მისი ფსკერის ექოლოტირება ყოველ 100×100 მ და ფსკერის თანამედროვე პროფილების აგეგმვა;

3. დაგროვილი ნატანის მოცულობის (W_6 , მ³) გაანგარიშება საპროექტო და თანამედროვე პროფილების შედარებით;

4. ნატანის სიმსხოსა (d_6) და მისი ხვედრითი წონის (γ_6) დასადგენად ფსკერიდან გრუნტის სინჯების ამოღება და გრანულომეტრიული შემადგენლობის გაანგარიშება.

ბ) წყალსაცავის ფსკერიდან ნატანის გამორეცხვის პროცესი:

1. წყალსაცავის დონის დაწევა, თუნდაც მკვდარი მოცულობის დონემდე. დონის დაცლის სიჩქარე არ უნდა აღემატებოდეს 1,0 მ/დღე-ღამეში. დაცლის პროცესი სასურველია ჩატარდეს გაზაფხულის წყალდიდობის პერიოდის დაწყებამდე;

2. წყალსაგდები არხის ფაქტობრივი განივკვეთის ფართობის ($\omega_{ფაქ.}$, მ²), დახრილობისა ($i_{ფაქ.}$) და სიგრძის ($l_{ფაქ.}$, მ) გაზომვა;

3. წყალსაგდებ არხში წყლის დინების ფაქტობრივი სიჩქარის ($V_{ფაქ.}$, მ/წმ) გაზომვა ხორციელდება წყალსაცავის დონის შესაბამის საანგარიშო ნიშნულზე;

4. არხში წყლის ფაქტობრივი სიჩქარისა ($V_{ფაქ.}$, მ/წმ) და ნატანით გაჯერებული წყლის კრიტიკული (არადალექვადი) სიჩქარის ($V_{კრ. არადალექვადი}$) სიდიდეების შედარება.

ნატანის გამოტანა უნდა ხორციელდებოდეს პირობის დაცვით:

$$V_{ფაქ.} > V_{კრ. არადალექვადი}. \tag{VIII.2.1}$$

არხში არადალექვის კრიტიკული სიჩქარე ($V_{კრ. არადალექვადი}$) შესაბამისი წყლის დინების ფაქტობრივი სიჩქარის ($V_{ფაქ.}$), ნატანის საშუალო სიმსხოსა ($d_{საშ}$, მმ) და წყალსაგდები არხის დახრილობის (i) დროს იანგარიშება ა.ა. ჩერკასოვის ფორმულით [Киселев П.Г., 1972]:

$$V_{კრ. არადალექ.} = 0,646 \alpha \beta R^{0.5} \text{ მ/წმ}, \tag{VIII.2.2}$$

სადაც α არის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ($R \cdot 10^6$)-ზე (ცხრ. VIII.2.1); R (მ) – გამყვანი არხის ჰიდრავლიკური რადიუსი; i - გამყვანი არხის დახრილობა; β – კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ნატანის ჰიდრომექანიკურ ექვივალენტზე (η) (ცხრ. VIII.2.2).

ცხრილი VIII.2.1

α -ს მნიშვნელობები

$R \cdot 10^6$	α	$R \cdot 10^6$	α	$R \cdot 10^6$	A
50	0,97	200	0,995	350	1,015
75	0,975	225	1,00	400	11,02
100	0,98	275	1,005	450	1,095
125	0,985	300	1,01	500	1,03
150	0,99				

ცხრილი VIII.2.2

η -ს და β -ს მნიშვნელობები

η , გრ-სმ/ლ-წმ	β	η , გრ-სმ/ლ-წმ	β	η , გრ-სმ/ლ-წმ	β
0,001	0,735	0,2	0,950	1,5	1,075
0,01	0,815	0,3	0,975	2,0	1,090
0,2	0,840	0,4	0,990	3,0	1,120

ცხრილი VIII.2.2-ის გაგრძელება

0,03	0,860	0,5	1,005	4,0	1,140
0,04	0,870	0,6	1,015	5,0	1,160
0,05	0,880	0,7	1,025	7,0	1,180
0,06	0,880	0,8	1,030	10,0	1,215
0,08	0,900	0,9	1,040	15,0	1,250
0,10	0,915	1,0	1,045	20,0	1,270
0,15	0,935				

η -ს მნიშვნელობა ტოლია:

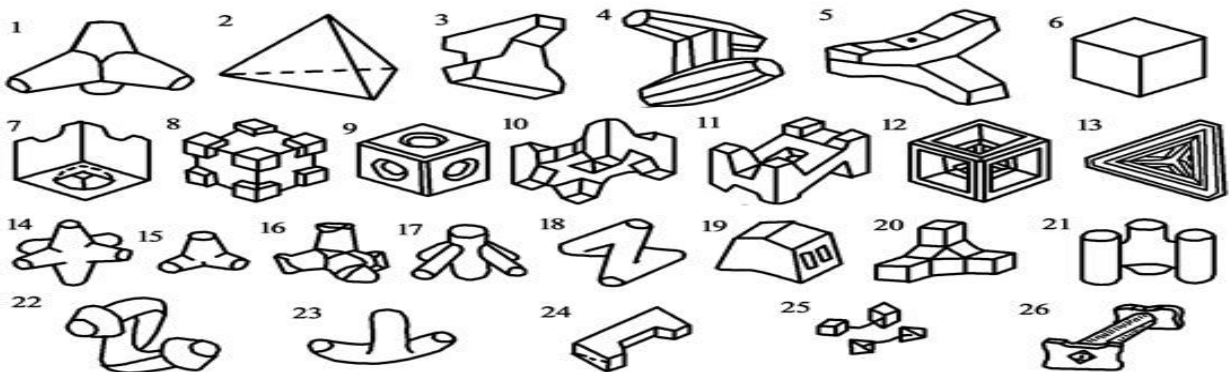
$$\eta = \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma_1} \cdot \varepsilon \frac{\sum (\omega_i \cdot P_i)}{\sum P_i}, \quad (\text{VIII.2.3})$$

სადაც γ, γ_1 წყლისა და ნატანის ხვედრითი წონაა; ε – გამყვან არხში ნაკადის სიმღვრივე (ანუ ნატანით გაჯერებული ნაკადის 1,0 ლიტრში ნატანის რაოდენობა გრამებში); ω_i – ნატანის i -ური ხარისხის ნაწილაკების გაშუალედებული ჰიდრავლიკური სიმსხო, სმ/წმ; P_i – ამ ფრაქციის ნატანის რაოდენობა, %-ში.

VIII.3. მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვისაგან დამცავი ღონისძიებები

წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების დაცვა ახალი, თანამედროვე, მაღალი ტალღაჩამქრობი უნარისა და დაბალი თვითღირებულების მქონე ნაპირდამცავი ნაგებობების მეშვეობით არის აქტუალური პრობლემა.

მრავალ ქვეყანაში უკვე უარი თქვეს მასიურ, ერთიან და ძვირადღირებულ ნაპირდამცავი ნაგებობების გამოყენებაზე. სხვადასხვა მოხაზულობის ბეტონის ფიგურული მასივებისგან შექმნილია გამჭოლი კონსტრუქციები, რომელთა წონის დიაპაზონი 0,5-60,0 ტონის ფარგლებშია (ნახ. VIII.3.1; ფოტო VIII.3.1; VIII.3.2; VIII.3.3; VIII.3.4) [Шеренков И.А., Складнев М.Ф., 1971; Иорданишвили И.К., 2002; Литвиненко Г.И., Стрекалов С.С., 2002; Bilyway E., Ozbachceci B., Bacanli S., Kiziroglu C., 2017; Soares F., Henriques M.I., Roca C., 2017].



ნახ. VIII.3.1. ფიგურული მასივების ძირითადი არსებული ტიპები

- 1 – ტეტრაპოდი; 2 – ტეტრაედრი; 3 – დიპოდი; 4 – დოლოსი; 5 – MII-ტიპი;
- 6 – კუბუსი; 7 – მოდიფიცირებული კუბუსი; 8 – ВНЗ ბლოკი; 9 – სტიბლოკი;
- 10 – H-სებრი ბლოკი; 11 – II-სებრი ბლოკი; 12 – КОБ-ბლოკი; 13 – ღრუ ტეტრაედრი;
- 14 – ჰექსაპოდი; 15 – კვადრიპოდი; 16 – სტაბილოპოდი; 17 – სტაპოდი; 18 – სტაბიტი;
- 19 – სვიბლოკი; 20 – ტრიპოდი; 21 – ტრიბარი; 22 – დინოზავრი; 23 – არტილისი;
- 24 – π-ბლოკი; 25 – შეკრული ბლოკები; 26 – ჰანტელისებრი ბლოკი.



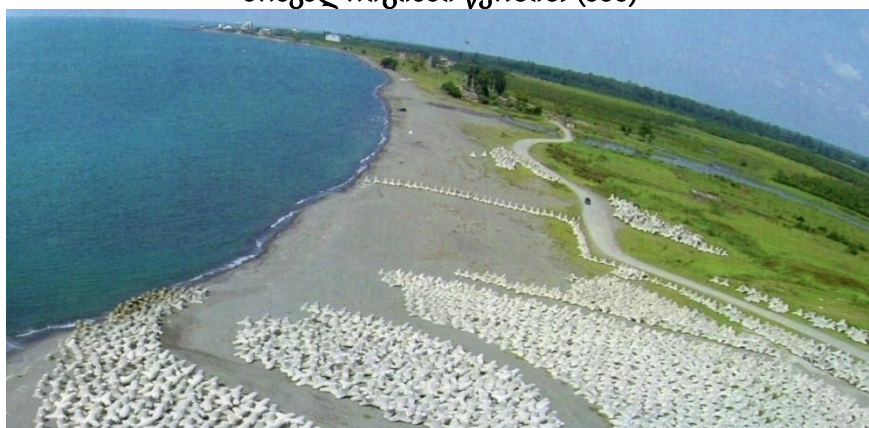
ფოტო VIII.3.1. ტეტრაპოდები ხიდის საყრდენთან მდ. ლიახვზე (საქართველო)



ფოტო VIII.3.2. ტეტრაბლოკების ნაყარი ფოთის ნავსადგურში (საქართველო)



ფოტო VIII.3.3. აბრაზიული ნაპირის გამაგრება სპეციალური კონსტრუქციების მრავალრიგიანი წყობით (აშშ)

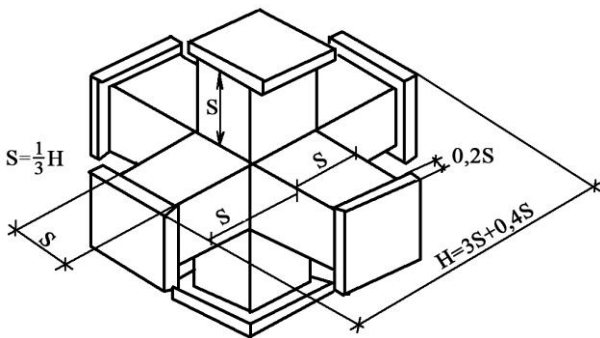


ფოტო VIII.3.4 ტეტრაპოდები ანაკლიაში (საქართველო)

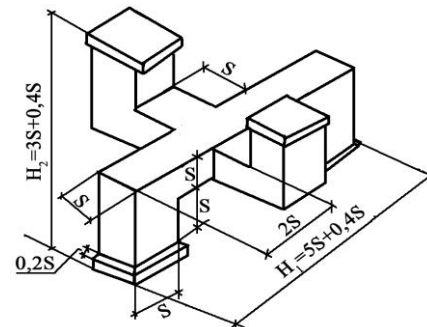
ფიგურული მასივების გამოყენებით შესაძლებელია აბრაზიული ციცაბო ფერდების გამაგრება. ფიგურული მასივებისგან აგებული კონსტრუქციების ეფექტური მუშაობის ძირითადი ფაქტორია – ტალღების ენერჯის ჩახშობა და ფერდზე მათი აგორების სიმაღლის შემცირება (2÷3-ჯერ).

ნაპირსამაგრი ახალი კონსტრუქციები - ფასონური ბლოკების სახით

ბლოკების ტალღაჩამქრობი უნარის, ურთიერთშეკრულების გაუმჯობესებისა და ფერდზე ტალღების აგორების სიმაღლის შემცირებისათვის დამუშავდა ფასონური ბლოკების ახალი ტიპები – „მოდულიზებული ჰექსაბლოკის“ და „მოდულიზებული ტეტრაბლოკის“ სახით (დასახელება შერჩეულია მათი შვერილების რაოდენობის შესაბამისად (ბვ. ბერძ. τετρα – „ოთხი“; Εξί – ექვსი) (ნახ.VIII.3.2; VIII.3.3) [კანდელაკი ნ., იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., კუპრეიშვილი შ., იორდანიშვილი კ., 2019; იორდანიშვილი ი., 2001; Иорданишвили И.К., 2002, 2003; Kandelaki N., Iordanishvili I., Iremashvili I., Ujma A., Shurgaia V., Iordanishvili K., 2019].



ნახ. VIII.3.2. „მოდულიზებული ჰექსაბლოკის“ სქემა



ნახ.VIII.3.3. „მოდულიზებული ტეტრაბლოკის“ სქემა

შემოთავაზებული ბლოკების – „მოდულიზებული ჰექსაბლოკის“, „მოდულიზებული ტეტრაბლოკის“ და არსებული მასივების – „ტეტრაპოდის“, „დიპოდის“ და „დოლოსის“ მასის შედარება მოყვანილია ნახაზზე VIII.3.4.

ა)

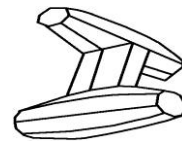
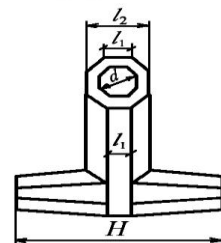
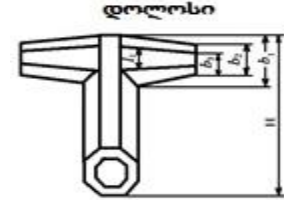
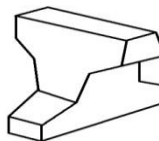
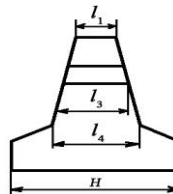
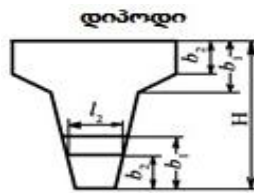
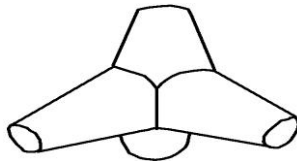
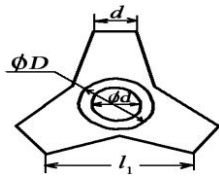
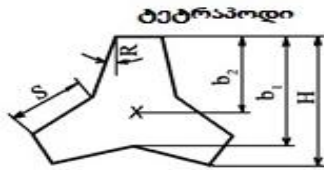
მოდულიზებული ჰექსაბლოკი, $\rho = 2,60 \text{ ტ/მ}^3$			მოდულიზებული ტეტრაბლოკი, $\rho = 2,60 \text{ ტ/მ}^3$		
$M, \text{ ტ}$	0,21	1,64	$M, \text{ ტ}$	0,21	1,70
$H, \text{ მ}$	0,75	1,50	$H_1, \text{ მ}$	0,97	2,11
$S, \text{ მ}$	0,22	0,44	$H_2, \text{ მ}$	0,61	1,33
$V, \text{ მ}^3$	0,08	0,63	$S, \text{ მ}$	0,18	0,39
			$V, \text{ მ}^3$	0,064	0,65
<p>მოდულიზებული ჰექსაბლოკი</p>			<p>მოდულიზებული ტეტრაბლოკი</p>		

ბ)

ტეტრაპოდი, $\rho = 2,60 \text{ ტ/მ}^3$		
$M, \text{ მ}$	1,00	6,00
$H, \text{ მ}$	1,30	2,30
$d, \text{ მ}$	0,30	0,60
$D, \text{ მ}$	0,50	1,01
$S, \text{ მ}$	0,60	1,10
$b_1, \text{ მ}$	1,07	1,95
$b_2, \text{ მ}$	0,75	1,40
$\text{tg}\alpha$	0,22	0,22

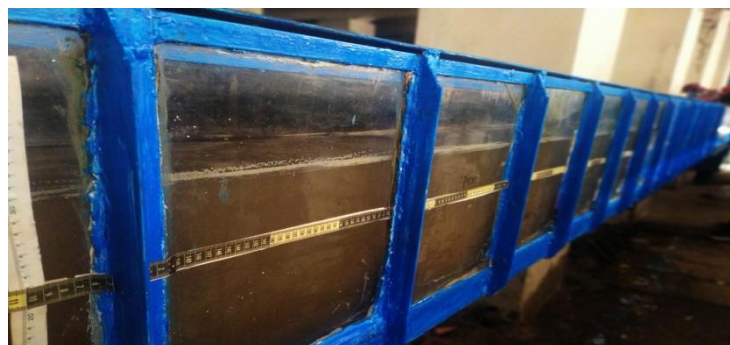
დიპოდი, $\rho = 2,60 \text{ ტ/მ}^3$		
$M, \text{ მ}$	1,00	6,00
$H, \text{ მ}$	1,20	2,20
$b_1, \text{ მ}$	0,41	0,76
$b_2, \text{ მ}$	0,26	0,48
$h, \text{ მ}$	0,75	1,40
$h_2, \text{ მ}$	0,28	1,52
$h_3, \text{ მ}$	0,45	0,82
$L_4, \text{ მ}$	0,57	1,04

დოლოსი, $\rho = 2,60 \text{ ტ/მ}^3$		
$M, \text{ მ}$	1,00	6,00
$H, \text{ მ}$	1,38	2,50
$b_1, \text{ მ}$	0,43	0,80
$b_2, \text{ მ}$	0,28	0,51
$b_3, \text{ მ}$	0,11	0,81
$h, \text{ მ}$	0,18	0,33
$h_2, \text{ მ}$	0,27	0,49
$d, \text{ მ}$	0,30	0,55



ნახ. VIII.3.4. ფიგურული მასივების: ა) „მოდიფიცირებული ჰექსაბლოკის“, „მოდიფიცირებული ტეტრაბლოკის“, ბ) „ტეტრაპოდის“, „დიპოდის“ და „დოლოსის“ სქემები და მათი მახასიათებლები (ρ – ბეტონის სიმკვრივე, ტ/მ³)

ფერდზე „მოდიფიცირებული ტეტრაბლოკისა“ და „მოდიფიცირებული ჰექსაბლოკის“ ნაყარის ყველაზე ეფექტური ზომებისა და ფორმის ეფექტურობის დასადგენად საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის არსებულ ჰიდრავლიკურ ღარში ჩატარდა ტალღური დატვირთვისა და ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლის სიდიდის ($h_{run up}$) დასადგენად ლაბორატორიული კვლევები (ფოტო VIII.3.5).



ფოტო VIII.3.5. ჰიდრავლიკური ღარის საერთო ხედი (10,0x0,3x0,7 მ)

ფერდზე „მოდფიცირებული ჰექსაბლოკებით“ ნაყარის ზედა საზღვრის პროგნოზირება ხორციელდება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$h_{run\ up,max\ (მოდ.ჰექს.)} = k_{(მოდ.ჰექს.)} \cdot k_w \cdot k_{run\ up(გლ.)} \cdot h_1\%, \quad (VIII.3.1)$$

სადაც $k_{(მოდ.ჰექს.)} = 0,60$ „მოდფიცირებული ჰექსაბლოკებით“ გამაგრებული ფერდის ხორკლიანობის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დადგენილია **ლაბორატორიული კვლევების** საფუძველზე. მისი მნიშვნელობა მიღებულია „მოდფიცირებული ჰექსაბლოკებით“ გამაგრებულ ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლის ($h_{run\ up-მოდ.ჰექს.}$) გაყოფით გლუვ ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლეზე ($h_{run\ up-გლ.}$) -

$$k_{(მოდ.ჰექს.)} = \frac{h_{run\ up\ მოდ.ჰექს.}}{h_{run\ up\ გლ.}} = 0,60 \quad (ფოტო\ VIII.3.6); \quad k_w = 1,5 - \text{კოეფიციენტი, მისი მნიშვნე-}$$

ლობა სამშენებლო ნორმატივების მიხედვით დამოკიდებულია ქარის სიჩქარესა და ფერდის დახრილობაზე; $k_{run\ up(გლ.)}$ - კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია გლუვ ფერდზე ტალღის დამრეცობასა (λ/h) და ფერდის დახრილობაზე (α°). მაშინ ($h_{run\ up-მოდ.ჰექს.}) = 0,60 \cdot 1,5 \cdot 10,0 = 0,90$ მ.



ფოტო VIII.3.6. „მოდფიცირებული ჰექსაბლოკების“ მოდელი



ფოტო VIII.3.7. „მოდფიცირებული ჰექსაბლოკებით“ ფერდზე ნაყარის ტალღაჩამქრობი ეფექტურობის კვლევა ჰიდრაულიკურ მცირე ღარში (10,0x0,3x0,70 მ)

ფერდზე „მოდირებული ტეტრაბლოკებით“ ნაყარის ზედა საზღვრის ანგარიში იდენტურია „ჰექსაბლოკის“ ანგარიშისა. ლაბორატორიული კვლევების საფუძველზე „ტეტრაბლოკებით“ ნაყარი ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლე იქნება:

$$h_{\text{run up მოდ.ტეტრ.}} = 0,55 \cdot 1,5 \cdot 0,1 \cdot 10,0 = 0,83 \text{ მ,}$$

ანუ „მოდირებული ტეტრაბლოკებით“ გამაგრებულ ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლე 0,07 მ-ით (8%-ით) ნაკლებია „ჰექსაბლოკებით“ გამაგრებულ ფერდზე (ფოტო VIII.3.8; VIII.3.9; ნახ. VIII.3.6).



ფოტო VIII.3.8. „მოდირებული ტეტრაბლოკების“ მოდელი

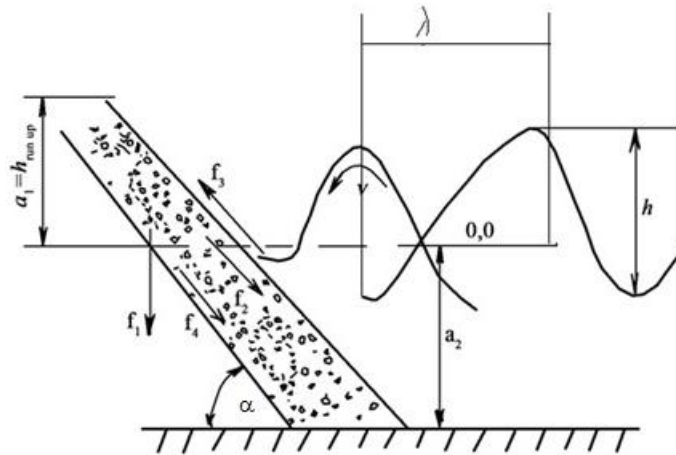


ფოტო VIII.3.9. „მოდირებული ტეტრაბლოკების“ ფერდზე ნაყარის ტალღაჩამქრობი ეფექტურობის კვლევა ჰიდრაულიკურ მცირე ღარში (10,0x0,3x0,70მ)

ბლოკის ოპტიმალური მასა (M) ჩაიწერება უნივერსალური დამოკიდებულების სახით [Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосროшвили Е.З., Джавахишвили Л.Г., 2010]:

$$M = \frac{0.0165 \rho_m h_{1\%}^3}{(\rho_m - \rho)^3 \operatorname{ctg} \alpha} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{1\%}}{h_{1\%}}}, \quad (\text{VIII.3.2})$$

სადაც 0,0165 არის უნივერსალური კოეფიციენტის მნიშვნელობა, რომელიც დამოკიდებულია ბლოკების სიმკვრივეზე; ρ_m, ρ – ბლოკებისა და წყლის სიმკვრივე; $h_{1\%}, \lambda_{1\%}$ – ერთპროცენტიანი უზრუნველყოფის ტალღის სიმაღლე და სიგრძე; α – ფერდის დახრილობის კუთხე (ნახ.VIII.3.5).



ნახ. VIII.3.5. „მოდულირებული ტეტრაბლოკებით“ და „ჰექსაბლოკებით“ შექმნილი კონსტრუქციის მდგრადობის განმსაზღვრელი ფაქტორების სქემა

ცხრილსა (VIII.3.1) და ნახაზზე (VIII.3.6) მოყვანილია სხვადასხვა ტიპის (დოლოსი, ტეტრაპოდი, ტრიბარი, სტაბიტი, „მოდულირებული ჰექსაბლოკი“ და „ტეტრაბლოკი“) მასივების ფაქტორივი და საანგარიშო ოპტიმალური მასის მნიშვნელობები.

ცხრილი VIII.3.1

ფასონური ბლოკების ოპტიმალური მასის (M) მნიშვნელობები

№	ადგილმდებარეობა/ ბლოკების ტიპი	ფაქტორივი მნიშვნელობები							საანგარიშო მნიშვნელობები, M, ტ
		d, მ	h%, მ	λ%, მ	$\sqrt{\frac{\lambda_{1\%}}{h_{1\%}}}$	ctg α	M, ტ	საშმ. ნორმები M, ტ	ფ-ლა (VIII.3.2) M, ტ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	გუმბოლტი (აშშ)/ დოლოსი	14,0	12,2	244	4,47	4,0	43,0	31	41
2	რიჩარდ ბეი (არაბეთი)/ დოლოსი	17,9	9,0	134	3,86	2,0	30,0	29	29
3	ჰეი-პოინტი (ავსტრალია)/ დოლოსი	10,0	6,1	90	3,84	2,0	10,0	9	9
4	მინა-რაისუნი (ომანი)/ დოლოსი	13,0	7,0	140	4,47	1,5	20,0	22	21

ცხრილი VIII.3.1-ის გაგრძელება

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	ჰანს ბეი (სამხრ. არაბეთი)/ დოლოსი	11,8	6,0	153	5,05	1,5	13,5	16	15
6	ტეიბლ ბეი (სამხრ. არაბეთი)/ დოლოსი	8,8	4,5	130	5,38	1,5	6,0	7	7
7	კრიშენტ-სიტი (აშშ)/ ტეტრაპოდი						25,0	22	24
8	ჰავაი/ ტრიბარი						17,8	16	17
9	ინგლისი/ სტაბიტი						25,0	23	24
10	საქართველო/ „მოდულიზირებული ჰექსაბლოკი“	2,3	6,9	69	3,16	3,0		8,0	4,6
11	საქართველო/ „მოდულიზირებული ტეტრაბლოკი“	2,3	6,9	69	3,16	3,0		7,8	4,4

ლაბორატორიულ პირობებში „მოდულიზირებული ჰექსაბლოკებისა“ და „მოდულიზირებული ტეტრაბლოკების“ გამოკვლევისათვის საჭიროა მსგავსების მექანიკური კანონის გამოყენება, რომელიც გულისხმობს გეომეტრიული, კინემატიკური და დინამიკური მსგავსების შენარჩუნებას ზღვრული და საწყისი პირობების დაცვით.

ტალღების „მოდულიზირებული ჰექსაბლოკებითა“ და „მოდულიზირებული ტეტრაბლოკებით“ ნაყარის ურთიერთგამოდების, ფერდზე წონასწორობისა და ტალღების ენერჯის ჩახშობის ლაბორატორიული კვლევებისა და შესაბამისი ნატურული მონაცემების ანალიზი მოყვანილია ცხრილსა (VIII.3.2) და ნახაზზე (VIII.3.6).

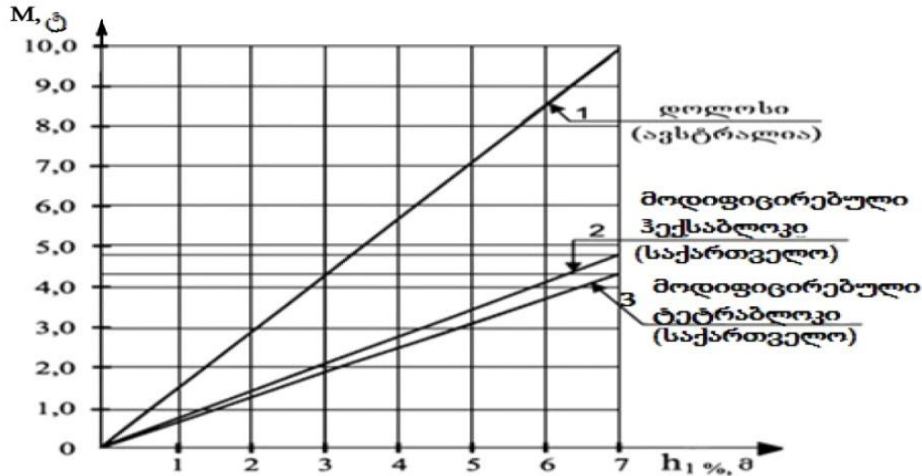
„მოდულიზირებული ტეტრაბლოკისა“ და „ჰექსაბლოკის“ ოპტიმალური მასის ანგარიში ტარდება სტაბილიზებადი და გამომწვევი ფაქტორების საფუძველზე, მსგავსების თეორიის გამოყენებით. ანგარიში ხდება მიღებული განმსაზღვრელი პარამეტრების გათვალისწინებით, ესენია: M – „მოდულიზირებული ბლოკების“ მასა (ტ); ρ_m – „მოდულიზირებული ბლოკის“ მასალის სიმკვრივე (ტ/მ³); α – ფერდის დახრილობის კუთხე (გრადუსებში); h – ტალღის სიმაღლე (მ); λ – ტალღის სიგრძე (მ); θ – ტალღების ნაპირთან მოსვლის კუთხე (რადიანებში); ρ – წყლის სიმკვრივე; g – თავისუფალი ვარდნის აჩქარება; μ – წყლის კინემატიკური სიბლანტე (ნახ. VIII.3.6).

ცხრილი VIII.3.2

მოდულიზირებული „ჰექსაბლოკის“ საანგარიშო მახასიათებლების მნიშვნელობები ნატურასა და მოდელზე (მცირე ღარისთვის 10,0×0,3×0,7 მ; $a_{L1}=30$)

$h_{ნატ,მ}/h_{მოდ,მ}$	5,00/0,16	5,70/0,19	6,90/0,23	7,50/0,25	8,10/0,27	8,40/0,28	9,00/0,30
$P_{ნატ,ტ}/P_{მოდ,კვ}$	1,70/0,06	2,10/0,08	4,50/0,17	5,50/0,21	7,10/0,26	7,80/0,29	8,00/0,30
$M_{ნატ,ტ}/M_{მოდ,კვ}$	1,80/0,07	2,20/0,08	4,60/0,17	5,90/0,22	7,40/0,27	8,00/0,30	8,30/0,31
$d_{ნატ,მ}/d_{მოდ,მ}$	0,40/0,01	0,45/0,015	0,55/0,018	0,60/0,02	0,65/0,022	0,68/0,023	0,73/0,024
$S_{ნატ,მ}/S_{მოდ,მ}$	0,52/0,017	0,63/0,021	0,75/0,025	0,83/0,028	0,90/0,031	0,95/0,032	1,0/0,033
$\xi_{ნატ,მ}/\xi_{მოდ,მ}$	1,69/0,05	1,90/0,06	2,30/0,075	2,50/0,08	2,70/0,09	2,80/0,09	3,00/0,10

სადაც $h_{ნატ.}$, $h_{მოდ.}$ ტალღის სიმაღლეა, შესაბამისად, ნატურასა და მოდელზე; $P_{ნატ.}$, $P_{მოდ.}$ – წყლის წნევა მოდიფიცირებულ ბლოკებზე; $M_{ნატ.}$, $M_{მოდ.}$ – მოდიფიცირებული ბლოკების მასა; $d_{ნატ.}$, $d_{მოდ.}$ – მოდიფიცირებული ბლოკების სიგრძე; $S_{ნატ.}$, $S_{მოდ.}$ – მოდიფიცირებული ბლოკების სიგანე; $l_{ნატ.}$, $l_{მოდ.}$ – მოდიფიცირებულ ბლოკების შვერილების სიგანე.



ნახ. VIII.3.6. ბლოკების მდგრადობის გაანგარიშებული მასის (M) დამოკიდებულება ტალღის 1% - უზრუნველყოფის სიმაღლესთან ($h\%$)

ტალღების მსხვერვის (ჩამოქცევის) ზონამდე (სადაც პროცესი მიმდინარეობს ავტომოდელურ ზონაში), ჰიდროდინამიკური და ფიზიკური ლაბორატორიული მახასიათებლების ნატურაში გაანგარიშება ხორციელდება მოდელირების წირითი მასშტაბისა და ფრუდის კრიტერიუმის (Fr) გამოყენებით, რომელიც ითვალისწინებს სიმძიმის (გრავიტაციული) ძალების იდენტურობას ($a_L = L_{ნატ.}/L_{მოდ.}$). ტალღების ჩამოქცევის ზონის შემდეგ (სადაც ავტომოდელირება აღარ სრულდება), ტალღის ფერდზე აგორების სიმაღლე და ფერდზე ტალღური წნევის ანგარიში ტარდება მასშტაბური შემასწორებელი კოეფიციენტის ($K=0,75$) გათვალისწინებით (ცხრ. VIII.3.3).

ჩატარებულმა კვლევებმა გვიჩვენა, რომ შემოთავაზებული ფიგურული მასივებით გამაგრებულ ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლე 40%-ით ნაკლებია.

ცხრილი VIII.3.3

„მოდიფიცირებული ჰექსაბლოკისა“ და „ტეტრაბლოკის“ ჰიდროდინამიკური ნატურული მახასიათებლების ლაბორატორიულში გადაანგარიშება

(ფრუდის კრიტერიუმის გამოყენებით $F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}}$, $g = idem$, $p = idem$)

ფიზიკური სიდიდეები	მასშტაბური ხაზობრივი მამრავლი $a_L = L_{ნატ.}/L_{მოდ.}$	მოდელური სიდიდეები ტალღების მსხვერვის ზონამდე	მოდელური სიდიდეები ტალღების მსხვერვის ზონაში მასშტაბური კოეფიციენტის $K = 0,75$ გათვალისწინებით
1	2	3	4
წირითი ზომები			
h (ტალღის სიმაღლე), მ	$a_h = a_L = h_{ნატ.}/h_{მოდ.}$	$h_{მოდ.} = h_{ნატ.}/a_L$	$h_{მოდ.} = h_{ნატ.}/a_L$
λ (ტალღის სიგრძე), მ	$a_\lambda = a_L = \lambda_{ნატ.}/\lambda_{მოდ.}$	$\lambda_{მოდ.} = \lambda_{ნატ.}/a_L$	$\lambda_{მოდ.} = \lambda_{ნატ.}/a_L$

ცხრილი VIII.3.3 (გაგრძელება)

1	2	3	4
H_f (წყლის სიღრმე), მ	$a_f = a_L = H_{6.აბ.წ} / H_{მოღ.წ}$	$H_{მოღ.წ} = H_{6.აბ.წ} / a_L$	$H_{მოღ.წ} = H_{6.აბ.წ} / a_L$
$l = 3,0 \cdot S^*$ (ჰექსაბლოკის სიმაღლე), მ	$a_l = a_L = l_{6.აბ} / l_{მოღ}$	$l_{მოღ} = l_{6.აბ} / a_L$	$l_{მოღ} = l_{6.აბ} / a_L$
Ω (ფართობი), მ ²	$a_\Omega = a_L^2$	$\omega_{მოღ} = \omega_{6.აბ} / a_L^2$	$\omega_{მოღ} = \omega_{6.აბ} / a_L^2$
W (მოცულობა), მ ³	$a_W = a_L^3$	$W_{მოღ} = W_{6.აბ} / a_L^3$	$W_{მოღ} = W_{6.აბ} / a_L^3$
$h_{run up}$ (ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლე), მ	$a_{run up} = a_L$	$h_{run up მოღ} = h_{run up 6.აბ} / a_L$	$h_{run up მოღ} = h_{run up 6.აბ} / a_L$
t (დრო, პერიოდი), წმ	$a_t = a_L^{1/2}$	$t_{მოღ} = t_{6.აბ} / \sqrt{a_L}$	$t_{მოღ} = t_{6.აბ} / \sqrt{a_L}$
V წირითი სიჩქარე), მ/წმ	$a_V = a_L^{1/2}$	$V_{მოღ} = V_{6.აბ} / \sqrt{a_L}$	$V_{მოღ} = V_{6.აბ} / \sqrt{a_L}$
α° (ფერდის დახრილობის კუთხე), გრადუსი	$a_\alpha = 1$	$\alpha_{მოღ} = \alpha_{6.აბ}$	$\alpha_{მოღ} = \alpha_{6.აბ}$
M (მასა), ტ	$a_M = a_L^3$	$M_{მოღ} = M_{6.აბ} / a_L^3$	$M_{მოღ} = M_{6.აბ} / a_L^3$
F (ძალა), ტ (მ)	$a_F = a_L^3$	$F_{მოღ} = F_{6.აბ} / a_L^3$	$F_{მოღ} = F_{6.აბ} / a_L^3$
$E_{გამჭ.}$ (გამჭოლიანობა)	$A_{გამჭ.} = 1$	$E_{გამჭ. მოღ} = E_{გამჭ. 6.აბ}$	$E_{გამჭ. მოღ} = E_{გამჭ. 6.აბ}$
P (წნევა), ტ/მ ²	$a_P = a_L$	$P_{მოღ} = P_{6.აბ} / a_L$	$P_{მოღ} = P_{6.აბ} / a_L$

სადაც $l = 3,0 \cdot S^*$ არის „მოდულიზებული ჰექსაბლოკის“ და „ტეტრაბლოკის“ ყველაზე ეფექტური ზომა, რომელიც განპირობებულია მათი მაღალი ტალღაჩამქრობი ეფექტით, ფერდზე მდგრადობისა და მათი მშენებლობის ტექნოლოგიის სიმარტივით.

ნაპირსამაგრი – ქვაყრილის სახით

მთის წყალსაცავების ფერდობების გამაგრების ერთ-ერთ საიმედო და ხელსაყრელ საშუალებას წარმოადგენს მათზე ქვაყრილის მოწყობა [Варазашვილი Н.Г., Иордანიшვილი И.К., 1985]. ნაყარში ქვის დიამეტრის შერჩევა ხორციელდება დეტერმინებული გამოსახულებებით, რომლებიც ითვალისწინებენ შემდეგ გასაშუალებულ ფაქტორებსა და პარამეტრებს: ნაკადის სიჩქარეს (V), წყალსაცავის ფერდობის დახრილობას ($m = ctg\alpha$), ტალღის სიმაღლეს (h) და სიგრძეს (λ), ქვის და წყლის სიმკვრივეს ($\rho_{\text{ქ}}$, $\rho_{\text{წყ}}$).

ტალღის ზემოქმედებისას ქვის ნაყარის მდგრადობის შეფასება გულისხმობს გარე ზემოქმედებისა (\bar{t}) და რეაქციული (\bar{R}) ძალების გამოსახულებას, რომელსაც შემდეგი სახე აქვს:

$$\frac{\bar{t}}{n} \leq \bar{R}, \tag{VIII.3.3}$$

სადაც n მუშაობის პირობების კოეფიციენტია.

მთის წყალსაცავების სპეციფიკურობიდან გამომდინარე, ფორმულაში (VIII.3.3) გათვალისწინებულია შემდეგი დამატებითი პირობები:

1. ქვას აქვს სფეროს ფორმა და მასზე მოქმედებს ორი სახის – ნაპირისაკენ მგორავი (ნ.მ.) და უკან დამაბრუნებელი (უ.დ.) ტალღური ნაკადი;
2. ქვის მდგრადობა განიხილება ორი მდებარეობისათვის, როდესაც ქვა ფერდიდან ამოწეულია შესაბამისად დიამეტრის 0,93 და 0,74 ნაწილით (ნახ. VIII.3.7, ა, ბ);

3. წყნარი ჰორიზონტის ზონაში ტალღის მაქსიმალური სიჩქარეები იანგარიშება [ვარაშვილი ნ.გ., იორდანიშვილი ი.კ., 1983]-ს მიხედვით;

4. მხები ძაბვის ხახუნის კოეფიციენტი $f_x = 0.12$ [Harti I., 1978].

ზემოთ მოყვანილ ფაქტორთა მხედველობაში მიღებით, ფერდზე ქვის მდგრადობის განტოლება შემდეგნაირად გამოისახება:

$$a) 0.076 \frac{1}{n} \rho_{\varphi} V_{6.ა}^2 \cdot (0.44m - 0.03) \leq D(\rho_j - \rho_{\varphi})(m + 1.7) \quad (VIII.3.4)$$

$$b) 0.076 \frac{1}{n} \rho_{\varphi} V_{6.ა}^2 \cdot (0.38m - 0.26) \leq D(\rho_j - \rho_{\varphi})(m + 1.7) \quad (VIII.3.5)$$

აღნიშნული უტოლობით შეიძლება გამოითვალოს ქვის დიამეტრის ზღვრული მნიშვნელობები:

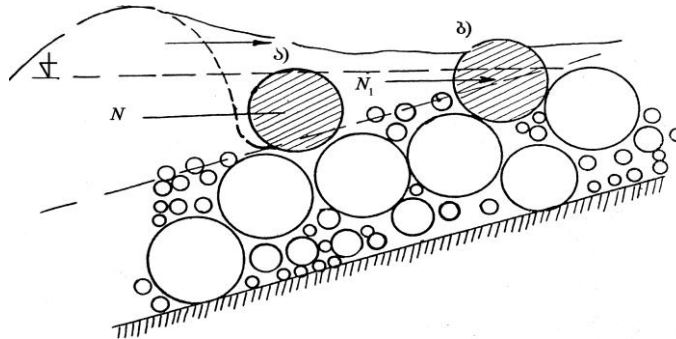
ა - სქემისათვის –
$$D = 0.076 \frac{1}{n} V_{6.ა}^2 \cdot \frac{\rho_{\varphi}}{\rho_j - \rho_{\varphi}} \cdot \frac{0.44m - 0.03}{m + 1.7}, \quad (VIII.3.6)$$

ბ - სქემისათვის –
$$D = 0.076 \frac{1}{n} V_{6.ა}^2 \cdot \frac{\rho_{\varphi}}{\rho_j - \rho_{\varphi}} \cdot \frac{0.38m - 0.26}{m + 1.7}, \quad (VIII.3.7)$$

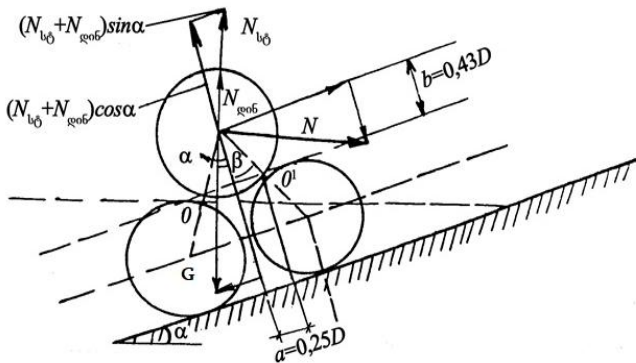
სადაც $V_{6.ა}$ არის ნაპირისაკენ მგორავი ტალღის სიჩქარე და გამოიანგარიშება დამოკიდებულებით:

$$V_{6.ა} = 1.34 \left[1.1 + 1.25h + 1.25h^2 \right] \cdot \left[0.9 + 8.78 \frac{1}{m} - 15.69 \left(\frac{1}{m} \right)^2 \right] \cdot \left[0.65 + 0.28 \frac{\lambda}{h} - 0.01 \left(\frac{\lambda}{h} \right)^2 \right] \quad (VIII.3.8)$$

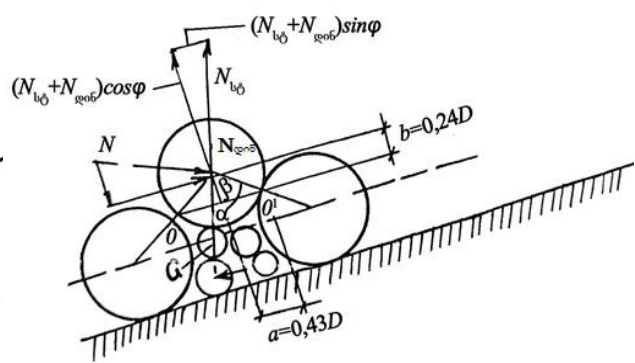
ა)



ბ)



გ)



ნახ. VIII.3.7. ქვის ნაყარის მდგრადობის სქემა ტალღის ნაპირისაკენ აგორებისას.

ქვა ამოწეულია: ა) $b=0.93D$; ბ) $b=0.74D$, სადაც N , $N_{ფრ}$, $N_{სტ}$, G – ჰიდროდინამიკური, ჰიდროსტატიკური და გრავიტაციული ძალებია.

უკან დაბრუნებული ტალღის შემთხვევაში - ქვის დიამეტრი განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$D = 0.05 \frac{1}{n} V_{\text{უფ}}^2 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f - \rho_s} \cdot \frac{m+2}{2m-1}, \quad (\text{VIII.3.9})$$

სადაც $V_{\text{უფ}} = \frac{V_{6.0}}{3}$.

ზემოთ მოყვანილი მეთოდით გაანგარიშებული ქვის დიამეტრის ზღვრული მნიშვნელობები ემთხვევა ლაბორატორიული და ნატურული გამოკვლევების შედეგებს.

VIII.4. მთის წყალსაცავების სანაპირო ზოლისა (ს. ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) განსაზღვრის მეთოდიკა

VIII.4.1. წყალსაცავების სანაპირო ზოლისა (ს. ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) სიგანის განსაზღვრის ზოგადი პრინციპები

წყალდამცავი სანაპირო ზოლის (ს. ზოლ.) შიდა საზღვარია წყალსაცავის შეტბორვის დონე, ხოლო გარე – ინიშნება ნაპირის 50-წლიანი გადამუმავების გათვალისწინებით:

$$L_{\text{ს.ზოლ}} \geq 50,0 \text{ მ} \quad (\text{VIII.4.1})$$

წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) გაბარიტები ინიშნება ბიოგენური დატვირთვის მოცულობისა და ბუნებრივი ფილტრების შთანთქმის გათვალისწინებით.

წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) სიგანე ($L_{\text{წ.ზონ}}$) ინიშნება წყალსაცავის ფორსირებული დონის ნიშნულიდან და ბიოგენური დატვირთვის სრული შეკავებით იგი იანგარიშება ფორმულით [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2010]:

$$L_{\text{წ.ზონ}} = L_{\text{ს.ზოლ}} + L_0 \cdot \lambda_{\text{ფ}} \cdot K_{\text{ტყ}} \cdot K_{\text{ნიად}} \cdot K_{\text{გ}} \cdot K_{\text{ხორ}}, \quad (\text{VIII.4.2})$$

სადაც $L_{\text{ს.ზოლ}} = 50,0$ მ არის წყალსაცავის სანაპირო ზოლის სიგანე; L_0 – მთის წყალსაცავების წყალდამცავი ზონის ეტალონის სიგანე, რომლის მნიშვნელობა $L_0 = 300,0$ მ (ფერდის დახრილობა – 5°-მდე), $L_0 = 280,0$ მ (ფერდის დახრილობა – 5°-12°-მდე), $L_0 = 260,0$ მ (ფერდის დახრილობა – 12°-18°-მდე); $L_0 = 240,0$ მ (ფერდის დახრილობა – 18°-25°-მდე), $L_0 = 220,0$ მ (ფერდის დახრილობა > 25°). (აღსანიშნავია, რომ ვაკის ტიპის წყალსაცავებისათვის, რომელთა ფერდის დახრილობა 5°-ზე ნაკლებია – $L_0 > 500$ მ); $\lambda_{\text{ფ}}$ – ფერდობული საშუალო წლიური ჩამონადენის საანგარიშო მნიშვნელობის გაანგარიშების კოეფიციენტი ($\lambda_{\text{ფ}} = 0,5 \div 2,0$); $K_{\text{ტყ}} = 0,85 \div 1,0$ – ფოთლოვანი ტყის და სხვა სახეობის ტყის კოეფიციენტი (ცხრ. VIII.4.1);

ცხრილი VIII.4.1

$K_{\text{ტყ}}$ -ის მნიშვნელობები

ტყის სახეობა	ფოთლოვანი	შერეული	წიწვოვანი
$K_{\text{ტყ}}$	1,0	0,92	0,85

$K_{\text{ნიად}} = 1,0 \div 2,0$ არის ფერდის ნიადაგის სახეობაზე დამოკიდებული კოეფიციენტი (ცხრ. VIII.4.2);

ცხრილი VIII.4.2

K_{ნაიღ}-ის მნიშვნელობები

ნაიდაგი	მჩატე ნაიდაგი	საშუალო ნაიდაგი	მძიმე ნაიდაგი
K _{ნაიღ}	1,0	1,5	2,0

K₉ არის ფერდის ექსპოზიციაზე დამოკიდებული კოეფიციენტი (ცხრ. VIII.4.3):

ცხრილი VIII.4.3

K₉-ს მნიშვნელობები

ფერდის ექსპოზიცია	ჩრდ.-აღმ. და დასავლეთი	სამხ.-აღმ. და ჩრდ.-დას.	სამხრეთი და სამხ.-დას
K ₉	1,0	0,8	1,2

K_{ხორ} – ფერდის ხორკლიანობის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია იმაზე, თუ როგორ არის მოხსნული ფერდი – განივი, გასწვრივ მოხსნულობით თუ საძოვრების გამოყენებით (ცხრ. VIII.4.4):

ცხრილი VIII.4.4

K_{ხორ}-ის მნიშვნელობები

K _{ხორ}	ფერდის განივი მოხსნულობისას ან საძოვრების გამოყენებისას	ფერდის გასწვრივ მოხსნულობისას
	1,6	2,6

VIII.4.2. წყალსაცავზე ფოსფორის დატვირთვის სიდიდის განსაზღვრის ზოგადი პრინციპები

ფერდობებიდან ჩამოდინებული ფოსფორის რაოდენობა დამოკიდებულია წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) სიგანეზე. ფოსფორის წყაროებია: მინერალური და ორგანული სასუქი, ნაკელი და დასახლებული პუნქტების ყოფითი ჩამონადენი. წყალსაცავში ფერდებიდან გამოტანილი ფოსფორის ნორმატივები (W_ფ) მოყვანილია VIII.4.5 ცხრილში [ჰიგიენური..., 2001; Методические рекомендации..., 1988]:

ცხრილი VIII.4.5

ფოსფორის შესაძლო გამონატანის კუთრი რაოდენობა

დატვირთვის წყარო	გამონატანი, W _ფ , კუთრი (კგ/წელიწადში)
	ფოსფორი
მოსახლეობა (ერთი ადამიანის)	0,2773
სახნავი მიწები (1 ჰა)	1,0
სარწყავი მიწები (1 ჰა)	0,5
საქონელი (ერთი ერთეულის)	3,64
ფრინველი (ერთი ერთეულის)	0,0092
ღორი (ერთი ერთეულის)	45,0
ცხვარი (ერთი ერთეულის)	20

რუკებზე (M:5000÷10000) წყალსაცავის წყალშემკრები აუზის ფართობების (F) და ამ ფართობებზე გამოყენებული ცალკე სახეობების წყაროდან გამოტანილი ფოსფორის შესაძლო რაოდენობა იანგარიშება ფორმულით:

$$\sum W_{ფ.შესაძლო} = F \cdot W_{ფ.კუთრი}, \tag{VIII.4.3}$$

სადაც $W_{ფ.შესაძლო}$ არის ფოსფორის შესაძლო გამონატანის კუთრი რაოდენობა, F არის გამოყენებული აუზის ფართობი; ფოსფორის გამონატანის ფაქტობრივი ჯამური რაოდენობა ($\sum W_{ფ.ფაქტ.}$) განისაზღვრება ფორმულით:

$$\sum W_{ფ.ფაქტ.} = \sum W_{ფ.შესაძლო} - \sum W_{ფ.შთანქმ.}, \quad (VIII.4.4)$$

სადაც $\sum W_{ფ.შთანქმ.}$ არის ფოსფორის ჯამური რაოდენობა, რომელიც შთანთქმულია ბუნებრივი ფილტრებით (ტყე, სათიბი, ჭაობი). მისი რაოდენობა განისაზღვრება ფილტრის ნორმატიული მაჩვენებლებით (ცხრ. VIII.4.6):

ცხრილი VIII.4.6

ფოსფორის ბუნებრივი ფილტრებით შთანთქმის ($W_{ფ.შთანქმ.}$) მაჩვენებლების ნორმა

ბუნებრივი ფილტრის ტიპი	ბუნებრივი ფილტრით ფოსფორის შთანთქმის ნორმა, ტ/ჰა წელიწადში
ტყე	0,031
სათიბი	0,004
ჭაობი	0,18

ფოსფორის ნარჩენი მოცულობა ($\sum W_{ფ.ნარჩ.}$) განისაზღვრება ფოსფორის ფაქტობრივი დატვირთვის ($\sum W_{ფ.ფაქტ.}$) ფილტრებით შთანთქმული ფოსფორის რაოდენობის ($\sum W_{ფ.შთანქმ.}$) სხვაობით:

$$\sum W_{ფ.ნარჩ.} = \sum W_{ფ.ფაქტ.} - \sum W_{ფ.შთანქმ.}, \quad \text{ტ/წელიწადში.} \quad (VIII.4.5)$$

$\sum W_{ფ.ნარჩ.}$ მაჩვენებლის გამოყენებით შესაძლებელია წყალდამცავი ღონისძიებების „სიმძლავრის“ ბალებში განსაზღვრა ფერდის დახრილობის გათვალისწინებით (ცხრ. VIII.4.7):

ცხრილი VIII.4.7

წყალდამცავი ღონისძიებების „სიმძლავრე“ (ბალებში)

ფოსფორის წყაროები	ნარჩენი დატვირთვა	ფერდის დახრილობა, გრადუსი	ბალი
	ფოსფორი ტ/წელიწადი		
სელიტებური ტერიტორიები	< 2	< 5	2
		> 5	3-4
		> 10	5-6
სელიტებური ტერიტორიები	> 2	< 5	3
		> 5	4-5
		> 10	7
სახნავი მიწები	< 15	< 5	3
		> 5	4
		> 10	8
	> 15	< 5	4
		> 5	7
		> 10	8
სარწყავი მიწები	< 0,5	< 5	1
		> 5	1
		> 10	3-4
	> 0,5	< 5	2
		> 5	3
		> 10	4-6
ფერმები	< 30	< 5	4
		> 5	6
		> 10	8

იმ შემთხვევაში, თუ ფოსფორით დატვირთვის „სიმძლავრე“ ნაკლებია ნორმატივის ბალებზე, საჭიროა ფოსფორის ზედაპირული ჩამონადენის შემცირებისთვის ღონისძიებების ჩატარება – წყალდამცავი ზონის (წ.ზონ.) დანიშვნა, ხოლო დატვირთვის „სიმძლავრის“ 5 ბალზე მეტობის დროს საჭიროა სამეურნეო მოქმედებების ჩატარება.

წყალსაცავის წყალდამცავი ზონის (წ.ზონ.) ტერიტორიაზე სამეურნეო მოქმედებების ჩატარების ძირითადი პრინციპია - წყლის და მიწის რესურსების რაციონალური გამოყენება წყალსაცავის ექსპლუატაციის რეჟიმის გათვალისწინებით.

წყალსაცავების ბუნებრივი პირობების შესაბამისად გამოყოფილია სამეურნეო მოქმედებების ორი სარტყელი: პირველი – მკაცრი რეჟიმისა და მეორე – სამეურნეო შეზღუდული მოქმედებების.

წყალდამცავი ზონის (წ.ზონ.) ფარგლებში იკრძალება: მეცხოველეობის კომპლექსების, ქიმიკატები, სასუქებისა და წვადი-საპოხი მასალების საწყობების განთავსება; სხვადასხვა ნარჩენების დაყრა; ტყის გაკაფვა; მიწების მოხვნა ფერდის გასწვრივ; ზედაპირული გაუწმენდავი წყლების ჩაგდება წყალსაცავში; ავტოტრანსპორტის სადგომების მოწყობა.

VIII.4.3. სიონის წყალსაცავის სანაპირო ზოლისა (ს. ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) სიგანის განსაზღვრის მაგალითი

სიონის წყალსაცავისათვის სანაპირო ზოლისა (ს. ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) პარამეტრები განსაზღვრულია სანაპირო ტერიტორიის გამოყენების გათვალისწინებით – სახნავი სავარგულები, სათიბი და სელიტებური მონაკვეთები, ტყის მასივები და მეცხოველეობის ფერმები (ცხრ.VIII.4.8).

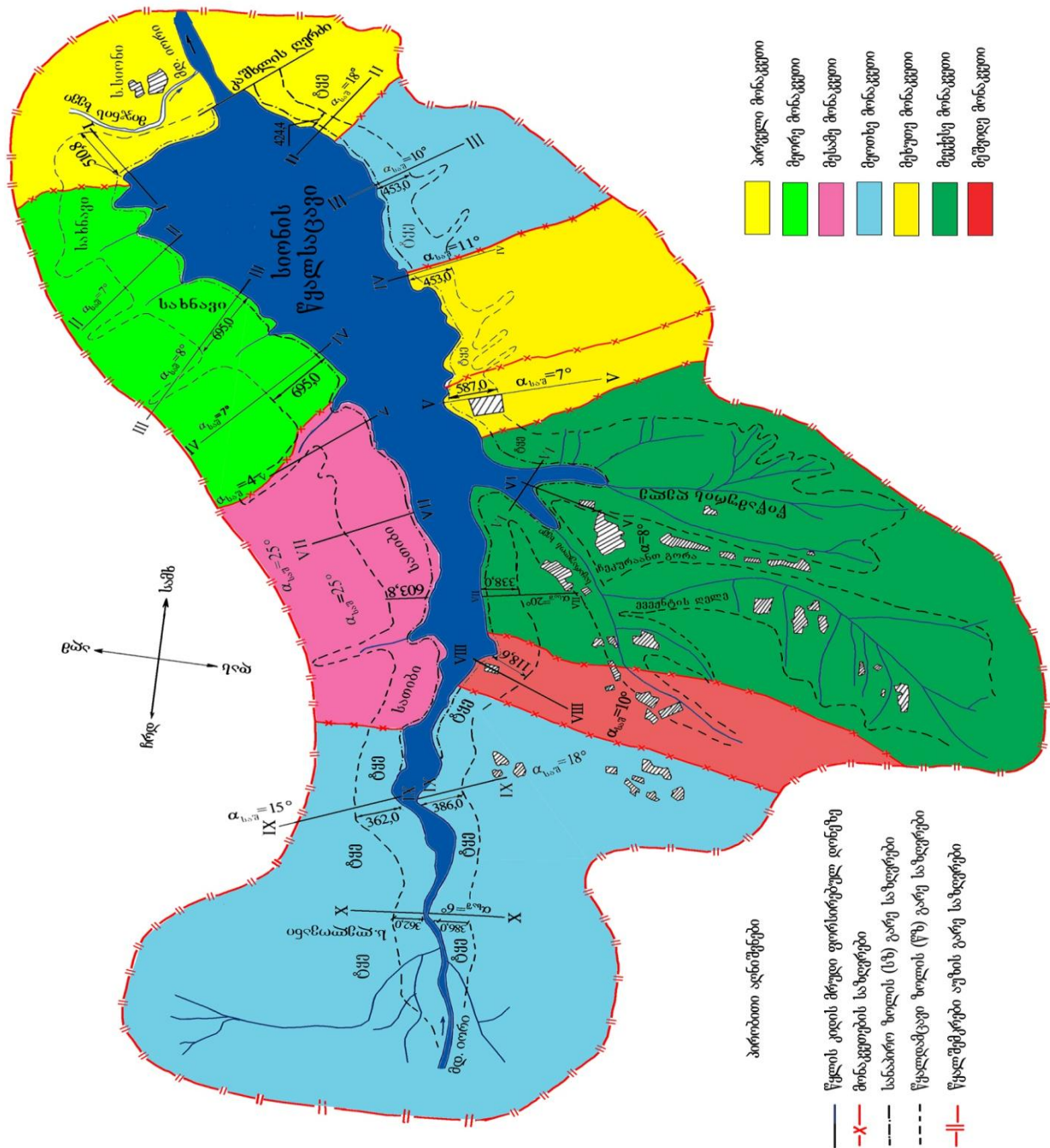
ცხრილი VIII.4.8

სიონის წყალსაცავის საანგარიშო მონაკვეთების ძირითადი მახასიათებლები

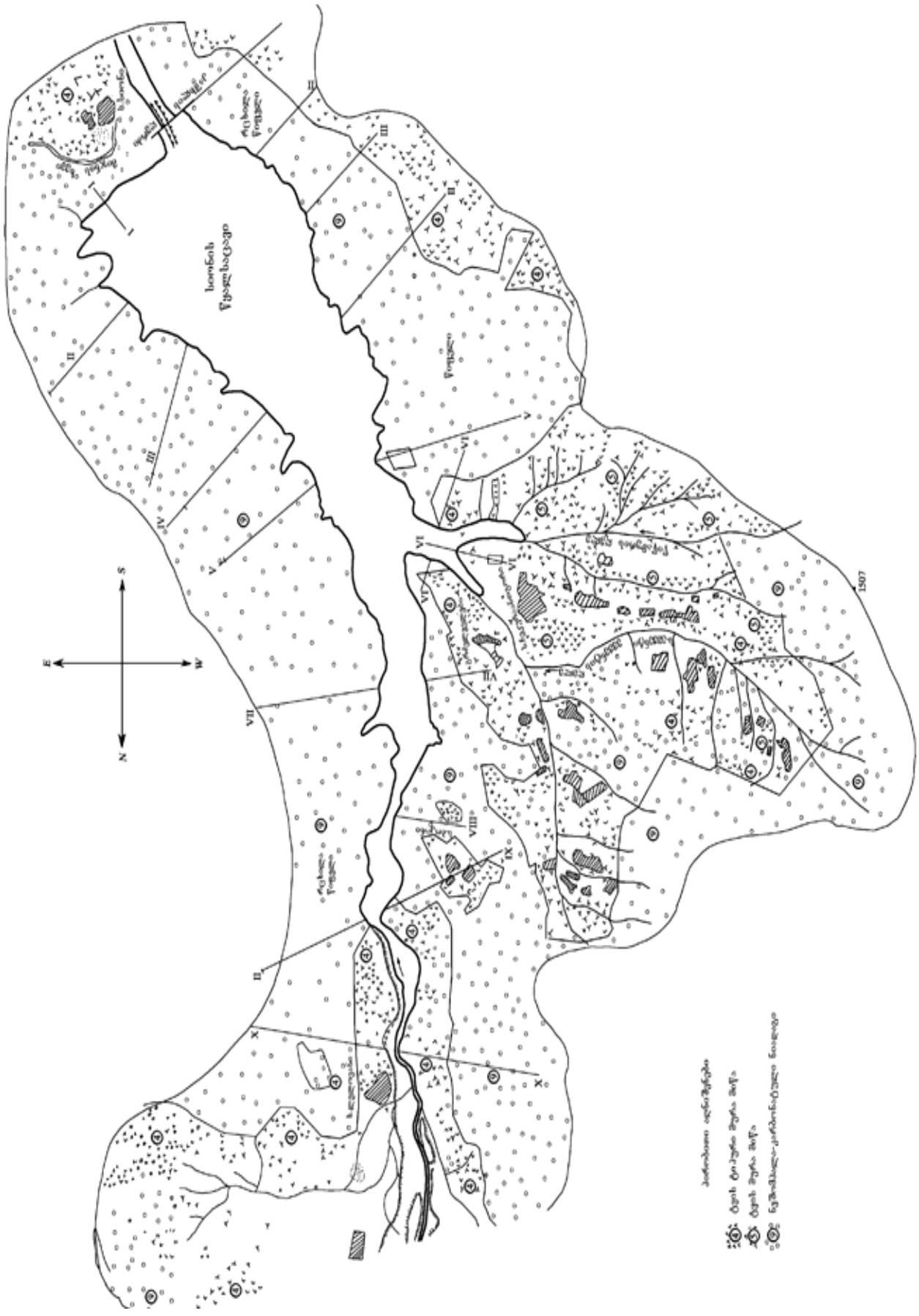
მონაკვეთების № (ნახ.VIII.4.1)	გამოყენების სახეობა	განლაგება	სიგრძე ±1068,0 მ ნიშნულზე, მ	საანგარიშო განივები	ფერდობის დახრილობა (გრადუსი)
პირველი	სელიტებური ტერიტორია (ს. სიონი)	მარცხენა	1750	I	4°
		მარჯვენა	1500	II	18°
მეორე	სახნავი	მარცხენა	5 000	(II,III,IV)	7°-8°
მესამე	სათიბები	მარცხენა	5 000	(V,VII,VIII)	15°-25°
მეოთხე	ტყის მასივები	მარცხენა	2 500	(IX)	15°
		მარცხენა	2 500	(X)	15°
		მარჯვენა	3 000	(IX)	18°
		მარჯვენა	3 000	(X)	6°
		მარჯვენა	5 000	(III,IV)	11°
მეხუთე	საქათმე	მარჯვენა	5 00	(V)	7°
მექვსე	სელიტებური ტერიტორია	მარჯვენა	6 500	(VI)	20°
მეშვიდე	საღორე	მარჯვენა	5 00	(VIII)	10°

წყალსაცავის სანაპირო ზოლის (ს. ზოლ.) შიდა საზღვარი წყალსაცავის ნორმალური შეტბორვის დონეა, ხოლო გარე – ინიშნება ფორსირებული შეტბორვის დონის ნაპირიდან 50 წლის მანძილზე გადამუშავების დონემდე (ხრამების გათვალისწინებით).

სიონის წყალსაცავის სანაპირო ზოლის (ს. ზოლ.) სიგანე ინიშნება წყალსაცავის დონის დატბორვის ზოლიდან, ანუ +1070,0 მ-დან. ანგარიშის შედეგები მოყვანილია ცხრილში VIII.4.9 (ნახ.VIII.4.1; VIII.4.2).



ნახ. VIII.4.1. სიონის წყალსაცავის წყალდამცავი ზონისა (წ.ზონ)-ს და სანაპირო ზოლის (ს. ზოლ.)-ს საზღვრები



ნახ. VIII.4.2. სიონის წყალსაცავის აუზის ნიადაგები

ცხრილი VIII.4.9

აზოტისა და ფოსფორის დატვირთვა სიონის წყალსაცავზე

ობიექტის დასახელება	რაოდენობითი მაჩვენებელი	გამონატანის ნორმატივი, კგ/წელ. (ერთეულზე)		საერთო გამონატანი, კგ/წელ.	
		აზოტი	ფოსფორი	აზოტი	ფოსფორი
1	2	3	4	5	6
სელიტური ტერიტორიები	156 ჰა	6,0	3,0	936,0	468,0
ყოფილი ჩამონადენი		0,355	0,277		
მოსახლეობა	2325 ადამიანი	0,265	0,207	616,13	481,27
საკურორტო სეზონი	3150 ადამიანი	0,09	0,07	283,6	220,5
სახნავი მიწები	239 ჰა	3,0	1,0	717,0	239,0
საქონელი	160 სული	0,26	3,64	41,6	582,0
ღორები	400 სული	–	45,0		18000,0
ქათამი	50000 ფრთა	0,092	0,0092	460,0	46,0
საერთო რაოდენობა წელიწადში				3054,2	20036,77

ბუნებრივი ფილტრებით (ზ ფ) შთანთქმული ბიოგენური ელემენტების რაოდენობის ანგარიშები მოყვანილია ცხრილში VIII.4.10.

ცხრილი VIII.4.10

სიონის წყალსაცავზე ბუნებრივი ფილტრებით შთანთქმული ბიოგენური ელემენტების რაოდენობა (ზ ფ)

ბიოგენური დატვირთვების წყარო		ბუნებრივი ფილტრის ფართობი, ჰა		შთანთქმის რაოდენობა ტ/ჰა/წელიწადში		ჯამური შთანთქმა, (ზ ფ), ტ/წელიწადში
		ტყე ჰა	მდელო ჰა	ტყე ტ/წელ.	მდელო ტ/წელ.	
ქათამი		0,80	0,75	0,0248	0,003	0,0278
ღორი		0,15	0,225	0,0047	0,0009	0,0056
საქონელი		1,0	2,50	0,031	0,01	0,041
სელიტური ტერიტორიები	ს. სიონი	2,0	9,50	0,062	0,38	0,442
	ს. ჩაკურიანთ გორი	10,9	14,5	0,319	0,058	0,377
სახნავი მიწები		–	17,5	–	0,07	0,07
სულ				0,4415	0,5219	0,9634

ბიოგენური ნარჩენი დატვირთვის (ბნ=ბდ–ბფ) ანგარიშის შედეგები მოყვანილია ცხრილში VIII.4.11, სადაც ბნ - ბიოგენური ნარჩენი დატვირთვაა; ბდ - ბიოგენური ჯამური დატვირთვაა; ბფ - ბუნებრივი ფილტრით შთანთქმული

ბიოგენური ელემენტების რაოდენობა. წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.) გაანგარიშებული სიგანე – მოყვანილია ცხრილში VIII.4.12 და ნახაზზე VIII.4.2.

ცხრილი VIII.4.11

სიონის წყალსაცავის ბიოგენური ნარჩენის დატვირთვის (ბნ) ანგარიში

დაბინძურების წყაროები	ბდ, ტ/ჰა წელიწადში		ბგ, ტ/ჰა წელიწადში	ბნ, ტ/ წელიწადში		ფერდის დახრილობა	ღონისძიებების სიმძლავრე (ბალებში)	
	ფოსფორი	სულ		ფოსფორი	საერთო		ფოსფორისგან	საერთო ბიოგენური დატვირთვისგან
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ქათამი	0,046	0,506	0,028	0,018	0,488	7°	7	8
ღორი	18,00	18,0	0,006	17,99	17,99	6°	6	8
საქონელი	0,582	0,623	0,041	0,541	0,582	8°	5	5
სელიტური ტერიტორიები								
ს. სიონი	0,439	1,001	0,442	შთაინ- თქმება	0,559	5°	–	2
ს. ჩაკურთანთ გორი	0,263	0,600	0,377	„-„	0,223	5°	–	3
სახნავი მიწები	0,239	0,954	0,07	0,169	0,886	7°	4	7
სულ	19,75	22,73	0,954	18,88	20,728	7°	–	–

ცხრილი VIII.4.12

სიონის წყალსაცავის წყალდამცავი ზონის (წ. ზონ.)

სიგანის ანგარიშის შედეგები

№	მონაკვეთის №	კვეთის №	სანაპირო ზოლის ეტალონის სიგანე, I,მ	საშუალო დახრილობა (გრადუსი)	ექსპოზიცია	კოეფიციენტები				წყალდამცავი ზონის Lწ.ზონ. სიგანე, მ
						K _{ფს} (ცხრ. VIII.4.1)	K _{ნაბ.} (ცხრ. VIII.4.2)	K _ფ (ცხრ. VIII.4.3)	K _{ბორ.} (1.6÷2.6)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	პირველი (მარცხენა)	I	300	4°	ჩდ	-	1,2	0,8	1,6	510,8
2	პირველი (მარჯვენა)	II	260	18°	ჩა	1,0	1,2	1,2	1,0	424,4
3	მეორე (მარცხენა)	II	980	7°	სდ	-	1,2	1,2	1,6	695,1
4	მეორე (მარცხენა)	III	280	8°	სდ	-	1,2	1,2	1,6	695,1
5	მეორე (მარცხენა)	IV	980	7°	სდ	-	1,2	1,2	1,6	695,1

ცხრილი VIII.4.12 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	მესამე (მარცხენა)	V	300	4 ^ე	სდ	-	1,2	1,2	1,6	689
7	მესამე (მარცხენა)	VII	260	18 ^ე	სდ	-	1,2	2,13 1,2	1,6	603,8
8	მეოთხე (მარცხენა)	IX	260	15 ^ე	დ	1,0	1,2	1,0	1,0	362,0
9	მეოთხე (მარცხენა)	X	260	15 ^ე	დ	1,0	1,2	1,0	1,0	362,0
10	მეოთხე (მარჯვენა)	IX	260	18 ^ე	ჩა	1,0	1,2	1,2	1,0	362,0
11	მეოთხე (მარჯვენა)	X	280	6 ^ე	აღმ	1,0	1,2	1,0	1,0	386,0
12	მეოთხე (მარჯვენა)	III	280	10 ^ე	ჩა	1,0	1,2	1,2	1,0	453,0
13	მეოთხე (მარჯვენა)	IV	280	11 ^ე	ჩა	1,0	1,2	1,2	1,0	453,0
14	მეხუთე (მარჯვენა)	V	280	7 ^ე	აღმ	1,0	1,2	1,0	1,6	587
15	მექვსე (მარჯვენა)	VI	280	8 ^ე	სა	1,0	1,2	0,8	1,6	480,1
16	მექვსე (მარჯვენა)	VII	240	20 ^ე	აღმ	1,0	1,2	1,0	1,0	338,0
17	მეშვიდე (მარჯვენა)	VIII	240	10 ^ე	სა	1,0	1,2	0,8	1,6	418,6

სანაპირო ზოლი, რომელიც ემიჯნება წყალსაცავს და რომლის სიგანეა 50,0 მ – მკაცრი რეჟიმის ზოლია. წყალდამცავ ზონაში უნდა აიკრძალოს: ახალი ობიექტების მშენებლობა; ნიადაგების შხამქიმიკატებით დამუშავება ქლორორგანული ნივთიერებების გამოყენებით; სასაფლაოების მოწყობა; სასაქონლო, მეღორეობისა და საქათმე ფერმების მოწყობა.

IX. ჰიდრავლიკური პროცესების მოდელირება და ექსპერიმენტების ჩატარების რაციონალიზაცია ღია ნაკადებზე

IX.1. ჰიდრავლიკური პროცესების მსგავსების თეორიის ძირითადი საფუძვლები ღია ნაკადებზე

ღია ნაკადებზე ჰიდრავლიკური პროცესების მოდელირებისათვის იყენებენ მათემატიკური და ფიზიკური მოდელირების მეთოდებს [Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н., Нетюхайло А.П., Шеренков И.А., Даденков В.Ю., Клешевникова Т.П., Железняк И.А., 1984].

ჰიდრავლიკური მოვლენის ან პროცესის მათემატიკური მოდელი იქმნება მექანიკის საერთო კანონების გამოყენების საფუძველზე – მოძრაობის, მასის და ენერჯის შენარჩუნებაზე. კლასიკური მექანიკის მეთოდების გამოყენებით შესაძლებელია პროცესებზე ან მოვლენებზე ინფორმაციის მიღება დიფერენციალური განტოლებების სახით. ამ შემთხვევაში ლაბორატორიული დანადგარის როლს ასრულებს კომპიუტერული ტექნიკა, რომელიც გამოთვლებს ასრულებს მოცემული პროგრამით.

ფიზიკურ მოდელირებას იყენებენ ლაბორატორიულ პირობებში ჰიდროდინამიკური პროცესების გამოკვლევისას, სადაც აუცილებელია მსგავსების მექანიკური კანონების – გეომეტრიული, კინემატიკური, დინამიკური მსგავსებისა და თანაბარი საწყისი პირობების შესრულება. ამ შემთხვევაში ჰიდრავლიკური პროცესების გამოკვლევა ტარდება ნატურული სიდიდეების შემცირებულ მოდელზე.

პროცესები **მექანიკურად მსგავსი** იქნება, თუ მათი გეომეტრიული ელემენტების – სიგრძის, მანძილის, სიმკვრივისა და ძალების თანაფარდობა ერთნაირია.

სრული ჰიდროდინამიკური მსგავსებისათვის საჭიროა ნაკადების **გეომეტრიული, კინემატიკური და დინამიკური მსგავსება**.

ნაკადები **გეომეტრიულად** მსგავსია, თუ მათი შესაბამისი გრძივის (L), ფართობისა და მოცულობის სიდიდეებს შორის არსებობს მუდმივი დამოკიდებულება: $L_{ნეტ.}/L_{მოლ.} = \alpha_L$, $\omega_{ნატ.}/\omega_{მოლ.} = \alpha_L^2$, $W_{ნატ.}/W_{მოლ.} = \alpha_L^3$, სადაც α_L – გრძივი მასშტაბია, რომელიც გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ მცირეა სამოდელო გრძივის სიდიდე ($L_{მოლ.}$) ნატურული გრძივის სიდიდეზე ($L_{ნატ.}$).

ორი ნაკადი **კინემატიკურად** მსგავსია, თუ ნაკადის სამოდელო ($V_{მოლ.}$) და ნატურული ($V_{ნატ.}$) სიჩქარეები სითხის წირების მსგავს წერტილებში დაკავშირებულია მასშტაბით (α_V):

$$\alpha_V = V_{ნატ.}/V_{მოლ.} \quad (IX.1.1)$$

ორი ნაკადი **დინამიკურად** მსგავსია, თუ ნაკადზე მოქმედი სამოდელო ($F_{მოლ.}$) და ნატურული ($F_{ნატ.}$) ძალები და სიმკვრივეები ($\rho_{მოლ.}$), ($\rho_{ნატ.}$) მსგავს წერტილებში დაკავშირებულია მასშტაბებით:

$$F_{მოლ.}/F_{ნატ.} = \alpha_F, \quad \rho_{მოლ.}/\rho_{ნატ.} = \alpha_\rho, \quad (IX.1.2)$$

სადაც α_F ძალური მასშტაბია, ხოლო α_ρ – სიმკვრივის მასშტაბი.

α_L , α_V , α_ρ და α_F მასშტაბებს შორის ასეთი დამოკიდებულებაა:

$$\alpha_F = \alpha_\rho \cdot \alpha_L^2 \cdot \alpha_V^2. \quad (\text{IX.1.3})$$

ეს დამოკიდებულება მასშტაბური მამრავლების ე.წ. ნიუტონის მსგავსების კანონითაა ცნობილი.

მასშტაბური მამრავლების ურთიერთდამოკიდებულება შეიძლება ჩაიწეროს ასეთი სახით:

$$\frac{F_{\text{ნაბ.}}}{\rho_{\text{ნაბ.}} \cdot L_{\text{ნაბ.}}^2 \cdot V_{\text{ნაბ.}}^2} = \frac{F_{\text{მოდ.}}}{\rho_{\text{მოდ.}} \cdot L_{\text{მოდ.}}^2 \cdot V_{\text{მოდ.}}^2}, \quad (\text{IX.1.4})$$

აქედან:

$$N_{\ell_{\text{ნაბ.}}} = N_{\ell_{\text{მოდ.}}}, \text{ ანუ } N_{\ell} = \text{idem}, \quad (\text{IX.1.5})$$

სადაც $N_l = \frac{F}{\rho L^2 V^2}$ – ნიუტონის უგანზომილებო კრიტერიუმია.

ამგვარად, თუ ნაკადების პარამეტრები აკმაყოფილებენ გეომეტრიული, კინემატიკური და დინამიკური მსგავსების მოთხოვნებს, მაშინ ეს ნაკადები **ჰიდროდინამიკურად (ჰიდრავლიკურად)** მსგავსია, რაც უზრუნველყოფილია ნიუტონის სამოდელო და ნატურული კრიტერიუმების ტოლობით.

IX.2. ჰიდროდინამიკური მსგავსების უგანზომილებო კრიტერიუმები და მოდელირების ძირითადი დებულებები

ჰიდროდინამიკური მსგავსების პირობაა – სამოდელო და ნატურული ძალების – სიმძიმის, წნევის, ინერციის, ხახუნის, ზედაპირული დაჭიმულობისა და სხვა თანაფარდობების ტოლობა. რადგან ამ ძალების ფიზიკური თავისებურებების გამო, ყველა ამ ძალების სრული მსგავსება მოდელსა და ნატურაში პრაქტიკულად შეუძლებელია, ამიტომ საჭიროა მოქმედი (ძირითადი) ძალის გათვალისწინება. თუ **ფრუდის უგანზომილებო** კრიტერიუმი ითვალისწინებს სიმძიმის ძალების მოქმედების უპირატესობას, მაშინ (IX.1.3) დამოკიდებულების გათვალისწინებით საჭიროა შემდეგი პირობის შესრულება:

$$\frac{\alpha_V^2}{\alpha_g \cdot \alpha} = 1, \quad (\text{IX.2.1})$$

ანუ

$$\frac{V_{\text{ნაბ.}}^2}{gL_{\text{ნაბ.}}} = \frac{V_{\text{მოდ.}}^2}{gL_{\text{მოდ.}}} = Fr, \quad (\text{IX.2.2})$$

სადაც Fr ე. წ. **ფრუდის რიცხვია**.

გეომეტრიულად მსგავსი ნაკადები (სადაც სიმძიმის ძალები დომინირებს) **ჰიდროდინამიკურად მსგავსია**, თუ სამოდელო და ნატურული ნაკადების ფრუდის კრიტერიუმები იდენტურია

$$Fr_{\text{ნაბ.}} = Fr_{\text{მოდ.}} = \text{idem}, \quad (\text{IX.2.3})$$

მაშინ სამოდელო და ნატურული ნაკადების სიჩქარეების (V), ხარჯების (Q), დროისა

(*t*) და ნაკადის ჰიდრავლიკური დახრილობის (*i*) საანგარიშო დამოკიდებულებებია:

$$V_{\text{ნაბ.}} = V_{\text{მოდ.}} \cdot \sqrt{\alpha} \quad (\text{IX.2.4})$$

$$Q_{\text{ნაბ.}} = Q_{\text{მოდ.}} \cdot \alpha^{2.5} \quad (\text{IX.2.5})$$

$$t_{\text{ნაბ.}} = t_{\text{მოდ.}} \cdot \sqrt{\alpha} \quad (\text{IX.2.6})$$

$$i_{\text{ნაბ.}} = i_{\text{მოდ.}} \quad (\text{IX.2.7})$$

დამოკიდებულება (IX.2.7) შეესაბამება მოძრაობის ტურბულენტურ რეჟიმს წინალობის კვადრატულ ზონაში.

რეინოლდსის უგანზომილებო კრიტერიუმი ითვალისწინებს ხორკლიანობის ძალების მოქმედების უპირატესობას, მაშინ დამოკიდებულება (IX.1.3) ჩაიწერება:

$$\frac{V_{\text{ნაბ.}} \cdot L_{\text{ნაბ.}}}{\nu_{\text{ნაბ.}}} = \frac{V_{\text{მოდ.}} \cdot L_{\text{მოდ.}}}{\nu_{\text{მოდ.}}} = \text{Re}, \quad (\text{IX.2.8})$$

სადაც ν ნაკადების სითხის კინემატიკური სიბლანტეა, მ²/წმ.

ნაკადები, სადაც ხორკლიანობის ძალები დომინირებს, ჰიდროდინამიკურად მსგავსია იმ შემთხვევაში, თუ სამოდელო და ნატურული რეინოლდსის კრიტერიუმები იდენტურია:

$$\text{Re}_{\text{ნაბ.}} = \text{Re}_{\text{მოდ.}} = \text{idem}, \quad (\text{IX.2.9})$$

მაშინ სამოდელო და ნატურული ნაკადების სიჩქარეების (*V*), ხარჯების (*Q*), დროის (*t*) და ჰიდრავლიკური დახრილობის (*i*) საანგარიშო დამოკიდებულებებია:

$$V_{\text{ნაბ.}} = \frac{V_{\text{მოდ.}}}{\alpha}, \quad (\text{IX.2.10})$$

$$Q_{\text{ნაბ.}} = Q_{\text{მოდ.}} \cdot \alpha, \quad (\text{IX.2.11})$$

$$t_{\text{ნაბ.}} = t_{\text{მოდ.}} \cdot \alpha^2, \quad (\text{IX.2.12})$$

$$i_{\text{ნაბ.}} = \frac{i_{\text{მოდ.}}}{\alpha^3}. \quad (\text{IX.2.13})$$

ეილერის უგანზომილო კრიტერიუმი ითვალისწინებს წნევის ძალების მოქმედების უპირატესობას, მაშინ პირობა (IX.1.3) ჩაიწერება:

$$\frac{P_{\text{ნაბ.}}}{\rho_{\text{ნაბ.}} V_{\text{ნაბ.}}^2} = \frac{P_{\text{მოდ.}}}{\rho_{\text{მოდ.}} V_{\text{მოდ.}}^2} = \text{Eu}, \quad (\text{IX.2.14})$$

სადაც *P* არის ნაკადის წერტილში სრული ჰიდროსტატიკური წნევის ძალა, კგ/მ²; ρ – სითხის სიმკვრივე, კგ/მ³. მაშინ ნაკადები, სადაც ჰიდროსტატიკური წნევა დომინირებს, ჰიდროდინამიკურად მსგავსია იმ შემთხვევაში, თუ სამოდელო და ნატურული ეილერის კრიტერიუმები იდენტურია:

$$\text{Eu}_{\text{ნაბ.}} = \text{Eu}_{\text{მოდ.}} = \text{idem}. \quad (\text{IX.2.15})$$

რეინოლდსის კრიტერიუმის შესრულების დროს – ეილერის კრიტერიუმი სრულდება ავტომატურად, მაშინ:

$$\text{Eu} = \lambda \frac{1}{2d}, \quad (\text{IX.2.16})$$

სადაც λ ჰიდრავლიკური ხორკლიანობის კოეფიციენტი, d – მილის დიამეტრია.

ვებერის უგანზომილებო კრიტერიუმი ითვალისწინებს ზედაპირული (კაპილარული) ძალების უპირატესობას, მაშინ პირობა (IX.1.3) ჩაიწერება:

$$\frac{\rho_{\text{ნაბ.}} \cdot V_{\text{ნაბ.}}^2 \cdot L_{\text{ნაბ.}}}{\sigma_{\text{ნაბ.}}} = \frac{\rho_{\text{მოდ.}} \cdot V_{\text{მოდ.}}^2 \cdot L_{\text{მოდ.}}}{\sigma_{\text{მოდ.}}} = We, \quad (\text{IX.2.17})$$

სადაც We ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი, We – ვებერის კრიტერიუმი, რომლის სამოდელო და ნატურული მნიშვნელობები ტოლია:

$$We_{\text{ნაბ.}} = We_{\text{მოდ.}} = idem. \quad (\text{IX.2.18})$$

სტრუქალის უგანზომილო კრიტერიუმი ითვალისწინებს ინერციას ძალების მოქმედების უპირატესობას, მაშინ სითხის არადამყარებული მოძრაობის დროს დამოკიდებულება (IX.1.3) ჩაიწერება:

$$\frac{V_{\text{ნაბ.}} \cdot t_{\text{ნაბ.}}}{L_{\text{ნაბ.}}} = \frac{V_{\text{მოდ.}} \cdot t_{\text{მოდ.}}}{L_{\text{მოდ.}}} = St, \quad (\text{IX.2.19})$$

სადაც St სტრუქალის კრიტერიუმი, რომლის სამოდელო და ნატურული მნიშვნელობები ტოლია:

$$St_{\text{ნაბ.}} = St_{\text{მოდ.}} = idem, \quad (\text{IX.2.20})$$

ხოლო დროის თანაფარდობა კი -

$$t_{\text{ნაბ.}} = t_{\text{მოდ.}} \quad (\text{IX.2.21})$$

მაქეს უგანზომილებო კრიტერიუმი ითვალისწინებს სითხის კუმშვადობის ზემოქმედების უპირატესობას (სხეულების დიდი სიჩქარის შეკუმშული სითხის ნაკადით გარს შემოდენისას), მაშინ დამოკიდებულება (IX.1.3) ჩაიწერება:

$$V_{\text{ნაბ.}} / C_{\text{ნაბ.}} = V_{\text{მოდ.}} / C_{\text{მოდ.}} = M, \quad (\text{IX.2.22})$$

სადაც C სითხეში ბგერის გავრცელების სიჩქარეა, ხოლო M – მაქეს კრიტერიუმი, რომლის სამოდელო და ნატურული მნიშვნელობები ტოლია:

$$M_{\text{ნაბ.}} = M_{\text{მოდ.}} = idem, \quad (\text{IX.2.23})$$

არქიმედეს უგანზომილო კრიტერიუმი ითვალისწინებს არქიმედეს ძალების მოქმედების უპირატესობას, რომელიც წარმოიქმნება ორი სხვადასხვა გარემოს სიმკვრივის სხვაობით ($\rho - \rho_1$). მაგალითად, ცივი და თბილი ჰაერით, მაშინ დამოკიდებულება (IX.1.3) ჩაიწერება:

$$\frac{g_{\text{ნაბ.}} \cdot L_{\text{ნაბ.}} \cdot (\rho - \rho_1)_{\text{ნაბ.}}}{V_{\text{ნაბ.}}^2 \cdot \rho_{\text{ნაბ.1}}} = \frac{g_{\text{მოდ.}} \cdot L_{\text{მოდ.}} \cdot (\rho - \rho_1)_{\text{მოდ.}}}{V_{\text{მოდ.}}^2 \cdot \rho_{\text{მოდ.1}}} = Ar, \quad (\text{IX.2.24})$$

სადაც Ar არქიმედეს კრიტერიუმი, რომლის სამოდელო და ნატურული მნიშვნელობები ტოლია:

$$Ar_{\text{ნაბ.}} = Ar_{\text{მოდ.}} = idem. \quad (\text{IX.2.25})$$

ქოშის უგანზომილო კრიტერიუმი ითვალისწინებს დრეკადი ძალების მოქმედების უპირატესობას (მაგალითად, მილებში ჰიდრავლიკური დარტყმა), მაშინ დამოკიდებულება (IX.1.3) ჩაიწერება:

$$\frac{V_{ნატ.}^2 \cdot \rho_{ნატ.}}{E_{ნატ.}} = \frac{V_{მოდ.}^2 \cdot \rho_{მოდ.}}{E_{მოდ.}} = Co, \quad (IX.2.26)$$

სადაც E არის მასალის დრეკადობის მოდული; Co – ქოშის კრიტერიუმია, რომლის სამოდელო და ნატურული მნიშვნელობები ტოლია:

$$Co_{მოდ.} = Co_{ნატ.} = idem. \quad (IX.2.27)$$

ლაგრანჟის უგანზომილებო კრიტერიუმი ითვალისწინებს მდორე ბლანტი ნაკადების მსგავსებას, იგი შეიძლება ჩაიწეროს ეილერისა და რეინოლდსის კრიტერიუმების ნამრავლის სახით:

$$L = Eu \cdot Re = idem. \quad (IX.2.28)$$

სხვა კრიტერიუმები – **პრანდტლის და რიჩარდსონის** რიცხვები გამოიყენება იშვიათი კერძო შემთხვევებისათვის:

$$p_r = \frac{\nu}{\lambda_1} - \text{პრანდტლის რიცხვი}, \quad (IX.2.29)$$

$$R_f = \frac{\sqrt{EL}}{\lambda_2} - \text{რიჩარდსონის რიცხვი}, \quad (IX.2.30)$$

სადაც ν სითხის ნაკადის ტურბულენტური სიბლანტეა, $\lambda_1 = \frac{\bar{u}_1 - \bar{u}_2}{u_1 + u_2}$, სადაც \bar{u}_1 და \bar{u}_2

გრძივი სიჩქარის გაშუალებული შემადგენლებია, λ_2 – ტემპერატურაგამტარიანობის კოეფიციენტი; E – ტურბულენტური კინეტიკური ენერჯია; L – მონინი-ობუხოვის კოეფიციენტი.

მოდელირების ძირითადი კოეფიციენტების მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში IX.2.1.

ცხრილი IX.2.1

მოდელირების ძირითადი მასშტაბური კოეფიციენტები

კრიტერიუ- მები	მასშტაბური კოეფიციენტი							
	სიგრძის	ფართობის	მოცულობის	დროის	სიჩქარის	აჩქარების	ხარჯის	ძალის
Fr	a	a^2	a^3	$a^{0.5}$	$a^{0.5}$	1	$a^{2.5}$	a^3
Re	a		a^3	a^2	a^{-1}	a^{-3}	a	1
Ar	a	a^2	a^3	$a^{3.5}$	$a^{2.5}$	a^6	$a^{0.5}$	a^3
We	a	a^2	a^3	$a^{1.5}$	$a^{0.5}$	a^2	$a^{1.5}$	a
Co	a	a^2	a^3	a	1	a^{-1}	a^2	a^2

ნაკადების მოდელირების ძირითადი კანონები შეიძლება ასე ჩამოვყალიბოთ:

– თუ ნატურული ნაკადი ტურბულენტურ მდგომარეობაშია, მაშინ სამოდელო ნაკადიც უნდა იყოს ტურბულენტური;

– თუ ნატურული ნაკადი წყნარ მდგომარეობაშია, მაშინ სამოდელო ნაკადიც უნდა იყოს წყნარ მდგომარეობაში;

– ნაკადების მოდელირებისას სასურველია დავიცვათ ხორკლიანობის კოეფიცი-

ენტის გეომეტრიული მსგავსება;

- ნატანის მოძრაობა ნატურაში და მოდელში უნდა იყოს მსგავსი;
- კავიტაციისას ნატურული ნაკადის ერთიანობის რღვევის ადგილმდებარეობა უნდა იყოს სამოდელო ნაკადის შესაბამის ადგილზე;
- ზედაპირული დაჭიმულობის ზემოქმედება უნდა იყოს იმდენად მცირე, რომ ხელი არ შეუშალოს ტალღების წარმოქმნას.

IX.3. ტალღური პროცესების მოდელირება

ტალღური პროცესების მოდელირების სქემა განიხილება ორი შემთხვევისათვის: ტალღების მსხვრევის ზონამდე და ზვირთცემის ზონაში [Иордანიшвили И.К., Вартанов М.В., 2011; Иордანიшвили И.К., Иремашვილი И.Р., Иордანიшвили К.Т., Поцхверия Д.Ш., Биланишვილი Л.Б., 2018].

ტალღების მსხვრევის ზონამდე ჰიდროდინამიკური სამოდელო ტალღების მახასიათებლების გადაანგარიშება ნატურაში

სხვადასხვა მასშტაბის სტენდებზე ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ტალღების მსხვრევის ზონამდე მოდელირების კრიტერიუმია ფრუდის (Fr) გრავიტაციული კანონი, სადაც პროცესები მიმდინარეობს ავტომოდელურ ზონაში. მაშინ მოდელირების ხაზოვანი მასშტაბების გამოყენებით ($\alpha_L = h_{ნაჭ.} / h_{მოდ.} = \lambda_{ნაჭ.} / \lambda_{მოდ.} = H_{ნაჭ.} / H_{მოდ.}$) სამოდელო ტალღური ჰიდროდინამიკური მახასიათებლებია: $\nu_{მოდ.} = \nu_{ნაჭ.} / \sqrt{\alpha_L}$, სადაც $\nu = \sqrt{g\lambda / 2\pi}$ - ტალღის ქიმის გადაადგილების სიჩქარეა; $t_{მოდ.} = t_{ნაჭ.} / \sqrt{\alpha_L}$ - ტალღის გადაადგილების პერიოდი; $m_{მოდ.} = m_{ნაჭ.} / (L_L)^3$ - ქვის (ფასონური ბლოკის) მასა; $W_{მოდ.} = W_{ნაჭ.} / \alpha_L^3$ - ქვის (ფასონური ბლოკის) მოცულობა; $\Omega_{მოდ.} = \Omega_{ნაჭ.} / (\alpha_L)^2$ - ქვის (ფასონური ბლოკის) საერთო ფართობი; $E_{მოდ.} = E_{ნაჭ.} / \alpha_L$ - დრეკადობის მოდული; $\varepsilon_{მოდ.} = \varepsilon_{ნაჭ.}$ - დრეკადობის ფარდობითი დეფორმაცია; $(\varepsilon_{ფორ})_{მოდ.} = (\varepsilon_{ფორ})_{ნაჭ.}$ - ქვის (ბლოკების) ნაყარის გამჭოლიანობის კოეფიციენტი; $\alpha^{\circ}_{მოდ.} = \alpha^{\circ}_{ნაჭ.}$ - ფერდის დახრილობის კუთხე; $F_{მოდ.} = F_{ნაჭ.} / (\alpha_L)^3$ - ძალა; $I_{მოდ.} = I_{ნაჭ.} / (\alpha_L)^5$ - მასის ინერციის მომენტი; $K_{მოდ.} = K_{ნაჭ.} / (\alpha_L)^2$ - სიხისტის კოეფიციენტი.

ტალღების ფერდზე აგორების ზონაში სამოდელო ტალღების მახასიათებლების გადაანგარიშება ნატურაში

სამოდელო ტალღების ფერდზე აგორების ზონაში ტალღური პროცესების ნატურაში გადაანგარიშება საკმაოდ რთულია. ეს სირთულე შეიძლება აიხსნას ტალღის აერირებით მსხვრევის ზონაში, წინალობის გაზრდით მისი ფერდზე გადაადგილებისას, ტურბულიზაციის და შიდა წნევის პულსაციის მომატებით.

როული პროცესებია აგრეთვე ტალღების მსხვრევა ფერდის გამაგრების ფილებს ქვეშ. ამ ზონაში პროცესების შედეგებზე ზემოქმედებას ახდენს გრუნტის შეჭიდულობა, ჰიდროდინამიკური უკუწნევა, ფილტრის ფრაქციების დიამეტრი, ფილა-გრუნტის ფრაქციის პარამეტრები და სხვ. ამიტომ, ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორების ზემოქმედების შესამცირებლად, ექსპერიმენტები მსხვილ მოდელებზე უნდა ჩატარდეს.

წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სხვადასხვა მასშტაბის სამ ჰიდრავლიკურ ღარზე (0,30×0,50×9,0 მ; 0,8×1,7×50,0 მ; 7,0×0,5×7,0 მ) ჩატარებული კვლევების საფუძველზე მიღებულია შემასწორებელი კოეფიციენტების მნიშვნელობები: ფერდზე ტალღების აგორების სიმაღლისათვის (K_{runup}), ტალღური წნევისათვის (K_p) და ქვანაყარი (ფასონური ბლოკების) დიამეტრისათვის (K_d).

ფერდზე სამოდელო ტალღის აგორების სიმაღლის ($(h_{runup})_{\text{მოდ}}$) ნატურაში ($(h_{runup})_{\text{ნატ}}$) გადაანგარიშება ხორციელდება დამოკიდებულებით:

$$(h_{runup})_{\text{ნატ}} = \alpha_L (h_{runup})_{\text{მოდ}} / K_{runup}, \quad (\text{IX.3.1})$$

სადაც α_L მოდელის ხაზობრივი მასშტაბია; $K_{runup} = f(\text{Re})$ – ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლის შემასწორებელი მასშტაბური კოეფიციენტი, $K_{runup} = 0,7 - 1,0$. პრაქტიკაში საკმარისი სიზუსტით შეიძლება მივიღოთ ქვანაყარისათვის – $K_{runup} = 0,85$, ბეტონის ფასონური მასივებისათვის – $K_{runup} = 0,7 - 0,8$.

სამოდელო ტალღური მაქსიმალური წნევის ($P_{\text{მოდ}}$) გადაანგარიშება ნატურაში ($P_{\text{ნატ}}$) ხორციელდება დამოკიდებულებით:

$$P_{\text{ნატ}} = \frac{P_{\text{მოდ}}}{K_p / \alpha_L}, \quad (\text{IX.3.2})$$

სადაც α_L მოდელის გრძივი მასშტაბია; $P_{\text{ნატ}}$ – მაქსიმალური ტალღური წნევა ნატურაში; K_p – წნევის მასშტაბური შემასწორებელი კოეფიციენტი $K_p = 0,6 - 1,0$. პრაქტიკაში საკმარისი სიზუსტით შეიძლება მივიღოთ $K_p = 0,8$.

მოდელირებისას ქვის (ბლოკების) სამოდელო მაქსიმალური დიამეტრის ($d_{\text{მოდ}}$) გადაანგარიშება ნატურაში ხორციელდება გამოსახულებით:

$$d_{\text{ნატ}} = \frac{d_{\text{მოდ}}}{\alpha_L K_d}, \quad (\text{IX.3.3})$$

სადაც $d_{\text{მოდ}}$, $d_{\text{ნატ}}$ არის ქვის (ფასონური ბლოკების) დიამეტრი მოდელსა და ნატურაში; α_L – ხაზობრივი მასშტაბი; K_d – ქვის (ფასონური ბლოკების) დიამეტრის მასშტაბური შემასწორებელი კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ქვის (ბლოკის) ფორმასა და რეინოლდსის (Re) რიცხვზე. პრაქტიკაში შეიძლება საკმარისი სიზუსტით მივიღოთ: ნებისმიერი ფორმის ქვისათვის (ბლოკისთვის) $K_d = 1,4$, ხოლო მომრგვალებული ფორმის ქვისათვის – $K_d = 1,2$.

სამოდელო და ნატურული ქვანაყარის (ბლოკების) გამჭოლიანობის კოეფიციენტების მნიშვნელობა დასტურდება სითხის მოძრაობის განტოლების თეორიული ანალიზით [Аравин В.С., Нумеров С.Н., 1953, Кристен Н.И., 1961].

ქვანაყარში ფორების მოცულობის შეფარდებას ქვანაყარის (ბლოკების) საერთო მოცულობაზე აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{ფორ}}} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \text{grad} P^* + gJ = 0, \quad (\text{IX.3.4})$$

სადაც $P^* = P + gpZ$.

მაშინ (IX.3.4) - ში თუ შევიტანთ ამ მნიშვნელობას, მივიღებთ:

$$\frac{1}{\rho} \text{grad} P^* = \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \text{grad} gZ, \quad (\text{IX.3.5})$$

ანუ

$$\frac{1}{\varepsilon_{\text{ფორ}}} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \text{grad} P + gJ + \text{grad} gZ = 0, \quad (\text{IX.3.6})$$

შესაბამისად მოდელისათვის:

$$\frac{1}{(\varepsilon_{\text{ფორ}})_{\text{მოდ}}} \frac{\partial \bar{V}_{\text{მოდ}}}{\partial t_{\text{მოდ}}} + \frac{1}{\rho} \text{grad} P_{\text{მოდ}} + gJ_{\text{მოდ}} + \text{grad} gZ_{\text{მოდ}} = 0, \quad (\text{IX.3.7})$$

მოდელში და ნატურაში იდენტური სითხისათვის:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \text{grad} P_{\text{მოდ}} &= \frac{1}{\rho} \text{grad} P_{\text{ნატ}} \\ \text{grad} gZ_{\text{მოდ}} &= \alpha_L \text{grad} gZ_{\text{ნატ}} \end{aligned} \quad (\text{IX.3.8})$$

მაშინ მსგავსების დასაკმაყოფილებლად საჭიროა ორი პირობა:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\varepsilon_{\text{ფორ}})_{\text{ნატ}}} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right)_{\text{ნატ}} &= \frac{1}{(\varepsilon_{\text{ფორ}})_{\text{მოდ}}} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right)_{\text{მოდ}} \\ gJ_{\text{ნატ}} &= gJ_{\text{მოდ}} \end{aligned} \quad (\text{IX.3.9})$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ მსგავსების გრავიტაციული კანონების მიხედვით - $\nu_{\text{მოდ}} = a_L^{0.5} \nu_{\text{ნატ}}$ და $t_{\text{მოდ}} = a_L^{0.5} t_{\text{ნატ}}$, მაშინ $\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right)_{\text{მოდ}} = \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \right)_{\text{ნატ}}$.

(IX.3.9) ტოლობის შესასრულებლად საჭიროა ტოლობა:

$$\frac{1}{(\varepsilon_{\text{ფორ}})_{\text{ნატ}}} = \frac{1}{(\varepsilon_{\text{ფორ}})_{\text{მოდ}}} \text{ ან } (\varepsilon_{\text{ფორ}})_{\text{ნატ}} = (\varepsilon_{\text{ფორ}})_{\text{მოდ}}, \quad (\text{IX.3.10})$$

ანუ საკმარისია, რომ ფორიანობის კოეფიციენტები მოდელსა და ნატურაში ტოლი იყოს. ლაბორატორიულ პირობებში მიღებული ორგანზომილებიანი დელვის ნატურულ სამგანზომილებიან დელვაში გადაანგარიშებისას, როგორც წესი, ტალღის სიმაღლის ანგარიშისას საჭიროა შემდეგი დამოკიდებულების გამოყენება [Смирнов А.А., 1960]:

$$h_{\text{ორგანზ1\%}}^{\text{ნატ}} = h_{\text{სამგანზ1\%}}^{\text{ნატ}} \cdot 0,83. \quad (\text{IX.3.11})$$

IX.4. ექსპერიმენტების ჩატარების დაგეგმარების რაციონალური მეთოდი

ექსპერიმენტების აუცილებელი და საკმარისი რაოდენობა დგინდება საინჟინრო რაციონალური დაგეგმარების მეთოდის გამოყენებით ფაქტორული რონდომი-ნიზირებული რაციონალური გეგმის ბერძნულ-ლათინური კვადრატების (4×4) გამოყენებით [Шенк X., 1972].

ამ მეთოდის გამოყენება შესაძლებელია დამოუკიდებელი ცვლადების ცალკეული ფუნქციების საბოლოო გამოსახულებების ნამრავლის სახით. მაგალითად, ტალღის ფერდზე აგორების (ჩამოგორების) ხუთფაქტორიანი სიჩქარის ფორმულა იქნება:

$$V_{runup} = K \cdot f(\lambda/h) \cdot f(m) \cdot f(K_r) \cdot f(h_H) \cdot (H_i), \quad (IX.4.1)$$

სადაც K მუდმივაა, $f(\lambda/h)$ – ტალღის დახრილობა, $m = ctga$ – ფერდის დახრილობა, K_r – ფერდის ხორკლიანობა და ფორიანობა, h_H – ტალღის სიმაღლე „ღრმა“ წყალზე, H_i – „ღრმა“ წყლის სიღრმე ($H_i \geq \lambda_H/2$). შედგენილია ექსპერიმენტების კვადრატები, სადაც ცვლადები (λ/h), m , K_r , h_H , H_i) შერჩეულია ოთხ დონეზე და კვადრატებს აქვთ ასეთი სახე (იხ. ცხრ. IX.4.1):

ცხრილი IX.4.1

საანგარიშო კვადრატები

λ_H/h_H m	10	13	15	20
9,5	$H_1=0,25$ მ $K_{r1}=0,55$	$H_2=0,20$ მ $K_{r2}=0,70$	$H_3=0,15$ მ $K_{r3}=0,85$	$H_4=0,30$ მ $K_{r4}=1,00$
6,3	$H_2=0,20$ მ $h_{H1}=0,1$ მ	$H_1=0$ მ $h_{H2}=0,25$ მ	$H_3=0,30$ მ $h_{H4}=0,50$ მ	$H_4=0,60$ მ $h_{H3}=0,35$ მ
3,0	$H_2=0,10$ მ	$H_1=0$ მ	$H_3=0,60$ მ	$H_4=1,20$ მ
8,1	$H_2=0,15$ მ $K_{r4}=1,0$	$H_4=0,30$ მ $K_{r3}=0,85$	$H_1=0,25$ მ $K_{r2}=0,70$	$H_1=0$ მ $K_{r1}=0,55$
5,1	$H_3=0,30$ მ $H_{H3}=0,25$ მ	$H_4=0,60$ მ $H_{H1}=0,10$ მ	$H_2=0,20$ მ $h_{H4}=0,35$ მ	$H_1=0$ მ $h_{H2}=0,10$ მ
2,4	$H_3=0,60$ მ	$H_4=1,20$ მ	$H_2=0,10$ მ	$H_1=0$ მ
7,1	$H_1=0$ მ $K_{r2}=0,70$	$H_3=0,25$ მ $K_{r4}=1,0$	$H_4=0,30$ მ $K_{r1}=0,55$	$H_2=0,15$ მ $K_{r3}=0,85$
4,1	$H_1=0$ მ $H_{H3}=0,35$ მ	$H_2=0,20$ მ $H_{H4}=0,50$ მ	$H_4=0,60$ მ $h_{H1}=0,5$ მ	$H_3=0,30$ მ $h_{H2}=0,25$ მ
1,9	$H_1=0$ მ	$H_2=0,10$ მ	$H_4=1,20$ მ	$H_3=0,30$ მ
6,4	$H_3=0,25$ მ $K_{r3}=0,85$	$H_4=0,45$ მ $K_{r2}=0,55$	$H_1=0$ მ $K_{r4}=1,0$	$H_2=0,5$ მ $K_{r1}=0,20$
3,1	$H_3=0,25$ მ $H_{H4}=0,50$ მ	$H_4=0,30$ მ $H_{H3}=0,35$ მ	$H_1=0$ მ $h_{H1}=0,10$ მ	$H_2=0,20$ მ $h_{H2}=0,25$ მ
0,9	$H_3=0,25$ მ	$H_4=0,60$ მ	$H_1=0$ მ	$H_2=0,10$ მ

ყოველი სტრიქონისთვის, სადაც განიხილება მოქმედი ფაქტორი, შედგენილია ოთხი ლოგარითმული განტოლება. მაგალითად, სტრიქონისთვის, სადაც

გათვალისწინებულია (m) ფაქტორი, განტოლებებს აქვთ სახე:

$$\begin{aligned}(\log v_{runup})_1 &= \log f_1(\lambda_H / h_{H1}) + \log f_2(m_1) + \log f_3(K_{r1}) + \log f_4(h_{H1}) + \log f_5(H_1), \\(\log v_{runup})_2 &= \log f_1(\lambda_H / h_{H2}) + \log f_2(m_1) + \log f_3(K_{r2}) + \log f_4(h_{H2}) + \log f_5(H_{21}), \quad (\text{IX.4.2}) \\(\log v_{runup})_3 &= \log f_1(\lambda_H / h_{H3}) + \log f_2(m_1) + \log f_3(K_{r3}) + \log f_4(h_{H3}) + \log f_5(H_3), \\(\log v_{runup})_4 &= \log f_1(\lambda_H / h_{H4}) + \log f_2(m_1) + \log f_3(K_{r4}) + \log f_4(h_{H4}) + \log f_5(H_4).\end{aligned}$$

ამ ოთხი განტოლებების შეჯამებით, გვექნება:

$$\begin{aligned}\sum \log(v_{runup}) &= 4\log f_2(m_1) + \log[f_1(\lambda_H / h_{H1}) \cdot f_1(\lambda_H / h_{H2}) \cdot f_1(\lambda_H / h_{H3}) \cdot \\&\cdot f_1(\lambda_H / h_{H4})] + \log[f_3(K_{r1}) \cdot f_3(K_{r2}) \cdot f_3(K_{r3}) \cdot f_3(K_{r4})] + \log[f_4(h_{H1}) \cdot \\&\cdot f_4(h_{H2}) \cdot f_4(h_{H3}) \cdot f_4(h_{H4})] + \log[f_5(H_1) \cdot f_5(H_2) \cdot f_5(H_3) \cdot f_5(H_4)]\end{aligned} \quad (\text{IX.4.3})$$

მეორე, მესამე და მეოთხე სტრიქონების ანალოგიური პროცედურის ჩატარებისას გვექნება:

$$\begin{aligned}\log f_2(m_1) &= \frac{\sum \log v_{runupm_1}}{n} - const \\ \log f_2(m_2) &= \frac{\sum \log v_{runupm_2}}{n} - const \quad (\text{IX.4.4}) \\ \log f_2(m_3) &= \frac{\sum \log v_{runupm_3}}{n} - const \\ \log f_2(m_4) &= \frac{\sum \log v_{runupm_4}}{n} - const ,\end{aligned}$$

სადაც (n) ანგარიშის დონეების რაოდენობა. ანგარიშის (m) დონის მიხედვით შედეგების ლოგარითმები გაშუალებულია, ხოლო დანარჩენი ოთხი ფაქტორის ზემოქმედება არ იცვლება ანგარიშის ერთი დონის მეორეზე გადასვლისას. ე.ი., გაშუალებული ლოგარითმების შედეგების ყველა ცვლილება განსაზღვრულია მხოლოდ ერთი ცვლადის ზემოქმედებით. ასეთივე ანგარიშები ტარდება ყველა დანარჩენი ცვლადის (K_r , h_H , H_i , h_H , h_H/λ_H) მიხედვით, ფუნქციების ანალიზი ტარდება ანტილოგარითმებისათვის. გაანგარიშებისას ცხრილები და მრუდები ყველა ფუნქციებისათვის ასეთი სახითაა შედგენილი:

$$V_{\lambda/h} = K_1 \cdot f_1(\lambda_H/h_H); \quad V_m = K_2 \cdot f_2(m); \quad V_{kr} = K_3 \cdot f_3(K_r); \quad V_{hH} = K_4 \cdot f_4(h_H); \quad V_H = K_5 \cdot f_5(H), \quad (\text{IX.4.5})$$

სადაც K მუდმივაა.

საბოლოოდ გაანგარიშებისას მიღებულია ფერდზე ტალღის აგორების სიჩქარის დამოკიდებულება:

$$V_{runup} = K \cdot (V_m) \cdot (V_{\lambda/h}) \cdot (V_{hH}) \cdot (V_{kr}) \cdot (V_H), \quad (\text{IX.4.6})$$

სადაც $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5$.

ყველა დანარჩენი ექსპერიმენტის დაგეგმარება და დამუშავება ტარდება ანალოგიურად. (IX.4.6) ფორმულის გაანგარიშება ხდება დამხმარე გრაფიკების ან ცხრილების გამოყენებით.

ექსპერიმენტების წინასწარი საინჟინრო დაგეგმარების გამოყენების მეშვეობით შესაძლებელია ექსპერიმენტების ჩატარების დროის და რაოდენობის შემცირება, ასევე შესაძლო შეცდომების მინიმუმამდე დაყვანა.

X. წყალსაცავების გარემოზე ზემოქმედების ფაქტორების სისტემური ანალიზის მეთოდები

სხვადასხვა ობიექტების გარემოზე ზემოქმედების სისტემური ანალიზი მოიცავს სამ ეტაპს: აღწერითს (ემპირიულ), სამეცნიეროს (თეორიულს) და ექსპერიმენტულს [Мирцхулава Ц. Е., 1975, 2000; Odilavadze T., Bziava K., Bagration-Davitashvili A., Inashvili I., 2017; Baryczko K., Bartoszek L., Koszelnik P., Rak I.R., 2018].

აღწერით (ემპირიულ) ეტაპზე მნიშვნელოვანია შემეცნების თეორია, რაც გამოისახება მოვლენების ობიექტური რეალობის აღქმაში. ამ ეტაპზე ხდება მიმდინარე პროცესების არსებული, შედარებით ზედაპირული წარმოდგენის ჩამოყალიბება. ამ დროს არ ხდება მოვლენების სიღრმისეული შესწავლა [Глушков В.М., 1969].

სამეცნიერო (თეორიული) დონის შემეცნება გულისხმობს მოვლენების მთლიანი სტრუქტურის შესწავლას, არსის გახსნას, არსებული მიზეზების, მოვლენების, კატეგორიების, კანონებისა და სამეცნიერო თეორიების ჩამოყალიბებას. თეორიული მეთოდები საშუალებას იძლევა, ღრმად ჩავიხედოთ ამა თუ იმ პროცესში და აღმოვაჩინოთ ჯერ კიდევ დაუდგენელი კანონზომიერებები, რაც ხელს უწყობს ობიექტური ჭეშმარიტების დადგენას.

წყალსაცავიანი სისტემების გარემოში მიმდინარე პროცესების დროს შეინიშნება იდენტური მომენტები, ამიტომ, სხვადასხვა მოვლენების მონაცემების გენერირების მიზნით, საჭიროა დაკვირვებები სავსე პირობებში ან ლაბორატორიული ცდების ჩატარება.

დაკვირვებების პროცესში შეიმჩნევა დაფიქსირებული მოვლენების მნიშვნელობების გარკვეული გაზნევა. მაგალითად, მიუხედავად იმისა, რომ წყალსაცავზე ქარისეული მოვლენები ყოველწლიურად მეორდება დეტერმინირებული კანონზომიერების ფორმით, ტალღის ელემენტების (სიმაღლე, სიგრძე, პერიოდი) მაქსიმალური მნიშვნელობა წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს, რომელიც დამოკიდებულია მთელ რიგ ძირითად და მეორეხარისხოვან ფაქტორებზე [იორდანიშვილი ი.კ., იორდანიშვილი კ.თ., 2010]. დეტერმინისტული მეთოდიკა **საიმედოა** იმ შემთხვევაში, თუ ცვლადი სიდიდის მცირე გადახრების იგნორირება დასაშვებია; ხოლო **ნაკლებად საიმედოა** იმ შემთხვევაში, თუ შემთხვევით გადახრებს მოჰყვება მნიშვნელოვანი ცვლილებები [Мирцхулава Ц.Е., 2003; დოხნაძე გ., 2007].

გამოსავალი უნდა ვეძებოთ ალბათობის თეორიის მათემატიკური სტატისტიკის, სახეთა გარჩევის, საიმედოობის თეორიის, ფაქტორთა ანალიზის, სახეთა მსგავსების, ინტეგრალური და სხვა მეთოდიკების გამოყენებით [Андреев И. Д., 1959; Брайтман В.М., 1962; Горелик А.Л., Скрипкин В.Л., 1977; Окунь Я., 1976].

X.1. ალბათობის თეორია

ალბათობის თეორია არის მათემატიკური მეცნიერება, რომელიც იკვლევს შემთხვევითი მოვლენების კანონზომიერებებს. ალბათობის თეორიის ძირითადი ცნებაა „შემთხვევითი მოვლენა“. სიტყვა „შემთხვევითი“ იხმარება მაშინ, როცა

უცნობია რაიმე ფაქტის, პროცესის ან მისი გამოვლინების დამახასიათებელი ნიშნის არსებობა. „მოვლენა“ კი არის ნებისმიერი ფაქტი, რომელიც ან განხორციელდება ან არა.

ჩატარებული ცდის ან დაკვირვების შედეგს, რომელიც ყოველთვის ასახავს ამა თუ იმ ფაქტის მოხდენა-არმოხდენას – „**ხდომილობა**“ ეწოდება. ისეთ ხდომილებას, როცა ცდის ან დაკვირვების ნებისმიერი გამეორებისას მას არასოდეს ექნება ადგილი – „**შეუძლებელი ხდომილობა**“ ეწოდება, ხოლო ისეთ ცდომილებას, რომელსაც ყოველი ცდის ან დაკვირვების დროს უთუოდ ექნება ადგილი – „**აუცილებელი ხდომილობა**“ ეწოდება.

ისეთ ხდომილობას კი, როცა ცდის ან დაკვირვების დროს მოსალოდნელია რომ მას ექნება ან არ ექნება ადგილი – „**შემთხვევითი ხდომილობა**“ ეწოდება.

რაიმე „ხდომილების სიხშირული ალბათობის რიცხვითი მნიშვნელობა“ არის წილადი, რომლის მრიცხველშია მოცემული ხდომილობის შემთხვევების რიცხვი, მნიშვნელში კი – ხდომილობების საერთო რაოდენობა. ასეთი ალბათობა გამოითვლება აპოსტერიორად ანუ ცდის ჩატარების შემდეგ.

დამოუკიდებელი ცდების რაოდენობის გაზრდისას კონკრეტული ხდომილობის შემთხვევების სიდიდე თანდათან სტაბილიზდება და აღნიშნული ფარდობა უახლოვდება მუდმივ სიდიდეს. სწორედ ეს სიდიდე არის „**მოვლენის ალბათობა**“.

სხვადასხვა პარამეტრების სავსე დაკვირვებების მონაცემების რაოდენობა დაკავშირებულია ანგარიშების სიზუსტესთან. ცხადია, რაც უფრო მეტია დაკვირვებების რაოდენობა, მით უფრო ზუსტია ანგარიშების შედეგი. ასეთი ინფორმაციის მოპოვება ხდება არსებული მონაცემების, თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების, დაკვირვებების და ანალიზების გამოყენებით.

იმ შემთხვევაში, თუ მოპოვებული პირველადი ინფორმაციის რაოდენობა არის მცირე და შეუძლებელია მათ მიმართ სტატისტიკური მეთოდების გამოყენება, მაშინ მიზანშეწონილია **მონტე-კარლოს** მეთოდის გამოყენება. ეს მეთოდი არსებული მონაცემებიდან, მაქსიმალური ინფორმაციის მიღების საშუალებას იძლევა. ამ მეთოდის არსი მდგომარეობს შემდეგში: არსებული დაკვირვებების მონაცემების მიხედვით აიგება განაწილების ინტეგრალური ფუნქცია. შემდეგ კი – შემთხვევით რიცხვთა ცხრილების გამოყენებით, გათამაშების გზით, ხდება საჭირო შემთხვევით სიდიდეთა ნებისმიერი რაოდენობის გენერაცია.

X.2. დაკვირვებების ხდომილობების შეფასება

დაკვირვების წარმოების დროს უნდა გამოიყოს ძირითადი განმსაზღვრელი ფაქტორები. ძირითადი ფაქტორების შერჩევის დროს მხედველობაშია მისაღები შემთხვევითი სიდიდის განაწილების მრუდის სასურველი და სავარაუდო ფორმა. ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში მიზანშეწონილია დადგინდეს დამოკიდებულება ნამდვილისა და გაზომილ მნიშვნელობებს შორის. ცვლადის ნამდვილ მნიშვნელობად შეიძლება ჩაითვალოს საშუალო არითმეტიკული, საშუალო გეომეტრიული,

საშუალო კვადრატული, მედიანა, მოდა და მათემატიკური ლოდინი [Уорсинг. А., Геффер Дж., 1949].

დაკვირვების **ხდომილობა** არის სხვაობა დარეგისტრირებულ და ნამდვილ მნიშვნელობას შორის. ხდომილობა უთუოდ ახლავს ნებისმიერი სიდიდის გაზომვის ყველა სერიას; ყოველი ხდომილობა შედგება და განისაზღვრება მრავალი მცირე ხდომილობისაგან; ყველა ელემენტარული ხდომილობა შეიძლება შედიოდეს „პლიუს“ და „მინუს“ ნიშნით. ამიტომ, ცდების მიმდინარეობისას, ყოველ დარეგისტრირებულ შედეგში აუცილებლად იარსებებს ეს თუ ის ხდომილობა, რომელთა ერთობლიობა სამ ჯგუფად შეიძლება ჩამოყალიბდეს: უხეში, სისტემატური და შემთხვევითი ხდომილობები.

უხეში (ანომალური) ხდომილობები აუცილებლად უნდა იქნეს ამოგდებული დაკვირვების რიგიდან და განხორციელდეს ახალი ანათვლების აღება.

დაკვირვების პროცესში შეუმჩნეველი რჩება მსგავსი ფაქტების არსებობა, რომელთა მიხედვითაც ხდება სტატისტიკურ რიგში არსებული საექვო მნიშვნელობის მქონე წევრების იგნორირება [Мирицхулава Ц.Е., 1974; Уорсинг А., 1949; Шенк Х., 1972].

ყველაზე გავრცელებული კრიტერიუმია ე.წ. „**სამი სიგმას წესი**“. დაკვირვების მონაცემების მიხედვით უნდა შედგეს ვარიაციული მწკრივი კლებადობის ან ზრდადობის მიხედვით, სადაც დაფიქსირდება ცვლადის მინიმალური (X_{\min}) და მაქსიმალური (X_{\max}) მნიშვნელობები. იმავე მონაცემების მიხედვით იანგარიშება ცვლადის საშუალო მნიშვნელობა (\bar{X}), საშუალო კვადრატული გადახრა (σ), სხვაობები საშუალო სიდიდისა და მწკრივის განაპირა მნიშვნელობებს შორის. იმ შემთხვევაში, თუ $(\bar{X} - X_{\min}) < 3\sigma$ ცვლადის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობები რჩება ვარიაციული მწკრივების წევრებად, ხოლო $(\bar{X} - X_{\min}) > 3\sigma$ შემთხვევისთვის ცვლადების (X_{\min} ან X_{\max}) შესაბამისი მნიშვნელობა გამოირიცხება მწკრივიდან. დარჩენილი წევრებისათვის შემდგომი ანალიზი მეორდება იგივე გათვლებით.

სისტემატიური ხდომილობები – ეს ის ხდომილობებია, რომელიც თან ახლავს გაზომვებს. შესაძლებელია მათი მიზეზების (ხელსაწყოთა გაუმართაობა, შედეგების დამრგვალება და ა.შ.) დადგენა. ცალკეული ფაქტორების ზეგავლენით გამოწვეული სისტემატიური ხდომილობის არსებობა ვლინდება სპეციალური გამოკვლევების საფუძველზე. გამოვლენილი სისტემატიური ხდომილობის გასწორება ხდება შესაბამისი შესწორებების შეტანით გაზომვის შედეგებში.

შემთხვევითი ხდომილობები გამოწვეულია ფაქტორთა ისეთი სიმრავლით, რომელთა ზემოქმედების ეფექტი უმნიშვნელოა, ამიტომ ვერ ხერხდება მათი ცალკე დაფიქსირება და გამოყოფა. შემთხვევითი ხდომილობები განიხილება ისეთ სიდიდეებად, რომელთა გამორიცხვა და უგულებელყოფა შეუძლებელია. ასეთი ხდომილობების გავლენა ცვლადის ნამდვილ მნიშვნელობაზე ფასდება ალბათობის თეორიის მეთოდებისა და მათი მოდიფიკაციების გამოყენებით.

X.3. ფაქტორების მოწყვლადობის შეფასება

ინტენსივობა და რისკი ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მოწყვლადობის მთავარი ცნებაა. **მოწყვლადობა** არის თვისება, რომელიც უჩვენებს ობიექტის უნარს შეეწინააღმდეგოს გარე და შიდა ზემოქმედებას.

ობიექტის წყობიდან გამოსვლის ინტენსივობის შემცირების ერთ-ერთი მთავარი ღონისძიებაა – მოწყვლადობის დროული შეფასება და მის საფუძველზე უკუქმედების სტრატეგიის დაგეგმვა. მოწყვლადობის ობიექტებზე ჩატარებულმა დაკვირვებებმა გვიჩვენა, რომ რაც უფრო მოწყვლადია ობიექტი შიდა და გარე ზემოქმედებაზე – მით უფრო მცირეა მისი საიმედოობა.

რამდენ ხანს იმუშავებს ობიექტი – ყოველთვის იპყრობდა სპეციალისტებისა და მეცნიერების ყურადღებას. კრიტიკულ (კრიზისულ) მდგომარეობაში მყოფი ობიექტის უსაფრთხო ექსპლუატაციის პერიოდის გაგრძელება მოითხოვს ობიექტის ფუნქციონირების განმსაზღვრელი დომინირებადი ფაქტორების გამოვლენას. მაგალითად, წყალსაცავების კრიტიკული დაბინძურების ზღვარის პროგნოზირება ტარდება სისტემის განვითარების დიალექტიკური კანონის გამოყენებით [Колмогоров А.Н., 1938; Свешников Л.А., 1993; Мирцхулава Ц.Е., 1993; 1999; 2003; 2005]. ამ კანონის შესაბამისად, სისტემის განვითარების შედეგი დამოკიდებულია ორ ტენდენციაზე, რომელთაგან ერთი – აფერხებს, ხოლო მეორე – ხელს უწყობს განვითარების პროცესს. წყალსაცავის კრიტიკული მდგომარეობის შეფასებისას აუცილებელია დადგინდეს დატვირთვების შესაბამისი მოქმედება და შემდეგ – წინააღმდეგობის ზღვრული მახასიათებლები.

აკადემიკოს ც. მირცხულავას მიერ შემუშავებული ობიექტების მოწყვლადობის შეფასების მეთოდოლოგიის მიხედვით – ობიექტი მოწყვლადი ხდება გარკვეული დეგრადაციის (განმაპირობებელი თვისებების დაკარგვის) შემდეგ, რაც გამოწვეულია მრავალი ფაქტორის ზემოქმედებით [Мирцхулава Ц.Е., 2006].

შემოთავაზებული მეთოდის მიხედვით, ობიექტის დეგრადაციის პროცესის განმსაზღვრელი ძირითადი პარამეტრის (y) ცვლილება დროში აღწერილია სტოქასტიკური დიფერენციალური განტოლებით:

$$dy(t) = m(t)dt + \sigma(t) dx(t), \quad (X.3.1)$$

სადაც $m(t)$ და $\sigma(t)$ შესაბამისად არის პარამეტრის ცვლილების საშუალო სიჩქარე და მისი საშუალო კვადრატული გადახრა, $dx(t)$ – ნორმალური განაწილების მდგენელი.

ფოკერ-პლანკ-კოლმოგოროვის განტოლების გამოყენებით და რიგი მათემატიკური გარდაქმნებით, მოწყვლადი დადგომის დროის (t) საანგარიშოდ მიღებულია შემდეგი დამოკიდებულება:

$$t = \mu \left[\frac{2 + z^2 v^2 \pm \sqrt{(4 + z^{-1} v^{-1}) z^2 v^2}}{2} \right], \quad (X.3.2)$$

სადაც μ არის დეგრადაციის პროცესის განმსაზღვრელი ძირითადი პარამეტრის ზღვრული მნიშვნელობა, რომლის მიღწევასაც ობიექტი ხდება მოწყვლადი; z – წინააღმდეგობის სტატისტიკური მარაგი, რომელიც განსაზღვრავს ობიექტის

ფუნქციონირებას მოწყვლადი მდგომარეობის მიღწევამდე; $1,00 \leq z \leq 4,99$; ν – ვარიაციის კოეფიციენტი, რომელიც წარმოადგენს ცვლადის საშუალო კვადრატული გადახრის შეფარდებას საშუალო მნიშვნელობასთან:

$$\nu = \frac{\sigma}{x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}, \quad (X.3.3)$$

სადაც K_i არის მოდულის კოეფიციენტი, რომელიც წარმოადგენს ცვლადის კონკრეტული მნიშვნელობის შეფარდებას საშუალო მნიშვნელობასთან.

ამოცანების გადაწყვეტისას შეიძლება შეგვხვდეს შემდეგი სიტუაციები: დაკვირვებების მონაცემები *საკმარისია*, *არასაკმარისია* ან *პრაქტიკულად არ არსებობს*.

დაკვირვებების *არარსებობის* დროს ინფორმაცია მოიპოვება ანალოგების გამოყენებით. დაკვირვებების *არასაკმარისი* რაოდენობის დროს გამოიყენება ბუტსტრეფ-მეთოდი, მონტე კარლოს ან ექსპერტების შეფასების მეთოდი.

დაკვირვებების *საკმარისი* რაოდენობის დროს გამოიყენება სტატისტიკური მონაცემების გაანალიზება კორელაციური მეთოდის გამოყენებით.

ამოცანა 1.

რამდენ ხანს (t) იქნება *სიონის წყალსაცავი* ნორმალური ფუნქციონირების მდგომარეობაში საიმედოობის დონის $P = 0,97$ და რისკის $r = 0,03$ დროს, თუ საშუალო კვადრატული გადახრა $\sigma = 0,049$, ხოლო ვარიაციის კოეფიციენტი $\nu = \frac{\sigma}{m} = \frac{0,049}{18,9} = 0,0026$,

სადაც (m) დადგენილია ჩვენი კვლევების საფუძველზე. *სიონის წყალსაცავში ფოსფორის* დაგროვების (ნარჩენის სახით) საშუალო სიჩქარე $m_{საშ.} = 18,72$ ტ/წელი (ანუ 0,058 მგ/ლ) (ცხრ. X.3.1) [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ხოსროშვილი ე., 2013].

ცხრილი X.3.1

სიონის წყალსაცავში ფოსფორისგან დატვირთვის ნარჩენის (ფნ) ანგარიში

დაბინძურების წყაროები	ფოსფორის დატვირთვა ფდ, ტონა წელიწადში	შთანთქმული ფოსფორი ფშ, ტონა წელიწადში	ნარჩენი ფოსფორი ფნ=ფდ-ფშ, ტონა წელიწადში	ფერდის დახრილობა გრადუსებში	ღონისძიებების სიმძლავრე ფოსფორისგან (ბალებში)
მეფრინველეობა	0,046	0,028	0,018	7°	7
მეღორეობა	18,00	0,006	17,99	6°	6
მესაქონლეობა	0,582	0,041	0,541	8°	5
სელიტური ტერიტორიებიდან:					
ს. სიონი	0,439	0,442	შთანთქმულია	5°	–
ს. ჩეკურიანთ-გორი	0,263	0,377	-“-	8°	–
სახნავი მიწები	0,239	0,07	0,169	7°	4
სულ	19,57	0,964	18,72	7°	–

განმსაზღვრელი პარამეტრის - ფოსფორის ზღვრული მნიშვნელობა, წყლის ხარისხის ეკოლოგიური პოზიციების მიხედვით, ტოლია 3,0 მგ/ლ. მაშინ ფოსფორის დაგროვების ზღვრული მნიშვნელობა, რომელიც შეიძლება დაგროვდეს სიონის

წყალსაცავში წყალცვლის ერთი წლის მანძილზე, ტოლია:

$$m_{\text{ზღვრ.}} = V_{\text{სრ.}} \cdot 3,0 \text{ მგ/ლ} = 325\,000\,000\,000 \text{ ლ} \cdot 3,0 \text{ მგ/ლ} = 1000 \text{ ტ/წელიწადში.}$$

$$\text{რისკს } r = 0,03 \text{ და საიმედოობას } P = \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \rho^{\frac{x^2}{2}} dx = 0,97 \text{ შეესაბამება შემთხ-}$$

ვევითი სიდიდე $z = 1,88$, რომელიც მოყვანილია საიმედოობისა და ალბათობის თეორიების ცნობარში [Колмогоров А.Н., 1938]. ამ მონაცემების ამონარიდი მოყვანილია ცხრილში X.3.2.

ცხრილი X.3.2

Z	$\Phi(Z)=P$	Z	$\Phi(Z)=P$	Z	$\Phi(Z)=P$
0	0,5000	2,0	0,97725	4,0	0,9468
0,5	0,6915	2,5	0,9237	4,5	0,9566
1,0	0,8413	3,0	0,9286	5,0	0,9600
1,5	0,93319	3,5	0,9376		

მაშინ სიონის წყალსაცავის ნორმალური ფუნქციონირების ხანგრძლივობის დრო ტოლია:

$$t = \frac{1000}{18.9} \left[\frac{2 + 1.88^2 \cdot 0.0026^2}{2} \pm \frac{\sqrt{(4 + 1.88^2 \cdot 0.0026^2)1.88^2 \cdot 0.0026^2}}{2} \right] = 53 \text{ წელიწადი.}$$

ანუ, სიონის წყალსაცავის მოწყვლადი მდგომარეობის დადგომის ალბათური დრო (წყალცვლის გათვალისწინების გარეშე) შეიძლება დადგეს 53 წლის ექსპლუატაციის შემდეგ. ნათელია, რომ რაც უფრო მაღალია წყალსაცავის წყალცვლის მნიშვნელობა, წყალსაცავი მით უფრო მედეგია დამაბინძურებელი ნივთიერებების მიმართ.

განხილული მაგალითი არ შეიძლება ჩაითვალოს ერთადერთ სწორ გადაწყვეტილებად, რამდენადაც წყალსაცავის არასასურველი მდგომარეობა შეიძლება გამოიწვიოს რადიოაქტიური დაბინძურების ან სხვა ნივთიერებების ჩადინებამ, რომელთა უმნიშვნელო მოცულობამაც კი შეიძლება წყალსაცავის მოწყვლადი მდგომარეობა უფრო ადრე გამოიწვიოს.

ამოცანა 2.

ჟინვალის წყალსაცავის ნაპირზე აგარაკების ექსპლუატაციის ხანგრძლივობის გაანგარიშებისას განმსაზღვრელი პარამეტრია – აბრაზიის ინტენსივობა. ჩვენი კვლევების თანახმად დადგინდა, რომ ჟინვალის წყალსაცავის მარჯვენა ნაპირზე განლაგებულია აგარაკების კაპიტალური ნაგებობები თავისი კომუნიკაციებით სულ რაღაც 30 მ-ის მანძილზე. რამდენი დრო დასჭირდება 30 მ მანძილზე აშენებული ობიექტების მოწყვლადი მდგომარეობის დადგენას ნაპირების აბრაზიის გამო, თუ $P = 0,975$, $r = 0,025$, $z = 1,96$.

ამ შემთხვევაში განმსაზღვრელი პარამეტრის – აბრაზიის სიგანე ერთი წლის მანძილზე არის 30 მ. აბრაზიის ინტენსივობის ყოველთვიური დაკვირვებების საფუძველზე დადგინდა, რომ აბრაზიის სიჩქარეა $m = 0,09$ მ/თვეში. ობიექტი გახდება მოწყვლადი, თუ გარეცხილი ნაპირი მიუახლოვდება წყალსაცავის წყლის ზედაპირს 5 მ-ით, ანუ როდესაც აბრაზიის სიგანე მიაღწევს $30 - 5 = 25$ მ-ს. სტატისტიკური

მონაცემების დამუშავებისას დადგინდა, რომ $m = 0,09$, $\sigma = 0,01$, $\nu = 0,25$.

მოცემული საიმედოობის მნიშვნელობას $P = 0,975$ შეესაბამება ნორმირებული სიდიდე $z = 1,96$. მაშინ, ობიექტის მოწყვლადი მდგომარეობის დადგენისათვის საჭირო დრო იქნება (ანუ წყალსაცავის ნაპირის $30 - 5 = 25$ მ აბრაზისათვის):

$$t = \frac{25}{0.09} \left[\frac{2 + 1.96^2 \cdot 0.25^2}{2} \pm \frac{\sqrt{(4 + 1.96^2 \cdot 0.25^2)1.96^2 \cdot 0.25^2}}{2} \right] = 45 \text{ წელიწადი.}$$

ამოცანა 3.

დაბინძურების განმსაზღვრელი ფაქტორია წყალბადის (Ph) მაჩვენებელი. თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ მთლიანობაში სიონის წყალსაცავის დამაბინძურებელი ნივთიერებების ბალანსი შედარებით გაწონასწორებულია, ანუ მდინარეებიდან შემოსული და გამოშვებული წყლის რაოდენობა ერთი წლის მანძილზე ტოლია*, ასევე, თუ გავითვალისწინებთ განმსაზღვრელი პარამეტრის – წყალბადის მაჩვენებელი $Ph = 6,75$ და სიონის წყალსაცავის კრიტიკული მდგომარეობის მაჩვენებელი $Ph = 6,5$, მაშინ წყალსაცავის უტყუარი ფუნქციონირება იანგარიშება ფორმულით:

$$P_{(t)} = \phi \left[\frac{C_k - C}{\delta} \right], \quad (X.3.5)$$

სადაც $\delta = \frac{0,2C}{6} = 0,033 \cdot 6,5 = 0,214$

რადგან ლანდშაფტის კომპონენტების დეგრადაცია მრავალფაქტორიანია, მაშინ შეიძლება გამოვიყენოთ ჰაუსის ნორმალური განაწილება, რომლის დროს „სამი სიგმის“ წესის გამოყენება დასაშვებია, ან:

$$P_{(t)} = \phi \left[\frac{6.5 - 6.75}{0.214} \right] = \phi[1.168] \quad P_{(t)} = 0.91.$$

რისკი $r = 1 - P = 1 - 0,91 = 0,09$. აქედან გამომდინარეობს, რომ წყალდამცავი ზომები მაინც სასარგებლოა, რამდენადაც $r < 0,01$ (ცხრ. X.3.3). როგორც ჩანს, ჩვენ შემთხვევაში წყალდამცავი ღონისძიებების ჩატარება სასარგებლოა. ანალოგიური გამოთვლები შეიძლება ჩატარდეს ყველა სახის დამაბინძურებელი ნივთიერებებისთვის.

ცხრილი X.3.3

არახელსაყრელი ხდომილების დადგომის სიხშირის შესაბამისი რისკების მნიშვნელობები

$r > 0,2$	რისკი ხშირია – დაბინძურების მნიშვნელობა ძალიან მაღალია და ტვირთვის კრიტიკულ მნიშვნელობაზე. წყალდამცავი ღონისძიებების ჩატარება აუცილებელია.
$0,1 < r < 0,7$	რისკი ალბათურია – დაბინძურება კრიტიკული მნიშვნელობის ფარგლებშია. წყალდამცავი ღონისძიებების ჩატარება აუცილებელია.
$0,01 < r < 0,1$	რისკი იშვიათია - წყალდამცავი ღონისძიებების ჩატარება სასარგებლოა.
$r < 0,01$	რისკი ძალიან იშვიათია – წყალდამცავი ღონისძიებების ჩატარება არ არის აუცილებელი.

*სიონის წყალსაცავის წყალცვლის პერიოდი ერთი წელია

ამგვარად, საიმედოობისა და რისკის თეორიის დახმარებით, ფორმულირებულია წყალსაცავების მდგომარეობის შეფასების ამოცანა. მიღებულია მოდელები და კრიტერიუმები, რომლებიც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს სხვადასხვა დამაბინძურებელი ფაქტორების მოქმედების პოტენციური საშიშროების პირობები; ბუნებრივია, მიღებული გადაწყვეტილებები საჭიროებს შემდგომ გამოკვლევებს.

X.4. ფაქტორების ექსპერტული შეფასების (დელფის) მეთოდი

ტალღების ჰიდრავლიკის შესწავლის დარგში დღეისთვის მრავალი წინააღმდეგობრივი მეთოდები არის დაგროვილი და გავრცელებული. პროცესთა ბუნებაზე კი ურთიერთსაწინააღმდეგო შეხედულებებია. განმსაზღვრელი ფაქტორებისა და კრიტერიუმების რაოდენობრივ შეფასებაში არ არის ერთიანობა, ურთიერთსაპირისპიროა აგრეთვე შეხედულებები მოდელირების ხერხებზეც. სულ უფრო იზრდება საანგარიშო ფორმულათა რიცხვი. ამავე დროს, მეცნიერების განვითარების დონე უკვე თხოულობს პრობლემის თანამედროვე გადაწყვეტას. ამის საშუალებას იძლევა სისტემური მეთოდები – **ექსპერტული შეფასება, ფაქტორული ანალიზი და სახეთა გარჩევა.**

წყალსაცავებზე ტალღური პროცესების შესწავლისას **ექსპერტული შეფასებების** ძირითადი ეტაპებია: ექსპერტთა ორგანიზაცია; თვით ექსპერტიზის ჩატარება უნივერსალური ანკეტის შევსებით; ექსპერტიზის შედეგების ანალიზი და დამუშავება; პროგრამის შედგენა ექსპერტიზის შედეგების ბალური სისტემით შესაფასებლად [Глушков М. О., 1969].

ფაქტორების ექსპერტული შეფასება ჩატარებულია ორ ეტაპად.

პირველ ეტაპზე დამუშავებულია წყალსაცავებზე ტალღების პროგნოზირების შესაძლო ყველა არსებული რეკომენდაცია, რომლის შედეგად გაანალიზებულია სამეცნიერო ლიტერატურა. ყოველი ლიტერატურული წყაროს განხილვის საფუძველზე ამოიკრიფა მონაცემები ფაქტორებსა და მათ ინფორმაციულობაზე. ქრონოლოგიური წესით შედგენილია ავტორების ნუსხა და მათი პუბლიკაციის გამოცემის წელი, მოყვანილ იქნა ყველა ფაქტორის ჩამონათვალი, ფორმულები და მათი გამოყენების საზღვრები [იორდანიშვილი ი., 1998]. მაგალითად, ფერდოზე **ტალღის სიმაღლის** ტრანსფორმაციის შესწავლისადმი მიძღვნილ შესაძლო ყველა არსებულ შრომათა საფუძველზე დგინდება ავტორებისა და საანგარიშო ფორმულების ჩამონათვალი.

მეორე ეტაპზე (ექსპერტთა უშუალო გამოკითხვა) შედგენილია ანკეტები, რომელთა სტრიქონებში მოყვანილია სამეცნიერო ლიტერატურის ყველა ფაქტორის ანალიზი, ხოლო სვეტებში – ფაქტორთა სამი ჯგუფი მათი გავლენის ხარისხის (ბალიანობის) მიხედვით. გავლენის ხარისხის მიხედვით ფაქტორთა ბალიანობის შესაფასებლად მიღებულია შემდეგი სქემა: ძლიერი გავლენა – 5, საშუალო – 3 და სუსტი – 1 ბალი. ფაქტორთა სამი ჯგუფის საზღვრებად მიღებულია შემდეგი სამი (I, II, III) სქემა: I – 4 ბალზე მეტი, II – 4 ბალი და III – 2 ბალზე ნაკლები.

კვლევების ამ ეტაპის ჩატარებისას რიგ მკვლევართან უშუალო შეხვედრის შესაძლებლობა არ გვქონდა, ამიტომ მკვლევართა აზრი ჩამოყალიბდა მათ მიერ შემოთავაზებული ფორმულების ანალიზით: პირველ ადგილზე აღინიშნება ძირითადი მოქმედი ფაქტორი; შემდეგ ის ფაქტორები, რომელთა ზემოქმედება უფრო ნაკლები ინტენსივობით გამოირჩევა და ა.შ.

მიღებული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე შედგენილია ფერდობზე ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლეზე მოქმედი ფაქტორების აპრიორული რანჟირების (რანგების) მატრიცის ცხრილი. ანალიზის ჩატარებისას გამოყოფილია შემდეგი შვიდი ძირითადი ფაქტორი: 1) ფერდის დახრილობა $X_1(m)$; 2) „ღრმა“ წყალში ტალღის დახრილობა $X_2(h_H / \lambda_H)$; 3) საანგარიშო სიღრმე $X_3(H)$; 4) ფერდოს ხორკლიანობის კოეფიციენტი $X_4(K_r)$; 5) ტალღის სიმაღლე „ღრმა“ წყალზე $X_5(h_H)$; 6) ნაპირთან ტალღის ფრონტის მოსვლის კუთხე $X_6(a')$; 7) ტალღის სიმაღლის უზრუნველყოფა $X_7(m\%)$.

ყველა ექსპერტის აზრთა შეთანხმებულობის ხარისხი დადგენილია კონკორდაციის კოეფიციენტის (K) მნიშვნელობის საფუძველზე, რომელიც ახასიათებს ექსპერტთა აზრის შეთანხმებულობას და გვიჩვენებს მის შემთხვევითობის ხარისხს:

$$K = \frac{S}{1/12N^2(n^2 - n) - n \sum_{i=1}^n T_i}, \quad (X.4.1)$$

სადაც S არის გადახრების კვადრატების ჯამი, N – ექსპერტთა რიცხვი, n – რანგების მატრიცის ყოველ სტრიქონში i -ური ნიშნის რანგების რიცხვი; T_i – რანგების საშუალო ჯამიდან გადახრა.

გაანგარიშების შედეგად მიღებული კონკორდაციის კოეფიციენტის მნიშვნელობა მიუთითებს სპეციალისტების აზრთა შორის უთანხმოებას. რანგების საშუალო აპრიორული დიაგრამის მიხედვით დგინდება ყველაზე უფრო მეტად მნიშვნელოვანი ფაქტორები. მოქმედ ფაქტორთა ექსპერტული შეფასების მეთოდი აპრიორული ხასიათისაა.

მაგალითი 1.

ფერდზე ტალღების სიმაღლის (h_i) ტრანსფორმაციაზე მოქმედი ფაქტორები ექსპერტული (დელფის) შეფასების მაგალითი

ფერდზე ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლისათვის (h_i) მოქმედი ფაქტორების ექსპერტული შეფასება ჩატარდა ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლის არსებული ფორმულების ანალიზის გამოყენებით. შედგენილია ფაქტორების რანჟირებული აპრიორული რანგების მატრიცის ცხრილი (ცხრ. X.4.1; X.4.2). ანალიზის დროს გამოყოფილია შვიდი ძირითადი ფაქტორი: ფერდის დახრილობა $X_1(m = \text{ctg } \alpha)$, ტალღის დახრილობა „ღრმა წყალზე“ $X_2(h_H / \lambda_H)$, წყლის საანგარიშო სიღრმე $X_3(H)$, ფერდოს ხორკლიანობის კოეფიციენტი $X_4(K_r)$, ტალღის სიმაღლე „ღრმა“ წყალზე $X_5(h_H)$, ტალღების ფრონტის ნაპირთან მოსვლის კუთხე $X_6(\beta)$, ტალღების სიმაღლის უზრუნველყოფა $X_7(m\%)$.

ფერღზე ტალღების სიმაღლის (h_i) ტრანსფორმაციის არსებული ძირითადი ფორმულების ექსპერტული შეფასება

№	ავტორი	წელი	ფორმულა	შემოკლებული ფორმულა	წყლის სიღრმის (H) და ღრმა წყალზე ტალღის სიმაღლის (h_H) ფაქტორი	დამატებითი კოეფიციენტის მნიშვნელობა	გამოყენების საზღვრები
1	2	3	4	5	6	7	8
ნატურალური კვლევების საფუძველზე მიღებული დამოკიდებულებები							
1	გაიარი	1914	$\frac{h_i}{h_H} = \left(\frac{h_H}{H_i}\right)^{1/2}$	$h_i = \left(\frac{h_H}{H_i}\right)^{1/2} \cdot h_H$			$m=1:100;$ $t=const;$ $H_H = \frac{\lambda_H}{3}$
2	კუზნეცოვი პ.ა.	1944	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1 - 0,012 \frac{\Delta\lambda}{0,5(H_i - H_H)}}{1^{K(H_i+H_h)} \cdot \sqrt{\frac{H_H}{H_i}}}}$	$h_i = K_H \cdot h_H \cdot \left(\frac{h_H}{H_i}\right)^{1/2}$	$K_H = \left[1 - \frac{0,09\lambda_H}{H_i + H_H} \times \frac{1}{l^k (H_i + H_H)}\right]^{1/2}$		$\frac{\lambda_H}{h_H} = const$ $\Delta\lambda = (10 - 20)h_H$
3	ზიგელოუ ტ. ედმონდსონი ვ.	1951	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{2n \frac{U_i}{U_H}}}$	$h_i = K_H^{1/2} \cdot K_W^{1/2} \cdot h_H$	$K_H = \left(1 + \frac{2kH_i}{Sh2kH_i}\right)$	$K_u = \frac{U_i}{U_0}$	
4	შიშოვი ნ.დ.	1952	$\frac{h_i}{h_H} = 1,2 \sqrt[3]{\frac{H_H}{H_i}}$	$h_i = 1,2h_H \cdot \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{1/3}$			$\rho = 1\%$ $i < 0,02 \div 0,03$
5	გოროდეცკი ს.დ.	1954	$\frac{h_i}{h_H} = l^{0,123(H-H_H)}$	$h_i = 1,2h_H \cdot \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{1/3}$			$\rho = 1\%$ $i < 0,02 \div 0,03$
6	ივანოვი ა.ა.	1955	$\frac{h_i}{h_H} = \frac{\sqrt{H_i}}{\sqrt{H_i - b\lambda_H}}$	$h_i = K_H h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{-1/2}$	$K_h = \left[\frac{H_h}{H_i + 0,2K_m \lambda \left(1 + \frac{H_i + H_H}{2}\right)} \right]^{1/2}$	$K_m = \left(\frac{m-1}{m+1}\right)^2$	
7	ვილენსკი ი.გ. გლუხოვსკი ბ.ბ.	1957	გრაფიკი: $h_{i\%} = f\left(\frac{H_H}{H_i}\right)$				

1	2	3	4	5	6	7	8
ლაბორატორიული ექსპერიმენტების საფუძველზე მიღებული დამოკიდებულებები							
8	ზოჟიჩი პ.კ.	1948	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{H_i}{H_h}}$	$h_i = h_H \left(\frac{H_H}{H_i} \right)^{-1/2}$			$m=6 \div 25$ $0,35\lambda_H \geq H_H \geq 0,1 / \lambda_h$
9	ზოჟიჩი პ.კ.	1949	$\frac{h_i}{h_H} = 1,74 \sqrt{\frac{H_i}{\lambda_H}}$	$h_i = K_\lambda h_H \left(\frac{H_H}{H_i} \right)^{-1/2}$	$K_\lambda = \left(\frac{3H_i}{\lambda_{Hi}} \right)^{1/2}$		$0,35\lambda_H \geq H_H \geq 0,25 / \lambda_H$
10	სმირნოვი ა.ა.	1960	$\frac{h_i}{h_H} = 0,56 \sqrt{\frac{\lambda_H}{H_i}}$	$h_i = K_\lambda h_H \left(\frac{H_H}{H_i} \right)^{-1/4}$	$K_\lambda = 0,56 \left(\frac{\lambda_H}{H_i} \right)^{1/4}$		$0,02 \leq i \leq 0,2;$ $\frac{H_i}{H_H} < 0$
11	კოჟევნიკოვი მ.რ.	1972	გრავიტი: $\frac{h_i}{h_H} = f \left(\frac{H_i}{\lambda_H}, \frac{h_H}{\lambda_H} \right)$				$\frac{h_H}{\lambda_H} = 0,02 \div 0,1$
12	ერი	1945	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt[4]{\frac{H_H}{H_i}}$	$h_i = h_H \left(\frac{H_H}{H_i} \right)^{1/4}$			$t = const$ $E = const$
13	სტოკსი	1880	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{ctgKH_i}{2KH_i} + \frac{ctgKH_i}{Sh2KH_i}}$	$h_i = h_H K_H^{1/2}$	$K_H = \frac{ctgKH_i}{2KH_i} + \frac{ctgKH_i}{Sh2KH_i}$		$H_i < 0,5\lambda_H$
14	ანდრიანოვი ზ.	1939	$\frac{h_i}{h_H} = \frac{-0,25Km_\Delta X + K_\lambda \lambda^{1/2}}{0,25Km_\Delta X + K_X}$	$h_i = K_H^{1/2} \cdot h_h$	$K_\lambda = \sqrt{\lambda_{i-1}\lambda_i + (\lambda_{i-1} - \lambda_i)}$	$K_m = \frac{1,07}{ShKH_{\text{ბაზ}}} + 0,016$	
15	ო'ზრაინი მ.ნ.	1942	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{2H} \frac{U_i}{U_H}}$	$h_i = K_H^{-1/2} \cdot K_u^{1/2} h_H$	$K_H = \left[1 + \frac{2KH_i}{\sin KH_i} \right]$	$K_u = \frac{U_p}{U_i}$	
16	მიში მ.პ.	1944	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{thKH_i \left[1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i} \right]}}$	$h_i = K_H^{1/2} \cdot h_H$	$K_H = thKH_i \left[1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i} \right]$		$H_i > 0,15\lambda_H$

ცხრილი X.4.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8
17	კრილოვი ი.მ.	1948	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{U_H - H_H}{UH_i}}$	$h_i = K_H h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{1/2}$		$K_u = \left(\frac{U_0}{U_i}\right)^{1/2}$	
18	კონდრატიევი ნ.ე.	1950	$h_i = \sqrt{\frac{4N}{\gamma \left(1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i}\right)}}$	$h_i = K_H^{-1/2} \cdot K_4^{1/2}$	$K_H = 1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i}$	$K_u = \frac{UN}{\gamma}$	
19	მუნვი ვ.	1951	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt[3]{\left(\frac{H_H}{H_i}\right)^4}$	$h_i = h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{4/3}$			
0	ზრასლავსკი ა.	1952	$h_i = \left[\frac{U_0}{U} h_H^2 + \frac{8}{U} (X - X_0) \times \right. \\ \left. \times (N_0 - N)\right]^{0.5}$	$h_i = K_u$	$\frac{h_i}{h_H} = \left(\frac{H_i}{\lambda_H}\right)^{1/5} \cdot \sqrt{\frac{2thKH_i \cdot th2KH_i}{thKH_i + th2KH_i}}$	$K_u = \left[\frac{U_0}{U} h_H^2 + \frac{8}{U} (X - X_0) \cdot \right. \\ \left. \cdot (N_0 - N)\right]^{0.5}$	
21	ლაბზოვსკი ნ.ა.	1956	$\frac{h_i}{h_H} = \left(\frac{H_i}{\lambda_H}\right)^{1/5} \cdot \sqrt{\frac{2thKH \cdot th2KH}{thKH + th2KH}}$	$h_i = K_H h_H$	$K_H = \left(\frac{H_i}{\lambda_H}\right)^{1/5} \cdot \sqrt{\frac{2thKH_i \cdot th2KH_i}{thKH_i + th2KH_i}}$		$\lambda_H \geq H_i \geq 0$
22	მაგენსი ს.	1958	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{2h} \cdot \frac{\lambda_H \ell_H}{\lambda_i \ell_H}}$	$h_i = h_H K^{-1/2} \left(\frac{\lambda_H}{h_H}\right)^{1/2}$	$K_H = 1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i} \cdot \frac{\ell_i}{\ell_H}$		
23	რელი	1958	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{1}{2h_H} \cdot \frac{U_H}{U_i}}$	$h_i = K_u^{1/2} \cdot K_H^{-1/2} \cdot h_H$	$K_H = 1 + \frac{2KH_i}{Sh2KH_i}$	$K_u = \frac{U_H}{U_i}$	
24	ლოგინოვი ვ.ნ.	1958	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt[3]{\frac{1}{2h_H} \cdot \frac{H_H}{H_i}}$	$h_i = h_H \left(\frac{H_H}{H_i}\right)^{4/3}$			
25	ზაშვიროვი გ.ს.	1961	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{U_H}{U_i} + \frac{8h_H}{\gamma U} \phi_x X}$	$h_i = h_H K_u^{1/2}$		$K_u = \frac{U_0}{U} + \frac{8h_i}{\gamma h U_i} \phi_x X$	$X = (2 \div 5)\lambda$
26	კრასნოჟონი გ.ფ. სიდოროვა ა.გ.	1961	$\frac{h_i}{h_H} = f\left(\frac{H_i}{\lambda_i} \cdot \frac{h_H}{t^2}\right)$				
27	კოჟევნიკოვი მ.	1972	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{2ch^2KH_i}{2KH_i + Sh2KH_i}}$	$h_i = h_H K_H^{1/2}$	$K_H = \left(\frac{2ch^2KH_i}{2KH_i + Sh2KH_i}\right)^2$		

1	2	3	4	5	6	7	8
28	ბრეტშნიდერი კლ.	1970	$\frac{h_i}{h_H} = K_p K_\Delta K_\vartheta \left(\frac{n_u U_u}{nU} \right)^{1/2}$	$h_i = h_H K_H^{1/2} K_4^{1/2} \cdot K$	$K_H = \left(\frac{1}{\frac{2KH_i}{Sh2KH_i}} \right)^2$	$K_u = \frac{U_H}{U_i}$ $K = K_p K_\Delta K_\vartheta$	
29	გაგოშიძე მ.	1973	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt{\frac{S_0 - \sin(180 - 2\alpha) + S_i + \cos(180 - 2\alpha) \cdot \frac{sh^2 K_0 H}{sh^2 K_0 H} \times \frac{Sh^2 K_0 H}{Shk_0 H} \times \frac{thk_i H_0 K_i s}{thk_{-H} K S_i}}{S_0 - K_m + \frac{K_m K_{\lambda H}}{K_{\lambda H}}}}$	$h_i = h_H \sqrt{\frac{S_0 - K_m + \frac{K_m K_{\lambda H}}{K_{\lambda H}}}{S_i}}$	$K_{\lambda H} = Sh^2 K_0 H_i thK_0 H + thK_i H_i$	$K_m = \sin(180 - 2\alpha)$ $K_m^1 = \cos(180 - 2\alpha)$ $K = \frac{2\pi}{\lambda_H}$	$\alpha < 0,02$
30	პელინოვსკი ე.ნ.	1977	$\frac{h_i}{h_H} = \left(\frac{H}{H_H} \right)^{-1}$	$h = K_H \cdot h_H$	$K_H = \left(\frac{H}{H_H} \right)^{-1}$		$h \approx H^{-1}$ ერთეული ტალღა
31	ვოინიზ-სიანოჟენცკი ტ.გ.	1979	$\frac{h_i}{h_H} = \sqrt[4]{\frac{\lambda H_i}{8\pi H X}}$	$h_i = K_m \cdot K_\lambda \cdot K_H$	234		$\alpha < 0,02$
32	პელინოვსკი ე.ნ.	1981	$\frac{h_i}{h_H} = 2\pi \sqrt{\frac{2X}{\lambda_i}}$	$h_i = K \cdot K_\lambda \cdot K_X \cdot h_H$	$K_\lambda = \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$	$K = 2\pi\sqrt{2}$ $K_x = \sqrt{2}$	ცუნამის ტალღა
33	პეჩერკინი ლ.ლ.	1981	$\frac{h_i}{h_H} = 0.849 \left(\frac{H_H}{\lambda_H} \right)^{1.5} \cdot \frac{W}{h_H}$	$h_i = K_w \cdot K_H \cdot K_\lambda \cdot h_H$	$K_H = H^{1.5}$	$K_w = 0,849W$	$H_H < 0,6\lambda_H$
34	კანტარჯი ი.გ.	1995	$\frac{h_i}{h_H} = \frac{H}{H_H} \left[\left(\frac{H}{H_H} \right)^{1/2} - g \right] - g^{-1/2} \frac{H^{-1/2}}{H_H} \cdot \frac{H_i^{-1/2}}{H_H}$	$h_i = K_H \cdot (K_H^{1/2} - g) \cdot (1 - g^{-1/2} \cdot K^{-1/2}) \cdot h_H$	$K_H = \frac{H_i}{H_H}$		$m = 50 - 20$

ტალღის სიმაღლის (h_i) ტრანსფორმაციაზე მოქმედი რანჟირებული აპრიორული ფაქტორების რანგების მატრიცა

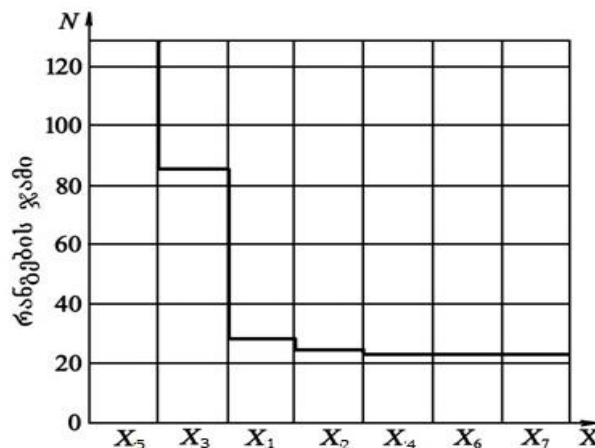
ექსპერტების ცხრილი	$X_1(m=ctg\alpha)$	$X_2(h_H)$	$X_3(H_i)$	$X_4(K_r)$	$X_5(h_H)$	$X_6(\beta)$	$X_7(m\%)$
1	2	3	4	5	6	7	8
$\sum_{i=1}^N$	36	30	84	28	130	28	28

ყველა ექსპერტის აზრის შეთანხმების ხარისხი დადგენილია „კონკორდაციის“ კოეფიციენტის (K) საფუძველზე, რომელიც ახასიათებს ექსპერტების აზრის შეთანხმებას:

$$K = \frac{S}{\frac{1}{12}T^2(N^3 - N) - N \sum_{i=1}^N T_i} = 0,75, \tag{X.4.2}$$

სადაც S – გადახრების კვადრატების ჯამია, T – ექსპერტების რაოდენობა N რანგების მატრიცის ყველა სტრიქონში, i -ური ნიშან-თვისების რანგების რაოდენობა. კონკორდაციის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ($K = 0,75$) მიუთითებს სპეციალისტებს შორის არასრული კანონზომიერების არსებობაზე.

რანგების საშუალო აპრიორული დიაგრამის აგებით დადგინდა, რომ უდიდესი მნიშვნელობით გამოირჩევა შემდეგი ფაქტორები: (h_H) – ტალღის სიმაღლე ღრმა წყალზე, H_i წყლის საანგარიშო სიღრმე და ($m = ctg\alpha$) – ფერდის დახრილობა (ნახ. X.4.1).



ნახ. X.4.1. ტალღის სიმაღლის ტრანსფორმაციისას აპრიორული საშუალო რანგების დიაგრამა.

მაგალითი 2.

მთის წყალსაცავების ეკოლოგიური საიმედოობის შეფასება

მთიან რეგიონებში წყალსაცავების დაპროექტებისას შედგენილია ეკოლოგიური მოთხოვნების რანჟირებული ფაქტორების ნუსხა (ცხრ. X.4.3).

მთის წყალსაცავების ეკოლოგიური საიმედოობის მოთხოვნათა ნუსხა

№	ლონისძიებები	მოთხოვნები	საექსპერტო შეფასება	
			N	ნN
1	წყალდამცავი	წყალდამცავი ზონის და ტყის ზოლის შექმნა წყალსაცავში ჩამდინარე მდინარეთა გასწვრივ	0,9	0,1
2	ეროზიის საწინააღმდეგო	–	0,6	0,1
3	ტყის დაცვა წყალსაცავის აუზში	–	0,5	0,1
4	ფლორის შენარჩუნება	შენარჩუნება მცენარეთა პირველყოფილი სახით; ნაკრძალების შექმნა	0,75	0,2
5	ფაუნის შენარჩუნება	თევზდაცვითი ღონისძიებები	0,85	0,1

ეკოლოგიური საიმედოობის მნიშვნელობები მიღებულია ექსპერტული (დელფის) მეთოდის გამოყენებით [Мирицхулава Ц.Е., 1974; Померанец В.И., 1991; Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.И., 1996; იორდანიშვილი ი., 1997, 2001, 2000, 2005].

ფაქტორთა გავლენა აისახება (N) რიცხვით, რომლის მნიშვნელობაა $0 \leq N \leq 1$. წყალსაცავების ეკოლოგიური საიმედოობის შესაფასებლად გამოყენებულია ეკოლოგიური მოთხოვნების სრული ($N_{სრ}$) ან არასრული ($N_{არასრ}$) აღრიცხვის მნიშვნელობები:

$$N_{სრ} = \sum_{i=1}^n Ni; \quad N_{არასრ} = \sum_{i=1}^m Ni, \quad (X.4.3)$$

სადაც n, m , შესაბამისად, ყველა და გაუთვალისწინებელი ეკოლოგიური მოთხოვნების რიცხვია; $m \leq n$.

ჩვენ შემთხვევაში: $N_{სრ} = 3,6$ და $N_{არასრ} = 2,0$.

მაშინ წყალსაცავების ეკოლოგიური საიმედოობის მნიშვნელობა (R) ტოლია [Мирицхулава Ц.Е., 1974]:

$$R = \frac{1}{2\pi} \int_{Z_0}^{\infty} \ell^{0,5Z_0^2} dZ_0, \quad (X.4.4)$$

სადაც
$$Z_0 = (N_{არასრ} - N_{სრ}) / \sqrt{6_{არასრ}^2 + 6_{სრ}^2}, \quad (X.4.5)$$

ხოლო $(N_{არასრ}^2 + N_{სრ}^2)$ დისპერსიის ჯამია. ჩვენ შემთხვევაში $N_{არასრ}^2 = 0,03$; $N_{სრ}^2 = 0,08$.

ეკოლოგიური საიმედოობის მნიშვნელობა ყველა მოთხოვნის შესრულებისას ტოლია – $R_{სრ} = 0,08$, ხოლო გაუთვალისწინებისას – $R_{არასრ} = 0,90$.

X.5. ფაქტორული ანალიზის მეთოდი

XX საუკუნის მეორე ნახევრიდან ინტენსიურად განვითარდა სტატისტიკური კვლევების ახალი მეთოდი – ფაქტორული ანალიზი [Окунь Я., 1976]. ფაქტორული ანალიზის გამოყენებით შესაძლებელია რთული მოვლენების არსის ახსნა, ურთიერთდამოკიდებული და არაურთიერთდამოკიდებული, ძირითადი და არაძირითადი

ნიშან-თვისებების განსაზღვრა. ფაქტორული ანალიზის ძირითადი დებულებები შეიძლება ჩამოვაცალიბოთ შემდეგნაირად: მოვლენები კვლევების განსაზღვრულ მიმართულებაში, მიუხედავად თავისი ცვლილებებისა და არაერთგვაროვნებისა, შეიძლება აღწერილი იყოს მცირე რაოდენობის ფუნქციონალური ერთეულებით, ფაქტორებით ან პარამეტრებით. ფაქტორული ანალიზის მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია გამოვავლინოთ და დავადგინოთ ნიშან-თვისებებს შორის დამოკიდებულება, მათი მნიშვნელობა და გავლენის ხარისხი. ფაქტორული ანალიზის მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია კორელაციური მატრიცების შიდა სტრუქტურის გამოკვლევა, ლატენტური ან ფარული ფაქტორების გამოვლენა.

ფაქტორების გამოყოფის პროცესი ტარდება კორელაციის კოეფიციენტების მატრიცის თანამიმდევრული გარდაქმნით. მიღებული ფაქტორული დატვირთვები კოეფიციენტის სახითაა და წარმოადგენს იმ საზომს, რომლის განსახილველი ფაქტორი დამოკიდებულია შესაბამის ცვლადზე.

ფაქტორული ანალიზი – ხარისხობრივია, იგი არ იძლევა ყველა მოქმედი ფაქტორების რაოდენობრივ შეფასებას.

მაგალითი 1.

მთის წყალსაცავების ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლის ($h_{runup}(X_9)$) ფაქტორული ანალიზის შედეგები დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე. ამ ამოცანის ამოხსნა შესაძლებელია ტალღის ფერდზე აგორების სიმაღლის $h_{runup}(X_9)$ მნიშვნელობების შემდეგი რვა ცვლადი ფაქტორის საფუძველზე: საწყისი ტალღის სიმაღლე ღრმა წყალზე – $X_1(h_H)$; ფერდის დახრილობა – $X_2(m = ctg\alpha)$; ტალღის დამრეცობა – $X_3(\lambda_H/h_H)$; ფერდის ხორკლიანობა და ფორიანობა – $X_4(K_f)$; ტალღების სიმაღლის უზრუნველყოფა – $X_5(m\%)$; ტალღების ნაპირთან მოსვლის კუთხე – $X_6(\beta)$; ქარის სიჩქარე – $X_7(V_w)$; წყლის სიღრმე – $X_8(H)$.

ამოცანის გადაწყვეტა შესაძლებელია ფაქტორული ანალიზის ცენტროიდული მეთოდის გამოყენებით. გეომეტრიულ ინტერპრეტაციაში მეთოდი ითვალისწინებს ვექტორების ცენტრის და მატრიცის სტრიქონების დადგენას და შემდეგ – ვექტორების კოორდინატების საწყისში გადატანას. ფაქტორების გამოყოფის პროცესი ტარდება კორელაციის კოეფიციენტების მატრიცის თანამიმდევრული გარდაქმნით. მიღებული ფაქტორული დატვირთვები კოეფიციენტის სახითაა და წარმოადგენს იმ საზომს, რომლის განსახილველი ფაქტორი დამოკიდებულია შესაბამის ცვლადზე.

ფაქტორული ანალიზის რეალიზაცია ტარდება პროგრამის სახით, რომლის ინტერფეისიც შედგენილია ღილაკის მინიმალური რაოდენობიდან: „n“ – საწყის მონაცემების ფაილის გახსნა, „R“ მომდევნო ფაქტორის გაანგარიშებაზე გადასვლა; „S“ – მიმდინარე ფაქტორის შენახვა ფაილში. ფაილის ფორმატის შენახვისთვის შერჩეულია CDV (comma delimited values) ფორმატი [ИорданишвилиИ.К., Варта-новМ.В., ВартановаА.М., 2010].

კორელაციური რედუცირებული მატრიცის პირველი ნაბიჯი მოყვანილია ცხრილში X.5.1.

ცხრილი X.5.1

ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლის (h_{runup})
ფაქტორული ანალიზის პროგრამა (ინტერფეისი)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	
1	0,543	-0,194	0,005	-0,067	0,111	-0,091	0,215	0,096	0,543	
2	-0,194	0,447	0,32	0,224	0,123	0,267	0,121	0,142	-0,447	
3	0,005	0,32	0,422	0,422	0,165	0,91	0,031	-0,274	0,163	
4	-0,067	0,224	-0,422	0,422	-0,049	0,069	-0,221	0,296	0,244	
5	0,111	-0,122	-0,168	-0,049	0,163	-0,103	0,152	-0,137	-0,103	
6	-0,091	0,262	0,01	0,069	-0,103	0,371	-0,042	-0,371	-0,163	
7	0,215	-0,121	-0,091	-0,271	0,152	-0,042	0,271	-0,044	0,032	
8	0,096	0,143	-0,274	0,296	-0,137	-0,371	-0,044	0,371	0,145	
9	0,543	-0,447	0,163	0,244	0,103	-0,163	0,032	0,145	0,543	
ჯამი (X)	0,618	-0,576	-1,087	0,023	-0,419	-0,429	-0,16	-0,146	0,413	1,7629411
Co13	0,607	0,064	1,087	0,367	-0,082	-0,449	0,002	0,402	0,086	2,58551449
Co16	0,789	-0,46	1,106	0,73	0,123	0,449	0,087	1,144	0,412	4,37991439
Co12	1,178	0,46	0,466	0,282	0,368	0,973	0,329	0,358	1,307	6,22189824
ფაქტორი	0,55	-0,29	-0,284	0,225	0,172	-0,43	0,192	0,393	0,591	1,11887768

ტალღის ფერდზე აგორების სიმაღლის ($h_{runup}(X_9)$) მონაცემებიდან შედგენილია კორელაციური მატრიცა R , ცხრ. (X.5.2). მოქმედი ფაქტორების საბოლოო მატრიცა მოყვანილია ცხრილში X.5.3.

ცხრილი X.5.2

კორელაციური საწყისი მატრიცა

ტესტები	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
X ₁	1	-0,194	0,005	-0,067	0,111	-0,091	0,215	0,096	0,543
X ₂	-0,194	1	-0,32	0,224	-0,122	0,262	-0,121	0,143	-0,447
X ₃	0,005	-0,32	1	-0,422	-0,168	0,01	-0,081	-0,274	0,163
X ₄	-0,067	0,224	-0,422	1	-0,049	0,069	-0,271	0,296	0,244
X ₅	0,111	-0,122	-0,168	-0,049	1	-0,103	0,152	-0,137	-0,103
X ₆	-0,091	0,262	0,01	0,069	-0,103	1	-0,042	-0,371	-0,163
X ₇	0,215	-0,123	-0,081	-0,271	0,152	-0,042	1	-0,044	0,032
X ₈	0,096	0,143	-0,274	0,296	-0,137	-0,371	-0,044	1	0,145
X ₉	0,543	-0,447	0,163	0,244	-0,103	-0,163	0,032	0,145	1

ცხრილი X.5.3

რვა მოქმედი ფაქტორის საბოლოო კორელაციური მატრიცა

ფაქტორები	მოქმედი ფაქტორების დატვირთვა								
	$H_H(X_1)$	$m(X_2)$	$\lambda_H/h_H(X_3)$	$K_r(X_4)$	$m_6(X_5)$	$\beta(X_6)$	$V_w(X_7)$	$H(X_8)$	$h_{runup}(X_9)$
F1	0,55	-0,29	-0,284	0,225	0,172	-0,43	0,192	0,393	0,591
F2	-0,382	0,523	-0,491	0,481	-0,111	0,075	-0,307	0,509	-0,296
F3	0,266	0,084	0,156	0,33	-0,42	0,2	-0,269	0,122	0,515
F4	0,189	0,39	-0,479	0,17	0,23	0,435	0,155	-0,215	-0,192

მიღებულ რედუცირებულ კორელაციურ მატრიცაში სვეტების რაოდენობა განსაზღვრავს იმ ფაქტორის რიცხვს, რომელიც საჭიროა ყველა კორელაციის დასადგენად, ხოლო ყოველი ფაქტორების დატვირთვა განისაზღვრება ფაქტორული მატრიცის სტრიქონებით, შემდეგ კი დგინდება მიღებული ფაქტორების ხარისხი. პრაქტიკული გაანგარიშებისას საკმარისია პირველი სამი-ოთხი აქტიური ფაქტორის შერჩევა, რომელთა რაოდენობა იანგარიშება ტერსტოუნის ფორმულით:

$$m = \frac{2n+1-\sqrt{8n+1}}{2}, \quad (X.5.1)$$

სადაც n არის მოქმედი ფაქტორების რაოდენობა, ხოლო აქტიური ფაქტორების რაოდენობა (m) ტოლია:

$$m = \frac{2,8+1-\sqrt{8 \cdot 8+1}}{2} \approx 4. \quad (X.5.2)$$

ჩატარებული ოპერაციების შემდეგ რვა მოქმედი ფაქტორის საბოლოო მატრიცას აქვს X.5.4 ცხრილი სახე, სადაც ოთხი ტესტი, პრაქტიკულად, ხასიათდება მეოთხე ფაქტორის (K_r) უდიდესი დატვირთვით (მნიშვნელობით). მაშასადამე, პირველი დატვირთვა ფერდის ზედაპირის ხორკლიანობაა (K_r), მეორე – საწყისი ტალღის სიმაღლე (h_H), მესამე – ფერდის დახრილობა ($m = \text{ctg}\alpha$), მეოთხე – ტალღის დამრეცობა (λ_H/h_H) (ცხრ. X.5.4).

ცხრილი X.5.4

ტალღების ფერდზე აგორების სიმაღლეზე (h_{sum}) მოქმედი ფაქტორების რანჟირება

დატვირთვის თანმიმდევრობა	მოქმედი ფაქტორები
1	ფერდის ხორკლიანობა და ფორიანობა (K_r)
2	ტალღის საწყისი სიმაღლე (h_H)
3	ფერდის დახრილობა ($m = \text{ctg}\alpha$)
4	ტალღის დახრილობა (λ_H/h_H)
5	ტალღის უზრუნველყოფა (n°)
6	ტალღის ფერდთან მისვლის კუთხე (β°)
7	ქარის სიჩქარე (V_w)
8	ფერდთან წყლის სიღრმე (H)

მაგალითი 2.

ფერდზე ტრანსფორმირებული მრავალფაქტორული ტალღის სიმაღლის (h_i) მნიშვნელობა კლებადი რანგის მიხედვით ასე ჩაიწერება:

$$h_i = f(h_H, H_i, m, \beta, h_H/\lambda_H, K_r, n^{\circ}). \quad (X.5.3)$$

ანგარიშში გამოყენებულია ნატურული, თეორიული და ექსპერიმენტული მონაცემები, რომელიც ჩატარებულია ფერდზე ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლეზე — აშშ-ის, საფრანგეთის, ინგლისის, იაპონიის, რუსეთის, საქართველოსა და სხვა ქვეყნების მკვლევარების მიერ, ხოლო ამ მონაცემების საბოლოო ანგარიშის შედეგები მოყვანილია ცხრილში X.5.5.

ფერდზე ტალღის ტრანსფორმირებული სიმაღლისა (h_i) და მოქმედი ფაქტორების დამოკიდებულება

№	$m(X_3)$	$(h_H/\lambda_H)X_5$	$(H/\lambda_H) X_2$	$(K_T) X_6$	$(h_H) \vartheta, (X_1)$	$(\beta) X_4$	$(n\%) X_7$	$y (h_i),$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	9,51	0,06	0,025	1,0 ⁰	0,5	0	1	0,6
2	9,51	0,36	0,05	1,0	0,5	10	2	0,65
3	9,51	0,07	0,05	1,0	0,5	20	5	0,74
4	9,51	0,045	0,075	1,0	1,0	30	10	1,04
5	9,51	0,08	0,075	1,0	1,0	40	20	1,02
6	9,51	0,054	0,1	1,0	1,0	50	30	0,85
7	9,51	0,1	0,1	1,0	1,5	60	40	0,82
8	6,30	0,045	0,075	1,0	1,5	70	50	0,72
9	6,30	0,054	0,1	1,0	1,5	80	1	1,53
10	3,07	0,036	0,05	1,0	2,0	90	2	1,55
11	3,07	0,15	0,075	1,0	2,0	0	5	2,01
12	3,07	0,054	0,1	1,0	2,0	20	10	1,52
13	8,14	0,038	0,075	1,0	2,5	20	20	2,40
14	8,14	0,038	0,1	1,0	2,5	30	30	1,78
15	8,14	0,054	0,05	1,0	2,5	40	40	1,63
16	6,30	0,06	0,075	1,0	3,0	50	50	1,57
17	6,30	0,07	0,1	1,0	3,0	60	1	3,19
18	6,30	0,1	0,05	1,0	3,0	70	2	3,88
19	4,31	0,03	0,075	1,0	0,5	80	5	4,91
20	4,31	0,03	0,1	1,0	0,5	90	10	3,22
21	4,31	0,05	0,05	1,0	0,5	0	20	4,30

*) ფაქტორის მონაცემების არარსებობისას მისი კოეფიციენტის მნიშვნელობა ერთის ტოლია.

ტალღის სიმაღლე „ღრმა“ წყალზე (h_H) იცვლებოდა შემდეგ ფარგლებში – $h_H = 0,5 \div 3,0$ მ; ფერდის დახრილობა $m = \text{ctg} \alpha = 0,9 \div 9,5$; ტალღის დახრილობა – $h_H/\lambda_H = 0,028 \div 0,10$; ფერდის ხორკლიანობისა და გამჭოლიანობის კოეფიციენტი – $K_T = 0,7 \div 1,0$; ტალღის სიმაღლის უზრუნველყოფა – $n\% = 1\% \div 50\%$; ტალღის ნაპირთან მოსვლის კუთხე – $\beta = 0^\circ \div 90^\circ$. ტალღის ფერდზე ტრანსფორმირებული სიმაღლის (h_i) ვარიაციული რიგის დამუშავების შემდეგ ექსპერტების რაოდენობის (T) გათვალისწინებით შესაძლო ცდომილებების შესაფასებლად მიღებულია მონაცემები (ცხრ. X.5.6).

ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლის (h_i) გაანგარიშებისას შესაძლო ცდომილებების ვარიაციული ცხრილი

№	h_i, ϑ	T_i	$(h_i - \bar{h}_i) \vartheta$	$(h_i - \bar{h}_i)^2 \vartheta^2$	$T_i (h_i - \bar{h}_i) \vartheta$
1	0 \div 0,5	12	-1,53	2,34	30,42
2	0,5 \div 1,0	30	-1,03	1,06	3,80
3	1,0 \div 1,5	25	-0,53	0,28	7,0
4	1,5-2,0	23	-0,03	0,001	0,0023
5	2,0-2,5	22	0,47	0,22	4,44
6	2,5-3,0	8	0,97	0,94	7,52
7	3,0-3,5	9	1,47	2,16	19,44

კომპონენტების შესაძლო ცდომილებების შედეგები მოყვანილია ცხრილში X.5.7.

ცხრილი X.5.7

შესაძლო ცდომილებების ცხრილი

№	კომპონენტის ფორმულა	კომპონენტის მნიშვნელობა
1	$\bar{h}_i = \frac{\sum^r h_i}{T}$	1,78
2	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum^r T(h_i - \bar{h}_i)^2}{v}}$	1,006
3	$\sigma_{\bar{x}} = \pm \sigma / \sqrt{T}$	±0,084
4	საიმედოობის კრიტერიუმის ხარისხი $\bar{h}_i / \sigma_{\bar{x}}$	22,25

როგორც ვხედავთ, საიმედოობის კრიტერიუმის მნიშვნელობა $(\bar{h}_i / \sigma_{\bar{x}}) = 22,25 > 3$, რაც მეტყველებს იმაზე, რომ მისი მნიშვნელობა – საიმედოა. ანგარიშების საფუძველზე შედგენილია მოქმედი ფაქტორების ცხრილი, რომლებიც განლაგებულია მათი ზემოქმედების რანჟირებით (ცხრ. X.5.8).

ცხრილი X.5.8

ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლეზე (h_i)

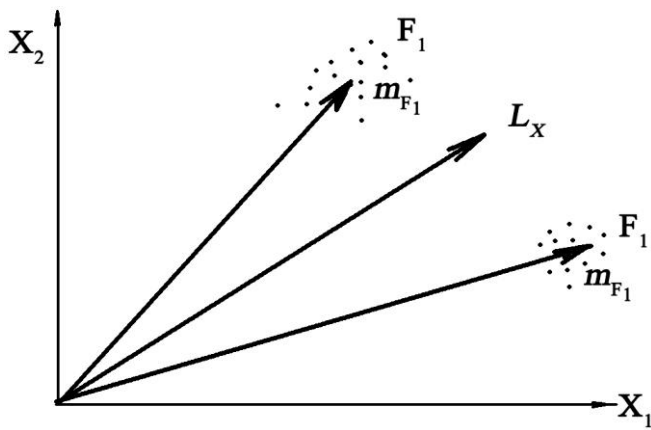
მოქმედი ფაქტორების რანჟირება

ზემოქმედების ხარისხი	მოქმედი ფაქტორები
1	2
1	ტალღის საწყისი სიმაღლე – $X_1(h_H)$
2	წყლის საანგარიშო სიღრმე – $X_2(H)$
3	ფერდის დახრილობა – $X_3(m)$
4	ნაპირთან ტალღის მოსვლის კუთხე – $X_4(\beta)$
5	ტალღის დახრილობა – $X_5(h_H / \lambda_H)$
6	ფერდის ხორკლიანობა – $X_6(K_r)$
7	ტალღების უზრუნველყოფა – $X_7(I_{\%})$

აღსანიშნავია, რომ ფაქტორების შემოთავაზებული რანჟირება ემთხვევა ექსპერტების აპრიორულ დიაგრამას (ნახ.X.4.1), რაც ზრდის ანგარიშების საიმედოობას.

X.6. სახეთა გარჩევის მეთოდი

სახეთა გარჩევის მეთოდის გამოყენებით შესაძლოა მოქმედი ფაქტორების ერთგვაროვან კლასებში გაერთიანება [Горелик А. Л., Скрипкин В.Л., 1977]. ტალღურ ჰიდრავლიკაში სახეთა გარჩევის მეთოდების გამოყენებით შესაძლებელია მრავალ-ფაქტორული დამოკიდებულების ერთი ან რამდენიმე ფაქტორის გაერთიანება ერთ კლასში (ნახ, X.6.1).



ნახ. X.6.1. მრავალფაქტორული დამოკიდებულებების ფაქტორების სახეთა გარჩევის გეომეტრიული ინტერპრეტაცია

ფაქტორების კლასიფიკაციის შესაფასებლად გამოვიყენოთ სახეთა გარჩევის ბაიესის მეთოდი [Андреев И. О., 1959; Брайтман В. М., 1962].

ფერდზე აგორებული ტალღის სიმაღლის (h_i) ტრანსფორმაციის დამოკიდებულებისათვის ფაქტორული ანალიზით შერჩეულია ოთხი ფაქტორი: X_1, X_2, X_3, X_4 ; მაშინ $\overline{X_1}, \overline{X_2}, \overline{X_3}, \overline{X_4}$ - ამ ფაქტორების საშუალო არითმეტიკული, $n(\overline{X_1}), n(\overline{X_2}), n(\overline{X_3}), n(\overline{X_4})$ - საშუალო კვადრატული და $n^2(\overline{X_1}), n^2(\overline{X_2}), n^2(\overline{X_3}), n^2(\overline{X_4})$ - დისპერსიის მნიშვნელობებია.

სახეთა გარჩევის მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია ცალკეული ფაქტორების ზემოქმედების ხარისხის დადგენა წონითი კოეფიციენტების (W_n) მეშვეობით [Джонсон Н., Лион Ф., 1980]:

$$W_i = \frac{1}{n^2 \left(\sum_{n=1}^n \frac{1}{n_i^2} \right)}, \quad (X.6.1)$$

სადაც n_i^2 დისპერსიაა.

მაგალითი 1.

**სახეთა გარჩევის მაგალითი
ფერდზე ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლის (h_i) ცვალებადობაზე
მოქმედი ფაქტორების ზემოქმედების შეფასება**

სახეთა გარჩევის მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია პირველი ოთხი ფაქტორის: ტალღის „ღრმა წყალზე“ სიმაღლის $X_1(h_H)$ –საანგარიშო სიღრმის $X_2(H)$, ფერდის დახრილობის $X_3(m=ctg\alpha)$ და ნაპირთან ტალღის მისვლის კუთხის $X_4(\beta)$ ზემოქმედების რაოდენობრივი შეფასება.

ფაქტორული ანალიზის გამოყენებით ზემოთ დადგენილი ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლის რანჟირებული ერთობლიობა წარმოდგენილია ასეთი სახით:

$$h_i = f(X_1; X_2; X_3; X_4), \quad (X.6.2)$$

სადაც $X_1=h_H; X_2=H; X_3=m=ctg\alpha; X_4=\beta$.

მთის წყალსაცავების პირობებისათვის ტალღის ფერდზე სიმაღლის სიდიდის (h_i) ტრანსფორმაციის შესაძლო დიაპაზონი შეიძლება დავყოთ ორ კლასად (ცხრ. X.6.1).

ცხრილი X.6.1

ვერდზე ტალღის ტრანსფორმირებული სიმაღლის (h_i) სიდიდის რანჟირება

I კლასი	$h_i=0,0\div 1,0$, მ
II კლასი	$h_i=1,1\div 2,0$, მ

თითოეული კლასისთვის (F_i) შერჩეულია შვიდ-შვიდი ფაქტორი, ცხრ. X.6.2.

ცხრილი X.6.2

ფაქტორების ამონაკრები რანჟირებული (F_I ; F_{II}) კლასებისათვის

კლასი	ვექტორი L_i	ფაქტორი X_1	ფაქტორი X_2	ფაქტორი X_3	ფაქტორი X_4	h_i
1	2	3	4	5	6	7
F_I	1	0,5	0,025	9,5	0	0,6
	2	1,0	0,075	2,36	10	0,8
	3	1,5	0,075	6,30	70	0,72
	4	1,0	0,050	3,08	60	0,75
	5	0,5	0,100	0,9	0	0,44
	6	1,5	0,025	6,31	50	0,97
	7	1,5	0,050	8,14	20	1,00
F_{II}	1	1,0	1,0	9,51	0	1,10
	2	1,5	0,1	6,30	10	1,53
	3	2,5	0,1	8,14	70	1,78
F_{II}	4	2,0	0,1	3,07	10	1,52
	5	2,0	0,05	3,07	90	1,55
	6	3,0	0,075	6,30	50	1,57
	7	2,5	0,1	8,14	30	1,78

ტრანსფორმირებული ტალღების სიმაღლის ალბათური ელემენტების ანგარიშები მოყვანილია ცხრილში X.6.3.

ცხრილი X.6.3

ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლის (h_i) საანგარიშო ელემენტები

კლასი	რაოდენობა	h_i , მ	\bar{X}_1	$\sigma(\bar{X}_1)$	$\sigma^2(\bar{X}_1)$	\bar{X}_2	$\sigma(\bar{X}_2)$	$\sigma^2(\bar{X}_2)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
F_I	7	0-1,0	1,07	0,23	0,038	0,05	0,40	0,19
F_{II}	7	1,1-2,0	2,07	0,30	0,08	0,21	0,51	0,30
კლასი	რაოდენობა	h_i , მ	\bar{X}_3	$\sigma(\bar{X}_3)$	$\sigma^2(\bar{X}_3)$	\bar{X}_4	$\sigma(\bar{X}_4)$	$\sigma^2(\bar{X}_4)$
10	11	12	13	14	15	16	17	18
F_I	7	0-1,0	5,22	0,51	0,30	30	0,41	0,15
F_{II}	7	1,1-2,0	6,36	0,42	0,17	45 30	0,29	0,26

ტრანსფორმირებული ტალღის სიმაღლეზე ფაქტორების ზემოქმედების რაოდენობრივი შეფასება წონითი კოეფიციენტების მნიშვნელობების მეშვეობით მოყვანილია ცხრილში X.6.4.

ტალლის სიმაღლეზე (h_H) მოქმედი ფაქტორების წონითი კოეფიციენტების მნიშვნელობები კლასების მიხედვით

W_i	წონითი კოეფიციენტების მნიშვნელობა	
	კლასი I ($h_i < 1,0$ მ)	კლასი II ($2,0 > h_i > 1,0$ მ)
W_{h_H}	0,50	0,55
W_H	0,22	0,19
W_m	0,19	0,15
W_β	0,09	0,11

წონითი კოეფიციენტების ანალიზმა აჩვენა: ფაქტორების მნიშვნელობების ერთგვარი რანჟირება დაცულია ორივე კლასში, ამავე დროს „ღრმა წყალზე“ ყველაზე მნიშვნელოვან ზემოქმედებას ახდენს საწყისი ტალლის სიმაღლე (h_H), შემდეგ – წყლის სიღრმე (H_H), ფერდის დახრილობა ($m = \text{ctg}$) და ფერდთან ტალღების მოსვლის კუთხე (β). კვლევებმა კი აჩვენა, რომ ფერდის დახრილობისას ($\alpha > 80^\circ$) – ტალღის სიგრძის (λ_i) და პერიოდის (t_i) მნიშვნელობები პრაქტიკულად არ იცვლება – $\lambda_i \cong \lambda_H$; $t_i \cong t_H$.

მაგალითი 2.

წყალსაცავების ნაპირდამცავი ნაგებობების ზედა საზღვრის ($h_{run\ up} = a_2$) ცვალებადობაზე მოქმედი ფაქტორების შეფასება

წყალსაცავების ნაპირდამცავი ნაგებობების ზედა საზღვრის (a_2) მნიშვნელობა დამოკიდებულია ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლეზე ($h_{run\ up}$), რომლის მნიშვნელობის შესაფასებლად გამოიყენება სახეთა გარჩევის პარამეტრული მეთოდი [Мирцхулава Ц.Е., 1974]. ფერდზე ტალღების აგორების სიმაღლის ($h_{run\ up}$) მნიშვნელობა დამოკიდებულია ოთხ ძირითად ფაქტორზე:

$$h_{run\ up} = f\left(h_H, m, \frac{\lambda_H}{h_H}, K_r\right), \tag{X.6.3}$$

სადაც h_H არის ტალღის სიმაღლე „ღრმა წყალზე“, $m = \text{ctg}\alpha$ – ფერდის დახრილობა, λ_H – ტალღის სიგრძე, K_r – ფერდის ხორკლიანობის კოეფიციენტი.

მთის წყალსაცავების ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლის ($h_{run\ up}$) მნიშვნელობები რანჟირებულია ოთხი კლასის მიხედვით: I კლასი – $h_{run\ up} = 0 \div 1,0$ მ; II კლასი – $h_{run\ up} = 1,0 \div 2,0$ მ; III კლასი – $h_{run\ up} = 2 \div 3,0$ მ; IV კლასი – $h_{run\ up} > 3$ მ-ზე.

საქართველოს მთის წყალსაცავებზე დაფიქსირებულია „ღრმა წყალზე“ მაქსიმალური ტალღის სიმაღლე $h_{max} = 4,0$ მ, ქარის სიჩქარე $V = 20,0$ მ/წმ; $m = 0,1 \div 20,0$; $\lambda_H/h_H = 7 \div 35,0$; $K_r = 0,3 \div 1,0$.

საწყისი ელემენტებისათვის – $h_H = 1,0$ მ, $m = 1,0$, $\lambda_H / h_H = 1,0$, $K_r = 1,0$, – მიღებულია ალბათობის (P) მნიშვნელობები: $P_1 = 0,1387 \cdot 10^{-10}$, $P_2 = 0,1438 \cdot 10^{-10}$, $P_3 = 0,0982 \cdot 10^{-10}$, $P_4 = 0,0818 \cdot 10^{-10}$.

რადგან (P_2)-ის მნიშვნელობა ყველაზე მაღალია, განსახილველი ობიექტი მიეკუთვნება II კლასს. სახეთა გარჩევის მეთოდის გამოყენებით ცალკეული ფაქტორის ზემოქმედების ხარისხი დადგინდა წონითი კოეფიციენტების (W_i) მიხედვით, რომელთა მნიშვნელობები ყველა კლასისთვის მოყვანილია ცხრილში X.6.5.

ცხრილი X.6.5

ფერდზე ტალღების აგორების სიმაღლეზე ($h_{sum up}$) მოქმედი ფაქტორების წონითი კოეფიციენტის მნიშვნელობები კლასების მიხედვით

წონითი კოეფიციენტები (W_i)	კლასები							
	I		II		III		IV	
W_H	0,3800	2	0,0030	3	0,1350	2	0,0190	2
W_m	0,0010	4	0,0950	2	0,0010	3	0,0017	3
$W_{\lambda h}$	0,0090	3	0,0020	4	0,0005	4	0,0003	4
W_{Kr}	0,6100	1	0,9000	1	0,8950	1	0,9796	1

წონითი კოეფიციენტების (W) მნიშვნელობების ანალიზმა აჩვენა: ფერდზე ტალღის აგორების სიმაღლეზე ყველაზე მნიშვნელოვან ზემოქმედებას ახდენს – ფერდის ხორკლიანობის კოეფიციენტი – ყველა კლასში, ხოლო მესამე და მეოთხე კლასში – წყლის სიღრმე და ტალღის დამრეცობა.

XI. წყალსაცავიანი სისტემების ძირითადი ელემენტების მოწყვლადობის შეფასება და პროგნოზირება

XI.1. არსებული კაშხლების ავარიებისა და კატასტროფების ანალიზი

წყალსაცავიანი სისტემა – წყალსაცავი, კაშხალი, წყალსაგდები – წყალსამეურნეო უმნიშვნელოვანესი ელემენტების კომპლექსია, რომელიც უზრუნველყოფს წყლის რესურსების ეფექტურ გამოყენებას. მაგრამ, ამ კომპლექსს დადებით ეფექტთან ერთად ახასიათებს კატასტროფული მოვლენები, რომლებსაც მოჰყვება ადამიანების მსხვერპლი და სოფლის მეურნეობის სავარგულების, საცხოვრებელი და სატრანსპორტო ინფრასტრუქტურის დაკარგვა.

დედამიწაზე კაშხლები პირველად აგებულია ძველ ეგვიპტეში 3 ათას წელზე მეტი ხნის წინ ჩვ.წ.აღ.-მდე (ცხრ. I.1). ჯერ კიდევ ფარაონ მენესის დროს დედაქალაქ მემფისიდან მდ. ნილოსის გადასაგდებად აიგო კომიშის კაშხალი, სიგრძით 415 მ და სიმაღლით 17,5 მ. 2800 წლით ადრე ჩვ.წ.აღ.-მდე ქაიროს სამხრეთით ააგეს კაშხალი სად-ელ-კაფარი სიმაღლით 13 მ და სიგრძით 121 მ. 2300 წლის წინ ჩვ.წ.აღ.-მდე ქაიროდან 80 კმ-ის დაშორებით შეიქმნა 1 კმ³-ზე მეტი მოცულობის მერისის წყალსაცავი, რომელსაც ჰეროდოტემ მსოფლიოს ერთ-ერთი საოცრება უწოდა. მოგვიანებით შეიქმნა კაშხლები ახლო აღმოსავლეთში [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2010; Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., 2012]. ჩვ.წ.აღ.-ის პირველ საუკუნეებში კაშხლების მშენებლობა სწრაფი ტემპით მიმდინარეობდა: ნაბათის სამეფოში (ისრაელის ტერიტორია) 14 მ სიმაღლის ორი კაშხლის მშენებლობით შეიქმნა წყალსაცავი მდ. სიგზე. კაშხლები დღემდეა შემორჩენილი.

კაშხლების შექმნის ინტენსიფიკაცია შეინიშნებოდა ჩვ.წ.აღ.-ის V-ე საუკუნიდან, რომელთა მნიშვნელოვანი ნაწილი დაინგრა ომების პერიოდში და ჩვენამდე ვერ მოაღწია. ჩვ.წ.აღ.-ით I ათასწლეულში შეიქმნა კაშხალი მდ. ფავრენახზე, სიმაღლით 40 მ და სიგრძით 120 მ, ექსპლუატაციაში იყო 100 წლის განმავლობაში.

აზიაში – იაპონიაში ჩვ.წ.აღ.-ის 522-1600 წლებში შეიქმნა 15 მ-ზე მეტი სიმაღლის კაშხლები, ხოლო შემდგომი 200 წლის მანძილზე – 540 ჰიდროკვანძი, რომლებიც დღესაც ექსპლუატაციაშია. ჩინეთში პირველ ასწლეულებში მიმდინარეობდა მშენებლობა მდინარეების – ხუანხესა და იანძის შუამდინარეთის რაიონში. მდ. ხუანხეზე 100 მ სიგრძის დამბით შეიქმნა ხუნიხეხუს მსხვილი წყალსაცავი და რიგი მცირე წყალსაცავები.

ევროპაში წყალსაცავიანი სისტემის მშენებლობის განვითარება XIV-XVI საუკუნეებში დაიწყო.

ამერიკის კონტინენტზე კაშხლების დიდი რაოდენობა იქნა აშენებული მექსიკაში – აცტეკების, ინკებისა და მაიას ტომების მიერ. ნეცაუალ-კოიოტლის დამბამ, სიგრძით 16 კმ, შუაზე გაყო ტესკოკოს ტბა და წარმოქმნა მეხიკოს წყალსაცავი. ეს

ნაგებობები არ შემორჩა, რადგან მათი ნაწილი განადგურდა ესპანელი კონკისტადორების მიერ XV საუკუნეში. წყალსაცავიანი სისტემის მშენებლობის ინტენსიფიკაციის ახალი პიკი განეკუთვნება VII საუკუნეს. XX საუკუნის მეორე ნახევარი ხასიათდება წყალსაცავიანი სისტემების შექმნის დინამიკური ტემპებით მთელ მსოფლიოში. მათი რიცხვი 1950 წლიდან გაორმაგდა, ხოლო წყალსაცავების ჯამური მოცულობა – 8-ჯერ გაიზარდა.

თანამედროვე ეტაპზე კაშხლების მშენებლობა მსოფლიოს ყველა ქვეყანაში სწრაფი ტემპით მიმდინარეობს. მსოფლიოში 200 000-მდე მსხვილი და მცირე კაშხალია. ავარიების კომიტეტის საერთაშორისო კომისიის მონაცემების ანალიზისას დადგინდა, რომ ყოველწლიურად 3000-მდე კაშხალი ზიანდება [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2010].

კაშხლების **დაზიანების, ავარიის და კატასტროფების მიზეზების** ანალიზი ჩატარდა კატალოგების, სპეციალური ლიტერატურის, პერიოდული გამოცემების, წიგნების, ინფორმაციული მასალისა და საერთაშორისო კონგრესებზე წარდგენილი მოხსენებების საფუძველზე.

დაზიანება და ავარია – კაშხლის ისეთი მდგომარეობაა, რომლის შეკეთების შემდეგ მას შეუძლია ნორმალური ფუნქციონირება, თუმცა ხშირად მას თან სდევს ადამიანების მსხვერპლიც კი. **კატასტროფა** – კაშხალი ინგრევა და ამის შემდეგ იგი აღარ ფუნქციონირებს. როგორც წესი, კატასტროფა იწვევს ადამიანების მსხვერპლს.

რამდენიმე ასეული კაშხლის **ავარიისა და დაზიანების** ანალიზის საფუძველზე დადგინდა, რომ მათი ფილტრაციის, სუფოზიის, წყლის აგრესიულობისა და კავიტაციის გამო მოხდა ავარიების 31%; კაშხლის თხემზე გადადინების გამო – 18%; გარეცხვის, გამორეცხვის, ეროზიის, მეწყრების, ჯდენის, ბზარებისა და კავერნების გამო – 17%; კაშხლის დაპროექტებისა და ექსპლუატაციის დროს დაშვებული შეცდომების გამო – 15%; მიწისძვრით, კაშხლის შევსება-დაცლით გამოწვეული სეისმური მოვლენების გამო – 9%; წყალდიდობის, კოკისპირული წვიმების გამო – 5%; კაშხლის გაღობისა და გაყინვის, ტემპერატურის მნიშვნელოვანი ცვალებადობის გამო – 4%; ტალღური დატვირთვის გამო კი - 1%.

კაშხლების **დაზიანება, ავარიები და კატასტროფები** ყოველთვის ხდებოდა და ახლაც მიმდინარეობს. მსოფლიოს 400-ზე მეტი კაშხლის დაზიანების, ავარიის და კატასტროფის გამომწვევი ფაქტორების ანალიზის საფუძველზე გამოვლინდა, რომ ყველაზე სენსიტიური კაშხლის ტიპია – მიწის კაშხალი (ცხრ. XI.1.1).

დედამიწაზე არსებული მიწის კაშხლების კატასტროფების ანალიზი

წყალდიდობების წყლით ავსების შემდეგ **მიწის** კაშხლებში შეიძლება განვითარდეს ისეთი დეფორმაციები, რომლებიც გამოიწვევენ მის არამდგრადობას – კაშხლის გრუნტის ერთიანობის გარღვევით და ნაგებობის ავარიით. მიწის კაშხლების დაპროექტებისას აუცილებელია ისეთი ამოცანის დასახვა, რომელიც გადაჭრის კაშხლის გრუნტის ხარისხის შენარჩუნებას. ასეთი ამოცანის გადაწყვეტილებაა –

კაშხლის ზღვრული წონასწორობის ზონების უსაფრთხო შენარჩუნება. ამ პროცესებს, როგორც წესი, მოჰყვება კაშხლის ტანის გრუნტის სუფოზია და ფილტრაციული მოვლენები. ნაპრალები – მიწის კაშხლის კონსტრუქციის რღვევის ყველაზე სახიფათო ფორმაა. სუფოზიის მოვლენას მოჰყვება გრუნტის წყალგამტარობის გაზრდა; მიწის კაშხლის ტანში, მის ფერდობებსა და ქიშე წარმოიქმნება ჩავარდნები. XX საუკუნეში ბრაზილიაში მომხდარი მიწის კაშხლის კატასტროფის მაგალითია, რომელიც დაინგრა სულ რაღაც 20 წუთში (ფოტო XI.1.1÷XI.1.4), [იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., ნატროშვილი გ., იორდანიშვილი კ., გლუნჩაძე მ. 2019].

ცხრილი XI.1.1

მსოფლიოში კაშხლებზე ყველაზე მსხვილი დაზიანებები, ავარიები და კატასტროფები

კაშხლების რაოდენობა	კაშხლის ტიპი	კაშხლების ავარიებისა და დაზიანების გამოწვევი ფაქტორები								დანგრეული კაშხლების კატასტროფების რაოდენობა	მსხვერპლთა რაოდენობა	კაშხლების ავარიის რაოდენობა	დაზიანებული კაშხლების რაოდენობა
		მიწისძვრა	წყალმოვარდნები, წყალდიდობები	ჩარეცხვა, ჩამოზვავება, ჯდენა	წყლის გადმოდინება თხემზე	შეცდომები დაპროექტებისა და ექსპლუატაციისას	კაშხლის დნობა	ტალღური ზემოქმედება	სუფოზია, წყლის აგრესიულობა				
260	მიწის	12	42	48	42	8	3	87	36	40	273000	94	122
80	ქვყარილის	4	8	12	25	12	5	-	14	18	3600	31	27
48	ბეტონის	3	-	14	1	11	-	-	-	2	3000	11	26
სულ 388		19	51	74	68	31	11	87	63	69	27960	136	170



ფოტო XI.1.1. მიწის კაშხალი კატასტროფის დაწყებამდე (ბრაზილია)



ფოტო XI.1.2. მიწის კაშხალი კატასტროფის დაწყებიდან 5 წუთის შემდეგ (ბრაზილია)



ფოტო XI.1.3. მიწის კაშხალი კატასტროფის დაწყებიდან 10 წუთის შემდეგ (ბრაზილია)

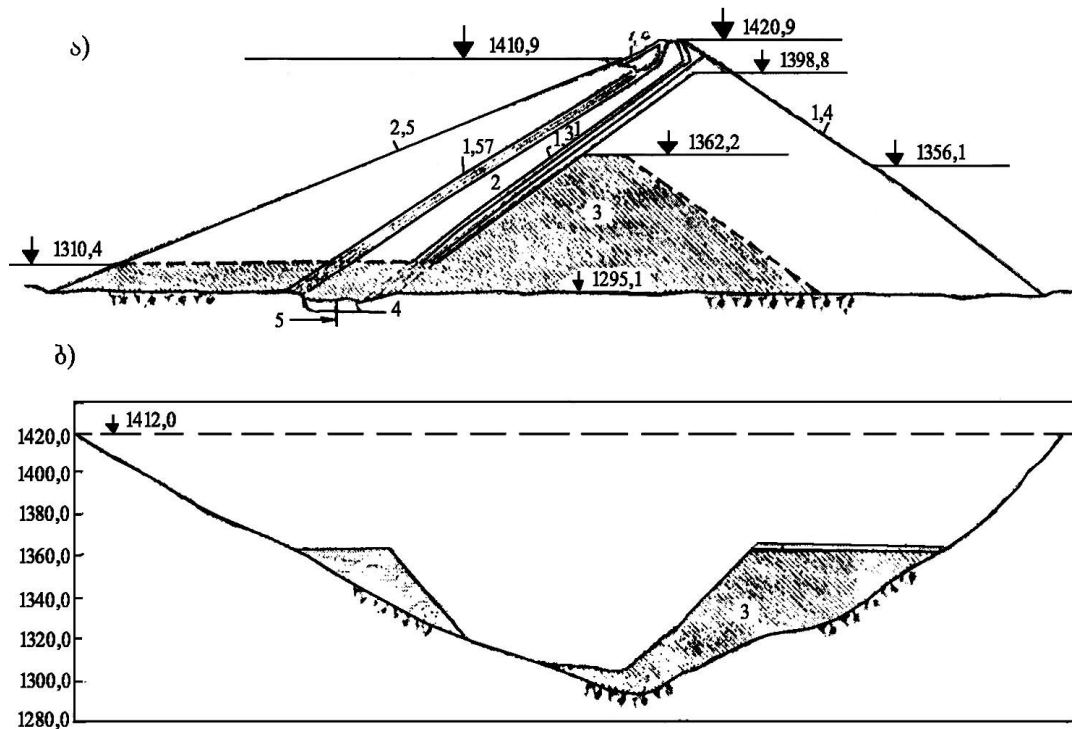


ფოტო XI.1.4. მიწის კაშხალი კატასტროფის დაწყებიდან 15 წუთის შემდეგ (ბრაზილია)

1975 წელს ჩინეთში მიწის დამბის - რუკხუას გარღვევისა და დანგრევის შემდეგ დაიღუპა 200 000 ადამიანი. ეს კატასტროფა ითვლება უდიდესად კაცობრიობის ისტორიის მანძილზე.

დედამიწაზე არსებული ქვანაყარი კაშხლების კატასტროფების ანალიზი

ქვანაყარი კაშხლების დაზიანების ძირითადი მიზეზია – კაშხლის გარღვევა და საძირკვლის გეოლოგიური პირობების არასწორი გათვალისწინება (ნახ XI.1.1, ცხრ. XI.1.1).



ნახ. XI.1.1. ხელ-ხოლის ქვანაყარი კაშხლის ავარია თხემზე წყლის გადაღინების გამო
 ა) განივი პროფილი: 1- ნაყარი; 2 - გრუნტის ეკრანი; 3 - წყალდიდობის შემდეგ დარჩენილი კაშხლის ნაწილი; 4 - ცემენტის ფარდა; ბ) გრძივი კვეთი: კაშხლის დარჩენილი ნაწილი წყალდიდობის შემდეგ

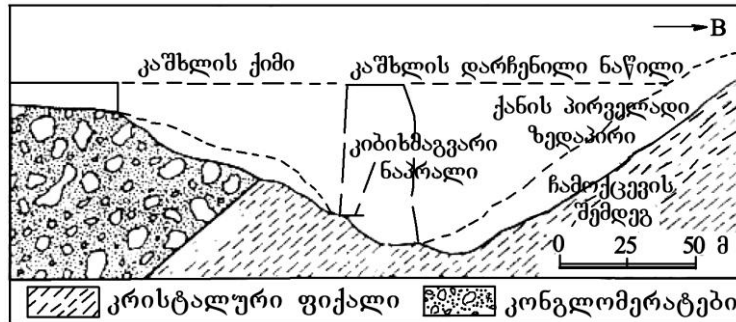
ქვანაყარი კაშხლების ავარიის 80%-ის მიზეზია წყლის ნაკადის გადადინება თხემზე და კაშხლის ტანში ფილტრაცია. ბრაზილიაში ოროსის ქვანაყარ კაშხალზე 35 სმ-იანი სიმაღლის წყლის ნაკადის თხემზე გადადინება საკმარისი იყო კაშხლის დანგრევისათვის.

დედამიწაზე არსებული ბეტონის კაშხლების კატასტროფების ანალიზი

ბეტონის კაშხლის – სენტ-ფრენსისის (აშშ) დანგრევის გამო (1928 წ.) დაილუპა 600 ადამიანი. კაშხალი დაინგრა მის ძირში განლაგებული გარეცხილი კონგლომერატისა და წყალსაცავში ჩამოწოლილი კრისტალიზებული ფიქლების გამო (ნახ. XI.1.2, ფოტო XI.1.5). 40,0 მ-ის სიმაღლის წყლის ნაკადმა წალეკა 80 კმ სიგრძის ტერიტორია. წყალსაცავი მთლიანად დაიცალა 1 საათში.

მალ-პასესი ბეტონის კაშხალი (საფრანგეთი) დაინგრა 1959 წელს. დანგრევის მიზეზი იყო დიდი რაოდენობის მიკრონაპრალეები კაშხლის ძირში. დაილუპა 42 ადამიანი (ნახ. XI.1.3).

ა)



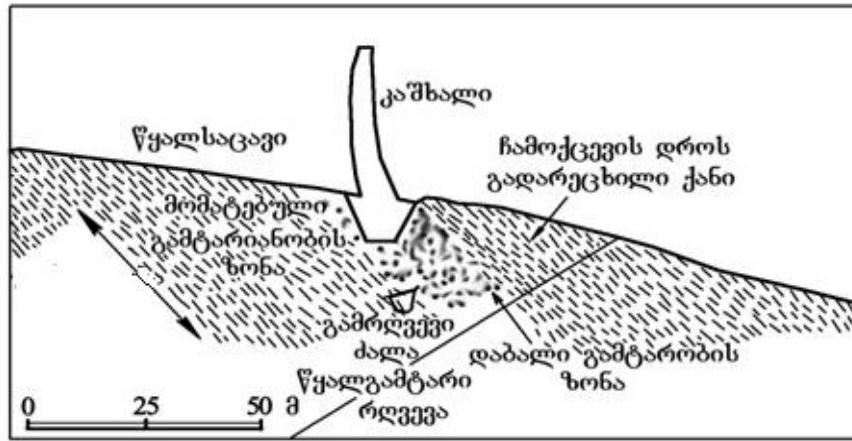
ბ)



გ)



ნახ. XI.1.2. სენტ-ფრენსისის ბეტონის კაშხლის კატასტროფა, 1928 წ. (აშშ, კალიფორნია)
 ა. დანგრეული კაშხლის პროფილი; ბ. კაშხლის ხედი კატასტროფამდე; გ. ბეტონის კაშხლის ცენტრალურ ნაწილში დარჩენილი ვიწრო სეგმენტის ფოტო



ნახ. XI.1.3. მალ-პასეს ბეტონის კაშხლის განივი ჭრილი, 1959 წ. (საფრანგეთი)

1963 წელს იტალიაში ვაიონტის ბეტონის კაშხალზე წყლის 20,0 მ სიმაღლის ტალღის გადაძინებისას, რომელიც გამოწვეული იყო წვიმებითა და წყალსაცავის ფერდობის წყალში ჩამოშლით, კაშხალი თითქმის არ დაზიანებულა, ხოლო კაშხლის ქვედა ბიეფში დაიღუპა 2500 ადამიანი.

საქართველოში არსებული კაშხლების ავარიებისა და კატასტროფების ანალიზი

საქართველოს ტერიტორიაზე ამჟამად 15 მიწის, 5 ქვაყრილისა და 6 ბეტონის მსხვილი კაშხალია (ცხრ. XI.1.2; ცხრ. XI.1.3, ცხრ. XI.1.4) [იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., 2013; Вартанов М., Иордანიшвили И., Кечხოшვილი Э., Бераия Н., Шагирадзе М., 2020].

ცხრილი XI.1.2

საქართველოს მიწის კაშხლების ძირითადი მაჩვენებლები

№	წყალსაცავის დასახელება	რაიონი	დანიშნულება	კაშხლის კონსტრუქციები	კაშხლის გაბარიტები		კაშხლის ელემენტების მოცულობა, მ ³			მშენებლობის ტექნოლოგია	წყალსაცავის კვების წყარო	წყალსაცავის თანამედროე მდგომარეობა
					სიმაღლე, მ	სიგრძე, მ	საერთო	ანტიფილტრაციული ელემენტები	პრიზმები			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	არხაშენის ხევი	საგარეჯო	ირიგაციული	არაერთგვაროვანი, კბილი, გული და საყრდენი პრიზმები	35		1569197	668722	900475	წყალში ჩაყრით	ჩასასხმელი	არ ფუნქციონირებს
2	დევის წყალი	—	—		32	595	984242			—	—	ფუნქციონირებს
3	უდაბნოს	—	—	ერთგვაროვანი	10,8	229	30000			—	—	ფუნქციონირებს

ცხრილი XI.1.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4	ქერმის	გურჯა- ანი	--	არაერთ- გვაროვანი, კბილი, ეკრანი და საყრდენი პრიზმები	30,8	131	116850	20600	96250	--	--	არ ფუნქცი- ონირებს
5	ლაკბე	--	--	არაერთ- გვაროვანი, კბილი, გული, საყრდენი პრიზმები, გარდამვა- ლი ზონა, დრენაჟი, ბანკეტი	75	585	5988000	1080000	4423000	წყალში ჩაყრით	--	არ ფუნქცი- ონირებს
6	თელეთ წყალი	დედოფ- ლის წყარო	--	არაერთ- გვაროვანი, კბილი, გული და საყრდენი პრიზმები	41,3	260	378000	60000	318000	--	--	არ ფუნქცი- ონირებს
7	ყუშის ხევი	--	--	ერთგვა- როვანი	18	719	657000			--	--	ფუნქცი- ონირებს
8	კრანჭის ხევი	--	--	--	14,5	406	214000			--	--	არ ფუნქ- ციო- ნირებს
9	დალის მთა	--	--	არაერთ- გვაროვანი, კბილი, ეკრანი, საყრდენი პრიზმები	38	1750	580000			წყალში ჩაყრით	მდ. იორი	არ ფუნქცი- ონირებს
10	ვაკე	--	--	არაერთ- გვაროვანი, კბილი, გული და საყრდენი პრიზმები	36,7	250	407000	49290	357710	წყალში ჩაყრით	ჩასასხ- მელი	არ ფუნქცი- ონირებს
11	სიონის	თიანეთი	ირიგა- ცია, ენერგე- ტიკა, წყალმო- მარაგება	არაერთ- გვაროვანი	84,4	780	6400000	628000	5772000	--	მდ. იორი	ფუნქცი- ონირებს

ცხრილი XI.1.2 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12	კრასნო-გორკა	საგარე-ჯო	ირიგაციული	ერთგვაროვანი	15	415	318050			წყალში ჩაყრით	ჩასასხმელი	არ ფუნქციონირებს
13	ზონკარი	ცხინვალი	---	არაერთგვაროვანი, კბილი, გული და საყრდენი პრიზმები	71	425,5	3059000	295000	2764000	წყალში ჩაყრით	მდ. პატარა ლიახვი	ფუნქციონირებს
14	ჟინვალის	დუშეთი	ენერგეტიკა, ირიგაცია, სასმელი წყალი	მიწის კაშხალი თიხნარი გულით	98	12000	6156300	4225000			მდ. არაგვი	ფუნქციონირებს

ცხრილი XI.1.3

საქართველოს ქვყარილი კაშხლების მაჩვენებლები

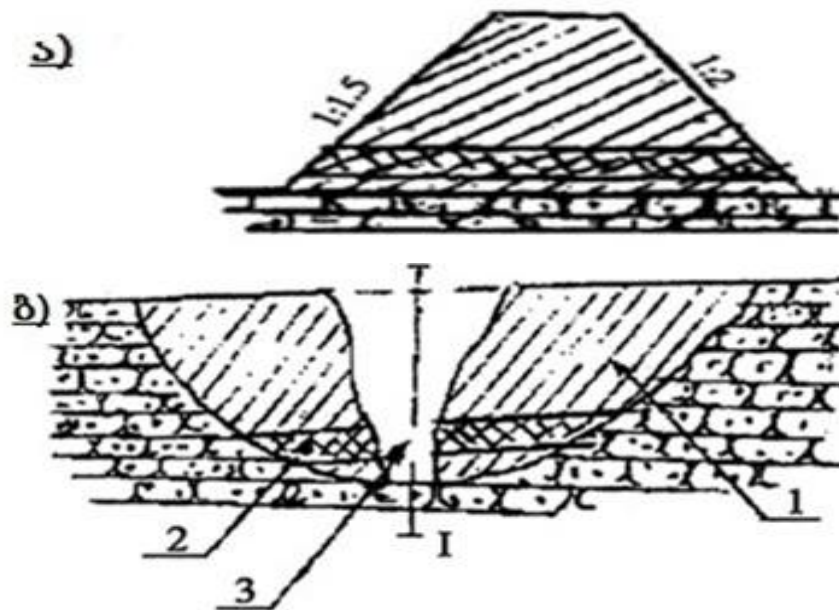
№	წყალსაცავის დასახელება	რაიონი	დანიშნულება	კაშხლის კონსტრუქცია	კაშხლის სიგანე (მირზე), მ	კაშხლის სიმაღლე, მ	კაშხლის სიგრძე, მ	კაშხლის საერთო მოცულობა, მ3	წყალსაცავის კვების წყარო	წყალსაცავის თანამედროვე მდგომარეობა
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ხრამის (წალკის)	წალკის	ენერგეტიკა ირიგაცია	ქვყარილი	5,0	32,0	113,0	9 000	მდ. ხრამი	ფუნქციონირებს
2	შაორის	ამბროლაურის	ენერგეტიკა	ქვყარილი	8,8	14,2	1241,0	79 000	მდ. დიდი-ჭალა, ტყიბულა	ფუნქციონირებს
3	გალის	გალის	ენერგეტიკა	ქვყარილი	8,0	55,0	890,0	195 000	მდ. ერისწყალი, ენგური	ფუნქციონირებს
4	ალგეთის	თეთრი წყაროს	ენერგეტიკა	ქვყარილი	12,0	86,0	470,0	485 000	მდ. ალგეთი	ფუნქციონირებს
5	თბილისის	თბილისის	ირიგაცია	ორი ქვყარლის, ორი ბეტონის	8,0 10,0	10,0 12,0	480,0 290,0	25 000 21 000	მდ. იორი, ჟინვალი	ქვყარილი კაშხლები მდებარეობს წყლის დონის ზემოთ

საქართველოს ბეტონის კაშხლების მაჩვენებლები

№	კაშხლის დასახელება	კაშხლის სიმაღლე, მ	კაშხლის თხემის სიგრძე, კმ	კაშხლის თხემის სიგანე, მ	კაშხლის ტიპი	კაშხლის თანამედროვე მდგომარეობა
1	2	3	4	5	6	7
1	ჯვრის (ენგურის)	271,5	758,0	10,0	ბეტონის თაღოვანი	ფუნქციონირებს
2	ლაჯანურის	70,0	127,0	2,5	ბეტონის თაღოვანი	ფუნქციონირებს
3	გუმათის	32,0	211,0	3,0	ბეტონის გრავიტაციული	წყალსაცავი დალექილია
4	ზაჰესის	24,0	68,0		ბეტონის	ფუნქციონირებს
5	ვარციხის	21,02 (რ-ბ) 11,0 (ბ)	447,0	10,0	რკინაბეტონის და მიწის	წყალსაცავი დალექილია
6	თბილისის	9,0; 15,0 10,0; 12,0	192,0; 290,0 480,0; 290,0	2,0 – 2,5	ორი ბეტონის, ორი მიწის	ფუნქციონირებს

საქართველოს რიგ კაშხლებზე აღინიშნება სხვადასხვა ტიპის დაზიანებები, ამის ერთ-ერთი მიზეზია – წყლის გადადინება კაშხლის თხემზე. მაღალი კაშხლების თხემზე წყლის გადადინების პროგნოზირების მეთოდიკა დამუშავებულია აკადემიკოს გ. გავარდაშვილის მიერ [Г.В. Гавардашвили, 2010].

საქართველოში მიწის კაშხლის ერთადერთი კატასტროფის მაგალითია დაბა წყნეთში (14 მაისი, 1980 წ.), როდესაც დაინგრა 12,0 მ სიმაღლის მიწის კაშხალი და მოჰყვა შვიდი ადამიანის მსხვერპლი (ფოტო XI.1.5, ნახ. XI.1.4). კატასტროფის მიზეზი იყო კაშხლის გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების შესუსტება ექსპლუატაციის 30 წლის შემდეგ და მაღალი ინტენსივობის თავსხმა წვიმებით გამოწვეული კაშხლის ქვედა ბიეფის გამორეცხვა. ამ ფაქტორებმა გამოიწვია ფილტრაციის სიგრძის შემცირება, რამაც სულ ერთი საათის განმავლობაში წყლის დონის უეცარი აწევის (40÷50 სმ-ით) შედეგად გაზარდა ფილტრაციის ხარჯი. ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების გამო დაიწყო კაშხლის ქვედა ფერდის ჯდენა, წარმოიშვა ნაპრალი. ფილტრაციის წყლის ჭავლმა გამოიწვია ქვედა ფერდის მდგრადობის შემცირება. ქიშხე წარმოშობილი ნაპრალი გავრცელდა კაშხლის ტანში მთელ სიგრძეზე, საიდანაც წყალმა უფრო გააგანიერა და გააღრმავა ნაპრალი, რის შედეგადაც ჩამოცურდა კაშხლის ქვედა ბიეფის ჯერ მარცხენა, შემდეგ მარჯვენა ნაწილი. წყალგაჯერების კოეფიციენტის მნიშვნელობა შეადგენდა 0,9-1,0-ს, რის გამოც კაშხლის ტანის დამკრის მახასიათებელი შემცირდა.



ნახ. XI.1.4. მიწის კაშხლის გარღვევა დაბა წყნეთში (1980 წ.)

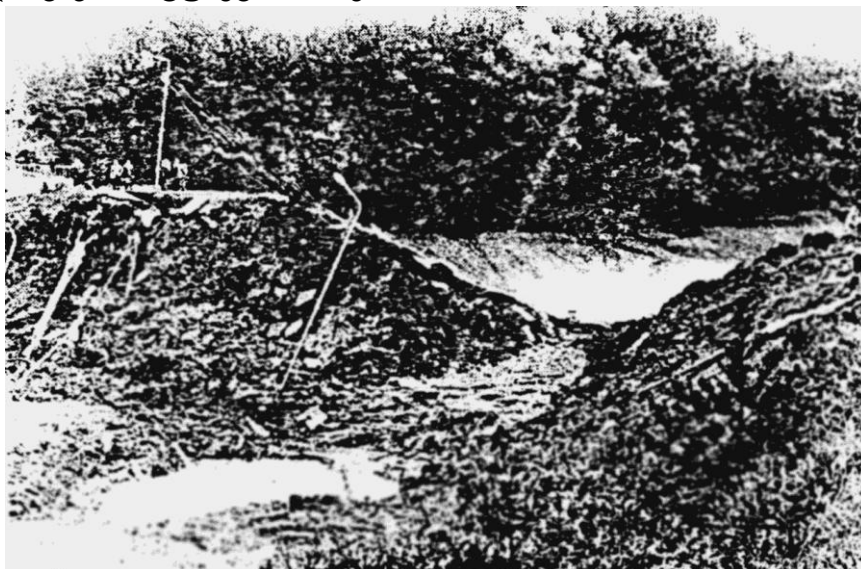
ა) წყნეთის კაშხლის განივი პროფილი გარღვევამდე;

ბ) წყნეთის კაშხლის გარღვევის შემდეგ დარჩენილი ნაწილის გრძივი კვეთი;

1 - მიწის კაშხლის ტანი; 2 - გალღობილი თიხის შრე; 3 - კაშხლის გარღვეული ნაწილი

დალის მთის მიწის კაშხლის თხემზე წყლის გადადინების გამო კაშხალი მწყობრიდან გამოვიდა და წყალსაცავი დღემდე დაცლილია.

2010 წლის აპრილში, ინტენსიური წვიმების შედეგად ჭერემის წყალსაცავში აღინიშნებოდა წყლის დონის მკვეთრი მატება, რასაც თან მოყვა ნაპირების წარეცხვა, წყალსაცავების სათავესთან ბეტონის ფილების გამორეცხვა და ხიდის დანგრევა (ფოტო XI.1.6). წყლის შესაძლო გამოჟონვის გამო სახიფათო სიტუაცია შეიქმნა ქ. გურჯაანში. ოპერატიულად ჩატარდა პრევენციული ღონისძიებები. კატასტროფული წყალსაცავების ჩარეცხილი კალაპოტი გამაგრდა ქვიშიანი ტომრებით, მიმართული აფეთქებით გაიწმინდა დალამული წყალსაშვი (საირიგაციო მილი). ჩატარებული ღონისძიებების შედეგად წყალსაცავში წყლის დონე დაყვანილ იქნა მინიმუმამდე. ამჟამად წყალსაცავი არ ფუნქციონირებს.



ფოტო XI.1.5. წყნეთის მიწის კაშხლის კატასტროფა (1980 წ.)



ფოტო XI.1.6. ავარია ჭერების წყალსაცავის წყალსაგდებზე

2015 წლის 13 ივნისის ღამეს თბილისში მოხდა ტრაგედია წყნეთი-ბეთანიის მონაკვეთზე, რომლის მიზეზი გახდა მთის მასის დიდი სიმაღლიდან წვიმებით გამოწვეული ჩამოშვავება. ჩამოშლილი ღვარცოფული მასა მდინარე ვერეს შეუერთდა, რამაც მისი კალაპოტის გადაკეტვა და დატბორვა გამოიწვია. დაგუბებულმა წყალმა შექმნილი დამბა გაარღვია და მდ. ვერეს ხეობის მიმდებარე ტერიტორიაზე წყლის მოვარდნა გამოიწვია. მეწყერმა, რომლის სიგრძე 4 კმ და სიგანე 600 მ იყო, ორი გზა გამოიარა: წყნეთი-სამადლოს საავტომობილო გზაზე ჩაწყდა 400 მ სიგრძის მონაკვეთი, პარალიზებული იყო სოფელ ახალდაბასთან მისასვლელი გზა. მდინარე ვერემ ღვარცოფული მასა უნივერსიტეტის დასახლებიდან გმირთა მოედნამდე ჩაიტანა. გვირაბებში ნაშალი მასალის ნაკადმა ვერ გაიარა, გვირაბში გაიჭედა და წყლის ტალღამ მდ. ვერეს ხეობა მთლიანად დატბორა. მოვარდნილმა წყალმა სვანიძის ქუჩაზე გაიარა და გმირთა მოედნამდე ჩავიდა (ფოტო XI.1.7). დროის მოკლე მონაკვეთში ამ ტერიტორიაზე წყლის ხარჯი 1000 მ³/წმ იყო (შედარებისთვის, მდ. მტკვრის ხარჯი ავჭალის ჰეს-თან არის 400 მ³/წმ), მოვარდნილი ტალღის სიმაღლე კი 7-8 მეტრი. კატასტროფას ემსხვერპლა 19 ადამიანის სიცოცხლე, 4 ადამიანი დაკარგულია, სახლ-კარის გარეშე დარჩა 400-მდე ადამიანი და ზარალმა 100 მლნ ლარს მიაღწია [იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., ნატროშვილი გ., იორდანიშვილი კ., გლუნჩაძე მ., 2019].



ფოტო XI.1.7. კატასტროფა მდ. ვერეს ხეობაში (2015 წ.)

საბედნიეროდ, საქართველოში ქვანაყარ და ბეტონის კაშხლებზე მსგავსი ტიპის კატასტროფები არ ყოფილა.

XI.2. კაშხლების უსაფრთხოების შეფასება

მიწის, ქვანაყარი და ბეტონის კაშხლების ავარიების, დაზიანებისა და კატასტროფების (შემდგომში – ინციდენტების) უსაფრთხოება წარმოადგენს მეტად რთულ ამოცანას. ამ კვლევების ერთ-ერთი ფუძემდებელი იყო გამოჩენილი ქართველი მეცნიერი, აკადემიკოსი **ც. მირცხულავა**, რომელიც აღნიშნავდა – „დიდ ფასეულობას შეიძლება წარმოადგენდეს მიახლოებითი შეფასებებიც კი, რომელიც საორიენტაციოდ განსაზღვრავს ტექნოგენური სისტემების ხანგრძლივობას“ [Мирцхулава Ц. Е., 1989].

კაშხლების უსაფრთხოების რაოდენობრივი შეფასება ტარდება სტატისტიკური ან ალბათური მეთოდების გამოყენებით. კაშხლების ექსპლუატაციის წლების სტატისტიკური მონაცემების საფუძვლებზე დგინდება ის საშუალო ვადა, რომლის პერიოდში ხდება ერთი ინციდენტი:

$$t_{in} = \sum_i^m t_i / n_{of}, \quad (XI.2.1)$$

სადაც t_i განსახილველი ტიპის კაშხლის ექსპლუატაციის ხანგრძლივობაა (ფუნქციონირების წლების რაოდენობა), n_{of} – ინციდენტის საერთო რიცხვი განსახილველი პერიოდისათვის, m – განსახილველი ტიპის კაშხლების საერთო რაოდენობა.

შემდეგ დგინდება კაშხლების უსაფრთხოების ალბათური მაჩვენებელი, რომელიც ასახავს იმ კერძო მიზეზთა გამოვლინებას, რომელიც იწვევს ინციდენტს. კაშხლების უსაფრთხოების ინფორმაციის საფუძველზე დგინდება მათი უსაფრთხო ფუნქციონირების რიცხვი ყოველ 100 წელიწადში:

$$n_{100} = 100n_c / n_{ვერ.}, \quad (XI.2.2)$$

სადაც n_c და $n_{ვერ.}$, შესაბამისად, ინციდენტებისა და წლების რაოდენობაა გასაანალიზებელი პერიოდისათვის.

სტატისტიკური მაჩვენებლების გამოყენებით განისაზღვრება შემდეგი მაჩვენებლები: კაშხლების ფუნქციონირების უსაფრთხოების დონე; ყველა ფაქტორი და მიზეზი, რომლებიც განაპირობებენ ინციდენტურ სიტუაციებს; ფასდება კაშხლების სრულყოფილობის ხარისხი და უსაფრთხოების დონეები.

სხვადასხვა ტიპის კაშხლების – მიწის, ქვანაყარის, ბეტონის – ინციდენტების ხელშემწყობი ფაქტორების სტატისტიკური ინფორმაციის საფუძველზე (ცხრ. XI.1.2) იანგარიშება მათი ექსპლუატაციის (მუშაობის წლების) ის საშუალო ვადა ($n_{დახ.მ.}$, $n_{ვე.მ.}$, $n_{კატ.მ.}$), რომელიც მოდის ერთ ინციდენტზე (დაზიანება, ავარია, კატასტროფა) [იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., ნატროშვილი გ., იორდანიშვილი კ., გლუნჩაძე მ., 2019]:

ა) მიწის კაშხლებისთვის:

$$t_{დახ.მ.} = \frac{\sum_i^{m_a} t_{i,a}}{n_{დახ.მ.}}, \quad t_{ვე.მ.} = \frac{\sum_i^{m_a} t_{i,b}}{n_{ვე.მ.}}, \quad t_{კატ.მ.} = \frac{\sum_i^{m_a} t_{i,c}}{n_{კატ.მ.}} \quad (XI.2.3)$$

სადაც $t_{i\theta}$ არის მიწის კაშხლების ექსპლუატაციის ხანგრძლივობა (ფუნქციონირების წლების რაოდენობა) განსახილველ პერიოდში (მაგალითად 100 წელი); $n_{დახ.მ.}$; $n_{ვე.მ.}$; $n_{კატ.მ.}$ – ინციდენტის (დაზიანების, ავარიის, კატასტროფის) საერთო რაოდენობა განსახილველ პერიოდში (100 წელი); m_a – მიწის კაშხლების რაოდენობა. მაშინ, მიწის კაშხლების ინციდენტების საშუალო ვადა, რომელიც მოდის ერთ ინციდენტზე (100 წლის მანძილზე) იქნება:

$$t_{დახ.მ.} = \frac{327}{78} = 4,19, \quad t_{ვე.მ.} = \frac{542}{44} = 12,18, \quad t_{კატ.მ.} = \frac{187}{25} = 7,48,$$

ბ) ქვანაყარი კაშხლებისთვის:

$$t_{დახ.ქ.} = \frac{\sum_i^{m_d} t_{i,d}}{n_{დახ.ქ.}}; \quad t_{ვე.ქ.} = \frac{\sum_i^{m_d} t_{i,e}}{n_{ვე.ქ.}}; \quad t_{კატ.ქ.} = \frac{\sum_i^{m_d} t_{i,f}}{n_{კატ.ქ.}}. \quad (XI.2.4)$$

ქვანაყარი კაშხლების ინციდენტების საშუალო ვადა, რომელიც მოდის ერთ

ინციდენტზე (100 წლის მანძილზე) იქნება:

$$t_{\text{დაზ.ქ}} = \frac{359}{18} = 19,9; \quad t_{\text{ვ.ქ}} = \frac{228}{21} = 10,86; \quad t_{\text{კატ.ქ}} = \frac{110}{9} = 12,2.$$

გ) ბეტონის კაშხლებისათვის – თაღვანი გრავიტაციული (თგ), თაღვანი (თ), ბუტობეტონის (ბბ), კონტროლის (კვ) და ძელორის (ძე) ტიპის კაშხლები განიხილება ბეტონის (ბ) კაშხლებთან ერთად:

$$t_{\text{დაზ.ბ}} = \frac{\sum_{i=1}^{m_b} t_{i\text{ბ}}}{n_{\text{დაზ.ბ}}}; \quad t_{\text{ვ.ბ}} = \frac{\sum_{i=1}^{m_b} t_{i\text{ბ}}}{n_{\text{ვ.ბ}}}; \quad t_{\text{კატ.ბ}} = \frac{\sum_{i=1}^{m_b} t_{i\text{ბ}}}{n_{\text{კატ.ბ}}}; \quad (\text{XI.2.5})$$

მაშინ ბეტონის კაშხლების ინციდენტების საშუალო ვადა, რომელიც მოდის ერთ ინციდენტზე (100 წლის მანძილზე), იქნება:

$$t_{\text{დაზ.ბ}} = \frac{195}{16} = 12,19; \quad t_{\text{ვ.ბ}} = \frac{52}{8} = 6,5; \quad t_{\text{კატ.ბ}} = \frac{84}{6} = 14,0.$$

კაშხლების ინციდენტების საშუალო ვადა, რომელიც მოდის ერთ ინციდენტზე (100 წლის მანძილზე), მოყვანილია ცხრილში XI.2.1.

ცხრილი XI.2.1

კაშხლების ინციდენტების საშუალო ვადა

მიწის კაშხლები	ქვანაყარი კაშხლები	ბეტონის კაშხლები	
t _{დაზ.ბ.*})	4,19	t _{დაზ.ქ.} 19,9	t _{დაზ.ბ.} 12,19
t _{ვ.ბ.*})	12,18	t _{ვ.ქ.} 10,86	t _{ვ.ბ.} 6,5
t _{კატ.ბ.*})	7,48	t _{კატ.ქ.} 12,2	t _{კატ.ბ.} 14
*) ანგარიშში არ იყო გათვალისწინებული იმ კაშხლების ინციდენტები, რომელთა ინციდენტის წლები არ არის აღნიშნული შესაბამის მონაცემთა ბანკში.			

ამრიგად, ინციდენტების საშუალო ვადა, რომელიც მოდის ერთ კატასტროფაზე, ყველაზე ხანგრძლივია ბეტონის კაშხლებისათვის, ანუ ბეტონის კაშხლები ყველაზე საიმედოა.

XI.3. კაშხლების ნაპირსამაგრი ნაგებობების საიმედოობის შეფასება

კაშხლებზე ავარიების გაანალიზებისას კვლევებში დადგენილია ძირითადი მიზეზი – ქიმზე წყლის გადადინება [გავარდაშვილი გ., კუხალაშვილი ე., სუპატაშვილი თ., ირემაშვილი ი., ბზიავა კ., ნატროშვილი გ., ქუფარაშვილი ი., 2022; Gavardashvili G.V., 2010; Gavardashvili G.V., 2013; Гавардашвили Г.В., 2010; Gavardashvili G.V., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Qufarashvili I., Bziava K., Natroshvili G. 2018; Gavardashvili G.V., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Natroshvili G., Qufarashvili I., 2019]. საიმედოობის თეორიის ტერმინოლოგიით – ეს მოვლენა (ავარია) შემთხვევითი ხდომილებაა, ამიტომ მისი დადგენა შესაძლებელია სტატისტიკური ან ალბათური მეთოდების გამოყენებით, კერძოდ, კაშხლების ქიმზე წყლის გადადინების ან წყალსაცავების

ნაპირებზე ტალღების აგორების სიმაღლის ალბათური მეთოდის გამოყენებით [ბერძენაშვილი გ., ირემაშვილი ხ., 2016].

1. კაშხლების ქიმის ნიშნულის საიმედოობის ანგარიში

მთის წყალსაცავების კაშხლების ქიმისა და ნაპირების ზედა სიმაღლის ($h_{ბ.ს.}$) შეფასება განისაზღვრება დამოკიდებულებით [Иордანიшвили И.К., 1987]:

$$h_{ბ.ს.} = \nabla_{\max} + h_{runup,1\%} + h_{set}^{\text{ბ.ს.}} + a, \text{ მ}, \quad (\text{XI.3.1})$$

სადაც ∇_{\max} არის წყალსაცავში წყლის უმაღლესი ჰორიზონტის ნიშნული, მ; $h_{runup,1\%}$ – კაშხლის ნაპირსამაგრზე 1%-იანი უზრუნველყოფის ტალღის აგორების სიმაღლე, მ; $h_{set}^{\text{ბ.ს.}}$ – ტალღური მოდენის სიმაღლე, მ; $a = 0,5$ მ – ნაპირსამაგრი სიმაღლის მარაგი.

ცალკეულ შემთხვევაში შესაძლებელია კაშხლის ქიმზე დისკრეტული ტალღების გადადინება. ამ შემთხვევაში კაშხლის ფერდობზე ტალღის აგორების სიმაღლე იანგარიშება ორი დამოუკიდებელი ტალღური ფაქტორის – ე.წ. ტალღის „ღრმა წყალზე“ სიმაღლისა და სიგრძის ალბათური სიმკვრივის გამოყენებით.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ მთის წყალსაცავების პირობებში ტალღური მოდენის მნიშვნელობაა $h_{set}^{\text{ბ.ს.}} \leq 0,5 h_{runup,1\%}$, მაშინ ექსტრემალურ შემთხვევაში კაშხლის ქიმის ზედა საზღვრის ნიშნული ტოლია:

$$h_{ბ.ს.ს.} = K + 1,5 h_{runup,1\%}, \quad (\text{XI.3.2})$$

სადაც $K = \nabla_{\max} + 0,5$ მ.

მთის წყალსაცავებზე ტალღების ციკაბობა ტოლია $h_H / \lambda_H = \frac{1}{10} \div \frac{1}{20}$, კაშხლის ზედა ფერდის დახრილობა $m = 3,0 \div 0,9$, მაშინ $h_{runup,1\%}$ -ის მნიშვნელობა ტოლია:

$$h_{runup,1\%} = h_{H1\%} \cdot K_i \quad (\text{XI.3.3})$$

$h_{runup,1\%}$ -ის მნიშვნელობის ალბათური სიმკვრივე ფუნქციონალურად დამოკიდებულია ტალღის სიმაღლეზე, ხოლო მთის წყალსაცავების ტალღების სიმაღლის განაწილება სანაპირო ზონაში ასე ჩაიწერება:

$$F(h_i / \bar{h}) = \exp[0,65(h_i / \bar{h})^4], \quad (\text{XI.3.4})$$

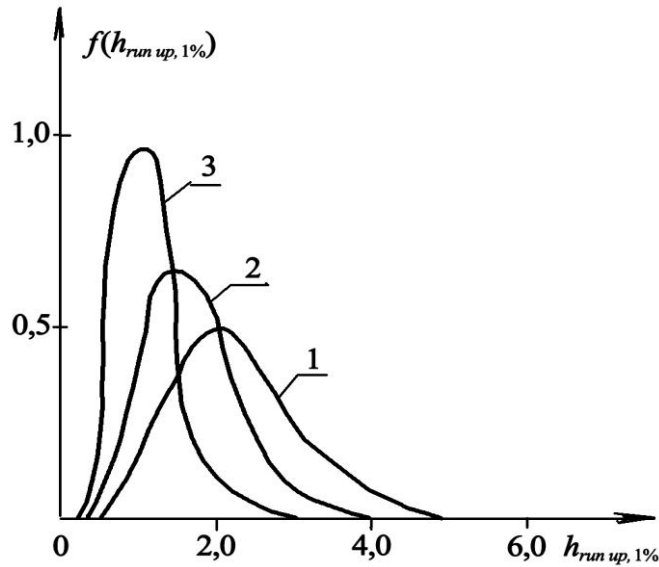
სადაც \bar{h} არის ტალღის სიმაღლის საშუალო მნიშვნელობა, ანუ ტალღის სიმაღლის განაწილება წარმოდგენილია ერთი შემთხვევითი მნიშვნელობის ფუნქციის სახით – ტალღის სიმაღლის „ღრმა წყალზე“, ყველა დანარჩენი სიდიდე – უცვლელია.

რიგი მათემატიკური გარდაქმნების შემდეგ განმეორადობის ფუნქციის (ალბათობის სიმკვრივის) მნიშვნელობა ასე ჩაიწერება:

$$f(h_{runup,1\%}) = 2,6 \left(\frac{h_{runup,1\%}}{\bar{h} K^{-3}} \right) \exp \left[0,65 \left(\frac{h_{runup,1\%}}{\bar{h}} \right)^4 \right], \quad (\text{XI.3.5})$$

სადაც $K = f(m) \cdot K_{ბორკ} \cdot K_{გამჭ} \cdot f(h_H / \lambda_H)$; $K_{ბორკ}$, $K_{გამჭ}$ – კაშხლის ფერდის გამაგრების ხორკლიანობის და გამჭოლიანობის კოეფიციენტებია.

ფუნქცია (XI.3.5)-ის რიცხობრივი რეალიზაცია მოყვანილია ნახაზზე XI.3.1, სადაც $m=3,0$, $h_{H,1\%}=0,5 \div 2,0$ მ, $h_H/\lambda_H=0,1$ [Иорданишвили И. К., 2000]:



ნახ.XI.3.1. ფუნქცია $f(h_{run\ up,1\%})$ სიმკვრივის ალბათობა
 1 – $h_{H,1\%} = 0,5$ მ, 2 – $h_{H,1\%} = 1,0$ მ, 3 – $h_{H,1\%} = 2,0$ მ

მაშინ კაშხლის ფერდის ქიმზე წყლის არგადადინების ალბათობა ტოლია:

$$P = \int_0^{2P} f(h_{run\ up,1\%}) dh_{run\ up,1\%} \cdot \quad (XI.3.7)$$

შემთხვევითი მნიშვნელობის $f(h_{run\ up,1\%})$ გაზრდისას იზრდება P ალბათობის მნიშვნელობებიც, რაც განაპირობებს ავარიების ხდომილობის პროგნოზირების აუცილებლობას.

გაანგარიშებების საფუძველზე შედგენილია ნაპირსამაგრი ნაგებობების კლასიფიკაცია ექსპლუატაციის პერიოდისა (t) და ალბათობის (P) გათვალისწინებით (ცხრ. XI.3.1).

ცხრილი XI.3.1

კაშხლების ნაპირსამაგრი ნაგებობების კლასიფიკაცია

პირველი კლასის ნაპირსამაგრი ნაგებობები	მეორე კლასის ნაპირსამაგრი ნაგებობები	მესამე კლასის ნაპირსამაგრი ნაგებობები
$P=0,99$ $t=1$ წელიწადი	$P=0,85$ $t=1$ წელიწადი	$P=0,75$ $t=1$ წელიწადი

აქ მოყვანილია ნაპირსამაგრის საიმედოობის ანგარიში, რომელიც ხორციელდება წყლის ნაკადის ფერდზე მაქსიმალური აგორების ნიშნულამდე; ხოლო ტალღის ჩამოქცევის ზონაში – ანგარიში ტარდება ფერდზე ტალღის მაქსიმალური დარტყმის ძალის გათვალისწინებით; ნაპირსამაგრი სისქის საიმედოობის ანგარიში ტარდება მოპირკეთების სისქის ზღვრული მნიშვნელობის გათვალისწინებით.

2. ნაპირსამაგრი სისქის საიმედოობის ანგარიში

მოპირკეთების ცვეთის ინტენსივობა, რომელიც დამოკიდებულია ცვეთის უნარიანობაზე, შეიძლება გამოვსახოთ დიფერენციალური განტოლებით [Мирицху-ლაва Ц.Е., 1974]:

$$\frac{dH}{dt} = \alpha H, \quad (\text{XI.3.8})$$

სადაც H ნაპირსამაგრის სისქეა, t – ექსპლუატაციის პერიოდი (წელიწადი), α – ცვეთის მუდმივა, რომლის მნიშვნელობა დგინდება დაკვირვებების საფუძველზე, მოპირკეთების ტიპისა და ხარისხის გათვალისწინებით. მაგალითად, $t = 45$ წლის მოპირკეთების ექსპლუატაციის განმავლობაში რკინაბეტონის ფილების რაოდენობის 50%-ის თავდაპირველი სისქე $H_0 = 50$ სმ – შემცირდა $H_0 = 40$ სმ-მდე. მაშინ (თუ ვიცით, რომ რემონტი აუცილებელია მოპირკეთების სისქის 8 მმ-ით შემცირებისას) ფორმულა (XI.3.8) შეიძლება ასე ჩაიწეროს:

$$H = H_0 e^{-\alpha t}, \text{ ანუ } 40 = 50 e^{-\alpha \cdot 45}, \quad (\text{XI.3.9})$$

სადაც ℓ ნეპერის რიცხვია.

(XI.3.9) განტოლებიდან მივიღებთ, რომ 45 წლის ექსპლუატაციის შემდეგ $a = 0,00456$, ხოლო დრო, რომელიც საჭიროა მოპირკეთების ცვეთის ზღვრულ სისქემდე –

$$t = \frac{1}{a} \ln \frac{50}{49,2} = 4,34 \text{ წელიწადი.}$$

XI.4. წყალსაცავების ექსპლუატაციის პერიოდის ეკოლოგიური საიმედოობის შეფასება

წყალსაცავიანი სისტემების ავარიებისა და კატასტროფების საფრთხის მაჩვენებლებია: წყალსაცავის ტაფობის გეომორფოლოგია; წყალსაცავის წყლით შევსების წყარო; ჰიდრომეტრიული, რელიეფისა და სეისმოლოგიური მაჩვენებლები; კაშხლის სამშენებლო მასალა; ატმოსფერული ნალექები. ამ მონაცემების ნორმალიზაცია ჩატარდა გარდაქმნების ხაზოვანი მეთოდის გამოყენებით, რის შედეგად დადგინდა საქართველოს წყალსაცავიანი სისტემების ავარიულობის საპროგნოზო მნიშვნელობების რანჟირება (ცხრ. XI.4.1) [Вартанов М., Иорданишвили И., Кечხოшвили И., Бераия Н., Шагирадзе М., 2020; Нормализация... (статистика)]:

- წყალსაცავის ტაფობის მორფოლოგია და წყლით შევსების წყარო – არ მოქმედებს (d_1);
- წყალსაცავის რაიონის ჰიდრომეტრია და რელიეფი – უმნიშვნელოდ მოქმედებს (d_2);
- წყალსაცავის რაიონის სეისმოლოგია – მოქმედებს სუსტად (d_3);
- კაშხლის სამშენებლო მასალა – უმნიშვნელოდ მოქმედებს (d_4);
- ატმოსფერული ნალექები – მოქმედებს ძლიერ (d_5);
- ჯამური საფრთხე (D), რომლის მნიშვნელობა გამოთვლილია შემდეგი ფორმულის მიხედვით: $D = 0,2(d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5)$.

საქართველოს წყალსაცავიანი სისტემების ბუნებრივი პირობების მახასიათებლების ნორმალიზებული მნიშვნელობები (X_{norm}) გამოთვლილია მინი-მაქსის მეთოდით [Нормализация... (статистика)] (ცხრ. XI.4.1):

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \cdot 0,9 + 0,1. \quad (XI.4.1)$$

ცხრილი XI.4.1

საქართველოს მოქმედი წყალსაცავების ზოგადი მახასიათებლების ნორმალიზებული (X_{norm}) მაჩვენებლები

№	წყალსაცავის დასახელება	წყალსაცავის ტაფობის გეომორფოლოგიური ტიპი		წყალსაცავის უცვსების წყარო	წყალსაცავის პიგმენტირია	რელიეფი	რაიონის სეისმოლოგია ბალებში	კაშხლის სამშენებლო მასალა	ნალექები, მმ		წყალსაცავის სიღრმე, მ	წყალსაცავის სრული მოცულობა, მლნ მ ³	სადელეამისო (ბაქსიმუმი)
		საშუალო წლის	სადელეამისო (ბაქსიმუმი)										
1	2	d ₁		d ₂		d ₃	d ₄	d ₅				X _{norm}	
1	ენგურის (ჯვრის)	d ₁ =1,0		d ₂ =0,66		d ₃ =0,55	d ₄ =0,1	d ₅ =1,0		230,0	109,0	0,52	
	ხეობის	მდ. ენგური	მთისწინეთის	დასერილი	8	ბ	1534,0	150÷200					
2	ჟინვალის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,78		d ₃ =1,0	d ₄ =1,0	d ₅ =0,82		98,0	510,0	0,90	
	„-“	მდ. არაგვი	მთის	„-“	9	მ	1082,0	150÷200					
3	ალგეთის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,66		d ₃ =0,55	d ₄ =0,4	d ₅ =0,52		72,9	63,0	0,46	
	„-“	მდ. ალგეთი	მთისწინეთის	„-“	8	ქნ	668,0	100÷150					
4	სიონის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,78		d ₃ =1,0	d ₄ =1,0	d ₅ =0,52		68,6	325,0	0,80	
	„-“	მდ. იორი	მთის	„-“	9	მ	825,0	100÷150					
5	ლაჯანურის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,66		d ₃ =1,0	d ₄ =0,1	d ₅ =0,7		67,8	24,6	0,52	
	„-“	მდ. ლაჯანური	მთისწინეთის	„-“	„-“	ბ	1283	100÷150					
6	ზონკარის (პატარა ლიახვის)	d ₁ =1,0		d ₂ =1,0		d ₃ =1,0	d ₄ =1,0	d ₅ =0,82		62,0	40,3	0,95	
	„-“	მდ. პატარა ლიახვი	მაღალი მთის	„-“	„-“	მ	948	150÷200					
7	გალის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,1		d ₃ =0,55	d ₄ =0,4	d ₅ =0,79		52,0	145	0,10	
	ქვაბულის	არხით	ვაკის	სწორი	8	ქნ	1646	100÷150					
8	თბილისის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,44		d ₃ =0,55	d ₄ =0,4	d ₅ =0,87		45,0	308	0,27	
	„-“	„-“	მთისწინეთის	„-“	8	„-“	596	200÷250					
9	ნარეკვავის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,78		d ₃ =0,55	d ₄ =0,1	d ₅ =0,82		40,3	6,8	0,80	
	ხეობის	მდ. ნარეკვაი	მთის	დასერილი	„-“	მ	1052	150÷200					
10	ტყიბულის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,66		d ₃ =1,0	d ₄ =1,0	d ₅ =0,58		32,0	84	0,77	
	„-“	მდ. ტყიბული	მთისწინეთის	„-“	9	მ	1648	75÷100					
11	გუმათის	d ₁ =1,0		d ₂ =0,44		d ₃ =1,0	d ₄ =0,4	d ₅ =0,79		30,0	39	0,55	
	„-“	მდ. რიონი	ვაკის	„-“	9	ბ	1592	100÷150					
12	ხრამის (წალკის)	d ₁ =5,55		d ₂ =0,46			d ₄ =1,0	d ₅ =0,40		25,0	312	0,32	
	ქვაბულის	მდ. ხრამი	მაღალი მთის	სწორი		ქმ	632	30÷175					
13	ზაჰესი	d ₁ =1,0		d ₂ =0,44		d ₃ =0,55	d ₄ =1,0	d ₅ =0,43		23,0	12,0	0,53	
	ხეობის	მდ. მტკვარი	მთისწინეთის	„-“	8	ბ	589	100÷150					

ცხრილი XI.4.1 (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
14	თავეწაროს	$d_1=0,1$		$d_2=0,44$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,52$		22,4	3,36	0,36
		ქვაბულის	მილსადენი	-,-	-,-			691	100÷150			
15	ლაფიანის	$d_1=0,1$		$d_2=0,55$		$d_3=1,0$ 9	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,73$		20,0	3,6	0,57
		-,-	არხით	მთის	-,-			875	150÷200			
16	კუხის	$d_1=1,0$		$d_2=0,33$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,79$		19,4	1,9	0,59
		ხეობის	მდ. კუმის წყალი	ვაკის	დასერილი			1608	100÷150			
17	კუშისხევის	$d_1=1,0$		$d_2=0,55$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,52$		18,4	4,0	0,41
		-,-	მდ. კუშისხევი	მთისწინეთის	-,-			682	100÷150			
18	პანტიანის	$d_1=0,1$		$d_2=0,55$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,1$		15,0	5,36	0,27
		ქვაბულის	არხით	მაღალი მთის	სწორი			658	30÷75			
19	შაორის	$d_1=0,55$		$d_2=0,55$		$d_3=1,0$ 9	$d_4=0,4$ ქნ	$d_5=0,91$		12,3	90	0,54
		ქვაბულის	მდ. შაორი	მთის	-,-			1203	150÷200			
20	დმანისის	$d_1=0,1$		$d_2=0,55$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,1$		11,5	11	0,27
		-,-	მდ. დმანისი	მაღალი მთის	-,-			649	30÷75			
21	ნადარბაზევის	$d_1=0,1$		$d_2=0,55$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,1$		11,0	8,2	0,27
		-,-	სატუმბი მოწყობილობა	მთის	-,-			749	30÷75			
22	ცხენის წყლის	$d_1=0,1$		$d_2=0,44$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,1$		10,5	1,5	0,22
		-,-	არხი	მთისწინეთის	-,-			692	30÷75			
23	ჭალის	$d_1=0,1$		$d_2=0,44$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,73$		10,0	1,4	0,43
		-,-	-,-	-,-	-,-			658	150÷200			
24	ოქტომბრის	$d_1=0,55$		$d_2=0,33$		$d_3=0,55$ 9	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,73$		8,5	1,7	0,48
		-,-	მდ. ფშავის ხევი	ვაკის	-,-			651	150÷200			
25	მარაბდის	$d_1=0,1$		$d_2=0,33$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,61$		8,0	1,2	0,35
		-,-	სატუმბი მოწყობილობა	მთისწინეთის	-,-			492	150÷200			
26	ვარციხის	$d_1=0,1$		$d_2=0,33$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,61$		8,0	14,6	0,34
		-,-	მდ. რიონი	ვაკის	-,-			987	100÷150			
27	მთისძირის	$d_1=0,1$		$d_2=0,66$		$d_3=0,55$ 8	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,1$		7,2	3,3	0,32
		-,-	არხით	მაღალი მთის	-,-			670	30÷75			
28	ჯანდარის	$d_1=0,1$		$d_2=0,33$		$d_3=0,1$ 7	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,64$		7,0	52	0,25
		-,-	-,-	მთისწინეთის	-,-			483	150÷200			
29	ზრესის	$d_1=0,1$		$d_2=0,55$		$d_3=0,55$ 9	$d_4=1,0$ მ	$d_5=0,1$		3,8	2,0	0,27
		-,-	-,-	მაღალი მთის	-,-			648	30÷75			

*) ბ - ბეტონის; ქნ - ქვანაყარი; მ - მიწის კაშხლები

ანალიზმა აჩვენა, რომ ყველაზე სენსიტიურია ზონკარისა (პატარა ლიახვის) და ჟინვალის წყალსაცავიანი სისტემები, სადაც (X_{norm})-ის მნიშვნელობები მაქსიმალურია, ხოლო გალის წყალსაცავი – გამოირჩევა ყველაზე მცირე სენსიტიურობით ($X_{norm}=0,1$). მოყვანილი მასალიდან ჩანს, რომ ჩასასხმელი წყალსაცავები გამოირჩევა დაბალი

სენსიტიურობით, ხოლო ყველაზე მაღალი სახიფათო მიზეზი, რომელსაც შეუძლია გამოიწვიოს ავარია და კატასტროფა – თავსხმა წვიმებია. აღსანიშნავია, რომ ხაზოვანი გარდაქმნის მეთოდის გამოყენებით მონაცემების ნორმალიზაცია – აპრიორული (ხარისხობრივი) მეთოდია.

წყალსაცავების ფუნქციონირების ეკოლოგიური საიმედოობის დასადგენად და ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მოწყვლადობის ხარისხის შესაფასებლად გამოყენებულია აკადემიკოს ც. მირცხულავას მიერ დამუშავებული დებულებები [Мирцхулава Ц.Е., 1974]. წყალსაცავების ფუნქციონირების საიმედოობის ასამაღლებლად მეცნიერულად დასაბუთებული მეთოდიკა ეყრდნობა ამ ნაგებობების მტყუნებების ანალიზს. წყალსაცავების „მტყუნება“ ამ შემთხვევაში განიხილება, როგორც ისეთი ხდომილება, რომლის შედეგად მისი შრომისუნარიანობა ირღვევა. ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ წყალსაცავის ფუნქციონირების უნარის შემცირება დამოკიდებულია წყალსაცავის ტაფობის დალამვის (მოსილვის) პროცესის მაღომინირებელი ფაქტორის მოქმედებაზე.

წყალსაცავის უმტყუნო მუშაობის საიმედოობის დასადგენად ჩატარდა ანგარიში, რომელიც ეფუძნება წყალსაცავის ისეთ საიმედოობას (P), რომლის დროს წყალსაცავის ტაფობს არ დასჭირდება გაწმენდა 10 წლის მანძილზე თუნდაც 9-ჯერ [Iordanishvili I., Iordanishvili K., Iremashvili I., 2009]:

$$P = 1 - P_K = 1 - \frac{\ell^{-a}}{K} \alpha^K, \quad (\text{XI.4.2})$$

სადაც $a=9$ განაწილების პარამეტრია; $K=10$ - შემთხვევითი სიდიდე, რომლის დისპერსიული განაწილება შეესაბამება პუასონის კანონს; ℓ - ნეპერის რიცხვი. მაშინ (XI.4.2)-ის შესაბამისად წყალსაცავს არ დასჭირდება გამწმენდი სამუშაოების ჩატარება 9-ზე მეტჯერ 10 წლის მანძილზე ამ ალბათობით – $P = 1 - P_K = 1,0 - 0,12 = 0,88$.

ამრიგად, იმისათვის, რომ წყალსაცავი ფუნქციონირებდეს უმტყუნოდ, მისი საიმედოობის მნიშვნელობა უნდა იყოს საკმაოდ მაღალი.

წყალსაცავის ფუნქციონირების პერიოდის გასაგრძელებლად საჭიროა:

- 1) წყალსაცავის რეგულარული მექანიკური გაწმენდა და ჰიდრაულიკური ჩარეცხვა;
- 2) წყალსაცავის აუზში ტყის მასივების აღდგენა და შექმნა; 3) მდინარეების კალაპოტებში ეროზიული პროცესების სტაბილიზაცია.

ბოლოთქმა

წინამდებარე მონოგრაფიაში მოყვანილია წინა წლებში გაანალიზებული და ახალი კვლევების შედეგები, რომელიც მოიცავს საქართველოს მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავებზე ეკო-ეკოლოგიური პროცესების თავისებურებებს.

ავტორების პირველი მონოგრაფიები – „Динамика внутриводоемных процессов горных водохранилищ Грузии“, 2004 წ. (რუსულ ენაზე) და „საქართველოს მთის წყალსაცავები და მათი ზემოქმედება გარემოზე“, 2000 წ., სადაც მოყვანილია მთის წყალსაცავების ნაპირების გადამუშავების მოცულობისა და დინამიკის, ტალღური და სედიმენტაციური პროცესების მეთოდოლოგია, წარმატებით იყო გამოყენებული სპეციალისტების მიერ. გავიდა არც ისე დიდი დრო, მაგრამ მიმდინარე სხვადასხვა პროცესების დინამიკამ მთის წყალსაცავებში მიიღო მნიშვნელოვანი ცვლილებები. შეგროვილი ახალი მასალის გამოყენებით შესაძლებელია ცალკეული საკითხების მნიშვნელოვანი განვითარება და ხელახალი გადახედვა.

წინამდებარე მონოგრაფიის შექმნა განპირობებულია საქართველოში ახალი მთის წყალსაცავების მშენებლობითა და ბოლო წლებში განვითარებული მასშტაბური ბუნებრივი კატაკლიზმებით, როგორცაა წყალდიდობები, მეწყერები, სანაპირო ფერდობების წარეცხვა, წყალსაცავების ტაფობის დაღამვა და მოსიღვა, ღვარცოფული მოვლენები და კაშხლების შესაძლო გარღვევები. აღწერილი და გაანალიზებულია უძველესი დროიდან შექმნილი წყალსაცავები და მათი ძირითადი მაჩვენებლები, მოყვანილია მსოფლიოს წყალსაცავების რაოდენობისა და სრული მოცულობის დინამიკა. გამოყოფილია მთისა და მთისწინეთის წყალსაცავების უპირატესობა ვაკის წყალსაცავებთან შედარებით. აღნიშნულია, რომ საქართველო იმ ქვეყნებს ეკუთვნის, რომელსაც ჰიდრორესურსებით შეუძლია ენერგეტიკისა და ირიგაციის მოთხოვნილებები თვითონ უზრუნველყოს, რაც ჰიდროტექნიკური კვანძების დამპროექტებლების ძირითადი ამოცანაა.

მაღალმთიან რეგიონებში ელექტროენერჯის მისაღებად ყველაზე რაციონალური სქემაა მთავარი მდინარისა და მისი შენაკადების სათავე ნაწილში მაღალდაწნევიანი დანადგარების მოწყობა, ხოლო მდინარის ქვედა ნაწილში – ირიგაციის. როგორც წესი, მთის მდინარეების სათავე ნაწილი განლაგებულია ღრმა და ციცაბო ფერდობებიან ხეობებში. ამიტომ, აქ მიზანშეწონილია მაღალი კაშხლების აგება, ხოლო ქვედა ბიეფის ფართობები, რომლებიც გამოირჩევა მცირე დახრილობით გამოიყენება მოსარწყავად. მიზანშეწონილია საქართველოს ტერიტორიაზე ღრმა წყალსაცავების აგება, რომლებიც გამოირჩევა ტერიტორიის მცირე ფართობის დატბორვითა და უმნიშვნელო ეკოლოგიური პრობლემებით.

დასმული საკითხების შესწავლის მიზნით აუცილებელი გახდა მსოფლიოსა და საქართველოს ტერიტორიაზე აგებული წყალსაცავების ფონდის დახასიათება, ფსკერზე სედიმენტაციური და ნაპირების აბრაზიული პროცესების ცნობილი კვლევების ანალიზი.

საქართველოში არსებული სამეცნიერო ლიტერატურის, საპროექტო და

სამეცნიერო ორგანიზაციებიდან მოპოვებული მონაცემების შესწავლის საფუძველზე შედარებულია შვიდი მსხვილი წყალსაცავის (სიონის, თბილისის, ჟინვალის, ხრამის, შაორის, ლაჯანურისა და ტყიბულის) საპროექტო გეგმები და პროფილები. საველე სამუშაოების საფუძველზე ჩატარდა ამ წყალსაცავების ფსკერისა და ნაპირების ამჟამინდელი პროფილების აგეგმვა და მათი დატანა საპროექტო პროფილებზე. დადგინდა ზემოთ ჩამოთვლილი წყალსაცავების სედიმენტაციური და აბრაზიული პროცესების მასშტაბები და დინამიკა. გამოყვანილია მათი მრავალფაქტორიანი საანგარიშო პროგნოსტიკული დამოკიდებულებები პერიოდის, ნაპირების ფიზიკურ-მექანიკური აგებულების, ქარ-ტალღური, დონური რეჟიმისა და სხვა ფაქტორების გათვალისწინებით. განხილულია მთის წყალსაცავების ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების განვითარების გამაფრთხილებელი და საექსპლუატაციო ღონისძიებები. მითითებულია, რომ წყალსაცავების ფსკერის გაწმენდის ყველაზე გავრცელებული მეთოდია – კაშხლების ძირში გამრეცხი გალერეების მოწყობა. აღნიშნულია, რომ საქართველოს წყალსაცავების ფსკერის ნატანისგან ეფექტური ჰიდრაულიკური ჩარეცხვა ჯერ არც ერთ წყალსაცავზე არ განხორციელებულა.

დამუშავებულია მთის წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვისაგან დამცავი ახალი კონსტრუქციები – მოდიფიცირებული „ჰექსაბლოკი“ და „ტეტრაბლოკი“, რომლებიც გამოირჩევა მაღალი ტალღაჩამქრობი უნარიტა და ურთიერთშეჭიდულობით, ფერდზე ტალღების აგორების სიმაღლის შემცირებით. გაანგარიშებულია ამ მასივების ოპტიმალური მასის დასადგენი უნივერსალური დამოკიდებულება.

ჩამოყალიბებულია მთის წყალსაცავების სანაპირო და წყალდამცავი ზონების დანიშვნის პრინციპები. მოყვანილია წყალსაცავების წყალდამცავი სანაპირო ზოლისა (ს.ზოლ.) და წყალდამცავი ზონის (წ.ზონ.) სიდიდეების ანგარიში, რომელთა ჯამური სიგანის მნიშვნელობა დამოკიდებულია წყალსაცავის ფერდის დახრილობაზე, ტყის სახეობაზე, ფერდის ექსპოზიციასა და მოხვნის მიმართულებაზე. მოყვანილია სიონის წყალსაცავის სანაპირო ზოლისა და წყალდამცავი ზონის განსაზღვრის მაგალითი. აღნიშნულია, რომ საქართველოს წყალსაცავებზე დამცავი ზონების სიდიდე არ არის დაცული.

განხილულია მთის წყალსაცავების დაცლის ან შევსების დროის ანგარიში მდინარიდან ჩამოდინებული და ღიობიდან გადინებული წყლის მუდმივი ხარჯების დროს. მოყვანილია სიონის წყალსაცავის სრული დაცლის პერიოდის გაანგარიშების მაგალითი.

წინამდებარე ფუნდამენტური მონოგრაფიის გამოცემის სტიმულია ავტორების მრავალრიცხოვანი პუბლიკაციები რუსეთის, ამიერკავკასიის ქვეყნების, ბელარუსის, საქართველოს წამყვან ჟურნალებში და მოხსენებები სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციებზე, რის გამოც ავტორები მადლობას უხდებიან სამეცნიერო ჟურნალების, საერთაშორისო კონფერენციების შრომათა კრებულების რედკოლეგიის წევრებს და შ. რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერისთვის.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. ბერძენიშვილი გ., ირემაშვილი ხ. სამთო ღრმა წყალსაცავის წყალუხვობის დროს მიწის კაშხლის წარეცხვის რისკების შეფასებისა და პროგნოზირების მეთოდოლოგია. //მე-VI საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“, თბილისი, 2016, გვ. 95-98;
2. გავარდაშვილი გ., კუხალაშვილი ე., კუპრეიშვილი შ., გავარდაშვილი ნ. ღვარცოფ-სარეგულაციო ელასტიკური ბარაჟი. პატენტი, საიდენტიფიკაციო კოდი AP14656, 2018 წ.;
3. გავარდაშვილი გ., კუხალაშვილი ე., სუპატაშვილი თ., ირემაშვილი ი., ბზიავა კ., ნატროშვილი გ., ქუფარაშვილი ი. მოწყვლადი ინფრასტრუქტურის უსაფრთხოების რისკების შეფასება მოსალოდნელი კატასტროფების ფორმირებისას. თბილისი, „უნივერსალი“, 2022, 170 გვ.;
4. გავარდაშვილი გ. ტყის ხანძრებისგან დაცვის მეთოდური რეკომენდაციები. თბილისი, 2017, 82 გვ.;
5. გრიგოლია გ., კერესელიძე დ., ტრაპაიძე ვ., ბრეგვაძე გ. მდ. მტკვრის (ლიკანთან) წყალდიდობებისა და წყალმოვარდნების სიხშირის შეფასება. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, №69, „უნივერსალი“, თბილისი, 2014, გვ. 69-73;
6. დიაკონიძე რ., ჩახაია გ., წულუკიძე ლ., ვარაზაშვილი ზ., სუპატაშვილი თ., კუპრეიშვილი შ., მთიულიშვილი ნ. თბილისის ზღვის ეკოლოგიური პრობლემები და მათი პრევენციის ღონისძიებები. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №68, „უნივერსალი“, თბილისი, 2013, გვ. 57-63;
7. დიაკონიძე რ. პლანეტის გლობალური დათბობა და ღვარცოფები. //წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, „უნივერსალი“, თბილისი, 2005, გვ. 21-23;
8. დონაძე გ. კვლევის მეთოდები სამხედრო გეოგრაფიაში. „ლეგა“, თბილისი, 2007, 76 გვ.;
9. თევზაძე თ., იორდანიშვილი ი., ფოცხვერია დ. წყლის ხარისხის დინამიკა აღმოსავლეთ საქართველოს არიდული ზონის ხელოვნურ წყალსაცავებში და მათ მიმდებარე გეოეკოლოგიურ ტერიტორიაზე. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №67, „უნივერსალი“, თბილისი, 2012, გვ. 84-93;
10. იორდანიშვილი ი., გავარდაშვილი გ., ირემაშვილი ი., იორდანიშვილი კ. ჰიდრო-საინჟინრო ტერმინოლოგიის განმარტებითი ლექსიკონი. „უნივერსალი“, თბილისი, 2021, 371 გვ.;
11. იორდანიშვილი ი., ვართანოვი მ., იორდანიშვილი კ., ირემაშვილი ი., ბილანიშვილი ლ. ელექტრო ენერჯის წარმოებისათვის საქართველოს ჰიდრორესურსების გამოყენების ეფექტურობა. //საქ. ტექნ. უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №75, უნივერსალი, თბილისი, 2022;
12. იორდანიშვილი ი. მთის წყალსაცავების ნაპირდამცავი ღონისძიებების ეკოლოგიური საიმედოობის შეფასება. //ჟ. „ენერჯია“, №4, თბილისი, 1997, გვ. 48-50;
13. იორდანიშვილი ი. მთის წყალსაცავების ნაპირდამცავი ღონისძიებების საიმედოობის უზრუნველყოფა. //საერთაშორისო კონფერენციის „ეროზიულ-ღვარცოფული მოვლენები და ზოგიერთი მომიჯნავე პრობლემები“ მოხსენებების კრებული, საქჰიდროეკოლოგია, „უნივერსალი“, თბილისი, 2001, გვ. 87-92;

14. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ნატროშვილი გ., ფოცხვერია დ., კანდელაკი ნ., ბილანიშვილი ლ.** სიონის მიწის კაშხლის სუფოზიური და ფილტრაციული პროცესების შეფასება. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, №70, „უნივერსალი“, თბილისი, 2015, გვ. 72-76;
15. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ.** აღმოსავლეთ საქართველოს ბუნებრივი წყლის ძირითადი მარაგისა და წყლის რესურსების ფორმირებისა და გამოყენების თავისებურებანი. „უნივერსალი“, თბილისი, 2008, 144 გვ.;
16. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ.** დასავლეთ საქართველოს ბუნებრივი წყლის ძირითადი მარაგისა და წყლის რესურსების ფორმირებისა და გამოყენების თავისებურებანი. „უნივერსალი“, თბილისი, 2008, 158 გვ.;
17. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ.** საქართველოს მთის წყალსაცავები და მათი ზემოქმედება გარემოზე. „უნივერსალი“, თბილისი, 2010, 340 გვ.;
18. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ.** საქართველოს წყალსამეურნეო ობიექტების კადასტრი. „უნივერსალი“, თბილისი, 2015, 223 გვ.;
19. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ჭარბაძე ზ., ჯავახიშვილი ლ.** საქართველოს მთის წყალსაცავების სედიმენტაციური პროცესების ეკოლოგიური საიმედოობის შეფასება. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №66, „უნივერსალი“, თბილისი, 2011, გვ. 93-97;
20. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ხოსროშვილი ე.** წყალსაცავიანი სისტემების მოწყვლადობის შეფასება. //წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №68, „უნივერსალი“, თბილისი, 2013, გვ. 103-107;
21. **იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., იორდანიშვილი კ., მღებრიშვილი მ., ქუფარაშვილი ი., ნატროშვილი გ., ფოცხვერია დ., კანდელაკი ნ., ბილანიშვილი ლ.** წყალსაცავების დაცვის და შევსების დროის განსაზღვრა // X International Scientific and Technical conference “Modern Problems of water management, environmental protection, architecture and construction”. „უნივერსალი“, Tbilisi, 2021, გვ. 72-78;
22. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ხოსროშვილი ე., ნატროშვილი გ., ფოცხვერია დ., ბილანიშვილი ლ.** მთის წყალსაცავების და მათი კასკადების ენერგორესურსების გამოყენების ეფექტურობა //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №74, „უნივერსალი“, თბილისი, 2019, გვ. 51-64;
23. **იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ფოცხვერია დ., კანდელაკი ნ., ბილანიშვილი ლ.** გლობალური დათბობით გახშირებული სტიქიური მოვლენების გავლენა საქართველოს წყლის რესურსებზე. //ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №72, „უნივერსალი“, თბილისი, 2017, გვ. 75-87;
24. **იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., ნატროშვილი გ., იორდანიშვილი კ., გლუნჩაძე მ.** კაშხლების კრიტიკული მდგომარეობის შეფასება. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №74, „უნივერსალი“, თბილისი, 2019, გვ. 65-76;
25. **იორდანიშვილი ი., იორდანიშვილი კ., ხოსროშვილი ე., ხუბულავა ი.** გლობალური დათბობა და მისი შედეგები. //ქ. „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“, №1-3, თბილისი, 2008, გვ.70-75;
26. **იორდანიშვილი ი.** სისტემური ანალიზის გამოყენება ჰიდროელექტროსადგურების წყალსაცავებში ტალღების ჰიდრავლიკის შესწავლისას. //ქ. „ენერჯია“, №4(8), თბილისი, 1998, გვ. 96-99;

27. **იორდანიშვილი კ., იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., კანდელაკი ნ., ბილანიშვილი ლ.** საქართველოს წყალსაცავებით აღძრული სეისმური მოვლენები. //ახალგაზრდა მეცნიერთა საერთაშორისო კონფერენციის „დედამიწის შემსწავლელი მეცნიერების თანამედროვე პრობლემები“ მოხსენებების კრებული. ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 21-22 ნოემბერი, 2022, გვ. 26-30;
28. **იორდანიშვილი კ., იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., მღებრიშვილი მ., ქუფარაშვილი ი., კანდელაკი ნ., ხოსროშვილი ე., ბილანიშვილი ლ.** წყლის ხარისხის ფორმირების და თვითწმენდის პროცესები ჟინვალის წყალსაცავში. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №75, „უნივერსალი“, თბილისი, 2022;
29. **კანდელაკი ნ., იორდანიშვილი ი., ირემაშვილი ი., კუპრეიშვილი შ., იორდანიშვილი კ.** წყალსაცავების აბრაზიული ნაპირების წარეცხვისაგან დამცავი ახალი კონსტრუქციების დამუშავება. //საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის „ბუნების კატასტროფები საქართველოში: მონიტორინგი, პრევენცია, შედეგების შერბილება“ მოხსენებების კრებული, ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 2019, გვ. 237-243;
30. **კანდელაკი ნ., კუპრეიშვილი შ.** სედიმენტაციური პროცესების განვითარების საწინააღმდეგო ღონისძიებები მთის წყალსაცავებში. //IX საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“, მოხსენებების კრებული, „უნივერსალი“, თბილისი, 2019, გვ. 122-129;
31. **კანდელაკი ნ.** ლაჯანურის და ტყიბულის წყალსაცავების სედიმენტაციური პროცესების დინამიკა. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 86-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. ტექნიკური უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 2019, გვ. 30;
32. **კანდელაკი ნ.** ჟინვალის, თბილისის, ხრამის, ტყიბულის, შაორის და ლაჯანურის წყალსაცავების სედიმენტაციური პროცესების გაანგარიშება და პროგნოსტიკული ჯგუფის დამუშავება. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 87-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. ტექნიკური უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 2019;
33. **კანდელაკი ნ., სილაგაძე ა.** სიონის წყალსაცავის ფსკერზე სედიმენტაციური პროცესების შეფასება და პროგნოზირება. //საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, №72, „უნივერსალი“, თბილისი, 2017, გვ. 75-99;
34. **კერესელიძე დ.** საქართველოს წყალსაცავების ჰიდროეკოლოგიური პრობლემები. თბილისი, 1994, 214 გვ.;
35. **კუპრეიშვილი შ., სუპატაშვილი თ., დადიანი ქ., კიკნაძე ხ., მაისაია ლ.** სამრეწველო ნარჩენების გავლენა გარემოს ეკოლოგიურ მდგომარეობაზე. //საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენციის „ინოვაციური ტექნოლოგიები და გარემოს დაცვა“ მოხსენებების კრებული, ქუთაისი, 2012;
36. **მეტრეველი გ., მაჭავარიანი ლ., გულაშვილი ზ.** წყალსაცავების პოზიტივები და ნეგატივები. „სამშობლო“, თბილისი, 2022, 200 გვ.;
37. **მეტრეველი გ.** ჟინვალის წყალსაცავის წყლის ბალანსი, თსუ, თბილისი, 1999, 38 გვ.;
38. სამელიორაციო სისტემების ტექნიკური ექსპლუატაცია. სახელმძღვანელო, თბილისი, 2013 წ.

39. საქართველოს პირველი ეროვნული შეტყობინება კლიმატის ცვლილებების ჩარჩო კონვენციისათვის. თბილისი, 1999;
40. საქართველოს მეორე ეროვნული შეტყობინება კლიმატის ცვლილების ჩარჩო კონვენციისათვის. თბილისი, 2009;
41. სიჭინავა პ., ლობჯანიძე ზ., კუპრეიშვილი შ. საქართველოს მდინარეების ჰიდროტექნიკური კლასიფიკაცია კალაპოტების მახასიათებლების მიხედვით. //სტუ-ს წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, №68, „უნივერსალი“, თბილისი, 2013, გვ. 57-63;
42. ფანჩულიძე ჯ., მეტრეველი გ. მთის წყალსაცავების გარემოზე ზემოქმედების შეფასების კრიტერიუმები. //V საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“, მოხსენებების კრებული. თბილისი, 2015, გვ. 288-292;
43. ქურჩიშვილი ა., ქურჩიშვილი ლ. ალბათობის და მათემატიკური სტატისტიკის ელემენტები. „უნივერსალი“, თბილისი, 2001, 188 გვ.;
44. ლუტიძე პ. დიდი წყალსაცავის შესაძლო გავლენის შესახებ სეისმურ აქტივობაზე. //ქ. „ენერჯია“, №4, თბილისი, 1997, გვ.40-42;
45. ლუტიძე პ., რუსაძე ვ., ჩხიკვაძე კ. ენგურის თაღოვანი კაშხლის სეისმომედეგობის რეტრო-სპექტული გამოკვლევა. //ქ. „ენერჯია“, თბილისი, 2000, გვ. 52-58;
46. ყრუაშვილი ი., ინაშვილი ი., კუპრეიშვილი მ., ბზიავა კ. წყლის რესურსების ინტეგრირებული მართვა. საქართველოს სახელმწიფო სასოფლო-სამეურნეო უნივერსიტეტი, თბილისი, 2008, 320 გვ.;
47. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ. ღვარცოფული მოვლენები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. თბილისი, 2017, 249 გვ.;
48. ჰიგიენური მოთხოვნები წყლის შემადგენლობასა და ხარისხზე სასმელ-სამეურნეო და კულტურულ საყოფაცხოვრებო წყალმომარაგების ობიექტებში და წყალში მავნე ნივთიერებების შემცველობის ზღვრულად დასაშვები კონცენტრაციები (ზდკ). საქართველოს შრომის, ჯანმრთელობის და სოციალური დაცვის მინისტრის 2001 წლის 16 აგვისტოს N297/ნ „გარემოს ხარისხობრივი მდგომარეობის ნორმების დამტკიცების შესახებ“. საქართველოს ოფიციალური ბეჭდვითი ორგანო. „საქართველოს საკანონმდებლო მაცნე“ (სსმ), N90, 24.08. 2001, გვ. 91-93.;
49. **Andredaki M., Georgoulas A., Hrissanthou V., Kotsovinos N.** Assessment of reservoir sedimentation effect on coastal erosion in the case of Nestos River, Greece. //International Journal of Sediment Research, 29(1), 2014, pp. 34-48;
50. **Basilashvili Ts.** – Reservoirs on the mountain rivers and their safety, 2020;
51. **Bennett S.J., Dunbar J.A., Rhoton F.E., Allen P.M., Bigham J.M., Davidson G.R., Wren D.G.** Assessing sedimentation issues within aging flood-control reservoirs. Reviews in Engineering Geology, 2013, pp. 21, 25-44;
52. **Beritashvili B.** Climate and Climate Change. Georgian Technical University, Tbilisi., 2011, 176 p.;
53. **Bilyway E., Ozbachceci B., Bacanli S., Kiziroğlu G.A.** New Approach to Breakwater Design – 2B Block. //Coastal Engineering Proceedings, Bilyay, №35, 2016;
54. **Boryczko K., Bartoszek L, Koszelnik P., Rak J.** A new concept for risk analysis relating to the degradation of water reservoirs. //Environmental Science and Pollution Research, 25(25), 2018, pp. 25591-25599;
55. **Bretschneider C.L.** Theory for waves of Finite light. Proc. of the seventh conf. on Coastal Engineering, 1961;

56. **Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F., Jones P.D.** Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, *J. Geophys. Res.*, 2006, 111 p.;
57. **Burova V.N.** Abrasion Risk Assessment on the Coasts of Seas and Water Reservoirs. //Geodetski list, 74(2), 2020, pp. 185-98;
58. **Clements F.E.** Research methods in ecology. Linkoln, Nebraska, 1905;
59. **Critical loads and critical limit values.** Edit. H. Raitio. Finland, 1994, 192 p.;
60. **Copinath G., Ashitha M.K., Jayakumar K.V.** Sedimentation assessment in a multipurpose reservoir in Central Kerala. //India, *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11), pp. 4441-4449;
61. **Culling W.** Theory of erosion on soil-covered slopes. //I. *Geoe.*, vol 73, 2, 1965;
62. **Gavardashvili G.V.** Forecast of Flooded Territories By Flooding In Case of Possible Accident of Shaori Rockfill Dam. //The International Conference on “Protection of Agrobiodiversity and Sustainable Development of Agriculture”. Tbilisi, Georgia, November 24-25, 2010, pp. 295-299;
63. **Gavardashvili G.V., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Quparashvili I., Bziava K., Natroshvili G.** Field Survey and Assessment of Ecological Processes Occurring in the Water Area of Zhinvali Reservoir. //8th International Scientific and Technical Conference “Modern Problems of Water Management, Environmental Protection, Architecture and Construction”. “Universal”, Tbilisi, 2018, pp. 27-34;
64. **Gavardashvili G.V., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Natroshvili G., Quparashvili I.** The Research of Water Levels in the Zhinvali Water Reservoir and Results of Field Research on the Debris Flow Tributaries of the River Tetri Aragvi flowing in it. //International Conference on Engineering and Technology. WASET, Rome, Italy, January 17, 2019, pp. 702-705;
65. **Gavardashvili G.V.** Prediction of Flooded Territories in Case of Possible Breakdown of the Sioni Earth Dam. //International Conference on VAIONT – 1963-2013, Thoughts and analyses after 50 years since the catastrophic landslide. Padua, ITALY, 8-10 October, 2013, pp.417-423;
66. **Georgia’s Second National Communication** to the United Nations Framework Convention on Climate Change. National Climate Research Centre, Tbilisi, 2009;
67. **Georgia’s Third National Communication** of Georgia to the United Nations Framework Convention on Climate Change. National Climate Research Centre, Tbilisi, 2015;
68. **Gerstner F.I.** Theori der Wellen. Gilberts Annabn der Physic. Bol. 32, 1809;
69. **Global Climate Observing System** GCOS implementation plan for the Global Observing System for Climate in support of the UNFCCC, Rep. GCOS 92, WMO/TD 1219, Geneva, Switzerland, 2004, 136 p.;
70. **Haeckel E.** Generale morphologie der organismen. Bd. I, Berlin, 1866, 574 s.
71. **Hartl I.** Schlepspannungen an Böschungen beim auflaufen von wellen. Österreichische Wassewirrschaft. Heft 11/12, 1978, pp. 238-244;
72. **Hansen A.** Wave setup and design water level. Discussion. I. of the waterway part coastal and ocean division. 1978, pp. 227-340;
73. **Henriksen A., Kamari I., Posch M., Wilander A.** Critical loads of Acidity, Nordic Surface Waters. //AMBIO, V, 21, 1992, pp. 356-363.
74. **Hosseinjanzadeh H., Hosseini K., Kaveh K., Mousavi S.F.** New proposed method for prediction of reservoir sedimentation distribution. //International Journal of Sediment Research, 30(3), 2015, pp. 235-240;
75. **Iordanishvili I., Iordanishvili K., Iremashvili I.** Assessments of ecological reliability of mountain

- reservoirs given increased frequency of floods (as exemplified by the Sioni Reservoir). //International Symposium on "Floods and modern methods of control measures". "Universal", Tbilisi, 2009, pp. 202-209;
76. **Iordanishvili I., Iordanishvili K., Iremashvili I., Potskhveria D., Khosroshvili E., Kandelaki N.** Modeling procedure of coastal protection shaped blocks with high waves suppressing and interlocking capacity. //4th International scientific and technical conference. «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction». Water management institute; Ecocenter for environmental protection, "Universal", Tbilisi, 2014, pp. 122-128;
 77. **Iordanishvili I., Iremashvili I., Iordanishvili K., Bilanishvili L., Potskhveria D., Kandelaki N., Sukhishvili N.** Graph analytical method of forecasting the transformation of abrasion banks of highland water reservoirs. //VII International Scientific and Technical conference "Modern Problems of water management, environmental protection, architecture and construction". "Universal", Tbilisi, 2017, pp. 52-60;
 78. **Iordanishvili K., Qigley B., Matcharadze C.** Integrated sediment management plan of the cascade of reservoirs on the river Rioni. //Aqua-Media International Ltd. POBOX 285 Wallington Surrey SM6 6 AN/ UK Gernobbio. Italy International journal on Hydropower & Dams, 2014, 2 p.;
 79. **Jain S.K., Singh V.P.** Water Resources Systems Planning and Management. Elsevier, 2003, 882 p.;
 80. **Jonson D.W.** Shore Process and Shoreline Development, 1966;
 81. **Kandelaki N., Iordanishvili I., Iremashvili I., Ujma A., Shurgaya V., Iordanishvili K.** Modeling procedure of coastal protection shaped blocks with high wave suppressing and interlocking capacity. //XXII International scientific conference on advances in civil engineering construction the form of living environment, Uzbekistan, Tashkent, E3S Web oxcont, 2019;
 82. **Kandelaki N., Iordanishvili I., Ujma A., Iremashvili I., Iordanishvili K., Kupreishvili Sh., Shurgaya V., Natroshvili G.** Impact of natural disasters on water resources of Georgia caused by global warming. //Archives of Hydro-Engineering and environmental mechanics. Institute of Hydro-engineering of the Polish Academy of Sciences, Vol 66, №1-2 (2019), pp. 15-26;
 83. **Kandelaki N., Kupreishvili Sh.** Efficiency of water reservoir construction in mountainous areas. //VIII International scientific and technical conference "Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction", "Universal", Tbilisi, 2018, pp. 142-155;
 84. **Karoly D.J., Stott P.A.** Anthropogenic warming of central England temperature, //Atmos. Sci. Lett., 7, 2006, pp. 81-85;
 85. **Kosyan R.D., Krylenko M.V.** Sea of Azov coasts. Estuarine, 2019, 224, pp. 314-323;
 86. **Kutuzov S.S., Mikhalenko V.N., Grachev A.M., Ginot P., Lavrentiev I.I., Kozachek A.V., Krupskaya V.V., Ekaykin A.A., Tielidze L.G., Toropov P.A.** First geophysical and shallow ice core investigation of the Kazbek plateau glacier, Caucasus Mountains. //Environmental Earth Sciences ,vol. 75, art. 1488, 2016;
 87. **Lagidze L., Matchavariani L., Metreveli G., Tsivtsivadze N., Paichadze N., Gulashvili Z., Svanadze D.** Evaluation of Climate Parameters of Black Sea Coastline in the Background of Climate Change. //Journal of Environmental Biology. Special Issue "Environment and Ecology", vol. 38(5), 2017, pp. 1069-1077;
 88. **Li D., Lu X., Overeem Ir., Walling D.E., Syvitski J., Kettner A.J., Bookhagen B., Zhou Y., Zhang T.** Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia. Science 2021, pp. 374, 599-603;
 89. **Li Jia-qing, Li W., Zhang Sh., Ndukeva H.** Water resources and geography education in China.

//International Symposium on floods and modern methods of control measures, Tbilisi, 2009;

90. **Loucks D.P., Eelco van Beek.** Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods models and Applications. Springer, 2017, 624 p.;
91. **Mansikkamaki H.** Monthly sedimentation in some reservoirs of hydroelectric stations in Finland. //Fennia-International Journal of Geography, 2013, 143 (1);
92. **Marco J.B., Harboe R., Salas J.D. (Ed.).** Stochastic Hydrology and its in Water Resources Systems Simulation and Optimization. //Springer Science & Business Media, NATO ASI Series E: Applied Science, vol. 237, 2012, 483 p;
93. **Matchavariani L., Lagidze L.** Environment Transformation in Georgia as a Result of Climate Change. Environment and Ecology in the Mediterranean Region, Chapter 35, Cambridge Scholars Publishing, Uk, 2012, pp. 379-392;
94. **Matchavariani L., Metreveli G., Lagidze L., Paichadze N.** Siltation Problem of Mountainous Reservoirs and its Solution for Sustainable Hydropower. //16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & Expo SGEM2016. Proceedings, book 3 "Water Resources, Forest, Marine & Ocean Ecosystems", vol. 1 "Hydrology & Water Resources", Albena, Bulgaria, 2016, pp. 661-667;
95. **Mehta V.M., Soares M.J., Manganello J.V., Delworth T.L.** Oceanic influence on the North Atlantic oscillation and associated Northern Hemisphere climate variations: 1959-1993, Geophys. Res. Lett., 27, 2000, pp. 121-124;
96. **Metreveli G., Matchavariani L., Gulashvili Z.** Method for Hydrological Parameters Definition of Silting Prism and Equilibrium Bed in Water Reservoirs. //Proceedings of the 19th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Bulgaria, 2019, vol. 19(3.1), pp. 363-368;
97. **Metreveli G., Metreveli L.** Research Method of Silting the Mountain Reservoirs Under the Current Climate Change. //Journal of Water Resources and Ocean Science. Science Publishing Group, 5(2), 2016, pp. 22-27;
98. **Metreveli G.S., Metreveli M.G.** Background Factors of Global Climate Warming in the Coastal Zone of the Black Sea. //Water Resources, vol. 28, №5, 2001, pp. 568-573;
99. **Miche M.B.** Movements on du toires de la mere en profondeur constante ou decroissante. Ann. Points et ohausses, 4,114, №3, 1954, pp. 4-6;
100. **Odilavadze T., Bziava K., Bagration-Davitashvili A., Inashvili I.** Ecological strategy for rational use of water resources. //VII International scientific and technical conference "Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction". "Universal", Tbilisi, 2017, pp.153-155;
101. **Parker D., Folland C., Scaife A., Knight J., Colman A., Baines P., Dong B.** Decadal to multidecadal variability and the climate change background. //Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 112 (D18115), 2007;
102. **Patriadi A., Soemitro R., Warnana D., Wasis Wardoyo, Toshifumi Mukunoki and Gozo Tsujimoto** The Influence of Sembayat Weir on Sediment Transport Rate in the Estuary of Bengawan Solo River. //Indonesia. Intern. Journal of GEOMATE, vol. 20, Issue 81, 2021, pp. 35-43;
103. **Ran L., Lu X., Xin Z., Yang X.** Cumulative sediment trapping by reservoirs in large river basins: A case study of the Yellow River basin. Global and Planetary Change, 100, 2013, pp. 308-319;
104. **Reid J.R.** Mechanisms of shoreline erosion along lakes and reservoirs. In Proceedings, US Army Corps of Engineers Workshop on Reservoir Shoreline Erosion: A National Problem, 1992, pp. 18-32;

105. Savilli T. Model Study of sand transport a long uninfinieex kong. //Тачу, V. 31, №4, 1950;
106. Soares F., Henriques M.J., Roca C. Concrete block tracking in breakwater models. //Conference: FIG Working Week, Helsinki, 2017;
107. Solomon S., Daniel J.S., Neely R.R. III, Vernier J.-P., Dutton E.G., Thomason L.W. The Persistently Variable "Background" Stratospheric Aerosol Layer and Global Climate Change. //Science, vol. 333(6044), 2011, pp. 866-870;
108. Sorokina O.A., Petrova L.E., Dontsov A.V., Fedorinov A.V., Antropov D.V. Protection of coastal territories of Russian water reservoirs using land management methods. //InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 350, No. 1, p. 0120070. IOP Publishing, 2019,;
109. Starodubtsev V.M., Bogdanets V.A. Dynamics of the Tsimlyansk Reservoir Coastline. //S. World Journal, 1102, 2016, pp. 7-15;
110. Stoker G.G. On the oscillatory waves. Trans. Cambridge Philosophical Society, 8, 1847;
111. Summary of the working groups report. IPCC, WMO, UNEP. Cambridge, UK, 1996;
112. Thompson D.W., Wallace J.M. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. //Science, 293, 2001, pp. 85-89;
113. Varazashvili N.G., Jordanishvili (Radchenko) I.K. Distribution of velocities of running up flow on slopes affected by waves, //XX conares De LiRH Volume VII, ВИНТИ, М., 1983, pp. 154-158;
114. Volterra V. Fluctuations in the Abundance of a Species considered Mathematically. Nature, 1926;
115. Zhang R., Delworth T.L., Held I.M. Can the Atlantic Ocean drive the observed multidecadal variability in Northern Hemisphere mean temperature? //Geophys. Res Lett., 34, 2007, L02709;
116. Zhenkin Bao, Guobin Fu, Guoqing Wang, Junliang Jin, Ruimin He, Xiaolin Yan, Cuishan Liu Hydrological projection for the Miyun Reservoir basin with the impact of climate change and human activity. //Quaternary International, vol. 282, 2012, pp. 96-103;
117. Авакян А.Б., Яковлева В.Б. Новые данные о водохранилищах мира. //Ж. «Гидротехническое строительство», №3, М., 1999, стр. 8-12;
118. Алтуний С.Т. Регулирование русел рек. "Сельхозиздат", М., 1964;
119. Андреанов В.Г. Ветровая волна озеровидных водоемов. Изд. ВНИИГ, стр.24-25, 1939;
120. Андреев И.Д. Основы теории подобия. Изд. АН СССР, М., 1959;
121. Аравин В.С., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в неоднородной пористой среде. М., 1953;
122. Барабанова Е.А. Глобально-региональные особенности регулирования стока рек под влиянием водохранилищ (по косвенным методам). //Вопросы географии, №133, География и гидрологические исследования. "Кодекс", М., 2012, стр. 297-311;
123. Беднарук С.Е., Меговилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ. //Ж. «Гидротехническое строительство», №7, М., 2017, стр. 22-35;
124. Безель В.С., Кряжимский Ф.Н., Семериков Л.Ф., Смирнов Н.Г. Экологическое нормирование антропогенных нагрузок. //"Метеорология, экология", №1, М., 1993, стр. 36-47
125. Божич П.К., Джунковский И.Н. Морское волнение и его действие на сооружения и берега, 1949;

126. **Божич П.К.** Производство волновых наблюдений и исследований. „Речиздат“, 1949;
127. **Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н., Нетюхайло А.П., Шеренков И.А.,** Справочник по гидравлике. "Выща школа", Киев, 1984, 343 стр.;
128. **Большаков В.Н., Кряжимский Ф.Б., Павлов Д.С.** Перспективные направления развития экологических исследований в России. // "Экология", №3, М., 1993, стр. 3-16;
129. **Браславский А.П.** Расчет ветровых волн, ГГИ вып. 35, (88), 1952;
130. **Брейтман В.М.** Примеры сопоставления анализов подобию классического и интегрального методов. //Сб. докл. "IV-ой международной конференции по применению физического и математического моделирования в различных отраслях техники", М., 1962;
131. **Бретшнейдер К.Л.** Образование волн на глубокой и мелкой воде. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. "Гидрометеиздат", Л., 1970, стр. 7-67;
132. **Будыко М.И.** Климат в прошлом и будущем. "Гидрометеиздат", Л., 1980;
133. **Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н.** Инженерно-экологические проблемы создания и эксплуатации водохозяйственных систем с водохранилищами в горных условиях. "Мецниереба", Тбилиси, 2002, 512 стр.;
134. **Варазашвили Н.Г., Иорданишвили И.К.** Мероприятия и сооружения для защиты берегов водохранилищ в условиях горных районов. Экзогенные процессы и проблемы рационального использования геологической среды. САИГИМС, Ташкент, 1985, стр. 59-64;
135. **Варазашвили Н.Г., Гобечия Г.Н.** Особенности формирования водного хозяйства горных регионов. "Мецниереба", Тбилиси, 1996, 234 стр.;
136. **Варазашвили Н.Г., Макацария А.П.** Классификация берегов горных водохранилищ применительно к задачам прогноза их переформирования. //Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 96, Л., 1974, стр.106-113;
137. **Варазашвили Н.Г.** Основы методики прогноза формирования ложа водохранилищ горных регионов. //Сб. докладов «Международной конференции по эрозионно-селевым явлениям и смежным проблемам». АН Грузии, Институт Грузводэкология, Тбилиси, 2001, стр.53-59;
138. **Варазашвили Н.Г., Тевзадзе Т.В.** Динамика формирования ложа водохранилищ горных регионов и особенности методики прогнозирования. //Сборник трудов V конференции "Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей". М., 1999, стр. 384-386;
139. **Вартанов М.В., Иорданишвили И.К., Кечхошвили И., Бераия Н., Шагирадзе М.,** К вопросу прогнозирования опасных аварий и катастроф на действующих водохранилищах Грузии; //**ინტერნეტ სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენციის „საქართველოს აგროსაინჟინრო სექტორის სტაბილიზაციისა და განვითარების პრიორიტეტები კორონავირუსის პანდემიისა და მის შემდგომ პერიოდში“ მოხსენებების კრებული, „აგრო“, თბილისი, 2020, გვ. 49-58;**
140. **Вендров С.Л.** Крупные водохранилища и задачи комплексного использования и охраны водных ресурсов. //Тр. совещания по гидрологии и инженерной геологии на Днепровских водохранилищах, ДГУ, 1962;
141. **Вентцель Е.Р.** Теория вероятностей. "Наука", М., 1964, стр. 576;
142. **Воропаев Г.В., Авакян А.Б.** Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду. "Наука", М., 1986, 387 стр.;
143. **Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Вартанов М.В.** Современные проблемы мелиорации в условиях исследования водных ресурсов трансграничной реки Кура. //Ж. «Мелиорация», РУП, Институт Мелиорации, 2(74), 2015, стр. 25-33;

144. **Гавардашвили Г.В., Иорданишвили И.К., Вартанов М.В., Иремашвили И.Р.** Влияние изменения климата на водные ресурсы бассейна р. Кура. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. //Вестник Брестского государственного технического Университета, №2, 2020, стр.10-14;
145. **Гавардашвили Г.В.** Компьютерная имитация наводнения в случае разрушения Ингурской плотины. //Сб. научных трудов Института водного хозяйства Грузии, №65, Тбилиси, 2010, стр. 42-52;
146. **Гайар Д.Д.** Работа волн и инженерные сооружения. Военно-инженерный Институт США, 1994;
147. **Гвелесиани Л.Г., Шмальцель И.П.** Заиление водохранилищ гидроэлектростанций, //Ж. «Энергия», Тбилиси, 1988, стр. 86;
148. **Гвелесиани Л.Г., Шмальцель И.П.** Опыт эксплуатации горных водохранилищ, //Ж. «Гидротехническое строительство», №5, 1953;
149. **Глазовская М.А.** Геохимия природных и техногенных ландшафтов. "Высшая школа", М., 1988, 328 стр.;
150. **Глушков В.М.** О прогнозировании на основе экспертных оценок. //Ж. «Кибернетика», №2, М., 1969;
151. **Гогелиани Л.Д.** Гидравлическая модель обвала-оползня горной породы, вторгающегося в водоем под воздействием сейсмических сил. //Сб. трудов «Международной конференции по русловым процессам, гидравлике трубопроводного транспорта, гидротехнических сооружений и вопросам гидроэнергетики», Тбилиси, 2000 г., стр. 30-32;
152. **Горелик А.Л., Скрипкин В.Л.** Методы распознавания. "Высшая школа", М., 1977;
153. **Григорьев О.Г.** Проверка оправдываемости прогнозов переформирования берегов Волгоградского водохранилища, тр. ГГИ, вып. 116, "Гидрометиздат", Л., 1964;
154. **Даденков В.Ю., Клещевникова Т.П., Железняк И.А.** Справочник по гидравлике. "Вища школа", Киев, 1984, 343 стр.;
155. **Дорожкина О.П.** Управление водными ресурсами в условиях трансграничного бассейна. //Ж. «Мелиорация и водное хозяйство», №5, М., 2013, стр. 24-27;
156. **Джакели Х.Т.** Характеристика элементов климата. Физическая география Закавказья. Издательство Ереванского Университета, Ереван, 1986, стр. 87-96;
157. **Джонсон Н., Лион Ф.** Статистика и планирование экспериментов в технике и науке. Методы обработки данных. "Мир", М., 1980, с. 99-183;
158. **Джунковский Н.Н.** Действие ветровых волн на гидротехнические сооружения. "Стройиздат", М., 1940;
159. **Духовный В.А., Соколов В.П., Зиганшина Д.Р.** Проблемы совместного использования соседними странами трансграничных водотоков. //Ж. «Мелиорация и водное хозяйство», №2, М., 2015, стр. 32-37;
160. **Жуковец А.М., Зайцев Н.Н.** Воздействие волн на сооружения откосного типа. "Госстройиздат", М., 1956;
161. **Золотарев Г.С.** Инженерно-экологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки. //Труды лаборатории гидрогеологических проблем АН СССР, т. 12, М., 1956, стр. 84-94;
162. **Иванов В.М.** Проектирование водохранилищ в современных условиях, //Ж. «Гидротехническое строительство» №8, М., 2012, стр. 66-68;
163. **Иванов А.Д., Лаппо А.Д., Солдаткин В.А.** Применение и реализация численных

алгоритмов для расчета волнового режима на огражденных акваториях. //ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, М., 226, 1992, стр.72-83;

164. **Израэль Ю.А.** Экология и контроль состояния природной среды. "Гидрометеиздат", М., 1984, 560 стр.;
165. **Иманов Ф.А.** Водные ресурсы и их использование в трансграничном бассейне р. Кура. Санкт-Петербург, 2016, 104 стр.;
166. **Иорданишвили И.К., Гавардашвили Г.В., Иремашвили И.Р., Варганов М.В., Иорданишвили К.Т.** Кадастр водных запасов Грузии. "Универсал", Тбилиси, 2018, 260 стр.;
167. **Иорданишвили И.К.** Динамика внутриводоемных процессов горных водохранилищ Грузии. "Мецниереба", Тбилиси, 2004, 194 стр.;
168. **Иорданишвили И.К., Варганов М.В., Варганов А.М.** Компьютерный расчет внутриводоемных процессов в горных водохранилищах. //Сб. трудов Института водного хозяйства, №65, Тбилиси, 2010, стр. 83-87;
169. **Иорданишвили И.К., Варганов М.В.** Моделирование процесса взаимодействия волн с береговыми откосами, укрепленными каменной наброской и фасонными массивами. //Сб. научных трудов Института водного хозяйства Технического Университети, №66, Тбилиси, "Универсал", 2011, стр. 98-103;
170. **Иорданишвили И.К.** Возможности оптимального использования системного анализа при изучении гидрологических процессов в горных водохранилищах. //Ж. "Энергия", №1 (13), Научно-исследовательский институт энергетики, Тбилиси, 2000, стр.96-99;
171. **Иорданишвили И.К.** Основные положения достоверного расчета элементов берегозащитных сооружений на водохранилищах в условиях горных регионов. //Международная конференция по русловым проблемам, гидравлике трубопроводного транспорта, гидротехнических сооружений и вопросам гидроэнергетики, Грузинский Технический Университет, Академия наук Грузии, Тбилиси, 2000, стр. 49-52;
172. **Иорданишвили И.К.** Особенности развития внутриводоемных процессов на горных водохранилищах. //Ж «Водные ресурсы», т. 22, №6, М., 2000, стр. 678-686;
173. **Иорданишвили И.К.** Особенности расчета берегозащитных сооружений на горных водохранилищах. //Труды Общероссийской конференции «Оценка и управление природными рисками», т. II, М., 2003, стр. 339-343;
174. **Иорданишвили И.К.** Особенности режима мелководий горных водохранилищ Грузии. Сборник трудов Института водного хозяйства и инженерной экологии "Экологическая устойчивость, безопасность, надежность", Тбилиси, 2003, стр. 54-60;
175. **Иорданишвили И.К.** Откосные крепления с повышенной волногасящей способностью для защиты берегов горных водохранилищ. //Ж. «Энергия», №4 (24), Тбилиси, 2002, стр. 166-169;
176. **Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т.** Вопросы эволюции горных водохранилищ Грузии. "Универсал", Тбилиси, 2012, 186 стр.;
177. **Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Джавахишвили Л.Г.** Исследование эффективности возможности использования фасонных массивов на размываемых берегах Аджарии Сб. Научных трудов Института водного хозяйства Грузии, №65, Тбилиси, 2010, стр. 88-94;
178. **Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Канделаки Н.В.** Оценка занесения горных водохранилищ Грузии. //Сб. докладов Международной научно-технической конференции «Современные проблемы охраны окружающей среды, архитектуры и строительства». "Универсал", Кобулет, 2012, стр. 70-75;

179. Иорданишвили И.К., Иорданишвили К.Т., Хосрошвили Е.З., Хубулава И. Проблемы антропогенного изменения климата. //Ж. «Экологические системы и приборы», №5, М., 2009, стр. 55-57;
180. Иорданишвили И.К. Оценка надежности креплений плотин и берегов горных водохранилищ. //ჰიდროტექნიკური ნაგებობათა პროექტირების, მშენებლობის და ექსპლუატაციის პრობლემებისადმი მიძღვნილი საერთაშორისო სიმპოზიუმის მოხსენებების კრებული. თბილისი, 2000, გვ. 147-149;
181. Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Канделаки Н.В. Динамика формирования ложа водохранилищ Грузии. //Сб. докладов VI-ой Международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства». "Универсал", Тбилиси, 2016, стр. 78-89;
182. Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Канделаки Н.В. Практический метод прогноза абразионных процессов на берегах горных водохранилищ, Ж. «Водные проблемы, наука и техника», Баку, 2018, стр. 27-38;
183. Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Итриашвили Л.А., Иорданишвили К.Т., Натрошвили Г.Т., Хосрошвили Е.З., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б. Динамика качества вод горных и предгорных водохранилищ Грузии. //Сборник докладов IX-ой Международной научно-технической конференции "Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства", "Универсал", Тбилиси, 2019, стр. 95-107;
184. Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б. Управление водными ресурсами Грузии в условиях трансграничных рек. //Сборник трудов института водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета, №71, "Универсал", Тбилиси, 2016, стр. 62-78;
185. Иорданишвили И.К., Иремашвили И.Р., Иорданишвили К.Т., Поцхверия Д.Ш., Биланишвили Л.Б. Методика моделирования формирования береговых откосов горных водохранилищ при волновом воздействии. //Сб. докладов VIII-й Международной научно-технической конференции «Современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства», "Универсал", Тбилиси, 2018, стр. 119-125;
186. Иорданишвили-Радченко И.К. Оценка верхней границы береговых креплений водохранилищ с использованием статистической теории распознавания образов. Инженерные методы прогноза и борьба с эрозией почв. Тбилиси, 1987, стр. 98-101;
187. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. "Гидрометеиздат", Л., 1977, стр. 210-258;
188. Караушев А.В. Сгонно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. "Гидрометеиздат", Л., 1960;
189. Качугин Е.Г. Геологическое изучение динамики берегов водохранилищ. "Наука", М., 1975, 146 стр.;
190. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчётам. "Энергия", М., 1972, 312 стр.;
191. Колмогоров А.Н. Об аналитическом методе в теории вероятностей. Успехи математических наук, вып. 5, 1938;
192. Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю. Изменение локализации природных зон при глобальном потеплении. //Ж. «Экология», №3, 1992, стр. 9-18;
193. Кожевников Н.М. Гидравлика ветровых волн, //Ж. «Энергия», М., 1972;
194. Кондратьев К.Я. Ключевые аспекты экологической политики. //"Экодинамика", Изв.

русского географического общества, т.127, вып. 3, 1995, стр. 1-10;

195. **Кондратьев Н.Е.** Расчеты береговых переформирований на водохранилищах. "Гидрометеоздат", Л., 1960, 230 стр.;
196. **Корнеева Л.А., Ливерди В.Г.** Экспериментальная проверка ускоренной методики расчета волн в море произвольной глубины, //Тр. координационных совещаний по гидротехнике, ВНИИГ, вып. 50, Л., 1969;
197. **Кристен Н.И.** Подземная гидравлика, 4.1. II, М., 1961;
198. **Красножон Г.Ф., Сидорова А.Г.** Трансформация волн на мелководье. Управление поверхностными и подземными водными ресурсами и их использование. АН СССР, М., 1961, стр. 161-208;
199. **Крылов Ю.М.** Ветровые волны. "И.Л.", 1962, стр. 27-30;
200. **Кульчицкий И.В., Бураков М.И.** Исследование взаимодействия волн с гидротехническими сооружениями откосного типа. "Речной транспорт", М., 1961, стр. 42-45;
201. **Лабзовский Н.А.** Определение элементов волн в зависимости от скорости ветра. Сб. трудов, ЛОНИ ОВТ, 1956;
202. **Литвиненко Г.И., Стрекалов С.С.** Расчет массы элементов крепления откосов оградительных сооружений морских берегов. //Ж. «Гидротехническое строительство», №3, М., 2002 г., стр. 18-222;
203. **Логинов В.В.** Динамика береговой зоны бесприливных морей. АН СССР, М., 1963;
204. **Лупинский М.П., Юрков Ю.В.** Рекомендации по расчету и конструированию креплений напорных откосов земляных сооружений. //Сб. совещания "Пути улучшения и удешевления строительства", М., 1961;
205. **Максимчук В.Л., Аверин В.П., Степчук Е.И.** //Сб. "Вопросы переработки берегов водохранилищ", изд. АНУССР, 1962;
206. **Мамедов А.Ш., Мамедли А.А.** Заиление горных водохранилищ и борьба с ним. //Сб. докладов VI-ой Международной научно-технической конференции "Современные проблемы водного хозяйства, охрана окружающей среды, архитектура и строительство". "Универсал", Тбилиси, 2016, стр. 121-125;
207. **Марьин В.А.** Ветровое волнение в озеровидных бьефах. Водный транспорт. М., 1930;
208. **Марков К.К., Лазуков Г.И., Николаев В.А.** Четвертичный период. Ледниковый период. Антропогенный период, т. 1-3, М., 1965-1967;
209. МГЭИ, Пятый доклад, 2013;
210. **Международная конференция** "Анализ и оценка природных рисков в строительстве", М., 1997;
211. **Методические указания** по расчету поступления биогенных элементов в водоемы от рассредоточенных нагрузок и установление водоохранных мероприятий. М., 1988;
212. **Метревели Г.С.** Водоохранилища Закавказья, 1985, Тбилиси, 131 стр.;
213. **Метревели Г.С.** Особенности режима уровней и баланса воды горных водохранилищ Грузии. //Сборник резюме докладов II конгресса. НРБ, Варна, 1973, стр. 110-111;
214. **Мирицхулава Ц.Е.** Безопасность плотин: состояние проблемы, пути решения. //Ж. "Мелиорация и водное хозяйство", №10, 1989, стр. 11-18;
215. **Мирицхулава Ц.Е.** Водная эрозия почв. "Мецниереба", Тбилиси, 2000, 421 стр.;
216. **Мирицхулава Ц.Е.** Надёжность гидромелиоративных сооружений. "Колос", М., 1974, 279 стр.;

217. **Мирцхулава Ц.Е.** Об экологически целесообразном сроке эксплуатации потенциально опасных сооружений различного назначения. //Сб. тр. "Экологическая безопасность, устойчивость и надежность водохозяйственных и гидромелиоративных объектов", Грузгидроэкология, Тбилиси, 2005, стр. 112-128;
218. **Мирцхулава Ц.Е.** О возможностях и перспективах системного анализа при оценке устойчивости почв к эрозии. ВАСХНИЛ, №12, М., 1975, стр. 31-32;
219. **Мирцхулава Ц.Е.** Опасности и риски на некоторых водных и других системах. В 2-х томах, "Мецниереба", Тбилиси, 2003, 537 стр.;
220. **Мирцхулава Ц.Е.** Оценка надёжности плотин и других сооружений с учетом интенсивности старения. //Сб. тр. "Современные проблемы водного хозяйства и инженерной экологии". Институт водного хозяйства и инженерной экологии, Тбилиси, 1999, стр. 80-100;
221. **Мирцхулава Ц.Е.** Современные возможности предсказания уязвимого состояния территорий и объектов для катастрофических селей. //Ж. "Геозология, инженерная геология, гидрогеология", №1, "Наука", М., 2006, стр. 57-65;
222. **Мирцхулава Ц.Е.** Возможности оптимального использования системного анализа при изучении гидрологических процессов в горных водохранилищах. //Ж. "Энергия", №1(13), 2000, стр. 105-107;
223. **Мирцхулава Ц.Е.** Экологические нарушения (предсказание риска нарушения). Меры по снижению опасности. Институт гидроэкологии АН Грузии, Тбилиси, 1993, 438 стр.;
224. **Моисеенко Т.И.** Экономический подход. //Ж. "Экология", №6, М., 1998, стр. 452-461;
225. **Мунк У., Витбули М.** Простой критерий разрушения волн на береговом склоне. //Ж. "Океанология", 1. IX, 1969, стр. 71-75;
226. **Никаноров А.М.** Экологическое нормирование антропогенного воздействия на эстуарные водоемы. Методология экологического нормирования. //Тезисы докладов Всесоюзной конференции, Харьков, 1990, стр. 40-41;
227. **Никитин И.К.** К вопросу о расчете ветрового волнения и режим водохранилищ применительно к условиям ср. Азии. //Тр. IV Гидрологического съезда. Л., 1959;
228. **Ногид Л.М.** Теория подобия и размерностей. "Судпромгиз", М., 1967;
229. **Нормализация (статистика).** *ru.gwe*. WikiNormalization, statistika; Нормализация данных: методы и формулы. *Bigtaschoolru/blog* П.;
230. **Окунь Я.** Факторный анализ. "Статистика", М., 1976;
231. **Павловский Н.Н.** Гидравлический справочник. Л., 1937, стр. 366-371;
232. **Петров Т.Н.** Исследование процессов заиления Нурекского водохранилища. //Ж. "Гидротехника и мелиорация", №10, М., 2008, стр. 11-15;
233. **Печеркин И.А.** Геодинамика побережья Камских водохранилищ. Пермь, 1969;
234. **Положение о водоохраных зонах Грузинской ССР**, 1988;
235. **Поляков Б.В.** Гидрологический анализ и расчеты. Л., 1946;
236. **Пышкин Б.А.** Динамика берегов водохранилищ. "Наукова думка", Киев, 1973, 413 стр.;
237. **Померанец В.И.** Оценка экологической надежности систем сооружений. //Ж. "Водохозяйственное строительство", №3, 1993;
238. **Попов И.Я.** Воздействие волн на откосы земляных плотин. //Тр. "Координационных совещаний по гидротехнике", вып., 75, Л., 1972;

239. **Рекомендации** – «Единые критерии качества вод», Совет Экономической Взаимопомощи (СЭВ), Секретариат СЭВ, 1982, 68 стр;
240. **Розовский Л.Б.** Введение в теорию геологического подобия и натурального моделирования. "Наука", М., 1968, 198 стр.;
241. **Розовский Л.Б.** Опыт применения метода инженерно-геологических аналогий для прогноза переработки берегов больших водохранилищ. //Труды Одесского Университета, 147. Сер.: геологических и географических наук, 4, 1957;
242. **Салуквадзе Н.И., Гогоадзе М.Г.** Волновой режим горных водохранилищ. //Сб. тр. Института гидротехники и мелиорации, Тбилиси, 1981, стр. 15-16;
243. **Сванидзе Г.** Водные ресурсы Закавказья. "Гидрометеиздат", Л., 1988, 263 стр.;
244. **Сванидзе Г.Г., Гагуа В.П., Сухишвили Э.В.** Возобновляемые энергоресурсы Грузии. "Гидрометеиздат", Л., 1987, 174 стр.;
245. **Свешников Л.Л.** Прикладные методы теории случайных функций. Наука, М., 1998;
246. **Скрыльников В.А.** Расчет заиления водохранилищ. //Ж. "Гидротехническое строительство", №8, М., 1988, стр. 30-33;
247. **Смирнов А.А.** Трансформация волн на пологом склоне. //Ж. "Гидротехника и мелиорация", №1, 1960;
248. **Соловьев Л.П.** Климатические изменения, потепление и похолодание. //Ж. "Экологические системы и приборы", №7, М., 2014, стр. 20-25;
249. **Уйма А., Иорданишвили И., Иремашвили И., Варганов М., Канделаки Н., Иорданишвили К.** Качество водных ресурсов бассейнов Балтийского и Чёрного морей в условиях потепления климата. //Сб. тр. IX Международной научно-технической конференции "Современные проблемы охраны окружающей среды, архитектуры и строительства". "Универсал", Тбилиси, 2019, стр. 263-277;
250. **Уорсинг А., Геффнер Дж.** Методы обработки экспериментальных данных. М., 1949, 362 стр.;
251. **Фатуллаев Г.Ю.** Современные изменения водных ресурсов и водного режима рек Южного Кавказа, Баку, Изд. БГУ, 2000, 167 стр.;
252. **Фатуллаев Г.Ю.** Разработка нового методического подхода оценки возможных изменений водных ресурсов и водного режима рек бассейна Куры в условиях глобального потепления климата. //Докл. межд. конф. "Новые подходы и методы в изучении природных и природно-хозяйственных систем". Алматы, 2000, стр. 209-212;
253. **Финаров Д.П.** Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР. "Энергия", Л., 1974, 243 стр.;
254. **Флинт Р.Ф.** Ледники и палеография плейстоцена. Пер. с англ., 1963;
255. **Хасхачик Г.Д.** Механизм разрушения ветровых волн на наклонной стене. //Ж. "Гидротехническое строительство", №6., 1957, стр. 33-38;
256. **Хаширова Т.Ю., Ламердонов З.Г., Кузнецов Е.В.** Системный подход в решении экологических проблем охраны горных и предгорных ландшафтов с управлением твердого стока. //Ж. "Экологические системы и приборы", №9, М., 2007, стр. 29-33;
257. **Херхеулидзе Г.И.** К определению нагрузок от воздействия селевого потока на поперечные преграды. Тр. Зак. НИГМИ, вып. 40(46), Гидрометеиздат, Л., 1972, стр. 76-113;
258. **Хмаладзе Г.Н.** Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа. "Гидрометеиздат", Л., 1978, стр. 165-166;

259. **Чантладзе З.И.** Особенности формирования химического состава и химическое качество поверхностных вод Грузии, Тр. ГГИ, 167, 1972, стр. 186-196;
260. **Чоговадзе Г.И., Мгебришвили И.М., Ломов И.Е.** Ингурская гидроэлектростанция. "Энергоатомиздат", М., 1987, 200 стр.;
261. **Шайтан В.С.** Некоторые результаты исследований наката нерегулярных волн на откосы сооружений. //Труды координационных совещания по гидротехнике, 50, "Энергия", Л., 1969, стр. 437-444;
262. **Шанкин П.А.** О границах креплений откосов, подверженных воздействию волн. //Ж. "Гидротехническое строительство", №9, 1958;
263. **Шамов Г.И.** Речные наносы. "Гидрометеиздат", Л., 1969, 348 стр.;
264. **Шенк Х.** Теория инженерного эксперимента. "Мир", М., 1972, 381 стр.;
265. **Шеренков И.А., Складнев М.Ф.** Применение бетонных блоков для защиты земляных откосов. //Ж. "Гидротехническое строительство", №2, М., 1971, стр. 51-54;
266. **Широков В.М.** Формирование берегов и ложа крупных водохранилищ Сибири. "Наука", Новосибирск, 1974, 172 стр.;
267. **Ширямов В.А.** К вопросу о переработке береговых склонов водохранилищ, Труды Института геологических наук, вып. 23, сер. "Инженерная геология", №2, изд-во АН СССР, 1940;
268. **Шишов Н.Д.** К вопросу о расчете элементов ветровых волн на ограниченной глубине. //Ж. "Метеорология и гидрология", №1, 1949.

ფოტოალბომი

მსოფლიოს უმაღლესი კაშხლები



ნურეკი, ტაჯიკეთი, H = 300 მ



გრანდ-დიკსანსი, შვეიცარია, H = 284 მ



ენგური, საქართველო, H = 271,5 მ



ვაიონტი, იტალია, H = 261 მ



მიკა, კანადა, H = 243 მ



საინო-შუმენსკის, რუსეთი, H = 242 მ



ერტანი, ჩინეთი, H = 240 მ



ელ კახონი, ჰონდურასი, H = 234 მ



ჩირკევისის, რუსეთი, H = 232,5 მ



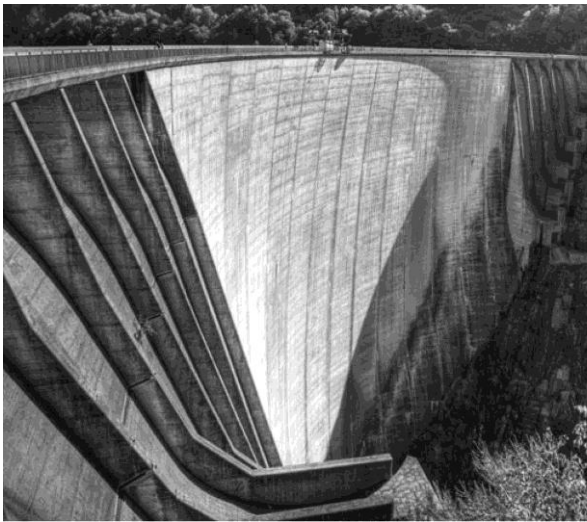
ოროვილი, აშშ, H = 223 მ



ბჰაკრა, ინდოეთი, H = 226 მ



ჰუმერი, აშშ, H = 221 მ



ვერაცვა, შვეიცარია, H = 220 მ



დვორაქი, (აშშ), H = 219 მ



ტოკტოგულის, ყირგიზეთი, H = 215 მ

საქართველოს წყალსაცავები



ენგურის (ჯვრის) წყალსაცავი



ენგურის კამხალი



ჟინვალის წყალსაცავი



ჟინვალის კაშხალი



სიონის წყალსაცავი



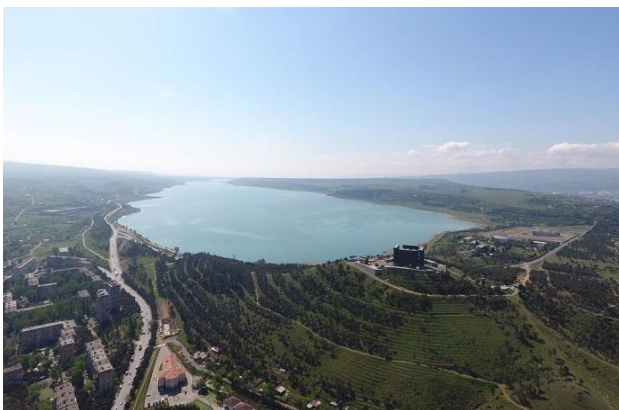
სიონის კაშხალი



ხრამის წყალსაცავი



ხრამის წყალსაცავი



თბილისის წყალსაცავი
(თბილისის ზღვა)



თბილისის წყალსაცავი
(თბილისის ზღვა)



დალის მთის წყალსაცავი



ტყიბულის წყალსაცავი



ვარციხის წყალსაცავი



შაორის წყალსაცავი



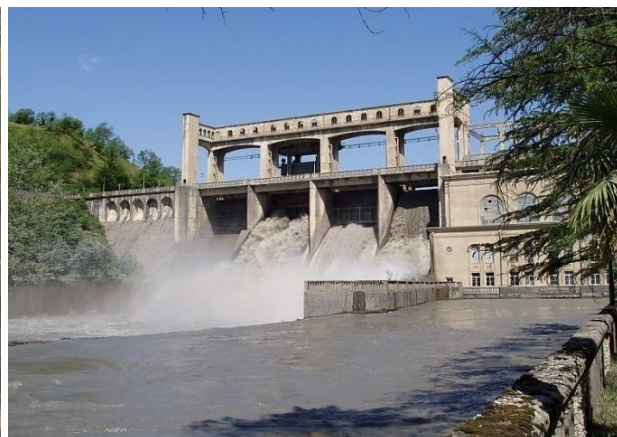
ლაჯანურის წყალსაცავი



ალგეთის წყალსაცავი



კუხის წყალსაცავი



გუმათის ჰესი



ორთაჭალის ჰესი



ზემო ავჭალის ჰესი



იაკუბლოს წყალსაცავი



კუმისის წყალსაცავი



კონსტანტინე იორდანიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის მეცნიერთანამშრომელი; ტექნიკის აკადემიური დოქტორი; 60-მდე სამეცნიერო ნაშრომის ავტორი/თანაავტორი, მათ შორის 7 მონოგრაფიისა; 4 გრანტის ხელმძღვანელი/ძირითადი შემსრულებელი შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით.



ირინა იორდანიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის ზღვებისა და წყალსატევების განყოფილების ხელმძღვანელი; ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი; 100-ზე მეტი სამეცნიერო ნაშრომის ავტორი/თანაავტორი, მათ შორის 9 მონოგრაფიისა; სამეცნიერო რიგი გრანტის ხელმძღვანელი/ძირითადი შემსრულებელი შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით.



ინგა ირემაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის დირექტორის მოადგილე; ტექნიკის აკადემიური დოქტორი, პროფესორი; 160-მდე სამეცნიერო ნაშრომის ავტორი/თანაავტორი, მათ შორის 8 მონოგრაფიისა; 10 სამეცნიერო გრანტის ხელმძღვანელი/ ძირითადი შემსრულებელი შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო და სხვა ფონდების ფინანსური მხარდაჭერით.



ნოდარ კანდელაკი

ტექნიკის აკადემიური დოქტორი, 25-მდე სამეცნიერო ნაშრომის, მათ შორის 1 მონოგრაფიის ავტორი/თანაავტორი; 2 გრანტის ხელმძღვანელი/ ძირითადი შემსრულებელი შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით; საქართველოს მუნიციპალური განვითარების ფონდის ინჟინერ-კონსულტანტი.