

შალვა ბაბოშიძე, მანონ კოდუა,
ივანე სალინაძე, იური ქაღარია

სამდინარო ჰიდრომშენებლობა და საქართველოს შავიზღვისპირეთის ბეომორფოლოგიური პროცესები



„ტექნიკური უნივერსიტეტი“



შალვა გაგოშიძე,
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
E-mail: sh.gagoshidze@gmail.com



მანონ კოდუა,
აკადემიური დოქტორი,
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
E-mail: m.kodua@gtu.ge



ივანე სალინაძე,
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორი
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
E-mail: vanosag@gmail.com



იური ქადარია,
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
E-mail: Juri_gtu@yahoo.com



საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

შალვა გაგოშიძე, მანონ კოდუა,
ივანე საღინაძე, იური ქადარია

სამდინარო ჰიდრომშენებლობა და
საქართველოს შავიზღვისპირეთის
ბეომორფოლოგიური პროცესები



დამტკიცებულია მონოგრაფიად
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
სარედაქციო-საგამომცემლო საბჭოს
მიერ. 24.06.2016, ოქმი №2

თბილისი
2017

Gagoshidze Sh., Kodua M., Saghinadze I., Kadaria I. RIVER HYDRO CONSTRUCTION AND GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES OF THE BLACK SEA COAST OF GEORGIA . Monograph, Technical University, Tbilisi, 2017. UDC 627.221.2

The Monographs considers the dangerous geomorphological changes in the Black Sea regions of Georgia, caused by the hydro-engineering constructions in the catch basins of the rivers Enguri, Rioni and Chorokhi.

Causes of failure of river protection measures have been researched.

Environmental and marine-hydro engineering projects implemented by different firms in Georgia are critically evaluated

Analytical and numerical methods of hydraulic calculation of riverbeds in the coastal areas and marine-hydraulic hydropower structures have been developed, the use of which ensures the stability of the coastline and the reliable exploitation of the existing hydraulic structures in river estuaries.

The book is mainly includes the results of the researches carries out by the authors within the framework of the Shota Rustaveli Scientific Foundation and the EU program - "Black Sea Basin Joint Operational Program 2007-2013" grants.

Accessible materials of monitoring research studies of various active project-research organizations in Georgia, namely "Napirdatsva", LLC "Tbiltskalgeo", LTD "Gamma Consulting" and other organizations are used in the book.

შპს 627.221.2

მონოგრაფიაში განხილულია საქართველოს შავი ზღვისპირა რეგიონებში წარმოქმნილი სახიფათო გეომორფოლოგიური ცვლილებები, განპირობებული ჰიდროსაინჟინრო მშენებლობით მდინარეების – ენგურის, რიონისა და ჭოროხის წყალშემკრებ აუზებში. გამოკვლეულია ნაპირდამცავ ღონისძიებათა წარუმატებლად განხორციელების მიზეზები. კრიტიკულადაა შეფასებული უცხოური ფირმების მიერ საქართველოში განხორციელებული გარემოსდაცვითი და საზღვაო-ჰიდროსაინჟინრო ხასიათის პროექტები. შემუშავებულია ზღვის სანაპირო არეებში კალაპოტური პროცესებისა და საზღვაო-სამდინარო ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ჰიდრაულიკური გაანგარიშების ანალიზური და რიცხვითი მეთოდები, რომელთა გამოყენება უზრუნველყოფს სანაპირო ზოლის სტაბილიზაციასა და მდინარეთა შესართავებში არსებული ჰიდროტექნიკური ნაგებობების საიმედო ექსპლუატაციას.

წიგნი ძირითადად მოიცავს ავტორთა მიერ, სხვადასხვა პერიოდში შოთა რუსთაველის სამეცნიერო ფონდისა და ევროკავშირის პროგრამა – „Black Sea Basin Joint Operational Programme 2007–2013“ გრანტების ფარგლებში შესრულებულ კვლევათა შედეგებს. მასში გამოყენებულია საქართველოში მოქმედი მრავალი საპროექტო-კვლევითი ორგანიზაციის, კერძოდ, შპს „ნაპირდაცვის“, სსიპ „თბილწყალგეოს“, შპს „გამა კონსალტინგის“ და სხვა ორგანიზაციების მონიტორინგული ხასიათის კვლევების ხელმისაწვდომი მასალა;

ნაშრომი განკუთვნილია სამდინარო და საზღვაო ჰიდროტექნიკური მშენებლობისა და გარემოს დაცვის სფეროში მომუშავე ინჟინერ-ტექნიკურ პერსონალის, მაგისტრანტებისა და დოქტორანტებისთვის.

რეკენზენტები

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორები:
დიმიტრი ნამგალაძე და გიორგი ზალიკაშვილი



© საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2017

ISBN 978-9941-20-746-4

<http://www.gtu.ge>

ყველა უფლება დაცულია. ამ წიგნის არც ერთი ნაწილის (იქნება ეს ტექსტი, ფოტო, ილუსტრაცია თუ სხვა) გამოყენება არანაირი ფორმით და საშუალებით (იქნება ეს ელექტრონული თუ მექანიკური) არ შეიძლება გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

სარჩევი

შესავალი	6
თავი 1. გეომორფოლოგიური პროცესები	
მდინარეების ენბურის, რიონისა და ჭოროხის	
შესართავ აკვატორიებში	10
1.1. გეომორფოლოგიური პროცესები და ნაპირდაცვითი	
ღონისძიებები მდინარე ენგურის შესართავ უბანზე	11
1.1.1. მდინარე ენგურის მოკლე ჰიდროლოგიური	
დახასიათება	11
1.1.2. ჰიდრომშენებლობა და გეომორფოლოგიური პროცესები	
ანაკლიის რეგიონში	16
1.2. ჰიდრომშენებლობის გავლენა ქალაქ ფოთის საზღვაო	
ნაპირსა და მდ. რიონის შესართავ უბნებზე	20
1.2.1. მოკლე ისტორიული ცნობები	20
1.2.2. გარემოსდაცვითი და ჰიდროსაინჟინრო პრობლემები	
ქალაქ ფოთის საზღვაო რეგიონში	22
1.2.3. მდ. რიონის შესართავი უბნისა და ფოთის საზღვაო	
აკვატორიის მოკლე ჰიდროლოგიური და ჰიდრო-	
მეტეოროლოგიური დახასიათება	29
1.3. მდინარე ჭოროხის ჰიდროლოგიური დახასიათება	
წყალშემკრებ აუზში ჰესების კასკადის მშენებლობის	
გათვალისწინებით	35
თავი 2. ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლის ლითონ-	
დინამიკის რიცხვითი მოდელები	43
2.1. შესართავ აკვატორიებში ტალღებისა და ნატანის	
მოძრაობის გაანგარიშების არსებული კომპიუტერული	
მოდელების ანალიზი	43
2.2. ზღვის სანაპირო არეებსა და შესართავ აკვატორიებში	
ტალღებისა და ნატანის გავრცელების მათემატიკური	
მოდელირება	48
2.2.1. სანაპირო ტალღური რეჟიმები	49
2.2.2. სანაპირო დინებები	57
2.2.3. ნატანის მოძრაობა	61

2.3. ფოთის პორტის შესასვლელი არხის მიმდებარე ტერიტორიის ლითონდინამიკის მათემატიკური მოდელი. მოსილვებისგან დაცვის საინჟინრო ღონისძიებები	69
თავი 3. ნაპირღამცავ ღონისძიებათა წარუმატებლად განხორციელების მიზეზები და მათი აღმოფხვრის ბზები მდინარეების ენბურის, რიონისა და ჯორჯის შესართავ აკვატორიებში	73
3.1. კურორტ ანაკლიასთან სანაპირო ზოლის აღდგენის არსებულ ღონისძიებათა შეფასება და რეკომენდაციები	73
3.2. ქალაქ ფოთის წარეცხილი საზღვაო ნაპირის სარეაბილიტაციო ღონისძიებები	83
3.3. მდ.რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის ნგრევის მიზეზები და კაპიტალური სარეაბილიტაციო ღონისძიების დასაბუთება	87
3.4. გარემოსდაცვით ღონისძიებათა დასახვა მდინარე ჯორჯის შესართავ აკვატორიაში	94
ღანართები	
სანაპირო არეებში ტალღურ მოძრაობათა განხორციელების ანალიზური მეთოდები	96
1. ზღვის ზედაპირული ტალღური მოძრაობის გაანგარიშების არსებული მეთოდების მიმოხილვა	96
1.1. ტალღურ მოძრაობათა თეორიის ელემენტები	99
1.2. წრფივი ტალღური მოძრაობის ძირითადი განტოლებები და ამოხსნები	100
2. ტალღების გაანგარიშება მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში	106
2.1. გრძელი ფრონტალური ტალღები ნებისმიერად ცვალებადი სიღრმის სანაპირო არეებში	106
2.2. ნაკადებზე ტალღების ტრანსფორმაციის განსაზღვრის ენერგეტიკული მეთოდები	111
2.3. გრძელი ტალღები ცვალებადი სიჩქარის დამყარებულ ნაკადებზე	115

2.4. შესართავ აკვატორიებში გრძელი ტალღების საანგარიშო დამოკიდებულებები	123
3. სანაპირო ფერდობების გავლენა ნაპირგასწვრივ ტალღურ მოძრაობაზე	130
3.1. ნაპირგასწვრივი ტალღების თეორია და არსებული ამოხსნების მიმოხილვა	132
3.2. ნაპირგასწვრივი ტალღების გაანგარიშება ნებისმიერად დახრილი ფერდობების მქონე არხებში	136
3.3. ნაპირგასწვრივი ტალღების გაანგარიშების რიცხვითი მაგალითები	145
4. ნაპირგასწვრივი ტალღებით სანაპირო ფერდობების დეფორმაციების პროგნოზირება და გამაგრების საკითხები	152
4.1. სანაპირო ფერდობზე გრუნტის ნაწილაკების მდგრადობა ტალღური ნაკადით გარსდენისას	154
4.2. სანაპირო ფერდობის დეფორმაციების გაანგარიშება	159
4.3. ფერდობების გამაგრებისა და მოპირკეთების საანგარიშო მეთოდები	163
5. ზღვის წყლის ინტრუზია მდინარეთა შესართავებსა და სიღრმით წყალსაგდებ ნაგებობებში	169
5.1. ჰალოსოლის გაანგარიშება მდინარეთა შესართავებში, ფსკერის ქანობის მხედველობაში მიღებით.	170
5.2. ზღვის სიღრმითი წყალსაგდები კოლექტორების ჰიდრავლიკური გაანგარიშების მეთოდი	176
ლიტერატურა	181

შესავალი

შავი ზღვა წარმოადგენს ევროპისა და აზიის კონტინენტების დამაკავშირებელ საზღვაო-სატრანსპორტო აუზს. მის პერიმეტრზე განლაგებულია რამდენიმე მსხვილი პორტი, რომლებსაც მნიშვნელოვანი წვლილი შეაქვს აღმოსავლეთ ევროპისა და მცირე აზიის ქვეყნების ეკონომიკურ განვითარებაში. ამავე დროს, შავი ზღვის თითქმის მთელი სანაპირო ზოლი განეკუთვნება სარეკრეაციო ზონას, იქ არსებული მრავალი საერთაშორისო მნიშვნელობის საკურორტო ქალაქითა და დასახლებული პუნქტით.

შავი ზღვის პორტების გამართულ მუშაობას, გარდა შტორმული ვითარებისა და ზამთრობით ზოგიერთი პორტის მოყინვისა, მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს მის შენაკად მდინარეებზე ჰიდროენერგეტიკული თუ სხვა ხასიათის მშენებლობა. ამ მშენებლობების შედეგად მკვეთრად შეიცვალა მდინარეთა ჰიდროლოგიური რეჟიმები, რამაც შავი ზღვის აუზის ექვსივე ქვეყანაში განაპირობა სანაპირო ზოლისა და მდინარეთა შესართავი უბნების მნიშვნელოვანი გეომორფოლოგიური ცვლილებები.

ეს ცვლილებები განსაკუთრებით შეეხო და პრობლემატური აღმოჩნდა საქართველოს შავიზღვისპირეთისთვის, რომლის 312 კილომეტრიანი სანაპირო ზოლის დაახლოებით 47% იკვებება დასავლეთ საქართველოს უმსხვილესი მდინარეების – რიონის, ენგურისა და ჭოროხის ნატანით (მყარი ჩამონადენით). ამ მდინარეებზე გასულ საუკუნეში გაშლილმა ჰიდრომშენებლობამ და მათი ჰიდროლოგიური რეჟიმების ხელოვნურად შეცვლამ მნიშვნელოვანი ზეგავლენა მოახდინა შავი ზღვის სანაპირო ზოლის მდგრადობასა და შესართავი უბნების კალაპოტურ პროცესებზე. უკვე წლებია ირეცხება საქართველოს შავიზღვისპირეთის უნიკალური პლაჟები; ისილება და სისტემატურ გაღრმავებას საჭიროებს საქართველოს მთავარი საზღვაო კარიბჭის – ფოთის პორტის შესასვლელი არხი; ასეულობით მეტრითაა წარეცხილი ქალაქ ფოთის ნაპირი; ავარიულ მდგომარეობაშია და ვერ ასრულებს ნაპირაღდგენით დანიშნულებას მდინარე რიონზე აგებული წყალგამანაწილებელი ჰიდროკვანძი და ა. შ.

თაღოვანი კაშხლის აგების შემდეგ ანალოგიური მოვლენები დაფიქსირდა მდინარე ენგურზე შესართავ აკვატორიაში, კურორტ ანაკლიასთან. ხოლო თურქეთის ტერიტორიაზე, მდინარე ჭოროხის ზედა წელში, დერინერისა და სხვა ჰიდროელექტროსადგურების კასკადის მშენებლობის გამო, უახლოეს მომავალში მოსალოდნელია აჭარის სანაპირო ზოლის კატასტროფული წარეცხვები.

სანაპირო ზოლის დაცვის მიზნით, საქართველოში მრავალი წლის განმავლობაში წარმოებდა ფართომასშტაბური სამუშაოები, რასაც ჯერჯერობით არ მოჰყოლია

სასურველი შედეგები (ხშირ შემთხვევაში, გატარებულ საინჟინრო ღონისძიებათა დაუსაბუთებლობის გამო).

შექმნილი მძიმე ვითარების ზემოთ მოყვანილი მოკლე ჩამონათვალიდანაც ცხადია, თუ რამდენად აქტუალურია სანაპირო არეებში გარემოზე ჰიდრომშენებლობით განპირობებული უარყოფითი შედეგებისა და თვით ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მწყობრიდან გამოსვლის მიზეზების გამოკვლევა. ცხადია აგრეთვე, რომ შექმნილი ვითარების მიზეზები უნდა ვეძიოთ არამხოლოდ საზღვაო და სამდინარო ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობების ხარისხში, არამედ ამ ნაგებობების პროექტირებისას დაშვებულ შეცდომებსა და გაანგარიშების არსებული მეთოდების უზუსტობაში.

სწორედ გაანგარიშების არსებული მეთოდების დახვეწა და მათი შეცვლა უფრო მაღალი სიზუსტის და, ამავე დროს, ინჟინრებისთვის მისაწვდომი ანალიზური და რიცხვითი მეთოდების, წარმოადგენს წინამდებარე მონოგრაფიის მთავარი მიზანსა და სიახლეს.

მდინარეთა შესართავ უბნებში კალაპოტური პროცესებისა და ტალღურ მოძრაობათა ჰიდრაულიკური გაანგარიშების ნაშრომში მოყვანილი მეთოდები, გამოირჩევა მაღალი მათემატიკური სიზუსტით. ავტორებს მიაჩნიათ, რომ დაპროექტებისას ამ მეთოდებითა და რეკომენდაციებით საარგებლობა ხელს შეუწყობს საქართველოს შავიზღვისპირეთში არსებული გეომორფოლოგიური პროცესების სტაბილურობასა და საზღვაო ნაპირდამცავი ნაგებობების ხანგრძლივ და საიმედო ექსპლუატაციას.

მონოგრაფიაში მოყვანილი ჰიდროლოგიური და ჰიდრაულიკური ხასიათის ნატურული დაკვირვებებისა და ექსპერიმენტული კვლევების მასალები ეფუძნება სხვადასხვა დროს სხვადასხვა ორგანიზაციებისა და თვით ავტორების უშუალო მონაწილეობით რუსთაველის სამეცნიერო ფონდის მიერ დაფინანსებულ რამდენიმე საგრანტო პროექტის ფარგლებში განხორციელებულ სავსე ექსპედიციებისა და ნატურული დაკვირვებების შედეგებს.

კვლევის ობიექტების ირგვლივ წარმოქმნილ ჰიდროსაინჟინრო პრობლემებთან დაკავშირებით, მონოგრაფიის ავტორთა მიერ შესრულებულია შემდეგი სახის სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოები:

— მოპოვებულია მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავი უბნების კალაპოტური პროცესებისა და ზღვის მიმდებარე სანაპირო ზოლის

ჰიდრომეტეოროლოგიური და ჰიდროლოგიური მონაცემები და ნატურული დაკვირვებების მასალები;

— აღწერილი და გამოკვლეულია მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავი უბნების კალაპოტური პროცესებისა და ზღვის მიმდებარე სანაპირო ზოლის გეომორფოლოგიური ცვლილებები, გამოწვეული ამ მდინარეებზე განხორციელებული ჰიდროტექნიკური მშენებლობით;

— ქალაქ ფოთის საზღვაო რეგიონისთვის შემუშავებულია ნატანის მოძრაობისა და სანაპირო ზოლის ლითოდინამიკის სამგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელები. სასრულ ელემენტთა მეთოდით დადგენილია ტალღური რეჟიმების, სანაპირო დინებების, ნატანის მოძრაობისა და ზღვის სანაპირო ზოლის ევოლუციის მათემატიკური მოდელები;

— მათემატიკური მოდელირების საფუძველზე შემუშავებულია ფოთის პორტის შესასვლელი არხის მოსილვებისგან დაცვის საინჟინრო ღონისძიებები;

— ჰიდრავლიკურად გამოკვლეულია ნაპირდამცავ ღონისძიებათა წარუმატებლად განხორციელების მიზეზები და დასახულია მათი აღმოფხვრის გზები მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავ აკვატორიებში;

დანართების სახით მონოგრაფიაში მოყვანილია სანაპირო არეებში წყლის ტალღურ მოძრაობათა თეორიის ელემენტები და პრაქტიკული გაანგარიშების მეთოდები, კერძოდ:

— შემუშავებულია შესართავ აკვატორიებში, მდინარეთა არათანაბარ დინებებზე ზედდებული გრძელი ტალღების გაანგარიშების თეორია;

— პირველადაა გადაწყვეტილი ამოცანა ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობის შესახებ ტრაპეციულ და სამკუთხა არხებში, მათი სანაპირო ფერდობების ნებისმიერი დახრილობის შემთხვევაში და, შესაბამისად, დამუშავებულია სანაპირო ფერდობების მდგრადობისა და გამაგრების საკითხები, მათი ნაპირგასწვრივი ტალღური ნაკადით გარსდენისას;

— დამუშავებულია სადაწნეო წყალსატარების – ზღვის სიღრმითი დიუკერული წყალსაშვის, სანიაღვრე და საკანალიზაციო კოლექტორების ჰიდრავლიკური გაანგარიშების მეთოდი ამ ნაგებობებში ზღვის წყლის – ჰალოსოლის შეჭრის გათვალისწინებით;

მონოგრაფიის ინჟინრული ასპექტები მოიცავს ზღვებისა და წყალსაცავების სანაპირო არეებში ადამიანის სამეურნეო მოღვაწეობის მრავალ დარგს. შედეგები პრაქტიკულად ვარგისია ჰიდროტექნიკურ და ჰიდროენერგეტიკულ მშენებლობაში

დასანერგად, სანაპირო და შესართავ უბნებში არსებული დასახლებების წყალმომარაგებისა და საკანალიზაციო ქსელების საანგარიშოდ, სანაპირო და შესართავი უბნების ეკოლოგიური პრობლემების გადასაწყვეტად და სხვ.

წიგნი ძირითადად მოიცავს ავტორთა მიერ, სხვადასხვა პერიოდში შოთა რუსთაველის სამეცნიერო ფონდისა და ევროკავშირის პროგრამის „Black Sea Basin Joint Operational Programme 2007-2013“ გრანტებით შესრულებულ კვლევათა შედეგებს.

ავტორები მადლობას უხდებიან შოთა რუსთაველის ეროვნულ სამეცნიერო ფონდს წინამდებარე მონოგრაფიის გამოცემის ფინანსური უზრუნველყოფისთვის, რაც შესრულებულ იქნა გრანტ DO/77/3-109/14-ის ბიუჯეტის ფარგლებში.

ავტორები მადლობას უხდებიან აგრეთვე შპს „ნაპირდაცვას“, სსიპ „თბილწყალგეოს“, შპს „გამა კონსალტინგს“, „წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტს“ და სხვა საპროექტო და კვლევით ორგანიზაციებს მონოგრაფიაში წარმოდგენილი საცნობარო ხასიათის მასალის მოწოდებისა და თანადგომისთვის.

თავი 1. გეომორფოლოგიური პროცესები მდინარეების ენბურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავ აკვატორიებში

ზღვის ტალღებისა და მდინარეთა ჩამონადენის ჰიდროლოგიური რეჟიმების ბუნებრივი თუ ხელოვნური ცვლილება გადამწყვეტ გავლენას ახდენს ზღვებისა და ოკეანეების სანაპირო ზოლის ფორმირებაზე, მის გეომორფოლოგიასა და ეკოლოგიურ პროცესებზე. განაპირობებს მდინარეთა შესართავებში დელტათ წარმოქმნისა და ზღვის სანაპირო ზოლის ეროზიულ პროცესებს, გარემოსდაცვითი ხასიათის მასშტაბურ ცვლილებებს, რომელთა აღმოსაფხვრელად მნიშვნელოვანი კაპიტალდაბანდება და წლებია საჭირო.



ნახ. 1.1. კვლევის ობიექტები საქართველოს შავიზღვისპირეთში.

ზღვის სანაპირო ზოლის მორფოლოგიური გამოკვლევისათვის აუცილებელია მდინარის მიერ ზღვაში შეტანილი ფსკერული და ტივტივა ნატანის რაოდენობის დადგენა. საქართველოს შავიზღვისპირეთის სანაპირო ზოლის ფორმირებაში გადამწყვეტ როლს ასრულებს მდინარეების რიონის, ენგურისა და ჭოროხის ნატანი, რომლის რაოდენობა, მნიშვნელოვნად იცვლებოდა გასულ საუკუნეში ამ მდინარეებზე განხორციელებული ჰიდრომშენებლობების და მათ კალაპოტურ პროცესებში სხვადასხვა სახის ანთროპოგენური ჩარევის შედეგად. ამ ფაქტორებმა განაპირობა მრავალი, დღეს-დღეობით გადაუჭრელი პრობლემა, რომელთა შესწავლა ხორციელდებოდა და ამჟამადც ხორციელდება საქართველოში და მის ფარგლებს გარეთ მოქმედი რიგი საპროექტო და სამეცნიერო-კვლევითი ორგანიზაციების მიერ. ამ საქმიანობაში განსაკუთრებული წვლილი მიუძღვით „საქართველოს ენერგეტიკისა და

ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ს.კ. ინსტიტუტს“, „თბილჰიდროპროექტს“ „საქწყალპროექტს“, „საქართველოს წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ს.კ. ინსტიტუტს“, „საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს“, სსიპ „თბილწყალგეოს“, შპს „გამა კონსალტინგს“, შპს „ნაპირდაცვას“ და სხვა ორგანიზაციებს.

1.1. გეომორფოლოგიური პროცესები და ნაპირდაცვითი ღონისძიებები მდინარე ენგურის შესართავ უბანზე

1.1.1. მდინარე ენგურის მოკლე ჰიდროლოგიური დახასიათება

ვიდრე შევხებოდეთ უშუალოდ კვლევის ობიექტს - მდინარე ენგურის შესართავ აკვატორიას (ნახ.1.2.), ქვემოთ მოგვყავს მდ.ენგურის მოკლე ჰიდროლოგიური დახასიათება, როგორც მასზე მაღლივი თაღოვანი კაშხლის აშენებამდე, ასევე კაშხლის აშენების შემდეგ დროინდელ პერიოდებში.



ნახ.1.2. მდ. ენგურის შესართავი უბნის პანორამული ხედი ანაკლიასთან

მდინარე ენგური სათავეს იღებს კავკასიონის ქედზე, ზღვის დონიდან 2520 მ სიმაღლეზე და ერთვის შავ ზღვას კურორტ ანაკლიასთან. მდინარის სიგრძეა 213 კმ, საშუალო ქანობი 1,8 ‰ (პრომილს), წყალშემკვრები აუზის ფართობი 4060 კმ², აუზის საშუალო ნიშნულია 1840 მ. მდინარეს ერთვის 242 შენაკადი, საერთო სიგრძით 872

კმ. შესართავ უბანში მდინარის სიგანე იცვლება 100-150 მ-დან 200-250 მ-მდე, სიღრმე 1-დან 3,5 მ-მდე, სიჩქარე – 1 მ/წმ-დან 1,8 მ/წმ-მდე [4, 182].

შესართავთან, წყალშემკრები აუზის ზოგიერთი მონაკვეთი ზღვის დონეზე დაბლაა, რის გამოც წყალდიდობების პერიოდში მდინარე ტბორავს და აჭაობებს ამ ტერიტორიებს. წლის თბილ პერიოდში ჩამოედინება წლიური ჩამონადენის 80-82%, ხოლო ცივ პერიოდში – მხოლოდ 7-8%.

მდინარე ენგური წარმოადგენს საქართველოს მთავარ ენერგეტიკულ არტერიას, მასზე აგებულია 271,5 მ სიმაღლის ბეტონის თაღოვანი კაშხალი (ნახ.1.3). მისი წყალსაცავის სრული მოცულობა შეადგენს 1100 მლნ მ³, ხოლო სასარგებლო მოცულობა 680 მლნ მ³-ს.

თაღოვანი კაშხლის აშენებასთან დაკავშირებით მდინარე ენგურის ძირითადი თხევადი ჩამონადენი გადაგდებულ იქნა მდ. ერისწყლის კალაპოტში, რის გამოც მნიშვნელოვნად შემცირდა ხარჯი მდინარის ძველ კალაპოტში. იგი ამჟამად ატარებს მხოლოდ მცირე შენაკადების, სანიტარულ და შედარებით იშვიათად – ენგურჰესის კაშხლიდან გადმოგდებულ ჭარბი ნაკადის ხარჯებს.



ნახ. 1.3. ენგურჰესის თაღოვანი კაშხალი

ენგურის ძველ კალაპოტში ჰიდროლოგიური რეჟიმის ცვლილებამ და ხარჯების კლებამ გამოიწვია მისი ფსკერის ნიშნულების აწევა, ხოლო შესართავში ზღვის ტალღებმა შექმნა დაახლოებით 2,5 კმ სიგრძისა და 100 მ-მდე სიგანის ცელის ფორმის ქვიშის ზვინული, რომელმაც მნიშვნელოვნად შეაფერხა წყალდიდობისა და კაშხლიდან გადმოგდებული წყლის შედარებით დიდი ხარჯების გატარების პროცესი.

მდ. ენგურის მაქსიმალური ხარჯის 39 წლიანი დაკვირვების ვარიაციული რიგის სტატისტიკური დამუშავების შედეგად (მომენტების მეთოდით), მიღებულია განაწილების მრუდის შემდეგი პარამეტრები:

მაქსიმალური ხარჯის საშუალო მრავალწლიური სიდიდე ბუნებრივ პირობებში $Q_0 = \frac{\sum Q_i}{n} = 772$ მ³/წმ-ს. მდ. ენგურის მაქსიმალური ხარჯები შესართავთან, დადგენილი ენგურის თაღოვანი კაშხლის ექსპლუატაციაში შესვლამდე (1976 წელი), მოყვანილია ცხრილ 1.1-ში, ხოლო კაშხლის ექსპლუატაციაში შესვლის შემდგომი პერიოდისთვის (ნაანგარიშები ემპირიული ფორმულებით [4,12]) – ცხრილ 1.2-ში, რომელშიც გათვალისწინებულია წყალსაცავის სრული შევსების პირობებში კაშხლის ზედაპირული და სიღრმითი წყალსაგდებებიდან 2550 მ³/წმ ხარჯის გადმოგდება. ამ რაოდენობას ემატება კაშხლის ტანის ქვევით წყალშემკრებ აუზის შემავალი სხვა მდინარეების ხარჯები, დაახლოებით 800 მ³/წმ.

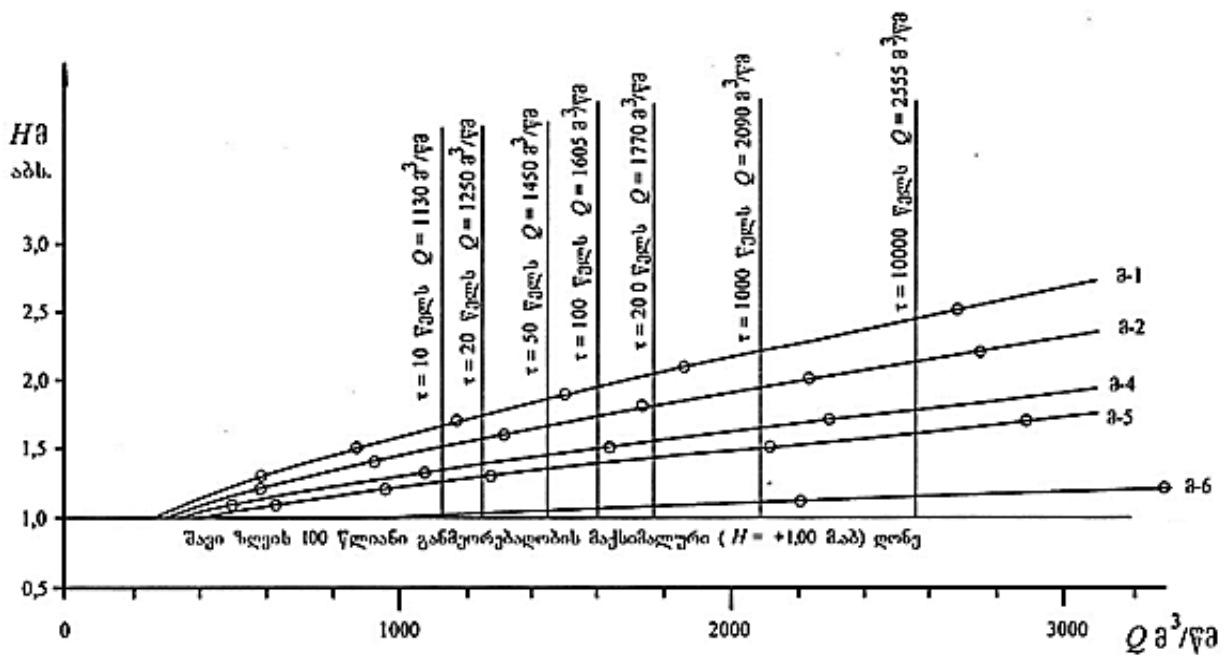
ცხრილი 1.1. მდინარე ენგურის მაქსიმალური ხარჯები თაღოვანი კაშხლის აშენებამდე [4].

კვეთი	F კმ ²	Q ₀ მ ³ /წმ	C _v	C _s	K	უზრუნველყოფა P%						
						0,01	0,1	0,5	1	2	5	10
ჰ/ს დარჩელი	3640	772	0,34	1,36	–	2836	2188	1788	1621	1498	1263	1110
შესართავი	4060	815	–	–	1,056	2995	2310	1890	1710	1580	1335	1170

ცხრილი 1.2. ენგურის მაქსიმალური ხარჯები თაღოვანი კაშხლის ქვედა ბიეფში

მაქსიმალური ხარჯები, მ ³ /წმ	უზრუნველყოფა, %						
	0,01	0,1	0,5	1	2	5	10
კაშხლის ზედაპირული წყალსაშვიდან	2055	1590	1270	1105	950	750	630
კაშხლის სიღრმითი წყალსაშვიებიდან	500	500	500	500	500	500	500
მაქს. საანგარიშო ხარჯები	2555	2090	1770	1605	1450	1250	1130

ნახ. 1.4-ზე $Q = f(H)$ დამოკიდებულების მრუდები აგებულია შეზის ფორმულის საფუძველზე, ორ საანგარიშო კვეთს შორის ნაკადის ჰიდრავლიკური ქანობის შერჩევის გზით. ამასთან, სიმქისის კოეფიციენტი n მიღებულია 0,022-ის ტოლი მდინარის კალაპოტისთვის და 0,055-ის ტოლი – ჭალისთვის [4].



ნახ. 1.4. ანაკლიასთან მდ. ენგურის წყლის დონეებსა და ხარჯებს შორის დამოკიდებულების მრუდები [4] (მრუდები აგებულია 100 წლიანი განმეორადობის დონეებისთვის).

ანაკლიის რეგიონის სანაპირო ზოლში მაქსიმალურად სახიფათო მიმართულებისა და სიმძლავრის დასავლეთის შტორმული 8 ბალიანი ღელვის 1%-იანი უზრუნველყოფის მქონე ტალღების გაანგარიშების შედეგები მოყვანილია ცხრილ 1.3-ში.

ცხრილი 1.3. ღია ზღვაზე, ანაკლიის მისადგომებთან შტორმების სიმძლავრე, მიმართულებები და განმეორებადობა

შტორმის სიმ- ძლავრე (ბალი)	სსდ, სდ		დსდ, დ		ღრდ, ჩდ		ჩ		შტილი		ჯამი	
	0	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%
0									343	39,6	343	39,6
1	11	1,2	101	11,7	122	15,2	1	0,1			245	28,2
2	4	0,5	54	6,2	40	4,6					98	11,3
3	2	0,2	54	6,3	22	2,6	1	0,1			79	9,2
4	1	0,1	30	3,5	12	1,4					43	5,0
5	1	0,1	30	3,5	7	0,8					38	4,4
6			13	1,5	6	0,7					19	2,2
7			1	0,1							1	0,1
	19	2,1	283	32,8	219	25,3	2	0,2	343	39,6	866	100

ცხრილი 1.3 შესრულებულია არსებული სამშენებლო ნორმების, წესებისა და სხვადასხვა ორგანიზაციების მონაცემების საფუძველზე. ტალღების მახასიათებლების განსაზღვრისას გამოყენებულია „ჰიდრომეტსამსახურისა“ და „თბილწყალგეოს“ მონაცემები [3].

აღნიშნავთ, რომ ტალღების საწყისი პარამეტრების (ტალღის საანგარიშო სიმაღლე, სიგრძე და პერიოდი ნაპირიდან დაშორებით – ღრმა წყალზე) დადგენისას დაფიქსირდა სხვაობა დაკვირვებებითა და ანგარიშით მიღებულ შედეგებს შორის. ამიტომ, აღნიშნული მონაცემები დაზუსტდა ნატურული დაკვირვებისა და გაანგარიშების შედეგების საფუძველზე. კერძოდ, ღია ზღვაზე ტალღების საანგარიშო პარამეტრების დადგენისას ქარის მაქსიმალურად სახიფათო მიმართულებად მიჩნეულ იქნა დასავლეთის მიმართულება, ხოლო ქარის სიჩქარედ – $W=25$ მ/წმ (უფრო დიდი სიჩქარის მქონე ქარების ხანგრძლივობა იმდენად მცირეა, რომ მათგან გამოწვეული ტალღები ვერ ასწრებს სრულ ფორმირებას).

ცხრილ 1.4-ში მოყვანილია სხვადასხვა ორგანიზაციების მიერ („საქართველოს ჰიდრომეტსამმართველო“, „საქნაპირდაცვა“) მოწოდებული მასალების მიხედვით ღრმა წყალზე დადგენილი ტალღების გასაშუალებული პარამეტრების მნიშვნელობები 8 ბალიანი დელვისას [3].

ცხრილი 1.4. ტალღების საანგარიშო პარამეტრები მაქსიმალური (8 ბალიანი) დელვისას

ორგანიზაცია	ტალღის საშუალო პარამეტრები ღრმა წყალზე, დელვის მიმართულება დასავლეთი- ჩრდილო-დასავლეთი		
	სიმაღლე $\bar{h}_{ღრ}$, მ	პერიოდი $\bar{\tau}_{ღრ}$, წმ	ტალღის სიგრძე $\bar{\lambda}_{ღრ}$, მ
„ჰიდრომეტსამმართველო“, „თბილჰიდროპროექტი“	4,6	10,3	165
„საქნაპირდაცვა“	4,6	9,9	152
„თბილწყალგეო“	4,8	9,6	147

ზღვის სანაპირო ზოლში, თავთხელ წყალზე, ტალღების ძირითად მახასიათებლებზე დიდ გავლენას ახდენს წყლის სიღრმე და ფსკერის ფორმა. თავთხელი ეწოდება წყალს, რომლის სიღრმე (H) იცვლება $\frac{\bar{\lambda}_{ღრ}}{2} \geq H > H_{კრ}$ ფარგლებში, სადაც $\bar{\lambda}_{ღრ}$ ტალღის საშუალო სიგრძეა ღრმა წყალზე დადგენილი ნორმებით [149,150,161] საანგარიშო შტორმული ვითარების შერჩევის შედეგად; $H_{კრ} \approx 2\bar{h}_{ღრ}$ ტალღის პირველი დამსხვრევის შესაბამისი კრიტიკული სიღრმეა; ნაპირის უშუალო სიახლოვეს ტალღა იმსხვრევა და საბოლოოდ, მისი სიმაღლე ეცემა $h_{1\%} = 2$ მ-მდე 1% - იანი უზრუნველყოფის ტალღებისთვის.

აღნიშნულ რეგიონში, ზღვის დონის მერყეობაზე სხვადასხვა პერიოდში ჩატარებული ნატურული დაკვირვებების შედეგად დადგენილია [3], რომ გარდა ტალღის სიმაღლისა, ზღვის წყლის ზედაპირის მაქსიმალურ აწევას განსაზღვრავს დონის დღეღამური რყევა, რომლის დიაპაზონი, ბალტიის ათვლის სისტემაში, შეადგენს

$\pm 0,3 \div 0,4$ მ-ს. გარდა ამისა ღელვისას ადგილი აქვს ნაპირზე ზღვის ე.წ. შტორმულ ადინებას, რომელიც დასავლეთის $w = 25$ მ/წმ სიჩქარის ქარების შემთხვევაში აღწევს 0,9 მ-ს. საბოლოოდ, ამ და სხვა ფაქტორების (კერძოდ, მიქცევა-მოქცევის, ახლომდებარე მდინარეების წყალდიდობების, შავი ზღვის აკვატორიაში ატმოსფერული წნევის ცვალებადობის (ანუ ბარიული სეიშების – ე. წ. „ტიაგუნების“) გათვალისწინებით, ზღვის დონის მაქსიმალური აწევა ანაკლიის ნაპირთან, ზღვის $H=3,0$ მ სიღრმის იზობატზე 3,2 მ-ს უტოლდება, რაც უნდა გადაიზომოს ზღვის საშუალო მრავალწლიური დონიდან.

1.1.2. ჰიდრომშენებლობა და გეომორფოლოგიური პროცესები ანაკლიის რეგიონში

ანაკლიის პლაჟის უკან, ხმელეთის ნიშნულები ხშირად პლაჟის ნიშნულებზე მნიშვნელოვნად დაბლაა. თვით პლაჟი ამჟამად, იკვებება მხოლოდ მდ. ენგურის მცირე რაოდენობის წვრილფრაქციული ნატანით და, წყალმარჩხოვის პერიოდში, განმუხურის ნაპირიდან ტრანსპორტირებული მასალით, რის გამოც, ანაკლიის სანაპირო ზოლი ექვემდებარება ინტენსიურ წარეცხვას: – ენგურის შესართავთან, ანაკლიის ნაპირის ჩრდილოეთ ნაწილში, პლაჟის სიგანე 5-10 მეტრამდეა შემცირებული, ხოლო მის ცენტრალურ და სამხრეთ ნაწილებში კი წარეცხვების სიგანე აღწევს 30-40 მეტრს. ამ უკანასკნელ 30 წელიწადში წაირეცხა დაახლოებით 32 ჰა სანაპირო ზოლი.

ანაკლიის ნაპირის წარეცხვის ძირითადი მიზეზებია:

- სამდინარო და საზღვაო ჰიდრომშენებლობით გამოწვეული პლაჟ-წარმომქნელი მასალის მკვეთრი დეფიციტი;
- სანაპირო ხაზის აზიმუტის შეცვლა, გამოწვეული გაბატონებული მიმართულების ტალღების აგრესიულობით;
- ტალღური რეჟიმების გაუარესება, რაც განპირობებულია ბოლო ათწლეულებში კლიმატის დათბობითა და მაღალი სიმძლავრის შტორმების განმეორებადობის ზრდით.



ნახ.1.5. ანაკლიის წარეცხილი სანაპირო

ენგურის შესართავში წყალდიდობის ხარჯის გატარების გაუმჯობესებისა და ანაკლიის სანაპირო ზოლის აღდგენის მიზნით, ჯერ კიდევ 1981-86 წლებში საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროტექნიკური ნაგებობების სამეცნიერო კვლევით ინსტიტუტში (ყოფილი ГрызНИИЭГС), პროფესორების თ. ვოინიჩ-სიანოჟენცკის, ვ. საყვარელიძისა და შ. გაგოშიძის ხელმძღვანელობით ტარდებოდა ლაბორატორიული კვლევები (ნახ.1.6. ა, ბ). ამ კვლევების საფუძველზე ენგურის შესართავი ყელის მისილვებისაგან დაცვისა და შესართავის გამტარუნარიანობის გაზრდის მიზნით, შეიმუშავეს მდ. ენგურის შესართავში გასაჭრელი არხის სქემა.



ა)



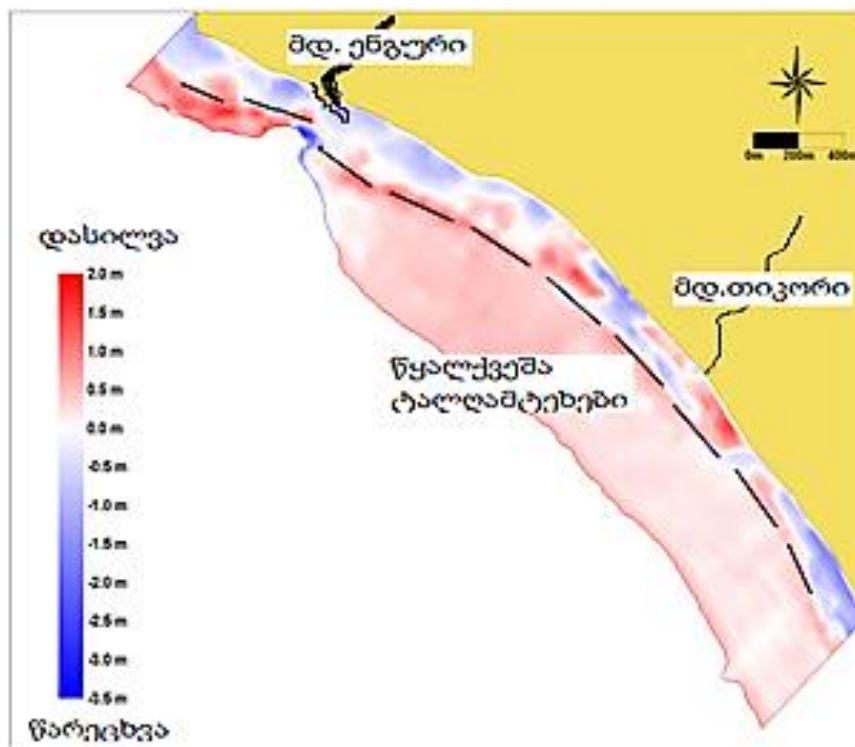
ბ)

ნახ.1.6. მდ. ენგურის შესართავის ლაბორატორიული კვლევები საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ს. კ. ინსტიტუტის დიდ ტალღათწარმომქმნელ აუზში (1984-1985 წწ) [102]

2010 წელს შპს „ნაპირდაცვამ“ წარმოადგინა ანაკლიის საზღვაო ნაპირის დაცვის პროექტი [1], რომელიც გულისხმობდა წყალქვეშა ტალღამრიდი ბეტონის ბლოკების ჩაწყობას წარეცხილი ნაპირის გასწვრივ და ნაპირის აღდგენას ინერტული მასალის დაყრით. ამავე დროს, ეს პროექტიც ითვალისწინებდა არხის გაჭრას მდ. ენგურის შესართავში, მაგრამ „ნაპირდაცვის“ მიერ შემოთავაზებული არხი (რომელიც

ფაქტობრივად იმეორებდა ენერგეტიკისა და ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ს. კ. ინსტიტუტისა და „საქზღვანაპირდაცვის“ 1982 წლის წინადადებას), არ იყო ჰიდრავლიკურად გაანგარიშებული, რომ არაფერი ვთქვათ ტალღური ზემოქმედების გათვალისწინებაზე.

2011-2013 წლებში კორეულმა ფირმამ „DOHWA Engineering“-მა და საქართველოს ასოციაცია „ჰიდროსფერომ“ შეიმუშავეს პროექტი [2], რომელიც გულისხმობდა ანაკლიის 4,5 კმ სიგრძის ზღვის სანაპირო ზოლის დაცვას ორ ეტაპად, ნაპირიდან დაახლოებით 200-250 მ-ში განთავსებული 10 წყალქვეშა ტალღამტეხი ბარიერით (ნახ.1.7). ეს ბარიერები უნდა შექმნილიყო ტეტრაპოდებით (ნახ.1.17).



ნახ. 1.7. „DOHWA Engineering“-ის საპროექტო წინადადება და წყალქვეშა ნაპირდამცავი ბანკეტების მოწყობის მათემატიკური SWAN მოდელირების შედეგები [2]; წითელ ფერში აღნიშნულია დასილვის, ხოლო ლურჯ ფერში – ეროზიის პროცესები

აღნიშნული პროექტი არ განიხილავდა მდინარე ენგურის გავლენას ანაკლიის საზღვაო სანაპირო ზოლზე. კერძოდ, ამჟამად, მდინარის შესართავში ტალღების ზემოქმედებით წარმოქმნილი ქვიშის ზვინული მდინარის ჭავლს მიმართავს ანაკლიის ნაპირის გასწვრივ, რაც კიდევ უფრო მეტად უწყობს ხელს ნაპირის წარეცხვას და, მუდმივად ამღვრევს ზღვის წყალს კურორტ ანაკლიის სანაპირო ზოლში (განმუხურის ნაპირისგან განსხვავებით, სადაც მდ. ენგურის ჭავლი ფაქტობრივად არ ზემოქმედებს). წყალქვეშა ნაპირგასწვრივი ბარიერების მოწყობის შემთხვევაში ეს უარყოფითი პროცესები კიდევ უფრო მეტად გამძაფრდება, თუ დროულად არ იქნა მიღებული შესაბამისი საინჟინრო გადაწყვეტილებები.

ამ პროექტით აიგო კიდევ ორი წყალქვეშა ბარიერი, მაგრამ 2016 წელს შეწყდა ბარიერების მშენებლობა, ანაკლიაში, ენგურის შესართავს სამხრეთით დაგეგმილი უმსხვილესი (პერსპექტივაში 100 მლნ. ტონამდე ტვირთბრუნვით) საპორტო მშენებლობის საძიებო-საპროექტო სამუშაოების წამოწყების გამო. აღნიშნული პორტის მდებარეობისა და ტერიტორიული მოწყობის საორენტაციო რუკა მოყვანილია ნახ. 1.8-ზე.

ამავე მიზეზით აღარ განხილულა ცნობილი ქართველ გეომორფოლოგის, „საქზღვანაპირდაცვის“ დამაარსებლის – არჩილ კვიციანიის წინადადება, რომელმაც პირველმა, ჯერ კიდევ 1988 წელს, წამოაყენა ანაკლიაში საპორტო მშენებლობის იდეა არა უშუალოდ ზღვის ნაპირზე, არამედ მდ. ენგურის შესართავ კალაპოტში, დაბა ანაკლიის ჩრდილოეთით არსებულ ტერიტორიაზე, მდ. ენგურის შესართავის გადაღდებით ანაკლიის სამხრეთით.



ნახ. 1.8. ანაკლიაში საპორტო მშენებლობისა და თავისუფალი სავაჭრო ზონის შექმნის კონცეპტუალური რუკა

1.2. ჰიდრომშენებლობის გავლენა ქალაქ ფოთის საზღვაო ნაპირსა და მდ. რიონის შესართავ უბნებზე

1.2.1. მოკლე ისტორიული ცნობები

საქართველოს ერთ-ერთი უძველესი ქალაქი ფოთი, ზოგი მკვლევარის მტკიცებით – ქალაქი ფაზისი, ბერძნულ ისტორიულ წყაროებში გვხვდება ჯერ კიდევ ძვ. წ. VII საუკუნეში. ქართულ წყაროებში ფოთი პირველად მოიხსენიება მხოლოდ XI საუკუნის თხზულებაში „გიორგი მთაწმინდელის ცხოვრება“, რომელიც ეკუთვნის გიორგი მთაწმინდელის მოწაფეს – ხუცეს გიორგი მცირეს. ამ ცნობის თანახმად, საზღვარგარეთიდან სამშობლოში დაბრუნებული გიორგი ათონელი სამსუნიდან ნავით შემოსულა ფოთის ნავსადგურში.

XVI-XVIII საუკუნეებში ფოთი ოსმალეთის იმპერიის მფლობელობაშია. იგი, როგორც საპორტო ქალაქი, ამ პერიოდში ტყვეებით ვაჭრობის მთავარი ცენტრია.

1809 წელს თავადმა დადიანმა ფოთი სამეგრელოს სამთავროს დაუბრუნა, ხოლო 1829 წელს, ადრიანოპოლის ზავით ფოთი საბოლოოდ ჩამოშორდა ოსმალეთის იმპერიას და მოექცა რუსეთის იმპერიის შემადგენლობაში, დაექვემდებარა რა ქუთაისის გუბერნიას.

1832 წელს ბარონმა როზენმა რედუტ-კალედან (ახლანდელი ყულევი) ფოთში გადმოიტანა საბაჟო და რამდენიმე სახელმწიფო დაწესებულება.

1853 წელს რუსეთის ხელმწიფე ალექსანდრე II ხელს აწერს კავკასიის კომიტეტის დადგენილებას ფოთში ნავსადგურის მშენებლობაზე, ხოლო 1859 წლიდან ფოთი ოფიციალურად ცხადდება საპორტო ქალაქად. ამ პერიოდში ფოთში იმოგზაურა დიდმა ფრანგმა მწერალმა ალექსანდრე დიუმამ, რომელმაც ეს მოვლენები ასახა თავის ცნობილ თხზულებაში – „კავკასია“.

1858-1872 წლებში მდ. რიონში, ფოთიდან ორპირამდე, დაცურავდნენ ორთქლის გემები – „თავადი ბარიატინსკი“ და „გოლუმჩიკი“, რომლებსაც შემოჰქონდათ ქსოვილები, შაქარი, მარილი და სხვა საქონელი. სანაცვლოდ ფოთში ჩაჰქონდათ ხე-ტყე, ნედლი აბრეშუმი, ბამბა, ღვინო და ა.შ. 1871 წელს რიონზე შეწყდა სამდინარო ნაოსნობა ამიერკავკასიის პირველი სარკინიგზო ხაზის – ფოთი-შორაპნისა და 1872 წელს თბილისი-ფოთის სარკინიგზო ხაზების ამოქმედების გამო.

1863 წელს იწყება ფოთის ნავსადგურის მშენებლობა „შავროვის პროექტით“, რომელმაც ვერ გაამართლა, რადგან პორტს შესასვლელი მოწყობილი ჰქონდა სამხრეთ-

დასავლეთიდან და უმნიშვნელო ქარის შემთხვევაშიც იქ მყოფ გემებს ღია ზღვაში უწევდა გასვლა.

1894 წლის 18 სექტემბერს ქალაქ ფოთის თავად ირჩევენ დიდ ქართველ საზოგადო მოღვაწეს ნიკო ნიკოლაძეს, რომელმაც კარდინალურად შეცვალა ვითარება. მისი მმართველობის დროს, უშუალოდ მისი ხელმძღვანელობით, 1897 წელს დაიწყო მზადება ფოთის ნავსადგურის რეკონსტრუქციისთვის. რეკონსტრუქცია დასრულდა 1907 წელს და ფოთის ნავსადგურმა მიიღო თანამდროვე იერსახე.

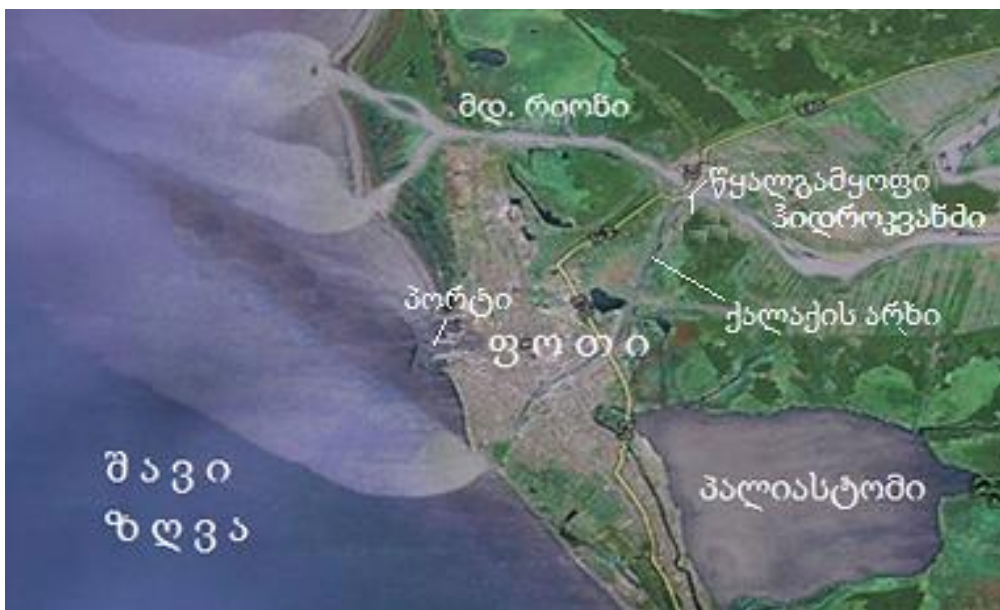
ამჟამად, ნავსადგურის მფლობელობაშია 14 ნავმისადგომი ტვირთების ტრანსპორტირებისათვის. ნავმისადგომების ფრონტის ჯამური სიგრძე შეადგენს 2650 მეტრს. მათგან 11 ნავმისადგომი აღჭურვილია 6-დან 40 ტონამდე სიმძლავრის ამწეებით. პორტი ემსახურება როგორც მშრალი, ასევე თხევადი ტვირთის გადაზიდვას. მისი წლიური ტვირთბრუნვა 7 მლნ. ტონაზეა გათვლილი.

ქალაქი ფოთი და მისი მოსაზღვრე რეგიონები მდებარეობს ტრასეკას კორიდორში და წარმოადგენს კავკასიის სატრანზიტო-სატრანსპორტო ქსელის უმნიშვნელოვანეს სეგმენტს. ფოთის განვითარების გეგმა ითვალისწინებს გლობალურ პროექტებს: – ახალი საპორტო აკვატორიების შექმნას საერთაშორისო გადაზიდვებისთვის ბულგარეთის, თურქეთის, რუმინეთის, უკრაინისა და რუსეთის პორტებში და, ახლო მომავალში, ფოთში თავისუფალ სავაჭრო ზონის ამოქმედებას. ყველა ამ გადაწყვეტილების წარმატებით განხორციელება უშუალოდ უკავშირდება იმ რიგი ჰიდროსაინჟინრო, გეომორფოლოგიური და გარემოსდაცვითი პრობლემების გადაჭრას, რაც წარმოიშვა გასული საუკუნის პირველი ნახევრიდან და დღემდე არსებობს ამ რეგიონში. ეს პრობლემები ნათელი მაგალითია იმისა, თუ რა უარყოფითი შედეგები შეიძლება მოჰყვეს მეცნიერულად დაუსაბუთებელ ჰიდროტექნიკურ მშენებლობას და საინჟინრო ღონისძიებათა გატარებას არა მხოლოდ გარემოზე ზემოქმედების, არამედ თვით ამ მშენებლობების ეფექტური ფუნქციონირების თვალსაზრისითაც.

1.2.2. გარემოსდაცვითი და ჰიდროსაინჟინრო პრობლემები ქალაქ ფოთის საზღვაო რეგიონში

მასშტაბური გეომორფოლოგიური ცვლილებები ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლში დაიწყო მას შემდეგ, რაც 1939 წელს მდ. რიონი მთლიანად იქნა გადაგდებული ქალაქის ჩრდილოეთით. ამ ღონისძიებამ მართალია თვით ქალაქი იხსნა ხშირი დატბორვებისგან, მაგრამ ქალაქის ნაპირზე შექმნა პლაჟწარმომქმნელი ნატანის აუნაზღაურებელი დეფიციტი. ზღვამ კატასტროფულად წარეცხა ფოთის სანაპირო ზოლი და ასეულობით მეტრით დაახევინა უკან. ფოთის ნაპირზე აიგო მრავალი ბუნი და ტალღამრიდი, დაიყარა უამრავი რაოდენობის ბეტონის ბლოკი, ფლეთილი ქვა და ლოდი, მაგრამ ამ ღონისძიებებმა ვერ შეაჩერა ფოთის ნაპირის წარეცხვების ინტენსივობა, რაც კიდევ უფრო მეტად გაიზარდა მდ.რიონზე გუმათი და ვარციხე ჰესების კასკადის ექსპლუატაციაში შესვლის შემდეგ (მდ. რიონის მყარი ჩამონადენი მასზე გუმათისა და შემდგომ, ვარციხის ჰესების წყალსაცავების აშენების შედეგად შემცირდა 2,07 მლნ.მ³-დან 1,35 მლნ.მ³-მდე წელიწადში).

ნახ.1.9-ზე წარმოდგენილ აეროფოტოსურათიდანაც შეიძლება დავასკვნათ, თუ რა რთულ ზემოქმედებას განიცდის ქალაქ ფოთისა და მისი მიმდებარე ტერიტორიების საზღვაო ნაპირი მდინარე რიონის ჩამონადენისა და ზღვის ურთიერთქმედების შედეგად. სურათზე მკაფიოდ ჩანს მდ. რიონის მიერ დელტიდან და „ქალაქის არხიდან“ ზღვაში ნატანის ტრანსპორტირების სამი კვალი, რომელიც დაფიქსირებულია გადაღების მომენტში.



ნახ. 1.9. ქალაქი ფოთი და მდინარე რიონის შესართავი უბნები

გარდა ძირითადი ჩრდილო-დასავლეთის მიმართულებისა, სიმღვრივის ლაქა ამავე დროს მოიცავს სანაპირო ზოლს მდინარის სამხრეთ ტოტსა და ფოთის პორტის შესასვლელ არხს შორის, რაც განაპირობებს პორტში შესასვლელი არხის მოსილვებს. ეს მოსილვები ცხადია კიდევ უფრო მეტად ინტენსიური ხდება სამხრეთისა და დასავლეთის მიმართულების შტორმებისა და ზღვაში მდინარის სამხრეთით მიმართული ჭავლური დინებების შემთხვევაში.



ნახ. 1.10. ქალაქ ფოთის წარეცხილი ნაპირები

პორტში შესასვლელი არხისა და თვით პორტის შიგა აკვატორიის მოსილვები, საფრთხეს უქმნის ნაოსნობას. პორტში შესასვლელისა და შიგა აკვატორიის სისტემატური გაწმენდა-გაღრმავებითი სამუშაოები ყოველწლიურად ასეულობით ათასი დოლარი უჯდება პორტის ადმინისტრაციას.

ქალაქ ფოთის წარეცხილი ნაპირის აღდგენის მიზნით, 1959 წელს მდ. რიონზე, ფოთის ჩრდილო-აღმოსავლეთით მეშვიდე კილომეტრზე, აიგო წყალგამყოფი ჰიდროკვანძი კაშხალ-ხიდით და რაბ-რეგულატორით (ნახ. 1.11-1.12).



ნახ. 1.11. ქალაქ ფოთთან მდ.რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის ხედი.
 1– კაშხალ-ხიდი ფარებიანი წყალსაშვებით; 2 – რეგულატორი; 3 – ქალაქის არხი; 4 – სარკინიგზო ხიდი. ისრით ნაჩვენებია შესართავისკენ მდ.რიონის ძირითადი ნაკადის მიმართულება

მისი დანიშნულება იყო 600 მ³/წ-მდე მდინარის ხარჯების დაბრუნება ქალაქის ძველ კალაპოტში და ამ გზით ზღვის ნაპირზე ნატანის არსებული დეფიციტის (600 ათასი მ³/წლ.) შევსება. მაგრამ 300 მ³/წმ-ზე მეტი ხარჯების გაშვებისას, არხის კალაპოტის დაღეჭვისა და ზღვაში გასასვლელი კვეთის დეფორმაციების გამო (რაც ხდებოდა ზღვის ტალღების ზემოქმედებით მდინარის წყალმცირობის პერიოდში), ქალაქი კვლავ დაექვემდებარა დატბორვებს. დატბორვებისგან დასაცავად არხი შემოიზღუდა ჯებირებით, მოეწყო ორი წყალშემკრები და წყალსაქაჩი სადგური, მაგრამ ქალაქისთვის ზიანის მიუყენებლად მაინც ვერ მოხერხდა სასურველი ხარჯების გატარება.



ნახ.1.12. მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხალ-ხიდი (ხედი ქვედა ბიეფიდან)

გასული საუკუნის 80-იან წლებში, ფოთის სანაპირო ზოლის დაცვაში მონაწილეობას იღებდა სხვადასხვა სამეცნიერო-კვლევითი, საპროექტო და საგანმანათლებლო ორგანიზაცია. მათ შორის, საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის „ჰიდრავლიკისა და ჰიდრომანქანების“ კათედრა პროფესორების ნ. დანელიასა და გ. რურუას ხელმძღვანელობით. აღსანიშნავია აგრეთვე ი. ქადარიას და ვ. მარგველანის ღვაწლი ფოთთან დაკავშირებულ ექსპერიმენტულ კვლევებში, რომლებიც ეძღვნებოდა წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის რაბ-რეგულატორის ექსპლუატაციის ისეთი რეჟიმების შემუშავებას, რომლებსაც უნდა აღმოეფხვრა ზემოაღნიშნული ნეგატიური პროცესები. ეს რეჟიმები გულისხმობდა ქალაქის არხში მდინარის ნატანით გაჯერებული ხარჯების გაშვებას მხოლოდ მაშინ, როდესაც ზღვა იმყოფება წყნარ მდგომარეობაში. პროფესორ გ. რურუას აპრიორული მტკიცებით, მხოლოდ ამ პირობებში იყო შესაძლებელი ნატანის აკუმულაცია ზღვის სანაპირო ზოლში. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ანუ ზღვის დეღვისას, ადგილი ექნებოდა ქალაქის არხით ნატანის ზღვაში ტრანსპორტირებას ზღვის იმდენად დიდი სიღრმეებისკენ,

საიდანაც იგი ველარ მოხმარდებოდა ფოთის წარეცხილი სანაპირო ზოლის აღდგენას [152] (თეორიული დასაბუთება მოყვანილია მე-3 თავში).

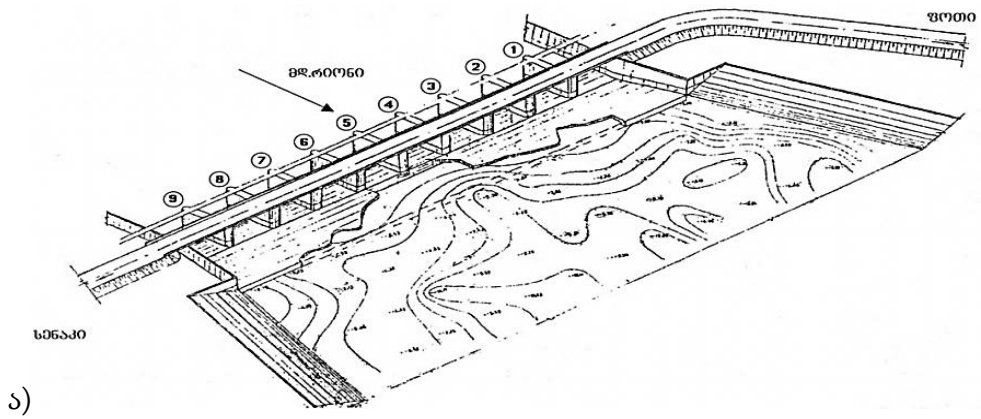
აღნიშნული რეკომენდაციები განხორციელდა კიდევ ნატურაში, წყალგამყოფ ჰიდროკვანძზე. მიუხედავად ამ ღონისძიების განხორციელების შედარებით მოკლე პერიოდისა, მდ. რიონის შესართავ უბანთან მართლაც აღინიშნა ზღვის ნაპირის სტაბილური ზრდა, განსაკუთრებით ქალაქის არხის შესართავთან აგებულ შუქურასთან, მაგრამ 90-იან წლებში, ცნობილი მოვლენების გამო, შეწყდა როგორც სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოები, ასევე წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის ექსპლუატაცია აღნიშნული რეჟიმებით.

80-იანი წლების მიწურულს ფოთის საზღვაო ნაპირის აღდგენა გაგრძელდა სამეცნიერო-საწარმოო გაერთიანება „საქნაპირდაცვის“ მიერ დაპროექტებული პულპასადენის მეშვეობით (წინადადების ავტორი, პროფესორი ვ. საყვარელიძე). პულპასადენი სათავეს იღებდა წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის ზედა ბიეფიდან და ზღვის ნაპირამდე მიჰყვებოდა ქალაქის არხის ჯებირს, აწვდიდა რა რიონის წყალგამყოფ ჰიდროკვანძთან აკუმულირებულ ნატანს ფოთის წარეცხილ ნაპირს. ამ ღონისძიებამაც გამოიღო გარკვეული ეფექტი, მაგრამ არც იგი გაგრძელებულა დიდხანს პულპასადენის მწყობრიდან ნაადრევად გამოსვლის გამო [7].

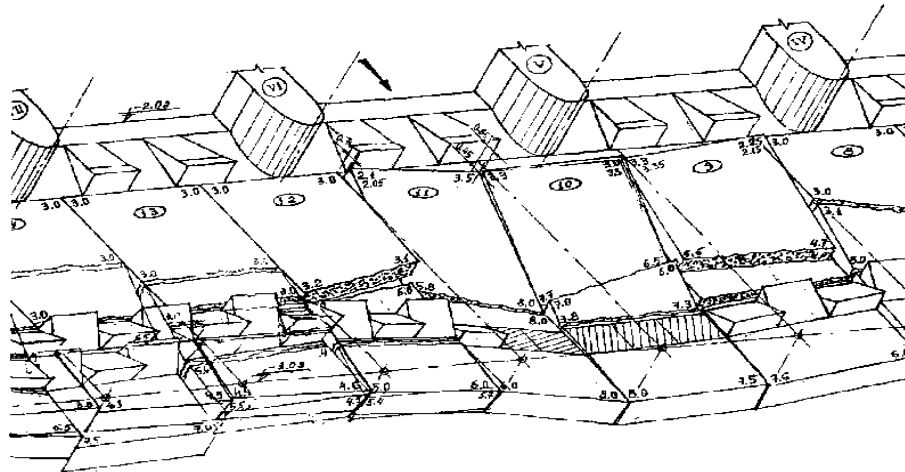
დროთა განმავლობაში მნიშვნელოვნად ინგრეოდა და ირეცხებოდა თვით კაშხალ-ხიდის ქვედა ბიეფიც, მიუხედავად მის გადასარჩენად მრავალი ორგანიზაციის მიერ სხვა და სხვა წლებში გატარებული უშედეგო ღონისძიებებისა. ამ გამორეცხვებითა და ნგრევებით ძალზე სერიოზული საფრთხე ექმნებოდა (ეს საფრთხე დღესაც არაა მოხსნილი!) წყალგამანაწილებელი კაშხალ-ხიდის მდგრადობას.

2006 წელს „საქწყალპროექტის“ პროექტით განხორციელდა კაშხლის გამორეცხილი ქვედა ბიეფის ამოვსება მაკაფერის გაბიონებით (ნახ.1.14). ეს ღონისძიება არ აცხადებდა პრეტენზიას კაშხლის ქვედა ბიეფის კაპიტალურ რეაბილიტაციაზე და ამდენად ატარებდა (დღეს-დღეობითაც ატარებს) დროებით ხასიათს. ამასთან, რამდენადაც ჩვენთვის ცნობილია, 2006 წლის შემდგომ პერიოდში არც „საქწყალპროექტს“ და არც ერთ სხვა ორგანიზაციას, არ ჩაუტარებია კაშხლის ქვედა ბიეფის სრული წყალქვეშა რეკონსტრუქცია და ფაქტობრივად უცნობია, თუ რა ვითარებაა იქ შექმნილი.

ამრიგად, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მდ. რიონზე აგებულმა არც კაპიტალურმა და არც დროებითმა საინჟინრო ნაგებობებმა და ღონისძიებებმა ფაქტობრივად არა თუ ვერ გაამართლეს თავისი ფუნქციური დანიშნულება, დაეცვათ ფოთის ნაპირი წარეცხვებისაგან, არამედ თვითონვე გამოვიდნენ მწყობრიდან.

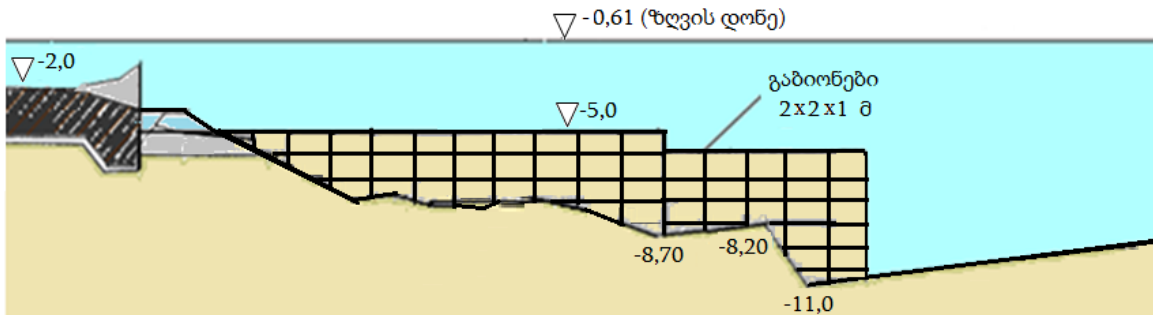


ა)



ბ)

ნახ.1.13. წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფის ნგრევების კონტურისა (ა) და დამსხვრეული წყალსაცემი ფილების (ბ) ესკიზური ნახაზები. („საქწყალპროექტი“ 2006-2007[20])



ნახ.1.14. კაშხლის ქვედა ბიეფის გამაგრება გაბიონების მეშვეობით („საქწყალპროექტი“ 2006-2007)

არანაკლებ რთული ვითარებაა შექმნილი ფოთის პორტის დამცავ ზღუდარზეც, ე.წ. „სამხრეთის მოლოზე“, რომელიც X-ბლოკების გამოყენებით ჰოლანდიური ფირმა "Delta Marine Consultants bv"-ს პროექტით იყო რეაბილიტირებული 2008-2009 წლებში. 2011 წელს 7 თებერვალს, 4-5 ბალიანმა შტორმმა ლუზას მოწყვიტა და მოლოს მინარცხა გარე რეიდზე მდგომი საშუალო წყალწყვის დაუტვირთავი გემი "Grigoriy Petrovski". შეჯახების შედეგად დაზიანდა მოლოს 60 მ სიგრძის უბანი, ხოლო გემი შუაზე გადატყდა და მალე ჩაიძირა (ნახ.1.15).



*ნახ.1.15. ფოთის პორტის დამცავ ზღუდარზე გემ
“GRIGORIY PETROVSKI”-ის შეჯახების ვიდეოკადრი*

მაგრამ განსაკუთრებული ზიანი ფოთის პორტის დამცავ ზღუდარს მიაყენა 2013 წლის დეკემბრის მძაფრმა შტორმებმა, რომლებიც რამდენჯერმე განმეორდა ორი კვირის განმავლობაში და გამოიწვია X-ბლოკებისაგან შექმნილი „სამხრეთი მოლოს“ 600 მ სიგრძის უბნის რღვევა პორტის როგორც გარე, ასევე შიგა აკვატორიების მხრიდან (ნახ.1.16). ამგვარი ნგრევები, რა თქმა უნდა, არ უნდა მომხდარიყო, რადგან აღნიშნული შტორმები მართალია გამოირჩეოდა მოქმედების ხანგრძლივობით, მაგრამ ბალიანობით არ აღემატებოდა ფოთის რეგიონისათვის ნორმებით დადგენილ 1% უზრუნველყოფის შტორმებს.



*ნახ. 1.16. X-ბლოკებით 2008-2009 წლებში რეაბილიტირებული ფოთის
პორტის დამცავი ზღუდარის რღვევის სურათი გარე აკვატორიის მხრიდან
(2016 წელი)*

ეს ნგრევები, ჩვენი შეფასებით, განაპირობა 2008-2009 წლებში სარეაბილიტაციო ღონისძიებათა გატარებისას დაშვებულმა შეცდომებმა, კერძოდ, ერთი მხრივ, მოლოს დამცავი X-ბლოკების საპროექტო წონისა (4,8 ტ) და გაბარიტების სიმცირემ, ხოლო მეორე მხრივ, ამ ე.წ. რეაბილიტაციის პროცესში მოლოს ტანში არსებული

უზარმაზარი – 40-დან 70 ტონამდე წონის მართკუთხა ბეტონის ბლოკების სრულიად გაუმართლებელმა დაშლა-დაქუცმაცებამ.

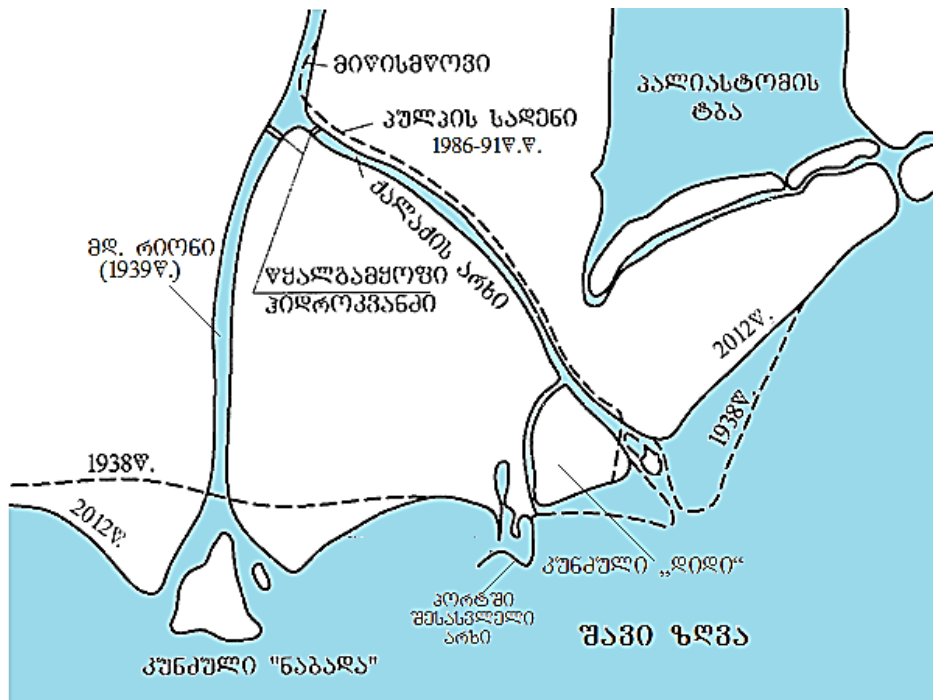


ნახ.1.17. პრაქტიკაში ხმარებული ზოგიერთი საზღვაო-საპორტო ფასონური ბლოკი დათარიღებული დაპატენტების წლებით

ამჟამად ფოთის პორტის მფლობელ კორპორაციას განზრახული აქვს „სამხრეთის მოლოს“ განმეორებითი რეაბილიტაცია ჰოლანდიური საპროექტო ფირმა „Royal HaskoningDHV“-ს რეკომენდაციებით, რაც გულისხმობს მოლოზე არსებული X-ბლოკების ჩანაცვლებას 9,4-დან 10,4 ტ-მდე მასის მქონე ე.წ. კუბიპოდებით (ნახ. 1.17), მაგრამ ჩვენი შეფასებით კუბიპოდების (ისევე, როგორც X-ბლოკების) წონა არ არის საკმარისი ფოთის მოლოს სტაბილურობისთვის. გარდა ამისა, დამცავ ელემენტებად აღნიშნული ფასონური ბლოკების დაპატენტებიდან 15 წელიც არ არის გასული და ამიტომ, მათ დანერგვას სათანადო ექსპერიმენტული კვლევებისა და ნატურული გამოცდების გარეშე ფოთის პორტის მფლობელი კორპორაცია სიფრთხილით უნდა მოეკიდოს.

ფოთის რეგიონში ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი პრობლემატური ობიექტი სექმატურად წარმოდგენილია ნახ.1.18-ზე.

ეს მოკლე ისტორიული ექსკურსიკ ნათელ წარმოდგენას გვიქმნის, თუ რამდენად აქტუალურია ქალაქ ფოთის რეგიონში არსებული ჰიდროსაინჟინრო და გარემოსდაცვითი ხასიათის პრობლემების მეცნირულად დასაბუთებული გამოკვლევა და ისეთი საინჟინრო ღონისძიებების დასახვა, რომლებიც მაქსიმალურად შეუწყობს ხელს იქ არსებული გეომორფოლოგიური პროცესების მართვასა და ჰიდროსაინჟინრო პრობლემების მოგვარებას.



ნახ.1.18. ფოთის საზღვაო რეგიონში არსებული გეომორფოლოგიური პროცესებისა და ჰიდროსაინჟინრო პრობლემების სქემა. -- საზღვაო სანაპირო ზოლი 1938 წელს; — საზღვაო სანაპირო ზოლი 2012 წელს.

1.2.3. მდ. რიონის შესართავი უბნისა და ფოთის საზღვაო აკვატორიის მოკლე ჰიდროლოგიური და ჰიდრომეტეოროლოგიური დახასიათება

რიონი დასავლეთ საქართველოს ყველაზე წყალუბვი მდინარეა. იგი სათავეს იღებს კავკასიის ქედზე, ზღვის დონიდან 2960 მ სიმაღლეზე, მისი სიგრძეა 327 კმ, წყალშემკრები აუზის ფართობი შეადგენს 13400 კმ²-ს, საშუალო ქანობი – 7,2 %.

მდინარე რიონის ჰიდროლოგიური მახასიათებლების ცვლილება ძირითადად გამოწვეულია ანთროპოგენური ჩარევებით, რამაც მთავარი როლი შეასრულა ქალაქ ფოთისა და მიმდებარე ტერიტორიების სანაპირო ზოლის ფორმირებაში.

ჩვენი გაზომვებით მდ. რიონის ძირითადი – ჩრდილოეთი განტოტების სიგანე იცვლება 150-450 მ დიაპაზონში, სიღრმე – 1-დან 9 მ-დე, დინების საშუალო სიჩქარე – 0,3-დან 2 მ/წმ-მდე. ძლიერი ქარებისა და ზღვის დღეღვის პერიოდში შეინიშნება წყლის დონის აწევა, რომელიც ვრცელდება წყალგამოვ ჰიდროკვანძამდე. ეს მოვლენა არსებითია, როცა მდინარის ხარჯი აჭარბებს 1100 მ³/წმ-ს, რადგანაც ხდება მიმდებარე ტერიტორიის დატბორვა.

რიონის თხევადი და მყარი ჩამონადენის ხარჯებზე მრავალწლიანი დაკვირვებების შედეგები სხვადასხვა მახასიათებელ კვეთში მოყვანილია ცხრილ 1.5 და 1.6-ში [20, 28].

ცხრილი 15. მდ. რიონის საშუალო ხარჯი, (Q მ³/წმ) [28]

სადგური, წ.შ.აუზის ფართ. დაკვ.წლები	მახასიათებლები	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წლიური
		ნამახვანი 3450 კმ ² , 1934-1998	$Q_{საშ}$	73.8	74.0	120	233	275	252	199	144	102	112	
	$Q_{მაქს}$	188	126	160	352	375	334	281	226	144	184	173	145	182
	$Q_{მინ}$	38,7	41,7	65,8	129	176	147	132	91,2	59,0	48,2	42,3	45,9	110
საქოჩაკიძე 13 300 კმ ² , 1927-1998	$Q_{საშ}$	277	352	445	635	654	551	407	280	237	310	295	331	399
	$Q_{მაქს}$	610	671	844	979	1090	1210	772	555	410	768	749	834	546
	$Q_{მინ}$	67,3	149	228	318	347	293	222	162	118	98,7	70,6	43,1	284
ფოთი, ჩრდ. ტოტი 13 400 კმ ² , 1971-1990	$Q_{საშ}$	234	252	302	498	433	416	279	171	155	207	281	245	290
	$Q_{მაქს}$	307	436	573	900	608	654	388	372	228	380	579	547	393
	$Q_{მინ}$	153	73,6	184	307	292	228	197	14,7	-	112	106	143	229
ფოთი, სამხრ. ტოტი 13 400 კმ ² , 1971-1990	$Q_{საშ}$	85,6	104	90,7	113	133	131	126	140	112	115	101	106	114
	$Q_{მაქს}$	114	144	157	162	194	180	167	186	189	161	176	196	140
	$Q_{მინ}$	54,5	41,5	41,9	40,1	83,5	87,2	76,3	92,0	73,9	72,1	50,5	62,4	89,2

ცხრილი 16. მდ. რიონის ნატანის საშუალო ხარჯი (R კგ/წმ) [28]

სადგური, წ.შ.აუზის ფართ. დაკვ.წლები	მახასიათებლები	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წლიური
		ნამახვანი 3450 კმ ² , 1934-1998	$R_{საშ}$	13	14	43	130	170	170	140	94	52	51	
	$R_{მაქს}$	93	46	170	350	440	330	550	400	320	300	99	73	140
	$R_{მინ}$	0,40	1,6	8,9	33	47	65	24	18	3,8	0,68	1,2	1,1	21
საქოჩაკიძე 13 300 კმ ² , 1927-1998	$R_{საშ}$	72	130	170	340	330	280	190	200	79	130	92	99	180
	$R_{მაქს}$	380	390	440	800	890	1100	540	290	340	970	440	370	550
	$R_{მინ}$	6,6	13	19	53	69	33	24	8,0	8,5	3,6	3,9	2,8	27
ფოთი, ჩრდ. ტოტი 13 400 კმ ² , 1971-1990წწ	$R_{საშ}$	62	81	110	170	210	190	97	70	34	86	84	73	110
	$R_{მაქს}$	200	160	260	350	350	440	150	310	78	170	320	180	190
	$R_{მინ}$	6,2	7,0	21	60	71	57	45	1,7	15	12	15	28	69
ფოთი, სამხრ. ტოტი 13 400 კმ ² , 1971-1990წწ	$R_{საშ}$	29	44	40	60	90	83	70	120	67	75	51	76	67
	$R_{მაქს}$	69	77	77	120	190	140	160	330	220	210	190	300	130
	$R_{მინ}$	4,0	6,5	4,2	15	25	23	18	19	7,5	2,6	8,5	9,9	32

შპს „გამა კონსალტინგი“-ს მიერ ჩატარებული კვლევებით მდინარეს ზღვაში ყოველწლიურად შეაქვს 3,5-4,0 მლნ.მ³ ნაპირმაფორმირებელი ნატანი [28]. აკუმულაციის შედეგად დელტის წინ მდებარე წყალქვეშა ფერდობის სიღრმეები ყოველწლიურად მცირდება დაახლოებით 0,1 მეტრით. ძლიერი დასილვების გამო, ფოთის საზღვაო ნავსადგურის შესასვლელ არხში, განუწყვეტლივ მიმდინარეობს გაწმენდითი სამუშაოები.

გუმათისა (1956-1958 წ.წ) და ვარციხე (1976-1987 წ.წ.) ჰესების კასკადის ექსპლუატაციაში შესვლის შემდეგ მდინარის ნატანით დაილექა წყალსაცავები, რის გამოც მათი მოცულობა შემცირდა 95-97%-ით.

საქოჩაკიდის საგუმაგოზე მდ. რიონის ტივტივა და ფსკერული ნატანის რაოდენობა, დაფიქსირებული 1970-1994 წლებში ნაჩვენებია ცხრილ 1.7-ში, ხოლო იმ წლებში, როცა არ ტარდებოდა გაზომვითი სამუშაოები, მათი მოცულობების დადგენა ხდებოდა ლ.გველესიანის ემპირიული ფორმულის მეშვეობით [21].

ცხრილი 1.7. ნატანის საშუალო ხარჯები საქოჩაკიდის საგუმაგოზე

თვეები	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ტივტივა (კგ/წმ)	78	447	98	273	386	269	83	58	21	32	39	126
ფსკერული(კგ/წმ)	21	45	26	37	45	37	24	21	14	15	14	22

ზღვაში შესული ნატანის 90-95% ემთხვევა წყალდიდობების პერიოდს და საშუალოდ შეადგენს 8 მლნ მ³-ს წელიწადში, აქედან 7,25 მლნ მ³ მოდის ტივტივა ნატანზე, ხოლო 0,75 მლნ.მ³ – ფსკერულზე. ნატანის ჰიდრაულიკური სიმსხოს მნიშვნელობები ნაწილაკების დიამეტრების მიხედვით მოყვანილია ცხრილ 1.8-ში [19, 22]. ზოგიერთი მონაცემით [15], ფსკერული ნატანი, დიამეტრით 0,05-1 მმ, წყნარი ზღვის პირობებში გაიტანება ზღვაში მხოლოდ 1-დან 35 მ ნაძილზე ნაპირის ხაზიდან და რჩება ფოთის სანაპირო ზოლში.

ცხრილი 1.8. ნატანის ჰიდრაულიკური სიმსხოს მნიშვნელობები

d, მმ.	0,01	0,15	0,03	0,05	0,1	0,2	0,25	0,5	1	>1
W _s (სმ/წმ)	0,008	0,018	0,073	0,203	0,575	1,95	2,5	3,0	8,0	15

ქალაქი ფოთი გეოგრაფიული მდებარეობიდან გამომდინარე, ხშირად განიცდის აღმოსავლეთის ქარების გავლენას. ზაფხულში უმეტესად ქრის სამხრეთ-დასავლეთის, დასავლეთისა და ჩრდილო-დასავლეთის ქარები მაშინ, როცა ზამთარში ძირითადად გაბატონებულია სამხრეთ-აღმოსავლეთისა და ჩრდილო-აღმოსავლეთის ქარები.

ცხრილ 1.9-ში მოყვანილია ფოთის რეგიონში ქარების მიმართულების წლიური განაწილება პროცენტებში [23].

ცხრილი 1.9. ქარების წლიური განაწილება ქალაქ ფოთის რეგიონში

ქარის სიჩქარე, მ/წმ	ქარის მიმართულება პროცენტებში (%)								
	ჩ	ჩა	ა	სა	ს	სდ	დ	ჩდ	სულ
1÷4	2	5,2	16,7	4,1	4,4	4,7	10,4	4,8	52,3
5÷9	0,3	1,2	9,0	0,9	2,1	5,9	3,7	1,5	24,6
10÷14	–	0,1	3,7	0,1	0,6	1,3	1,0	0,3	7,1
15 და მეტი	–	0,1	2,1	–	0,1	0,2	0,3	0,1	2,9
სულ	2,3	6,6	31,5	5,1	7,2	12,1	15,4	6,7	86,9

შავი ზღვა გამოირჩევა წყლის დონის მცირე ცვალებადობით. მოქცევების შედეგად იგი აღწევს მაქსიმუმ 20-25 სმ-ს, ხოლო ქარების ზემოქმედებისას – 20-40 სმ-ს.

მდინარეში წყალდიდობებისა და ზღვაზე შტორმების არსებობა არსებითად ცვლის ზღვაში ნატანის დალექვის სურათს, რადგან წყალდიდობის დროს შემოდის ნატანის ძირითადი რაოდენობა – დაახლოებით 70%. ტალღების ნაპირთან კუთხით მოსვლის გამო იქმნება ნაპირგასწვრივი დინებები, რაც იწვევს ნატანის ტრანსპორტირებას ზღვის ნაპირის გასწვრივ. მეორე მხრივ, მდინარის ნაკადი განაპირობებს ნაპირგასწვრივი მოძრაობის გადაკეტვას და თითქოს ხელს უწყობს ნაპირზე ნატანის აკუმულაციას. ამ პროცესების გასათვალისწინებლად აუცილებელია განისაზღვროს, თუ რამდენადაა მოსალოდნელი წყალდიდობების დამთხვევა ზღვაზე 4 ბალზე უფრო ძლიერ შტორმებთან. წყალდიდობების დროს, როცა წყლის ხარჯი ქალაქის არხში აჭარბებს 250მ³/წმ (ორთვიანი უზრუნველყოფით წელიწადში), ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე აღწევს დაახლოებით 1 მ/წმ [13, 25, 148, 167]. ამ დროს ქალაქის არხიდან ზღვაში შესული ნატანი (როგორც ეს დასაბუთებულია დანართებში და მოყვანილია მე-2 თავში), არ ხმარდება ფოთის ნაპირის აღდგენას და იკარგება ზღვის დიდ სიღრმეებში.

ფოთის პორტთან ტალღების მიმართულებების განაწილება გვიჩვენებს, რომ ძირითადი – დასავლეთის მიმართულების ტალღები შეადგენს ღელვის 44,7%-ს, სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულების ტალღები – 39%-ს, ხოლო სამხრეთის მიმართულების მხოლოდ 6,3%-ს. ზაფხულობით, ძირითადად, ჭარბობს სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულების ტალღები, ხოლო ზამთრობით – გაცილებით უფრო ძლიერი, დასავლეთის მიმართულების ტალღები [22, 23]. ტალღის სიმაღლეები განაწილებულია შემდეგნაირად: 0,7 მ-ზე ნაკლები სიმაღლის ტალღები შეადგენს 3,4%-ს, 0,7-2 მ-მდე სიმაღლის ტალღები – 29%-ს, ხოლო ტალღები, რომელთა სიმაღლე მეტია 2 მ-ზე – 7,3% -ს.

ქალაქ ოდესის შავი ზღვის საპროექტო და სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტის „**ЧЕРНОМОРНИИПРОЕКТ**“-ის დაკვირვებებით ფოთის პორტთან დასავლეთის მიმართულების ტალღები შეადგენს 44,7%-ს; სამხრეთ-დასავლეთის – 39%, ხოლო ჩრდილო-დასავლეთის – 8,8% -ს.

ცხრილი 1.10. ტალღების განმეორადობა ფოთის რეგიონისთვის 1947-1992 წლებში (ფოთის ჰიდრომეტეოროლოგიური სადგური) [28].

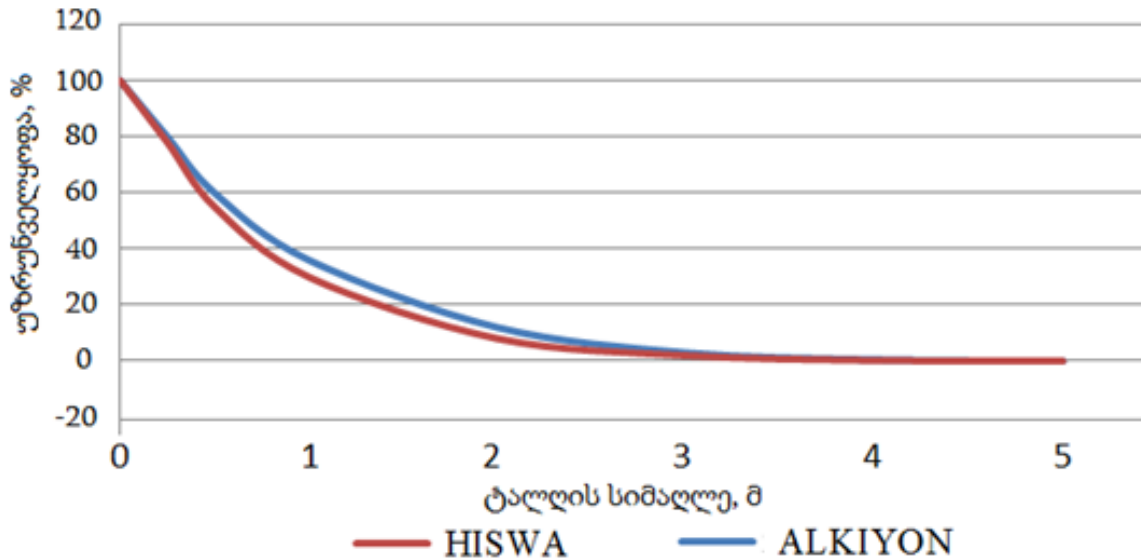
ტალღის სიმაღლე, მ	ა		ჩა		ჩ		ჩდ		დ		სდ		ს		სა		შტილი		ჯამი	
	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%	დაკვირვებათა რიცხვი	%
0																	821	5,5	821	5,55
0,1-0,4	3222	19,6	463	2,82	170	1,03	658	4,0	3297	20,06	2652	16,14	301	1,83	584	3,55			11347	69,04
0,4-0,6	93	0,57	13	0,08	1	0,006	207	1,26	782	4,76	1036	6,3	4	0,02	7	0,04			2143	13,04
0,6-1,0	26	0,16					105	0,64	670	4,08	618	3,76	3	0,02	2	0,012			1424	8,66
1,0-1,8							80	0,49	224	1,36	219	1,33			1	0,006			524	3,19
1,8-3,0							34	0,21	50	0,3	50	0,3							134	0,82
3,0-4,0							4	0,02	16	0,1	13	0,08							33	0,20
4,0-5,0							1	0,006	4	0,02	5	0,03							10	0,061
სულ	3341	20,33	476	2,9	171	1,036	1089	6,626	5043	30,68	4593	27,94	308	1,87	596	3,61	821	5,5	16436	100

არსებობს შავი ზღვის აღმოსავლეთ ნაწილში ქარებსა და ტალღურ რეჟიმებზე დაკვირვებების კიდევ რამდენიმე წყარო. მათ შორის აღსანიშნავია ALKIYON–ს მონაცემთა ბაზა, რომელიც მსოფლიო მასშტაბით მოიცავს დიდი რაოდენობის ინფორმაციას ქარებსა და ტალღურ რეჟიმებზე. დაკვირვებები შესრულებულია გემებიდან 1960–1994 წლებში [22].

ცხრილი 1.11. ტალღური რეჟიმების მახასიათებელი პარამეტრები ქალაქ ფოთთან

ქარის მიმართულება	ქარის მაქს. ხანგრძლივობა, სთ	ქარის საშ. სიჩქარე, მ/წმ	ტალღების მახასიათებელი პარამეტრები		
			გარბენი, კმ	სიმაღლე, $h_1\%$, მ	პერიოდი $T_1\%$, წმ
ჩრდ - დას	8	13,0	298	2,4	5,5
ჩრდ, დას-ჩრდ	13	16,5	450	4,4	7,5
დას	34	16,5	504	5,9	9,0
დას, სამხ -დას	33	16,5	428	5,4	8,5
სამხ - დას	24	20	266	6,0	8,5

ფოთის პორტის ახლოს გაზომვებით მიღებული მონაცემები, დაზუსტებული ჰოლანდიელი მეცნიერების მიერ 2000 წელს შემუშავებული კომპიუტერული მოდელის HISWA-ს მეშვეობით ჩვენ მიერ შედარებულ იქნა ALKIYON-ის მონაცემებთან (ნახ.1.19.), ამ შედარებამ გვიჩვენა, რომ პორტთან ტალღების პროცენტული უზრუნველყოფა, დადგენილი HISWA მოდელით, ფაქტობრივად ემთხვევა ALKIYON-ის მონაცემთა ბაზით დადგენილ უზრუნველყოფას.



ნახ. 1.19. ფოთის პორტთან ტალღის სიმაღლეთა მრუდები გამოთვლილი (HISWA) და გაზომილი (ALKIYON) მოდელებით

ცხრილ 1.12-ში წარმოდგენილია 1993-1998 წლებში გაზომილი წყლის დონეების საშუალო თვიური და აგრეთვე მაღალი და დაბალი მნიშვნელობები (მონაცემების წყაროა ფოთის მეტეოროლოგიური სადგური). ამ პერიოდის მონაცემები გვიჩვენებს, რომ წყლის ყველაზე მაღალი დონე პორტში დაფიქსირდა 1998 წლის თებერვალში და შეადგენდა +1,3 მ-ს. ამ დროს დაიტბორა პორტის ნაწილი. როგორც ვხედავთ, წყლის ყველაზე მაღალი დაფიქსირებული დონეა +1,3 მ, ხოლო მინიმალური – -0,3 მ. საშუალოდ მაღალი დონე შეადგენს დაახლოებით +0,5 მ-ს; დაბალი – +0,2 მ-ს;

სანაპირო დინებები იცვლება ქარისა და მდინარეთა ზღვაში შენაკადი ჭავლების მიმართულებისა და სიჩქარის ცვლილებების შესაბამისად. პორტის გარე აკვატორიაში შემომზღუდავი მოლოს დასავლეთით სანაპირო დინებები მიმართულია სამხრეთიდან დასავლეთისკენ მაშინ, როცა კუნძულ ნაბადასა და პორტის შესასვლელს შორის დინება მიმართულია ჩრდილოეთიდან სამხრეთისკენ, რაც განპირობებულია რიონის სამხრეთი ტოტის ნაკადით. პორტის გარე და შიგა აკვატორიებში დინებების საშუალო სიჩქარე მერყეობს 10-25 სმ/წმ დიაპაზონში, რაც არ შეიძლება ჩაითვალოს ძლიერ დინებად (წინააღმდეგ შემთხვევაში, იგი აუცილებლად შეუშლიდა ხელს ნავიგაციას და განაპირობებდა ფსკერის წარეცხვებს პორტის სამხრეთი მოლოს ძირში).

ცხრილი 1.12. ზღვის დონეები ფოთის სანაპირო რეგიონში (1993-1998 წწ.)

	საშუალო მნიშვნელობა(მ)		აბსოლუტური მნიშვნელობა(მ)	
	მაღალი დონე	დაბალი დონე	მაღალი დონე	დაბალი დონე
იანვარი	0,55	0,22	0,89	0,17
თებერვალი	0,61	0,19	1,29	0,08
მარტი	0,47	0,15	0,73	0,01
აპრილი	0,40	0,17	0,59	0,08
მაისი	0,42	0,18	0,55	0,03
ივნისი	0,44	0,21	0,54	0,11
ივლისი	0,48	0,17	0,61	0,12
აგვისტო	0,42	0,18	0,64	0,06
სექტემბერი	0,44	0,15	0,57	0,07
ოქტომბერი	0,47	0,16	0,74	0,11
ნოემბერი	0,36	0,13	0,64	0,07
დეკემბერი	0,38	0,15	0,54	0,17
საშ.წლიური	0,45	0,18	-	-

1.3. მდინარე ჭოროხის ჰიდროლოგიური დახასიათება წყალშემკრებ აუზში ჰესების კასკადის მშენებლობის გათვალისწინებით

მდინარე ჭოროხი სათავეს იღებს თურქეთში, ოკუს-ბადაცაგის მთებში, ზღვის დონიდან 2700 მ სიმაღლეზე და ჩაედინება შავ ზღვაში, ბათუმიდან სამხრეთით 6 კმ-ის დაშორებით. მდინარის საერთო სიგრძეა 438 კმ (საქართველოს ფარგლებში – 26 კმ). შესართავთან მდინარე იტოტება და ქმნის კუნძულებს (ნახ.1.20).



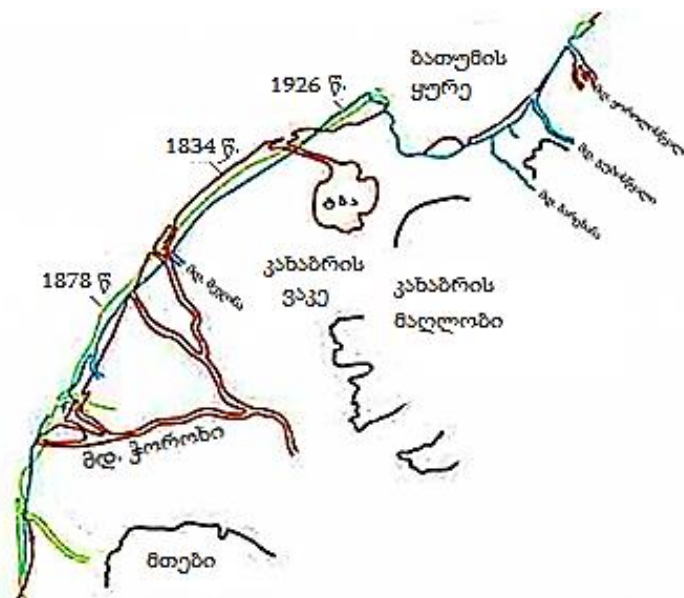
ნახ. 1.20. მდ. ჭოროხის შესართავი უბანი

საქართველოს შავი ზღვის აუზის მდინარეებს მდ. ჭოროხს გააჩნია ყველაზე დიდი წყალშემკრები აუზი, ფართობით – 22100 კმ² (საქართველოს ტერიტორიაზე – 2090 კმ²). მდინარის აუზი გამოირჩევა აგრეთვე დახრილობით საშუალოდ 30‰. საქართველოს ტერიტორიაზე მდინარის ვარდნა შეადგენს 56 მ-ს. კალაპოტის სიგანე იცვლება 48 მ-დან 900 მ-მდე (შესართავთან); სიღრმე – 1,5-დან 5 მ-მდე; ნაკადის საშუალო სიჩქარე – 0,7-2,5 მ/წმ ფარგლებში.

აჭარის სანაპირო ზონა და, მათ შორის კახაბრის ვაკე, ძირითადად აგებულია მდ. ჭოროხის ალუვიონით. ბუნებრივ პირობებში, ზღვაში მოხვედრილი ჭოროხის მყარი ნატანი ემსახურებოდა პლაჟწარმომქმნელ პროცესებს. გაბატონებული დასავლეთის მიმართულების შტორმების ზემოქმედებით, ჭოროხის ნატანი გადაადგილდებოდა ბათუმის სანაპირო ზოლის გასწვრივ ჩრდილოეთისკენ და აღწევდა მდ. ნატანების შესართავამდე.

1832 წლის კარტოგრაფიული მასალების მიხედვით, მდინარე ჭოროხი ზღვაში ორი ძირითადი ტოტით ჩაედინებოდა, სამხრეთით – თანამედროვე შესართავის სიახლოვეს და ჩრდილოეთით – ადლიაში, მდინარე მეჯინის შესართავთან. ორივე ტოტი ქმნიდა ფართო დელტებს განშტოებებით, რაც იმდროინდელი ჭოროხის წყალუხვობასა და აქტიურ ჰიდროლოგიურ რეჟიმზე მეტყველებს. 1890 წლის რუკაზე ჩრდილოეთი ტოტი გაუქმებულია – ამ დროისთვის ჩრდილოეთ ტოტს უკვე დაკარგული აქვს კავშირი მდინარე ჭოროხის ძირითად სისტემასთან და მისი ადგილი უჭირავს მდინარე მეჯინისწყლის შესართავს [15, 31, 32, 33].

ბოლო 150 წლის განმავლობაში მდ. მეჯინის ზღვისკენ წაწეულმა ნაპირმა უკან დაიხია დაახლოებით 400 მ-ით, წარეცხვის ტემპმა 1880-1926 წლებში შეადგინა საშუალოდ 5,2 მ/წელ, 1926-1980 წლებში კი შემცირდა 2,2 მ/წლამდე.



ნახ. 1.21. კახაბრის ვაკის განვითარების ეტაპები (დ. დ. სვიშვესკი 1939წ.)[117]

მდ. ჭოროხის ხარჯის კონცენტრირებამ სამხრეთი ტოტის შესართავში, მნიშვნელოვნად შეცვალა ზღვის სანაპირო ზოლის თანამედროვე ლითოლინამიკა. შესართავ უბანთან გაჩნდა ღრმა კანიონები და წარმოიქმნა წყალქვეშა ალუვიური მარაო, რომელიც ზღვაში 30კმ-მდეა შეჭრილი.

მდინარე ჭოროხზე, აჭარისწყლის შესართავთან ახლოს, სოფელ ერგესთან 1992 წლამდე ფუნქციონირებდა ჰიდროლოგიური საგუმავო. ამ საგუმავოსთან მდინარის დონის მაქსიმალური მერყეობა შეადგენდა 6,9 მ-ს. ხოლო საშუალო წლიური ხარჯი იცვლებოდა 159-409 მ³/წმ ფარგლებში. იმ დროს, როდესაც პროფ. რ. დიაკონიძის მონაცემებით (ცხრ.1.13) 1%-იანი უზრუნველყოფის ხარჯი აღწევს 4210მ³/წმ [14].

ცხრილი 1.13. მდ.ჭოროხის მაქსიმალური ხარჯები სოფ. ერგესთან

უზრუნველყოფის %	1	2	5	10	25
მაქსიმალური ხარჯები, მ ³ /წმ	4210	3750	3070	2560	1888

სანაპირო ზოლის დინამიკურობა ტალღის რეჟიმზეა დამოკიდებული. მკვებავი მდინარეების მიერ მოტანილი დანალექები სანაპირო ზოლზე მოძრაობს ტალღის ძალისა და მიმართულების შესაბამისად. აჭარის ტერიტორიაზე დინების სიჩქარე საშუალოდ 0,3-0,5 მ/წმ-ს უდრის, ხოლო ძლიერი ქარის დროს 1 მ/წმ-ს აღწევს. ტალღის მიმართულებებიდან დასავლეთის ტალღები შეადგენს 57%-ს, ჩრდილო-დასავლეთის – 18%-ს, სამხრეთ-დასავლეთის – 15%-ს.

ცხრილი 1.14. ტალღების მახასიათებელი პარამეტრები აჭარის სანაპირო ზოლში

შტორმის სიმძლავრე (ბალი)	ტალღის საშუალო პარამეტრები			ტალღის განმეორებადობა მიმართულების მიხედვით, დღე-ღამე/წელ					
	სიმაღლე \bar{h} , მ	პერიოდი $\bar{\tau}$, წმ	სიგრძე $\bar{\lambda}$, მ	სდ	დ	ჩდ	ჩ	ჩა	შტილი
0	–	–	–	–	–	–	–	–	91
1	0,06	1,4	3,0	5,1	23,8	16,7	17,2	3,7	–
2	0,23	1,8	5,0	8,5	50,0	27,0	18,0	5,6	–
3	0,46	2,6	10,8	6,35	32,4	11,2	6,95	1,28	–
4	0,74	4,0	25,5	2,42	16,6	4,8	1,78	0,15	–
5	1,25	5,6	50,0	1,3	9,6	1,27	0,73	0,11	–
6	2,15	6,8	75,0	0,22	1,9	0,22	0,36	–	–
7	3,3	8,5	115,0	0,07	0,4	0,07	–	–	–
8	4,45	9,8	155,0	0,04	0,04	0,04	–	–	–

ზღვის შტორმული აქტივობის სტატისტიკური რიგის ანალიზიდან ჩანს, რომ 1961-2007 წლების პერიოდში შტორმული დღეების წლიურ გადანაწილებაში კანონზომიერება არ შეიმჩნევა. თუმცა შეიმჩნევა ძლიერი შტორმების (5 ბალი და მეტი) სიხშირის მატება.

1997-2007 წლებში ასევე მკვეთრად იზრდება ძლიერი შტორმების წილი მათ საერთო რაოდენობაში (ცხრილი 1.15).

ცხრილი 1.15. ძლიერი შტორმების განაწილება წლების მიხედვით

წლები	შტორმების სიმძლავრე და რაოდენობა			
	4 ბალი	5 ბალი	6 ბალი	7 ბალი
1961-1971	326	77	6	–
1978-1988	713	112	2	–
1997-2007	254	210	25	6
2007 - 2009	22	8	1	–

2007-2009 წ.წ. გონიო-ბათუმის სანაპირო ზოლის მატებამ შეადგინა დაახლოებით 5 ჰა. ნაპირის ხაზის ცვალებადობა არაერთგვაროვანია სხვადასხვა უბანზე. მიუხედავად პლაჟის ფართობის ჯამური მატებისა, წყალქვეშა ფერდის გასწვრივ (ადლია-ბათუმი) დაფიქსირდა ზღვის გაღრმავების საგანგაშო პროცესი 5-10 მ სიღრმემდე, რაც შეიძლება როგორც სანაპირო ნატანის დეფიციტით, ასევე წყალზედა პლაჟის მასალის საშუალო დიამეტრის შემცირებით იყოს გამოწვეული.

ცხრილი 1.16. პლაჟების ფართობების ცვლილება 1980 წელთან შედარებით (ჰა)

წელი	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1993	1996	1998	2001
ბათუმი	3,4	2,6	4,9	5,8	7,2	8	8,9	8,2	12,2	15,1	14,7	11,2
ადლია	0,4	0,3	0,8	-0,8	-1,9	-3,3	-3,3	-4,7	-7,2	-8,6	-10	-12,4
ჯამი	3,8	2,9	5,7	5,0	5,2	4,7	5,6	3,5	5,0	6,5	4,7	-0,8

70-იან წლებში, მდ. ჭოროხის შესართავის მარცხენა განტოტების გასწვრივ წყალდიდობის პერიოდში სავარგულების დატბორვისგან დასაცავად, მოეწყო ნაყარი დამბა, რამაც შესართავი დააფიქსირა წყალქვეშა კანიონის სათავეებთან. ამავე პერიოდიდან მდ. ჭოროხის კალაპოტში ფუნქციონირება დაიწყო ინერტული მასალების ქარხანამ, რომლის წარმადობა შეადგენდა დაახლოებით 0,5 მლნ მ³/წელ (ძირითადად მოიპოვებოდა პლაჟშემქმნელი მსხვილფრაქციული მასალა). შედეგად ადლია-ბათუმის სანაპიროზე, ჩამოყალიბდა ნაპირშემქმნელი ნატანის მწვავე დეფიციტი. სულ, 1930-80 წლებში ადლია-ბათუმის სანაპირო ზოლში წაირეცხა 40 ჰა-ზე მეტი ტერიტორია [15, 31].

1978 წლის მონაცემებით საქართველოს ტერიტორიიდან მდინარეების მიერ შავ ზღვაში წელიწადში საშუალოდ შეტანილი 30 მლნ მ³ მყარი ნატანიდან მარტო ჭოროხის წილად მოდიოდა 17 მლნ მ³, რაც შეადგენს მთლიანი ნატანის 57%-ს [14].

1982-1990 წლებში სანაპირო ზოლის წარეცხილ უბნებზე, ნატანის დეფიციტის შევსების მიზნით, სსგ „საქზღვანაპირდაცვის“ პროექტით ჭოროხის შესართავიდან

ამოიღეს დიდძალი მსხვილფრაქციული მასალა – 6,3 მლნ მ³ ნატანი, (რომლის შევსება ხდებოდა წყალდიდობისა და წყალმოვარდნის პერიოდში). აქედან ადლიის ნაპირზე დაიყარა დაახლოებით 1,3 მლნ მ³. ეს მასალა წინა წლებში იკარგებოდა წყალქვეშა კანიონში, იწვევდა კანიონის ფერდების ეროზიას და, შესაბამისად, მის გააქტიურებას. როგორც მოსალოდნელი იყო, ადლიასთან დაყრილი პლაჟმექმნელი მასალა, გაბატონებული მიმართულების შტორმების ზეგავლენით, გადაადგილდებოდა ბათუმისკენ, სადაც ქმნიდა სრული პროფილის პლაჟებს.

ზღვის სანაპირო ზოლის წარეცხვის სიგანემ მდ. ჭოროხის შესართავის მარცხენა შესართავი ნაპირის გასწვრივ 1984-დან 2007 წლამდე შეადგინა 180-185 მ. 2007-2011 წლებში კი ჩატარებული ნაპირსამაგრი სამუშაოების შედეგად პლაჟის სიგანემ მოიმატა დაახლოებით 50-55 მ-მდე.

განსაკუთრებით გაიზარდა ზღვის ნაპირის წარეცხვის მასშტაბები შესართავის მარჯვენა ნაპირზე 1984-2001 წლებში წაირეცხა 120 მ სიგანის პლაჟი, 2001-2007 წლებში – 125 მ სიგანის, საშუალოდ წელიწადში 10-11მ სიგანის პლაჟი.

2009-2012 წლებში ადლიის სანაპიროზე მდ. ჭოროხის კალაპოტიდან შეიტანეს 100 ათასი მ³ ინერტული მასალა, რის შედეგად, პლაჟი აღდგა ადლიის ნაპირისთვის ოპტიმალურ პარამეტრებში და მიაღწია 30-დან 50 მ-მდე სიგანეს. უფრო ჩრდილოეთით, ბათუმისკენ, პლაჟების მატების ტემპი კლებულობს: ამ პერიოდში პლაჟების ზრდამ წელიწადში საშუალოდ 2-7 მ შეადგინა [18,32].

2012 წლიდან დღემდე ადლიის მონაკვეთზე აღარ ჩატარებულა ნაპირდაცვითი სამუშაოები. ბათუმის ბულვართან კვლავ შეიქმნა კატასტროფული ვითარება და გამოირეცხვება და ნგრევებს დაექვემდებარა ბულვარის დიდი ნაწილი (ნახ. 1.22).



ნახ. 1.22. დანგრეული პრომენადა ადლიასთან (2016წ.)

ჭოროხის შესართავის სამხრეთით, კურორტ გონიოს სანაპირო ზონა ხასიათდება მკვეთრად გამოხატული ზვინულებიანი პლაჟით, რომლის სიგანე მერყეობს 75-100 მ-ის ფარგლებში. პლაჟს პასიურ ნაწილში გასდევს წყალშემკრები არხი, რომელიც ზღვაში ჩაედინება ფილტრაციული რეჟიმით. მისი ზღვიური შესართავი ჩაკეტილია ნაპირგასწვრივი ზვინულით. ამ უბანზე პლაჟის მასალის საშუალო დიამეტრი შეადგენს 32 მმ-ს.

გონიოს სანაპირო ხაზის დინამიკა ხასიათდება არაერთგვაროვნებით. მის სხვადასხვა უბანზე, კერძოდ, თუ მდ. ჭოროხის შესართავის სიახლოვეს 1984-2001 წლებში გარეცხვის სიგანემ დაახლოებით 60 მ, ხოლო 2001-2007-ში 33-35 მ შეადგინა, 2007-2011 წლებში გონიოს სამხრეთ და ცენტრალურ ნაწილში პლაჟის სიგანემ მოიმატა 4-10 მ-ით. აქ პლაჟების მდგომარეობა ჯერჯერობით საგანგაშო არ არის, თუმცა სხვადასხვა პერიოდის მასალის შედარებამ გვიჩვენა, რომ ამ რაიონში მაინც მიმდინარეობს წარეცხვის პროცესები [31].

ამჟამად, საქართველოს ფარგლებში ჭოროხის აუზში თხევადი ხარჯი წელიწადში შეადგენს საშუალოდ 200 მ³/წმ. მასში შედის ორი შენაკადის – მდ. აჭარისწყლისა და მაჭახელას საშუალო წლიური ხარჯებიც, შესაბამისად, 52 მ³/წმ და 18 მ³/წმ. ამ შენაკადების პლაჟშემქმნელი ნატანის ჯამური მოცულობა არ აღემატება 80 ათას მ³-ს წელიწადში. თუმცა ეს ნატანიც ვერ აღწევს ზღვამდე, მდინარეს აღარ აქვს ნატანის ტრანსპორტირების უნარი. ნატანი ილექება ჭოროხის კალაპოტში და მის შესართავ უბანში წარმოქმნის კუნძულებს.

ამ პროცესებმა განაპირობა წინა წლებში მდ. ჭოროხის ზღვისკენ გაწეული დელტის მნიშვნელოვანი სახეცვლილება. ნატანის ერთმა ნაწილმა უზრუნველყო გონიოს პლაჟების დროებითი ზრდა, ხოლო მეორე, მცირე ნაწილი მონაწილეობს ადღია-ბათუმის ნაპირფორმირების პროცესში.

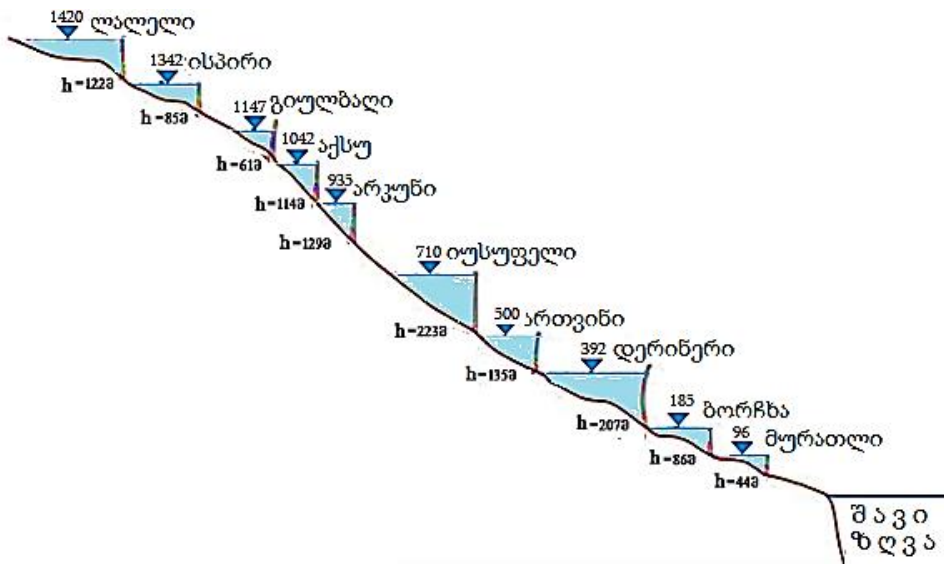
განსაკუთრებულ საფრთხეს აჭარის სანაპირო ზოლს უქმნის ჰიდროენერგეტიკული მშენებლობები მდინარე ჭოროხის აუზში, როგორც თურქეთის, ასევე საქართველოს ტერიტორიაზე.

მდ. ჭოროხის ენერგეტიკული პოტენციალის ათვისება თურქეთში დაიწყო 1998 წლიდან, დერინერის თაღოვანი კაშხლის მშენებლობით (ნახ. 1.23). მშენებლობა მიმდინარეობდა ეტაპობრივად და საბოლოოდ დასრულდა 2013 წელს. კაშხლის სიმაღლეა 249 მ .



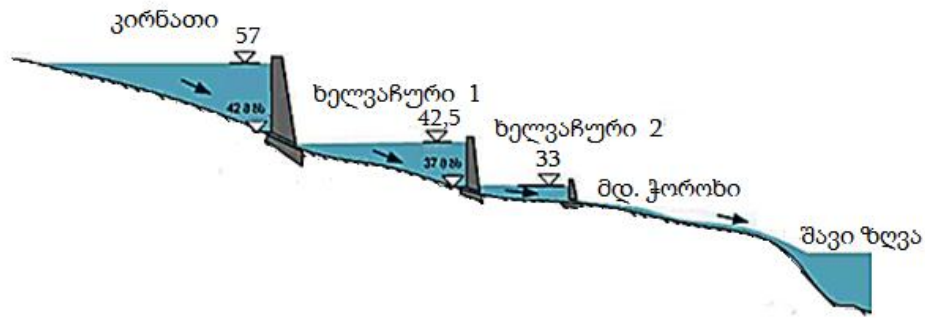
ნახ. 1.23. დერინერის თაღოვანი კაშხალი მდ.ჭოროხზე (თურქეთი)

2017 წლის მონაცემებით, სულ თურქეთის ტერიტორიის ფარგლებში, მდ. ჭოროხზე დაგეგმილია 27 კაშხლის მშენებლობა (ნახ. 1.24). მათგან, გარდა დერინერისა, ჭოროხის აუზში უკვე აშენდა და ექსპლუატაციაშია ექვსი – მურათლის, ბორჩხის, ართვინის, არკუნის, გიულბადისა და თორთუმის კაშხლები.

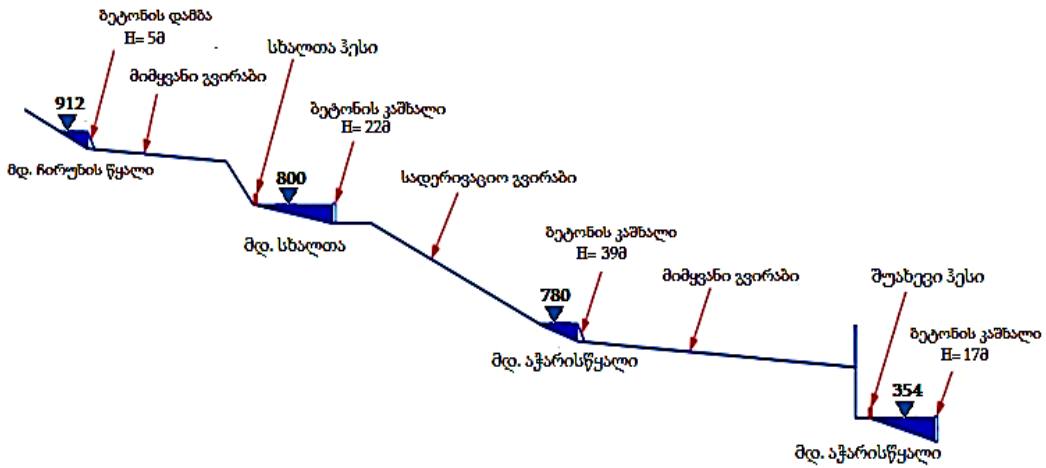


ნახ. 1.24. მდ.ჭოროხზე თურქეთის ტერიტორიაზე მოქმედი და მშენებარე კაშხლების სქემატური ჭრილი

საქართველოს ტერიტორიის ფარგლებში, მდ.ჭოროხზე შენდება კირნათი, ხელვაჩაური 1 და ხელვაჩაური 2 ჰესები (ნახ. 1.25.), ხოლო მის შენაკად მდ. აჭარისწყალზე დაგეგმილია შუახევი, კორომხეთი და ხერთვისი ჰესების მშენებლობა (ნახ.1.26).



ნახ. 1.25. მდ. ჭოროხზე საქართველოს ტერიტორიაზე მშენებარე კაშხლები [32]



ნახ. 1.26. საპროექტო ჰესები მდ. აჭარისწყალზე [184].



ნახ. 1.27. მდ. ჭოროხზე, სოფელ ერგესთან მშენებარე ჰესი (2015წ.)

ახლო მომავალში ზემოთ ჩამოთვლილი ჰესების ექსპლუატაციაში შესვლის შემდეგ, მდ. ჭოროხი პრაქტიკულად აღარ მიაწვდის პლაჟწარმომქმნელ ნატანს აჭარის სანაპიროს 300-350 წლის განმავლობაში.

თავი 2. ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლის ლითოღინამიკის რიცხვითი მოდელები*

2.1. შესართავ აკვატორიებში ტალღებისა და ნატანის მოძრაობის გაანგარიშების არსებული კომპიუტერული მოდელების მიმოხილვა და ანალიზი

1997-2001 წლებში ფოთის სანაპირო ზოლი გამოკვლევული იქნა ინგლისელი, იაპონელი და ჰოლანდიელი მეცნიერების მიერ „Hindcast“ და „HISWA“ მათემატიკური მოდელების საფუძველზე [19, 80, 167].

„Hindcast“ მოდელი ეყრდნობა ადგილობრივ და ხომალდიდან დაკვირვებების შედეგებს. კომპიუტერული მოდელირების გამოყენებით მიღებულია ნაპირთან ახლოს ქარისა და ტალღის რეჟიმები. მოდელი – „Hindcast“ იძლევა ფასეულ ინფორმაციას ტალღური რეჟიმებისა და ქარის სიჩქარეების განაწილების შესახებ, მაგრამ მიღებული შედეგები არასაიმედოა, რადგან გამოკვლევების დროს არაა გათვალისწინებული შავი ზღვის აღმოსავლეთ სანაპიროს მთიანი რელიეფი.

„HISWA“ მოდელი წარმოადგენს ორგანოზომილებიან მოდელს, რომელიც აკავშირებს ტალღურ რეჟიმებს ნაპირიდან შორს და ახლო მანძილებზე. „HISWA“-ს გამოყენების არეალი ვრცელდება ფართობზე 10×5კმ – 30×100კმ და ითვალისწინებს ტალღების რეფრაქციას, განპირობებულს ფსკერის ტოპოგრაფიით. ამოხსნისას აღებული იყო სისტემის პარამეტრების შემდეგი მნიშვნელობები:

1. ტალღების მიმართულებები – 195°ჩრდ; 225°ჩრდ; 255°ჩრდ; 285°ჩრდ; 315°ჩრდ; 345°ჩრდ; 375°ჩრდ.

2. ტალღების სიმაღლეები – 0,05მ; 1მ; 2მ; 3მ; 4მ; 5მ; 6,5მ.

„HISWA“-ს გამოთვლები გვიჩვენებს, რომ ტალღა მაქსიმალურ სიმაღლეს აღწევს წყლის 6,5 მეტრ სიღრმეზე და გააჩნია 0,04 დახრილობა. ამოხსნებიდან გამომდინარე, შეიძლება შემდეგი დასკვნების გაკეთება:

ა) სამხრეთის მიმართულების ტალღები ფოთის სანაპირო ზოლში განიცდის ძლიერ რეფრაქციას და მათი სიმაღლე მკვეთრად მცირდება, მაგრამ ნაპირთან მიახლოებისას ტალღის სიმაღლე ისევ იზრდება.

ბ) წყალქვეშა კანიონის ზემოთ ტალღების სიმაღლეები მცირდება.

გ) იმ ტალღების სიმაღლე, რომლებიც მოძრაობს, სანაპირო ხაზის მართობულად, რჩება დიდი და კანიონის თავზე განიცდის ძლიერ რეფრაქციას.

* თავი 2-ის ავტორია ი. სალინაძე.

დ) ჩრდილო-დასავლეთის მიმართულების ტალღები განიცდის ძლიერ რეფრაქციას, მაგრამ 4,5 მ სიმაღლის ტალღები სანაპირო ზონას მაინც აღწევს. სიმაღლის დანაკარგი გამოწვეულია ენერჯის დანაკარგით ტალღის დამსხვრევისას და ფსკერული ხახუნის გავლენით.

შავი ზღვის ფოთის რეგიონის სანაპირო ზოლში ნატანის მოძრაობის გამოსაკვლევად უცხოელი მეცნიერების მიერ (ჰოლანდიელები და იაპონელები) შემუშავდა 2 მოდელი: 1) მოდელი – „UNIBEST“ ; 2) მოდელი – „SOBEK- River“.

1. მოდელი – „UNIBEST“ შედგება სამი ქვემოდელისაგან:

ა) ერთგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელი – „UNIBEST-TC“ [19] განსაზღვრავს ზღვის სანაპიროს გასწვრივ განივ კვეთებში სიღრმეების ცვლილებას და სწავლობს ამ კვეთებში ნატანის მოძრაობას. მოდელი – „UNIBEST-TC“ ითვალისწინებს ზღვის ძირითადი პარამეტრების გავლენას: ფსკერის რეფრაქციით გამოწვეული ტალღური ენერჯის ცვლილებას, ფსკერული ხახუნს, ტალღების დამსხვრევას და წყლის საწინააღმდეგო მაკომპენსირებელ მოძრაობას, რომელიც წარმოადგენს ნატანის განივი მოძრაობის მექანიზმს. დამსხვრევის ზონის დინამიკა გამოკვლეულია ბატესისა და სტივის (1984) მოდელით, ტალღის გავრცელებისა და მიღების მეთოდით. ნატანის მოძრაობა გამოითვლება ბაილარდის (1981) მოდელით.

მოდელი – „UNIBEST-TC“ გამოყენებული იყო ნაბადის სამხრეთ დელტის მიდამოებში განივი პროფილების გამოსათვლელად. მოდელირებისას გამოიყენეს 1999 წელს გაზომილი პროფილები და მოდელი “HISWA”-ს მიერ მიღებული ტალღური რეჟიმები. ფსკერული მასალის ფრაქციების ზომები აღებული იქნა შემდეგი: $D_{50}=0,35\text{მმ}$; $D_{90}=0,47\text{მმ}$.

მიღებული შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ფსკერული ნატანი ძირითადად გადაადგილდება 9-10 მეტრ სიღრმემდე. ფსკერული ნატანის დანაკარგი 10 მეტრზე მეტ სიღრმეში ფაქტობრივად არ ხდება. ნატანის F მსხვილ და წვრილ ფრაქციებს შორის გამყოფი საზღვარი მდებარეობს სანაპირო ხაზიდან 750 მეტრზე და ნატანი მოძრაობს ნაპირის მიმართულებით $15-20\text{მ}^3/\text{წელ}/\text{მ}$ დონეზე [19,148].

სხვა პროფილზე ნატანის F მსხვილ და წვრილ ფრაქციებს შორის გამყოფი საზღვარი მდებარეობს სანაპირო ხაზიდან 500 მეტრზე და ნატანი მოძრაობს ნაპირის მიმართულებით $20\text{მ}^3/\text{წელ}/\text{მ}$ დონეზე.

ბ) მოდელი „UNIBEST-LT“ იკვლევს ნაპირგასწვრივ დინებებს და ნატანის მოძრაობას ტალღური ენერჯის ცვლილების გათვალისწინებით, რომელიც გამოწვეულია ფსკერული ხახუნით და ტალღების დამსხვრევით. დამსხვრევის ზონის დინამიკა გაანგარიშებულია ბატესისა და სტივის (1984) მოდელით.

შედეგები მიღებულია მოდელ „UNIBEST-LT“-ით, გამოკვლეულია ნატანის გადაადგილების გრადიენტის გავლენა ზღვის სანაპირო ხაზის ცვლილებაზე. სისტემის შემდგომი მდგომარეობის პროგნოზირების მიზნით, მოდელირდება სხვადასხვა ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობის გავლენა სანაპირო პროცესებზე. ზღვის სანაპირო ზონის ცვლილება გამოთვლილია პელნარდ-კონსიდერის (1956) ერთგანზომილებიანი წრფივი თეორიის მიხედვით. კომპიუტერული მოდელირების შედეგად, მიღებულია ფოთის რეგიონში ნატანის ტრანსპორტირების რაოდენობრივი ანალიზი. მიღებული შედეგებიდან შეიძლება გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

ა) ნატანის ხარჯი სამხრეთ არხში შეადგენს 200 000 მ³/წელ;

ბ) სამხრეთ არხიდან ჩრდილოეთის მიმართულებით კუნძულის უბანში ხდება 40 000 მ³/წელ ტრანსპორტირება, ხოლო 10 000 მ³/წელ ირეცხება. 50 000მ³/წელ იკარგება წყალქვეშა კანიონში;

გ) დანარჩენი ნატანი - 150 000 მ³/წელ გადაადგილდება რიონის სამხრეთ არხიდან სამხრეთის მიმართულებით. აქ ნატანის ნაპირგასწვრივი მოძრაობის სრული მოცულობა შეადგენს 340 000 მ³/წელ, დეფიციტი შეადგენს 190 000მ³/წელ, რომელიც იწვევს ნაპირის გარეცხვას.

2. მოდელი „SOBEK-River“ წარმოადგენს მდინარე რიონის დინების ერთგანზომილებიან მოდელს. მდინარე რიონის მოდელირების მიზანს წარმოადგენს პლაჟის შემქმნელი ნატანის მოცულობის განსაზღვრა მის სამხრეთ და ჩრდილოეთ არხებში. მოდელირების შედეგად მიღებულია შემდეგი შედეგები:

ა) მდინარე რიონის სამხრეთი არხი:

1. წყალდიდობის დროს, როცა წყლის ხარჯი $Q > 400 \text{მ}^3/\text{წმ}$, პლაჟის შემქმნელი ნატანი ($d=0.2\text{მ}$) შეადგენს ნატანის მთლიანი მოცულობის 15%-ს;

2. იმ შემთხვევაში, როცა წყლის ხარჯი $Q < 400 \text{მ}^3/\text{წმ}$, პლაჟის შემქმნელი ნატანი შეადგენს ნატანის მთლიანი მოცულობის მხოლოდ 5%-ს;

3. ფსკერული ნატანი შეადგენს მთლიანი ნატანის მოცულობის 10%-ს;

4. ფსკერული ნატანის 50% არის პლაჟის შემქმნელი;

5. პლაჟის შემქმნელი ნატანის რაოდენობა შეადგენს 200 000მ³/წელ;

ბ) მდინარე რიონის ჩრდილოეთი არხი:

1. წყალდიდობის დროს, როცა წყლის ხარჯი $Q > 400 \text{მ}^3/\text{წმ}$, პლაჟის შემქმნელი ნატანი ($d=0.2\text{მ}$) შეადგენს ნატანის მთლიანი მოცულობის 35%-ს;

2. იმ შემთხვევაში, როცა წყლის ხარჯი $Q < 400 \text{მ}^3/\text{წმ}$, პლაჟის შემქმნელი ნატანი შეადგენს ნატანის მთლიანი მოცულობის მხოლოდ 10%-ს;

3. ფსკერული ნატანი შეადგენს მთლიანი ნატანის მოცულობის 10%-ს;

4. ფსკერული ნატანის 70% არის პლაჟის შემქმნელი;

5. პლაჟის შემქმნელი ნატანის რაოდენობა შეადგენს 640 000მ³/წელ;

გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ ზღვის წყლის აწევა დიდ გავლენას ახდენს სანაპირო პროცესებზე [19]. მიღებულია, რომ წყლის დონის აწევა იწვევს ეროზიული პროცესების გააქტიურებას, ამ დროს მიმდინარეობს ნატანის ზღვის სიღრმეში ინტესიური გადაადგილება. ეროზიის სიდიდე განსაზღვრულია ბრუნის (1983) წესით.

ზემოთ აღწერილი მოდელებისა და დაკვირვებების ანალიზის საფუძველზე იმავე ნაშრომში [19] შემოთავაზებულია ნაპირდაცვითი ღონისძიებების სხვადასხვა ვარიანტი (სცენარი), რომელიც გათვლილია 25 წელზე:

1. უმოქმედობა. ამ სცენარის მიხედვით არ იგეგმება რაიმე ღონისძიება ნაპირის დასაცავად და სანაპირო ზოლის განვითარება ხდება ბუნებრივ პირობებში. ამ შემთხვევაში სამხრეთის არხის მიდამოებში 25 წლის განმავლობაში ეროზიის დონე შეადგენს 200 მეტრს. მდინარე რიონის ჩრდილოეთის არხის შესართავთან მოხდება ნატანის აკუმულაცია, დელტა გაიზრდება 150 მეტრით.

2. ნაპირის დაცვის „რბილ“ კატეგორიას განეკუთვნება სცენარი, რომელიც გულისხმობს სანაპირო ზოლის ეროზიის შეჩერებას მდ. რიონის ნატანის მიზანდასახულად განაწილების მეშვეობით. წინა წლების გამოცდილება გვიჩვენებს, რომ ეს ვარიანტი უფრო საიმედო და ეფექტურია.

3. დაცვის „მყარი“ სცენარი გულისხმობს სანაპირო ზოლის სტაბილიზაციის მიღწევას „მყარი“ სტრუქტურების (ბუნები, ბერმი) მშენებლობის გზით.

ნაპირის ეროზიისაგან დაცვის რბილი სცენარების ვარიანტები განსხვავდება ერთმანეთისაგან პლაჟშემქმნელი მასალის მოპოვების ადგილითა და მეთოდებით, ტრანსპორტირების ხერხებით. განვიხილოთ ნაპირის დაცვის რბილი სცენარის სამი ვარიანტი:

ა) **რიონის ჩრდილოეთ დელტის მასალის გამოყენება.** პლაჟშემქმნელი მასალა მოიპოვება მიწისმწოვის საშუალებით და მისი ტრანსპორტირება სანაპირო ზოლში ხდება თვითმცლელი ბარჟის მეშვეობით. ამ შემთხვევაში ხელოვნური პლაჟის 1 მ³ მასალის ღირებულება შეადგენს 5 აშშ დოლარს. სულ 25 წელიწადში ამ სამუშაოების ღირებულება შეადგენს 76,7 მილიონ დოლარს.

ბ) **რიონის მასალის გამოყენება.** პლაჟშემქმნელი მასალა მოიპოვება წყალგამყოფი კვანძის ზემოთ, მდინარე რიონის აღმა მიწისმწოვის საშუალებით. მისი ტრანსპორტირება ხდება მილსადენით. ამ შემთხვევაში ხელოვნური პლაჟის 1მ³ მასალის ღირებულება შეადგენს 7,5 აშშ დოლარს. ეს სცენარი მთლიანად შეესაბამება ადრე (1990წ.) ფოთში გამოყენებულ ნაპირის დაცვის მეთოდს. 25 წელიწადში ამ სამუშაოების ღირებულება შეადგენს 107 მილიონ დოლარს.

გ) ქალაქის არხის გამტარუნარიანობის გაზრდა. ამ შემთხვევაში იგულისხმება წყალდიდობის დროს წყლის ხარჯების რეგულირებით მდინარის მიერ ეროზიის ზონაში შემოტანილი პლაჟმემქმნელი ნატანის რაოდენობის გაზრდა. სამხრეთ არხში წყლის ხარჯების გაზრდა გამოიწვევს პლაჟმემქმნელი ნატანის რაოდენობის გაზრდას 140000მ³/წლ-დან 250000მ³/წლ-მდე. მეორე მხრივ, არხში წყლის ხარჯების გაზრდა გამოიწვევს ქალაქში გრუნტის წყლების დონის აწევას და შესაბამისად მის დატბორვას. ამიტომ ამ სცენარის განხორციელებისთვის საჭიროა დამატებითი ღონისძიებების გატარება დატბორვის თავიდან ასაცილებლად. აღნიშნული სცენარით ძირითადი ფინანსური სახსრები იხარჯება ქალაქის არხის გაწმენდასა და მისი ნაპირების გამაგრებაზე. 25 წელიწადში ამ ვარიანტის ღირებულება შეადგენს 40 მილიონ აშშ დოლარს.

ჰოლანდიელი და ქართველი მეცნიერების გაანგარიშებებით ამ სცენარების რეალიზაციის ღირებულება 25 წლის განმავლობაში ასეთი იქნება:

ფოტის სანაპიროს დაცვის სცენარები	ღირებულება მლნ. აშშ დოლარებში
ა)რიონის ჩრდილოეთ დელტის მასალის გამოყენება	76,7
ბ) მდინარე რიონის მასალის გამოყენება	107,0
გ) ქალაქის არხის გამტარუნარიანობის გაზრდა	40,0

საინტერესოა ამ სცენარების შეფასება „მოქნილობაზე“ (რამდენად რეაგირებს ისინი გარეპირობების შეცვლაზე – მდინარის ხარჯის ცვლილება, ზღვის დონის აწევა და სხვა), „საიმედოობაზე“ (გათვლილი და რეალური ეფექტურობის შედარება), „რისკზე“ (პრაქტიკულად შეუძლებელია ზუსტად განისაზღვროს ამა თუ იმ ნაპირდაცვითი ღონისძიების შედეგები, მაგალითად, მდინარის ხარჯების გაზრდამ შეიძლება გამოიწვიოს წყალქვეშა კანიონის გააქტიურება):

ფოტის სანაპიროს დაცვის სცენარები	მოქნილობა	საიმედოობა	რისკი
ა)რიონის ჩრდილოეთ დელტის მასალის გამოყენება	++	+	-
ბ) მდინარე რიონის მასალის გამოყენება	++	+	-
გ) ქალაქის არხის გამტარუნარიანობის გადიდება	0	-	--

„++“ – ძალიან კარგი, „+“ – კარგი, „0“ – ნეიტრალური შეფასება,
 „-“ – ცუდი, „--“ – ძალიან ცუდი.

2.2. ზღვის სანაპირო არეებსა და შესართავ აკვატორიებში ტალღებისა და ნატანის გავრცელების მათემატიკური მოდელირება

ფოთის რეგიონის სანაპირო ზოლის ლითოდინამიკის მათემატიკური მოდელის შექმნას მრავალი თეორიული და ექსპერიმენტული ხასიათის სამეცნიერო ნაშრომი მიეძღვნა. სანაპირო ზოლის დინამიკის ამოცანის სირთულე უდავოა, ამიტომ ადეკვატური მათემატიკური მოდელების შექმნა მოითხოვს მიმდინარე ფიზიკური პროცესების ღრმა ანალიზს, სანაპიროს ევოლუციურ სურათზე შიგა და გარე ბუნებრივი ფაქტორების გავლენის ცოდნას. ამ ეტაპზე პრაქტიკული მნიშვნელობის მქონე უნივერსალური მათემატიკური მოდელების შექმნა შეუძლებელია. ამიტომ მათემატიკურ მოდელირებას აწარმოებენ, იმ ფაქტორების იგნორირების ხარჯზე, რომლებიც მცირე გავლენას ახდენს გამოსაკვლევი სანაპირო უბნის პროცესებზე. მაგალითად, ფოთის რეგიონის სანაპირო ზოლში ნატანის მოძრაობაზე დაკვირვების შედეგად მიღებული მონაცემები გვიჩვენებს, რომ ნატანის რეგულარული მოძრაობის ზონის სიღრმე 4 მ-მდეა, ნაკლებ აქტიური მოძრაობის ზონა – 10 მ-მდე, ხოლო შედარებით სტაბილური ზონა უფრო ღრმად მდებარეობს. ამის გამო შემოვიფარგლეთ ნატანის მოძრაობის მათემატიკური მოდელირებისას საკმაოდ ვიწრო სანაპირო ზოლის (იზობატი 12-15 მ-მდე) განხილვით.

ქვემოთ წარმოდგენილია პროფესორ ივანე სალინაძის მიერ შედგენილი ფოთის რეგიონის შავი ზღვის სანაპირო ზოლის ლითოდინამიკის მათემატიკური მოდელი და გამოთვლითი ექსპერიმენტების შედეგები. მოდელის მიზანია, წინასწარ შესწავლილი სანაპირო დინებებისა და ტალღური მოძრაობების საფუძველზე, ფოთის რეგიონის სანაპირო ზოლის დეფორმაციის შესწავლა. პირველ ეტაპზე მოცემულია ნაპირის ტოპოგრაფია და სტრუქტურის გეომეტრია, როგორც საწყისი პარამეტრები. შემდგომში მოცემული ტალღური რეჟიმისთვის გამოითვლება სანაპირო ტალღური ველი. გამოთვლილი ტალღური ველი გამოიყენება რადიაციული ძაბვისა და ფსკერული ორბიტული სიჩქარეების სივრცითი განაწილების შესაფასებლად. სანაპირო დინებები გამოითვლება ტალღური ველის გამოთვლის შემდეგ. სანაპიროს ტალღური მოძრაობებისა და დინებების ველები გამოიყენება ნატანის მოძრაობის სიჩქარისა და ნაპირის ტოპოგრაფიის ცვლილების ქვემოდელში.

2.2.1. სანაპირო ტალღური რეჟიმები

როგორც პრაქტიკაშია მიღებული გამოთვლების დროს ჩვენ შემოვიფარგლებით სანაპირო ზოლში ტალღების გავრცელების წრფივი მოდელებით. ასეთი მოდელის ფარგლებში სანაპირო ზოლისთვის განვიხილოთ წრფივი ორგანოზომილებიანი ტალღების განტოლებები [50, 154]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{c^2}{n} \vec{\nabla} (n\zeta) &= 0, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{Q} &= 0, \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

სადაც სითხის ნაკადის \vec{Q} ვექტორი მიიღება ჰორიზონტალური ვექტორული სიჩქარის ვერტიკალური მიმართულებით ფსკერიდან $-h(x_1, x_2)$ თავისუფალი ზედაპირის წყნარი ზღვის დონიდან ამალეობამდე $\zeta(t, x_1, x_2)$ ინტეგრირებით: $\vec{Q} = \int_{-h}^{\zeta} \vec{u} dz$; n არის ჯგუფური სიჩქარის C_g შეფარდება ფაზურ C სიჩქარესთან $\vec{\nabla} = \vec{e}_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \vec{e}_2 \frac{\partial}{\partial x_2}$ – დიფერენცირების ოპერატორი. ადგილი აქვს ცნობილ თანაფარდობას:

$$\sigma^2 = gk \cdot \tanh(kh), \quad c = \frac{\sigma}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad \text{და} \quad n = \frac{c_g}{c} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right),$$

სადაც $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ კუთხური სიხშირეა, $k = \frac{2\pi}{L}$ ტალღური რიცხვია, T, L –

შესაბამისად, ტალღის პერიოდი და სიგრძე. ჩამოყალიბებულია სასაზღვრო პირობები: Γ – საერთო საზღვრის Γ_1 ნაწილზე მოცემულია ვექტორული ფუნქცია $\vec{Q}^*(t, x, y)$, ხოლო Γ_2 -ზე – $\xi^*(t, x, y)$ ფუნქცია. (2.2.1) განტოლებათა სისტემა მიახლოებით ითვალისწინებს ტალღების რეფრაქციას, დიფრაქციას, არეკვლასა და დამსხვრევას.

შემდეგში (2.2.1) განტოლებებს გამოვიყენებთ ასეთი სახით:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + \frac{c^2}{n} \vec{\nabla} \xi &= 0 \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + n \vec{\nabla} \cdot \vec{Q} &= 0 \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

სადაც ფუნქციას $\xi(t, x_1, x_2) = n(x_1, x_2) \cdot \zeta(t, x_1, x_2)$ – ვუწოდებთ ზღვის თავისუფალი ზედაპირის დაყვანილ აწევას.

ჩამოვყალიბოთ სასაზღვრო პირობები. საერთო Γ საზღვრის Γ_1 ნაწილზე ინტეგრირების არეზე მოცემულია ვექტორული ფუნქცია, ხოლო Γ_2 -ზე ფუნქცია $\xi^*(t, x_1, x_2)$.

სასაზღვრო ამოცანა (2.2.2) სისტემისთვის შესაბამისი სასაზღვრო პირობებით ეკვივალენტურია ვარიაციული ამოცანისა:

$$\int_S \left(\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{c^2}{n} \bar{\nabla} \xi \right) \cdot \delta \bar{Q} ds = \int_{\Gamma_2} \frac{c^2}{n} (\xi - \xi^*) \bar{N} \cdot \delta \bar{Q} d\Gamma,$$

$$\int_S \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + n \bar{\nabla} \cdot \bar{Q} \right) \delta \xi dS = \int_{\Gamma_1} n (\bar{Q} - \bar{Q}^*) \cdot \bar{N} \delta \xi d\Gamma, \quad (2.2.3)$$

სადაც $\delta \bar{Q}$ და $\delta \xi$ ვარიაციებია, რომლებიც აკმაყოფილებს სასაზღვრო პირობებს წყლის ნაკადის სიჩქარისა და ზღვის ზედაპირის ამალეებისთვის, \bar{N} ინტეგრების არის საზღვრის გარე ნორმალის ერთეულოვანი ვექტორია. განტოლებების მარცხენა მხარეებში ინტეგრება ხდება მთლიან S არეზე, ხოლო მარჯვენაში – შესაბამისი საზღვრის ნაწილებზე. შემდგომში ინტეგრების არეზე იგება სასრულელებმენტებიანი აპროქსიმირების სქემა და შედეგად ვღებულობთ კოშის ამოცანას. კოშის ამოცანის რიცხვითი ამოხსნისას გამოიყენება კრანკ-ნიკოლსონის სქემა და მიიღება ალგებრულ განტოლებათა სისტემა.

(2.2.3) განტოლებების წევრები შეიძლება ვაინტეგროთ ნაწილებად გრინის პირველი ფორმულის გამოყენებით:

$$\int_S \frac{c^2}{n} \bar{\nabla} \xi \cdot \delta \bar{Q} \cdot dS = \int_{\Gamma_2} \xi \cdot \frac{c^2}{m} \cdot \delta \bar{Q} \cdot \bar{N} \cdot dS - \int_S \xi \cdot \bar{\nabla} \left(\frac{c^2}{n} \cdot \delta \bar{Q} \right) dS,$$

$$\int_S n \bar{\nabla} \cdot \bar{Q} d\xi dS = \int_{\Gamma_1} n \bar{Q} d\xi \cdot \bar{N} dS - \int_S \bar{Q} \cdot \bar{\nabla} (n \delta \xi) dS.$$

აქ მიღებულია:

$$\int_S \xi \frac{c^2}{n} \delta \bar{Q} \cdot \bar{N} dS \equiv 0, \text{ რადგან } \Gamma_1\text{-ზე მოცემულია } \bar{Q} = \bar{Q}^* \text{ და } \delta \bar{Q} = 0,$$

$$\int_{\Gamma_2} n \bar{Q} d\xi \cdot \bar{N} dS \equiv 0, \text{ რადგან } \Gamma_2\text{-ზე } \exists \text{ მოცემულია } \xi = \xi^* \text{ ი } \delta \xi = 0.$$

(2.2.3) განტოლებებიდან ვღებულობთ:

$$\int_S \left\{ \frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} \cdot \delta \bar{Q} - \xi \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{c^2}{n} \delta \bar{Q} \right) \right\} dS + \int_{\Gamma_2} \frac{c^2}{n} \xi^* \bar{N} \cdot \delta \bar{Q} d\Gamma = 0$$

$$\int_S \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \delta \xi - \bar{Q} \cdot \bar{\nabla} (n \delta \xi) \right) dS + \int_{\Gamma_1} n \bar{Q}^* \cdot \bar{N} \delta \xi d\Gamma = 0 \quad (2.2.4)$$

ინტეგრირების არე დავეყოთ სასრულ ელემენტებად $S = \cup S_e$. თითოეულ სასრულ S_e ელემენტზე ვიყენებთ შემდეგ აპროქსიმაციის ფუნქციას [79,142]:

$$Q_i(t, x_1, x_2) = Q_i^N(t) \psi(x_1, x_2), \delta Q_i(t, x_1, x_2) = \delta Q_i^N(t) \psi(x_1, x_2), \dots, \left(\frac{c^2}{n} \right) = \left(\frac{c^2}{n} \right)^N \psi(x_1, x_2),$$

$$n(x_1, x_2) = n^N \psi(x_1, x_2)$$

სადაც, $\psi_N(x_1, x_2)$ - ლოკალური ინტერპოლაციური(ბაზისური) ფუნქციაა. თუ

ჩავსვამთ ამ აპროქსიმაციებს (2.2.4) მივიღებთ შემდეგ განტოლებებს:

$$\begin{aligned}
& \int_S \left\{ \frac{\partial \bar{Q}^N}{\partial t} \psi_N \psi_K - \xi^N \psi_N \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \bar{\nabla}(\psi_M \psi_K) \right\} \cdot \delta \bar{Q}^K dS + \\
& \int_{\Gamma_2} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^{*N} \psi_N \psi_M \psi_K \bar{N} \cdot \delta \bar{Q}^K d\Gamma = 0, \\
& \int_S \left\{ \frac{\partial \xi^N}{\partial t} \psi_N \psi_K - \bar{Q}^N \psi_N n^M \cdot \bar{\nabla}(\psi_M \psi_K) \right\} \delta \xi^K dS + \\
& \int_{\Gamma_1} n^M \bar{Q}^{*N} \psi_N \psi_M \psi_K \cdot \bar{N} \delta \xi^K d\Gamma = 0.
\end{aligned}$$

ამ განტოლებებიდან კვანძების ვარიაციების $\delta \bar{Q}^N, \delta \xi^N$ ნებისმიერობის გამო, ვღებულობთ სამ სასრულ ელემენტთან სკალარულ განტოლებას:

$$\begin{aligned}
a_{NK} \frac{\partial Q_1^N}{\partial t} + b_{NMK1} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^N &= \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^{*N} p_{NMK1} \\
a_{NK} \frac{\partial Q_2^N}{\partial t} + b_{NMK2} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^N &= \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^{*N} p_{NMK2} \\
a_{NK} \frac{\partial \xi^N}{\partial t} + b_{NMK1} n^M Q_1^N + b_{NMK2} n^M Q_2^N &= n^M (Q_1^{*N} N_1 p_{NMK1} + Q_2^{*N} N_2 p_{NMK2})
\end{aligned} \tag{2.2.5}$$

სადაც მიღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$\begin{aligned}
a_{NK} &= \int_{S_e} \psi_N \psi_K dS, \\
b_{NMKi} &= - \int_{S_e} \psi_N \frac{\partial}{\partial x_i} (\psi_M \psi_K) dS, \\
p_{NMKi} &= \int_{\Gamma_{e2}} \psi_N \psi_M \psi_K N_i d\Gamma.
\end{aligned}$$

თუ დავუკავშირებთ S_e სასრულ ელემენტს საერთო არეს S [7,8], მივიღებთ მოდელის გლობალურ განტოლებებს:

$$\begin{aligned}
\sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ a_{NK} \frac{\partial Q_1^N}{\partial t} + b_{NMK1} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^N \right\} &= \sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^{*N} p_{NMK1} \right\} \\
\sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ a_{NK} \frac{\partial Q_2^N}{\partial t} + b_{NMK2} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^N \right\} &= \sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \xi^{*N} p_{NMK2} \right\} \\
\sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ a_{NK} \frac{\partial \xi^N}{\partial t} + b_{NMK1} n^M Q_1^N + b_{NMK2} n^M Q_2^N \right\} &= \\
\sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ n^M (Q_1^{*N} N_1 p_{NMK1} + Q_2^{*N} N_2 p_{NMK2}) \right\}
\end{aligned} \tag{2.2.6}$$

(2.2.6) სისტემაში $\Omega_{\Delta}^{(e)N}$ ფუნქცია ღებულობს მნიშვნელობას 1, თუ S_e ელემენტის ლოკალური კვანძი K ემთხვევა S არის გლობალურ Δ კვანძს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ღებულობს ნულოვან მნიშვნელობებს.

(2.2.6) სისტემისთვის კოშის ამოცანის ამოხსნისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ სასრული სხვაობების მეთოდი. დროის t ღერძზე Δt ბიჯით ავიღოთ წერტილების დისკრეტული სიმრავლე $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{i-1}, t_i, \dots$ და გამოვიყენოთ კრანკ-ნიკოლსონის სქემა [128]. (2.2.6) საფუძველზე მივიღებთ წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას:

$$\begin{aligned} & \sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ \frac{a_{NK}}{\Delta t} Q_{1(i)}^N + b_{NMK1} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \frac{\xi_{(i)}^N}{2} \right\} = \\ & \sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ \frac{a_{NK}}{\Delta t} Q_{1(i-1)}^N - b_{NMK1} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \frac{\xi_{(i-1)}^N}{2} + \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \frac{\xi_{(i)}^{*N} + \xi_{(i-1)}^{*N}}{2} p_{NMK1} \right\}; \\ & \sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ \frac{a_{NK}}{\Delta t} Q_{2(i)}^N + b_{NMK2} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \frac{\xi_{(i)}^N}{2} \right\} = \\ & \sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ \frac{a_{NK}}{\Delta t} Q_{2(i-1)}^N - b_{NMK2} \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \frac{\xi_{(i-1)}^N}{2} + \left(\frac{c^2}{n} \right)^M \frac{\xi_{(i)}^{*N} + \xi_{(i-1)}^{*N}}{2} p_{NMK2} \right\}; \Rightarrow \\ & \sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ \frac{a_{NK}}{\Delta t} \xi_{(i)}^N + b_{NMK1} n^M \frac{Q_{1(i)}^N}{2} + b_{NMK2} n^M \frac{Q_{2(i)}^N}{2} \right\} = \\ & \sum_{(e)} \Omega_{\Delta}^K \left\{ \frac{a_{NK}}{\Delta t} \xi_{(i-1)}^N - b_{NMK1} n^M \frac{Q_{1(i-1)}^N}{2} - b_{NMK2} n^M \frac{Q_{2(i-1)}^N}{2} + \right. \\ & \left. n^M \left(\frac{Q_{1(i)}^N + Q_{1(i-1)}^N}{2} N_1 p_{NMK1} + \frac{Q_{2(i)}^N + Q_{2(i-1)}^N}{2} N_2 p_{NMK2} \right) \right\}; \end{aligned}$$

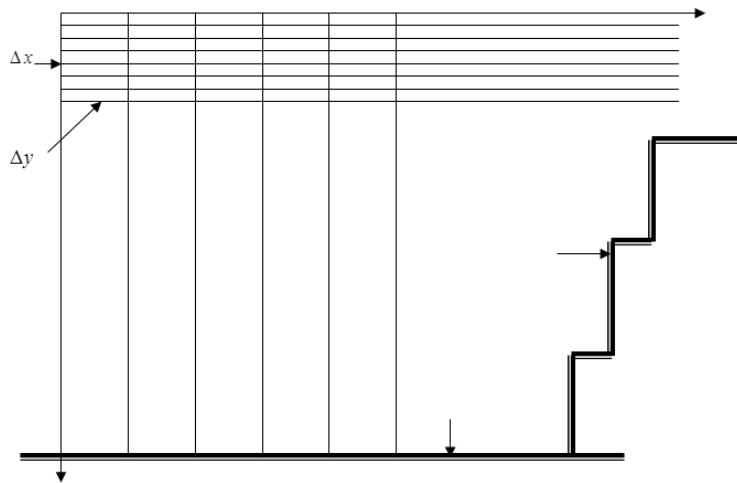
დროის t_0 მომენტისთვის კვანძური ნაკადების $Q_{1(0)}^N, Q_{2(0)}^N$ მნიშვნელობები და თავისუფალი ზედაპირის დაყვანილი აწევა $\xi_{(0)}^N$ წარმოადგენს საწყის პირობებს. დროის i -ურ ბიჯზე ტალღური ველის საპოვნელად საჭიროა მიღებული განტოლებათა სისტემის ამოხსნა $Q_{1(i)}^N, Q_{2(i)}^N, \xi_{(i)}^N$ ცვლადების მიმართ სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით.

განვიხილოთ ფოთის პორტის მომიჯნავე 700×600 მ² ფართის ზოლში სანაპირო ტალღური რეჟიმების კვლევის შედეგები (ნახ.2.1). აღნიშნულ უბანში ფსკერის პროფილი საკმაოდ რთულია. ინტეგრირების არე დაყოფილია სამკუთხოვან სასრულ ელემენტებად, დაყოფა აღებულია შემდეგნაირად: x (ნაპირის მართობული) ღერძის მიმართულებით: $\Delta x = 5$ მ, y (ნაპირის პარალელური) ღერძის მიმართულებით: Δy

=50მ, აქედან ღერძის გასწვრივ კვანძების რაოდენობაა: 141 ($i=1 \div 141$), y ღერძის გასწვრივ – 13 ($j=1 \div 13$).

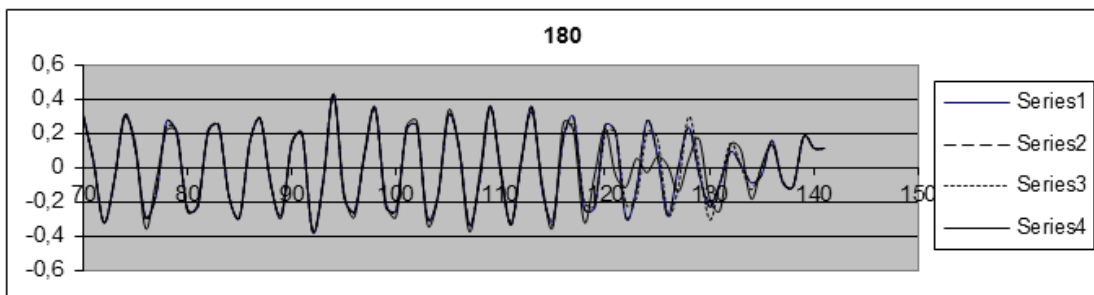
აქ ნაჩვენებია გამოთვლითი ექსპერიმენტების ზოგიერთი შედეგი. ტალღური რეჟიმი გამოწვეულია ჰარმონიული ტალღით. მისი პარამეტრები ღრმა წყალში ასეთია:

- გავრცელების მიმართულებაა სამხრეთ-დასავლეთის (x ღერძის გასწვრივ);
- ტალღის სიმაღლეა $H=1\text{მ}$;
- ტალღის პერიოდი $\tau = 4\text{წმ}$.

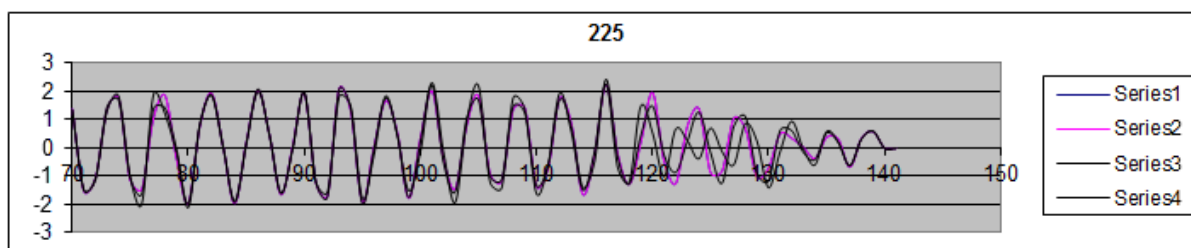


ნახ. 2.1. მოდელირების არის სქემა

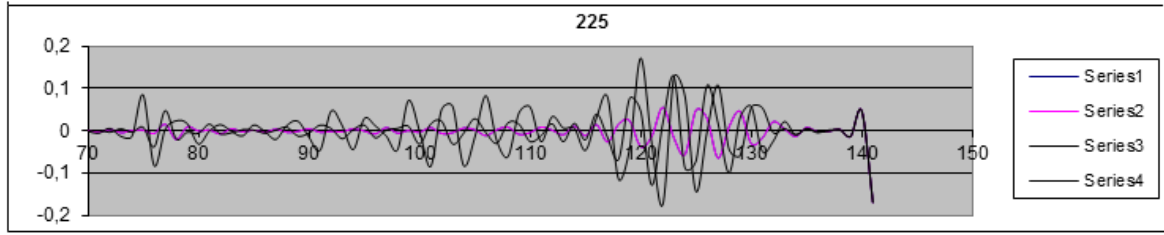
ნახ. 2.2-2.4-ზე მოცემულია ტალღის ერთი პერიოდისთვის ზღვის თავისუფალი ზედაპირის ამალღება - ζ (ნახ. 2.2), ნაპირის მართობული q_1 (ნახ. 2.3) და ნაპირგასწვრივი q_2 (ნახ. 2.4) ნაკადები შემდეგ არეებში ($i = 70 - 141$; $j = 1 - 4$). ნახაზებზე ვერტიკალური და ჰორიზონტალური მიმართულებებით სიგრძეთა მასშტაბები სხვადასხვაა. განსახილველი უბნის სიგრძეა 350მ.



ნახ. 2.2 ზღვის თავისუფალი ზედაპირის აწევის ცვლილება ნაპირთან ახლოს ($i=70-141$).

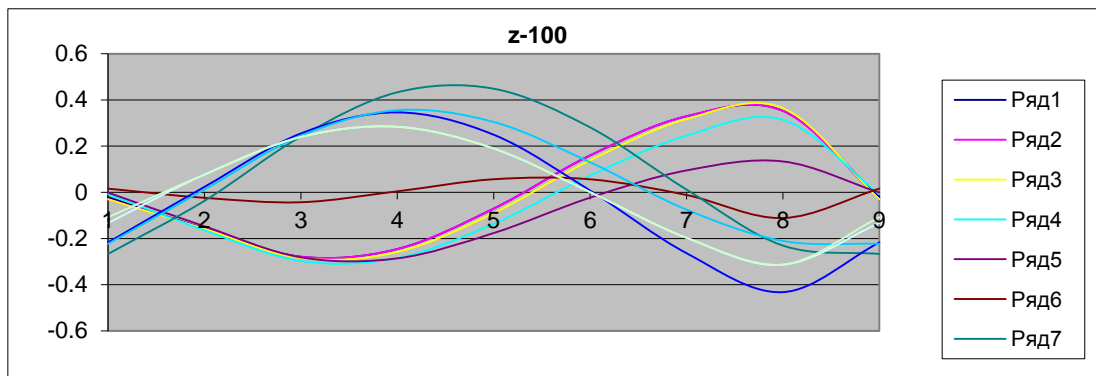


ნახ. 2.2. ნაპირთან ახლოს განივი ნაკადის სიჩქარის ცვლილება.

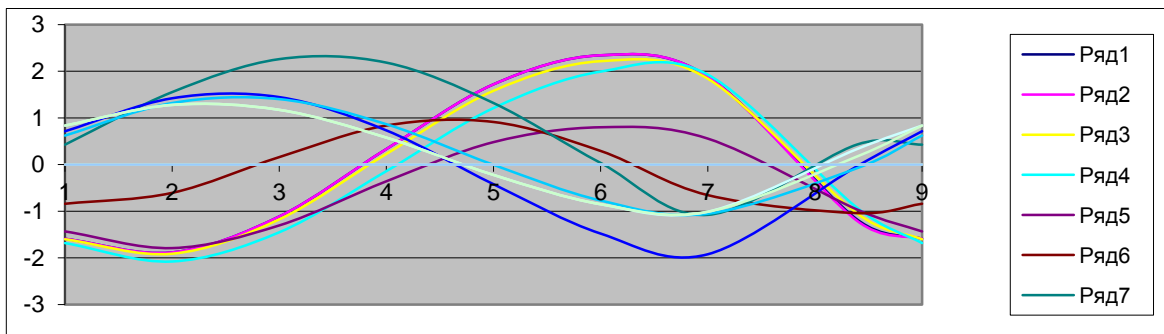


ნახ. 2.4. ნაპირთან ახლოს ნაპირგასწვრივი ნაკადის სიჩქარის ცვლილება.

გამოთვლების დროს მათემატიკური მოდელის მოძრაობის განტოლებებში შემოდის ახალი წევრი, რომელიც ითვალისწინებს ნაპირთან ტალღის დამსხვრევების დროს ენერჯის დისიპაციას. ამიტომ უშუალოდ ნაპირთან ახლოს ზღვის თავისუფალი ზედაპირის აწევისა და განივი ნაკადის რხევათა ამპლიტუდები მცირდება. ნახ. 2.5-სა და 2.6-ზე ნაჩვენებია ზღვის თავისუფალი ზედაპირის აწევისა და განივი ნაკადის ცვლილება ერთი პერიოდის განმავლობაში შემდეგ კვანძებში: $i=100$; $j=3-11$. ზღვის ფსკერის პროფილითაა განპირობებული ის, რომ ერთი და იმავე x კოორდინატის მქონე ზღვის ზედაპირის წერტილები განივად სხვადასხვა ფაზებით რხევას განსხვავებული ამპლიტუდებით.



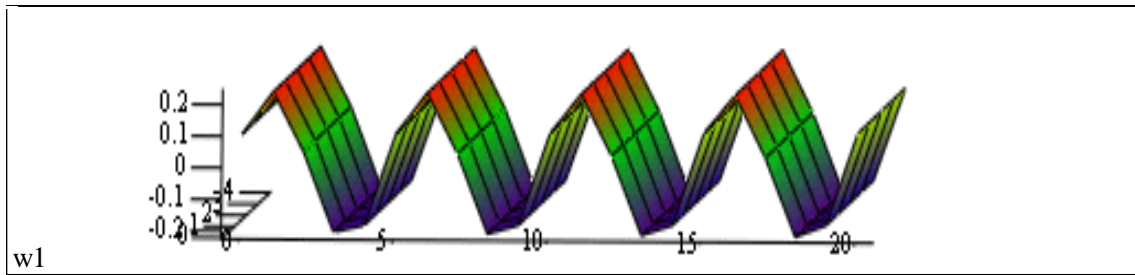
ნახ. 2.5. ერთი პერიოდის განმავლობაში $X1=495m$ კოორდინატის კვანძებში თავისუფალი ზედაპირის აწევის ცვლილება.



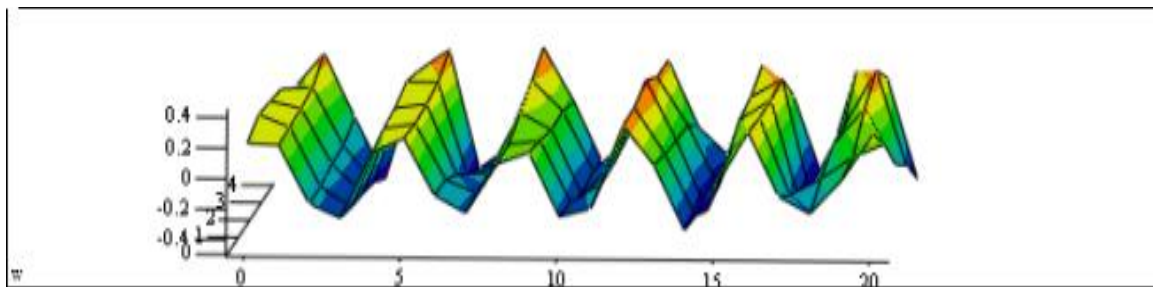
ნახ. 2.6. ერთი პერიოდის განმავლობაში $X1=495m$ კოორდინატის კვანძებში განივი ნაკადის ცვლილება.

ტალღური მოდელის ტესტირებისთვის ჩატარებულია ტალღური რეჟიმის ანგარიში იმავე არესა და სასაზღვრო პირობებში ღრმა წყლისთვის. ანგარიშის შედეგები შეესაბამება ცნობილ ანალიტიკურ გადაწყვეტას. ტალღური სურათის

ფრაგმენტები ღრმა წყლისთვის მოცემულია ნახ. 2.7-ზე, ხოლო არსებული ფსკერის პროფილისთვის – ნახ. 2.8-ზე

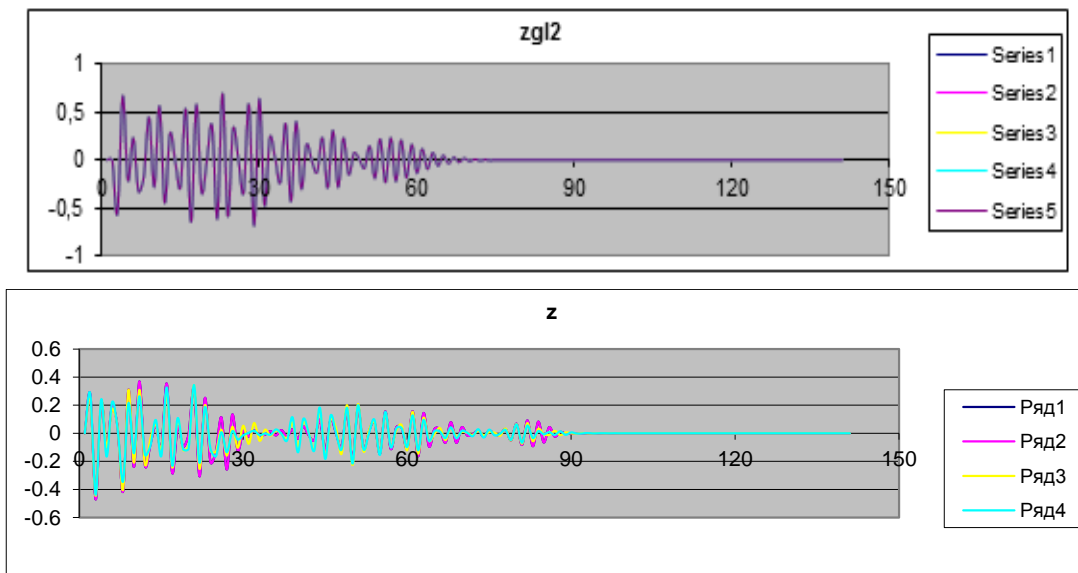


ნახ. 2.7 ღრმა წყალში ტალღის გავრცელების ფრაგმენტი

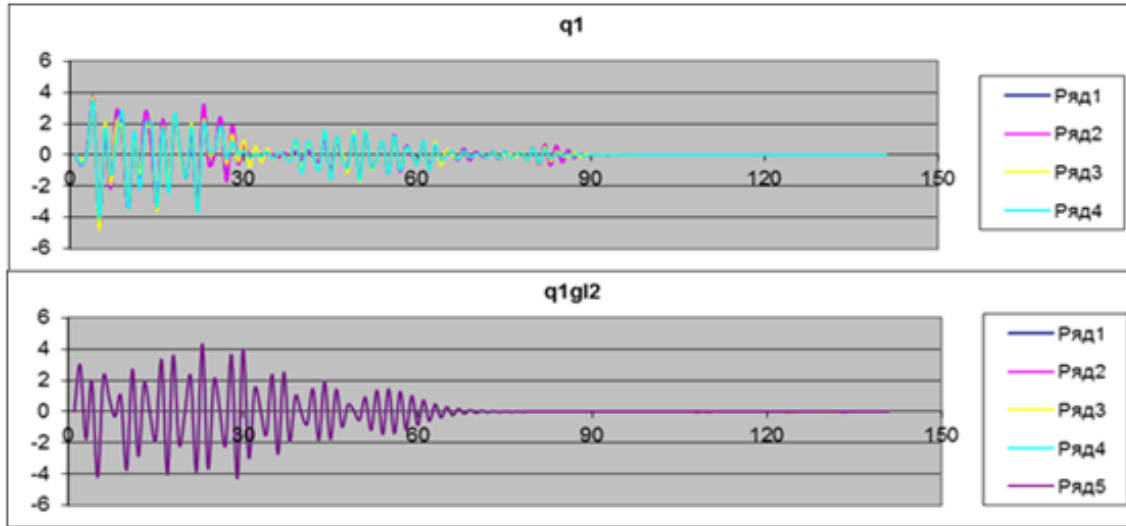


ნახ.2.8 ტალღური სურათის ფრაგმენტი ფსკერის არსებული პროფილის დროს

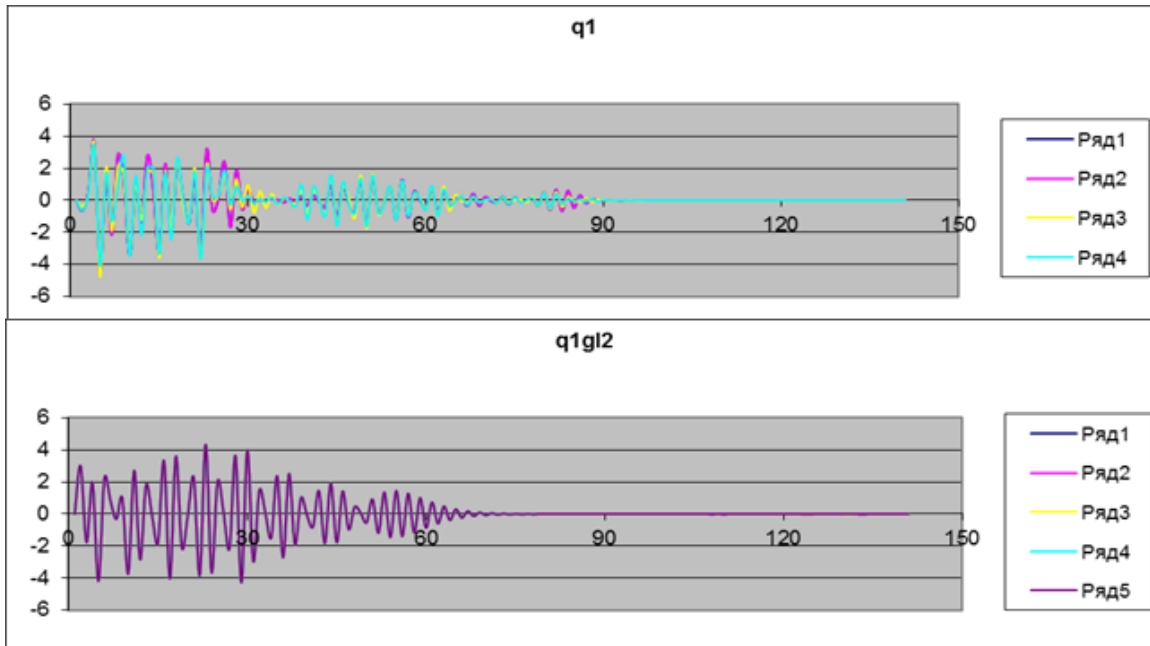
მოძრაობის განტოლებები ენერჯის დისიპაციას ითვალისწინებს მხოლოდ დაბალ წყალში, ტალღების დამსხვრევის ზონაში, ამიტომ არადაამყარებული მოძრაობის დროს დიდი მნიშვნელობა აქვს საზღვარზე შეშფოთებისა და სასაზღვრე პირობების დასმას. შემდეგ სურათებზე მოცემულია საწყის წყნარ წყალზე ჰარმონიული რხევის ტიპის $\zeta(t, 0, z) = a \sin \sigma t$ შეშფოთების გავრცელებას.



ნახ. 2.9. ზღვის თავისუფალი ზედაპირის დონის აწევის სასაზღვრე შეშფოთების გავრცელება ოთხი პერიოდის განმავლობაში (ქვემოთ – ღრმა წყალში, ზემოთ – ფსკერის არსებულ პროფილზე)



ნახ. 2.10. ზღვის თავისუფალი ზედაპირის დონის აწევის სასაზღვრე შეშფოთების გავლენა განივ ნაკადზე ოთხი პერიოდის განმავლობაში (ქვემოთ – ღრმა წყალში, ზემოთ – ფსკერის არსებულ პროფილზე)



ნახ. 2.11. ზღვის თავისუფალი ზედაპირის დონის აწევის სასაზღვრე შეშფოთების გავლენა ნაპირგასწვრივ ნაკადზე ოთხი პერიოდის განმავლობაში (ქვემოთ – ღრმა წყალში, ზემოთ – ფსკერის არსებულ პროფილზე)

2.2.2. სანაპირო დინებები

ზღვის სანაპირო ზონაში არსებობს სხვადასხვა სახის სანაპირო დინება: ოკეანის (მსხვილმამტაბური) დინება, მოქცევების დინება და დინება, რომელიც გამოწვეულია ქარისა და ტალღების ნაკადებით.

ოკეანის დინება თითქმის მუდმივია წლის განმავლობაში. მოქცევითი დინებები ასევე მსხვილმამტაბურია, მაგრამ გააჩნიათ რხევითი ხასიათი და იცვლება დროისა და ადგილის მიხედვით. ჩვენთვის განსაკუთრებით საინტერესოა დინებები, რომელიც გამოწვეულია ქარისა და ტალღების ნაკადებით.

სანაპირო დინებები შედგება ისეთი ნაკადებისაგან, რომელიც გამოწვეულია უშუალოდ ტალღების მოქმედებით. სანაპირო დინებების სისტემა შეიცავს ნაპირგასწვრივ, ნაპირის მართობულ და წყვეტილ დინებებს.

ტალღების მიერ გამოწვეული სანაპირო დინებების ანალიზისთვის მიღებულია რადიაციული ძაბვის თეორია. რადიაციული ძაბვა განსაზღვრულია, როგორც ტალღური ნაკადის ცვლილება [50]. ტალღური ველისაგან განსხვავებით, სანაპირო დინებების ველი იცვლება შედარებით ნელა.

სანაპირო დინებების გაანგარიშება აუცილებელია სანაპირო ზოლის ტოპოგრაფიის ცვლილებისა და ნატანის მოძრაობის გამოკვლევისათვის.

ამ თავში განვიხილავთ რიცხვითი მეთოდების გამოყენებით მოცემული ტალღური რეჟიმისა და ბატიმეტრიკის დროს სანაპირო დინებების ანალიზს. ზოგადად, დინებები სანაპირო ზოლში სამგანზომილებიანია. წყლის ზედა და ქვედა ფენები, გარკვეულ პირობებში შეიძლება მოძრაობდეს საპირისპირო მიმართულებებით. სამგანზომილებიანი სანაპირო დინებების გამოკვლევა ძალიან რთულია. ამიტომ ჩვენ განვიხილავთ სანაპირო დინებების ორგანზომილებიან განტოლებებს, დავუშვებთ, რომ ნაკადი სიღრმის მიხედვით ერთნაირია [4].

სანაპირო დინებების ანალიზისთვის მიღებულია შემდეგი ძირითადი განტოლებები:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(h+\zeta)U}{\partial x} + \frac{\partial(h+\zeta)V}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

სადაც U და V სანაპირო დინების სიჩქარის ვექტორის კომპონენტებია.

$$U = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} u dz, \quad V = \frac{1}{h + \zeta} \int_{-h}^{\zeta} v dz,$$

Z – ღერძი მიმართულია ζ წყლის უძრავი ზედაპირის მართობულად, ზემოთ, – წყლის საშუალო დონის აწევა, h არის უძრავი წყლის სიღრმე, R და R_y – რადიაციული ძაბვის კომპონენტები, F_x და F_y – ფსკერული ხახუნის კომპონენტები, M_x და M_y კი გვერდითი შერევის კომპონენტებია (ნაკადის ტურბულენტობით გამოწვეული დიფუზია).

ტალღური მოძრაობის დროს ფსკერული ხახუნის კოეფიციენტები გამოისახება ფორმულებით [19]:

$$F_x = \frac{C_f}{h+\zeta} \frac{1}{4} \left\{ (U+u_b \cos \delta) \sqrt{(U+u_b \cos \delta)^2 + (V+v_b \cos \delta)^2} + (U+u_b \sin \delta) \sqrt{(U+u_b \sin \delta)^2 + (V-v_b \sin \delta)^2} + (U-u_b \cos \delta) \sqrt{(U-u_b \cos \delta)^2 + (V-v_b \cos \delta)^2} + (U-u_b \sin \delta) \sqrt{(U-u_b \sin \delta)^2 + (V-v_b \sin \delta)^2} \right\}$$

$$F_y = \frac{C_f}{h+\zeta} \frac{1}{4} \left\{ (V+v_b \cos \delta) \sqrt{(U+u_b \cos \delta)^2 + (V+v_b \cos \delta)^2} + (V+v_b \sin \delta) \sqrt{(U+u_b \sin \delta)^2 + (V-v_b \sin \delta)^2} + (V-v_b \cos \delta) \sqrt{(U-u_b \cos \delta)^2 + (V-v_b \cos \delta)^2} + (V-v_b \sin \delta) \sqrt{(U-u_b \sin \delta)^2 + (V-v_b \sin \delta)^2} \right\} \quad (2.2.8)$$

სადაც C_f - ფსკერული ხახუნის კოეფიციენტი (ჯონსონის კოეფიციენტი), რომელიც ტოლია $C_f = 0,01$; $\delta = (\varphi_x - \varphi_y)/2$, φ_x და φ_y – საწყისი ფაზებია, u_b და v_b - ფსკერული ორბიტალური სიჩქარეები. სიდიდეები φ_x , φ_y , u_b და v_b განისაზღვრება ტალღური ამოცანის ამოხსნის შედეგად.

რადიაციული ძაბვების მდგენელები განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით [50]:

$$R_x = \frac{1}{\rho(h+\zeta)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right), \quad R_y = \frac{1}{\rho(h+\zeta)} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right),$$

სადაც

$$S_{xx} = \rho g \left(\frac{n\hat{Q}_x^2}{2c^2} + \frac{(2n-1)\hat{\zeta}^2}{4} + \Gamma \right), \quad S_{yy} = \rho g \left(\frac{n\hat{Q}_y^2}{2c^2} + \frac{(2n-1)\hat{\zeta}^2}{4} + \Gamma \right), \quad (2.2.9)$$

$$S_{xy} = \rho g \left(\frac{n\hat{Q}_x \hat{Q}_y}{2c^2} \cos(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \right), \quad \Gamma = \frac{1}{8\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \hat{\zeta} \hat{Q}_x \sin(\varepsilon_\zeta - \varepsilon_x) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \hat{\zeta} \hat{Q}_y \sin(\varepsilon_\zeta - \varepsilon_y) \right\} \right]$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}, \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right), \quad k = \frac{2\pi}{L},$$

L - ტალღის სიგრძეა, კომპონენტები $Q_x, Q_y, \zeta, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_\zeta$ – შესაბამისი სიდიდეების ამპლიტიდური მნიშვნელობებია, რომლებიც განისაზღვრება ტალღური ამოცანის ამოხსნის შედეგად. შემდეგში დავუშვებთ, რომ კონვექტიური წევრები მცირეა $\frac{\partial U}{\partial t}$ და

$\frac{\partial V}{\partial t}$ წევრებთან შედარებით და შეიძლება უგულებელვყოთ.

რიცხვითი ალგორითმი. შევადგინოთ აპროქსიმაციის სქემა. S არეზე არათანაბარი ბიჯითა და შესაბამისი საზღვრით ავაგოთ ბადური S^n არე. ზღვის სანაპირო აუზი ჰორიზონტალურ კოორდინატებში იფარება ბადით მუდმივი Δx და Δy ბიჯით. საკოორდინატო ღერძების გასწვრივ წერტილების რაოდენობა შესაბამისად არის 141 და 13. დროის ბიჯი $\Delta t = 4$ წმ.

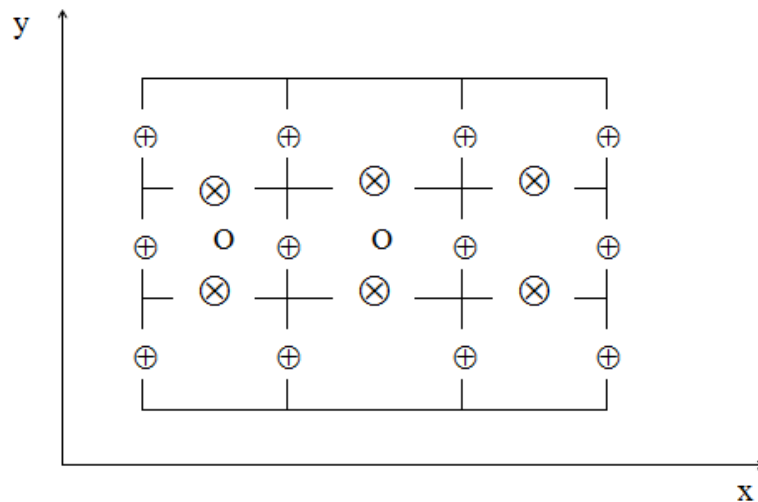
(2.2.7) განტოლებების აპროქსიმაცია მოვახდინოთ სასრულ სხვაობების მეთოდით:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{i,j}}{dt} - M_{xi,j} &= -F_{xi,j} - R_{xi,j} - g \frac{\zeta_{i,j} - \zeta_{i-1,j}}{\Delta x}, \\ \frac{dV_{i,j}}{dt} - M_{yi,j} &= -F_{yi,j} - R_{yi,j} - g \frac{\zeta_{i,j} - \zeta_{i,j-1}}{\Delta y}, \\ \frac{d\zeta_{i,j}}{dt} + \frac{D_{xi+1,j}U_{i+1,j} - D_{xi,j}U_{i,j}}{\Delta x} + \frac{D_{yi,j+1}V_{i,j+1} - D_{yi,j}V_{i,j}}{\Delta y} &= 0, \end{aligned} \quad (2.2.10)$$

სადაც

$$\begin{aligned} M_{xi,j} &= \frac{\varepsilon_{i,j}(U_{i+1,j} - U_{i,j}) - \varepsilon_{i-1,j}(U_{i,j} - U_{i-1,j})}{\Delta x^2} + \frac{\varepsilon^*_{i,j+1}(U_{i,j+1} - U_{i,j}) - \varepsilon^*_{i,j}(U_{i,j} - U_{i,j-1})}{\Delta y^2}, \\ M_{yi,j} &= \frac{\varepsilon_{i,j}(V_{i+1,j} - V_{i,j}) - \varepsilon_{i-1,j}(V_{i,j} - V_{i-1,j})}{\Delta x^2} + \frac{\varepsilon^*_{i,j+1}(V_{i,j+1} - V_{i,j}) - \varepsilon^*_{i,j}(V_{i,j} - V_{i,j-1})}{\Delta y^2}, \\ \varepsilon^*_{i,j} &= (\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i-1,j} + \varepsilon_{i,j-1} + \varepsilon_{i-1,j-1})/4, \\ D_{xi,j} &= (h_{i,j} + \zeta_{i,j} + h_{i-1,j} + \zeta_{i-1,j})/2, \quad D_{yi,j} = (h_{i,j} + \zeta_{i,j} + h_{i,j-1} + \zeta_{i,j-1})/2. \end{aligned}$$

ბადური ვექტორ-ფუნქციები განისაზღვრება შემდეგნაირად: $U_{i,j}$ - განისაზღვრება წერტილებში, რომელიც ნახ. 3.12-ზე აღნიშნულია \otimes ნიშნით; $V_{i,j}$ - \oplus წერტილებში; $\zeta_{i,j}$ - \circ წერტილებში.



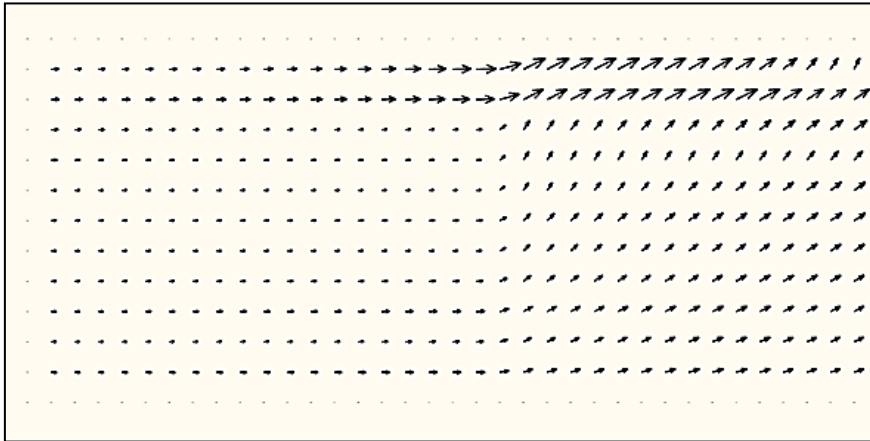
ნახ. 2.12 სხვაობათა ბადე

(2.2.10) განტოლების ამოხსნისთვის დროის მიხედვით აპროქსიმაციის სქემის შესადგენად ვისარგებლოთ კრანკლ-ნიკოლსონის სქემით [71,142], რომელიც უზრუნველყოფს დროის მიხედვით აპროქსიმაციის მეორე რიგს.

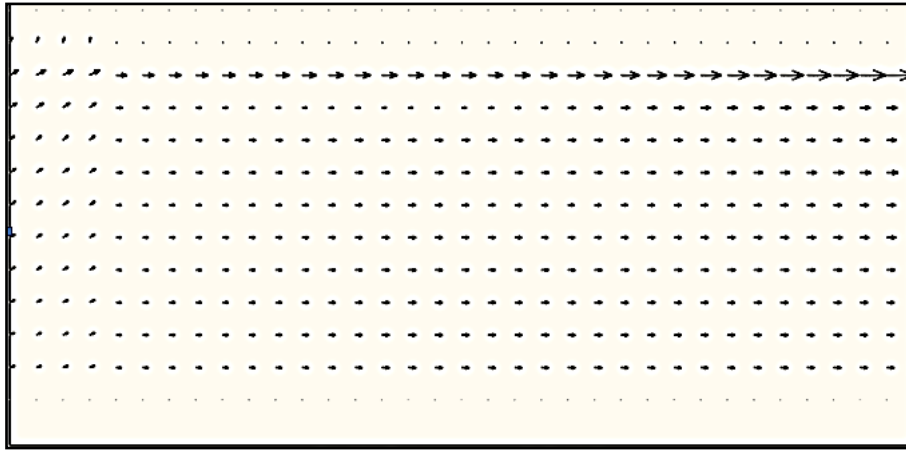
(2.2.10) სისტემის ამოხსნის საბოლოო სქემას აქვს სახე:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\varepsilon_{i-1,j}}{2\Delta x^2} U_{i-1,j}^{m+1} + \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i-1,j}}{2\Delta x^2} + \frac{\varepsilon_{i,j+1}^* + \varepsilon_{i,j}^*}{2\Delta x^2} \right] U_{i,j}^{m+1} - \frac{\varepsilon_{i,j}}{2\Delta x^2} U_{i+1,j}^{m+1} = \frac{\varepsilon_{i,j+1}^*}{2\Delta y^2} U_{i,j+1}^{m+1/2} + \\
 & \frac{\varepsilon_{i,j}^*}{2\Delta y^2} U_{i,j-1}^{m+1/2} + \frac{\varepsilon_{i-1,j}}{2\Delta x^2} U_{i-1,j}^m + \left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i-1,j}}{2\Delta x^2} - \frac{\varepsilon_{i,j+1}^* + \varepsilon_{i,j}^*}{2\Delta x^2} \right] U_{i,j}^m + \frac{\varepsilon_{i,j}}{2\Delta x^2} U_{i+1,j}^m + \\
 & \frac{\varepsilon_{i,j+1}^*}{2\Delta y^2} U_{i,j+1}^m + \frac{\varepsilon_{i,j}^*}{2\Delta y^2} U_{i,j-1}^m - F_{xi,j}^{m+1/2} - R_{xi,j}^{m+1/2} - \frac{g(\zeta_{i,j} - \zeta_{i-1,j})}{\Delta x}, \\
 & -\frac{\varepsilon_{i-1,j}}{2\Delta x^2} V_{i-1,j}^{m+1} + \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i-1,j}}{2\Delta x^2} + \frac{\varepsilon_{i,j+1}^* + \varepsilon_{i,j}^*}{2\Delta x^2} \right] V_{i,j}^{m+1} - \frac{\varepsilon_{i,j}}{2\Delta x^2} V_{i+1,j}^{m+1} = \frac{\varepsilon_{i,j+1}^*}{2\Delta y^2} V_{i,j+1}^{m+1/2} + \\
 & \frac{\varepsilon_{i,j}^*}{2\Delta y^2} V_{i,j-1}^{m+1/2} + \frac{\varepsilon_{i-1,j}}{2\Delta x^2} V_{i-1,j}^m + \left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{\varepsilon_{i,j} + \varepsilon_{i-1,j}}{2\Delta x^2} - \frac{\varepsilon_{i,j+1}^* + \varepsilon_{i,j}^*}{2\Delta x^2} \right] V_{i,j}^m + \frac{\varepsilon_{i,j}}{2\Delta x^2} V_{i+1,j}^m + \\
 & \frac{\varepsilon_{i,j+1}^*}{2\Delta y^2} V_{i,j+1}^m + \frac{\varepsilon_{i,j}^*}{2\Delta y^2} V_{i,j-1}^m - F_{yi,j}^{m+1/2} - R_{yi,j}^{m+1/2} - \frac{g(\zeta_{i,j} - \zeta_{i,j-1})}{\Delta y}, \\
 & \frac{U_{i,j}}{4\Delta x} \zeta_{i-1,j}^{m+1} + \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{4\Delta x} + \frac{V_{i,j+1} - V_{i,j}}{4\Delta y} \right] \zeta_{i,j}^{m+1} + \frac{U_{i+1,j}}{4\Delta x} \zeta_{i+1,j}^{m+1} = -\frac{U_{i,j}}{4\Delta x} \zeta_{i-1,j}^m + \\
 & \left[\frac{1}{\Delta t} - \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{4\Delta x} - \frac{V_{i,j+1} - V_{i,j}}{4\Delta y} \right] \zeta_{i,j}^m - \frac{U_{i+1,j}}{4\Delta x} \zeta_{i+1,j}^m - \frac{V_{i,j+1}}{4\Delta y} \zeta_{i,j+1}^{m+1/2} + \frac{V_{i,j}}{4\Delta y} \zeta_{i,j-1}^{m+1/2} - \\
 & \frac{V_{i,j+1}}{4\Delta y} \zeta_{i,j+1}^m + \frac{V_{i,j}}{4\Delta y} \zeta_{i,j-1}^m - \frac{(h_{i+1,j} + h_{i,j})}{2\Delta x} U_{i+1,j}^m + \frac{(h_{i,j} + h_{i-1,j})}{2\Delta x} U_{i,j}^m - \frac{(h_{i,j+1} + h_{i,j})}{2\Delta y} V_{i,j+1}^m + \\
 & \frac{(h_{i,j} + h_{i,j-1})}{2\Delta y} V_{i,j}^m.
 \end{aligned}$$

მიღებული წრფივი ალგებრულ განტოლებათა სისტემა იხსნება ზედა რელაქსაციის მეთოდით.



ნახ. 2.13 სანაპირო დინებების ვექტორული ველი, როცა $i=1-35$; $j=1-13$



ნახ. 2.14. სანაპირო დინებების ვექტორული ველი, როცა $i=36-70$; $j=1-13$

სანაპირო დინებები გამოვიკვლიოთ იმავე უბანზე, სადაც გამოვიკვლიეთ ტალღური პროცესები $700-600\text{მ}^2$ ფართობის მქონე ფოთის პორტის მომიჯნავე ზონაში. მოდელირების დროა 180 წთ, დროის ბიჯი – 0,001 წმ. ნახ. 2.13-დან ჩანს, რომ x ღერძის გასწვრივ ნაპირთან მიახლოებისას სანაპირო დინებების სიჩქარეთა ვექტორები უხვევს მოლის მიმართულებით. ისინი იზრდება და მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს 8-9მ-ის სიღრმეზე, როცა $i=20-40$, $j=1-13$. შემდეგში დინების სიჩქარე მცირდება და იცვლის რა მიმართულებას, მოძრაობს x ღერძის გასწვრივ. ზვირთცემის ზონაში სანაპირო დინებებების სიჩქარეთა ვექტორები იზრდება და მიმართულია ნაპირის მართობულად (ნახ. 2.14). გაანგარიშებებში სასაზღვრო პირობებად ვიყენებთ: მყარ საზღვარზე სიჩქარის ვექტორი $U_n = 0$, თხევად

საზღვარზე:
$$\frac{\partial U_n}{\partial n} = 0.$$

2.2.3. ნატანის მოძრაობა

გამოვიკვლიოთ ნატანის მოძრაობა და ზღვის ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილება. ნაპირის ცვლილება გამოწვეულია სანაპირო ზოლში ტალღების მოძრაობითა და სანაპირო დინებებით. როგორც ნატანის მასის მუდმივობის განტოლებიდანაა ცნობილი, წყლის სიღრმის ცვლილება შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად [50,155] :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \quad (2.2.11)$$

სადაც x და y ჰორიზონტალური კოორდინატებია, q_x და q_y კი - ელემენტის საზღვრებში ნატანის მოძრაობის სიჩქარე x და y მიმართულებებით. მოძრაობის

მოცულობითი სიჩქარეები (q_x, q_y) გამოისახება ელემენტის ვერტიკალური განივი კვეთის მიერ დროის ერთეულში გატარებული ეფექტური ნატანის მოცულობით. ნატანის მოძრაობის სიჩქარის განსასაზღვრავად მიღებულია ფორმულა:

$$(q_x, q_y) = (q_{cx}, q_{cy}) + (q_{wx}, q_{wy}), \quad (2.2.12)$$

სადაც (q_{cx}, q_{cy}) გასაშუალებული დინებებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარეა, (q_{wx}, q_{wy}) კი ტალღებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე. დინებებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$q_{cx} = Q_c U, \quad q_{cy} = Q_c V, \quad (2.2.13)$$

$$Q_c = A_c (\tau_m - \tau_{cr}) / \rho g,$$

სადაც U და V გასაშუალებული დინებების სიჩქარეებია x და y მიმართულებით, A_c 0,1-1 რიგის უგანზომილებო კოეფიციენტი, τ_m – ტალღებისა და დინებების ერთობლივი მოქმედებით გამოწვეული ფსკერული ძვრის ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობაა $\tau_m = \frac{1}{2} \rho f_{cw} \hat{u}_b^2$, \hat{u}_b ფსკერული ორბიტული სიჩქარის ამპლიტუდაა, f_{cw} ფსკერის ხახუნის კოეფიციენტი, τ_{cr} ნატანის ასამოძრავებლად საჭირო ფსკერის კრიტიკული ძვრის ძაბვაა (თუკი $\tau \leq \tau_{cr}$, მაშინ $Q_c = 0$).

ტალღების მიერ ნატანის მოძრაობა გამოწვეულია ფსკერული ტალღური სიჩქარის ასიმეტრიულობით და უფრო რთულია, რადგანაც ის ითხოვს ისეთი ფაქტორების გათვალისწინებას, როგორცაა ტალღათა რეფრაქცია, დიფრაქცია, დამსხვრევა, არეკვლა და ფსკერის დახრილობა. ტალღებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$q_{wx} = F_d Q_w \hat{u}_b \cos \alpha, \quad q_{wy} = F_d Q_w \hat{u}_b \sin \alpha, \quad (2.2.14)$$

$$Q_w = A_w (\tau_m - \tau_{cr}) / \rho g,$$

სადაც A_w არის უგანზომილებო კოეფიციენტი, \hat{u}_b ფსკერული ორბიტული სიჩქარის ამპლიტუდაა, α – კუთხე ტალღების გავრცელების მიმართულებასა და x ღერძს შორის. A_w კოეფიციენტი ტოლია:

$$A_w = B_w \frac{w_0}{(1 - \lambda_v) s \sqrt{sgd}} \sqrt{\frac{f_w}{2}},$$

$s = (\rho_s - \rho) / \rho$, τ_m ტალღებითა და დინებებით გამოწვეული ძვრის მაქსიმალური ძაბვაა, λ_v ფსკერის ფორიანობაა, f_w კი - ხახუნის ტალღური კოეფიციენტი. f_w –ს მნიშვნელობა დამოკიდებულია ორბიტული სიჩქარის ამპლიტუდასა და პერიოდზე,

აგრეთვე ფსკერის მახასიათებლებზე. მაგალითად, თუ ფსკერი შედგება ქვიშისაგან $d = 0,2$ მმ, $w_0 = 2,4$ სმ/წმ, $\lambda_v = 0,4$, $s = 1,65$ და $B_w = 7$ და $f_w = 0,01 \sim 0,2$, მაშინ A_w -ს მნიშვნელობა იცვლება დიაპაზონში. გამოთვლების დროს A_w მუდმივია (2.2.14) ფორმულებში:

$$F_d = \tanh\left(k_d \frac{\Pi_c - \Pi}{\Pi_c}\right), \quad \Pi = \psi' \frac{h}{L_0} = \frac{\hat{u}_b^2}{sgd} \frac{h}{L_0}, \quad (2.2.15)$$

სადაც ნულოვან წერტილში Π -ს კრიტიკულ მნიშვნელობას წარმოადგენს (სადაც ნატანის განივი მოძრაობა ნულის ტოლია). Π_c ერთეული რიგის სიდიდეა და ზუსტდება გამოთვლების პროცესში. Π პარამეტრის მნიშვნელობები დაზუსტდება, თუ ψ' -ს შევცვლით შილდის პარამეტრით ($\psi_m = \tau_m / (\rho_s - \rho)gd$).

(2.2.14) ტოლობები დამოკიდებულია ფსკერულ ხახუნზე (ძვრის კრიტიკულ ძაბვებზე), რომლის მნიშვნელობა უნდა განისაზღვროს. ტალღებისა და დინებების გავლენით ნატანის მოძრაობის კრიტიკული პირობა განისაზღვრება შილდის პარამეტრის კრიტიკული მნიშვნელობით, რომელიც ტოლია

$$\psi_c = \tau_{cr} / (\rho_s - \rho)gd.$$

მცირე ზომის ქვიშისთვის ($d = 0,1 \sim 0,4$) შილდის კრიტიკული პარამეტრის მნიშვნელობა უდრის 0,11, მსხვილი ქვიშისთვის კი – 0,06 -ს.

ფორმულებში, რომლებითაც განისაზღვრება (q_x, q_y) , არ არის გათვალისწინებული ფსკერის დახრის ფაქტორი. მისი გათვალისწინებით მიიღება:

$$q_x' = q_x + \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y' = q_y + \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.2.16)$$

და (2.2.11)-ის ნაცვლად მივიღებთ

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x'}{\partial x} + \frac{\partial q_y'}{\partial y}. \quad (2.2.17)$$

ამოხსნის ალგორითმი. შემოვიტანოთ (2.2.16) განტოლებაში აღნიშვნები:

$$A = q_x, \quad B = \varepsilon |q_x|, \quad C = q_y, \quad D = \varepsilon |q_y|$$

და (2.2.17) გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (2.2.18)$$

ჩამოვაცალიბოთ განზოგადებული ამოცანა. (2.2.18) განტოლების განზოგადოებული ამოხსნა ვუწოდოთ ფუნქციას $h \in \tilde{W}_2^{(1)}$ ($\tilde{W}_2^{(1)}$ სობოლევის ფუნქცია), რომელიც აკმაყოფილებს განტოლებას [50, 148, 153]:

$$\iint_S \frac{\partial h}{\partial t} \omega_{i,j} dS = \iint_S \frac{\partial}{\partial x} \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) \omega_{i,j} dS + \iint_S \frac{\partial}{\partial y} \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \omega_{i,j} dS. \quad (2.2.19)$$

ნებისმიერი $\omega_{i,j} \in W_2^{(1)}$, აქ $W_2^{(1)}$ - თავის პირველი რიგის წარმოებულთან ერთად კვადრატულად შეჯამებადი ფუნქციების სივრცეა, რომელიც Γ საზღვარზე ნულის ტოლია და ღებულობს ნებისმიერ ფიქსირებულ მნიშვნელობას S არის შიგნით.

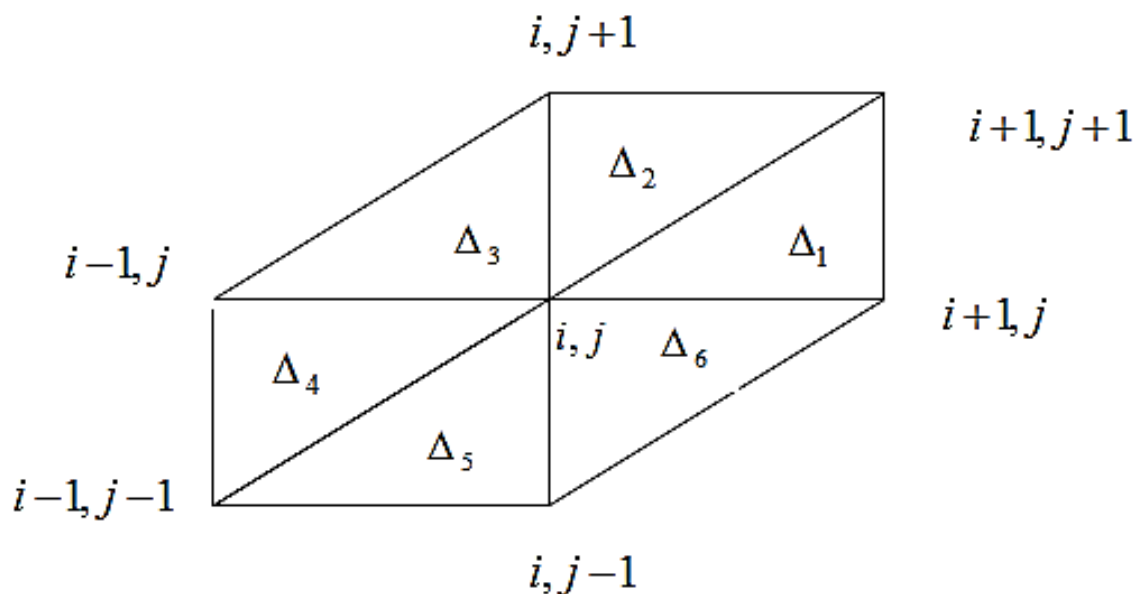
გამოვიყენოთ (2.2.19)-ში გრინის ფორმულა, მივიღებთ:

$$\iint_S \frac{\partial h}{\partial t} \omega_{i,j} dS = - \iint_S \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial x} dS - \iint_S \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial y} dS. \quad (2.2.20)$$

გადავიდეთ აპროქსიმაციის სქემის შედგენაზე. შემდგომში S არეში ვაგებთ ბადურ მართკუთხოვან არეს ბიჯით და პროექციულ-სხვაობიანი სქემის ასაგებად არეზე ბადის თითოეულ კვანძს ვუთავსებთ კურანტის ფუნქციას, რომელიც მოცემულ კვანძში ერთის ტოლია, ხოლო ბადის დანარჩენ კვანძებში - ნულისა.

$$\omega_{m,n}(x_i, y_j) = \begin{cases} 1, & (i, j) = (m, n) \\ 0, & (i, j) \neq (m, n) \end{cases}$$

ფუნქციებს $\omega_{m,n}(x_i, y_j)$ მატარებლად აქვს ექვსკუთხედი, რომელიც გამოსახულია ნახ. 2.15-ზე.



ნახ. 2.15. სასრული ელემენტი

ინტერპოლაციული ფუნქცია $\omega_{i,j}$ განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\omega_{i,j}(x,y) = \begin{cases} (x_{i+1,j} - x)/a, \dots \dots \dots \text{როცა } (x,y) \in \Delta_1; \\ (y_{i,j+1} - y)/b, \dots \dots \dots \text{როცა } (x,y) \in \Delta_2; \\ (x - x_{i,j})/a + (y_{i,j+1} - y)/b, \dots \dots \text{როცა } (x,y) \in \Delta_3; \\ (x - x_{i-1,j})/a, \dots \dots \dots \text{როცა } (x,y) \in \Delta_4; \\ (y - y_{i,j-1})/b, \dots \dots \dots \text{როცა } (x,y) \in \Delta_5; \\ (x_{i+1,j} - x)/a + (y - y_{i,j})/b, \dots \dots \text{როცა } (x,y) \in \Delta_6. \end{cases}$$

$\omega_{i,j}$ ფუნქციის წარმოებულის მნიშვნელობები ბაზისურ სამკუთხედებზე იქნება მუდმივი. ისინი მოცემულია (2.1) ცხრილში.

ცხრილი 2.1. ბაზისური ფუნქციების წარმოებულები

	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6
$\frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial x}$	$-\frac{1}{a}$	0	$\frac{1}{a}$	$\frac{1}{a}$	0	$-\frac{1}{a}$
$\frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial y}$	0	$-\frac{1}{b}$	$-\frac{1}{b}$	0	$\frac{1}{b}$	$\frac{1}{b}$

(2.2.20) განტოლების მიახლოებით ამონახსნის პოვნა შესაძლებელია ფორმულით:

$$h = \sum_{i,j \in S^n} h_{i,j}(t) \omega_{i,j}(x,y). \quad (2.4.21)$$

$\omega_{i,j}(x,y)$ ფუნქცია ნულისგან განსხვავებულია მხოლოდ არის (x_i, y_j) კვანძის მომიჯნავე ექვს სამკუთხედში. ამიტომ (2.2.20) განტოლების ინტეგრირება ხდება ამ სამკუთხედების გაერთიანებით. $h_{i,j}(x,y)$ ფუნქციას აქვს სახე (i,j) წერტილების მიდამოში ტეილორის მწკრივად გაშლისა და პირველი ორი წევრის შენარჩუნების შემდეგ):

$$h_{i,j}(x,y) = \begin{cases} h_{i,j} + h_{(i,j)x}(x - x_{i,j}) + h_{(i,j)y}(y - y_{i,j}), \dots \dots \dots -\epsilon \Delta_1; \\ h_{i,j} + h_{(i,j)x}(x - x_{i,j}) + h_{(i,j)y}(y - y_{i,j}), \dots \dots \dots -\epsilon \Delta_2; \\ h_{i,j} + h_{(i,j)x}(x - x_{i,j}) + h_{(i,j)y}(y - y_{i,j}), \dots \dots \dots -\epsilon \Delta_3; \\ h_{i,j} + h_{(i,j)x}(x - x_{i,j}) + h_{(i,j)y}(y - y_{i,j}), \dots \dots \dots -\epsilon \Delta_4; \\ h_{i,j} + h_{(i,j)x}(x - x_{i,j}) + h_{(i,j)y}(y - y_{i,j}), \dots \dots \dots -\epsilon \Delta_5; \\ h_{i,j} + h_{(i,j)x}(x - x_{i,j}) + h_{(i,j)y}(y - y_{i,j}), \dots \dots \dots -\epsilon \Delta_6 \end{cases}$$

$h_{i,j}$ წარმოებულები S_n სამკუთხა არეებზე ნაჩვენებია ცხრილში 2.2.

ცხრილი 2.2. $h_{i,j}$ ფუნქციის წარმოებულები

	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6
$\frac{\partial h_{i,j}}{\partial x}$	$\frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{a}$	$\frac{h_{i+1,j+1} - h_{i,j+1}}{a}$	$\frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{a}$	$\frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{a}$	$\frac{h_{i,j-1} - h_{i-1,j-1}}{a}$	$\frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{a}$
$\frac{\partial h_{i,j}}{\partial y}$	$\frac{h_{i+1,j+1} - h_{i+1,j}}{b}$	$\frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{b}$	$\frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{b}$	$\frac{h_{i-1,j+1} - h_{i-1,j}}{b}$	$\frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{b}$	$\frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{b}$

$h_{i,j}(t)$ კოეფიციენტების მოსამებნად (2.4.20) განტოლება ჩავწეროთ შემდეგი

$$\text{სახით: } \left(\iint_S \omega_{i,j} dS \right) \frac{dh_{i,j}}{dt} + \iint_S \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial x} dS + \iint_S \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial \omega_{i,j}}{\partial y} dS = 0.$$

(2.2.22) ჩავსვათ (2.2.21) გამოსახულება (2.4.22)-ში და საბოლოოდ ვღებულობთ ვექტორულ ტოლობას:

$$\theta \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} + E \vec{h} = 0, \quad (2.2.23)$$

$$\vec{h}(0) = \vec{h}_0, \quad \theta = \Delta x \Delta y = ab.$$

უნდა აღინიშნოს, რომ დროითი წევრის აპროქსიმაციის დროს გამოყენებულია მაპროქსიმებული ფორმულები:

$$\left(\dot{\vec{h}}, \omega_{i,j} \right) = \theta \dot{h}_{i,j}.$$

ეს იძლევა საშუალებას, რომ გამოთვლების გასამარტივებლად ევოლუციური ამოცანის ნაცვლად შემდგომში განხილულ იყოს კოშის ამოცანა.

როგორც ცნობილია, ამ დროს აპროქსიმაციული თვისებები არ იცვლება [7,9,12].

ყოველი $(i, j) \in S^n$ -სთვის (2.2.23) ტოლობას მივცეთ სახე:

$$\theta \frac{dh_{i,j}}{dt} + E_1 h_{i,j} - E_2 h_{i+1,j} - E_3 h_{i,j+1} - E_4 h_{i-1,j} - E_5 h_{i,j-1} = F, \quad (2.2.24)$$

სადაც:

$$E_1 = \frac{b}{6a} (4B_{i,j} + 2B_{i+1,j} + B_{i+1,j+1} + B_{i,j+1} + 2B_{i-1,j} + B_{i-1,j-1} + B_{i,j-1}) +$$

$$+ \frac{a}{6b} (D_{i+1,j+1} + 2D_{i,j+1} + D_{i-1,j} + D_{i-1,j-1} + 2D_{i,j-1} + D_{i+1,j});$$

$$E_2 = \frac{b}{6a} (2B_{i,j} + 2B_{i+1,j} + B_{i+1,j+1} + B_{i,j-1}); \quad E_3 = \frac{a}{6b} (2D_{i,j} + D_{i+1,j+1} + 2D_{i,j+1} + D_{i-1,j});$$

$$E_4 = \frac{b}{6a} (2B_{i,j} + B_{i,j+1} + 2B_{i-1,j} + B_{i-1,j-1}); \quad E_5 = \frac{a}{6b} (2D_{i,j} + D_{i-1,j-1} + 2D_{i,j-1} + D_{i+1,j});$$

$$F = \frac{b}{6} (A_{i+1,j} + A_{i+1,j+1} - A_{i,j+1} - A_{i-1,j} - A_{i-1,j-1} + A_{i,j-1}) +$$

$$+ \frac{a}{6} (C_{i+1,j+1} + 2C_{i,j+1} + C_{i-1,j} - C_{i-1,j-1} - 2C_{i,j-1} - C_{i+1,j}).$$

(2.2.24) განტოლების ამოხსნისას გამოყენებულია კრანკ-ნიკოლსონის სქემა, რომელიც უზრუნველყოფს დროში მეორე რიგის აპროქსიმაციას. საბოლოოდ მივიღებთ:

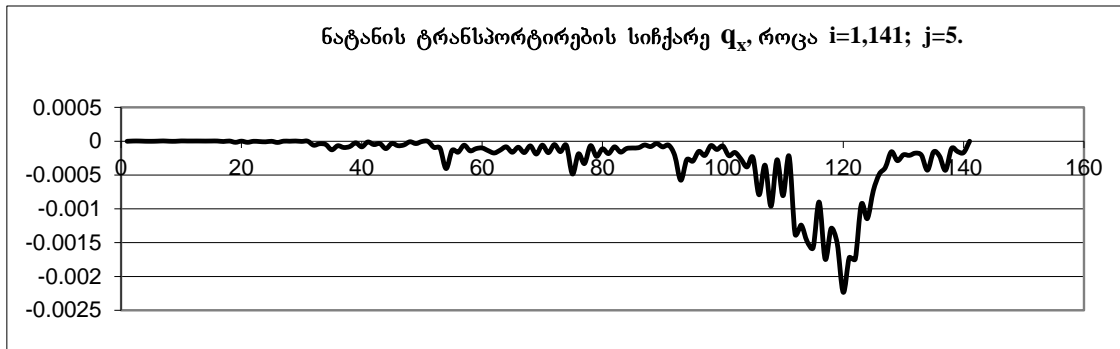
$$h_{i,j}^{m+1} \left[\frac{ab}{\Delta t} + \frac{E_1}{2} \right] - h_{i+1,j}^{m+1} \frac{E_2}{2} - h_{i,j+1}^{m+1} \frac{E_3}{2} - h_{i-1,j}^{m+1} \frac{E_4}{2} - h_{i,j-1}^{m+1} \frac{E_5}{2} = h_{i,j}^m \left[\frac{ab}{\Delta t} - \frac{E_1}{2} \right] + h_{i+1,j}^m \frac{E_2}{2} + h_{i,j+1}^m \frac{E_3}{2} + h_{i-1,j}^m \frac{E_4}{2} + h_{i,j-1}^m \frac{E_5}{2} + F. \quad (2.2.25)$$

მიღებული (2.2.25) განტოლებები შესაბამისი სასაზღვრო და საწყისი პირობების დროს ეფექტურად იხსნება ზედა რელაქსაციის მეთოდით.

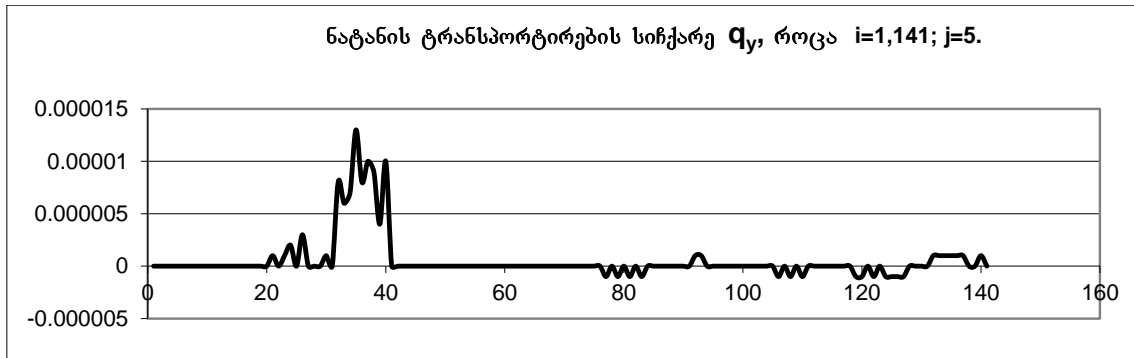
რიცხვითი გამოთვლების შედეგები მოცემულია ნახ. 2.16-2.18-ზე. სამოდელო დროა 180 წთ, დროის ბიჯი – 0,001 წმ. ზღვის დონის საშუალო აწევის საწყის სიდიდედ ანგარიშის დროს ვიღებთ 0,1 მ-ს. ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარეები ნაპირის გასწვრივი და განივი მიმართულებებით მოცემულია ნახ. 2.16-სა და 2.17-ზე. ნახ. 2.16-დან ჩანს, რომ ღელვის დროს ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე წყლის 10-15 მ სიღრმეზე თითქმის ნულის ტოლია. ის შესამჩნევია მხოლოდ 6-8 მ სიღრმის წყალში, როდესაც $i=80-141$, $j=1-13$. ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარის მაქსიმალური მნიშვნელობები იცვლება $0,002 \div 0,0001 \text{მ}^2/\text{წმ}$ საზღვრებში.

ნახ.2.17-ზე მოცემულია ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარის ცვლილება x ღერძის მიმართულებით i და j სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს. სამხრეთ-დასავლეთის ტალღების დროს მნიშვნელოვანია ნატანის მოძრაობა x ღერძის მიმართულებით. ამ დროს y ღერძის მიმართულებით ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე უმნიშვნელოა. ის გამოვლინდება წერტილებში $i=20-40$, $j=1-13$, რომელიც გამოწვეულია წყლის ღერძის გასწვრივ მოძრაობით (ნახ. 2.17). ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარის მაქსიმალური მნიშვნელობა იცვლება $-0,000001-0,000013 \text{მ}^2/\text{წმ}$ საზღვრებში.

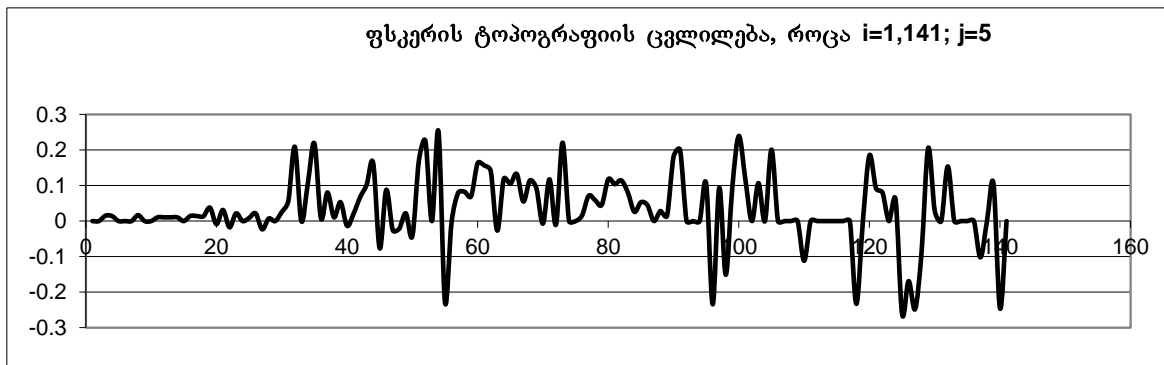
ზღვის სანაპირო ზოლის ტოპოგრაფიის ცვლილების ანგარიშის შედეგები მოცემულია ნახ. 2.18-ზე. უარყოფითი მნიშვნელობები შეესაბამება ნაპირის ეროზიას, დადებითი კი – აკუმულაციას. ის იცვლება -0,29 მ-დან 0,25 მ-მდე. ზვირთცემის ზონაში $i=100-141$, შეიმჩნევა ნაპირის ეროზია, აკუმულაციას კი ადგილი აქვს პორტის მოლთან.



ნახ. 2.16. ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე q_x ($მ^2/წმ$)



ნახ. 2.17. ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე q_y ($მ^2/წმ$)



ნახ. 2.18. ზღვის ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილება ($მ$).

მათემატიკური მოდელირება გვიჩვენებს, რომ ნატანის დეფიციტი მდინარე რიონის ქალაქის არხის შესართავ უბანში მიახლოებით შეადგენს $200\ 000\text{მ}^3/\text{წელი}$, ხოლო ნაპირის ეროზიის სიჩქარე არის $8\text{-}10\text{მ}/\text{წელი}$.

2.3. ფოთის პორტის შესასვლელი არხის მიმდებარე ტერიტორიის ლითოვანი მინერალის მათემატიკური მოდელი. მოსილვებისგან დაცვის საინჟინრო ღონისძიებები

ფოთის ნავსადგურის შემოსასვლელი არხის მოსილვისაგან დაცვის პრობლემა აქტუალური და მნიშვნელოვანია. მისი მოუგვარებლობის შემთხვევაში, ახლო მომავალში შესაძლოა ნავსადგურის ფუნქციონირების შეზღუდვა.

ტვირთბრუნვის გაზრდის შემთხვევაში, ნავსადგურს აქვს შემუშავებული არსებული პორტის ჩრდილოეთით, ნაბადის დელტის მიმართულებით გაფართოების გეგმა. ეს გეგმა გულისხმობს მდინარე რიონის ნაბადის არხის შესართავის მიმდებარე ტერიტორიიდან სამხრეთით არსებული პორტის მიმართულებით 2,5-3 კმ სიგრძის დამცავი მოლის მშენებლობას. ეს მოლი პორტის შემოსასვლელს ააცილებს რიონის ჩრდილოეთ არხიდან შემოტანილ ნატანს და ზემოთ აღნიშნული პრობლემები გარკვეულ წილად მოგვარებული იქნება.

იმ შემთხვევაში, როცა დამცავი მოლი არ შენდება, საჭიროა პროცესების შეწავლა და შესაბამისი საინჟინრო ღონისძიებების დასახვა.

პრობლემის შესწავლისას ვისარგებლოთ პორტის შესასვლელი არხის დინამიკის მათემატიკური მოდელირების მეთოდებით. ამოცანა დავყოთ სამ ეტაპად, რაც ნიშნავს, რომ თავიდან ამოვხსნათ ტალღების ორგანოზომილებიანი ამოცანა, შემდეგ მიღებული შედეგების გამოყენებით გამოვთვალოთ სანაპირო დინებები და ბოლოს ნატანის მოძრაობა [50,154].

როგორც ნატანის მასის მუდმივობის განტოლებიდანაა ცნობილი, წყლის სიღრმის ცვლილება შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად [1,6,7,8]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}, \quad (2.3.1)$$

სადაც x და y ჰორიზონტალური კოორდინატებია, q_x და q_y კი – ელემენტის საზღვრებში ნატანის მოძრაობის სიჩქარე x და y მიმართულებებით. მოძრაობის მოცულობითი სიჩქარეები (q_x, q_y) გამოისახება ელემენტის ვერტიკალური განივი კვეთის მიერ დროის ერთეულში გატარებული ეფექტური ნატანის მოცულობით.

ნატანის მოძრაობის სიჩქარის განსაზღვრისთვის მიღებულია ფორმულა [4,10]:

$$(q_x, q_y) = (q_{cx}, q_{cy}) + (q_{wx}, q_{wy}), \quad (2.3.2)$$

სადაც (q_{cx}, q_{cy}) გასაშუალებული დინებებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარეა, (q_{wx}, q_{wy}) კი – ტალღებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე.

დინებებით გამოწვეული ნატანის ტრანსპორტირების სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$q_{cx} = Q_c U, \quad q_{cy} = Q_c V, \quad Q_c = A_c (\tau_m - \tau_{cr}) / \rho g, \quad (2.3.3)$$

სადაც U და V გასაშუალებული დინებების სიჩქარეებია x და y მიმართულებით, A_c 0,1-1 რიგის უგანზომილებო კოეფიციენტი, τ_m – ტალღებისა და დინებების ერთობლივი მოქმედებით გამოწვეული ფსკერული ძვრის ძაბვის მაქსიმალური მნიშვნელობაა.

ფორმულებში, სადაც განისაზღვრება (q_x, q_y) , არ არის გათვალისწინებული ფსკერის დახრის ფაქტორი. მისი გათვალისწინებით მიიღება:

$$q'_x = q_x + \varepsilon_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q'_y = q_y + \varepsilon_s |q_y| \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.3.4)$$

და (2.3.1)-ის ნაცვლად მივიღებთ:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial q'_x}{\partial x} + \frac{\partial q'_y}{\partial y} \quad (2.3.5)$$

ამოხსნის ალგორითმი. შემოვიტანოთ (2.3.4) განტოლებებში აღნიშვნები:

$$A = q_x, \quad B = \varepsilon_s |q_x|, \quad C = q_y, \quad D = \varepsilon_s |q_y|.$$

და (2.3.5) გადავწეროთ შემდეგი სახით:

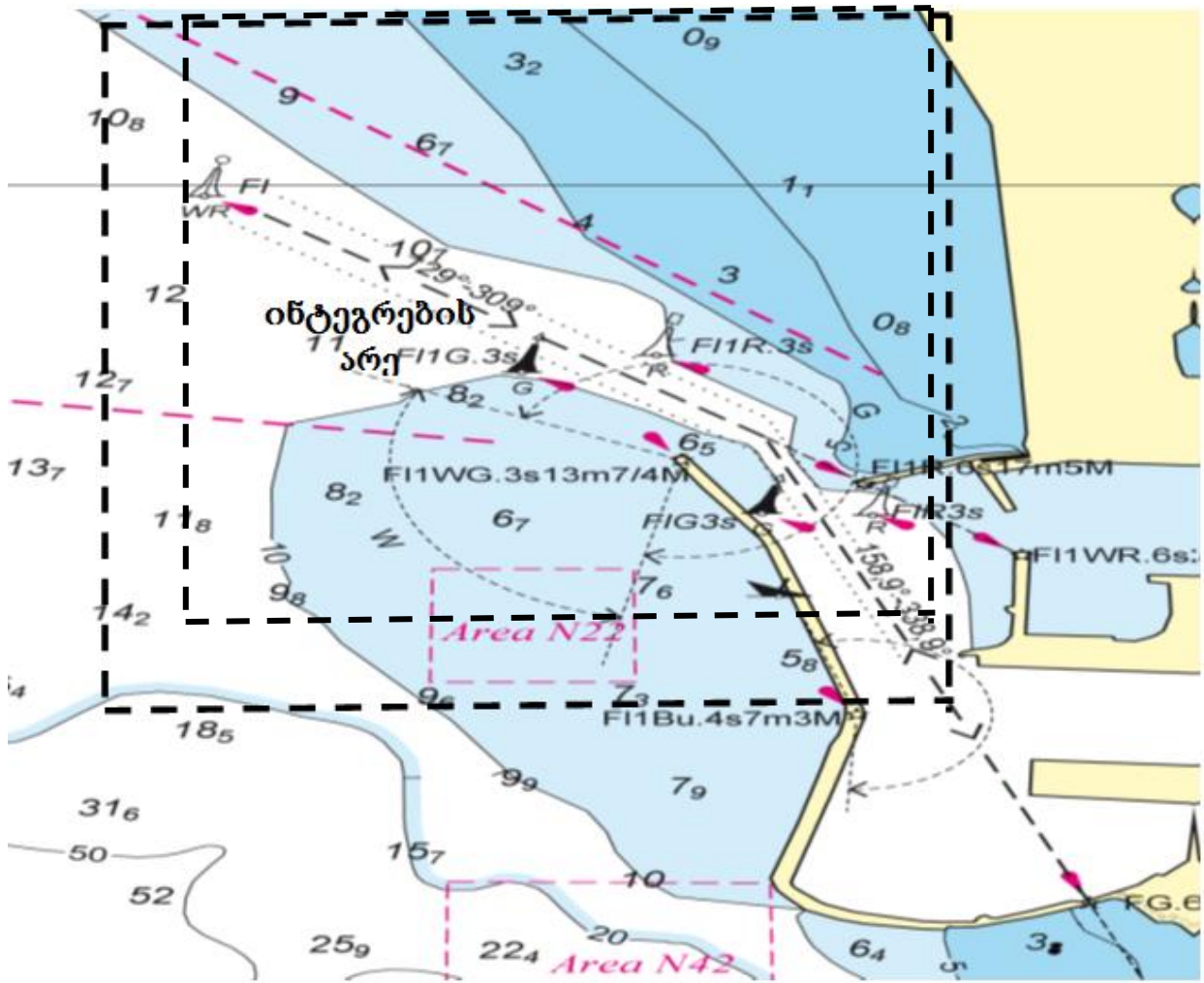
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A + B \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(C + D \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (2.3.6)$$

ამოცანის ამოხსნისას გამოიყენება იგივე ალგორითმი, რომელიც მოცემულია (2.2.3)-ში, ინტეგრების არე ნაჩვენებია ნახ. 2.19-ზე. საბოლოოდ ყოველი $(i, j) \in S^n$ - სთვის (2.3.6) ტოლობა ღებულობს სახეს:

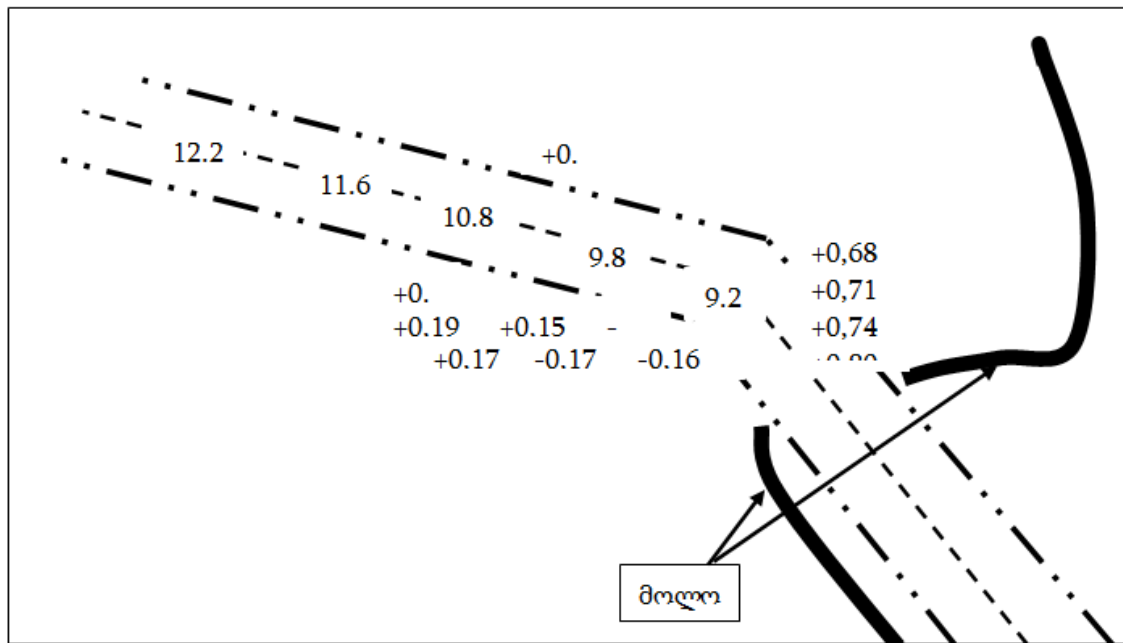
$$\theta \frac{dh_{i,j}}{dt} + E_1 h_{i,j} - E_2 h_{i+1,j} - E_3 h_{i,j+1} - E_4 h_{i-1,j} - E_5 h_{i,j-1} = F, \quad (2.3.7)$$

(2.3.7) განტოლების ამოხსნისას გამოყენებულია კრანკ-ნიკოლსონის სქემა, რომელიც უზრუნველყოფს დროში მეორე რიგის აპროქსიმაციას. მიღებული განტოლებები შესაბამისი სასაზღვრო და საწყისი პირობების დროს ეფექტურად იხსნება ზედა რელაქსაციის მეთოდით.

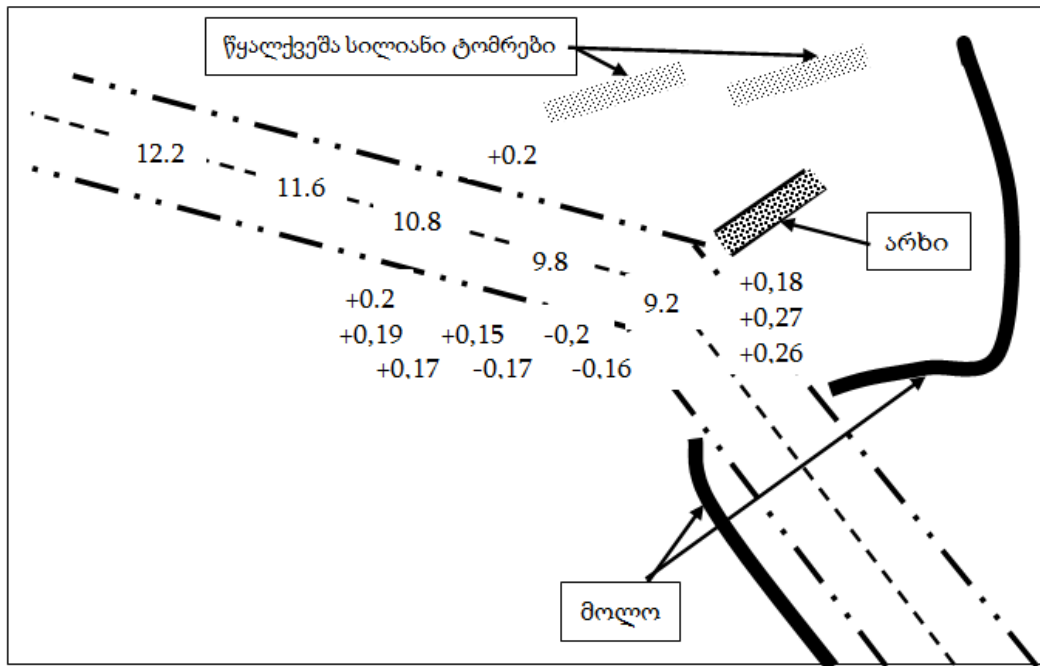
რიცხვითი გამოთვლების შედეგები მოცემულია ნახ. (2.20)-სა და (2.21)-ზე. სამოდელო დროა 48 საათი (ერთი შტორმი – 5-6 ბალიანი), დროის ბიჯი – 5 წუთი. ზღვის დონის საშუალო აწევის საწყისი სიდიდედ ანგარიშის დროს ვიღებთ 0,1მ-ს.



ნახ. 2.19. ინტეგრების არე, რომელიც მოიცავს პორტის შემოსასვლელ არხს (ნაჩვენებია წყვეტილი ხაზებით)



ნახ. 2.20. პორტის შემოსასვლელ არხში ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილება არსებული მდგომარეობის შემთხვევაში



ნახ.2.21. პორტის შემოსასვლელ არხში ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილება არხის გაკეთებისა და ტომრების განლაგების შემთხვევაში

პორტის შემოსასვლელ არხში ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილება არსებული მდგომარეობის შემთხვევაში მოცემულია ნახ.2.20-ზე. უარყოფითი მნიშვნელობები შეესაბამება ფსკერის ეროზიას, დადებითი კი აკუმულაციას. ის იცვლება 0,16მ-დან 0,80მ-მდე. ნატანის მნიშვნელოვან აკუმულაციას ადგილი აქვს პორტის შემოსასვლელი არხის მოსახვევში და იცვლება 0,68-დან 0,8 მეტრამდე (ნახ.2. 20).

ნახ. 2.21-ზე მოცემულია პორტის შემოსასვლელ არხში ფსკერის ტოპოგრაფიის ცვლილება წყალქვეშა არხის გაჭრისა და ტომრების განლაგების შემთხვევაში. როგორც ნახ. 2.21-დან ჩანს, არხის გაკეთებისა და ტომრების განლაგების შემთხვევაში, შემოსასვლელი არხის მოსახვევში დალექვის სურათი იცვლება და ის მოთავსებულია დიაპაზონში 0,18-0,26მ, ე. ი. შემცირდა დაახლოებით 60-70%-ით.

ამრიგად, ფოთის ნავსადგურის შემოსასვლელი არხის მოსილვისაგან დასაცავად საჭიროა:

1. პორტის ჩრდილოეთით გარკვეულ სიღრმემდე დამცავი მოლოს მშენებლობა, რომელიც შესასვლელ არხს ააცილებს ნატანის შეტანას და დაიცავს მას მოსილვებისგან.
2. იმ შემთხვევაში, თუ დამცავი მოლო არ აშენდება, მაშინ საჭიროა პორტის შესასვლელი არხის მიმდებარე ტერიტორიაზე წყალქვეშა არხის გაჭრა და გარკვეული წესით სილით ავსებული ტომრების განლაგება. გამოკვლევები გვიჩვენებს, რომ აღნიშნული ღონისძიება 60-70%-ით შეამცირებს დასილვების ინტენსივობას.

თავი 3. ნაკირღამცავ ღონისძიებათა წარუმატებლად განხორციელების მიზეზები და მათი აღმოფხვრის გზები მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავ აკვატორიებში

ნებისმიერი სამდინარო ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ხანგრძლივ და საიმედო ექსპლუატაციას გარდა, მისი კონსტრუქციული გადაწყვეტისა და მშენებლობის ხარისხისა ძალზე ხშირად განსაზღვრავს დაპროექტების სტადიაზე კალაპოტური პროცესების სწორი პროგნოზირება. ეს საკითხი, მიუხედავად მრავალი თეორიული მცდელობისა, ამჟამად ძირითადად წყდება ფიზიკური მოდელირების საფუძველზე, ჰიდრავლიკურ ლაბორატორიებში. მაგრამ ხშირად შეუძლებელია მოდელირების კრიტერიუმების სრული დაცვა და კალაპოტის გრუნტის სამოდელე მასალის იმგვარი შერჩევა, რომ მან უზრუნველყოს წარეცხვის პროცესების ადეკვატურობა ნატურასა და ჰიდრავლიკურ ლაბორატორიებში. შედეგად, ნაგებობის ექსპლუატაციის პერიოდში ადრე თუ გვიან შეიძლება განვითარდეს დაუშვებელი დეფორმაციები და იგი გამოვიდეს მწყობრიდან.

ამ მიზეზით, კერძოდ საქართველოში, მრავალი ჰიდროკვანძის ქვედა ბიეფი მნიშვნელოვნადაა დაზიანებული და საჭიროებს რეაბილიტაციას, მათ შორის განსაკუთრებით აღსანიშნავია მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავ აკვატორიებში არსებული წარეცხვები და მათი აღმოფხვრის მიზნით წარუმატებლად განხორციელებული საინჟინრო ღონისძიებები, რომლებიც ჩვენს მიერ მიმოხილული იყო I თავში. ქვემოთ მოგვყავს აღნიშნული ვითარებების გამომწვევი მიზეზების დეტალური ანალიზი და დასახული გვაქვს მათი აღმოფხვრის ჰიდრავლიკურად დასაბუთებული გზები.

3.1. კურორტ ანაკლიასთან სანაპირო ზოლის აღდგენის არსებულ ღონისძიებათა შეფასება და რეკომენდაციები

ამჟამად, ანაკლიასთან იგეგმება მსხვილი პორტის მშენებლობა. რისთვისაც აქ ხელსაყრელ პირობებს ქმნის ახლომდებარე ღრმაწყლიანი კანიონი, რადგანაც:

- ა) იქმნება პორტში დიდი წყალწყვის გემების შესვლის შესაძლებლობა;
- ბ) პორტში შესასვლელი არხს აღარ დასჭირდება მოსილვებისგან სისტემატური დაცვა, (როგორც ეს ხდება, ფოთის პორტის შემთხვევაში). ამასთან წყალქვეშა კანიონის არსებობა, ხელს უწყობს რა ზღვის ტალღების სიმაღლის კლებას კანიონის თავზე, მნიშვნელოვნად გააადვილებს პორტში გემების შესვლის პროცესს.

ანაკლიის პორტის მშენებლობა მდ. ენგურის შემცირებული ნატანის პირობებში ნაპირდაცვითი პრობლემების გადაწყვეტასაც შეუწყობს ხელს, რადგან შეიქმნება საპორტო აკვატორიიდან ამოღებული ინერტული მასალის გამოყენების შესაძლებლობა კურორტ ანაკლიის წარეცხილი ნაპირის აღსადგენად.

მაგრამ, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, არც ნაპირდაცვის არსებულ პროექტებში და არც ანაკლიაში საპორტო მშენებლობის საპროექტო წინადადებებში არ განიხილება ენგურის შესართავში წარმოქმნილი ქვიშის ზვინულის უარყოფით გავლენა ანაკლიის სანაპირო ზოლსა და, აგრეთვე, მომავალი პორტის შესასვლელ არხზე, იმ დროს, როდესაც ჯერ კიდევ გასული საუკუნის 80-იან წლებში საქართველოს ენერგეტიკისა და ჰიდროტექნიკური ნაგებობის სამეცნიერო კვლევით ინსტიტუტში შემოთავაზებული იყო (იდეის ავტორი ვ. საყვარელიძე) და ლაბორატორიულადაც გამოიცადა (კვლევებს ხელმძღვანელობდა შ. გაგოშიძე) მდინარე ენგურის ორგანიზებულად შეყვანა ზღვაში, შესართავში არსებული ქვიშის ზვინულში (ნახ.3.1) არხის გაჭრის მეშვეობით.

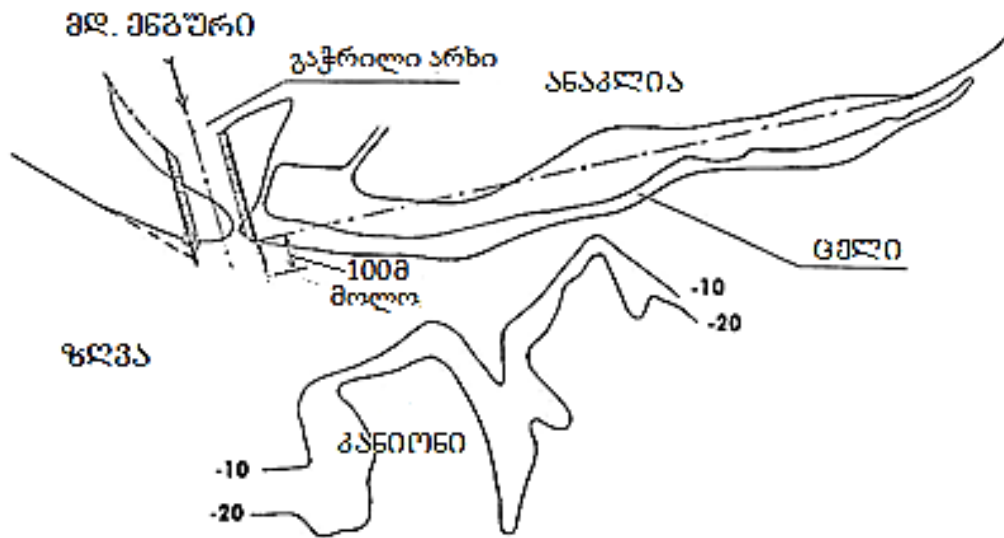


ნახ.3.1. ქვიშის ზვინული (ცელი) მდ. ენგურის შესართავში

ამ კვლევების მიზანი იყო ანაკლიის ნაპირის დაცვა მდინარე ენგურის ზღვაში შემავალი ნაპირგასწვრივი ნაკადის წამრეცი ზემოქმედებისგან და მდინარის თითქმის მუდმივად მღვრიე ჭავლის მიმართავა ზღვის დიდი სიღრმეებისკენ ისე, როგორც ეს ნახ.3.2-ზეა წარმოდგენილი.

ჩვენი გათვლებით ეს არხი ატარებს მდ. ენგურის 0,01% უზრუნველყოფის ხარჯს – $Q \approx 2550 \text{ მ}^3/\text{წმ}$. მას უნდა გააჩნდეს ტრაპეციული კვეთი და მოპირკეთდეს ბეტონის ფილებით (ან შემოიზღუდოს ტეტრაპოდებით). არხის სიგანე ფუძეში $b = 145 \text{ მ}$; ფერდობების დახრილობა $m_0 = 1,75$, არხის სიგრძე დაახლოებით უნდა უდრიდეს 300 მ-ს, ხოლო ფსკერის ქანობი $i = 0,001$, (რომელიც ბოლოში შეუუღლდება ზღვის

ფსკერს ქანობით $i_{\text{ფლ}} = 0,0153$). არხის, ისევე როგორც მდ. ენგურის კალაპოტისათვის, სიმქისის კოეფიციენტი $n = 0,036$.



ნახ.3.2. არხის გაჭრის სქემა მდ.ენგურის შესართავში, 1982 წ. [102]

თუ ვისარგებლებთ შეზის ცნობილი დამოკიდებულებით $Q = \omega \cdot C \sqrt{R \cdot i}$, (სადაც ω ცოცხალი კვეთის ფართობია; $C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}$ – მანინგის ფორმულით დადგენილი შეზის კოეფიციენტი; $R = \frac{\omega}{\chi}$ – ჰიდრაულიკური რადიუსი; χ – სველი პერიმეტრი) ადვილად დავრწმუნდებით, რომ აღნიშნული არხი $H = 6\text{მ}$ სიღრმითა და წყლის სარკის სიგანით $B = 166\text{მ}$ უზრუნველყოფს $Q = 2558\text{მ}^3/\text{წმ}$ ხარჯის შეუფერხებლად გატარებას ზღვაში. მაგრამ უფრო დიდი უზრუნველყოფის (ანუ უფრო მცირე ხარჯების) გავლის შემთხვევაში არხში ზღვის მხრიდან შესაძლებელია შემოიჭრეს როგორც ზედაპირული ტალღები, (რომლებიც უთუოდ გამოიწვევს არხის ფერდობების წარეცხვას, თუ ფერდობები შესაბამისად არ იქნა გამაგრებული), ასევე ზღვის მარილიანი წყლის ფსკერული ფენა (ჰალოსოლი), რომელიც ხელს შეუწყობს მყარი ნატანის დალექვას არხის კალაპოტში და დროთა განმავლობაში შეამცირებს მის გამტარუნარიანობას. ამავე დროს ეს ფენა (ჰალოსოლი) უვარგისს გახდის მდინარის ნაპირთან ახლომდებარე ჭების სასმელ წყალს.

აღნიშნულ არხში ჰალოსოლის შეჭრის გაბარიტების შესაფასებლად ვისარგებლოთ დანართ 5-ში შემუშავებული მეთოდით. ამისთვის წინასწარ ვადგენთ მდინარის წყლის სიჩქარის გასაშუალოებულ მნიშვნელობებს არხის მთელ $H = 6,0\text{მ}$ სიღრმეზე. საშუალო სიჩქარის ეს მნიშვნელობა ზღვის დონის მუდმივობის გამო

ნაკლებად ექვემდებარება ცვალებადობას მდინარის ხარჯების მთელ დიაპაზონში და განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$V_{\text{მდ}} = \frac{Q_{\text{მდ}}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{q_{\text{მდ}}}{H}, \quad (3.1)$$

სადაც $Q_{\text{მდ}}$ მდინარის ხარჯია; $\omega_{\text{max}} = 933 \text{ მ}^2$ წარმოადგენს შესართავში $H = 6 \text{ მ}$ სიღრმის ტრაპეციული არხის ცოცხალი კვეთის ფართს; მდინარის დაყვანილ ხარჯს ($q_{\text{მდ}}$) ვანგარიშობთ დამოკიდებულებით:

$$q_{\text{მდ}} = \frac{Q_{\text{მდ}}}{B_{\text{საშ}}} \quad (3.2)$$

სადაც $B_{\text{საშ}} = 0,5(145 + 166) = 155,5 \text{ მ}$.

არხში ზღვის წყლის (ჰალოსოლის) შეჭრას ადგილი არ ექნება, თუ მდინარის გასაშუალოებული სიჩქარის მნიშვნელობა გაუტოლდება ან გადააჭარბებს $V' \geq V_{\text{კრი}} = 0,959(g\sigma H)^{1/2}$ ფორმულით ნაანგარიშვე კრიტიკული სიჩქარის მნიშვნელობას (იხ. დანართ 5. 5.17), სადაც, ჩვენს შემთხვევაში, მდინარისა და ზღვის მარილიანი წყლის ხვედრით წონათა ფარდობა $\gamma'/\gamma = 0,983$, რის გამოც $\sigma = 1 - \gamma'/\gamma = 0,017$, ხოლო მდინარის კრიტიკული სიჩქარე

$$V_{\text{კრი}} = 0,959\sqrt{9,8 \cdot 0,017 \cdot 6} = 0,953 \text{ მ/წმ},$$

ეს სიჩქარე (3.1) დამოკიდებულების თანახმად არხის შესართავში მყარდება მაშინ, როცა არხი ატარებს $Q_{\text{მდ}} = 0,953 \cdot 933 = 895 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ ხარჯს. უფრო ნაკლები ხარჯების შემთხვევაში ჰალოსოლი ამა თუ იმ სიგრძეზე აუცილებლად შეიჭრება არხის ფსკერზე და გაჩერდება იქ, სადაც შესრულდება დანართ 5-ში მოყვანილი (5.12) დამოკიდებულება.

ვისარგებლოთ დანართების (5.12) დამოკიდებულებით ან ნახ.5.2 გრაფიკებით და განვსაზღვროთ ჰალოსოლის გაბარიტები არხში, როცა $Q_{\text{მდ}} < 895 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ -ზე ანგარიშის დემონსტრაციას ვატარებთ იმ შემთხვევისთვის, როცა ხარჯი მდ. ენგურის კალაპოტში $Q_{\text{მდ}} = 50 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ (დაყვანილი ხარჯი $q_{\text{მდ}} = 50/155,5 = 0,322 \text{ მ}^2/\text{წმ}$). მაშინ დანართების (5.14) და (5.16) -ის თანახმად ვღებულობთ

$$Fr_0 = \frac{0,322^2}{9,8 \cdot 6^3} = 4,9 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{h_0}{H_0} = 1 - 1,01 \left(\frac{0,322}{6(9,8 \times 0,017 \times 6)^{1/2}} \right)^{2/3} = 0,857$$

საიდანაც ვადგენთ, რომ ჰალოსოლის (ზღვის წყლის) ფენის სიღრმე არხის შესართავ კვეთში

$$h_0 = 0,857 \times 6 = 5,13 \text{ მ.}$$

თუ ჩავთვლით მდინარის წყლის ტემპერატურას 20°-ის ტოლად, მაშინ მისი კინემატიკური სიბლანტის კოეფიციენტი $\nu = 10^{-6}$ [10, 78,174], ხოლო ხახუნის კოეფიციენტი მტკნარი და მარილიანი წყლების გამყოფ ზედაპირზე, დანართების (5.15) დამოკიდებულების თანხამად,

$$\chi = 0,04 \left(\frac{0,322}{10^{-6}} \right)^{1/4} = 0,0017 .$$

ამის შემდეგ ვანგარიშობთ უგანზომილებო კომპლექსს

$$4\chi \cdot \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{Fr_0}{l_0} = 4 \times 0,0017 \times \frac{1-0,017}{0,017} \times \frac{4,9 \times 10^{-5}}{0,001} = 0,0193 ,$$

რის საფუძველზეც, იგივე ნახ. 5.2 გრაფიკების დახმარებით $h_0/H_0 = 0,857$ -ის შემთხვევაში, ვადგენთ, რომ $i_0 \frac{L}{H_0} = 0,67$ და საბოლოოდ ვღებულობთ, რომ ჰალოსოლის სიგრძე მდინარის კალაპოტში, როცა მდინარის ხარჯი $Q = 50$ მ³/წმ, აღწევს

$$L = 0,67 \times \frac{6}{0,001} = 4020 \approx 4 \text{ კმ-ს.}$$

ცხრილ 3.1-ში მოყვანილია ჰალოსოლის მაქსიმალური სიღრმისა და სიგრძის ასეთივე გაანგარიშების შედეგები მდ. ენგურის შესართავში გაჭრილი არხით წყალმცირობის სხვადასხვა ხარჯების გატარებისას. ხოლო ცხრილ 3.2-ში – მდ. ენგურის შესართავში სხვადასხვა უზრუნველყოფის ხარჯების გავლისას მტკნარი და მარილიანი წყლის სიღრმეებისა და მტკნარი წყლის მაქსიმალურ სიჩქარეთა მნიშვნელობები არხში ჰალოსოლის შეჭრის გათვალისწინებით.

ცხრილი 3.1

მდინარის ხარჯი Q , მ ³ /წმ	0	25	50	100	250	420	650	895
ჰალოსოლის საწყისი სიღრმე არხში h_0 , მ	6	5,5	5,13	4,6	3,5	2,5	1,6	0
ჰალოსოლის შეჭრის სიგრძე კალაპოტში L , კმ	6	4,5	4	3,4	2,3	1,5	0,96	0

ცხრილი 3.2.

უზრუნველყოფა, %	0,01	1	2	5	8	20	100
მდინარის ხარჯები, მ ³ /წმ	2500	1318	1190	1030	420	250	50
ჰალოსოლის მაქსიმალური სიღრმე არხის შესართავში, მ	0	0	0	0	2,5	3,5	5,1
მტკნარი წყლის მინიმალური სიღრმე არხში, მ	6	6	6	6	3,5	2,5	0,9
მდინარის წყლის მაქსიმალური სიჩქარე არხის შესართავში, მ/წმ	2,68	1,41	1,28	1,1	0,75	0,62	0,35

აუცილებლობის შემთხვევაში მდინარის კალაპოტში შესაძლოა აღიკვეთოს ზღვის მარილიანი წყლის შეჭრა, ამისთვის არხის შესართავიდან დაახლოებით 450 მ-ში შეიძლება მოეწყოს წყალქვეშა ზღუდარი, რომლის ქიმის ნიშნული უნდა აჭარბებდეს ამ კვეთში ჰალოსოლის მაქსიმალურ მოსალოდნელ დონეს (სიღრმეს). მდინარის 100% უზრუნველყოფის 50 მ³/წმ ხარჯის შემთხვევაში გამომდინარე დანართების (5.11) დამოკიდებულებიდან ეს სიღრმე ტოლია:

$$h = 6 - 0,001 \cdot 450 - [4 \cdot 0,0017 \cdot 57,82 \cdot \frac{0,322^2}{9,8} \cdot 450 + (6 - 5,13)^4]^{1/4} = 4,3 \text{ მ.}$$

ამრიგად, ზღუდარის ამალემა ფსკერიდან უნდა შეადგენდეს 4,3 მ-ს, ხოლო მისი ქიმის ნიშნული (ჩაღრმავება), ათვლილი ზღვის ნულოვანი დონიდან – $\nabla_{\text{ზღუდ.}} = -1,25 \text{ მ-ს}$. ვინაიდან, მდინარე ენგურის კალაპოტის სიგანე არხის შესართავიდან 450 მ-ში დაახლოებით 500 მ-ს ტოლია, ამგვარი წყალქვეშა ზღუდარის მოწყობა არ გამოიწვევს წყლის დონის მნიშვნელოვან შეტბორვას კალაპოტში 2550 მ³/წმ ხარჯის გავლის შემთხვევაშიც. ამაში ადვილად დავრწმუნდებით, თუ შევადარებთ 500 მ სიგანის ზღუდარის თავზე ნაკადის კრიტიკულ სიღრმეს

$$h_{\text{კრ.}} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} = \sqrt[3]{\frac{2500^2}{500^2 \cdot 9,8}} = 1,4 \text{ მ-ს}$$

მდინარის მტკნარი წყლის წყნარი დინების იმ სიღრმეს – $6 - 4,3 = 1,7 \text{ მ-ს}$, რაც უნდა დამყარდეს დაძირული ზღუდარის თავზე*.

ახლა ვაჩვენოთ, თუ დაახლოებით როგორ უნდა ჩატარდეს არხის ფერდობების წარეცხვისგან დაცვის ანგარიში არხში ზღვის მხრიდან ტალღების მოსალოდნელი შემოჭრის გათვალისწინებით. ანგარიში ჩავატაროთ არხში მდინარის 1% უზრუნველყოფის ხარჯის – $Q = 1190 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ გავლის შემთხვევისთვის. ამ დროს ცხრ. 3.2-ის თანახმად არხში არ ხდება ჰალოსოლის შემოჭრა, მაგრამ ვინაიდან ტალღების ბლოკირების სიჩქარე (იხ. დანართი 5.2)

$$U = \sqrt{\frac{2}{3} g H} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot 9,8 \cdot 6} = 6,26 \text{ მ/წმ} \quad (3.3)$$

აჭარბებს მდინარის წყლის სიჩქარეს არხში 1,28 მ/წმ (ცხრ. 3.2) ლეღვისას შესაძლოა ადგილი ჰქონდეს ტალღების შეჭრას არხში ზღვის მხრიდან, რაც კიდევ უფრო მეტად გააძლიერებს კალაპოტის ფერდობებისა და ფსკერის წარეცხვის პროცესებს, რომელთა არაგამრეცხი სიჩქარე სოფელ ანაკლიასთან არის $v = 0,7 \text{ მ/წმ}$ ($< 1,28 \text{ მ/წმ}$).

არხის ფერდობები შეიძლება დაცული იყოს ბეტონის ფილებით. გამარტივებული გაანგარიშების საფუძველზე შევაფასოთ ამ ფილების საჭირო სისქე ფერდობის

* ანგარიში საჭიროებს დაზუსტებას დეტალური პროექტირებისას.

ჩაღრმავების სხვადასხვა ნიშნულზე მაშინ, როცა ზღვის მხრიდან ადგილი აქვს $h = 0,8$ მ სიმაღლისა და $\lambda = 39$ მ სიგრძის სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულების ტალღების ფრონტალურ შეჭრას.* ნახ. 3.3-ზე წარმოდგენილი საანგარიშო სქემის შესაბამისად ჩაანკერების გარეშე სანაპირო ფერდობზე მიფენილი d სისქის ფილის წონასწორობა უზრუნველყოფილი იქნება მაშინ, როცა წყლით დაფარული ფილის ნებისმიერ წერტილში ფერდობის სიბრტყის ნორმალური მიმართულებით შესრულდება უტოლობა:

$$P_{\text{ფ}} \leq F + P, \quad (3.4)$$

სადაც $P_{\text{ფ}}$ არის ფილტრაციული უკუწნევა ფილის საანგარიშო კვეთის ძირში, რომელიც ჩაღრმავებულია არხში წყლის გასაშუალოებული (შეუშვოთებელი) დონიდან $H + d \cos \theta_0$ სიდიდით, სადაც θ_0 სანაპირო ფერდობის დახრის კუთხეა ჰორიზონტთან. ფილტრაციული წნევის დანაკარგების უგულვებელყოფით (ნახ. 3.3)

$$P_{\text{ფ}} = \gamma(H + d \cos \theta_0) \quad (3.5)$$

სადაც γ – წყლის ხვედრითი წონაა; d – ფილის სისქე; F -ით აღნიშნულია საანგარიშო კვეთზე მოსული ფილის წონის მდგენელი

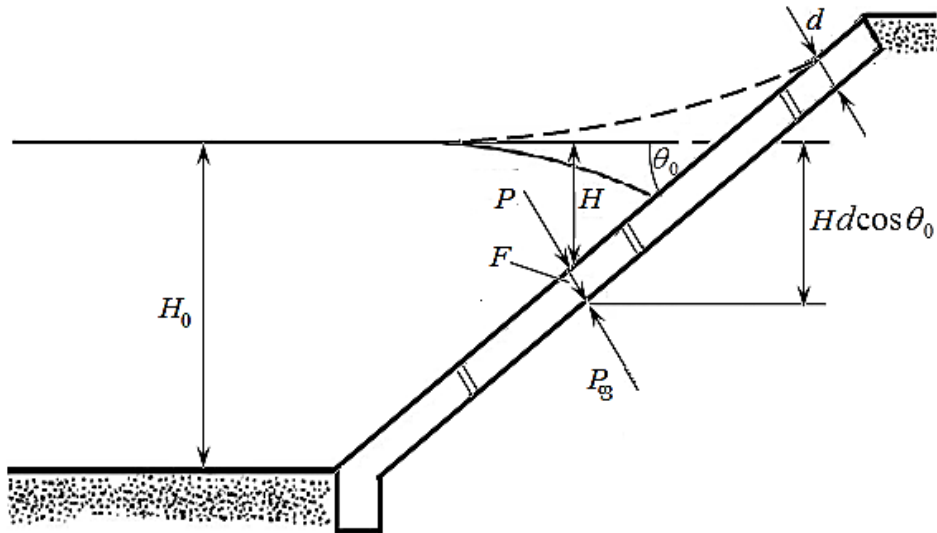
$$F = \gamma_s d \cos \theta_0, \quad (3.6)$$

სადაც γ_s არის ფილის მასალის ხვედრითი წონაა; P – ჰიდროსტატიკურ და ჰიდროდინამიკურ წნევათა ჯამი ფილის საანგარიშო კვეთის თავზე, რომელიც განპირობებულია არხში U_0 სიჩქარით მოძრავ ნაკადზე ტალღების ზედდებით. ფილის ზედაპირის H სიღრმეზე ჩაღრმავებულ წერტილში ეს წნევა იანგარიშება შემდეგი გამოსახულებით:

$$P = \gamma H + \gamma A \sin(\sigma t - kx) - \gamma \frac{U_0^2}{2g} \quad (3.7)$$

სადაც A ფერდობზე ტალღის ცვალებადი ამპლიტუდაა, რომელიც საჭიროებს დადგენას გამომდინარე ზღვის მხრიდან შემოჭრილი ტალღის პარამეტრებიდან; დანართის (3.7)-ში მიჩნეული უნდა იქნას, რომ $\sin(\sigma t - kx) = -1$, რადგან ამ შემთხვევაში, ანუ ტალღის ფსკერის გავლისას ფილას ექმნება ყველაზე უფრო სახიფათო მდგომარეობა ამოვარდნის ან ამოტეხვის თვალსაზრისით.

* ტალღების ეს პარამეტრები დაახლოებით შეესაბამება ანაკლიის მისადგომებთან ს.დ. მიმართულების 6 ბალიან შტორმს, რომელის დროს ტალღის საანგარიშო სიმაღლე ღია ზღვაში აღწევს 4 მ-ს, ხოლო სიგრძე - 80 მ-ს, მაგრამ მდ. ენგურის შესართავთან მიახლოებისას ამ ტალღების სიმაღლე და სიგრძე, მკვეთრად მცირდება შესართავთან უშუალოდ მიჯრილი წყალქვეშა კანიონის არსებობის გამო [78].



ნახ.3.3. არხის სანაპირო ფერდობის ფილებით გამაგრების გამარტივებული საანგარიშო სქემა ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედების გათვალისწინებით

(3.5)-(3.7) ტოლობათა გათვალისწინებით (3.4) პირობა გვამღევს არხის ნაპირსამაგრი ფილის მინიმალური ზღვრული სისქის საანგარიშო შემდეგ დამოკიდებულებას:

$$d = \frac{\gamma}{(\gamma_s - \gamma) \cos \theta_0} \left(A + \frac{U_0^2}{2g} \right). \quad (3.8)$$

(3.8) დამოკიდებულების თანახმად ფილის სისქე იზრდება არხის განივად ფერდობზე ტალღის ამპლიტუდის ზრდასთან ერთად და აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას, როცა წყლის სიღრმე ფერდობზე $H = A_{\max}$, სადაც A_{\max} – ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდაა. აღნიშნულ არხში A -ს დასადგენად ვისარგებლოთ დანართ 3.2-ში მოცემული მეთოდით. ამისათვის დანართის (3.56) ფორმულით საანგარიშევი ტალღის სიგრძის ზღვრული მნიშვნელობა

$$\lambda_{\text{ზღ}} = \frac{6,28 \cdot 6}{\left(0,5 + \frac{3,14^2}{4 \cdot 1,05^2} \right) \cos 1,05} = 27,6 \text{ მ},$$

(რომელშიც $\alpha_0 = \frac{\pi}{2} - \theta_0 = 1,57 - 0,52 = 1,05$ რად., ვინაიდან $m_0 = 1,75$), შევადაროთ ზღვის მხრიდან არხში შეჭრილი ტალღის სიგრძეს - $\lambda = 39$ მ-ს. ვინაიდან $\lambda > \lambda_{\text{ზღ}}$ და ამავე დროს $\lambda < B$, (სადაც $B = 166$ მ – არხში წყლის სარკის ზედაპირის სიგანეა), ზღვიდან შემოჭრილი ტალღები დაიკავებს არხის მთელ სიგანეს, მაგრამ უშუალოდ სანაპირო ფერდობზე მოხდება მათი ამპლიტუდის – $a_0 = h/2 = 0,8/2 = 0,4$ – მატება ფერდობზე ნაკადის სიღრმის კლებასთან ერთად. ფერდობზე ტალღის ამპლიტუდის

ამ ცვალებადობას ვანგარიშობთ დანართების (4.7) და (3.39) დამოკიდებულებით, რისთვისაც წინასწარ ვადგენთ მათში შემავალი შემდეგი პარამეტრების მნიშვნელობებს:

$$k = 2\pi / \lambda = 6,28 / 39 = 0,161; \quad \alpha_0 = 60,2^\circ; \quad \cos \alpha_0 = 0,497;$$

$$kH_0 = 0,161 \cdot 6 = 0,966; \quad \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = \frac{0,966}{0,497} = 1,944; \quad \coth 3,89 = 1,0; \quad \sinh 3,89 = 24,45.$$

მაშინ (3.39) დამოკიდებულების თანახმად, ფერდობზე ტალღის ამპლიტუდის ცვალებადობის კოეფიციენტი

$$m = \left[\frac{1,944 \cdot 1,0 - 0,5}{1 + 3,89 / 24,45} \right]^{1/2} = 1,12.$$

შესაბამისად $\cos m\alpha_0 = \cos(1,12 \cdot 60,2^\circ) = 0,38$

(4.7) დამოკიდებულების თანახმად, ნაპირგასწვრივი ტალღის ამპლიტუდა სანაპირო ფერდობის H სიღრმით ჩაღრმავებულ ნებისმიერ წერტილში

$$A = a_0 \frac{\cosh(k \frac{H_0 - H}{\cos \alpha_0})}{\cosh(kH_0)} \cdot \frac{1}{\cos m\alpha_0} \quad (3.9)$$

აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას უშუალოდ ნაპირის ხაზის გასწვრივ, ანუ როცა $H = 0$, ამიტომ

$$A_{\max} = 0,4 \frac{\cosh 1,944}{\cosh 0,966} \cdot \frac{1}{0,38} = 0,4 \frac{3,56}{1,5} \cdot \frac{1}{0,38} = 2,5 \text{ მ.}$$

ფერდობთან ტალღის ამპლიტუდის ამგვარი ინტენსიური მატების გამო ტალღები არხის ნაპირის გასწვრივ ვრცელდება დამსხვრეული ქიმებით.

იგივე (3.9)-ის თანახმად ტალღის ამპლიტუდა $H = A_{\max}$ სიდიდით ჩაღრმავებულ ფილის თავზე

$$A = 0,4 \frac{\cosh 0,161 \frac{6 - 2,5}{0,497}}{\cosh 0,161 \cdot 6} \cdot \frac{1}{0,38} = 0,4 \cdot \frac{1,71}{1,5} \cdot \frac{1}{0,38} = 1,2 \text{ მ.}$$

თუ ამავე დროს მივიჩნევთ, რომ $\gamma = 1 \text{ ტ/მ}^3$ $\gamma_s = 2,6 \text{ ტ/მ}^3$; $U_0 = 1,28 \text{ მ/წმ}$, ამ სიდიდის გათვალისწინებით (3.8) დამოკიდებულებიდან მივიღებთ, რომ წყლის ზედაპირიდან ფერდობის $H = 2,5 \text{ მ}$ ჩაღრმავებამდე მაინც ფილის (ან ბლოკების) სისქე უნდა აჭარბებდეს

$$d = \frac{1}{(2,6 - 1)} \frac{1}{\cos 29,8^\circ} \left(1,2 + \frac{1,28^2}{2 \cdot 9,8} \right) = 0,72 \cdot 1,28 = 0,92 \text{ მ-ს.}$$

მარაგის 1,1 კოეფიციენტით $d = 1,0 \text{ მ-ს}$. ამ სისქის ბლოკებით არხის სანაპირო ფერდობი უნდა გამაგრდეს $H = 3 \text{ მ}$ ჩაღრმავებამდე. ფერდობის 3-დან 4 მ-მდე

ჩაღრმავების დიაპაზონში (3.3) დამოკიდებულებაში მივიჩნევთ, რომ $H = 3$ მ-ს, და ვღებულობთ

$$A = 0,4 \frac{\cosh 0,161 \frac{6-3}{0,497}}{1,5} \cdot \frac{1}{0,38} = 0,7 \cdot \cosh 0,97 = 0,7 \cdot 1,5 = 1,06 \text{ მ,}$$

ხოლო ფილის სისქე, (3.8)-ის თანახმად,

$$d = 0,72 \cdot (1,05 + 0,008) = 0,76 \text{ მ.}$$

მარაგით ვნიშნავთ $d = 0,84$ მ-ს, (ანუ არხის ფერდობის 3-დან 4მ ჩაღრმავებაზე ბლოკების სისქეს ვამცირებთ 0,16 მ-ით).

შესაბამისად ვანგარიშობთ ფერდობის დამცავი ფილების სისქეს 4-დან 5 და 5-დან 6 მ ჩაღრმავებებზე (ცხრ.3.3).

ცხრილი 3.3

არხის სანაპირო ფერდობის ჩაღრმავება შეუშფოთებელი ზედაპირიდან, H მ	0 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6
გამაგრების ბლოკების სისქე d მ,	1,0	0,84	0,7	0,57

ნაპირგასწვრივი მიმართულებით ბლოკის სიგრძეს ვნიშნავთ კონსტრუქციულად. ამრიგად, შეიძლება ჩამოვაცალიბოთ შემდეგი სახის რეკომენდაციები:

1. საჭიროა განხორციელდეს მდინარე ენგურის ორგანიზებული შეყვანა ზღვაში ხელოვნურად გაჭრილი არხის მეშვეობით. ზემოთ მოყვანილი ჰიდრავლიკური გაანგარიშებების თანახმად ტრაპეციული არხს, გათვლილს მდინარის საანგარიშო კატასტროფულ ხარჯზე – 2550 მ³/წმ-ზე, უნდა ჰქონდეს: სიგრძე 500 მ; სიგანე ფსკერზე 145 მ; სიგანე წყლის ზედაპირზე 166 მ; ნაკადის სიღრმე საწყისს კვეთში 6 მ; ფსკერის ქანობი 0,001; ფერდების დახრილობა 1,75; სიმქისის კოეფიციენტი 0,036; ხოლო არხში ნაკადის მაქსიმალური სიჩქარე არ უნდა აჭარბებდეს 1,6 მ/წმ-ს.

2. სასურველია არხის ფერდოები მოპირკეთდეს ფილებით ან დაიფაროს ტეტრაპოდებით;

3. რადგან წყალქვეშა ბანკეტების მოწყობა არ ასრულებს არსებით როლს ანაკლიის ნაპირის აღდგენაში, ნაპირის დაცვა უმჯობესია განხორციელდეს მხოლოდ ინერტული მასალის დაყრით სანაპირო ზოლში, „საქზღვანაპირდაცვის“ რეკომენდაციების შესაბამისად;

4. მდინარის ნაკადით ანაკლიის ტერიტორიის დატბორვისგან დაცვის მიზნით, მდინარის შესართავში გაჭრილი არხის მარცხენა ბორტი სასურველია შეუუღლდეს კანიონთან მიმდებარე პირველ წყალქვეშა ტალღამტეხ ბარიერს აგებულს „DOHWA Engineering“- ის პროექტით.

3.2. ქალაქ ფოთის წარეცხილი საზღვაო ნაპირის სარეაბილიტაციო ღონისძიებები

როგორც თავ 1-ში აღვნიშნეთ, XX საუკუნის 50-იან წლებში ქალაქ ფოთიდან მე-7 კილომეტრზე აშენდა წყალგამყოფი ჰიდროკვანძი, რომელმაც მდ. რიონი მიმართა ფოთის პორტის ჩრდილოეთით დაუსახლებელი ტერიტორიების გავლით. ხოლო ქალაქის არხით ტარდებოდა მხოლოდ 400 მ³/წმ-მდე ხარჯი, რომელსაც უნდა უზრუნველყო ნატანის ადრე არსებული ბალანსის შენარჩუნება. ამ საკმაოდ ძვირადღირებული პროექტის განხორციელებით მართალია, ქალაქის ტერიტორიები გადაურჩა დატბორვებს, მაგრამ სამაგიეროდ ვერ შენარჩუნდა სანაპირო ზოლის სტაბილურობა და ზღვის ქვეშ მოექცა საშუალოდ 2 კმ სიგანის სანაპირო ზოლი. ამასთან, დაისილა ჩრდილოეთით მდ. რიონის ახალი შესართავი უბანი, რამაც უარყოფითი ზეგავლენა მოახდინა ფოთის ნავსადგურის შესასვლელი არხის ქმედითუნარიანობაზე და აქედან გამომდინარე, გამოიწვია პორტის საექსპლუატაციო ხარჯების ზრდა.

ფოთის სანაპირო ზოლში, ნავსადგურიდან მდ. რიონის შესართავამდე, მოსახლეობა იძულებული იყო გადასახლებულიყო. მიუხედავად იმისა, რომ 80-იან წლებში ნაპირის წარეცხვის პროცესების შესაჩერებლად სანაპირო ზოლის მთლიან პერიმეტრზე ჩაიყარა ქვის უზარმაზარი ლოდები. ისინი მალე ჩაიძირა წყლით გაჯერებულ წვრილ ქვიშაში და ზღვამ მაინც განაგრძო ფოთის ნაპირის წარეცხვა. ამჟამად ფოთს ფაქტობრივად არ აქვს პლაჟის ვიწრო ზოლიც კი და კვლავ გრძელდება ზღვის შემოტევა.

ფოთის სანაპირო ზოლის დაცვის მიზნით, 80-იან წლებში სხვა სამეცნიერო-კვლევით ორგანიზაციებთან ერთად მონაწილეობას იღებდა საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის „ჰიდრაულიკისა და ჰიდრომანქანების“ კათედრის თანამშრომლები, რომლებმაც პროფესორების გ. რურუას და ნ. დანელიას ხელმძღვანელობით შეიმუშავეს ფოთთან მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის რაბ-რეგულატორის ექსპლუატაციის ისეთი რეჟიმები, რომლებსაც უნდა აღმოეფხვრათ ზემოაღნიშნული (იხ. თავი 1) ნეგატიური პროცესები.

ეს რეჟიმები გულისხმობდა:

1. ქალაქის არხში მდინარის წყალდიდობის ნატანით გაჯერებული ხარჯის გატარებას სათავე ნაგებობიდან (ნახ.3.4.) მხოლოდ მაშინ, როდესაც ზღვა იმყოფება წყნარ მდგომარეობაში (რადგან მხოლოდ ამ პირობებშია შესაძლებელი ნატანის

აკუმულაცია შესართავ უბანში. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ანუ როცა ზღვა დელავს, მდინარის წყალდიდობის ხარჯის გავლისას იზრდება შესართავი უბნის წარეცხვების ინტენსივობა).

2. წყალდიდობის ხარჯის გავლის შემდეგ, ზღვის ფრონტალური და რეფრაგირებული ტალღების მეშვეობით ხდება მდინარის ნატანის გადანაწილება და ზღვის სანაპირო ზოლის (პლაჟის) ზრდა.

აღნიშნული რეკომენდაციები განხორციელდა კიდეც, მაგრამ დროის მცირე მონაკვეთში, რადგან 90-იანი წლების დასაწყისში შეწყდა როგორც სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოები, ასევე წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის ექსპლუატაცია აღნიშნული რეჟიმით. მიუხედავად ამისა, მდ. რიონის შესართავ უბანთან, მართლაც აღინიშნა ზღვის ნაპირის სტაბილური ზრდა, განსაკუთრებით ქალაქის არხის შესართავთან აშენებულ შუქურასთან.



ნახ. 3.4. წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის რაბ-რეგულატორის ხედი ქვედა ბიეფიდან

80-იან წლებში ტექნიკურ უნივერსიტეტში ჩატარებული ლაბორატორიული და საველე კვლევების შედეგი, დაფუძნებული ზემოთ ჩამოთვლილ ავტორთა მოსაზრებებზე, სრულ შესაბამისობაში აღმოჩნდა (როგორც ეს ქვემოთაა ნაჩვენები) რუსთაველის ფონდის 2011 წლის გრანტ 480-ის ფარგლებში ჩვენ მიერ მიღებულ თეორიულ შედეგებთან [10].

ნათქვამის საილუსტრაციოდ, ვისარგებლოთ მდინარეთა შესართავ უბნებში, სითხის ნაწილაკთა სიჩქარის, დანართ 2-ში მოყვანილი (2.68) დამოკიდებულებით:

$$U = U_0 - a_0 \frac{\sigma}{\sqrt[4]{(k_0 H)^3}} \left(\frac{U_0}{\sqrt{gH}} \pm 1 \right) \sin \left(\sigma - \frac{\sigma U_0}{g i_0} \pm 2 \sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}} \right),$$

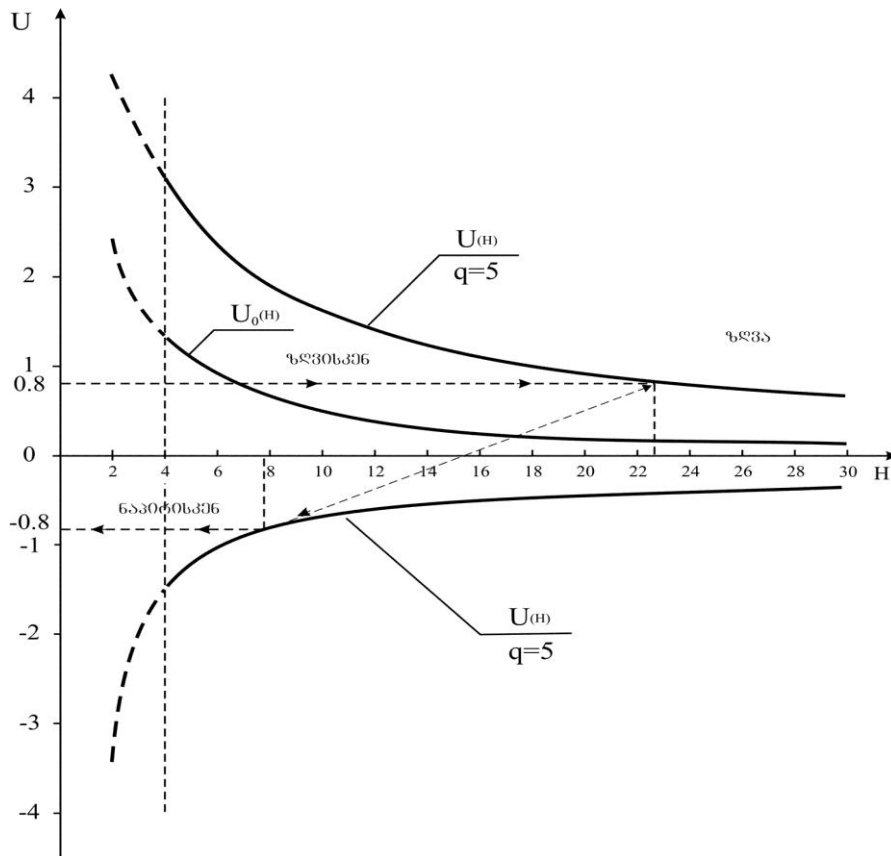
და ავანოთ ფოთის საქალაქო არხის შესართავ აკვატორიაში სითხის ნაწილაკების მაქსიმალურ სიჩქარეთა განაწილების მრუდები, როგორც ზღვაზე ღელვის პროცესში, ასევე წყნარი ზღვის (ე.წ. შტილის) პირობებში.

ფოთის საქალაქო არხის სიგანე – $b_0 = 80$ მ; სიღრმე – $H_0 = 4$ მ; გასატარებელი ხარჯი $Q = 400$ მ³/წმ; დაყვანილი ხარჯი $q = 5$ მ²/წმ; არხის შესართავ აკვატორიაში ზღვის ფსკერის ქანობი $i_0 = 0,0067$, პლაჟწარმომქმნელი ნატანის გამრეცხი სიჩქარე $U_{\text{გამ}} = 0,8$ მ/წმ.

ვთქვათ, ზღვის მხრიდან შესართავისკენ მოემართება რეგულარული ტალღები, რომელთა სიმაღლე ნაპირიდან შორს, ღრმა წყალზე $h_0 = 2$ მ (ამპლიტუდა $a_0 = 1$ მ), სიგრძე $\lambda_0 = 108$ მ; (შესაბამისად, ტალღური რიცხვი $k_0 = 2\pi/\lambda_0 = 0,058$ მ⁻¹), ტალღურ რხევათა პერიოდი $\tau = 8,26$ წმ, (სიხშირე $\sigma = 2\pi/\tau = 0,76$ წმ⁻¹).

ნახ. 3.5-ზე ნაჩვენებია (2.68) დამოკიდებულებით აგებული ნაპირისაკენ მიმართული ღელვისას წყლის ნაწილაკთა დადებითი (ზღვისკენ მიმართული) და უარყოფითი (ნაპირისკენ მიმართული) მაქსიმალური სიჩქარეების ცვლილების მრუდები შესართავ აკვატორიაში, ზღვის სხვადასხვა სიღრმეებისათვის, როცა (დან. 2.68)-ში აიღება ზედა „+“ ნიშანი, და ამავე დროს $\sin(\sigma - (\sigma U_0 / g i_0) \pm 2\sqrt{k_0 x / i_0}) = -1$, ანუ, როცა ნაპირისკენ გადაადგილდება ტალღის ფსკერი და $\sin(\sigma - (\sigma U_0 / g i) \pm 2\sqrt{k_0 x / i_0}) = +1$, ანუ როცა ხდება ტალღის ქიმის გადაადგილება შესართავისკენ, დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით.

ნატანგამრეცხი სიჩქარის ამსახველი წრფეების გადაკვეთა აღნიშნულ მრუდებთან და აგრეთვე მდინარის ჭავლის U_0 სიჩქარის ცვლილების მრუდთან გვიჩვენებს, რომ მოცემული ღელვის შედეგად ნატანი ინტეგრალურად გადაიტანება $H = 22$ მ სიღრმემდე, რაც ნაპირის ხაზიდან დაშორებულია დაახლოებით 2,7 კმ მანძილზე, იმ დროს, როდესაც წყნარი ზღვის პირობებში ($\sigma = 0$) მდინარის მიერ გამოტანილი ნატანი დაილექებოდა $H = 5/0,8 = 6,25$ მ სიღრმეზე, ანუ გაცილებით ახლოს, ნაპირიდან მაქსიმუმ 335 მ მანძილზე, რაც შემდგომ მართლაც მოხმარდება ნაპირის ზრდას.



ნახ. 3.5 ფოთის „საქალაქო არხის“ შესართავში მაქსიმალურ სიჩქარეთა განაწილების მრუდები

ზემოთ მოყვანილი მაგალითი, ერთი მხრივ თეორიულად ასაბუთებს პროფესორ გ. რურუას მიერ აპრიორულად შემოთავაზებულ ფოთის წყალგამანაწილებელი რეგულატორის საექსპლუატაციო რეჟიმების მართებულობას, ხოლო მეორე მხრივ, მეტყველებს სემოტ მოყვანილი (დან.2.68) დამოკიდებულების, როგორც თეორიულ, ასევე პრაქტიკულ მნიშვნელობაზე. აქედან გამომდინარე, მიგვაჩნია, რომ პროფესორ გ. რურუას მიერ შემოთავაზებული ღონისძიება [152] აუცილებლად უნდა აღდგეს და დაიხვეწოს წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის რეაბილიტაციის და ქალაქის არხის გაწმენდის შემდეგ.

გარდა ამისა შეიძლება განვიხილოთ აგრეთვე ჩრდილოეთ არხიდან ფოთის სანაპიროს ეროზიის ზონაში ნატანის ტრანსპორტირების ორი ვარიანტი:

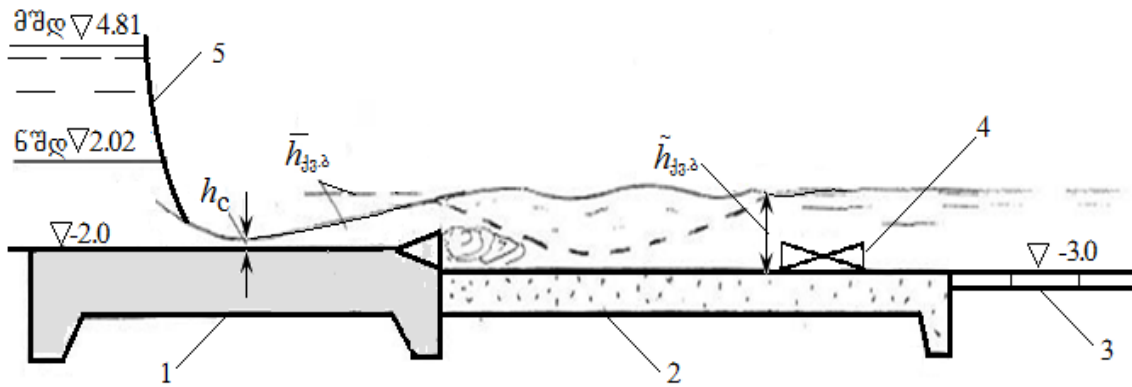
I. წყალგამყოფ ჰიდროკვანძზე წყლის ხარჯის რეგულირებითა და მდინარე რიონის დინების ენერჯის გამოყენებით შეიძლება ამოღებული ნატანის გადაგდება ქალაქის (სამხრეთ) არხში და მისი ტრანსპორტირება სანაპირო ზოლში. ასეთი მიდგომით გაიზრდება ნატანის ხარჯი სამხრეთ არხში. ამჟამად, სამხრეთ არხის გამტარუნარიანობა შეზღუდულია და შეადგენს დაახლოებით 250 მ³/წმ, რაც არასაკმარისია ნატანის ტრანსპორტირებისათვის. ამიტომ წყლის ხარჯისა და სიჩქარის გაზრდის მიზნით, საჭიროა სამხრეთის არხის გაწმენდა.

II. ფსკერული ნატანის ამომღები მოწყობილობის – ექექტორის გამოყენებით, მდინარიდან ამოღებული მასალის ზღვის სანაპირო ზოლში ტრანსპორტირება შესაძლებელია ლენტური კონვეიერის საშუალებით, რომელიც შეიძლება განთავსდეს მდინარე რიონის ქალაქის არხის გასწვრივ. ლენტური კონვეიერი შეიძლება აგრეთვე გამოვიყენოთ ქალაქის არხის გაწმენდის დროს მდინარიდან ამოღებული მასალის ტრანსპორტირებისთვის. კონვეიერის გამოყენებისას პლაჟის კვება ხორციელდება მიზანდასახულად, ეროზიის რეალური სურათის გათვალისწინებით.

3.3. მდ.რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის ნგრევის მიზეზები და კაპიტალური სარეაბილიტაციო ღონისძიების დასაბუთება

წყალგამყოფი კვანძი მდ. რიონზე გაშვებულია ექსპლუატაციაში 1959 წელს. იგი აშენდა საკავშირო საპროექტო ინსტიტუტ „გიპროვოდხოში“ შემუშავებულ პროექტით [166]. ჰიდროკვანძი შედგება ორი ძირითადი ნაგებობისგან: რეგულატორისგან, რომელიც გათვლილია 400 მ³/წმ-მდე ხარჯის გატარებაზე ქალაქის არხით და წყალსაშვიანი, 180 მ სიგანის კაშხლისგან, რომელიც აღჭურვილია 10 სეგმენტური ფართით და გათვლილია მდ. რიონის კატასტროფულ ხარჯის (4000 მ³/წმ-მდე) გატარებაზე კუნძულ ნაბადისკენ, ფოთის პორტის ჩრდილოეთით. ჰიდროკვანძის ზედა ბიეფში კაშხლის ფარების მანევრირებით იქმნება რეგულატორის მუშაობისათვის აუცილებელი შეტბორვის დონე (+2,02 მ). ამავე დროს კაშხალი მასზე გამავალი საავტომობილო ხიდითა და კავშირგაბმულობის კაბელით ასრულებს მნიშვნელოვან სატრანსპორტო-საკომუნიკაციო როლს.

კაშხლის ქვედა ბიეფის ნაგებობები შედგებოდა (დანგრევამდე) 20 მ სიგრძისა და 1,2 მ სისქის წყალსაცემი ფილისა და 40 მ სიგრძის რისბერმისგან, რომლებიც ერთმანეთის მიყოლებით განლაგებული იყვნენ ერთ ჰორიზონტზე, ზღვის დონის ქვევით -3 მ ნიშნულზე. წყალსაცემი ფილა კაშხალიდან 12 მ-ში აღჭურვილი იყო 1,5 მ სიმაღლის ენერჯის ჩამქრობი სამკუთხა ე.წ. რეზოკის კბილების რიგით (ნახ.3.6).



ნახ. 3.6. წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფის სქემატური ჭრილი დანგრევამდე.

სურათზე წარმოდგენილია ბიეფების შეულღების არასასურველი რეჟიმები,

1. წყალსაშვის ფუძის ფილა; 2. წყალსაცემი ფილა; 3. რისბერმა; 4. რეზოკის კბილები;
5. სემენტური საკეტი. რაც ხდებოდა 300მ³/წმ ნაკლები ხარჯების გატარებისას

ექსპლუატაციაში შესვლის დღიდან ჰიდროკვანძზე დაკვირვებებს აწარმოებდა სხვადასხვა ორგანიზაცია. ამ დაკვირვებებში განსაკუთრებული წვლილი შეიტანეს საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტისა (შემდგომში „სეკი“) და საპროექტო ინსტიტუტ „საქწყალპროექტის“ სპეციალისტებმა. 2003 წლიდან ფოთის წყალგამყოფი კვანძის გამოკვლევები და სარეაბილიტაციო ღონისძიებათა შემუშავება მსოფლიო ბანკის ფინანსური მხარდაჭერით ითავა საქართველოს სოფლის მეურნეობის განვითარების პროექტების საკოორდინაციო ცენტრმა.

გასული საუკუნის 70-იანი წლების ბოლოს, წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის წინ წარეცხვის სიღრმეებმა მიაღწია 8-9 მ-ს და წარეცხვები უშუალოდ მიუახლოვდა კაშხლის ქვედა ბიეფში მოწყობილ რისბერმას. ამასთან დაკავშირებით საქართველოს წყალთა მეურნეობის სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტის რეკომენდაციებით „საქწყალპროექტმა“ შეიმუშავა კაშხლის ქვედა ბიეფის გამაგრების პროექტი. კაშხლიდან 80 მ-ის დაშორებით, მდინარის კალაპოტის განივად, ჩასვეს ლითონის ნარანდი, რომელმაც გადაღობა მდინარის კალაპოტი -3მ ნიშნულამდე. ამავე დროს რისბერმასა და ნარანდს შორის არსებული წარეცხილი ფსკერი ამოავსეს დიდი ზომის ლოდებით თავდაპირველ საპროექტო ნიშნულამდე. პროექტი 1982-1983 წ.წ. განახორციელა „კოლხიდმშენმა“, მაგრამ ამ ღონისძიებამ არა თუ შეაფერხა, არამედ კიდევ უფრო მეტად შეუწყო ხელი ქვედა ბიეფის წარეცხვისა და ნგრევის პროცესების განვითარებას.

ამჟამად აღარ არსებობს რისბერმა, დამსხვრეულია წყალსაცემი ფილის უდიდესი ნაწილი, განსაკუთრებით, კაშხლის ცენტრალური 4, 5 და 6 მალეების წინ (ნახ. 1.13 ა, ბ) და როგორც უკანასკნელ პერიოდში ჩატარებულმა დაკვირვებებმა

გვიჩვენა (შ.პ.ს „ჰიდროსფერო“), გამორეცხვის ღრმულებმა შეაღწია უშუალოდ კაშხლის ტანის წყალსაშვი ფილის – საძირკვლის ქვეშაც.

ცხრ. 3.4-ში და ნახ. 3.7-ზე ნაჩვენებია სხვადასხვა წელს კაშხლის ქვედა ბიეფის კალაპოტში დაფიქსირებული ფსკერის მინიმალური ნიშნულები (ანუ წარეცხვის მაქსიმალური სიღრმეების შესაბამისი ნიშნულები), ათვლილი ბალტიის ზღვის ეტალონური დონიდან. თვით შავი ზღვის ზედაპირი ქალაქ ფოთთან მერყეობს -0.61-დან +0.2 ნიშნულებს შორის.

ცხრილი 3.4. ფსკერის ნიშნულის ცვლილება კაშხლის ქვედა ბიეფის კალაპოტში

წელი	1960	1968	1977	1979	1980	1981	1982	1997	2000	2003	2004
ქვედა ბიეფის წარეცხვის ნიშნულები	-5.0	-6.5	-8.0	-9.5	-10.5	-12.0	-9.4	-10.5	-12.8	-8.2	-8.7
დამორება წყალსაცემიდან, მ	70	70	60	65	60	70	80	45	40	25	25

თუ ვისარგებლებთ დაბალდაწნევიანი კაშხლების ცნობილი სპეციალისტის სტუდენტიჩნიკოვის რეკომენდაციებით [110] და ზოგადად შევაფასებთ კაშხლის ქვედა ბიეფის კონსტრუქციას, დავრწმუნდებით, რომ თითქმის არც ერთი ნიშნით კაშხლის ქვედა ბიეფი არ პასუხობდა ჰიდრავლიკური თვალსაზრისით „წარმატებულად“ დაპროექტებული კაშხლებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს. კერძოდ:

ა) კაშხლის ქვედა ბიეფი არ უნდა ყოფილიყო აღჭურვილი ჩამქრობი კონსტრუქციებით – რეზოკის კბილებით, ვინაიდან ისინი მუშაობს ცუდად და არ ასრულებს დადებით როლს, განსაკუთრებით ბიეფების ზედაპირულ რეჟიმებში შეუღლებისას და ზრდის წარეცხვებს. ამიტომ კაპიტალურ სარეაბილიტაციო სამუშაოთა ჩატარებისას უარი უნდა ითქვას ამგვარ „ჩამქრობ“ კონსტრუქციაზე;

ბ) კაშხლის ქვედა ბიეფში, რისბერმის ნიშნული არ უნდა ყოფილიყო წყალსაცემის ნიშნულის დონეზე, ვინაიდან ამ შემთხვევაში დიდი სიჩქარეები რისბერმაზე განაპირობებდა ნაკადის მხარქვევით მოძრაობას მორეცხვისა და დიდი გარეცხვების წარმოქმნით ქვედა ბიეფის კალაპოტში (ნახ 3.6).

გარდა ამისა, პროფ. შ. გაგომიძის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებებით [20] წყალსაცემი ფილის სისქე (0,4 მ) კაშხლიდან მდინარის საშუალო ხარჯის გაშვებისას (300 მ³ /წმ-მდე, რაც ხდებოდა კაშხლის ცენტრალური ფარების ნაწილობრივი გაღებით), არასაკმარისი აღმოჩნდა იმისთვის, რომ წყალსაცემ ფილებს გაეძლო ხანგრძლივი პულსაციური და ტალღური დატვირთვებისთვის (რასაც, დამატებით, ამძაფრებდნენ რეზოკის კბილები) და არ დამსხვრეულიყო კაშხლის თითქმის მთელ სიგრძეზე;

ამავე დროს როგორც პროექტის [166], ასევე 80-იან წლების დასაწყისში გატარებულ სარეაბილიტაციო ღონისძიებათა მთავარ ნაკლად უნდა ჩაითვალოს ის გარემოება, რომ მათი შემუშავებისას მხედველობაში არ იყო მიღებული მოსალოდნელი კალაპოტური პროცესები, რომლებმაც გადამწყვეტი როლი შეასრულეს რისბერმისა და ნაწილობრივ წყალსაცემი ფილის დანგრევაში. კალაპოტური პროცესების უგულებელყოფა პროექტში აისახება იმ ფაქტით, რომ პროექტის მიხედვით, რისბერმა განლაგებული იყო მაღალ, -3 მ ნიშნულზე და შედგებოდა $2 \times 2 \times 0,4$ მ ზომის ერთმანეთთან ხისტად შეკავშირებული რკინაბეტონის ფილებისგან, ნაცვლად უფრო მძიმე (მინიმუმ 0,8 მ-მდე სისქის) [20,134] მოქნილად შეკავშირებული ფილებისა. ამასთან, რისბერმა წინასწარვე უნდა ყოფილიყო დახრილად ჩაღრმავებული კალაპოტის ფსკერში. რაც შეეხება ნარადის ჩასმას, 80-იან წლებში გატარებული სარეაბილიტაციო ღონისძიებების გატარებისას ან საერთოდ არ უნდა განხორციელებულიყო, ან თუ მაინცდამაინც მიმართავდნენ ამ ღონისძიებას, ნარანდსა და წყალსაცემ ფილებს შორის არსებულ გამორეცხვის ღრმულებში ჩაყრილი ლოდების ზედაპირი აუცილებლად უნდა გადაეხეტონებინათ. წყალშეუღწევი ზედაპირის უქონლობის გამო, ქვანაყარი იოლად დაექვემდებარა გამორეცხვებს და ლოდები (რომლებიც თავადვე უწყობდა ხელს ნაკადის ტურბულენტობის ზრდას), მოკლე ხანში აღმოჩნდა სრულიად ჩაძირული მდინარის ფსკერის გათხევადებულ გრუნტში (მდ. რიონის შესართავი უბნის ფსკერი, რომელიც შედგება საშუალოდ 0,4 მმ დიამეტრის მარცვლებისგან, ირეცხება მდინარის ფაქტობრივად ნებისმიერ სიჩქარეზე. ამიტომ შეიძლება ითქვას, ფსკერი სინქრონულად „სუნთქავს“ მდინარის ხარჯის მცირეოდენ ცვლილებასთან ერთად).

სხვადასხვა ორგანიზაციების მიერ სხვადასხვა წლებში ჩატარებული წყალქვეშა აგეგმვების გარდა, კაშხლის ქვედა ბიეფის წარეცხვები თეორიულად იქნა შეფასებული: - 2003 წელს პროფესორმა შ.გაგოშიძემ, კაშხლის ქვედა ბიეფში წარეცხვის ღრმულების მაქსიმალური მნიშვნელობებისა და ამ ღრმულების კაშხლიდან დაშორების საანგარიშოდ ჩამოაყალიბა შემდეგი პოსტულატები [9, 20]:

ა) წყნარ რეჟიმში, როცა ფრუდის რიცხვი ნაკლებია ერთზე ($Fr < 1$) მდინარის ფსკერის წარეცხვის მაქსიმალური სიღრმე ემთხვევა მდინარის თანაბარი მოძრაობის შესაბამის სიღრმეს, დადგენილს შეზის კანონის საფუძველზე წყლის ნაკადის ზედაპირის მოცემული ნიშნულებისა და ქანობის მეშვეობით;

ბ) თუ ბიეფები ზედაპირული ჰიდრაულიკური ნახტომით უღლდებიან ერთმანეთს, წარეცხვის ეს მაქსიმალური სიღრმეები დაშორებულია წყალსაცემიდან იმ მანძილზე, რა მანძილზეც ჰორიზონტალურად მიმართული ტურბულენტური ჭავლის

სიჩქარე ქვედა ბიეფის წყნარ ნაკადში ეცემა ამ ნაკადის თანაბარი მოძრაობის სიჩქარემდე.

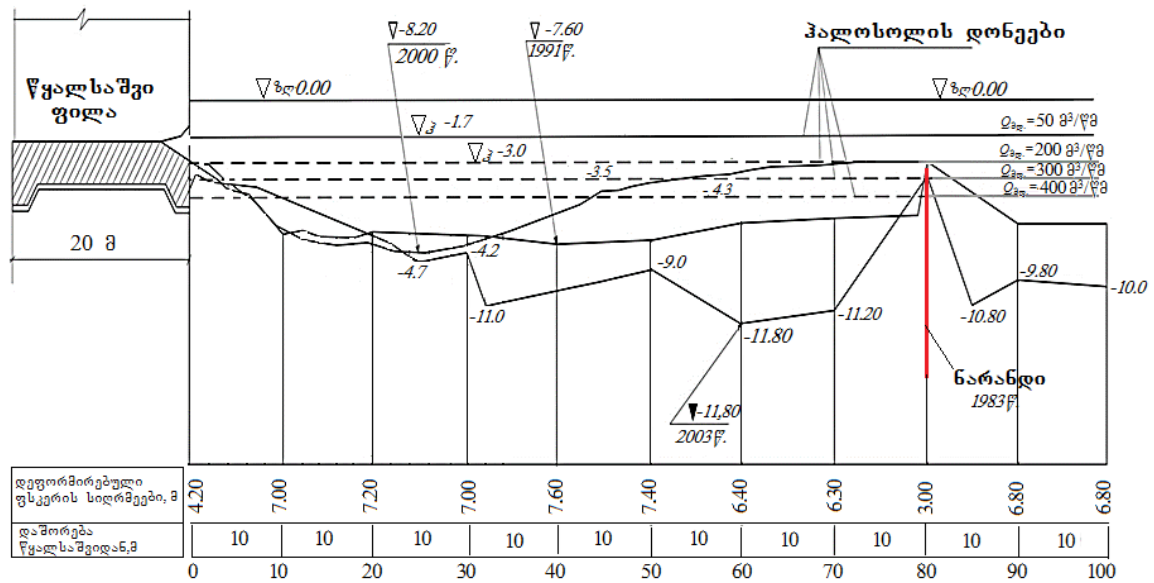
ამ პოსტულატებით სარგებლობისას გათვალისწინებული იყო, რომ ზღვის ნულოვან დონეზე კაშხალთან მიმდებარე კალაპოტის სიგანე (205 მ) განიცდის მცირე ცვალებადობას კალაპოტის სიღრმესთან შედარებით. ქვედა ბიეფში მდ. რიონის კალაპოტი აპროქსიმირებულ იქნა პარაბოლის სახით, ხოლო მდინარის თავისუფალი ზედაპირის ქანობები გაანგარიშდა ზღვიდან 6 კმ-ში მდებარე კაშხლის კვეთში დაფიქსირებული წყლის ზედაპირის ნიშნულების საფუძველზე [39]. ამასთან, კალაპოტის სიმქისის კოეფიციენტი ნარანდის ჩასმამდე მიჩნეულ იქნა $n = 0,04$ -ის, ხოლო ნარანდის ჩასმის გათვალისწინებით $n = 0,06$ -ის ტოლი. რაც შეეხება მეორე პოსტულატის საფუძველზე მდინარის სხვადასხვა ხარჯის შესაბამის წარეცხვის მაქსიმალური სიღრმეების დაშორებას წყალსაცემიდან, ისინი გაანგარიშებულ იქნა დაძირული ჭავლური ნაკადების თეორიის ცნობილი მკვლევარის – აბრამოვიჩის ფორმულის საფუძველზე [39,116] :

$$X = \frac{h_0}{0.08} \cdot \left(0.48 \cdot \frac{V_0}{V_{\text{კა.}}} - 0.145 \right),$$

სადაც h_0 და V_0 ტურბულენტური ჭავლის სიღრმე და სიჩქარეა წყალსაცემი ფილის თავზე; $V_{\text{კა.}}$ – პირველი პოსტულატის საფუძველზე შეზის დამოკიდებულებით დადგენილი მდინარის თანაბარი სიჩქარეა კალაპოტის ქვედა ბიეფში.

ამ მიდგომამ, არსებული ემპირიული ფორმულებისგან განსხვავებით, თითქმის ზუსტად ასახა კალაპოტის გარეცხვის ის მაქსიმალური სიღრმეები და წყალსაშვიდან მათი დაშორების კოორდინატები, რომლებიც გაზომვებით იყო დადგენილი (ნახ.3.7 და ცხრ. 3.5). კერძოდ, ცხრილ 3.5-ის თანახმად, ნარანდის ჩასმამდე კაშხალთან მიმდებარე მდინარის კალაპოტის გარეცხვის მაქსიმალური ნიშნული $\nabla_{\text{ფსკ.}} = -9,4$ მ (რომელიც შეესაბამება წყალდიდობის 3610 მ³/წმ ხარჯის გატარებას) მყარდება წყალსაცემიდან 60,5 მ-ში. ხოლო ნარანდის ჩასმის შემდეგ ფსკერის წარეცხვის ნიშნული აღწევს $\nabla_{\text{ფსკ.}} = -13$ -ს და განთავსებულია ნარანდსა და წყალსაცემს შორის.

ამრიგად, ეჭვს არ იწვევს ის გარემოება, რომ ნებისმიერ კალაპოტში მდინარის სიღრმე ყოველთვის მიისწრაფის საკუთარი – თანაბარი მოძრაობის შესაბამისი სიღრმისკენ, ამის გამო, მდინარის სიღრმე კაშხლის ქვედა ბიეფში ფსკერის თავდაპირველი ნიშნულით $\nabla_{\text{ფსკ.}} = -3$, ადრე თუ გვიან აუცილებლად უნდა დაქვემდებარებოდა წარეცხვებს, რაც არ იყო გათვალისწინებული არც ერთ სარეაბილიტაციო ღონისძიების გატარებისას.



ნახ.3. 7. მდ. როინის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის დეფორმირებული ფსკერის ნიშნულები და ჰალოსოლის დონეები ნარანდის ჩასმამდე (---) და ნარანდის ჩასმის შემდეგ (—)

ცხრილი 3.5. მდ. როინის წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფის ჰიდრაულიკური მახასიათებლები

ხარჯი, მ ³ /წმ	ნაკადის სიღრმე წყალ-საცემის თავზე, h ₀	სიჩქარე წყალსაცემის ბოლოს, V, მ/წმ	თავისუფალი ზედაპირის ქანობი, i×10 ⁴	ნარანდის ჩასმამდე				ნარანდის ჩასმის შემდეგ წარეცხვის ნიშნული
				ნაკადის სიღრმე h _{კ,ბ} , მ	ნაკადის სიჩქარე V _{კ,ბ} , მ/წმ	ფსკერის წარეცხვის ნიშნ., ∇ფს	დამორეზა წყალ-საცემის ბოლოდან X, მ	
400	3,45	2,69	0,90	5,30	0,55	-4,76	94,5	-6,16
600	3,90	2,20	250	5,80	0,76	-4,90	60,7	-6,50
800	4,20	2,27	2,00	6,30	0,93	-5,10	53,9	-6,84
1100	4,51	2,49	2,50	13	213	-5,64	525	-61
1380	4,75	2,08	2,90	82	299	-6,307	33	-8,22
1960	5,04	2,78	3,40	9,21	256	-17	44,8	-9,70
2400	5,26	3,26	3,80	10,0	275	-79	49,3	-10,54
292	5,47	3,81	4,10	1205	293	-8,58	54,9	-1263
3610	5,74	4,49	4,60	12,13	2,18	-9,39	60,5	-12,76

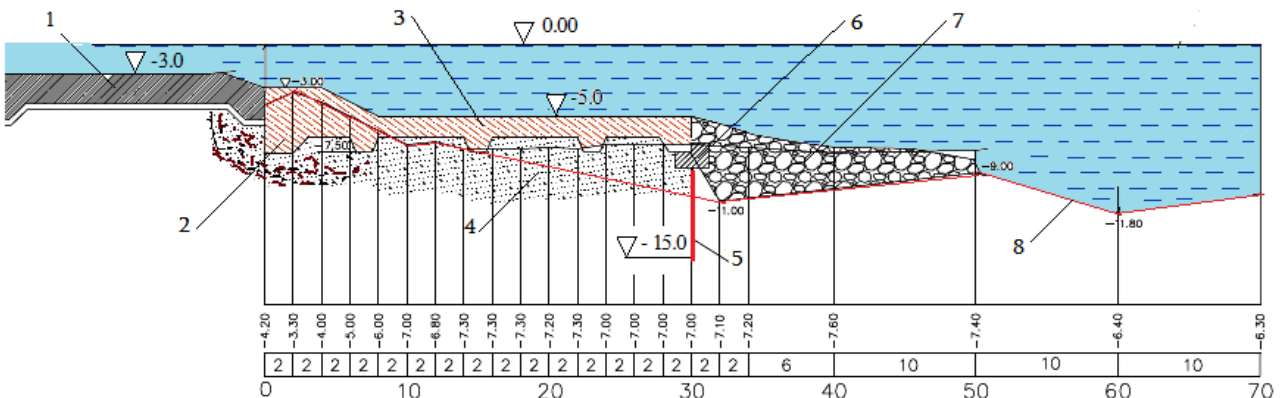
გარდა იმისა, რომ 1982 წელს ნარანდის ჩასმამ კალაპოტში გაზარდა და მიუახლოვა წარეცხვის სიღრმეები კაშხალს, ამ ღონისძიებამ დააჩქარა კიდევ კაშხლის ქვედა ბიეფის დეფორმაციების ტემპებიც. საქმე იმაშია, რომ ვიდრე ნარანდის ბარიერი ჩაისმებოდა კალაპოტში, ქიმიტ -3,0 ნიშნულამდე, ზღვის შედარებით დიდი სიმკვრივის მქონე წყალი (ჰალოსოლი) მდინარის კალაპოტში საკმაოდ დიდი ხარჯების გავლის დროსაც კი აღწევდა კაშხლამდე, ფარავდა რა წყალსაცემ ფილას, ხოლო კაშხალზე 300-400 მ³/წმ-მდე ხარჯების გავლისას

რისბერმის ფარგლებში ქმნიდა უძრავ წყლის ბალიშს, რის გამოც, ამ შუალედური ხარჯების გავლისას მდინარის მტკნარი წყლის ნაკადი ფაქტობრივად არ ზემოქმედებდა ფსკერზე. ზღვის წყლის ეს უძრავი ბალიში მხოლოდ ხელს უწყობდა მდინარის მყარი ჩამონადენის სწრაფ დალექვას ფსკერზე, რითიც კიდევ უფრო მეტად აფერხებდა წარეცხვის პროცესებს რისბერმის წინ მდებარე კალაპოტში.

ამრიგად, მდინარის კალაპოტში ნარანდის მოწყობამ შეფერხების ნაცვლად დააჩქარა წარეცხვისა და ნგრევის პროცესები კაშხლის ქვედა ბიეფში, რის გამოც კაპიტალური სარეაბილიტაციო სამუშაოების ჩატარების შემდეგ, მიზანშეწონილია მოხდეს მისი დემონტაჟი (თუმცა კაპიტალურ სარეაბილიტაციო სამუშაოთა განხორციელების პროცესში იგი შეიძლება ნაწილობრივ გამოყენებული იქნას კიდევ სამშენებლო ზღუდარის სახით).

დროებითი სარეაბილიტაციო ღონისძიებები, რაც მსოფლიო ბანკის კურატორობით განახორციელა „საქწყალპროექტმა“ 2005-2006 წლებში და მდგომარეობდა გამორეცხილ ქვედა ბიეფში მაკაფერის გაბიონების ჩაწყობაში (ნახ.1.14), განსხვავებით 1982-1983 წლებში „კოლხიდმშენის“ მიერ შესრულებული სარეაბილიტაციო ღონისძიებისგან, ამ ეტაპზე დადებითად უნდა იქნას შეფასებული, მაგრამ აუცილებლად მიგვაჩნია მასზე პერიოდულად წარმოებდეს დაკვირვებები, რაც აღნიშნული ღონისძიების გატარების შემდეგ (2007 წ.) არც ერთხელ შესრულებულა.

მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის კაპიტალური რეაბილიტაციისთვის ჩვენ რეკომენდაციას ვუწევთ წყალსაცემი ფილის მოწყობას უფრო დაბალ – -5მ ნიშნულზე, 1,5 მ სისქით, მის ბოლო კბილთან ჩასმული უნდა იყოს ნარანდი -15მ ნიშნულამდე (ნახ.3.8). ეს ღონისძიება კაპიტალურად დაიცავს წყალგამყოფი კვანძის კაშხლის ქვედა გამორეცხვებიდან.



ნახ.3.8. მდ. რიონის წყალგამყოფი კვანძის ქვედა ბიეფის რეაბილიტაციის სქემა: 1.წყალსაშვი; 2. სილრუეთა ცემენტაცია; 3. წყალსაცემი ფილა; 4. ქვიშის ფენა; 5. ნარანდი; 6. ბოლვერკი; 7. ქვიშით შევსებული ტომრები. 8. წარეცხვის კონტური (2003წ.)

3.4. გარემოსდაცვით ღონისძიებათა დასახვა მდ. ჭოროხის შესართავ აკვატორიაში

მდინარე ჭოროხის დარეგულირების შედეგად, აჭარის ზღვისპირეთში დაწყებულია ნაპირფორმირების ახალი ეტაპი, რომელსაც განაპირობებს შემდეგი ფაქტორები:

- აღარ არსებობს პლაჟწარმომქმნელი მასალის განახლებადი ბუნებრივი წყარო, მდ. ჭოროხის შესართავში მნიშვნელოვანი ოდენობით მყარი ნატანის გამოტანა პრაქტიკულად აღარ ხდება.

- დელტის წარცხვის პროცესმა მიიღო შეუქცევადი ხასიათი და გაგრძელდება მანამ, სანამ დელტის რკალი არ მიიღებს გაბატონებული ტალღების მიმართ სასურველ აზიმუტს, ხოლო დინამიკური წონასწორობის პროფილი არ შეესაბამება ახალ ფრაქციულ შემადგენლობას.

- კლებულობს წყალქვეშა კანიონის გავლენა სანაპირო ზონაზე, ნატანის დიდი რაოდენობა, რომელიც ამ კანიონისგან მიიტაცებოდა, მდინარეს აღარ შემოაქვს. რთული საპროგნოზოა ამ მოვლენით გამოწვეული გეომორფოლოგიური ცვლილება უახლოეს ათწლეულებში.

- ნატანის ნაპირგასწვრივი ნაკადის ფორმირება ხდება დელტისა და მიმდებარე ტრანზიტული ზონის წარცხვის პროდუქტების ხარჯზე.

მდ. ჭოროხის დარეგულირების ნეგატიური გავლენა მდინარის კალაპოტში და ზღვის სანაპირო ზონაში მიმდინარე პროცესებზე მრავალმხრივია.

არსებული და დაგეგმილი კაშხლების ექსპლუატაციისა და მომავალში ნატანის მოპოვების მოცულობების შესახებ შეზღუდული ინფორმაციის არსებობის გამო, პროგნოზული შეფასებები ძალზე მიახლოებითია. ანალიზის დროს გამოიყენება საშუალო თვიური ხარჯი, რომლებიც, ჩვეულებრივ, საკმაოდ ზუსტად ითვლება, მაგრამ ნატანის გადაადგილებისათვის განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს იმ პიკურ ხარჯს, რომელსაც პერიოდულად გაუშვებს ექსპლუატაციაში არსებული კაშხლები.

ჩატარებული გათვლების მიხედვით, პლაჟწარმომქმნელი ნატანის ბუნებრივად არსებული რაოდენობა – 400 ათასი მ³/წელი, რომელიც კაშხლების მშენებლობამდე აღწევდა ზღვას, შემცირდება 100% -დან (2000 წ.) 2% -მდე (2025 წ.).

მომავალ ათწლეულებში, ზღვის დონის აწევით, სანაპირო ხმელეთის მოსალოდნელი ინტენსიური წარცხვისა და დატბორვის თავიდან აცილების მიზნით, უპირველეს ყოვლისა, საჭიროა, დაიგეგმოს შესაბამისი ნაპირდამცავი ღონისძიებები, რომლებიც მეცნიერულად იქნება დასაბუთებული.

2009 წლიდან 2013 წლამდე ადლიის სანაპიროზე მდ. ჭოროხის კალაპოტიდან ყოველწლიურად შეჰქონდათ 300 ათასი მ³-მდე ინერტული მასალა. ამ ღონისძიებების შედეგად, პლაჟი აღდგა ადლიის ნაპირისთვის ოპტიმალურ პარამეტრებში (ნაპირგასწვრივი ხარჯის გათვალისწინებით) და სიგანეში მიაღწია 30-დან 50 მ-მდე (სამხრეთ ნაწილში – გემთმშენებელთან). უფრო ჩრდილოეთით, ბათუმის პლაჟების მატებამ კი მხოლოდ 2-7 მ შეადგინა. მაგრამ ვინაიდან ამ მასალის მოპოვება ხდება ნატანისგან თითქმის დაცლილ მდინარე ჭოროხის კალაპოტიდან ჭოროხის შესართავ აკვატორიაში მოსალოდნელია ეროზიული პროცესების მნიშვნელოვანი გააქტიურება.

გარდა ამისა, მიუღებელია ნაპირდაცვით ღონისძიებად ჩაითვალოს ზღვის ნაპირთან ტეტრაპოდების უსისტემო დაყრა, რასაც ადგილი აქვს აჭარის სანაპირო ზოლის ზოგიერთ მონაკვეთში.

არსებობს 2000 წელს მომზადებული ადლია-ბათუმის სანაპირო ზონის განვითარების პროგნოზი 2025 წლამდე (საინჟინრო პერიოდი) და ნაპირდაცვითი ღონისძიებების რამდენიმე ვარიანტი. მაგრამ აქ არაა შეტანილი მდ. ჭოროხის დელტის მარცხენა ნაპირი და გონიოს ზღვისპირეთი [18].

ნაპირდამცავი ღონისძიებები უნდა იყოს გაანგარიშებული ფერდობების დეფორმაციების პროგნოზირებისა და ნაპირსამაგრ კონსტრუქციების (ქვაყრილი, ფილები, ტეტრაპოდები და ა.შ.) ელემენტების გაანგარიშების მეთოდების გამოყენებით, მათზე მდინარის დინებისა და ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედების გათვალისწინებით; გაანგარიშებული უნდა იყოს ჭოროხის შესართავ უბნისა და ბათუმი-გონიოს სანაპირო ფერდობების გრუნტის მდგრადობა.

ამ ღონისძიებების დაგეგმარება და განხორციელება უნდა მოხდეს მისი მორფოდინამიკური განვითარების რეჟიმზე ბუნებრივი და ანთროპოგენური ფაქტორების ზემოქმედების რაოდენობრივი და თვისობრივი მახასიათებლების გათვალისწინებით. უპირველეს ყოვლისა, საჭირო იქნება სანაპირო ზონის ცალკე უბნებზე ხელოვნური გზით პლაჟწარმომქმნელი ნატანის ბალანსირების მიღწევა. იქ, სადაც მყარი ნატანით ზღვის ნაპირის გამაგრება შეუძლებელი ან ნაკლებად ეფექტიანი იქნება, გამოყენებული უნდა იყოს სხვადასხვა სახის ხისტი საინჟინრო ნაგებობები.

დანართები

სანაპირო არეებში ტალღურ მოძრაობათა ბაზანბარიშების ანალიზური მეთოდები*

დანართი მოიცავს მდინარეთა შესართავ უბნების, ამ უბნებში განთავსებული ჰიდროტექნიკური ნაგებობების, საპორტო და ნაპირდამცავი ზღუდარების, საზღვაო სანიაღვრე და საკანალიზაციო კოლექტორების და ა.შ. ჰიდრავლიკური გაანგარიშების იმ თეორიულ წინამძღვრებსა და მეთოდებს, როლებსაც ეფუძნება მონოგრაფიის წინათავეებში მოყვანილი საინჟინრო გადაწყვეტილებები. ეს მეთოდები, განსხვავებით ამჟამად პრაქტიკაში ხმარებული, ძირითადად ემპირიული ხასიათის დამოკიდებულებებისგან, ეფუძნება წყლის ტალღურ მოძრაობათა წრფივი ამოცანების ამოხსნას უმაღლესი მათემატიკის პირდაპირი და ასიმპტოტური მეთოდების გამოყენებით. საანგარიშო დამოკიდებულებები გამოირჩევა მაღალი სიზუსტით და ამავე დროს, აისახება რა ელემენტარულ ფუნქციებში, ადვილი მისაწვდომია ინჟინერ-ჰიდროტექნიკოსებისთვის.

1. ზღვის ზედაპირული ტალღური მოძრაობის გაანგარიშების არსებული მეთოდების მიმოხილვა

1837 წლიდან დაწყებული, როცა ინგლისელმა მათემატიკოსმა ჯორჯ გრინმა პირველად დაადგინა გრძელი ტალღების სიმაღლის ცვლილების კანონი, განპირობებული წყლის სიღრმისა და აკვატორიის სიგანის კლებით ტალღური მოძრაობების შესწავლას სანაპირო არეებში ეთმობოდა და დღესაც ეთმობა სპეციალისტთა შეუწელებელი ყურადღება. მიუხედავად ამისა, ამჟამად, მათემატიკური თვალსაზრისით, სანაპირო უბნებში ტალღური მოძრაობის ჰიდროდინამიკის მხოლოდ ცალკეული საკითხი შეიძლება ჩაითვალოს ამოწურულად. ეს პირველ რიგში ეხება თავთხელ ნაპირებთან გრძელი ტალღების გავრცელების წრფივ და არაწრფივ თეორიას და დახრილ ბრტყელ ზედაპირებთან პროგრესული და მდგრადი ტალღური მოძრაობის ზუსტ წრფივ თეორიას [163].

ამჟამად არსებობს სითხის ტალღურ მოძრაობის შესწავლის სამი ძირითადი მიმართულება: 1. ანალიზურ-რიცხვითი, რომელიც ეფუძნება წყლის ტალღური მოძრაობათა განტოლებების უშუალო ამოხსნებს; 2. ენერგეტიკული, რომელიც ენერჯის შენახვის მუდმივობის კანონის საფუძველზე ამყარებს კავშირს ტალღის

* დანართების ავტორია შ. გაგოშიძე.

პარამეტრებს შორის ტალღური მოძრაობის სხვადასხვა უბანზე (სხვადასხვა სიღრმეზე) და 3. სპექტრულ-სტატისტიკური, რომელიც მართალია ყველაზე უფრო ზუსტად ასახავს ღია ზღვებისა და ოკეანეების ზედაპირზე ბუნებაში არსებულ ტალღურ პროცესებს, მაგრამ ფაქტობრივად დაუმუშავებელია სანაპირო არეებისა და მდინარეთა შესართავი უბნებისათვის.

ჩვენ ქვემოთ შევხებით მხოლოდ იმ დეტერმინისტულ-მათემატიკურ მეთოდებს, რომლებმაც ყველაზე უფრო ფართო გავრცელება ჰპოვა სანაპირო ჰიდრომშენებლობის პრაქტიკაში.

უწყვეტ ტანთა მექანიკის ერთ-ერთი ურთულესი ნაწილის – სითხის ტალღურ მოძრაობათა ჰიდროდინამიკის შესწავლას სათავე დაუდეს მე-19 საუკუნის პირველი ნახევრის გამოჩენილმა მათემატიკოს-ბუნებისმეტყველებმა: კოშიმ, პუასონმა, სტოქსმა, ერიმ, გრინმა, ჰერსტენერმა და სხვებმა [78, 123, 146, 163, 168]. მათ პირველებმა გამოიყვანეს თავისუფალი ზედაპირის მქონე სითხის დამყარებული და დაუმყარებელი ტალღური მოძრაობის არაწრფივი და წრფივი განტოლებები და ჩამოაყალიბეს სასაზღვრო პირობები, როგორც ღრმა, ასევე ტალღის სიგრძესთან შედარებით მცირე, მუდმივი და ცვალებადი სიღრმის მქონე წყლის ზედაპირზე. მათ მოგვცეს ამ განტოლებათა ზუსტი კერძო ამოხსნები, რომლებსაც ამჟამად ფართო გამოყენება აქვს წყალთან დაკავშირებული საინჟინრო საქმიანობის თითქმის ყველა სფეროში.

მაგრამ რთული სასაზღვრო პირობების მქონე ამოცანების შემთხვევაში კლასიკური ტალღური ჰიდროდინამიკის ეს განტოლებები მოითხოვს ამოხსნის ახალი მეთოდების შემუშავებას და თვით ამ განტოლებათა სისტემის იმგვარ გარდაქმნებს (ძირითადად, ახალი ევოლუციური განტოლებების გამოყვანის გზით), რომელთა გამოყენება შედარებით იოლად და, ამავე დროს, დიდი სიზუსტით ასახავდა რთულ ტალღურ პროცესებს. ამგვარ პრობლემათა გადაწყვეტაში უდიდესი წვლილი შეიტანეს ისეთმა დიდმა მეცნიერებმა, როგორც იყვენ რელიე, ჰელმჰოლცი, ბუსინესკი, კელვინი, გრინხილი, მაკდონალდი, ბესელი, ლამბი, სტოკერი, როზო, სნედონი, სრეტენსკი, კოჩინი, კელდიში, სედოვი, ლავრენტევი, უიზემი, შაბატი, კორტევეგი და დე-ვრიზი, კადომცევი და ფეტვიაშვილი, ფილიპსი, ლონგე-ჰიგინსი და სხვა [58, 65, 96, 97, 100, 118, 119, 122, 128, 164].

გარკვეული თვალსაზრისით, ტალღური ჰიდროდინამიკის განვითარებაში თავისი წვლილი შეიტანეს დიდმა ქართველმა მათემატიკოსებმაც ნ. მუსხელიშვილმა, ი. ვეკუამ, ვ. კუპრაძემ, ა. ბიწაძემ და სხვებმა, რადგან მათ მიერ შემუშავებულმა მეთოდებმა კომპლექსური ცვლადის პოტენციალისა და სასაზღვრო ინტეგრალურ განტოლებათა თეორიაში გამოყენება ჰპოვეს სხვა ავტორების

შრომებში [136, 177], ტალღური ჰიდრომექანიკის მრავალი ურთულესი ამოცანის გადაწყვეტისას.

თავისი სიმარტივისა და ოპერატიულობის გამო, საზღვაო და სამდინარო ჰიდრომშენებლობაში ყველაზე უფრო ფართო გავრცელება ჰპოვა გრძელტალღოვანმა და ენერგეტიკულმა მეთოდებმა [29, 45, 52, 56, 59, 60, 76, 80, 120, 122, 146, 178] ჯერ-ჯერობით ამ მეთოდების საფუძველზე ხდება ტალღების ტრანსფორმაციისა და რეფრაქციის ანგარიში ფსკერის მცირე დახრილობის მქონე სანაპირო არეებში. გარკვეული მიახლოებით ამ მეთოდთა ფარგლებში ზოგი ავტორი ითვალისწინებს ტალღების არაწრფივობას, მდინარის სიჩქარის ცვალებადობას, წყლის სიმკვრივეს სტრატეფიკაციას, ტურბულენტობას და სხვა ფაქტორებს, რასაც ადგილი აქვს სანაპირო არეებსა და მდინარეთა შესართავ უბნებში. ამ ავტორთაგან პირველ რიგში გამოვყოფთ: ჯონსონის, ფილიპსის, უნას, მიშის, ტეილორის, ჰანსონის, ლონგე-ჰიგინსის, სტიუარტის, კრილოვის, ვონიჩ-სიანოჟენცის, პელინოვსკის, დავლეტშინის, ვოლცინგერის და სხვათა შრომებს [36, 54, 56, 59, 83, 86, 90, 91, 92, 93, 94, 103, 106, 115, 124, 125, 133, 143, 163]

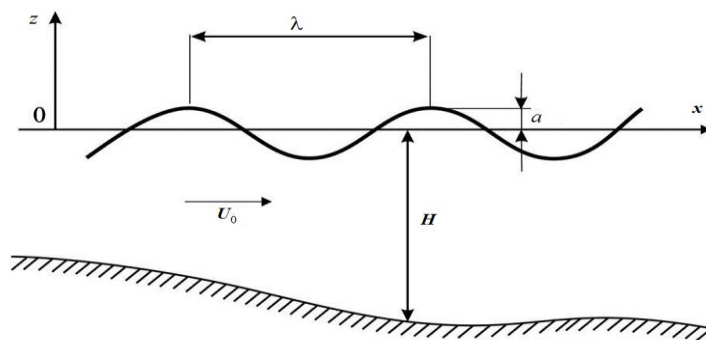
მდინარეთა შესართავი უბნების ჰიდროდინამიკის საინჟინრო ასპექტების კვლევას ეძღვნება ცნობილი ქართველი მეცნიერის პროფ. თ. ვონიჩ-სიანოჟენცის მონოგრაფია – „მდინარეთა შესართავი უბნებისა და არამიმოქცევადი ზღვების სანაპირო არეების ჰიდროდინამიკა“ [89]. აქვე უნდა აღინიშნოს მეორე თვალსაჩინო ქართველი ჰიდრაულიკოსის გ. მამრადისა და მისი სკოლის წარმომადგენლების პუბლიკაციები ჩაკეტილ არეებში (წყალსატევებში) გეოტექტონიკური გენეზისის ტალღების წარმოშობასა და გავრცელებაზე [127, 133, 134, 135]. სანაპირო არეების ჰიდროდინამიკის შესწავლაში მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანეს აგრეთვე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის პროფესორებმა ვ.საყვარელიძემ, ლ.ლოღელიანმა და შ.გაგოშიძემ [41, 92, 96, 104, 157].

ბოლოს შევჩერდებით სანაპირო არეებში ტალღური მოძრაობის ანალიტიკური კვლევის ახალ მიმართულებაზე, რაც გულისხმობს კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის ამოხსნის დაყვანას, ჩვეულებრივ დიფერენციალურ განტოლებათა ამოხსნაზე აკად. ლ. ვ. კანტოროვიჩის [112] მიერ შემოთავაზებული პირდაპირი მეთოდის გამოყენების საფუძველზე. ამ მეთოდით მიღებულ ამოხსნებს შუალედური ადგილი უჭირავს ამოცანის ზუსტ და რიტც-გალიორკინის პირდაპირი მეთოდებით მიღებულ მიახლოებით ამონახსნებს შორის [113] და უმრავლეს შემთხვევაში, ჩაიწერება ინჟინრებისთვის მისაწვდომ ელემენტარულ ფუნქციებში, მაგრამ ამ მეთოდით სარგებლობისას წარმატებას მნიშვნელოვანწილად განაპირობებს საბაზისო ფუნქციის ზუსტი შერჩევა.

ტალღურ ჰიდრომექანიკაში კანტოროვიჩის პირდაპირი მეთოდი პირველად გამოიყენა ბერკჰოფმა 1976 წელს [35]. ჩვენ მიერ (შ. გაგოშიძე) კანტოროვიჩის მეთოდის გამოყენება ცილინდრულ საკორდინატო სისტემებში ჩაწერილი ტალღური განტოლებების ამოსახსნელად, განსხვავებით ბერკჰოფის მიდგომისგან, ეფუძნება საბაზისო ფუნქციების იმგვარ შერჩევას, რომელიც ზუსტად აკმაყოფილებს ამოცანის ყველა სასაზღვრო პირობას [92, 93, 94, 95] ეს საშუალებას იძლევა ცხადი სახით (ელემენტარულ ფუნქციებში) ავსახოთ ტალღური მოძრაობის თითქმის ყველა ის ნიუანსი, რაც დაფიქსირებული იყო ნატურულ და ექსპერიმენტულ დაკვირვებებსა და აგრეთვე, ცალკეულ ზუსტ მათემატიკურ ამოხსნაში. ადრე საინჟინრო-ენერგეტიკული მეთოდების გამოყენების საფუძველზე, შეუძლებელი იყო ვთქვათ ისეთი მნიშვნელოვანი ფაქტორის გათვალისწინება, როგორცაა ფსკერის ქანობის გავლენა ტალღური მოძრაობის პარამეტრებზე.

1.1. ტალღურ მოძრაობათა თეორიის ელემენტები

ზოგადი (არაწრფივი) ტალღური თეორიის გადაულახავი სირთულეების გამო, მისი „გამარტივება“ თავიდანვე ორი ძირითადი გზით წარიმართა. პირველი გზა გულისხმობდა „გამარტივებას“ განტოლებების გაწრფივებით იმ ამოცანათა გადასაწყვეტად, რომლებშიც ტალღის ამპლიტუდა a (ნახ. 1.1) შეიძლება მიჩნეულ იქნას ტალღის სიგრძესთან λ შედარებით გაცილებით უფრო მცირე სიდიდედ ($\frac{a}{\lambda} \ll 1$), ამ თეორიას ეწოდა **ტალღური მოძრაობის წრფივი თეორია**. ამ თეორიის ფარგლებში მიღებულია კლასიკური ხასიათის ძირითადი შედეგები.



ნახ. 1.1. ტალღების ზოგადი საანგარიშო სქემა

მეორე მიმართულება არ იზღუდება მცირე სიმაღლის ტალღების განხილვით, მაგრამ მოითხოვს წყლის H სიღრმის სიმცირეს ტალღის სიგრძესთან შედარებით $\frac{H}{\lambda} \leq \frac{1}{20}$. ამ თეორიას ეწოდება **გრძელი ტალღების ან მცირე წყლის თეორია**. იგი შეიძლება იყოს წრფივი და არაწრფივი, იმისდა მიხედვით თუ რა თანაფარდობაშია

ერთმანეთთან ტალღის ამპლიტუდა და წყლის სიღრმე. კერძოდ, თუ ამავე დროს, $\frac{a}{H} \ll 1$, მაშინ საქმე გვაქვს გრძელი ტალღების წრფივ თეორიასთან. მიუხედავად იმისა, რომ თავისი სიმარტივით ამ ორი მიმართულების ამსახველი განტოლებები მართლაცდა მნიშვნელოვნად განსხვავდება ტალღური ჰიდროდინამიკის ზოგადი განტოლებებისგან, მათ ფარგლებში საინჟინრო ამოცანათა უმრავლესობის გადაწყვეტა მაინც არ ექვემდებარება ტრივიალურ მიდგომებს და დაკავშირებულია უმაღლესი მათანალიზის მიახლოებითი მეთოდების გამოყენებასთან. სწორედ ამის გამოა ზემოთ სიტყვა „გამარტივება“ ბრჭყალებში ჩასმული.

ვიდრე შევხებოდეთ ტალღური ჰიდროდინამიკის ამგვარად „გამარტივებულ“ მეთოდებს, შევჩერდებით ერთ ტერმინოლოგიური ხასიათის განსხვავებაზე, რაც არსებობს „დამყარებულ“ და „დაუმყარებელ“ მოძრაობებს შორის ჰიდრაულიკასა და ტალღურ ჰიდროდინამიკაში. ჰიდრაულიკური თვალსაზრისით ნებისმიერი ტალღური მოძრაობა (გარდა დროში უცვლელი ტალღური ზედაპირის მქონე დამყარებული ნაკადისა), განეკუთვნება დაუმყარებელ მოძრაობათა კლასს, იმ დროს, როდესაც ტალღურ ჰიდროდინამიკაში დამყარებული ტალღური მოძრაობის ქვეშ იგულისხმება მუდმივი პერიოდის მქონე რეგულარული ტალღური რხევები, ხოლო დაუმყარებელ ტალღურ მოძრაობას (განპირობებულს მაგალითად, ერთჯერადი იმპულსური ზემოქმედებით წყლის ზედაპირზე) არ ახასიათებს რეგულარული ხასიათი და იცვლება დროში.

ჩვენ განვიხილავთ მხოლოდ რეგულარულ ტალღურ მოძრაობებს მისი გამომწვევი მიზეზებისგან დამოუკიდებლად. განვიხილავთ აგრეთვე დროში უცვლელ ტალღურ ფორმებს (შეჩერებულ ტალღებს), რომელთა შენარჩუნებას განაპირობებს ორშირიანი ნაკადების საკონტაქტო ზედაპირზე წარმოქმნილი ხახუნის ძალები.

1.2. წრფივი ტალღური მოძრაობის ძირითადი განტოლებები და ამოხსნები

წრფივი ტალღური მოძრაობის განტოლებათა გამოყვანა ეფუძნება [65, 164] სითხის ნაწილაკთა სიჩქარის პოტენციალისა ϕ და ტალღური ზედაპირის ვერტიკალური გადაადგილების η წარმოდგენას მცირე პარამეტრებზე – $\varepsilon = a/\lambda$ (სადაც a ტალღის ამპლიტუდაა, ხოლო λ ტალღის სიგრძე) დამოკიდებული ფორმალური ხარისხოვანი მწკრივების მეშვეობით. ამ მწკრივების ჩასმა იდეალური სითხის უწყვეტობისა და დინამიკის განტოლებებში და სასაზღვრო პირობებში სითხის თავისუფალ და შემომფარგვლელ მყარ ზედაპირებზე ნულოვანი და პირველი

ხარისხის მიახლოებით გვაძლევს ზედაპირულ ტალღურ მოძრაობათა წრფივ განტოლებათა სისტემას, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad \text{როცა } z = 0 \quad (1.2)$$

$$\eta = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad \text{როცა } z = 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\frac{\partial H}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial H}{\partial y} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \text{როცა } z = -H(x, y) \quad (1.4)$$

სადაც ნაცვლად შემფოთებული $z = \eta$ ზედაპირისა, (1.2) და (1.3) პირობები სრულდება წყლის თავდაპირველად შეუშფოთებელი ზედაპირზე $z = 0$. წყალუქონვადობის (1.4) პირობა სრულდება წყლის ცვალებად (x, y) სიღრმესა და ნაპირებზე.

(1.2) და (1.3) სასაზღვრო პირობებიდან ტალღური ზედაპირის η კოორდინატის გამორიცხვის შედეგად ვღებულობთ ერთ სასაზღვრო პირობას

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad \text{როცა } z = 0, \quad (1.5)$$

ხოლო, როცა ბრტყელ ჰორიზონტალურ ფსკერთან გვაქვს საქმე, რომლის განტოლებაა

$$z = -H = \text{const} \quad (1.6)$$

(1.4) სასაზღვრო პირობა გვაძლევს:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \quad \text{როცა } z = -H, \quad (1.7)$$

სადაც H – შეუშფოთებელი წყლის ფენის სიღრმეა.

ამგვარად, კლასიკური ამოცანა ბრტყელი (ორგანზომილებიანი) დამყარებული ტალღების გავრცელების თაობაზე (ვთქვათ x ღერძის მიმართულებით H სიღრმის მქონე წყლის თავისუფალ ზედაპირზე დაიყვანება ლაპლასის ორგანზომილებიანი განტოლების

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1.8)$$

ამოხსნაზე (1.6) და (1.7) სასაზღვრო პირობების დაცვით. ამ ამოხსნას, რომელიც მიიღება ცვლადთა განცალების მეთოდით, აქვს შემდეგი სახე:

$$\varphi = a \frac{g}{\sigma} \cdot \frac{\cosh k(z + H)}{\cosh kH} \cos(\sigma t \pm kx), \quad (1.9)$$

სადაც a ინტეგრირების მუდმივი, ტალღური რხევების ამპლიტუდაა;

k – ე. წ. ტალღური რხევების რიცხვი,

$$k = 2\pi / \lambda ; \quad (1.10)$$

λ – ტალღის სიგრძე;

σ – ტალღურ რხევათა სიხშირე;

$$\sigma = 2\pi / \tau ; \quad (1.11)$$

τ – ტალღურ რხევათა პერიოდი;

ნიშნები „+“ და „-“ შეესაბამება ტალღების გავრცელებას x ღერძის საწინააღმდეგო და თანხვედნილი მიმართულებით. არაპროგრესირებადი ტალღური რხევების შემთხვევაში ბოლო თანამამრავლი (1.9)-ში უნდა შეიცვალოს $\cos \sigma \cos kx$ ორწევრა თანამამრავლით.

(1.9) ამოხსნის ჩასმა (1.5) სასაზღვრო პირობაში იძლევა ტალღური ჰიდრომექანიკის ძალზე მნიშვნელოვან, ე. წ. დისპერსიულ დამოკიდებულებას, რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს ტალღური მოძრაობის სიხშირეს (პერიოდს) და ტალღურ რიცხვს (ტალღის სიგრძეს):

$$\sigma^2 = gk \tanh kH \quad (1.12)$$

ამ ამოხსნებში ტალღური რხევების ამპლიტუდა, სიგრძე (ტალღური რიცხვი) და პერიოდი (ტალღურ რხევათა სიხშირე) მოცემულ მუდმივ რიცხვებს წარმოადგენს. ტალღურ ჰიდროდინამიკაში მიჩნეულია, რომ ამ მუდმივთა რიცხვითი მნიშვნელობები არ ექვემდებარება განსაზღვრას, უფრო ზუსტად ისინი განსაზღვრული უნდა იყოს სხვაგვარად ფორმულირებული ამოცანების ამოხსნის შედეგად, რომლებშიც საწყისი ან სასაზღვრო პირობების სახით გაითვალისწინება მაიძულებელი ძალების (ქარის, ბარიული გრადიენტის, გემების, ფარების მანიპულირების და ა.შ.) ზემოქმედების ხასიათი. ამგვარი ამოცანები, ცალკეული გამონაკლისის გარდა, არ ექვემდებარება ზუსტ ანალიტიკურ ამოხსნებს და ძირითადად აღიწერება ნატურული დაკვირვებებისა და სტატისტიკურ ალბათური მეთოდების გამოყენების საფუძველზე [51, 70, 103, 121, 126, 149, 150, 151, 160, 69].

(1.9) ამოხსნის საფუძველზე და (1.3) სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით, წყლის ტალღური ზედაპირი აღიწერება სინუსოიდით

$$\eta = a \sin(\sigma t \pm kx), \quad (1.13)$$

სადაც $\sigma t \pm kx$ ტალღური მოძრაობის ფაზაა. ფაზის წარმოებული დროით გვამლევს წყლის ზედაპირზე ტალღის ფორმის გადაადგილების სიჩქარეს, რომელსაც ფაზური სიჩქარე ეწოდება. (1.39) ტოლობის გათვალისწინებით ფაზური სიჩქარე x ღერძის გასწვრივ იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$c = \frac{\sigma}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kH}, \quad (1.14)$$

ხოლო თვით სითხის ნაწილაკთა სიჩქარეების ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მდგენელები (1.1) აღნიშვნების თანახმად და (1.12) პირობის გათვალისწინებით იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$u = a\sigma \frac{\cosh k(z+H)}{\sinh kh} \sin(\sigma - kx); \quad (1.15)$$

$$w = a\sigma \frac{\sinh k(z+H)}{\sinh kH} \cos(\sigma - kx); \quad (1.16)$$

როგორც ვხედავთ ფსკერზე, როცა $z = -H$, სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი $w = 0$. წნევის სიდიდე ტალღური ზედაპირის მქონე სითხის ნებისმიერ წერტილში განისაზღვრება (1.5) დამოკიდებულების საფუძველზე, რაც გაწრფივების შედეგად გვაძლევს

$$p = -\gamma z + a\gamma \frac{\cosh k(z+H)}{\cosh kH} \sin(\sigma - kx), \quad (1.17)$$

სადაც γ წყლის ხვედრითი წონაა.

თუ გავითვალისწინებთ ზემოთ მოყვანილ გამოსახულებებში ჰიპერბოლურ ფუნქციათა ზღვრულ (ასიმტოტურ) მნიშვნელობებს, ადვილად დავრწმუნდებით, რომ როცა საქმე გვაქვს ტალღის სიგრძესთან შედარებით ღრმა წყალთან, ანუ როცა $H \rightarrow \infty$ და სრულდება ზღვრული ტოლობები

$$\lim_{H \rightarrow \infty} \frac{\cosh k(z+H)}{\cosh kH} = e^{kz} \quad \lim_{H \rightarrow \infty} \tanh kH = 1 \quad (1.18)$$

სიჩქარის პოტენციალი ღებულობს სახეს

$$\varphi = \frac{ag}{\sigma} \cos(\sigma \pm kx) e^{kz}, \quad (1.19)$$

ხოლო სითხის ნაწილაკების სიჩქარის მოდული (1.10), (1.11) აღნიშვნების გათვალისწინებით იანგარიშება გამოსახულებით

$$(u^2 + w^2)^2 = a\sigma e^{kz} = a \frac{2\pi}{\tau} e^{2\pi z / \lambda}. \quad (1.20)$$

(1.20) გამოსახულების თანახმად, ვინაიდან z ღერძი სათავეს იღებს წყლის შეუშფოთებელ ზედაპირზე და მიმართულია ვერტიკალურად ზევით, (რის გამოც z კოორდინატი წყალში ღებულობს უარყოფით მნიშვნელობებს, ნაწილაკების სიჩქარე ინტენსიურად (ექსპოტენციალურად) კლებულობს წყლის სიღრმის მატებასთან ერთად. ამგვარად, ღრმა წყლად ფაქტობრივად შეგვიძლია მივიჩნიოთ წყალი, რომლის სიღრმე აჭარბებს მის ზედაპირზე არსებული ტალღების სიგრძის ნახევარს. უძრავ ღრმა წყალზე ტალღურ რხევათა სიხშირე, გამოსახული (1.12)

დამოკიდებულებით, (1.18)-ის თანახმად შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი ფორმულის სახით

$$\sigma = \sqrt{gk}, \quad (1.21)$$

ხოლო ტალღების გავრცელების სიჩქარე (1.14)-ის თანახმად მიიღებს მნიშვნელობას

$$c = \sqrt{g/k} = \sqrt{\frac{\lambda g}{2\pi}}. \quad (1.22)$$

მეორე ზღვრულ შემთხვევაში, როცა ტალღის სიგრძე (λ) მნიშვნელოვნად (კერძოდ, 20-ჯერ და მეტად) აჭარბებს წყლის სიღრმეს, სრულდება ზღვრული ტოლობა

$$\lim_{H \rightarrow 0} \tanh kH = kH, \quad (1.23)$$

რის გამოც, გამომდინარე (1.14) გამოსახულებიდან ტალღების გავრცელების ფაზური სიჩქარე ტალღის სიგრძესთან შედარებით გაცილებით უფრო ნაკლები სიღრმის მქონე, წყალზე გამოითვლება შემდეგი დამოკიდებულებით

$$c = \sqrt{gH}, \quad (1.24)$$

რაც გვიჩვენებს, რომ მუდმივი სიღრმის მქონე უძრავ წყალზე გრძელი ტალღების გავრცელების სიჩქარეს განსაზღვრავს მხოლოდ წყლის სიღრმე და იგი წრფივი მიახლოებით (განსხვავებით (1.22) დამოკიდებულებისგან) არაა დამოკიდებული ტალღის სიგრძეზე.

ჩვენთვის განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენს კლასიკური ტალღური ჰიდროდინამიკის ის ამოხსნები, რომლებიც შეეხება ტალღების გავრცელებას ერთგვაროვან სტაციონალურ ნაკადებზე. ბრტყელი ამოცანის განხილვის შემთხვევაში ნაკადზე ზედდებული ტალღური მოძრაობის პოტენციალი ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\Phi = U_0 x + \varphi(x, z, t), \quad (1.25)$$

სადაც U_0 ნაკადის უცვლელი სიჩქარეა x ღერძის გასწვრივ, $\varphi(x, z, t)$ წარმოადგენს პოტენციალის ტალღურ მდგენელს. ცხადია, როცა $U_0 = 0$, მაშინ $\Phi = \varphi$.

(1.25) აღნიშვნის ჩასმით (1.5) ტოლობა და (1.7) სასაზღვრო პირობაში, ამ უკანასკნელთა გაწრფივების შემდეგ ღებულობს [164]:

$$\frac{p}{\rho} + g\eta + \frac{\partial \varphi}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{1}{2} U_0^2 = 0 \quad (1.26)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad (1.27)$$

ამასთან, მუდმივი დინების ფაქტორი არ უცვლის სახეს არც ლაპლასის (1.1) განტოლებას და არც (1.7) სასაზღვრო პირობას ფსკერზე. ამიტომ დინებაზე ტალღური შემფოთებების პოტენციალის მიმართ ამ განტოლებათა ამოხსნა ფორმალურად არ

განსხვავდება უძრავ წყალზე ტალღური პოტენციალის ზემოთ მოყვანილი (1.9) ამოხსნისგან. სხვაობა ვლინდება მხოლოდ ტალღური მოძრაობის სიხშირისა და ფაზური სიჩქარის განსაზღვრისას (1.26) და (1.27) პირობების საფუძველზე. ამ პირობიდან ტალღური ზედაპირის η კოორდინატის გამორიცხვით მიიღება ახალი სასაზღვრო პირობა $z = 0$ ზედაპირზე φ ფუნქციის მიმართ:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + U_0^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} = -g \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (1.28)$$

თუ ამ პირობებში ჩავსვამთ φ პოტენციალის ამოხსნას, წარმოდგენილს

$$\varphi = A \cosh k(z + H) \cos(\sigma t \mp kx) \quad (1.29)$$

ფუნქციის სახით, სადაც A ინტეგრირების მუდმივია, ხოლო ნიშნები „-“ და „+“ შესაბამისად აიღება ტალღების გავრცელებისას x ღერძის თანხვედნილი და საწინააღმდეგო მიმართულებით (x ღერძი თავის მხრივ ემთხვევა ძირითადი ნაკადის მიმართულებას), მივიღებთ დინებაზე წრფივი ტალღური მოძრაობის სიხშირის ცნობილ გამოსახულებას

$$\sigma = kU_0 \pm \sqrt{gk \tanh kH}. \quad (1.30)$$

შესაბამისად, ტალღების გავრცელების სიჩქარე ძირითადი ნაკადის თანხვედნილი („+“ ნიშანი რადიკალის წინ) და საწინააღმდეგო მიმართულებით („-“ ნიშნის შემთხვევაში) იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$c = \frac{\sigma}{k} = U_0 \pm \sqrt{gH \tanh kH}. \quad (1.31)$$

(1.31) დამოკიდებულება მუდმივი, მაგრამ მცირე სიღრმის მქონე ნაკადზე, როცა $\tanh kH \approx kH$ დებულობს სახეს

$$c = U_0 \pm \sqrt{gH}, \quad (1.32)$$

(1.32) დამოკიდებულებას ფართოდ იყენებენ ღია არხებისა და მდინარეთა კალაპოტების ჰიდრავლიკურ გაანგარიშებებში, მაგრამ გრძელტალღოვანი თეორიის ფარგლებში, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, (1.2) დამოკიდებულება მოითხოვს კორექტირებას, განსაკუთრებით ძირითადი ნაკადის U_0 სიჩქარის დიდი მნიშვნელობებისას, რასაც მივყავართ არა მარტო რაოდენობრივ, არამედ თვისობრივი ხასიათის ცვლილებამდე [39, 98].

2. ტალღების გაანგარიშება მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში

ტალღური მოძრაობების შესწავლის მძლავრ მიმართულებას ქმნის ზემოთ აღნიშნული გრძელი ტალღური მოძრაობის თეორია ანუ, როგორც მას სხვაგვარადაც უწოდებენ – მცირე წყლის თეორია. შეიძლება ითქვას რომ სწორედ ამ თეორიის ფარგლებში წყდება მდინარეთა კალაპოტების, ღია არხების და ნებისმიერი ტიპის ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ჰიდრავლიკური ამოცანები. ამ თეორიის ფარგლებში განიხილება აგრეთვე ზღვებსა და ოკეანეებში წარმოქმნილი გლობალური ხასიათის ტალღური პროცესები, ისეთები როგორცაა მიმოქცევითი, სეისმური წარმოშობის (ცუნამის ტიპის) ტალღური მოძრაობები და ა. შ.

თავთხელ ნაპირთან მიახლოებისას, სიღრმის შემცირების გამო, ტალღა, რომლის სიგრძე ღრმა წყალზე ნაკლები იყო ან ეთანადებოდა ზღვის სიღრმეს, ადრე თუ გვიან გარდაიქმნება გრძელ ტალღად. უფრო მეტიც, როგორც ეს ჩვენმა გამოკვლევამ გვიჩვენა [41], ნებისმიერი კუთხით დახრილ და თვით უკუქანობის მქონე სანაპირო ფერდობთან მიახლოებისას (რომლის დახრის კუთხე ჰორიზონტთან შეიძლება იცვლებოდეს 0° -დან 180° -მდე), ტალღის მინიმუმ ერთი სიგრძის ფარგლებში ტალღური მოძრაობა ფაქტობრივად ექვემდებარება გრძელტალღოვანი თეორიის დამოკიდებულებებს, მიუხედავად იმისა, რომ წყლის სიღრმე ციცაბოდ და უკუქანობით დახრილი კედლის წინ პრაქტიკულად უსასრულოდ დიდ სიდიდეს იქნას მიჩნეული. აქდან გამომდინარე, ცხადია, თუ რა პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება სანაპირო არეებში გრძელი ტალღების გავრცელების თეორიას, რომლის კლასიკური შედეგები ქვემოთაა მიმოხილული.

2.1. გრძელი ფრონტალური ტალღები ნებისმიერად ცვალებადი სიღრმის სანაპირო არეებში

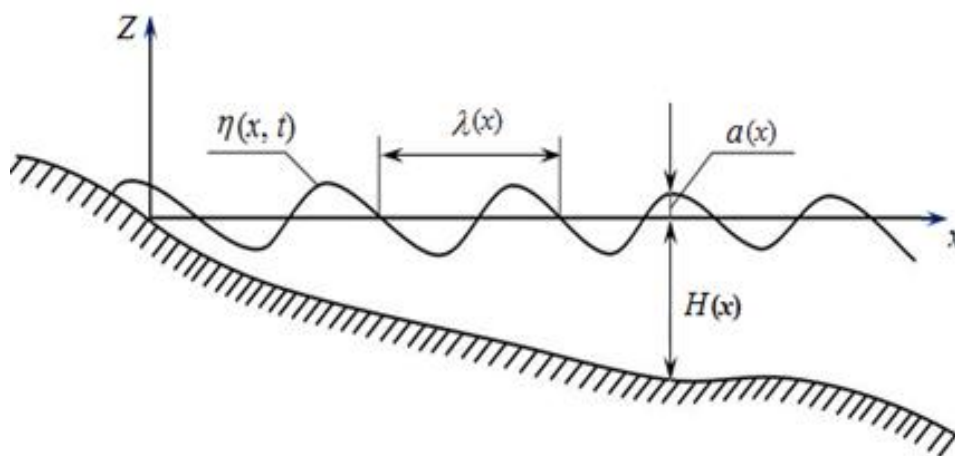
წრფივი გრძელტალღოვანი თეორიის საფუძველზე, ერთგანზომილებიანი მათემატიკური მოდელის ფარგლებში და ასიმპტოტური WKB მეთოდის [89] გამოყენებით განვიხილოთ ნებისმიერად ცვალებადი ფსკერის მქონე სანაპირო არეებში ტალღების ტრანსფორმაციის საკითხი. ენერგეტიკულ მეთოდზე დაფუძნებული ამოხსნებისაგან [89, 121] განსხვავებით, ქვემოთ მოყვანილი ამოხსნები ცხადი სახით გვიჩვენებს, თუ რა ზეგავლენას ახდენს ფსკერის ქანობი და სიმრუდე ტალღის სიმაღლისა და სიგრძის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტებზე.

ნახ.2.1-ზე მოცემული საანგარიშო სქემისთვის, ერთგანზომილებიანი გრძელი ტალღების მოძრაობა აღიწერება შემდეგი არაწრფივ განტოლებათა სისტემით:

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u'(H + \eta) = 0, \quad (2.2)$$

სადაც, (2.1) დინამიკის, ხოლო (2.2) უწყვეტობის განტოლებებია. u' არის ტალღური მოძრაობით სითხის ნაწილაკების სიჩქარე; $H(x)$ – შეუშფოთებელი ზღვის სიღრმე; $\eta(x,t)$ – ზღვის ზედაპირზე ზედდებული ტალღის ვერტიკალური კოორდინატი; g – თავისუფალი ვარდნის აჩქარება; t – დრო; x ღერძი ემთხვევა ზღვის შეუშფოთებელ ზედაპირს და მიმართულია დიდი სიღრმეებისკენ.



ნახ. 2.1. სანაპირო ფერდობზე გრძელი ტალღების საანგარიშო სქემა

(2.1)-(2.2) განტოლებათა სისტემა გვიჩვენებს, რომ გრძელტალღოვანი მიახლოების ფარგლებში, ტალღური მოძრაობისას სითხის ნაწილაკების u' სიჩქარე არ არის დამოკიდებული ვერტიკალურ z კოორდინატზე – იგი დამოკიდებულია მხოლოდ x ღერძის გასწვრივ წყლის ცვალებად H სიღრმეზე. (2.1)-(2.2) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა მისი არაწრფივობის გამო, დიდ მათემატიკურ სირთულეებთან არის დაკავშირებული, განსაკუთრებით წყლის სიღრმის ნებისმიერად ცვალებადობის პირობებში. ამიტომ პრაქტიკისთვის საკმარისი სიზუსტით მიიჩნევენ, რომ (2.1)-(2.2) სიტემის გაწრფივებისას შესაძლებელია u'^2 და $u' \cdot \eta$ სიდიდეების უგულებელყოფა. მაშინ გაწრფივებული (2.1) და (2.2) განტოლებათა სისტემა ღებულობს შემდეგ სახეს:

$$\frac{\partial u'}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}; \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} u'H. \quad (2.4)$$

თუ წყლის სიღრმე არ განიცდის ცვალებადობას, ანუ $H = \text{const}$, (2.3)-(2.4) იოლად იხსნება გამორიცხვის მეთოდით [119], მაგრამ ჩვენ შემთხვევაში, როდესაც

$H(x)$ ნებისმიერად ცვლადი უწყვეტი ფუნქციაა, (2.3)-(2.4) სისტემა დაიყვანება ცვლადკოეფიციენტებიან დიფერენციალურ განტოლებაზე, რომლის ანალიზური ამოხსნა, გარდა წყლის სიღრმის ცვალებადობის ცალკეული კერძო შემთხვევისა, შესაძლებელია მხოლოდ მიახლოებითი მეთოდების გამოყენებით. ასეთი ცვლადკოეფიციენტიანი განტოლების მისაღებად შემოვიღოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$$u' = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad (2.5)$$

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (2.6)$$

სადაც φ ტალღური მოძრაობისას სითხის ნაწილაკების სიჩქარის პოტენციალია. ამ აღნიშვნების ჩასმით (2.3)-(2.4) განტოლებათა სისტემაში ადვილად დავრწმუნდებით, რომ (2.3) კმაყოფილდება იგივეურად, ხოლო (2.4) საძიებელი φ ფუნქციის მიმართ გვაძლევს შემდეგი სახის ცვლადკოეფიციენტებიან დიფერენციალურ განტოლებას:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + gH \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + g \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0. \quad (2.7)$$

ქვემოთ განვიხილავთ მხოლოდ გრძელტალღოვან პერიოდულ ტალღურ მოძრაობას მუდმივი პერიოდით, რომლის პოტენციალი წარმოგვიდგება შემდეგი სახით:

$$\varphi = \Psi(x) \exp(i\sigma t), \quad (2.8)$$

სადაც i კომპლექსური ერთეულია; $\sigma = 2\pi/\tau$ – ტალღურ რხევათა სიხშირე; τ – პერიოდი.

(2.8) აღნიშვნის გათვალისწინებით (2.7) განტოლება $\Psi(x)$ ფუნქციის მიმართ ღებულობს შემდეგ სახეს:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{1}{H} \frac{dH}{dx} \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\sigma^2}{gH} \Psi = 0. \quad (2.9)$$

(2.9) განტოლება ექვემდებარება ზუსტ ამოხსნას იმ შემთხვევაში, კერძოდ, როდესაც ფსკერი ღრმავდება ზღვისკენ $H = i_0 x$ წრფივი კანონით, სადაც i_0 ფსკერის ქანობია. მაშინ, გამომდინარე (2.9) განტოლებიდან, ნაპირისკენ მიმართული გრძელი ტალღების პოტენციალისთვის ვღებულობთ:

$$\varphi = AH_0 \left(2\sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}} \right) \exp \cdot (i\sigma t), \quad (2.10)$$

სადაც A ნებისმიერი მუდმივაა; H_0 – ნულოვანი რიგის ჰანკელის ფუნქცია, რომელიც წარმოადგენს ნულოვანი რიგის ბესელისა და მაკდონალდის სპეციალურ ფუნქციათა კომპლექსურ ჯამს; $k_0 = \sigma^2/g$ – ტალღური რიცხვი.

ზღვის სიღრმის ნებისმიერად ცვალებადობის შემთხვევაში მივმართოთ (2.9) განტოლების ზოგად ასიმპტოტურ ამოხსნას **WKB** მეთოდის გამოყენებით [92, 130]. ამისთვის შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{H}} w(x) \quad (2.11)$$

და ჩავსვათ იგი(2.9) განტოლებაში. შედეგად, ეს უკანასკნელი დაიყვანება შემდეგი სახის ორწევრა დიფერენციალურ განტოლებაზე $w(x)$ ფუნქციის მიმართ:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} + F(x)w = 0, \quad (2.12)$$

სადაც

$$F(x) = \frac{\sigma^2}{gH} + \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{H^2} \left(\frac{dH}{dx} \right)^2 - \frac{1}{2H} \cdot \frac{d^2 H}{dx^2} \quad (2.13)$$

(2.12) სახის ორწევრა დიფერენციალური განტოლების მიმართ **WKB** მეთოდის გამოყენება ატარებს კანონიკურ ხასიათს, რაც საშუალებას გვაძლევს (2.11) და (2.8) აღნიშვნების გათვალისწინებით ასიმპტოტური ამოხსნა ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\varphi = \frac{A}{\sqrt{H^4 \sqrt{F}}} \exp \left[i \left(\sigma \pm \int \sqrt{F} dx \right) \right], \quad (2.14)$$

სადაც A წარმოადგენს პოტენციალის განზომილების მქონე ნებისმიერ მუდმივას, ნიშნები „+“ და „-“ ინტეგრალის წინ აიღება შესაბამისად, ზღვიდან ნაპირისკენ მიმართული და ნაპირიდან ზღვისკენ მიმართული – არეკლილი ტალღებისთვის.

ვინაიდან (2.14) გამოსახულება წარმოადგენს ასიმპტოტურ ამოხსნას, მისგან (2.5) და (2.6) აღნიშვნების გათვალისწინებით და ასიმპტოტური გამოსახულების გაწარმოების წესის გამოყენებით [130] ვღებულობთ ტალღის ზედაპირის კოორდინატისა და სითხის ნაწილაკების სიჩქარის რეალური ნაწილების შემდეგ გამოსახულებებს:

$$\eta = \frac{A}{g} \frac{\sigma}{\sqrt{H^4 \sqrt{F}}} \sin \left(\sigma \pm \int \sqrt{F} dx \right), \quad (2.15)$$

$$u' = \mp \frac{A \sqrt[4]{F}}{g \sqrt{H}} \sin \left(\sigma \pm \int \sqrt{F} dx \right), \quad (2.16)$$

სადაც ზედა ნიშნები შეესაბამება ზღვიდან მოსულ ტალღებს, ხოლო ქვედა – არეკლილს.

იმის მიხედვით, თუ რა სახის ამოცანასთან გვაქვს საქმე (2.15) და (2.16) გამოსახულებაში შემავალი ნებისმიერი A მუდმივა, განზომილების დაცვით, შეგვიძლია განვსაზღვროთ ტალღური მოძრაობის ამა თუ იმ კვეთში წინასწარ მოცემული (საწყისი) პარამეტრების საშუალებით. კერძოდ, თუ მოცემული გვექნება

ტალლის ამპლიტუდა და სიგრძე ღრმა წყალზე, ანუ იქ, სადაც ტალლის სიგრძე მოკლეა ან ეთანადება ზღვის სიღრმეს, შეგვიძლია მივიჩნიოთ, რომ

$$A = a_0 \sqrt{\frac{g}{k_0}}, \quad (2.17)$$

სადაც a_0 ღრმა წყალზე ტალლის საწყისი ამპლიტუდაა; $k_0 = 2\pi / \lambda_0 = \sigma^2 / g$ – ტალღური რიცხვი; λ_0 – ტალლის სიგრძე.

ამ აღნიშვნების გათვალისწინებით ტალღური ზედაპირის η კოორდინატი საბოლოოდ დებულობს სახეს:

$$\eta = \frac{a_0 \sin(\sigma \pm \int \sqrt{F} dx)}{\sqrt[4]{k_0 H + \frac{1}{4} \left(\frac{dH}{dx}\right)^2 - \frac{1}{2} H \frac{d^2 H}{dx^2}}}. \quad (2.18)$$

(2.18) გამოსახულების თანახმად, წრფივი ასიმპტოტური მიახლოებით ტალლის ამპლიტუდა სანაპირო ფერდოს ნებისმიერ წაერთილში მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ფსკერის სიმრუდეზე და აგრეთვე ტალლის სიგრძეზე (ანუ, რაც იგივეა, ტალღურ რხევათა სიხშირეზე). ეს დამოკიდებულება შეიძლება უგულებელყოფილი იყოს მხოლოდ ძალზე ნელცვლადი სიღრმეების მქონე სანაპირო ფერდობის შემთხვევაში $\left(\frac{dH}{dx} \ll 1\right)$, ან როდესაც ზღვის ფსკერი იცვლება კვადრატული პარაბოლის შესაბამისად $H \sim ax^2$. ამ შემთხვევაში (2.18)-დან გამომდინარე, გრძელი ტალლის ამპლიტუდა იცვლება გრინის ცნობილი კანონით – $\eta(x) \sim H^{-1/4}$, ხოლო სიჩქარის ამპლიტუდა გამომდინარე (2.16)-დან – კანონით $u'(x) \sim H^{-3/4}$ [76].

i_0 ქანობის მქონე სანაპირო ფერდობის შემთხვევაში, როცა $H = i_0 x$, (2.18)-ში ტალღური მოძრაობის ფაზა ექვემდებარება ზუსტ ინტეგრირებას და ტალღური ზედაპირისთვის (2.13) აღნიშვნის გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$\eta = \frac{a_0}{(k_0 H + i_0^2)^{0.25}} \sin \left[\sigma \pm \left(\sqrt{\frac{4k_0 H}{i_0^2} + 1} + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{4k_0 H + i_0} - \sqrt{i_0}}{\sqrt{4k_0 H + i_0} + \sqrt{i_0}} \right| \right) \right] \quad (2.3.19)$$

მცირე ქანობების შემთხვევაში ($i_0 \ll 1$) (2.19) გამოსახულების ასიმპტოტური ამოხსნა გვაძლევს:

$$\eta = \frac{a_0}{(k_0 i_0 x)^{0.25}} \sin \left(\sigma \pm 2 \sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}} \right), \quad (2.20)$$

რაც ემთხვევა ლ. სრეტენსკის ცნობილ ამოხსნას ტალღების გავრცელების თაობაზე, ძალზე მცირე კუთხით დახრილ სანაპირო ფერდობისთვის [163].

2.2. ნაკადებზე ტალღების ტრანსფორმაციის განსაზღვრის ენერგეტიკული მეთოდები

მდინარეთა შესართავ უბნებსა და ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ზღვასთან დამაკავშირებელ არხებში, აგრეთვე, ნებისმიერი ჰიდროკვანძის გამყვან და მიმყვან არხებში არსებული დინებები, უმრავლეს შემთხვევაში, შეგვიძლია მივიჩნიოთ დამყარებულ დინებებად მათში სხვადასხვა მიზეზით აღძრულ ტალღურ მოძრაობათა არასტაციონალურობასთან შედარებით. ეს დინებები ფსკერის ტოპოგრაფიასთან ერთად ძალზე მნიშვნელოვან ზეგავლენას ახდენს ნაკადის ზედაპირზე ზედდებული რეგულარული თუ არარეგულარული ტალღური მოძრაობის პარამეტრებზე, კერძოდ, ტალღების გავრცელების სიჩქარეზე, ტალღის სიგრძესა და სიმაღლეზე, რომლებიც თავის მხრივ, ძირითადი დინების სიჩქარესთან ერთად განაპირობებს კალაპოტის ფსკერისა და ფერდობების მდგრადობას, განსაზღვრავს ზღვასთან მიმდებარე ნაგებობების კონსტრუქციულ ზომებს, მათი ექსპლუატაციის ხანგრძლივობას და ა. შ.

ამჟამად, ისევე როგორც ცვალებადი სიღრმის მქონე უძრავ წყალზე, დამყარებულ არათანაბარ ნაკადებზე ტალღური მოძრაობის პარამეტრების დასადგენად იყენებენ ე. წ. ტალღების ტრანსფორმაციის თეორიას, რომელიც იშვიათი გამონაკლისის გარდა, ცვალებად დინებებზე ტალღური ჰიდროდინამიკის განტოლებების ზუსტი ან თუნდაც მიახლოებითი ამოხსნების არარსებობის გამო, ძირითადად, ეფუძნება მუდმივი სიღრმის ($H = const$) მქონე ნაკადებზე კლასიკურ ამოხსნებს. უფრო ზუსტად, ტრანსფორმაციის თეორია ტალღების ენერგეტიკული ბალანსის განტოლების საფუძველზე ამყარებს კავშირს ნაკადის ერთ სიღრმეზე მოცემულ და მეორე სიღრმეზე განსაზღვრულ ტალღური მოძრაობის პარამეტრებს შორის, როცა აღნიშნულ სიღრმეებს შორის გარდამავალი უბანი იმდენად ნელცვლადია, რომ შესაძლებელია მისი ფსკერის ქანობის უგულველყოფა. ამ თეორიის ფარგლებში განსაკუთრებით აღსანიშნავია ჯონსონის [56], ვაისფელდის [83], ლონგე-ჰიგინსისა და სტიუარტის [58,162], უნას [68], იპენისა და ხარლემანის [111], ვონიჩ-სიანოჟენცკისა და ტოგონიძის [89, 91], ტეილორის [66] და ფილიპსის [171] შრომები. მოკლედ განვიხილავთ ზოგიერთ მათგანს ჩვენ მიერ ქვემოთ, 3.2.3-ში მიღებულ შედეგებთან მათი შედარების მიზნით.

უნა განიხილავს შემთხვევას [68], როცა ტალღები მოცემული ფაქტობრივად უსასრულოდ ღრმა უძრავ წყალზე მიემართება რა შედარებით მცირე სიღრმისკენ, სადაც ძირითადი ნაკადის სიჩქარე ეთანადება ტალღური მოძრაობის სიჩქარეს, განიცდის ტრანსფორმაციას. კერძოდ, მათი ფაზური სიჩქარე $c_0 = \sqrt{gk_0} = \sqrt{g\lambda_0 / 2\pi}$

ღრმა წყალზე ხდება $c = U + c_u = U + \sqrt{g\lambda_u/2\pi}$ ტოლი. ამრიგად, ვინაიდან ფაზური სიჩქარე c არ არის დამოკიდებული ნაკადის სიღრმეზე, უნა ორივე უბანზე განიხილავს წყლის სიღრმესთან შედარებით მოკლე ტალღებს, რომელთა სიგრძის (λ) ცვალებადობა, განპირობებული მხოლოდ სტაციონალური ნაკადის სიჩქარის ცვალებადობით განისაზღვრება გამომდინარე ტალღური მოძრაობის სიხშირის მუდმივობის პირობიდან:

$$k_\lambda = \frac{\lambda_u}{\lambda_0} = \frac{c_u + U}{c_0}, \quad (2.21)$$

სადაც λ_u – ტალღის სიგრძეა დინების ზონაში, ხოლო λ_0 – ტალღის სიგრძე უსასრულოდ ღრმა წყალზე; c_u და c_0 შესაბამისი ფაზური სიჩქარეებია, რომლებიც უნას მიხედვით ერთმანეთს უკავშირდებიან დამოკიდებლობით

$$c_u = c_0 \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{U}{C_0}} \right). \quad (2.22)$$

ამ დამოკიდებულების თანახმად უძრავ წყალზე ($U = 0$) $c_u = c_0$ და $\lambda_u = \lambda_0$. როცა გვაქვს დინება და ტალღები ვრცელდება დინების მიმართულებით ($U > 0$) ყოველთვის სრულდება უტოლობა $c_u > c_0$, რის გამოც (2.21) დამოკიდებულების თანახმად დინების ზონაში ხდება ტალღის სიგრძის მატება ($\lambda_u > \lambda_0$). დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით ტალღების გავრცელების შემთხვევაში ($U < 0$) ხდება პირიქით: – კლებულობს ტალღის თავდაპირველი სიგრძე (λ_0), ხოლო მაშინ, როცა $U > |-c_0/4|$ ფაზური სიჩქარე განსაზღვრული (2.22) დამოკიდებულებით, ხდება წარმოსახვითი, ანუ წარმოიქმნება არამდგრადობა, რაც გამოვლინდება დინების საწინააღმდეგოდ ტალღების გავრცელებაში დამსხვრეული ფრონტით.

ტალღის ამპლიტუდის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის დადგენისას უნა იყენებს ენერგეტიკულ მეთოდს. ამასთან მიიჩნევს, რომ უძრავი წყლის ზონაში ტალღების მიერ ენერგია გადაიტანება $c_0/2$ სიჩქარით, ხოლო დინებაზე $(c_u/2) + U$ სიჩქარით, რის გამოც ენერგიის ნაკადის ბალანსის (მუდმივობის) განტოლება გვაძლევს ტალღის სიმაღლის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის შემდეგ საანგარიშო დამოკიდებულებას:

$$k_\eta = \frac{h_u}{h_0} = \left(\frac{c_0}{c_u + 2U} \right)^{1/2}, \quad (2.23)$$

სადაც h_u და h_0 ტალღის სიმაღლეებია, შესაბამისად წყლის მოძრავ და უძრავ ზონებში.

(2.23) დამოკიდებულების თანახმად დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით გავრცელებისას ($U < 0$) მატულობს ტალღის სიმაღლე, ხოლო დინების მიმართულებით კი პირიქით, – კლებულობს. გარდა ამისა, როცა $c_u = -2U$, ტალღის სიმაღლე უსასრულოდ იზრდება ანუ ხდება ტალღების მსხვრევა.

ვაისფელდი [83], ისევე როგორც უნა, განიხილავს მხოლოდ დინების გავლენას მოკლე ტალღების ტრანსფორმაციაზე, მაგრამ უნასაგან განსხვავებით, დინებაზე ტალღის გავრცელების სიჩქარისთვის იყენებს გამარტივებულ დამოკიდებულებას $c_U = c_0 + U$, რის გამოც ტალღის სიგრძის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი

$$k_\lambda = \frac{\lambda_u}{\lambda} = 1 + \frac{U}{c_0}, \quad (2.24)$$

ხოლო სიმაღლის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი

$$k_h = \frac{h_U}{h_0} = \frac{1}{(1 + 4U/c_0)^{1/2}} \quad (2.25)$$

როგორც ვხედავთ, მიუხედავად სხვადასხვა მიდგომისა, ვაისფელდთან, ისევე როგორც უნასთან (რომელიც თავის მხრივ ეყრდნობა ფილიპსის [81] კონცეფციას), ტალღების მსხვრევა ხდება დამყარებული ნაკადის სიჩქარის ერთი და იგივე მნიშვნელობისას, როცა $U = -c_0/4$.

ჯონსონიც [56] სიღრმის ცვლილების მხედველობაში მიუღებლად განიხილავს დინებაზე ტალღების ტრანსფორმაციას, რაც გულისხმობს, რომ ამ ნაშრომში საქმე გვაქვს მხოლოდ წყლის სიღრმესთან შედარებით მოკლე ტალღებთან.

ჩვენთვის განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენს თ. ვოინიჩ-სიანოჟენცკისა და ნ. ტოგონიძის პუბლიკაციები [89, 90, 91], რომლებშიც პირველად იყო განხილული ტალღების ტრანსფორმაციის ამოცანა ცვალებადი სიღრმის ნაკადებზე. ეს ნაშრომები ეყრდნობა გრავიტაციული ტალღების წრფივი და ნაწილობრივ არაწრფივი თეორიის კლასიკურ ამოხსნებს. მათში ტალღის ამპლიტუდის (a) (ანუ სიმაღლის, ვინაიდან $h = 2a$) ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის საანგარიშოდ მიღებულია შემდეგი დამოკიდებულება

$$k_{a(\eta)} = \frac{a_1}{a_2} = \sqrt{\frac{S_{0(1)}}{S_{0(2)}} \left[\frac{1 \pm \frac{U_1}{2S_{0(1)}} \left(1 + 2 \frac{S_{0(1)}}{c_{0(1)}} \right)}{1 \pm \frac{U_2}{2S_{0(2)}} \left(1 + 2 \frac{S_{0(2)}}{c_{0(2)}} \right)} \right]^{1/2}}, \quad (2.26)$$

სადაც ინდექსებით 1 და 2 შესაბამისად აღნიშნულია ტალღური მოძრაობის სხვადასხვა H_1 და H_2 სიღრმეებზე მოცემული და საძიებელი პარამეტრები; ნიშნები

„+“ და „-“ შეესაბამება ტალღების გავრცელებას სტაციონალური ნაკადის თანხვედნილი და საწინააღმდეგო მიმართულებით; c_0 აღნიშნავს ტალღის გავრცელების ფაზურ სიჩქარეს H სიღრმის მქონე მდგარ წყალზე; S_0 იწოდება ჯგუფურ სიჩქარედ, რომელიც განსაზღვრავს ტალღების მიერ ენერჯის გადატანის სიჩქარეს და იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$S_0 = \frac{c_0}{2} \left(1 + \frac{2kH}{\sinh 2kH} \right), \quad (2.27)$$

სადაც $k = 2\pi/\lambda$ ტალღური რიცხვია; λ ტალღის სიგრძე, რომლის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი, გამომდინარე რეგულარული ტალღური მოძრაობის სიხშირის (პერიოდის) მუდმივობის პირობიდან იანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$k_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{U_1 \pm c_{01}}{U_2 \pm c_{02}}. \quad (2.28)$$

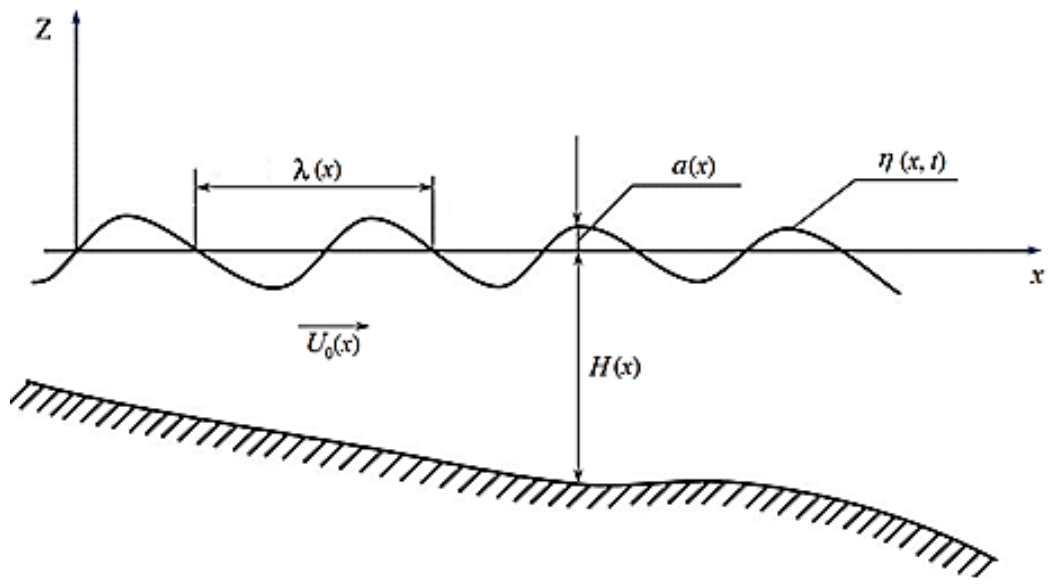
აქვე აღვნიშნავთ, რომ (2.26) და (2.28) შედეგები ხარისხობრივი თვალსაზრისით შესაბამისობაშია ჯონსონისა და ლონგე-ჰიგინს-სტიუარტის შედეგებთან. აქაც, ისევე როგორც სხვა ავტორებთან, რომლებიც ეყრდნობიან ენერგეტიკულ მეთოდებს, ტრანსფორმაციისას ტალღის სიგრძეები მატულობს, ხოლო სიმაღლეები იკლებს დინების თანხვედნილი მიმართულებით და პირიქით – სიგრძეები კლებულობს. როცა ტალღები დინების საწინააღმდეგოდ არის მიმართული, სიმაღლეები მატულობს. თუ არ გვაქვს დინება ($U = 0$) (2.28) გამოსახულება დაიყვანება ო'ბრაინისა [60] და კრილოვის [120, 121] დამოკიდებულებამდე:

$$k_{a(h)} = \frac{a_2}{a_1} = \sqrt{\frac{S_{0(1)}}{S_{0(2)}}}. \quad (2.29)$$

უძრავი წყლის (კერძოდ ზღვის) სანაპირო ფერდობის მცირე დახრილობისას და ნაპირთან ტალღების ფრონტალურად მოსვლის შემთხვევაში, ამავე შედეგამდე მივყავართ შ. გაგოშიძის ამოხსნებს [92, 95], სადაც ავტორი არ სარგებლობს ენერგეტიკული მეთოდით და ეფუძნება დახრილ ფსკერზე ტალღური ჰიდროდინამიკის სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნას პირდაპირი და ასიმპტომური მეთოდების გამოყენებით. მაგრამ, მიუხედავად ამგვარი თანხვედრისა, როცა საკითხი ეხება არათანაბარი დინების ფაქტორის გათვალისწინებას ტალღური ჰიდროდინამიკის განტოლებათა უშუალო ამოხსნა [72] იძლევა ენერგეტიკული მეთოდისაგან მნიშვნელოვნად გასხვავებულ, შეიძლება ითქვას, დიამეტრალურად საწინააღმდეგო შედეგებს, რაც ჩვენ მიერ დინებაზე ჰიდროდინამიკის გრძელტალღოვან განტოლებათა სისტემის ასიმპტოტური ამოხსნის შედეგად იქნება ნაჩვენები შემდეგ პუნქტში.

2.3. გრძელი ტალღები ცვალებადი სიჩქარის დამყარებულ ნაკადებზე

აქ ერთგანზომილებიანი ბრტყელი ამოცანის ფარგლებში ჩვენ განვიხილავთ ტალღების გავრცელებას ნებისმიერად, ცვალებადი სიჩქარისა და სიღრმის მქონე დამყარებულ ნაკადებზე. ამგვარ შემთხვევებთან ხშირად გვაქვს საქმე მდინარეთა ზღვაში შესართავ უბნებსა და ჰიდროტექნიკური ნაგებობების გამყვან და მიმყვან არხებში, ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ბიეფების შემაუღლებელ სწრაფდენებში (ე.წ. დრესლერის ტიპის ფენა ტალღები) და ა.შ. ქვემოთ მოყვანილი ამოხსნები მოიცავს აგრეთვე ყველასთვის კარგად ცნობილ და ჯერჯერობით მათემატიკურად აღუწერელ იმ წყვეტად-ფენა ტალღებს, რომლებიც ყველა შუნიშნავს დახრილ ასფალტირებულ ქუჩებზე წვიმის ნიაღვრის ჩავლისას. დაბოლოს, აქ მოყვანილი ამოხსნების ფარგლებში შეიძლება ახლებურად აიხსნას ჰიდრავლიკური ნახტომის მოვლენა [72, 173, 176], რაც უშუალოდ არ წარმოადგენს ჩვენი მონოგრაფიის კვლევის საგანს, მაგრამ რაზეც ჩვენ ორიოდ სიტყვით მაინც შევჩერდებით.



ნახ. 2.2. გრძელი ტალღების საანგარიშო სქემა ნებისმიერად ცვალებადი სიღრმის ნაკადზე

ცვალებადი სიჩქარისა და სიღრმის მქონე ნაკადების ზედაპირზე გრძელი ტალღების გავრცელების აღწერის მიზნით, ვისარგებლოთ ზოგადი არაწრფივი (2.1)-(2.2) განტოლებათა სისტემით და ნახ.2.2-ზე წარმოდგენილი სქემით, სადაც x ღერძი შეთავსებულია შეუშფოთებელ თავისუფალ ზედაპირთან და მიმართულია სტაციონალური დინების გასწვრივ. სითხის ნაწილაკთა ჰორიზონტალური გადაადგილების სიჩქარე u' ამჯერად წარმოგვიდგება შემდეგი ჯამის სახით:

$$u' = U_0(x) + u(x,t), \tag{2.30}$$

სადაც $U_0(x)$ არის შესართავ აკვატორიაში მდინარის ჭავლის ცვალებადი სიჩქარე; $u(x,t)$ წარმოადგენს მხოლოდ გრძელტალღოვანი მოძრაობით გამოწვეული სითხის ნაწილაკთა სიჩქარეს.

ჩავსვათ (2.30) გამოსახულება (2.1), (2.2) განტოლებათა სისტემაში და წარმოვადგინოთ ეს უკანასკნელი დივერგენტული ფორმით, შედეგად მივიღებთ შემდეგი სახის არაწრფივ განტოლებათა სისტემას

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U_0^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (U_0 u) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}; \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (U_0 h) + \frac{\partial}{\partial x} (U_0 \eta) + \frac{\partial}{\partial x} (u \eta) = -\frac{\partial}{\partial x} (u h). \quad (2.32)$$

ჩვეულებრივ, როცა ხდება ტალღების ზედდება უძრავი წყლის თავისუფალ ზედაპირზე ($U_0(x)=0$) (2.31)-(2.32) განტოლებათა სისტემის გაწრფივება არ არის დაკავშირებული რაიმე დამატებით პირობებთან, გარდა ერთისა – ესაა ტალღურ შემფოთებათა ამპლიტუდის სიმცირე წყლის სიღრმესთან შედარებით, რის გამოც, გარდა U_0 -იანი წევრებისა (2.31)-(2.32), განტოლებათა სისტემიდან ვარდება ყველა წევრი, რომელიც მოიცავს ტალღური შემფოთებების პარამეტრების – სიჩქარისა და სიმაღლის ნამრავლებსა და მათ კვადრატებს. მაგრამ, როცა განიხილება ტალღის გავრცელება შესართავ აკვატორიაში, სადაც მდინარის ნაკადი, ჩვეულებრივ, წყნარ რეჟიმში ერთვის ზღვას (2.31)-(2.32) განტოლებათა სისტემის გაწრფივების პროცედურა უკავშირდება გარკვეულ პირობებსა და გაწრფივების თანმიმდევრობას, რომლის დაუცველობამ, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, შეიძლება ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავებულ შედეგებამდე მიგვიყვანოს.

პირველ რიგში აღვნიშნავთ, რომ თუ გვსურს გავარკვიოთ რა გავლენას ახდენს ძირითადი ნაკადის U_0 სიჩქარე ტალღურ მოძრაობაზე, იგი უნდა მივიჩნიოთ სითხის ნაწილაკების ტალღური მოძრაობით განპირობებულ u სიჩქარეზე მეტ სიდიდედ. წინააღმდეგ შემთხვევაში (2.31)-(2.32) სისტემის გაწრფივება აუცილებლად გამოიწვევს ძირითადი ნაკადის – მდინარის U_0 სიჩქარის შემცველი წევრების გამორიცხვას. გარდა ამისა, თუ თავიდანვე ერთდროულად უგულებელვყოფთ წევრებს, რომლებიც მოიცავს u^2 -სა და $u \eta$ სიდიდეების ნამრავლს, მივიღებთ შედეგებს, რომლებსაც, როცა $H = const$ ექნება კლასიკური ამოხსნების სახე. თუ უგულებელვყოფთ წევრებს u^2 -ით და ამავე დროს, ვიდრე არ შევაფასებთ $u \eta$ ნამრავლში შემავალი წევრების წრფივადობას, კორექტულად შევინარჩუნებთ მას, აღმოვაჩინოთ, რომ ეს ნამრავლი შეიცავს იმავე რიგის წრფივ წევრს, რომელიც არ ექვემდებარება უგულებელყოფას.

ნათქვამის საილუსტრაციოდ განვიხილოთ გაწრფივების ეს შემთხვევები ცალ-ცალკე, რისთვისაც შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.33)$$

$$\text{და} \quad \eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{U_0^2}{2} \right), \quad (2.34)$$

სადაც φ ტალღური შეშფოთებების სიჩქარის სამიებული პოტენციალია.

ადვილი შესამჩნევია, რომ (2.34) აღნიშვნის შემოღებით იგივეურად კმაყოფილდება (2.31) განტოლება, რომელიც ზუსტად გამომდინარეობს რა, ტალღური ჰიდროდინამიკის ფუნდამენტური განტოლებიდან [119, 122, 164], ამავე დროს, მიგვითითებს მეტად საყურადღებო ფაქტზე – იმ შემთხვევაშიც კი, როცა არ გვაქვს ტალღური შეშფოთებები ($\varphi = 0$), იდეალური სითხის მოდელის ფარგლებში, სტაციონალური ნაკადის ზედაპირის η კოორდინატიც დაბლან ზღვის სტატიკურ (ნულოვან) დონესთან შედარებით $U_0^2/2g$ ტოლი სიდიდით. მდინარის ზღვასთან შეუღლების სწორედ ამგვარი სურათი მოჰყავს ცნობილ ჰიდრომექანიკოსსა და ოკეანოლოგს პრაუდმენს თავის მონოგრაფიაში „დინამიკური ოკეანოგრაფია“ ([146] ნახ. 29). $U_0^2/2g$ სიდიდე მართალია იმდენად მცირეა, რომ უმრავლეს შემთხვევაში დასაშვებია მისი უგულებელყოფა მდინარეთა შესართავი უბნებისთვის, მაგრამ როცა საკითხი ეხება ჰიდროტექნიკური ნაგებობების კალაპოტებში ტალღებისა და დინების ურთიერთქმედებას U_0^2 -ის უგულებელყოფა ან შენარჩუნება (2.34)-ში და გამომდინარე აქედან $u\eta$ ნამრავლში, რომელიც, თავის მხრივ, შედის (2.32) განტოლებაში, გვადლევეს როგორც ხარისხობრივ, ასევე რაოდენობრივი თვალსაზრისით ერთმანართისაგან მკვეთრად განსხვავებულ შედეგებს. მართლაც, თუ თავიდანვე უგულებელვყოფთ u^2 და $u\eta$ -ს შემცველ წევრებს, (2.32) განტოლებაში (2.33) და (2.34) აღნიშვნების ჩასმისა და გაწარმოება-გაწრფივების პროცედურის შესრულების შედეგად მივიღებთ ცვალებად დინებაზე ტალღური პოტენციალის სამიებელ შემდეგ განტოლებას:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + (U_0^2 - gH) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial U_0}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(U_0 \frac{\partial U_0}{\partial x} - g \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \quad (2.35)$$

მეორე მხრივ, თუ $u\eta$ ნამრავლში შევინარჩუნებთ U_0^2 -იან წევრს, ანუ მივიჩნევთ, რომ $u\eta \approx \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot \frac{U_0^2(x)}{2}$, (2.32)-დან გამომდინარე გაწრფივების იგივე პროცედურა მოგვცემს

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} + \left(\frac{3}{2} U_0^2 - gH \right) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial U_0}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(3U_0 \frac{\partial U_0}{\partial x} - g \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0. \quad (2.36)$$

როგორც ვხედავთ, ამ ორივე წრფივი განტოლების შესაბამის წევრებს გააჩნია ერთი და იგივე ან ერთი და იგივე რიგის ცვლადი კოეფიციენტები, მაგრამ მიუხედავად ამ მსგავსებისა, მათ მივყავართ ერთმანეთისაგან მნიშვნელოვნად განსხვავებულ შედეგებამდე. კერძოდ თუ განვიხილავთ კლასიკურ ამოცანას გრძელი ტალღების გავრცელების შესახებ მუდმივი სიღრმისა და სიჩქარის მქონე ნაკადებზე ($H = const, U_0 = const$), მაშინ (2.35) და (2.36) განტოლებები შესაბამისად ღებულობს სახეს:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} + (U_0^2 - gH) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0; \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} + \left(\frac{3}{2} U_0^2 - gH \right) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0. \quad (2.38)$$

წარმოვადგინოთ ამ განტოლებათა ამოხსნა კომპლექსურმაჩვენებლიანი პერიოდული ფუნქციის სახით

$$\varphi = A \cdot \exp i(\sigma t \pm kx), \quad (2.39)$$

სადაც, ნიშანი „+“ აიღება დინების საწინააღმდეგოდ მიმართული ტალღებისთვის, ხოლო „-“ – როცა ტალღების მიმართულება ემთხვევა დინების მიმართულებას; A წარმოადგენს პოტენციალის განზომილების მქონე ნებისმიერ მუდმივას; i – წარმოსახვითი ერთეულია, σ – ტალღურ რხევათა სიხშირე, $\sigma = 2\pi / \tau$; τ – პერიოდი; k – ტალღური რიცხვი, $k = 2\pi / \lambda$; λ – ტალღის სიგრძე.

თუ (2.39)-ს ჩავსვამთ (2.37) განტოლებაში მივიღებთ რომ დინების საწინააღმდეგოდ მიმართული ტალღებისთვის სრულდება ტოლობა

$$(\sigma + kU_0)^2 = k^2 gH, \quad (2.40)$$

საიდანაც ტალღურ რხევათა სიხშირე

$$\sigma = -kU_0 + k\sqrt{gH}, \quad (2.41)$$

ხოლო ტალღების დინების (x ღერძის) საწინააღმდეგოდ გადაადგილების ფაზური სიჩქარე

$$c = -\frac{\sigma}{k} = U_0 - \sqrt{gH}. \quad (2.42)$$

დინების მიმართულებით ტალღების გავრცელების შემთხვევაში (ნიშანი „-“ (2.39) გამოსახულებაში) (2.22) განტოლებიდან ვღებულობთ

$$(\sigma - kU_0)^2 = k^2 gH, \quad (2.43)$$

საიდანაც ფაზური სიჩქარე

$$c = \frac{\sigma}{k} = U_0 + \sqrt{gH}. \quad (2.44)$$

(2.40)-(2.44) გამოსახულებები წარმოადგენს მუდმივი სიღრმისა და სიჩქარის ნაკადებზე გრძელი ტალღების გავრცელების კარგად ცნობილ ამოხსნებს, რაც პ. 1.2-შია

მოყვანილი. ამავე ამოხსნებთან მივყავართ აგრეთვე უძრავ წყალზე ტალღური მოძრაობის განტოლებებს თუ ფორმალურად გამოვიყენებთ კოორდინატთა გარდაქმნის გალილეის მეთოდს [145] და x კოორდინატს შევცვლით $x \pm ct$ კოორდინატით.

ახლა განვიხილოთ (2.38) განტოლება და ჩავსვათ მასში(2.39) ამოხსნა: ადვილად დავრწმუნდებით, რომ ამ ჩასმის შედეგად(2.38) განტოლება დაიყვანება σ და k -ს დამაკავშირებელ შემდეგი სახის ალგებრულ გამოსახულებაზე:

$$\sigma^2 \pm 2kU_0\sigma + \frac{3}{2}k^2U_0^2 = k^2gH \quad (2.45)$$

ანუ, რაც იგივეა

$$(\sigma \pm kU_0)^2 = \left(gH - \frac{U_0^2}{2}\right)k^2. \quad (2.46)$$

აქ და ყველგან ქვემოთ ზედა ნიშნები შეესაბამება ტალღების გავრცელებას დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით, ხოლო ქვედა პირიქით - ტალღების გავრცელებას დინების მიმართულებით.

გამომდინარე (2.46) ტოლობიდან ტალღების გავრცელების ფაზური სიჩქარე დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით $c = -\sigma / k$ იანგარიშება დამოკიდებულებით:

$$c = U_0 - \sqrt{gH - \frac{U_0^2}{2}}, \quad (2.47)$$

რომელიც მნიშვნელოვნად განსხვავდება (2.42) დამოკიდებულებისაგან. კერძოდ, გამომდინარე (2.42)-დან ფაზური სიჩქარე $c = 0$ და ტალღებს არ შეუძლია გავრცელდეს დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით, როცა $U_0^2 = gH$, ანუ, როცა ფრუდის რიცხვი $Fr_0 = U_0^2 / gH \geq 1$. (2.47) ტოლობიდან გამომდინარე კი, ტალღების ბლოკირების პირობა $c = 0$ სრულდება მაშინ, როცა $Fr_0 = U_0^2 / gH \geq 2/3$. ამასთან (2.47)-ის თანახმად ბლოკირების პირობა წინ უსწრებს ტალღის დამსხვრევის პირობას $Fr_0 = U_0^2 / gH \geq 2$, რომლის დროსაც რადიკალქვეშა გამოსახულება (2.47)-ში ან (3.46)-ის მარჯვენა მხარე ხდება უარყოფითი. ამ შემთხვევაში (2.39)-ის ამოხსნაში ტალღურ რხევათა სიხშირე σ ხდება კომპლექსური რიცხვი და ამოხსნა დროში მიისწრაფის უსასრულობისკენ, რასაც მივყავართ ჰელმჰოლცისეულ არამდგრადობამდე და რაც რეალურად გამოიხატება ტალღის დამსხვრევაში.

როგორც ვხედავთ (2.47) შედეგის ფარგლებში კარგად იხსნება ცდებით მრავალჯერ დადასტურებული [5, 24, 25, 26] გარემოება, რომ ფრუდის რიცხვის ერთთან მახლობელ დიაპაზონში, კერძოდ, (2.47)-ის თანახმად, როცა $0,67 \leq Fr_0 \leq 2$ ჰიდრავლიკურ ნახტომს, (რომელიც სხვა არაფერია თუ არა შეჩერებული გრძელი ტალღა), არ გააჩნია დამსხვრეული ფრონტის მქონე სრულყოფილი ნახტომის სახე და ებულობს ე. წ. „ნახტომ-ტალღის“ ფორმას. „სრულყოფილი“ ჰიდრავლიკური

ნახტომი ხორციელდება მხოლოდ მაშინ, როცა $Fr_0 > 2$, ხოლო როცა $Fr_0 < 0,67$ გრძელი ტალღა თავისუფალად გადაადგილდება დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით, ანუ დიდი სიღრმის მქონე ნაკადი (ტალღა)დამსხვრეული ფრონტის გარეშე ფარავს მცირე სიღრმის შემხვედრ ნაკადს. უნდა აღინიშნოს, რომ ჰიდრავლიკური ნახტომის ზემოთ ნახსენებ დიაპაზონში ჩატარებული ექსპერიმენტული და ნატურული კვლევების შედეგები ვერ პოულობს ვერც რაოდენობრივ და ვერც ხარისხობრივ ახსნას ჰიდრავლიკური ნახტომის აღიარებლი თეორიის ფარგლებში, რომელიც გამომდინარეობს ნაკადის მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების კანონიდან [49, 72, 78, 173, 174]. ჰიდრავლიკური ნახტომის უფრო დეტალური ანალიზი სცილდება წარმოდგენილი მონოგრაფიის ფარგლებს, მაგრამ გარკვეული პირობითობით (2.47) დამოკიდებულების საფუძველზე შეგვიძლია განვსაზღვროთ ნახტომის შეუღლებული სიღრმეებიც, ამ სიღრმეთა შედარებით მცირე ფარდობებისთვის (ვინაიდან (2.47) წარმოადგენს წრფივი მიახლოების შედეგს). ამისათვის მივმართოთ (2.47) დამოკიდებულების შემდეგი სახის ინტერპრეტაციას: მივიჩნიოთ, რომ ჰიდრავლიკური ნახტომი წარმოადგენს $H = h'$ სიღრმეზე ნაკადის $U_0 = U_2$ სიდიდით შეჩერებულ ($c = 0$) ტალღას, ანუ მივიჩნიოთ, რომ როცა ხდება ჰიდრავლიკური ნახტომი, (2.47)-ის თანახმად სრულდება ტოლობა:

$$U_2^2 = gh' - \frac{U_2^2}{2}, \quad (2.48)$$

სადაც h' ნახტომის პირველი შეუღლებული სიღრმეა. ამასთან, ტრანზიტული ხარჯის მუდმივობის კანონი გვაძლევს

$$U_2 = \frac{h'}{h''} U_1, \quad (2.49)$$

სადაც h'' – ნახტომის საძიებელი მეორე შეუღლებული სიღრმეა, ხოლო U_1 – წარმოადგენს მძაფრი ნაკადის მოცემულ სიჩქარეს h' სიღრმის მქონე კვეთში. (2.49)-ის ჩასმით (2.48)-ში მივიღებთ ნახტომის შეუღლებულ სიღრმეთა მარტივ საანგარიშო ფორმულას

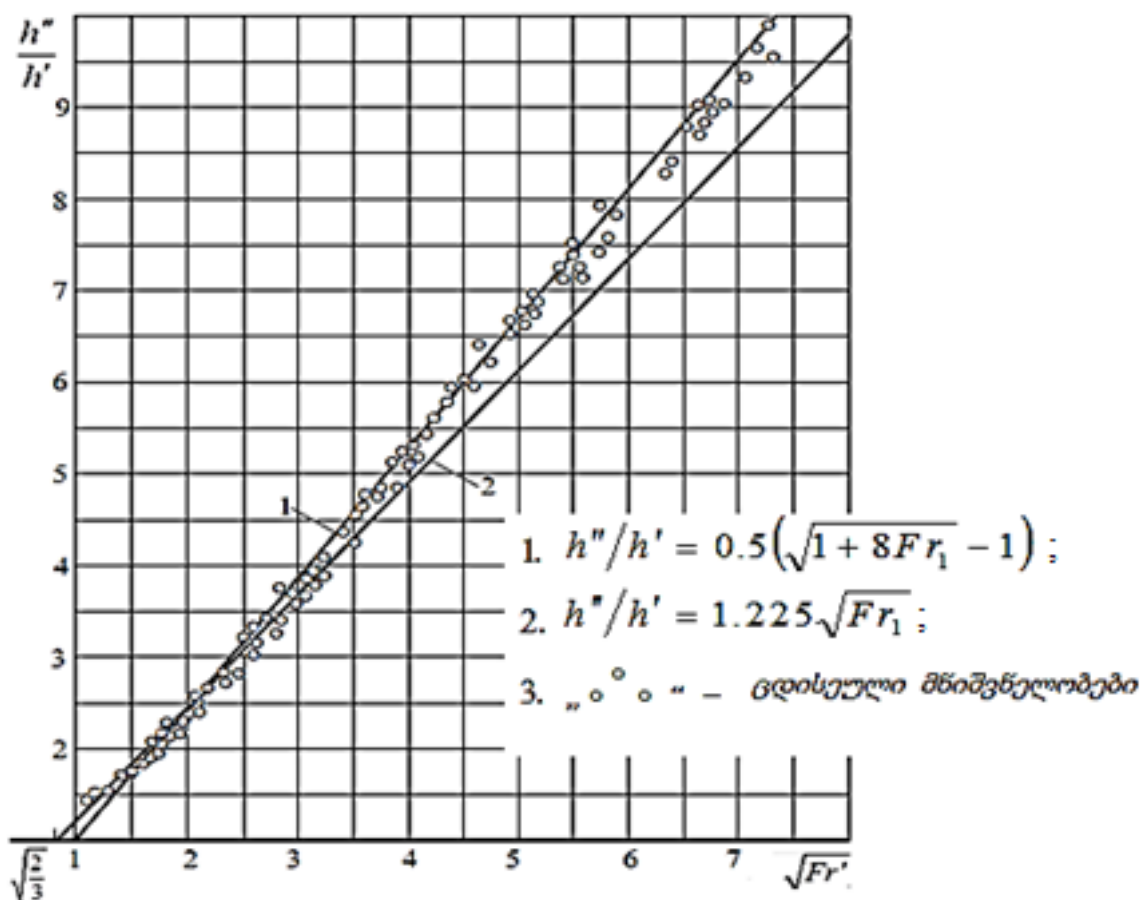
$$\frac{h''}{h'} = \sqrt{\frac{3}{2} Fr_1} = 1,225 \sqrt{Fr_1}, \quad (2.50)$$

სადაც $Fr_1 = U_1^2 / gh'$ ფრუდის რიცხვია განსაზღვრული პირველი შეუღლებული სიღრმის მქონე კვეთში. გამომდინარე (2.50) ფორმულიდან, როცა $Fr_1 = 2/3 = 0,67$, $h'' = h'$, ანუ არ გვაქვს ჰიდრავლიკური ნახტომი, ხოლო სრლყოფილი ჰიდრავლიკური ნახტომი – $h'' = 2h'$ ხდება მაშინ, როცა $Fr_1 = 2,67 > 2$. უნდა აღინიშნოს, რომ ფრუდის რიცხვების საკმაოდ დიდ დიაპაზონში ($0,67 \leq Fr_1 \leq 10$) (2.50) დამოკიდებულება გაცილებით უკეთესად ასახავს სხვადასხვა

ავტორთა ექსპერიმენტულ შედეგებს [24], ვიდრე ჰიდრავლიკური ნახტომის ბელანჟეს აღიარებული ფორმულა

$$\frac{h''}{h'} = 0,5(\sqrt{1+8Fr_1} - 1). \quad (2.51)$$

ნათქვამის დასადასტურებლად ნახ.2.3-ზე მოგვყავს ჩერტოუსოვის მიერ შედგენილი გრაფიკი [72, 173], რომელზეც გარდა ექსპერიმენტული წერტილებისა და (2.51) დამოკიდებულებით აგებული მრუდისა, ჩვენ მიერ შედარების მიზნით დატანილია (2.50) ფორმულით აგებული წრფე. ამ წრფით განისაზღვრება როგორც ჰიდრავლიკური ნახტომ-ტალღის, ასევე სრულყოფილი ნახტომის შეუღლებული სიღრმეები.



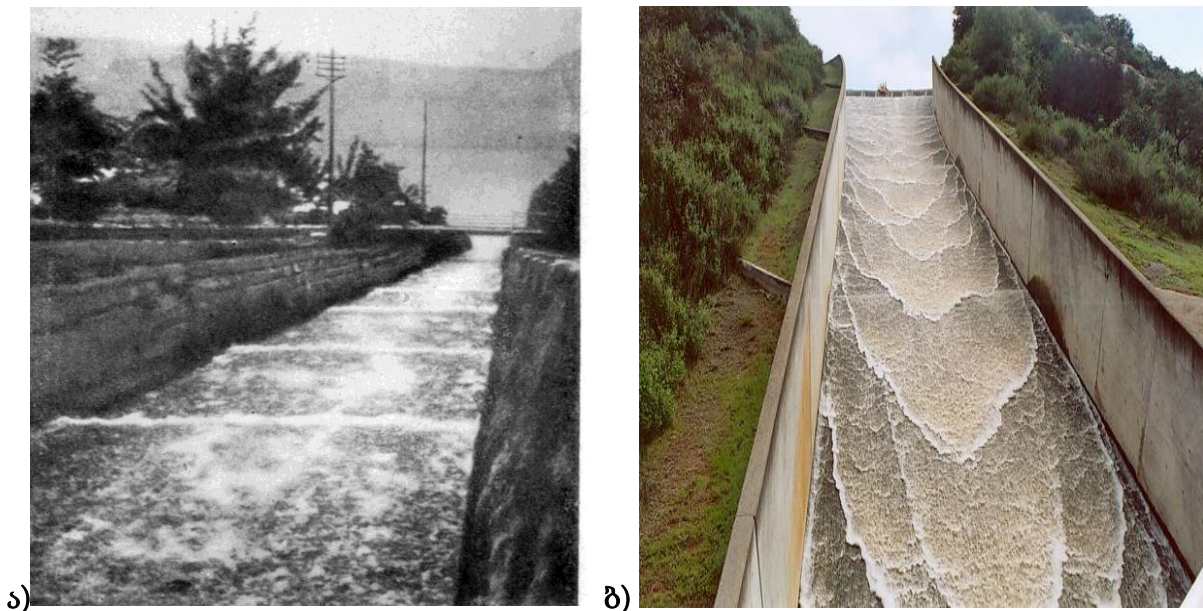
ნახ. 2.3. ჰიდრავლიკური ნახტომის საანგარიშო გრაფიკები და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგები [132].

ახლა განვიხილოთ მუდმივ სიღრმეზე დინების მიმართულებით მიმართული ტალღები. გამომდინარე (2.46)-დან ქვედა „-“ ნიშნის შემთხვევაში დინების გასწვრივ ტალღების გავრცელების ფაზური სიჩქარე იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$c = U_0 + \sqrt{gH - \frac{U_0^2}{2}}. \quad (2.52)$$

ისევე, როგორც დინების საწინააღმდეგოდ, ტალღების გავრცელების შემთხვევაში (2.52)-ის შედარება დინების მიმართულებით ტალღების გავრცელების ცნობილ (2.44) ამოხსნასთან გვაძლევს მნიშვნელოვნად განსხვავებულ შედეგებს. კერძოდ, თუ (2.44)-ის თანახმად, დინებაზე ტალღის გავრცელების ფაზური სიჩქარე c ყოველთვის აჭარბებს ძირითადი ნაკადის U_0 სიჩქარეს და მონოტონურად იზრდება ამ უკანასკნელის ზრდასთან ერთად. (2.52)-ის თანახმად, მართალია ფაზური სიჩქარე c აჭარბებს ძირითადი ნაკადის U_0 სიჩქარეს, მაგრამ სხვაობა ამ სიჩქარეთა შორის $(c - U_0)$ მცირდება ძირითადი ნაკადის U_0 სიჩქარის მატებასთან ერთად და ხდება ნულის ტოლი, როცა გამომდინარე (2.52)-დან ფრუდის რიცხვი $Fr = U_0^2 / gH = 2$.

სიჩქარის შემდგომი ზრდა (2.52)-სა და (2.46) ამოხსნებში იწვევს ფესქვეშა გამოსახულების ნიშნის ცვლილებას დადებითიდან უარყოფითისკენ, რასაც მივყავართ ტალღური მოძრაობის ჰელმჰოლცისეულ არამდგრადობამდე. (2.39)-ის თანახმად, ამ დროს ხდება დროში ტალღის ამპლიტუდის უსასრულოდ ზრდა, რაც, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, რეალურად გამოიხატება ტალღების ფრონტის დამსხვრევასა და ე. წ. „ბორის“ ტიპის პერიოდული ფენა ტალღების წარმოქმნაში. ამგვარ ტალღებს ხშირად ვხვდებით ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ბიეფების შემაუღლებელ სწრაფდენებში (ნახ. 2.4). მათი წარმოქმნის პირობები აქამდე აღიწერებოდა მხოლოდ რეალური (ბლანტი) სითხის დინების რთული ჰიდრავლიკური თეორიის ფარგლებში (დრესლერი [46], სტოკერი [164], რაუზი [165], თომასი და სხვა).



ნახ. 2.4. ბორის ტიპის ფენა ტალღები სწრაფდენებზე [164,180]

(2.52) და (2.39) ფორმულებიდან გამომდინარე, „ბორის“ ტიპის პერიოდული დამსხვრეული ტალღების გადაადგილების c ფაზური სიჩქარე ემთხვევა ძირითადი

დამყარებული ნაკადის U_0 სიჩქარეს, რაც სრულ შესაბამისობაშია დრესლერ-სტოკერის შედეგთან (იხ. [164] გვ. 505).

ზემოთქმული გვაძლევს საფუძველს, რომ დამყარებულ დინებებზე ტალღური მოძრაობების შესწავლისას, უპირატესობა მივანიჭოთ (2.36) წრფივ, ცვლად-კოეფიციენტთან დიფერენციალურ განტოლებას და მისი ამოხსნის შედეგებს ანალოგიურ (2.35) განტოლებასთან შედარებით, რასაც პირველ რიგში განაპირობებს (2.1)-(2.2) განტოლებათა სისტემის გაწრფივების პროცედურის მიმართ ზემოთ მოყვანილი ახლებური მიდგომა.

2.4. შესართავ აკვატორიებში გრძელი ტალღების საანგარიშო დამოკიდებულებები

ზოგადი სახით (2.36) განტოლება განეკუთვნება ჰიპერგეომეტრიულ განტოლებათა კლასს, რომლის ამოხსნა, უმრავლეს შემთხვევაში, მნიშვნელოვან მათემატიკურ სირთულეებთან არის დაკავშირებული და ძირითადად შესაძლებელია რიცხვითი მეთოდების გამოყენებით. მაგრამ, როცა საკითხი ეხება ტალღების გავრცელებას მდინარეთა გამყვანი არხების ზღვასთან შესართავ აკვატორიებში მდგომარეობას მნიშვნელოვნად ამსუბუქებს ის ვითარება, რომ ძირითადი (ანუ მდინარის) ნაკადის სიჩქარე და მისი გრადიენტები აქ მართლაც იმდენად მცირეა, რომ (2.36)-ის (ისევე, როგორც (2.35)-ის) კოეფიციენტებში შესაძლებელია სიჩქარის კვადრატისა (U_0^2 -ის) და სიჩქარისა და მისი წარმოებულის ნამრავლის შემცველი წევრების ($U_0 \partial U_0 / \partial x$)-ის უგულველყოფა ნაკადის სიღრმისა და სიღრმის გრადიენტის შემცველ წევრებთან შედარებით. მაშინ (2.36) მდინარეთა შესართავი უბნებისთვის ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + 2U_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} - gH \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{dU_0}{dx} \frac{\partial \varphi}{\partial t} - g \frac{dH}{dx} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0, \quad (2.53)$$

სადაც $U_0 = U_0(x)$ და $H = H(x)$.

ზოგადი ანალიტიკური სახით (2.53) განტოლების ამოხსნა შესაძლებელია, მაგრამ მხოლოდ მიახლოებითი მათემატიკური მეთოდების გამოყენებით. კერძოდ, განვიხილოთ დროში პერიოდული ტალღური მოძრაობა, რომლის სიჩქარის პოტენციალი წარმოვადგინოთ ორი უნქციის ნამრავლის სახით

$$\varphi = \psi(x) \exp(i\sigma t), \quad (2.54)$$

სადაც $\psi(x)$ საძიებელი ფუნქციაა, i – კომპლექსური ერთეული, σ – ტალღურ რხევათა მოცემული სიხშირე, t – დრო, თუ (2.54)-ს ჩავსვამთ (2.53)-ში, მცირეოდენი გარდაქმნების შემდეგ ადვილად დავრწმუნდებით, რომ ეს უკანასკნელი მიიღებს სახეს

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \left(\frac{1}{H} \frac{dH}{dx} - 2iU_0 \frac{\sigma}{gH} \right) \frac{d\psi}{dx} + \left(\frac{\sigma^2}{gH} - \frac{i\sigma}{gH} \frac{dU_0}{dx} \right) \psi = 0. \quad (2.55)$$

ცვლადკოეფიციენტებიანი (2.55) განტოლების ამოსახსნელად მივმართოთ ასიმპტოტურ WKB მეთოდს [87]. ამისთვის შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{H}} \exp\left(i \int \frac{U_0 \sigma}{gH} dx \right) W(x). \quad (2.56)$$

და დავიყვანოთ ორწევრა განტოლებაზე:

$$\frac{d^2W}{dx^2} + Q(x)W = 0; \quad (2.57)$$

სადაც უკვე $W(x)$ -ია საძიებელი ფუნქციაა, ხოლო $Q(x)$ -ით გამოსახულია მრავალწევრი

$$Q(x) = \frac{\sigma^2}{gH} + \frac{1}{4} \frac{1}{H^2} \left(\frac{dH}{dx} \right)^2 - \frac{1}{2H} \frac{d^2H}{dx^2} + \left(\frac{U_0 \sigma}{gH} \right)^2. \quad (2.58)$$

შემდგომში (2.58)-ში ასევე შესაძლებელია უგულებელვყოთ ბოლო წევრი, როგორც სხვა წევრებთან შედარებით მცირე სიდიდე.

ცვლადკოეფიციენტიანი ორწევრა (2.57) განტოლების ასიმპტოტური (ზღვრული) ამოხსნა WKB მეთოდის გამოყენებით გვაძლევს

$$W(x) = \frac{A}{\sqrt[4]{Q}} \exp\left[\pm i \int \sqrt{Q} dx \right], \quad (2.59)$$

სადაც A – ინტეგრირების მუდმივაა. ახლა თუ (2.59)-ს ჩავსვამთ (2.56)-სა და შემდეგ (2.54)-ში, φ ტალღური პოტენციალისთვის საბოლოოდ მივიღებთ შემდეგი სახის კომპლექსურ დამოკიდებლებას:

$$\varphi = \frac{A}{\sqrt{H} \sqrt[4]{Q}} \exp\left[i \left(\sigma t + \int \frac{U_0 \sigma}{gH} dx \pm \int \sqrt{Q} dx \right) \right]. \quad (2.60)$$

შევნიშნავთ, რომ (3.60)-ში ინტეგრირების A მუდმივს აქვს სიჩქარის პოტენციალის განზომილება, ხოლო ნიშნები „+“ და „-“ შესაბამისად, პასუხობს ტალღების გავრცელებას დინების საწინააღმდეგო და თანხვედნილი მიმართლებით.

(2.3.60) წარმოადგენს დინებაზე ტალღური მოძრაობით განპირობებულ ნაწილაკთა სიჩქარის პოტენციალის ასიმპტოტურ გამოსახულებას, რაც ნიშნავს, რომ ეს

გამოსახულება მიისწრაფვის ამოცანის ზუსტი ამოხსნისკენ არგუმენტის (x -ის ან H სიღრმის) შედარებით დიდი მნიშვნელობისთვის. როცა $H \rightarrow 0$ (2.60) ამოხსნა მიისწრაფვის უსასრულობისკენ, რაც ნიშნავს, რომ უშუალოდ ნაპირის ხაზის სიახლოვეს ხდება ტალღის ამპლიტუდის უსასრულოდ ზრდა და ტალღის დამსხვრევა. თუ გავითვალისწინებთ (2.60) ამოხსნის ასიმპტოტურობას და (2.33) აღნიშვნის შესაბამისად გავაწარმოებთ მას x კოორდინატით ასიმპტოტური გამოსახულების გაწარმოების წესის შესაბამისად (გაწარმოებას ექვემდებარება მხოლოდ სწრაფადცვლადი ფაზა), სითხის ნაწილაკთა სიჩქარის რეალური ნაწილისთვის, მივიღებთ

$$u = \frac{A}{\sqrt{H^4 \sqrt{Q}}} \left(\frac{U_0 \sigma}{gH} \pm \sqrt{Q} \right) \sin \left(\sigma + \int \frac{U_0 \sigma}{gH} dx \pm \int \sqrt{Q} dx \right). \quad (2.61)$$

იგივე გზით, გამომდინარე (2.34) აღნიშვნიდან, მივიღებთ მდინარის ზღვასთან შესართავ აკვატორიებში ტალღური ზედაპირის აღმწერ შემდეგი სახის ასიმპტოტურ დამოკიდებულებას:

$$\eta = \frac{A}{g} \frac{\sigma \pm U_0 \sqrt{Q}}{\sqrt{H^4 \sqrt{Q}}} \sin \left(\sigma + \int \frac{U_0 \sigma}{gH} dx \pm \int \sqrt{Q} dx \right). \quad (2.62)$$

იმისდა მიხედვით, თუ როგორი ტიპის ამოცანასთან გვაქვს საქმე ინტეგრირების A მუდმივის ნორმირება, განზომილების დაცვით, შესაძლებელია ტალღური მოძრაობის გარკვეულ კვეთში მოცემული პარამეტრების – სიმაღლის და სიგრძის, ან, რაც იგივეა, სიმაღლის და პერიოდის (სიხშირის) საფუძველზე. უმრავლეს შემთხვევაში ეს პარამეტრები მოცემულია ღრმა წყალზე, სადაც ნაპირისკენ მიმართული ტალღები შესაძლოა მოკლედ ჩაითვალოს. მაშინ განზომილების დაცვით შეგვიძლია მივიჩნიოთ, რომ

$$A = a_0 \sqrt{\frac{g}{k_0}}, \quad (2.63)$$

სადაც a_0 და k_0 შესაბამისად ტალღის ამპლიტუდა და ტალღური რიცხვია მოცემული (ან წინასწარ დადგენილი) ნაპირიდან შედარებით შორს – ღრმა წყალზე. ამასთან ტალღის ამპლიტუდა განისაზღვრება ტალღის სიმაღლის ნახევრით $a = h/2$, ხოლო ტალღური რიცხვი შემდეგ იმავე დამოკიდებულებაშია ტალღის λ_0 სიგრძესთან, ტალღურ რხევათა σ სიხშირესა და τ პერიოდთან:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{\sigma^2}{g} = \frac{1}{g} \left(\frac{2\pi}{\tau} \right)^2. \quad (2.64)$$

ჩავატაროთ მიღებული შედეგების ანალიზი სხვადასხვა კერძო შემთხვევებზე. პირველ რიგში შევნიშნოთ, რომ თუ (2.61) და (2.62) ამოხსნებსა და (2.58) აღნიშვნაში ტალღურ რხევათა სიხშირეს მივიჩნევთ ნულის ტოლად ($\sigma = 0$), ამით ეს ამოხსნები არ განუღდება თუ ამავე დროს $dH/dx \neq 0$ არ უდრის ნულს. ეს ნიშნავს, რომ ჩვენ მიერ მიღებული შედეგები მდინარის ცვალებადი სიღრმეების პირობებში მოიცავს ე. წ. უძრავ ტალღებს – დროში უცვლელ ტალღურ რელიეფს, რომელიც წარმოიქმნება მხოლოდ მდინარის შედინების სიჩქარით ზღვაში (ვინაიდან ამ შემთხვევაში თუ U_0 -იც უდრის ნულს. მაშინ ნულდება η და u). ამ უძრავი ტალღების ამპლიტუდა (2.62)-ის თანახმად კლებულობს როცა იზრდება H , კლებულობს Q -ც, რომელიც (2.62)-ში ასრულებს ტალღური რიცხვის ანუ ტალღის სიგრძის შებრუნებული სიდიდის როლს. ჩვენ მართლაც შეგვიძლია, სტატიკურად უძრავ ტალღურ ბორცვებს დავაკვირდეთ მდინარის შესართავში, განსაკუთრებით წყალუხვობის პერიოდში, როცა მდინარე დიდი სიჩქარით ერთვის ზღვას.

როცა $U_0 = 0$, ანუ როცა არ გვაქვს დინება, ტალღის ამპლიტუდის ცვლილება მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ფსკერის კონფიგურაციასა და ტალღურ რხევათა სიხშირეზე. ამ ფაქტორების გავლენა შეგვიძლია უგულველვყოთ მხოლოდ ფსკერის ძალზე მცირე დახრილობის შემთხვევაში ($dH/dx \ll 1$), ან როცა წყლის სიღრმის ცვალებადობა ექვემდებარება კვადრატულ კანონს ($H \sim a x^2$). ამ შემთხვევაში (2.62)-დან გამომდინარეობს ამპლიტუდის და სითხის ნაწილაკების სიჩქარის ცვლილების გრინისეული კანონები $a(x) \sim H^{-1/4}$ და $u(x) \sim H^{-3/4}$. ამასთან ფსკერის რთული კონფიგურაციის გამო, ტალღის სიგრძეც დამოკიდებულია ტალღურ რხევათა სიხშირეზე.

ბოლოს განვიხილოთ ზოგადი შემთხვევა, როცა გვაქვს დინება ($U_0(x) \neq 0$) და ტალღები მიემართება ($\sigma \neq 0$) ზღვიდან შესართავისკენ (ან პირიქით, შესართავიდან ზღვისკენ). ამ შემთხვევაში გამომდინარე (2.62)-დან შეგვიძლია ვაჩვენოთ, რომ შესართავში ზღვის ფსკერის დონის შემცირებასა და მდინარის ჭავლის სიჩქარის მატებასთან ერთად ხდება ზღვიდან მომავალი ტალღის ამპლიტუდის მატება.

რაც შეეხება ტალღის სიგრძეს, თუ ტალღები დინების საწინააღმდეგოდ არის მიმართული დინება ჭავლის სიჩქარის მატების გამო, აფერხებს ტალღის სიგრძის კლებას, განპირობებულს ზღვის სიღრმეთა კლებით. დინების მიმართულებით

(შესართავიდან ზღვისკენ) ტალღების გავრცელების შემთხვევაში კი ხდება პირიქით: – მდინარის ჭავლი ერთდროულად ხელს უწყობს როგორც ტალღის სიმაღლის, ასევე ტალღის სიგრძის კლებას, უფრო ზუსტად აფერხებს და არა ხელს უწყობს ტალღის სიგრძის მატებას, რასთანაც მივყავდით ადრე განხილულ ენერგეტიკულ მეთოდებს.

ნათქვამის საილუსტრაციოდ განვიხილოთ მდინარის შესართავი უბანი, რომლის ფსკერს გააჩნია მცირე ქანობი (i_0) და სიღრმე იცვლება თითქმის სწორხაზოვნად $H \approx i_0 x$. ამ შემთხვევაში ვინაიდან $dH/dx \ll 1$, ხოლო $U_0 = q/H$, სადაც q მდინარის ხვედრითი ხარჯია (2.61) და (2.62) ამოხსნებში ფაზისქვეშა გამოსახულებები იოლად ექვემდებარება ინტეგრირებას. კერძოდ, (2.62)-დან (2.58) და (2.64) აღნიშვნების გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$\eta = a_0 \frac{1 \pm \frac{U_0}{\sqrt{gH}}}{\sqrt[4]{k_0 H}} \sin \left(\sigma - \frac{\sigma U_0}{g i_0} \pm 2 \sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}} \right). \quad (2.65)$$

(2.3.65) დამოკიდებულებიდან ნათლად ჩანს, რომ ზღვიდან მდინარისკენ დინების საწინააღმდეგოდ მიმართული (ზედა „+“ ნიშნები) ტალღის ამპლიტუდა (ანუ გამოსახულება სინუსის წინ) მართლაც მატულობს შესართავის მიმართულებით ჭავლის U_0 სიჩქარის მატების გამო და კლებულობს თუ ტალღების მიმართულება ემთხვევა (ქვედა „-“ ნიშანი) დინების მიმართულებას. რაც შეეხება ტალღის სიგრძეს, იგი (2.65)-დან განისაზღვრება შემდეგი მოსაზრების საფუძველზე: ვთქვათ დროის თითოეული t_0 მომენტისთვის დახრილ ფსკერზე ტალღის ფაზა ფორმალურად აღიწერება ისევე, როგორც ჰორიზონტალურზე, ანუ გამომდინარე (2.65)-დან სრულდება ტოლობა

$$\sin(\sigma_0 \pm kx) = \sin \left(\sigma_0 - \frac{\sigma U_0}{g i_0} \pm 2 \sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}} \right), \quad (2.66)$$

სადაც $k = 2\pi/\lambda$ – ტალღური რიცხვია, ხოლო $\lambda(x, U_0)$ – საძიებელი ტალღის სიგრძე. მაშინ თუ გამოვიყენებთ ტოლობებს $H = i_0 x$; $U_0 = q/H$, (2.66)-დან მოვიღებთ, რომ

$$\lambda(x, U_0) = \frac{2\pi}{-\frac{\sigma q}{g H^2} \pm 2 \sqrt{\frac{k_0}{H}}}. \quad (2.67)$$

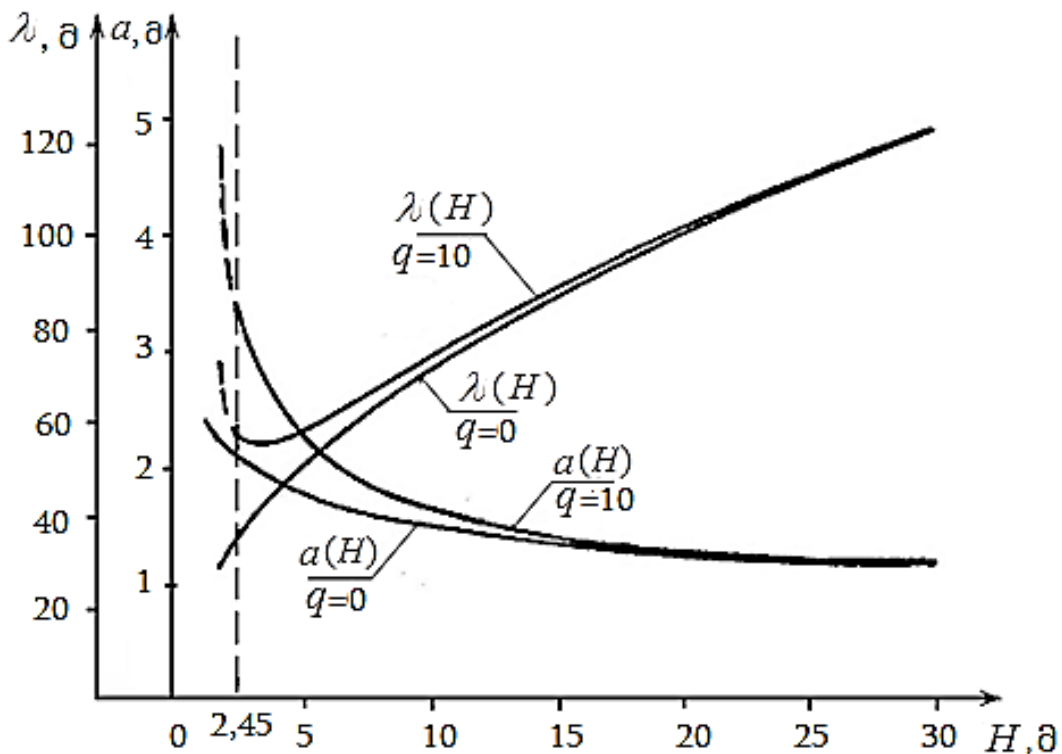
რაც გვარწმუნებს ზემოთქმულის სისწორეში ტალღის სიგრძის ცვლილების მიმართ: – კერძოდ დინება პირველი წევრის სახით (2.67)-ის მნიშვნელში მართლაც აფერხებს

როგორც ტალღის დამოკლებას დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით („+“ ნიშანი მნიშვნელში მეორე წევრის წინ), ასევე ტალღის დაგრძელებას დინების თანხვედნილი მიმართულებით (მეორე წევრთან „-“ ნიშნის შემთხვევაში).

მაგალითისთვის, ნახ. 2.5-ზე წარმოდგენილია ტალღის ამპლიტუდისა $a(H, q)$ და სიგრძის $\lambda(H, q)$ ცვლილების მრუდები მდინარის ზღვაში შესართავ უბანზე, რომლის სიღრმე $H \approx i_0 x$. ამასთან მიჩნეულია, რომ ნაპირიდან შორს, ღრმა წყალზე ტალღის ამპლიტუდა $a_0 = 1$ მ, სიგრძე $\lambda_0 = 314$ მ,

$$k_0 = 2\pi / \lambda_0 = 0,02 \text{ მ}^{-1}, \quad \sigma = \sqrt{gk_0} = 0,443 \text{ წმ}^{-1}; \quad \tau = 2\pi / \sigma = 14,18 \text{ წმ}.$$

ნახ. 2.5-ზე წარმოდგენილია ორი შემთხვევა: 1) როცა მდინარის დაყვანილი ხარჯი $q = 10 \text{ მ}^2 / \text{წმ}$ (ზედა მრუდები) და 2) როცა $q = 0$ (ქვედა მრუდები), პუნქტირით გამოსახული ვერტიკალი მიგვითითებს მდინარის ნაკადით ზღვიდან მომავალი ტალღების შეჩერების (ბლოკირების) კვეთზე $H_{\text{ბლ.}} = 2,45$ მ - ს.



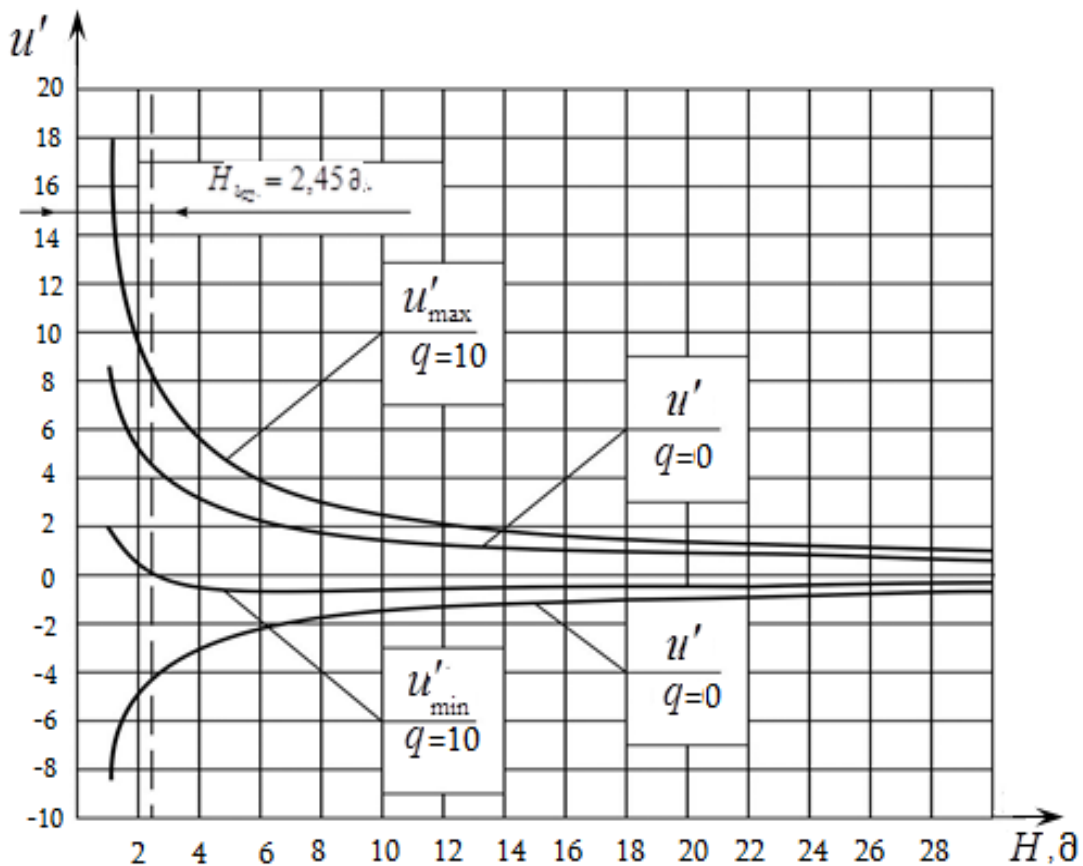
ნახ. 2.5. შესართავ აკვატორიაში ტალღის ამპლიტუდისა და სიგრძის ცვლილების მრუდები

დაბოლოს, ძალზე მცირედ დახრილი შესართავი უბნისთვის სითხის ნაწილაკთა სიჩქარე გამომდინარე (2.61) დამოკიდებულებიდან (2.30) აღნიშვნის გათვალისწინებით იანგარიშება ფორმულით

$$u' = U_0 - a_0 \frac{\sigma}{\sqrt[4]{(k_0 H)^3}} \left(\frac{U_0}{\sqrt{gH}} \pm 1 \right) \sin \left(\sigma - \frac{\sigma U_0}{g i_0} \pm 2 \sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}} \right), \quad (2.68)$$

სადაც, შეთანხმებისამებრ, $U_0 / \sqrt{gH} \ll 1$.

ზემოთ მოყვანილი მაგალითის შემთხვევაში ნახ. 2.6-ზე წარმოდგენილია (2.68) დამოკიდებულებით აგებული ნაკადის მაქსიმალური ($\sin(f(t, U_0, \sigma, x)) = -1$) და მინიმალური ($\sin(f(t, U_0, \sigma, x)) = +1$) სიჩქარეთა ცვლილების გრაფიკები მდინარის ზღვაში შესართავი უბნების მცირედ დახრილი ფსკერისთვის.



ნახ. 2.6. შესართავ აკვატორიაში წყლის ნაწილაკების მაქსიმალურ და მინიმალურ სიჩქარეთა ცვლილების გრაფიკები

3. სანაპირო ფერდობების გავლენა ნაპირგასწვრივ ტალღურ მოძრაობაზე

მდინარეთა შესართავ უბნებში, მთის ვიწრო წყალსაცავებში, საპორტო-საზღვაო, სატრანსპორტო, ენერგეტიკული თუ მელიორაციული დანიშნულების არხებში, აღძრულ ტალღებს ძირითადად აქვს ნაპირგასწვრივი მიმართულება. ასეთი ტალღები შეიძლება გამოწვეული იყოს ზღვის მიმოქცევის, ქარის, საზღვაო-სამდინარო ტრანსპორტის მოძრაობის, წყალსაცავებში მეწყერისა და ზვავის ჩამოწოლის, ქვედა ბიეფებში ჰიდრავლიკური ნახტომის და საერთოდ, ნაკადების არამდგრადობის შედეგად. სანაპირო ფერდობებზე მათი ზემოქმედება, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, ეთანადება და ხშირად აჭარბებს კიდევ იმავე სიმაღლის ნაპირისადმი ფრონტალურად ან კუთხით მიმართული ტალღების ზემოქმედებას.

ნაპირგასწვრივი მიმართულების ტალღების ფორმირებაზე დიდ გავლენას ახდენს სანაპირო ფერდობები. მათი კუთხის ცვლის ნაპირგასწვრივი ტალღის ორგანოზომილებიან სტრუქტურას, რაც მათ გააჩნიათ კალაპოტის ცენტრალურ ნაწილში (მუდმივ სიღრმეზე).

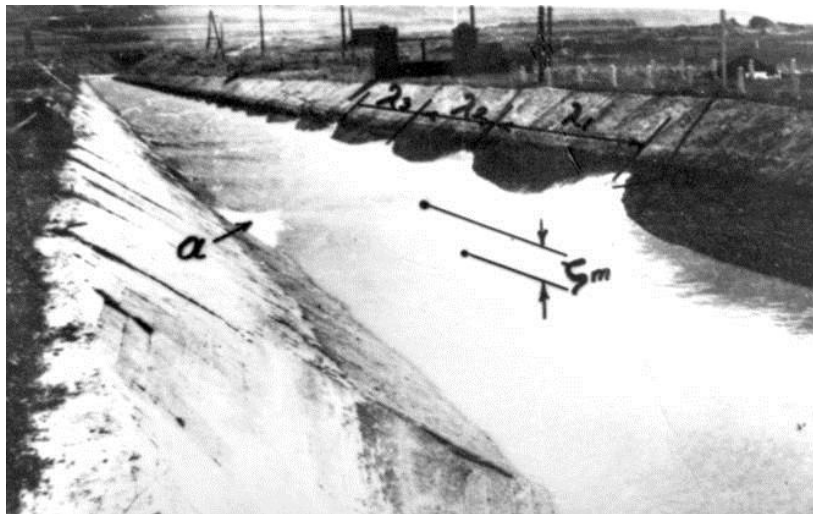


ნახ. 3.1. ოკეანის ზვირთვებით გამოწვეული ნაპირგასწვრივი ტალღების შემოსვლა მდინარე სევერნის შესართავში (ინგლისი)

არხის ფერდობების დახრის კუთხე განსაკუთრებით მოქმედებს წყლის სიღრმესთან შედარებით მოკლე (დისპერსიულ) ტალღებზე, რომელთა ამპლიტუდის ზრდა სანაპირო ფერდობზე, არხის განივი მიმართულებით განსაკუთრებული რელიეფურობითაა გამოხატული.

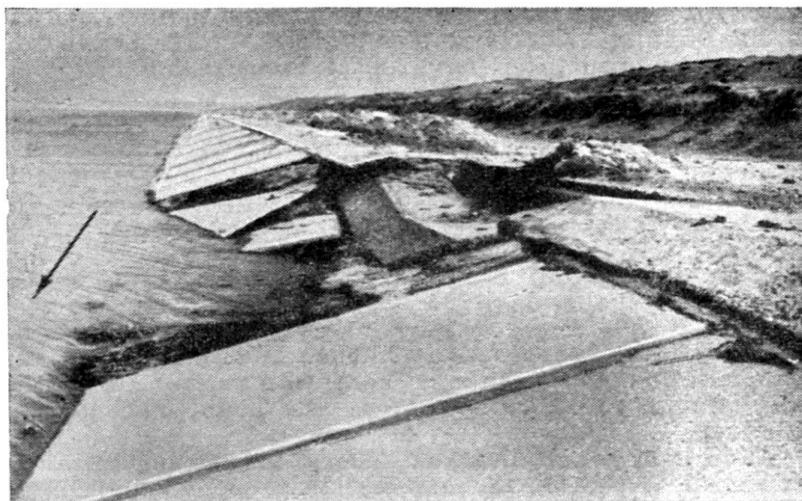
დღესდღეობით, უაღრესად დიდი მათემატიკური სირთულეების გამო, არ არსებობს ზოგადი ამოხსნა, რომელიც საშუალებას მოგვცემდა აგვესახა წყლის ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობა სანაპირო ფერდობების ნებისმიერი დახრილობის შემთხვევაში თუ კალაპოტის სიღრმე ეთანადება არხში ტალღის სიგრძეს. არსებული კერძო ამოხსნები მოიცავს ან „უსასრულოდ“ დიდი სიღრმის წყალსატევებს (ზღვებს,

ტბებს, წყალსაცავებს) ან განიხილავს მხოლოდ ჰორიზონტთან 45° და 30° -ით დახრილი ფერდობების მქონე სამკუთხა კვეთის არხებს [122].



ნახ. 3.2. ნაპირგასწვრივი ტალღები ჰიდროელექტროსადგურის გამყვან არხში.

ნაპირგასწვრივი ტალღების დამანგრეველი ზემოქმედება არხების, მდინარეთა თუ წყალსაცავების სანაპირო ფერდობებზე მრავალ მკვლევარს აქვს აღწერილი. ვ. ს. ალტუნინი თავის მონოგრაფიაში „მელიორაციული არხები მიწის კალაპოტებში“ [73], არხის ფერდობების ნგრევისა და წარცხვის ერთ-ერთ მთავარ მიზეზად საკვებით სამართლიანად მიიჩნევს ქარით და გემთა მიმოსვლით გამოწვეულ ნაპირგასწვრივ ტალღებს.



ნახ.3.3. ყარშინის არხში ფერდობის მოპირკეთების ფილების ნგრევა გამოწვეული გემების მიმოსვლით [73]

მიუხედავად ასეთი დამანგრეველი ზემოქმედებისა, არხების საანგარიშო ნორმატიულ დოკუმენტებში დღემდე არ არის გათვალისწინებული ნაპირგასწვრივი ტალღების ფაქტორი. ჩვენი შეფასებით [5, 25], სწორედ ტალღურ მოძრაობათა გაუთვალისწინებლობამ გამოიწვია ავარიული ვითარებები საქართველოში რიონჰესის, ვარციხეჰესებისა და ვარდნილჰესების მიმყვან და გამყვანი არხებში .

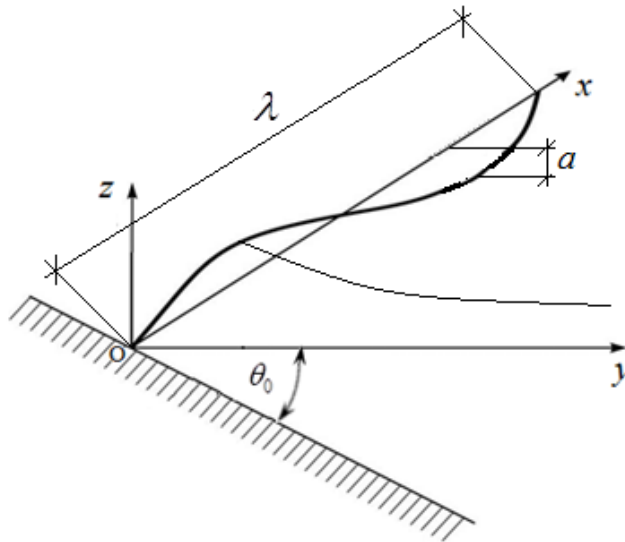
3.1. ნაპირგასწვრივი ტალღების თეორია და არსებული ამოხსნების მიმოხილვა

ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელება უსასრულოდ დიდი სიღრმის წყალზე (ზღვა, ოკეანე (ნახ.3.4)), რომელიც სანაპირო ფერდობით მხოლოდ ცალი მხრიდანაა შემოსაზღვრული, ჯერ კიდევ სტოქსის მიერ იქნა შესწავლილი [122].



ნახ.3.4. ოკეანის ნაპირგასწვრივი ტალღები (კალიფორნია, აშშ)

ნახ.3.5-ზე მოყვანილია სტოქსის ამოცანის საანგარიშო სქემა, სადაც ნაპირგასწვრივი x , ზღვისკენ მიმართული y და ვერტიკალური z კოორდინატები ღებულობს ნებისმიერად დიდ მნიშვნელობებს; θ_0 წარმოადგენს სანაპირო ფერდობის ჰორიზონტთან დახრის კუთხეს.



ნახ. 3.5. ზღვის ნაპირთან ნაპირდასწვრივი ტალღების მოძრაობის საანგარიშო სქემა (სტოქსის ამოცანა)

კოორდინატთა ასეთ სისტემაში ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობის სტოქსის მიერ განსაზღვრულ პოტენციალს აქვს შემდეგი სახე:

$$\varphi = a \frac{g}{\sigma} \exp(kz \sin \theta_0 - ky \cos \theta_0) \cos(\sigma - kx), \quad (3.1)$$

ხოლო, ტალღური ზედაპირი აღიწერება განტოლებით

$$\eta = a \cdot \exp(-ky \cos \theta_0) \sin(\sigma - kx), \quad (3.2)$$

სადაც, a ტალღის ამპლიტუდაა მოცემული ნაპირის ხაზის ($z = 0, y = 0$) გასწვრივ; $k = 2\pi / \lambda$ – ტალღური რიცხვია, λ – ნაპირგასწვრივი ტალღის სიგრძე; σ – ტალღურ რხევათა სიხშირე, $\sigma = 2\pi / \tau$; τ – პერიოდი.

ნაპირგასწვრივი ტალღის ქიმის გეგმილი xoy სიბრტყეზე წარმოადგენს სანაპირო ხაზის მართობულ წრფეს, ხოლო ამპლიტუდა, მოცემული ნაპირის ხაზის გასწვრივ (ანუ x ღერძის თავზე) ექსპონენციალურად კლებულობს და მიისწრაფის ნულისკენ ზღვის დიდი სიღრმეების მიმართულებით. იგი y ღერძის მიმართულებით თითქმის ნულდება ტალღის ნაპირგასწვრივი სიგრძის – $\lambda = 2\pi / k$ ტოლ მანძილზე.

პოტენციალის (3.1) გამოსახულება აკმაყოფილებს დახრილი ფსკერის მიმართ სიჩქარის მდგენელის ნულთან ტოლობის პირობას.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \tan \theta_0, \quad \text{როცა } z = -y \tan \theta_0, \quad (3.3)$$

ხოლო დინამიკური სასაზღვრო პირობა წყლის თავისუფალ ზედაპირზე

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -g \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad \text{როცა } z = 0 \quad (3.4)$$

იძლევა შემდეგ დისპერსიულ დამოკიდებულებას

$$\sigma^2 = gk \sin \theta_0 \quad (3.5)$$

(3.1) გამოსახულების გაწარმოებით x , y და z კოორდინატებით მიიღება სტოქსის ტალღების სიჩქარეთა ველის კომპონენტები ნაპირგასწვრივი, განივი და ვერტიკალური მიმართულებებით:

$$u = a \sqrt{\frac{gk}{\sin \theta_0}} \exp(kz \sin \theta_0 - ky \cos \theta_0) \sin(\sigma - kx); \quad (3.6)$$

$$v = a \sqrt{\frac{gk}{\sin \theta_0}} \cos \theta_0 \exp(kz \sin \theta_0 - ky \cos \theta_0) \cos(\sigma - kx); \quad (3.7)$$

$$w = a \sqrt{\frac{gk}{\sin \theta_0}} \sin \theta_0 \exp(kz \sin \theta_0 - ky \cos \theta_0) \cos(\sigma - kx). \quad (3.8)$$

სამკუთხა განივკვეთის მქონე არხებისთვის არსებობს სამგანზომილებიანი ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელების ორი ზუსტი ამოხსნა. ერთ-ერთი ეკუთვნის კელანდს, რომელიც ეხება სიმეტრიის ღერძთან 45° -ით დახრილი ფერდობების მქონე სამკუთხა არხს და აქვს შემდეგი სახე [122]:

$$\varphi = a \frac{g}{\sigma} \coth \frac{ky}{\sqrt{2}} \coth \frac{kz}{\sqrt{2}} \cos kx \cdot \sin \sigma \quad (3.9)$$

აქ x ღერძი მიჰყვება არხის ფსკერის ხაზს; რხევათა სიხშირე გამოისახება შემდეგი დისპერსიული დამოკიდებულებით:

$$\sigma^2 = \frac{gk}{\sqrt{2}} \tanh \frac{kH_0}{\sqrt{2}} \quad (3.10)$$

სადაც H_0 წყლის მაქსიმალური სიღრმეა სამკუთხა არხში; წყლის თავისუფალი ზედაპირი აღიწერება დამოკიდებულებით:

$$\eta = a \coth \frac{kH_0}{\sqrt{2}} \coth \frac{ky}{\sqrt{2}} \cos kx \cdot \sin \sigma, \quad (3.11)$$

რომლის თანახმად, როცა არხში ხდება გრძელი ტალღების რხევა, ანუ როცა kH_0 (ან, რაც იგივეა H_0/λ) მცირე რიცხვია, თავისუფალი ზედაპირი აღიწერება შემდეგი ტოლობით:

$$\eta = a \cos kx \cdot \sin \sigma. \quad (3.12)$$

მოკლე ტალღების შემთხვევაში, ანუ როცა kH_0 დიდი რიცხვია

$$\eta = \frac{a}{4} \exp \frac{kH_0}{\sqrt{2}} \exp \left(\pm \frac{ky}{\sqrt{2}} \right) \cos kx \cdot \sin \sigma = a_0 \exp \left(\pm \frac{ky}{\sqrt{2}} \right) \cos kx \cdot \sin \sigma, \quad (3.13)$$

სადაც a_0 ტალღის ამპლიტუდაა მოცემული არხის სიმეტრიის ღერძის გასწვრივ; ნიშნები „ \pm “ შეესაბამება სიმეტრიის ღერძიდან ფერდობების მიმართულებით ტალღის სიმაღლის ექსპონენციალურ ზრდას (ისევე, როგორც სტოქსის ამოხსნაში).

სამკუთხა არხის ვერტიკალთან 60° -ით დახრილი ფერდობების შემთხვევაში, მაკდონალდის ამოხსნა პოტენციალის მიმართ გამოისახება დამოკიდებულებით:

$$\begin{aligned} \varphi = a \frac{g}{\sigma} & \left(\coth k(z - H_0) + \frac{\sigma^2}{gk} \sinh k(z - H_0) \right) \cdot \cos kx \cos \sigma + \\ & + 2 \frac{a\sigma^2}{gk} \cosh \frac{ky\sqrt{3}}{2} \left(\cosh k \left(\frac{z}{2} + H_0 \right) - \frac{\sigma^2}{gk} \sinh k \left(\frac{z}{2} + H_0 \right) \right) \cdot \cos kx \cos \sigma \end{aligned} \quad (3.14)$$

ხოლო ტალღის რხევათა სიხშირე აკმაყოფილებს შემდეგი სახის ბიკვადრატულ განტოლებას:

$$2 \left(\frac{\sigma^2}{gk} \right)^2 - 3 \left(\frac{\sigma^2}{gk} \right) \coth 3 \frac{kH_0}{2} + 1 = 0, \quad (3.15)$$

რომლის ამოხსნა არხში ნაპირგასწვრივი მოკლეტალღოვანი რხევების შემთხვევაში (ანუ, როცა $\coth 3kH_0/2 = 1$), გვაძლევს ფესვების შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$\sigma^2 = gk \quad \text{და} \quad \sigma^2 = gk/2. \quad (3.16)$$

პირველი მათგანი შეესაბამება სითხის თავისუფალ ზედაპირს

$$\eta = -a \cos kx \cdot \sin \sigma - 2a \cosh \frac{ky\sqrt{3}}{2} \left(\cosh \frac{3kH_0}{2} - \sinh \frac{3kH_0}{2} \right) \cos kx \cdot \sin \sigma, \quad (3.17)$$

რომლის თანახმად ტალღის სიმაღლე (ამპლიტუდა) თითქმის არ იცვლება არხის განივი მიმართულებით.

მეორე ფესვის გამოყენებით ვღებულობთ:

$$\eta = -a \cos kx \cdot \sin \sigma - 2a \cosh \frac{ky\sqrt{3}}{2} \left(\cosh \frac{3kH_0}{2} - \frac{1}{2} \sinh \frac{3kH_0}{2} \right) \cos kx \cdot \sin \sigma, \quad (3.18)$$

რაც მიგვითითებს ტალღების ამპლიტუდის მნიშვნელოვან ზრდაზე სიმეტრიის ღერძიდან განივი მიმართულებით.

როგორც ვხედავთ, რამდენადაც ეს პარადოქსულად არ უნდა გვეჩვენოს, სამკუთხა კვეთის არხებში ერთი და იგივე სიგრძის ტალღა შესაძლოა ვრცელდებოდეს სხვადასხვა სიხშირით (პერიოდით) და სხვადასხვა სიჩქარით, მაგრამ უნდა აღინიშნოს ისიც, რომ ერთი და იგივე სიგრძისა და სხვადასხვა სიხშირის ტალღებს აქვს სხვადასხვა ტალღური რელიეფი.

მხოლოდ ამ სამი ზუსტი ამოხსნით შემოიფარგლება პრაქტიკისთვის მეტად მნიშვნელოვანი ამოცანა სანაპირო არეებსა და არხებში ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელების თაობაზე.

როგორც ზემოთ მოყვანილი ამოხსნები გვიჩვენებს, ნაპირგასწვრივი ტალღების ამპლიტუდის ზრდა სანაპირო ფერდობებზე აღინიშნება ან „უსასრულოდ“ დიდი სიგანისა და სიღრმის წყალსატევებში, ან ფუძეში 90° და 120° გაშლილობის მქონე სამკუთხა არხებში, მათში სიღრმესა და სიგანესთან შედარებით მოკლე სიგრძის ტალღების გავრცელების შემთხვევაში.

რაც შეეხება ნებისმიერი გაშლილობის სამკუთხა და, მით უმეტეს, ტრაპეციულ არხებს, მათში დისპერსიული ტალღების სასაზღვრო პირობები იმდენად რთულდება, რომ ასეთ არხებში, გარდა გარკვეული მიახლოებისა ტალღური განტოლებების ზუსტი ამოხსნა შეუძლებელი ხდება.

ქვემოთ მოყვანილი გაანგარიშების მეთოდები ერთ-ერთი პირველი მცდელობაა ამ მიმართულებით არსებული ხარვეზის შევსებისა. მათ საფუძვლად უდევს შ. გაგომიძის მიერ შემუშავებული სამკუთხა და ტრაპეციულ არხებში ზედდებული ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობის ამსახველი განტოლებების ამოხსნები, როცა არხის ფერდობების დახრის კუთხე ნებისმიერია [5, 25, 26].

3.2. ნაპირგასწვრივი ტალღების გაანგარიშება ნებისმიერად დახრილი ფერდობების მქონე არხებში

ვთქვათ, ნებისმიერი ფუძეში $2\alpha_0$ გაშლის კუთხის მქონე სამკუთხა არხში მუდმივი U_0 სიჩქარით მოძრავ წყლის ზედაპირზე აღიმდრება λ სიგრძის მქონე გრძივი მიმართულების რეგულარული ტალღები. ჩვენი მიზანია ამ ტალღების თავისუფალი ზედაპირისა და სიჩქარეთა ველის განსაზღვრა ნაკადის ნებისმიერ წერტილში.

ნახ. 3.6-ა)-ზე მოყვანილ დეკარტის საკოორდინატო სისტემაში, სადაც x ღერძი ემთხვევა ფსკერის ხაზს, z – სიმეტრიის ვერტიკალურ ღერძს, ხოლო y ღერძი მიმართულია სიმეტრიის ღერძიდან ფსკერის ხაზის მართობულად, ტალღური მოძრაობის სიჩქარეთა ველის პოტენციალის გაწრფივებულ განტოლებებს აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 ; \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + U_0^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2U_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x \partial t} = -g \frac{\partial \varphi}{\partial z} , \quad \text{როცა } z = H_0 ; \quad (3.20)$$

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial z} \sin \alpha_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cos \alpha_0 = 0 , \quad \text{როცა } z = \pm y \tan \alpha_0 . \quad (3.21)$$

ნაკადის თავისუფალ ზედაპირზე (3.20) ჰიდროდინამიკური პირობა მიიღება ლაგრანჟ-ბერნულის გაწრფივებული ინტეგრალისა და სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მყოფი ნაწილაკის მუდმივად ამ ზედაპირზე დარჩენის კინემატიკური პირობის გამოყენების შედეგად, რომლებიც შესაბამისად გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებებით [164]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -g \eta , \quad \text{როცა } z = H_0 \quad (3.22)$$

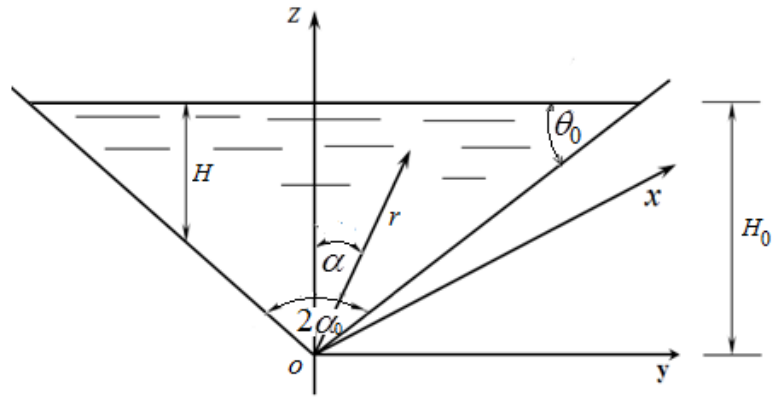
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} , \quad \text{როცა } z = H_0 \quad (3.23)$$

სადაც η ტალღური ზედაპირის კოორდინატია ათვლილი ნაკადის შეუშფოთებელი ზედაპირიდან. (3.20) პირობა მიიღება (3.22)-(3.23) განტოლებათა სისტემიდან η კოორდინატის გამორიცხვით.

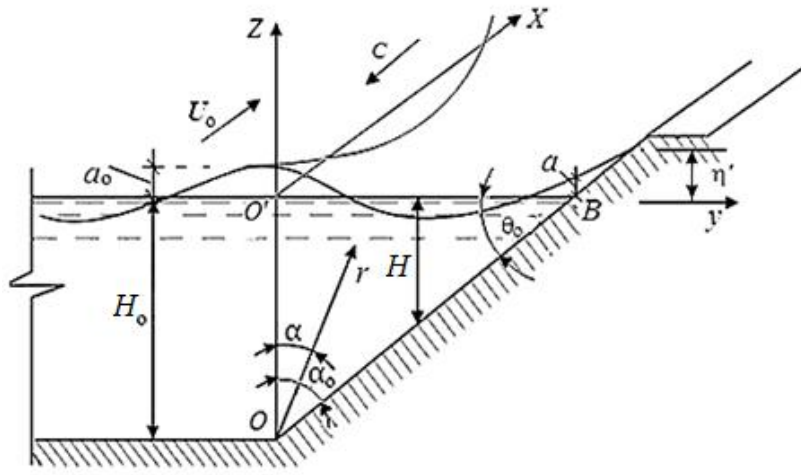
ამოცანის მიახლოებითი ამოხსნა შედარებით მარტივდება თუ შემოვიტანთ აღნიშვნებს (ნახ. 3.6 ა), ბ)).

$$x = \chi; \quad z = r \cos \alpha; \quad y = r \sin \alpha; \quad (3.24)$$

და გადავწერთ (3.19)-(3.21) განტოლებებს ცილინდრულ საკოორდინატო სისტემაში:



ა)



ბ)

ნახ.3.6 ნაპირგასწვრივი ტალღების საანგარიშო სქემები ა) სამკუთხა და ბ) ტრაპეციული არხის სანაპირო ფერდობებთან

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} = 0 ; \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + U_0^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2U_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x \partial t} = -g \left(\cos \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\sin \alpha}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \right), \text{ როცა } r \cos \alpha = H_0 ; \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} = 0, \text{ როცა } \alpha = \pm \alpha_0 . \quad (3.27)$$

ნიშანი „+“ აიღება მარჯვენა, ხოლო – „-“ მარცხენა ნახევარსექტორში.

ვინაიდან განვიხილავთ x ღერძის გასწვრივ მოძრავ მუდმივი სიგრძის მქონე პერიოდულ ტალღებს, სიჩქარეთა ველის პოტენციალი შეიძლება წარმოვიდგინოთ ნამრავლის სახით:

$$\varphi = \psi(r, \alpha) \exp(i(\sigma t - kx)) \quad (3.28)$$

სადაც i კომპლექსური რიცხვია; $\sigma = 2\pi/\tau$ – ტალღურ რხევათა სიხშირე; τ – პერიოდი; $k = 2\pi/\lambda$ – ტალღური რიცხვი. მაშინ (3.25)-(3.27) განტოლებები დებულობს შემდეგ სახეს:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \alpha^2} - k^2 \psi = 0 ; \quad (3.29)$$

$$(\sigma - kU_0)^2 \psi = g \left(\cos \alpha \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\sin \alpha}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \alpha} \right) , \text{ როცა } r \cos \alpha = H_0 ; \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \alpha} = 0 , \text{ როცა } \alpha = \pm \alpha_0 . \quad (3.31)$$

ტრაპეციული არხების განხილვის შემთხვევაში (ნახ.3.5ბ)), (3.29)-(3.31) განტოლებები ვრცელდება ფერდობის ფუძეზე აღმართულ ვერტიკალსა და სანაპირო ხაზს შორის მდებარე სამკუთხა არეზე. რაც შეეხება ტრაპეციული არხის ცანტრალურ მართკუთხა უბანს, აქ ტალღური მოძრაობა შებმული უნდა იქნას სამკუთხა უბნებზე (3.29)-(3.31) განტოლებათა ამოხსნის შედეგად მიღებულ ტალღურ მოძრაობასთან და, ამავე დროს, დაცული უნდა იყოს არხის ფსკერზე სიჩქარის ნორმალური მდგენელის ნულთან ტოლობის პირობა.

განვიხილოთ სამკუთხა და ტრაპეციული არხების მარჯვენა სამკუთხა არე და მივმართოთ (3.29)-(3.31) ამოცანის ამოხსნას კანტოროვიჩის პირდაპირი მეთოდით (ვინაიდან, როგორც აღვნიშნეთ, ამ ამოცანის ზუსტი ამოხსნა გადაუღებავ მათემატიკურ სირთულეს წარმოადგენს).

ამისთვის წარმოვიდგინოთ ψ ფუნქცია,

$$\psi = f(r) \times F(\alpha) \quad (3.32)$$

ნამრავლის სახით, მივიჩნიოთ $f(r)$ ფუნქცია საბაზისო ფუნქციად და მივანიჭოთ მას მნიშვნელობა

$$f(r) = r \cosh kr \quad (3.33)$$

ადვილი შესამჩნევია, რომ (3.32) და (3.33) გამოსახულებების გათვალისწინებით (3.29)-(3.31) განტოლებები ღებულობს შემდეგ სახეს:

$$\frac{d^2 F}{d\alpha^2} f + r \frac{df}{dr} F = 0; \quad (3.34)$$

$$(\sigma - kU_0)^2 fF = g \cos \alpha F \frac{df}{dr} + \frac{g \sin \alpha}{r} \cdot f \frac{dF}{d\alpha} , \text{ როცა } r \cos \alpha = H_0 \quad (3.35)$$

$$\frac{dF}{d\alpha} = 0 , \text{ როცა } \alpha = \pm \alpha_0 \quad (3.36)$$

კანტოროვიჩის მეთოდის შესაბამისად, გავამრავლოთ (3.34) განტოლება საბაზისო (3.33) ფუნქციაზე და გავაინტეგრეთ იგი r -ის ცვლილებების მთელ არეში 0-დან $H_0/\cos \alpha_0$ -მდე. ინტეგრების შედეგად მივიღებთ:

$$\left[\frac{\sinh(2k H_0/\cos \alpha_0)}{4k} + \frac{H_0}{2 \cos \alpha_0} \right] \cdot \frac{d^2 F}{d\alpha^2} + \left[\frac{H_0}{4 \cos \alpha_0} \cosh(2k H_0/\cos \alpha_0) - \frac{\sinh(2k H_0/\cos \alpha_0)}{8k} \right] \cdot F = 0 . \quad (3.37)$$

(3.37) განტოლება წარმოადგენს მუდმივ კოეფიციენტებიან მეორე რიგის დიფერენციალურ განტოლებას. მის ზოგად ამონახსნს აქვს სახე:

$$F = C_1 e^{im_1 \alpha} + C_2 e^{-im_2 \alpha} \quad , \quad (3.38)$$

სადაც C_1 და C_2 ინტეგრების მუდმივებია. მახასიათებელი განტოლების ფესვები განისაზღვრება დამოკიდებულებით

$$m = \pm \left[\frac{(kH_0 / \cos \alpha_0) \cdot \coth(2kH_0 / \cos \alpha_0) - 1/2}{1 + (2kH_0 / \cos \alpha_0) / \sinh(2kH_0 / \cos \alpha_0)} \right]^{1/2} . \quad (3.39)$$

სანაპირო ფერდობზე (3.36) პირობის გამოყენებით C_1 და C_2 მუდმივები დაიყვანება ერთ C მუდმივზე, რის შედეგად (3.38) ამონახსნის რეალური ნაწილი ღებულობს სახეს:

$$F(\alpha) = C \cos m(\alpha + \alpha_0) . \quad (3.40)$$

თუ შემოვიტანთ აღნიშვნას

$$C = \frac{g}{(\sigma - kU_0)} \cdot \frac{a_0}{\cosh H_0 \cos m\alpha_0} \quad (3.41)$$

(3.33), (3.38) და (3.40) გამოსახულებების გათვალისწინებით სიჩქარეთა ცვლის პოტენციალის რეალური ნაწილი საბოლოოდ მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\varphi = a_0 \frac{g}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\cosh kr}{\cosh kH_0} \frac{\cos m(\alpha \mp \alpha_0)}{\cos m\alpha_0} \cos(\sigma - kx) \quad , \quad (3.42)$$

ხოლო (3.22) პირობის საფუძველზე, (3.41) აღნიშვნის გათვალისწინებით, სითხის ტალღური ზედაპირი აღიწერება განტოლებით:

$$\eta = a_0 \frac{\cosh(kH_0 / \cos \alpha)}{\cosh kH_0} \cdot \frac{\cos m(\alpha \mp \alpha_0)}{\cos m\alpha_0} \sin(\sigma - kx) \quad , \quad (3.43)$$

სადაც α იცვლება 0-დან $\pm \alpha_0$ -მდე.

როგორც ეს (3.42) და (3.43) გამოსახულებებიდან ჩანს, სამკუთხა არხის სიმეტრიის ღერძზე ან ტრაპეციული არხის შუა, მართკუთხა უბანზე ტალღებს აქვს ჩვეულებრივი სინუსიოდალური სახე მუდმივი a_0 ამპლიტუდით. მართლაც, როცა $\alpha = 0$, (3.43)-დან ვღებულობთ

$$\eta = a_0 \cdot \sin(\sigma - kx) \quad , \quad (3.44)$$

ხოლო პოტენციალის (3.42) გამოსახულება ღებულობს მნიშვნელობას:

$$\varphi = a_0 \frac{g}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\cosh kz}{\cosh kH_0} \cos(\sigma - kx) \quad . \quad (3.45)$$

(3.44) და (3.45) გამოსახულებები ზუსტად ემთხვევა მუდმივი სიღრმის ნაკადზე ტალღების მოძრაობის კლასიკურ ამოხსნებს, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ მათში,

ისევე როგორც (3.42) და (3.43) დამოკიდებულებებში, ტალღურ რხევათა სიხშირე σ , მსგავსად მაკდონალდის ზემოთ მოყვანილი ამოხსნისა, აღარ არის ცალსახად დამოკიდებული არხში ნაპირგასწვრივი ტალღების სიგრძეზე. კერძოდ, იგი შეიძლება დამოკიდებული იყოს როგორც მაქსიმალურ მნიშვნელობებს, განსაზღვრულს ცნობილი დამოკიდებულებით

$$(\sigma - kU_0)^2 = gk \tanh kH_0, \quad (3.46)$$

ასევე მინიმალურს, განსაზღვრულს ფორმულით

$$(\sigma - kU_0)^2 = gk \cos \alpha_0 \tanh \left(\frac{kH_0}{\cos \alpha_0} \right), \quad (3.47)$$

ტალღური მოძრაობის სიხშირეთა ზღვრული მნიშვნელობები გამოსახული (3.46) და (3.47) დამოკიდებულებებით, მიიღება თავისუფალ ზედაპირზე სასაზღვრო პირობებში ψ ფუნქციის მიახლოებითი მნიშვნელობის ჩასმისა და ზღვრული გადასვლის განხორციელების შედეგად. კერძოდ, (3.32), (3.33) და (3.40) ფორმულების გათვალისწინებით (3.40) სასაზღვრო პირობა დებულობს შემდეგ სახეს:

$$(\sigma - kU_0)^2 = gk \cos \alpha_0 \tanh \left(\frac{kH_0}{\cos \alpha_0} \right) + \frac{gms \sin 2\alpha}{2H_0} \tanh m(\alpha - \alpha_0), \quad (3.48)$$

რაც ზღვრულ შემთხვევაში, როცა $\alpha = 0$ და $\alpha = \alpha_0$ დაიყვანება შესაბამისად (3.46) და (3.47) გამოსახულებებზე.

სიხშირის შუალედური მნიშვნელობების მისაღებად საჭიროა გაწარმოვდეს (3.48) გამოსახულება α კუთხით, წარმოებული გაუტოლდეს ნულს (ვინაიდან $\sigma - kU_0 = const$) და შემდგომ, მიღებული და (3.48) განტოლებათა სისტემიდან გამოირიცხოს α . ასეთი პროცედურის შედეგად მიღებული განტოლების ამოხსნა $\sigma - kU_0$ გამოსახულების მიმართ მოგვცემს სიხშირის საძიებელ მნიშვნელობებს. თეორიულად შესაძლებელია აგრეთვე ტალღურ რხევათა სიხშირის ერთი შუალედური მნიშვნელობის პოვნაც, თუ გამოვიყენებთ რელეის ცნობილ მეთოდს [122] და მიახლოებითი ამოხსნების საფუძველზე განვსაზღვრავთ ტალღური მოძრაობის პოტენციური და კინეტიკური ენერგიების ფარდობას, რაც იძლევა სიხშირის შუალედურ მნიშვნელობას. მაგრამ ამ ორივე გზის განხორციელება, თუ გავითვალისწინებთ, ერთი მხრივ (3.48) გამოსახულების სირთულეს, ხოლო, მეორე მხრივ, ნაკადის სიღრმის ცვალებადობას განივი მიმართულებით, დაკავშირებულია უაღრესად გადატვირთულ მათემატიკურ გარდაქმნებთან. უფრო მეტიც, რომც ვფლობდეთ ასეთ შედეგებს, მსგავსად მაკდონალდის ზუსტი ამოხსნებისა, ტალღების სიხშირის (ან სიგრძის) ანგარიშისას ვერ მივანიჭებდით უპირატესობას რომელიმე მათგანს. ამიტომ განსახილველ შემთხვევაში საკმარისია ვივარაუდოთ, რომ

ტრაპეციული კვეთის არხებში ერთიანი ფრონტის ტალღური მოძრაობის სიხშირის ან რაც იგივეა – ტალღების გადაადგილების ფაზური სიჩქარის დადგენისას განმსაზღვრელ როლს თამაშობს არხის სიგანე ფუძეში. თუ იგი მცირეა წყლის ზედაპირზე ნაპირგასწვრივი ტალღის სიგრძესთან შედარებით, მაშინ სიხშირის გაანგარიშებისას უპირატესობა უნდა მიენიჭოს (3.47) დამოკიდებულებას, ხოლო თუ ტრაპეციული არხის სიგანე ფუძეში მნიშვნელოვნად აჭარბებს ტალღის სიგრძეს, სიხშირე უნდა ვიანგარიშოთ (3.46) დამოკიდებულების საფუძველზე.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ სამკუთხა და ფუძეში ვიწრო სიგანის ტრაპეციულ არხებში სიხშირის საანგარიშო (3.47) ფორმულა დაიყვანება სტოქსის (3.5) ამოხსნაზე. თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\cos \alpha_0 = \sin \theta_0$ და მივიჩნევთ, რომ ტალღის სიგრძე მნიშვნელოვნად ნაკლებია არხში წყლის სიღრმესთან შედარებით ანუ $\tanh\left(\frac{KH_0}{\cos \alpha_0}\right) \approx 1$. მეორე ზღვრულ შემთხვევაში, როცა ტრაპეციულ არხში ტალღის სიგრძე მნიშვნელოვნად აჭარბებს წყლის სიღრმეს, სიხშირე იანგარიშება ცნობილი ფორმულით $\sigma = kU_0 \pm k\sqrt{gH_0}$, სადაც ნიშანი „+“ აიღება ნაკადისა და ტალღების გავრცელების თანხვედრილი მიმართულების შემთხვევაში, ხოლო „-“ ნიშანი ტალღების ნაკადის საწინააღმდეგო მიმართულებით გავრცელებისას. თუ არხს აქვს ვერტიკალური ფერდობები $\alpha_0 = 0$, $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ (3.47) გამოსახულება ემთხვევა (3.46)-ს და ასახავს მართკუთხა არხში ტალღურ რხევათა სიხშირეს.

ახლა განვიხილოთ, თუ როგორ იცვლება სითხის ტალღური ზედაპირის ამპლიტუდა არხის განივი მიმართულებით არხში ნაკადზე სხვადასხვა სიგრძის ტალღების ზედდებისას. ადვილი შესამჩნევია, რომ როცა არხში ვრცელდება არხში წყლის სიღრმესთან შედარებით გრძელი ტალღები, ანუ როცა სრულდება მიახლოებითი ტოლობები:

$$\coth\left(\frac{2kH_0}{\cos \alpha_0}\right) \approx \frac{\cos \alpha_0}{2kH_0}; \quad \frac{\sinh(2kH_0/\cos \alpha_0)}{2kH_0/\cos \alpha_0} \approx 1; \quad m \rightarrow 0; \quad \cos m\alpha_0 \approx 1 \quad (3.49)$$

გამომდინარე (3.43) დამოკიდებულებიდან, არხში განივი მიმართულებით, ცენტრიდან სანაპირო ფერდობისკენ, აღინიშნება ამპლიტუდის მცირე მატება, ხოლო მოკლე ტალღების გავრცელების შემთხვევაში, როცა სრულდება მიახლოებითი ტოლობები.

$$\tanh\left(\frac{kH_0}{\cos \alpha_0}\right) \approx 1; \quad \frac{2kH_0/\cos \alpha_0}{\sinh(2kH_0/\cos \alpha_0)} \approx 0; \quad m \approx \left(\frac{kH_0}{\cos \alpha_0} - \frac{1}{2}\right)^{1/2} \quad (3.50)$$

ამავე მიმართულებით, ადგილი აქვს ფერდობზე ნაპირგასწვრივი ტალღის ამპლიტუდის მნიშვნელოვან მატებას. უშუალოდ სანაპირო ხაზის გასწვრივ ამპლიტუდა აღწევს მნიშვნელობას

$$a = a_0 \frac{\coth(kH_0 / \cos \alpha_0)}{\coth kH_0} \cdot \frac{1}{\cos m\alpha} \quad (3.51)$$

რაც $(\cos m\alpha_0)^{-1}$ -ჯერ აჭარბებს ნაპირის ხაზზე გრძელი ტალღების ამპლიტუდას.

ტრაპეციულ და სამკუთხა არხებში ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელებისას, სითხის ნაწილაკების სიჩქარის მდგენელები სანაპირო ფერდობის $(\alpha = \alpha_0)$ ნებისმიერ წერტილში იანგარიშება შემდეგი დაკიდებულებების საფუძველზე:

$$u' = U_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial x} = U_0 + \frac{a_0 g k}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\sinh kr}{\cosh kH_0} \cdot \frac{1}{\cos m\alpha_0} \cdot \sin(\sigma - kx) \quad (3.52)$$

– სანაპირო ფერდობის სიბრტყეში, x ღერძის გასწვრივ ანუ ტალღების გავრცელების მიმართულებით და

$$v' = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{a_0 g k}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\sinh kr}{\cosh kH_0} \cdot \frac{1}{\cos m\alpha_0} \cdot \cos(\sigma - kx) \quad (3.53)$$

– სანაპირო ფერდობის სიბრტყეში, ქვევით და ზევით, x ღერძის (ანუ ტალღური ნაკადის) განივი მიმართულებით.

ფერდობის სიბრტყის ნორმალური მიმართულებით (3.36) სასაზღვრო პირობის შესაბამისად (3.42), გამოსახულების საფუძველზე, სიჩქარის მდგენელი $w' = 0$.

(3.42) და (3.53) გამოსახულებებში m კოეფიციენტი იანგარიშება (3.39)-ის საფუძველზე, ხოლო რადიუს-ვექტორი r დებულობს მნიშვნელობებს

$$r = \frac{H_0 - H}{\cos \alpha_0} \quad (3.54)$$

სადაც H წყლის სიღრმეა სანაპირო ფერდობის ნებისმიერი წერტილის თავზე; არხის ფსკერის $H = H_0$ და სიჩქარის V მდგენელი ემთხვევა რა ვერტიკალურ მდგენელს (3.53)-ის თანახმად უდრის ნულს. სანაპირო ხაზის გასწვრივ $H = 0$ და $r = H_0 / \cos \alpha_0$.

ზემოთმოყვანილ ფორმულებში, სტოქსის, კელანდისა და მაკდონალდის ზუსტი ამოხსნების ჩათვლით, ტალღის ამპლიტუდა მოცემული ან განსაზღვრული არხის ფერდობზე, ნაპირის ხაზის გასწვრივ, არ ემთხვევა ტალღური ზედაპირისა და ფერდობის სიბრტყის გადაკვეთის წერტილს და არ განსაზღვრავს ფერდობის დასველების სიმაღლეს. ეს უკანასკნელი პრაქტიკისთვის საკმარისი სიზუსტით შეიძლება განისაზღვროს დამოკიდებულებით [5]:

$$h' = \frac{a}{\cos \alpha_0} \quad (3.55)$$

სადაც h' გრძივი მიმართულების ტალღით ფერდობის დასველების მაქსიმალური სიმაღლეა, ათვლილი წყლის შეუშფოთებელი ზედაპირიდან; a ნაპირგასწვრივი ტალღის ამპლიტუდაა გამოთვლილი (3.51) დამოკიდებულებით.

მიღებული შედეგები ვრცელდება გრძელ და ისეთ დისპერსიულ ტალღებზე, რომელთაც გააჩნიათ ერთი მთლიანი ფრონტი არხის მთელ სიგანეზე ანუ როცა სრულდება პირობა $\cos m\alpha_0 \geq 0$. ეს პირობა (3.39) დამოკიდებულების საფუძველზე დაიყვანება შემდეგი სახის უტოლობაზე:

$$\lambda \geq \lambda_{\text{ზღ}} = \frac{2\pi H_0}{\left(0,5 + \frac{\pi^2}{4\alpha_0^2}\right) \cos \alpha_0} \quad (3.56)$$

სადაც α_0 რადიანებშია გამოსახული.

როცა $\lambda < \lambda_{\text{ზღ}}$ ტალღის ქიმი აღარ იკავებს არხის მთელ სიგანეს და წარმოიშობა ნაპირგასწვრივი საკვანძო წირები, რომელთა რიცხვი ერთ რომელიმე სანაპირო ფერდობზე განისაზღვრება

$$n = \frac{m}{\pi} \alpha_0 + 0,5 \quad (3.57)$$

ტოლობის მთელი ნაწილით.

ამ შემთხვევაში მსგავსად სტოქსის ამოხსნისა, უმჯობესია მივმართოთ (3.37) განტოლების ინტეგრების მუდმივის ნორმირებას ნაპირის ხაზის გასწვრივ მოცემული ამპლიტუდის მეშვეობით, ანუ (3.41)-ის ნაცვლად, ვისარგებლოთ აღნიშვნით

$$C = \frac{g}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{a}{\coth(kH_0/\cos \alpha_0)} \quad (3.58)$$

სადაც a არის ნაპირის ხაზის მოცემული ამპლიტუდა.

(3.58) აღნიშვნის გათვალისწინებით, სიჩქარეთა ველის პოტენციალისა და თავისუფალი ზედაპირის ამსახველი დამოკიდებულებები შესაბამისად ღებულობს შემდეგ სახეს:

$$\varphi = \frac{ag}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\cosh kr}{\cosh(kH_0/\cos \alpha_0)} \cos m(\alpha - \alpha_0) \cos(\sigma - kx) ; \quad (3.59)$$

$$\eta = a \cdot \frac{\cosh(kH_0/\cos \alpha)}{\cosh(kH_0/\cos \alpha_0)} \cos m(\alpha - \alpha_0) \sin(\sigma - kx) . \quad (3.60)$$

(3.60) გამოსახულების თანახმად, ნაპირის ხაზის გასწვრივ, ანუ როცა $\alpha = \alpha_0$, $\eta = a \cdot \sin(\sigma - kx)$, ხოლო არხის ცენტრალურ ნაწილში, არხის ფერდობის ფუძეზე აღმართულ ვერტიკალზე $\alpha = 0$, ტალღის ამპლიტუდა იანგარიშება ფორმულით

$$a_0 = a \cdot \left| \frac{\cosh kH_0 \cos m\alpha_0}{\cosh(kH_0/\cos \alpha_0)} \right|, \quad (3.61)$$

რომელიც ფაქტობრივად უმნიშვნელოა ნაპირთან ტალღის ამპლიტუდასთან შედარებით.

(3.59) დამოკიდებულების საფუძველზე, ადვილად განისაზღვრება აგრეთვე წყლის ნაწილაკთა სიჩქარეები. როცა $\lambda < \lambda_{\text{კლ}}$ ტალღური მოძრაობის სიხშირის საანგარიშოდ ვღებულობთ ნაკადზე სტოქსის განზოგადოებულ ფორმულას

$$\sigma = kU_0 \pm \sqrt{gk \cos \alpha_0} \quad (3.62)$$

წყლის ზედაპირზე ნაპირგასწვრივი საკვანძო წირების დაშორება ნაპირის ხაზიდან იანგარიშება ფორმულით

$$l = H \left(\tan \alpha_0 - \tan \left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m} (n - 0,5) \right) \right), \quad (3.63)$$

რომელიც მიიღება $\cos m(\alpha - \alpha_0) = 0$ განტოლების ამოხსნის საფუძველზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ ნაპირიდან პირველ საკვანძო წირსა და ნაპირის ხაზს შორის მოთავსებულ არეში ტალღური ზედაპირის საანგარიშო (3.60) გამოსახულება, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, იძლევა პრაქტიკულად ისეთივე შედეგს, რასაც სტოქსის ზუსტი ამოხსნა. ამავე დროს, როგორც სტოქსის ზუსტ ამოხსნაში, ფერდობზე ნაპირის ხაზის ზევით მოკლე ტალღების η კოორდინატი იზრდება იმდენად ინტენსიურად, რომ გარდა ძალზე მცირე ამპლიტუდის მქონე ტალღებისა, არ ხდება ტალღური ზედაპირის ამსახველი მრუდისა და სანაპირო ფერდობის სიბრტყის თანაკვეთა. ეს მიგვანიშნებს იმაზე, რომ სანაპირო ფერდობზე, ნაპირის ხაზს ზემოთ გრძივი მიმართულების მოკლე ტალღები განიცდის მსხვრევას. ამ შემთხვევაშიც ფერდობის მაქსიმალური დასველების სიმაღლის საანგარიშოდ დასაშვებია ვისარგებლოთ (3.55) ფორმულით. ამასთან უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ნაპირის ხაზს ზევით ფერდობის დასველებას განაპირობებს არა უწყვეტი ზედაპირის მქონე, არამედ დამსხვრეული ტალღები (ნახ.3.4).

მიღებული შედეგები, მიუხედავად მათი მიახლოებითი ხასიათისა, პრაქტიკული თვალსაზრისით მისაღებად უნდა ჩაითვალოს, რადგან ისინი აკმაყოფილებს სასაზღვრო პირობებს და ამავე დროს, როგორც ეს ქვემოთ, დანართ 3.3 - შია ნაჩვენები. შესაბამისობაში არის ზემოთ მოყვანილ სამ ზუსტ ამოხსნასთან.

3.3. ნაპირგასწვრივი ტალღების გაანგარიშების რიცხვითი მაგალითები

ქვემოთ მოყვანილ მაგალითებში განხილულია ტრაპეციულ არხებში ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელება, რომელთა ქიმები მოიცავენ არხის მთელ სიგანეს. ასევე განხილულია ტალღები, რომელთაც გააჩნიათ ტალღური ზედაპირი არა მხოლოდ მათი ნაპირგასწვრივი გადაადგილების, არამედ არხის განივი მიმართულებითაც.

ტრაპეციულ არხებში ტალღური მოძრაობის ანგარიშისას გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება ფერდობზე ტალღის ამპლიტუდის ზრდის მახასიათებელი m კოეფიციენტის დადგენას. ნახ.3.7-ზე, (3.39) ფორმულის საფუძველზე აგებულია $m = f(kH_0 / \cos \alpha_0)$ მრუდი, რომელიც მნიშვნელოვნად ამარტივებს m კოეფიციენტის განსაზღვრის პროცედურას.



ნახ. 3.7. არხის განივი მიმართულებით ტალღის ამპლიტუდის ზრდის მახასიათებელი m კოეფიციენტის მრუდი

მაგალითი 1. ვთქვათ, ფუძეში $b = 2,5$ მ სიგანის ტრაპეციულ არხში $U_0 = 1,5$ მ/წმ სიჩქარისა და $H_0 = 1,0$ მ სიღრმის მქონე ნაკადზე ვრცელდება პერიოდული ტალღები, რომელთა ნაპირგასწვრივი სიგრძე $\lambda = 6,28$ მ-ს, ხოლო ამპლიტუდა, არხის ცენტრალურ ნაწილში $a_0 = 0,2$ მ-ს. საჭიროა განისაზღვროს ტალღების ამპლიტუდა და ტალღური მოძრაობის სიჩქარეთა ველი სანაპირო ფერდობზე ნაპირის ხაზის გასწვრივ

და ფერდობზე $H = 0,5$ მ. სიღრმეზე, თუ ფერდობების დახრის კუთხე ჰორიზონტთან $\theta_0 = 45^\circ$ ($\theta_0 = \alpha_0 = 0,785$ რად, $\cos \alpha_0 = 0,707$).

ვინაიდან ტალღის სიგრძე არხში (6,28მ) აჭარბებს როგორც (3.56) გამოსახულებით ნაანგარიშვე მნიშვნელობას:

$$\lambda_{\text{ბლ}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1}{\left(0,5 + \frac{3,14^2}{40,785^2}\right) \cdot 0,707} = 2,0 \text{ მ};$$

ასევე არხის სიგანეს ფუძეში, ასეთი ტალღის ფრონტი დაიკავებს არხის მთელ სიგანეს ნაკადის ზედაპირზე ($B = 4,5$ მ), ხოლო მისი სიხშირე განისაზღვრება (3.57) დამოკიდებულების საფუძველზე. ვინაიდან, ტალღური რიცხვი $k = 2 \cdot 3,14 / 6,28 = 1$,

ხოლო კომპლექსი $\frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 1,41$, (3.57) გამოსახულება გვაძლევს

$$\sigma - kU_0 = \sqrt{9,8 \cdot 1 \cdot 0,707 \tanh 1,41} = \sqrt{6,1} = 2,47 \text{ წმ}^{-1},$$

საიდანაც ტალღურ რხევათა სიხშირე ნაკადზე

$$\sigma = 1 \cdot 1,5 + 2,47 = 3,97 \text{ წმ}^{-1},$$

ხოლო პერიოდი და ფაზური სიჩქარე შესაბამისად:

$$\tau = 2\pi / \sigma = 1,58 \text{ წმ}, \quad C = \sigma / k = 3,97 \text{ მ/წმ}.$$

არხში ტალღის ზედაპირის კოორდინატისა და სიჩქარეთა ველის საანგარიშოდ წინასწარ ვადგენთ (3.51)-(3.53) დამოკიდებულებებში შემავალ სიდიდეთა მნიშვნელობებს:

$$\begin{aligned} \cosh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} &= 2,17; \quad \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 2,83; \quad \sinh \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 8,43; \quad \coth \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 1,01; \quad \cosh kH_0 = 1,54; \\ \sinh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} &= 1,99; \quad \tanh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 0,89; \end{aligned}$$

მაშინ (3.39) დამოკიდებულების საფუძველზე, არხის განივი მიმართულებით ტალღის ამპლიტუდის ზრდის მახასიათებელი კოეფიციენტი ტოლი იქნება (ნახ.3.7):

$$m = \sqrt{\frac{1,14 \cdot 1,01 - 0,5}{1 + \frac{2,83}{8,43}}} = 0,83,$$

ხოლო, თვით ტალღის ამპლიტუდა სანაპირო ფერდობზე, ნაპირის ხაზის გასწვრივ (3.41) გამოსახულების თანახმად მიიღება:

$$a = 0,2 \frac{2,17}{1,54} \cdot \frac{1}{\cos(0,83 \cdot 0,785)} = 0,35 \text{ მ}.$$

როგორც ვხედავთ, ტალღის ამპლიტუდა სანაპირო ფერდობის გასწვრივ $0,35:0,2=1,75$ -ჯერ აჭარბებს ამპლიტუდის არხის ცენტრალურ ნაწილში – სანაპირო ფერდობის ფუძეზე აღმართული ვერტიკალის გასწვრივ.

სანაპირო ფერდობზე ნაპირის ხაზის გასწვრივ წყლის ნაწილაკების მაქსიმალური სიჩქარე მიიღება (3.52) დამოკიდებულების საფუძველზე, ტალღის ქიმის გავლის დროს, ანუ როცა $\sin(\sigma - kx)=1$ ხოლო მინიმალური – ტალღის ფსკერის გავლისას, ანუ როცა $\sin(\sigma - kx)=-1$ ადვილი შესამჩნევია, რომ ამ შემთხვევაში, გამომდინარე (3.33) და (3.34) ფორმულებიდან

$$u'_{\max/\min} = U_0 \pm a \frac{gk}{\sigma - kU_0}, \quad (3.64)$$

სადაც a იანგარიშება (3.52) ფორმულით; ნიშნები „+“ და „-“ შესაბამისად აიღება მაქსიმალური და მინიმალური სიჩქარეების ანგარიშისას, როცა ტალღების გავრცელების მიმართულება ემთხვევა ნაკადის მიმართულებას. როცა ნაკადი და ტალღები ურთიერთსაწინააღმდეგოდაა მიმართული, (3.64)-ში აიღება მოპირდაპირე ნიშნები.

ანალოგიურად, გამომდინარე (3.53) ფორმულიდან, სანაპირო ფერდობზე, ნაპირის ხაზის ზევით და ქვევით სითხის აცურება-ჩამოცურების მაქსიმალური სიჩქარე იანგარიშება ფორმულით

$$v' = \pm a \frac{gk}{\sigma - kU_0} \tanh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} \quad (3.65)$$

ან, თუ გავითვალისწინებთ (3.21) დისპერსიულ გამოსახულებას (3.35)-ში მივიღებთ:

$$v' = \pm a \cdot \frac{\sigma - kU_0}{\cos \alpha_0} \quad (3.66)$$

განსახილველ შემთხვევაში (3.64) და (3.66) დამოკიდებულებები გვაძლევს

$$u'_{\max} = 1,5 + 0,35 \frac{9,8 \cdot 1}{2,47} = 2,9 \text{ მ/წმ};$$

$$u'_{\min} = 1,5 - 0,35 \frac{9,8 \cdot 1}{2,47} = 0,1 \text{ მ/წმ};$$

$$\sigma - kU_0 = \sqrt{9,8 \cdot 1 \cdot 0,707 \cdot \tanh 1,41} = \sqrt{6,1} = 2,47 \text{ წმ}^{-1};$$

$$a = 0,2 \cdot \frac{2,17}{1,54} \cdot \frac{1}{\cos(0,83 \cdot 0,785)} = 0,35 \text{ მ. } \theta_0 = \alpha_0 = 0,785 \text{ რად, } \cos \alpha_0 = 0,707);$$

$$v' = \pm 0,35 \cdot \frac{2,47}{0,707} = \pm 1,22 \text{ მ/წმ};$$

სანაპირო ფერდობის შუა ხაზზე, სადაც წყლის სიღრმე აღწევს $H_0 = 0,5$ მ-ს, სიჩქარის მდგენელების ანგარიშისას, (3.42)-(3.43) ფორმულებში უნდა ჩაისვას r -ის მნიშვნელობა განსაზღვრული (3.34) ტოლობით:

$$r = \frac{1 - 0,5}{0,707} = 0,707 \text{ მ}$$

მაშინ (3.41), (3.42) და (3.43) ფორმულების საფუძველზე მივიღებთ:

$$u'_{\max/\min} = U_0 \pm a \frac{gk}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\cosh kr}{\cosh kH_0 / \cos \alpha_0} \quad (3.67)$$

$$v' = \pm a \cdot \frac{\sigma - kU_0}{\cos \alpha_0} \cdot \frac{\sinh kr}{\cosh kH_0 / \cos \alpha_0} \quad (3.68)$$

ჩვენს შემთხვევაში, როცა $\cosh kr = \cosh 0,707 = 1,26$; $\sinh 0,707 = 0,77$ (3.67) და (3.68) ფორმულები გვაძლევს:

$$u'_{\max} = 1,5 + 0,35 \frac{9,8 \cdot 1}{2,47} \cdot \frac{1,26}{2,17} = 2,31 \text{ მ/წმ};$$

$$u'_{\min} = 1,5 - 0,35 \frac{9,8 \cdot 1}{2,47} \cdot \frac{0,77}{2,17} = 0,7 \text{ მ/წმ};$$

$$v' = \pm 0,35 \cdot \frac{2,47}{0,707} \cdot \frac{0,77}{2,17} = \pm 0,12 \text{ მ/წმ};$$

როგორც ვხედავთ, ფერდობზე წყლის სიღრმის მატებასთან ერთად, აღინიშნება წყლის ნაწილაკების სიჩქარეთა კლება.

ნახ.3.8-ზე მოყვანილია არხში ტალღური ზედაპირის განივი პროფილები აგებული დროის იმ მომენტისთვის, როცა $\sin(\sigma - kx) = 1$ (შეესაბამება ტალღის ქიმს) და როცა $\sin(\sigma - kx) = -1$ (შეესაბამება ტალღის ფსკერს). პროფილები აგებულია (3.43) დამოკიდებულების საფუძველზე, რისთვისაც მასში შემავალ პოლარულ α კუთხეს მინიჭებული აქვს მნიშვნელობები 0-დან α_0 -მდე ფერდობების დასველების სიმაღლე ნაანგარიშევი (3.55) დამოკიდებულებით:

$$h' = 0,35 : 0,707 = 0,5 \text{ მ}$$

მაგალითი 2. ვთქვათ, ტრაპეციულ არხში, რომლის ფერდობები ვერტიკალთან აღგენს $\alpha_0 = 60^\circ = 1,047$ რად, ვრცელდება ტალღები, რომელთა სიგრძე $\lambda = 62,8$ მ-ს მნიშვნელოვნად აჭარბებს არხში $U_0 = 1$ მ/წმ სიჩქარით მოძრავი წყლის სიღრმეს – $H_0 = 2,0$ მ და სიგანეს ფუძეში – $b = 15$ მ-ს, საჭიროა განისაზღვროს ტალღის ამპლიტუდა სანაპირო ხაზის გასწვრივ და მაქსიმალური სიჩქარეები თუ ტალღის ამპლიტუდა არხის ცენტრალურ ნაწილში $a_0 = 0,5$ მ-ს.

წინასწარ ვსაზღვრავთ საანგარიშო ფორმულებში შემავალ სიდიდეებს:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 0,1; \quad kH_0 = 0,2; \quad \cos 60^\circ = 0,5; \quad \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 0,4; \quad \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 0,8;$$

$$\sinh \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 0,89; \quad \cosh \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 1,39; \quad \coth \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 1,51; \quad \cosh kH_0 = 1,02;$$

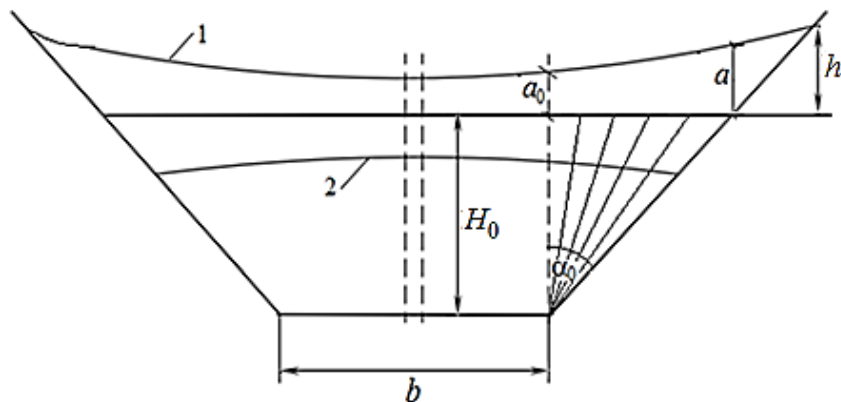
$$\cosh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 1,08; \quad \tanh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 0,37.$$

მაშინ, (3.39) ფორმულის თანახმად

$$m = \pm \left[\frac{(kH_0/\cos \alpha_0) \cdot \coth(2kH_0/\cos \alpha_0) - 1/2}{1 + (2kH_0/\cos \alpha_0) \cdot 1/\sinh(2kH_0/\cos \alpha_0)} \right]^{1/2} = \left(\frac{0,4 \cdot 1,51 - 0,5}{1 + 0,8/0,89} \right)^{1/2} = 0,23;$$

ხოლო ტალღის ამპლიტუდა ნაპირის ხაზის გასწვრივ, ნაანგარიშები (3.51) გამოსახულებით აღწევს მნიშვნელობას

$$a = 0,2 \cdot \frac{1,08}{1,02} \cdot \frac{1}{\cos(0,23 \cdot 1,04)} = 0,55 \text{ მ.}$$



ნახ. 3.8. მთლიანი ფრონტის გრძელი ნაპირგასწვრივი ტალღები ტრაპეციულ არხში.

1 – ტალღის ქიმი, 2 – ტალღის ფსკერი.

წინა მაგალითისგან განსხვავებით, a უმნიშვნელოდ აჭარბებს არხის ცენტრალურ ნაწილში ტალღის ამპლიტუდას ($a_0 = 0,5$ მ) და მიგვითითებს, რომ არსებული ზუსტი ამონახსნების შესაბამისად, არხში გრძელი ტალღების გავრცელებისას, მათი განივი პროფილი თითქმის არ განიცდის ცვლილებას. ტალღური ზედაპირის ცვლილება შესამჩნევი ხდება მხოლოდ ნაპირის ხაზს ზევით, სადაც ფერდობის დასველება აღწევს $h' = 0,55/0,5 = 1,1$ მ-ს წყლის შეუმფოთებელი ზედაპირის დონიდან.

გრძელი ნაპირგასწვრივი ტალღების რხევათა სიხშირე (3.47) გამოსახულების თანახმად, ტოლია

$$\sigma = 0,1 \cdot 1 + (9,8 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \cdot 0,37)^{0,5} = 0,52 \text{ წმ}^{-1};$$

პერიოდი – $\tau = 2\pi/\sigma = 12,1$ მ, ფაზური სიხქარე – $c = \lambda/\tau = 5,2$ მ/წმ.

სანაპირო ხაზის გასწვრივ წყლის ნაწილაკების მაქსიმალური სიჩქარეები (3. 64) და (3. 65) გამოსახულებების თანახმად დებულობს მნიშვნელობებს:

$$u'_{\max} = 1 + \frac{9,8 \cdot 0,1}{0,42} \cdot 0,55 = 2,3 \text{ მ/წმ}; \quad v'_{\max} = \pm \frac{9,8 \cdot 0,1}{0,42} \cdot 0,55 \cdot 0,37 = \pm 0,47 \text{ მ/წმ};$$

მაგალითი 3. განვიხილოთ შემთხვევა, როცა ამავე არხში ვრცელდება ტალღები, რომელთა სიგრძე $\lambda = 6,28 \text{ მ}$ ($k = 1$), ხოლო ამპლიტუდა ნაპირის ხაზის გასწვრივ – $a = 0,5 \text{ მ}$.

ვინაიდან $\lambda < \lambda_{\text{სფერ}}$, სადაც (3.56) ფორმულით ნაანგარიშევი $\lambda_{\text{სფერ}} = 9 \text{ მ}$, ტრაპეციულ არხში აღნიშნული მოკლე ტალღების გავრცელებისას, გარდა ნაპირის ხაზის მართობული (განივი) საკვანძო წირებისა, წარმოიშობა ნაპირგასწვრივი საკვანძო წირები, რომელთა რიცხვი თითოეულ ფერდობზე უნდა მივიჩნიოთ 1-ის ტოლად, (3.50) და (3.56) ფორმულების თანახმად

$$m = (1 \cdot 2 / 0,5 - 0,5)^{0,5} = 1,87; \quad n = \frac{1,87}{3,14} \cdot 1,043 - 0,5 = 1,18$$

(3.63) დამოკიდებულების თანახმად, ეს საკვანძო წირები არხის ორივე ნაპირიდან დაშორებული არიან მანძილით:

$$l = 2 \cdot \left(\tan 1,04 - \tan \left(1,04 - \frac{3,14}{1,87} \cdot (1 - 0,5) \right) \right) = 3,03 \text{ მ}.$$

(3.62) ფორმულის თანახმად, $\sigma = 0,1 + (9,8 \cdot 0,1 \cdot 0,5)^{0,5} = 3,2 \text{ წმ}^{-1}$; პერიოდი – $\tau = 2\pi / \sigma = 1,96 \text{ წმ}$.

როცა საქმე გვაქვს „სტოქსის ტიპის“ მოკლე ტალღებთან, წყლის თავისუფალი ზედაპირის ამსახველი (3.60) დამოკიდებულება შეიძლება შევცვალოთ ასიმპტოტური გამოსახულებით:

$$\eta = a \cdot \exp \left[kH_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \alpha_0} \right) \right] \cos m(\alpha - \alpha_0) \sin(\sigma - kx) \quad (3.69)$$

ტალღის განივი პროფილის ასაგებად, დროის იმ მომენტისთვის, როცა $\sin(\sigma - kx) = \pm 1$, α -ს ვანიჭებთ მნიშვნელობებს $60^\circ \geq \alpha \geq 0^\circ$, ვანგარიშობთ ამპლიტუდის

α კუთხეზე დამოკიდებულ $a \exp \left[kH_0 \left(\frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \alpha_0} \right) \right] = ae^{f(\alpha)}$ და $\cos m(\alpha - \alpha_0)$

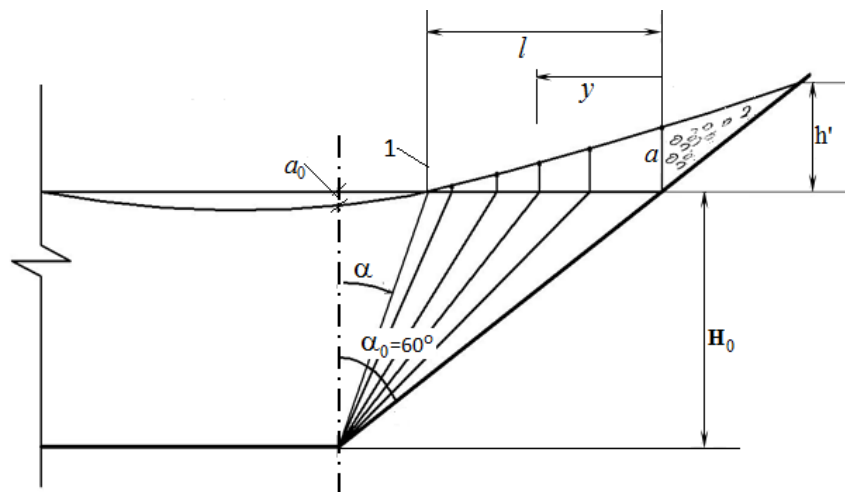
კოეფიციენტებს და ვადგენთ ცხრილს (ცხრ. 3.1), სადაც გარდა (3.69) ფორმულით ნაანგარიშევი ამპლიტუდის მნიშვნელობებისა, შედარების მიზნით, მოყვანილია აგრეთვე სტოქსის (3.2) ფორმულით გამოთვლილი ტალღის ზედაპირის ვერტიკალური კოორდინატები, ნაპირის ხაზიდან გაშლილობის სხვადასხვა α კუთხის შესაბამისი y დაშორებებისათვის.

ცხრილი 3. 1. ტალღური ზედაპირის საანგარიშო მახასიათებლები

$\alpha, ^\circ$	$\cosh m(\alpha - \alpha_0)$	$e^{f(\alpha)}$	$y, \text{მ}$	ტალღის ზედაპირის ნიშნული $\eta, \text{მ}$.	
				ფორმ. (3.69)	სტოქსი (3.2)
60	1,00	1,0	0	0,5	0,5
54	0,98	0,551	0,71	0,27	0,27
48	0,92	0,363	1,24	0,16	0,17
42	0,83	0,270	1,66	0,11	0,2
30	0,56	0,184	2,31	0,05	0,07
24	0,39	0,164	2,57	0,03	0,05
12	0,002	0,142	3,01	0,00	0,04
11,7	0,000	0,141	3,03	0,00	0,037
0	-0,38	0,135	3,46	-0,03	0,03

როგორც მიღებული შედეგების შედარება გვიჩვენებს (3.69) და (3.2) ფორმულები განსაკუთრებით კარგ შესაბამისობაში არიან ერთმანეთთან სანაპირო ფერდობის მახლობლად, ნაპირის ხაზიდან ტალღის სიგრძის $\approx 1/3$ მანძილზე. ეს შედეგი უფლებას გვაძლევს დავასკვნათ, რომ როცა საკითხი ეხება უშუალოდ არხის სანაპირო ფერდობზე მოკლე ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობით გამოწვეულ სიჩქარეთა ველის განსაზღვრას, შესაძლებელია ვისარგებლოთ სტოქსის ზუსტი ამოხსნებით, რომლებიც შეესაბამება უსასრულოდ ღრმა წყალზე ტალღების ნაპირგასწვრივ მოძრაობის შემთხვევას.

ცხრილ 3.1.-ში მოყვანილი სიდიდეების საფუძველზე ნახ.3.9-ზე აგებულია ტალღური ზედაპირის განივი ჭრილი.



ნახ. 3.9. მოკლე ნაპირგასწვრივი ტალღის განივი პროფილი ტრაპეციულ არხში: $H_0 = 2\text{მ}$, $b = 1,5\text{მ}$, $\alpha_0 = 60^\circ$; $\lambda = 62,8\text{მ}$, $a = 0,5\text{მ}$. 1- ნაპირგასწვრივი საკვანძო წირი.

4. ნაპირგასწვრივი ტალღებით სანაპირო ფერდობების დეფორმაციების პროგნოზირება და გამაგრების საკითხები

სანაპირო ფერდობების მდგრადობა, მათი ნაპირგასწვრივი ტალღებით გარსდენისას, პირდაპირ კავშირშია ნაპირგასწვრივი ტალღების პარამეტრებთან. კერძოდ, ტალღური მოძრაობის ჰიდროდინამიკურ წნევასთან და ფერდობზე სითხის ნაწილაკების სიჩქარეთა ველთან. სტოქსის ზუსტი ამონახსნები (დანართები პ.3.1) საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ყველა ეს პარამეტრი თუ ცნობილია წყალსატარის ფერდობებთან ან მის ცენტრალურ ნაწილში აღძრული ნაპირგასწვრივი ტალღების ამპლიტუდა (სიმაღლე) და ტალღის სიგრძე (ან ტალღური რხევათა სიხშირე).

როცა საკითხი ეხება წყალსაცავების ან ზღვების სანაპირო ფერდობების მდგრადობას, რომლებშიც ნაპირგასწვრივი ტალღების სიგრძე მნიშვნელოვნად ნაკლებია წყლის სიღრმესთან შედარებით, უნდა ვისარგებლოთ სტოქსის ამოხსნებით რომლისკენაც, მიისწრაფვის კელანდისა და მაკდონალდის ზუსტი ამოხსნები, თუ მასში ტალღის სიგრძეს მივიჩნევთ მოკლედ, არხში წყლის სიღრმესთან შედარებით. აქვე ჩვენ მიერ მიღებული მიახლოებით ამოხსნების საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ სტოქსის ამოხსნით შეგვიძლია ვისარგებლოთ აგრეთვე ტრაპეციული ან სამკუთხა არხების ფერდობების მახლობლად ტალღების პარამეტრების დადგენისას, თუ ნაპირგასწვრივი ტალღების ამპლიტუდა მოცემულია ნაპირის ხაზის გასწვრივ, ხოლო ტალღის სიგრძე არ აქარბებს დანართ 3-ის (3.56) ფორმულით ნაანგარიშვე ზღვრულ $\lambda_{\text{კლ}}$ მნიშვნელობას.

სტოქსის ამოხსნები შეესაბამება უსასრულო სიღრმის უძრავ წყალზე ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელებას. ეს ამოხსნები, დანართ 3-ში მოყვანილი სასაზღვრო პირობების საფუძველზე, ადვილად გარდაიქმნება ნაპირის გასწვრივ მუდმივი U_0 სიჩქარით მოძრავ წყალზე ტალღების საანგარიშო ფორმულებად. კერძოდ, ადვილად შეგვიძლია დავრწმუნდეთ, რომ ნაკადზე სტოქსის ტალღების გავრცელების სიხშირე იანგარიშება ფორმულით

$$(\sigma - kU_0)^2 = gk \sin \theta, \quad (4.1)$$

ხოლო სიჩქარეთა ველის კომპონენტებიდან, რომლებიც გამოითვლება (3.6)-(3.8) ფორმულებით, შეიცვლება მხოლოდ ნაპირგასწვრივი სიჩქარის გამოსახულება, რომელსაც დაემატება (ან გამოაკლდება – თუ ტალღები და ნაკადი ურთიერთსაწინააღმდეგოდ არის მიმართული) ძირითადი ნაკადის U_0 სიჩქარის მნიშვნელობა.

ჩვენ დაგვჭირდება სანაპირო ფერდობის სიბრტყეში წყლის ნაწილაკთა სიჩქარის ნაპირგასწვრივი და ნაპირის ხაზის მართობული მდგენელები (როგორც ვიცით,

სიჩქარის მდგენელი ფერდობზე, ფერდობის სიბრტყის მართობული მიმართულებით უდრის ნულს) და აგრეთვე ჰიდროდინამიკური წნევის მნიშვნელობა, სიბრტყის ნებისმიერი წერტილის თავზე ტალღური მოძრაობის ეს კომპონენტები შეიძლება შესაბამისად ჩაიწეროს შემდეგი ზოგადი სახით:

$$u' = \pm U_0 + AG \sin(\sigma t - kx); \quad (4.2)$$

$$v' = AG \cos(\sigma t - kx); \quad (4.3)$$

$$P = \gamma H + \gamma A \sin(\sigma t - kx), \quad (4.4)$$

სადაც γ წყლის ხვედრითი წონაა; H – ფერდობზე ნაკადის ცვალებადი სიღრმე, ხოლო A და G კოეფიციენტების მნიშვნელობა დამოკიდებულია წყალსატარში წყლის სიღრმესა და ტალღის სიგრძეზე. კერძოდ, თუ წყალსატარში აღინიშნება „სტოქსის ტიპის“ ტალღების ($\lambda < \lambda_{\text{ბლ}}$) მოძრაობა A და G კოეფიციენტები იანგარიშება ფორმულებით:

$$A = a \exp(-kH/\sin \theta_0); \quad (4.5)$$

$$G = (gk/\sin \theta_0)^{1/2}, \quad (4.6)$$

სადაც a ტალღის ამპლიტუდაა ნაპირის ხაზის გასწვრივ; $k = 2\pi/\lambda$ – ტალღური რიცხვი; λ – ტალღის სიგრძე; θ_0 – ჰორიზონტთან სანაპირო ფერდობის დახრის კუთხე.

არხში შედარებით გრძელი ტალღების გავრცელების შემთხვევაში, როცა $\lambda > \lambda_{\text{ბლ}}$, ჩვენ მიერ მიღებული ამონახსნების საფუძველზე, A და G კოეფიციენტები ღებულობს შემდეგ სახეს:

$$A = a_0 \frac{\cosh(k \cdot (H_0 - H)/\cos \alpha_0)}{\cosh kH_0 \cdot \cos m\alpha_0}, \quad (4.7)$$

$$G = \sqrt{(gk/\cos \alpha_0) \coth(kH_0/\cos \alpha_0)}, \quad (4.8)$$

სადაც a_0 არის ტალღის ამპლიტუდა არხის ცენტრალურ ნაწილში (ფერდობის ფუძეზე აღმართულ ვერტიკალზე); H_0 – წყლის მაქსიმალური სიღრმე; α_0 – წარმოადგენს კუთხეს სანაპირო ფერდობსა და ფერდობის ფუძეზე აღმართულ ვერტიკალს შორის $\alpha_0 = \frac{\pi}{2} - \theta_0$ (ნახ. 3.6 ბ); m კოეფიციენტი იანგარიშება (3.39) დამოკიდებულებით.

ფერდობზე სითხის ნაწილაკთა სიჩქარის მოდული (4.2) და (4.3) -ს თანახმად იანგარიშება გამოსახულებით:

$$|\vec{V}| = [U_0^2 \pm 2U_0AG \sin(\sigma - kx) + A^2G^2]^{1/2}, \quad (4.9)$$

რომლის მაქსიმალური მნიშვნელობა $|\vec{V}| = U_0 + AG$ მიიღება ფერდობზე ტალღის ქიმის გავლისას, ანუ როცა $\sin(\sigma - kx) = +1$. (4.3) გამოსახულებაში „+“ ნიშანი აიღება ტალღებისა და ნაკადის თანმხვედრი მიმართულების შემთხვევაში; „-“ – როცა ტალღები ნაკადის საწინააღმდეგოდაა მიმართული.

4.1. სანაპირო ფერდობზე გრუნტის ნაწილაკების მდგრადობა ტალღური ნაკადით გარსდენისას

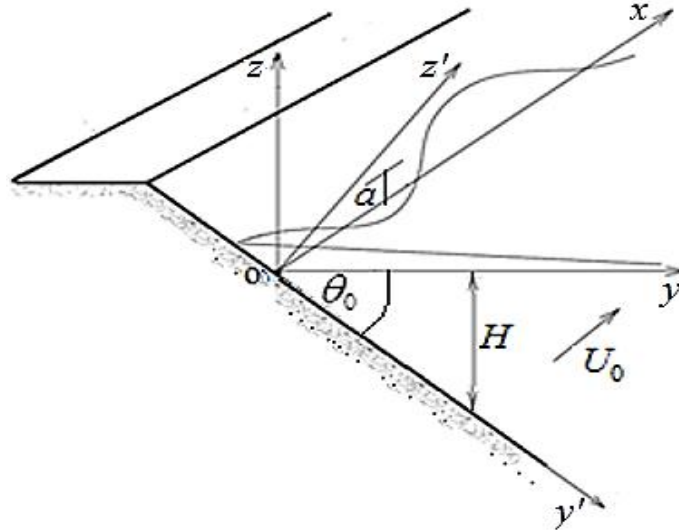
განვიხილოთ სანაპირო ფერდობის შემადგენელი გრუნტის რაიმე ნაწილაკის მდგრადობა, როცა ნაპირის გასწვრივ მიმართულ ნაკადზე ხდება ნაპირგასწვრივი ტალღების ზედდება.

ვთქვათ, წყლის სიღრმე ფერდობზე, გრუნტის საანგარიშო ნაწილაკის თავზე უდრის H -ს, ხოლო გრუნტის ნაწილაკის ზომები გაცილებით ნაკლებია ტალღის სიგრძესა (λ) და ნაპირთან ტალღის ამპლიტუდასთან (a) შედარებით. დავუშვათ აგრეთვე, რომ კრისტალურ ნაწილაკს აქვს კუბთან მიახლოებული ფორმა, რომლის გვერდის ზომაა d .

ვინაიდან ფერდობზე მდებარე ნაწილაკზე მოქმედებს სამგანზომილებიანი ტალღები, ნაწილაკის დაძვრა შესაძლებელია განვიხილოთ სამი მიმართულებით: კერძოდ, x ღერძის გასწვრივ, რომელიც ემთხვევა ნაპირის ხაზს; y' ღერძის გასწვრივ, რომელიც მდებარეობს ფერდობის სიბრტყეზე და მიმართულია ქვევით, წყლის დიდი სიღმეებისკენ და z' ღერძის, ანუ სანაპირო ფერდობის სიბრტყის მართობული მიმართულებით (ნახ. 4.1). ამასთან მივიჩნით, რომ ნაწილაკის სიმცირის გამო, მასზე მოქმედი ძალები მოდებულია დახრილ ფსკერზე განთავსებული ნაწილაკის სიმძიმის ცენტრში.

გრუნტის ნაწილაკის მდგრადობას სანაპირო ფერდობზე განაპირობებს აქტიური და დამჭერი ძალები. აქტიური ძალებია წყალქვეშა ფერდობზე გრუნტის ნაწილაკის წონის მდგენელი, წყლის ფილტრაციული უკუწნევა, განპირობებული ტალღური მოძრაობისას ჰიდროსტატიკურ და ჰიდროდინამიკურ წნევათა სხვაობით და ტალღური ნაკადით გრუნტის ნაწილაკის გარსდენისას აღძრული შუბლა-გამტაცი ძალებით. სხვა აქტიური ძალების ზემოქმედება, ნაწილაკის სიმცირის გამო, შეიძლება უგულებელყოფილ იქნას [5, 75].

ფერდობზე ნაწილაკის დამჭერ ძალებს გარდა წონისა, განეკუთვნება კულონის ხახუნის ძალა, რომელიც მიიღება ხახუნის კოეფიციენტის გადამრავლებით აქტიური ძალების გეგმილთა ჯამზე ფერდობის მართობული მიმართულებით და, თუ საქმე გვაქვს შეკავშირებულ გრუნტთან, ნაწილაკთა შეჭიდულობის ძალები.



ნახ. 4.1. ფერდობზე ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედების საანგარიშო სქემა

დავაგეგმილოთ გრუნტის ნაწილაკზე მოქმედი ძალები ფერდობის მართობულ Oz' ღერძზე. შეწონილ მდგომარეობაში ნაწილაკის წონის მდგენელი Oz' ღერძზე გამოისახება ტოლობით:

$$P_1 = -\gamma'_s \cos \theta_0 d^3, \quad (4.10)$$

სადაც $\gamma'_s = \gamma_s - \gamma$ ნაწილაკის ხვედრითი წონაა შეწონილ მდგომარეობაში; γ_s ნაწილაკის კუთრი წონა; γ – წყლის ხვედრითი წონა.

ნაწილაკის ზედაპირზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური წნევა გამოისახება (4.4) ტოლობით, ხოლო ნაწილაკის ძირზე მოსული ფილტრაციული უკუწნევა შეგვიძლია გავუტოლოთ ჰიდროსტატიკურ წნევას, ათვლილს სითხის შეუშფოთებელი ზედაპირიდან $-P = \gamma H$. მაშინ ამ წნევათა სხვაობით განპირობებული ძალა იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$P_2 = \gamma A \sin(\sigma t - kx) d^2 \quad (4.11)$$

ცხადია, ფილტრაციული უკუწნევით გამოწვეული ნაწილაკის ამომგდები ძალა იმოქმედებს მხოლოდ მაშინ, როცა ნაწილაკის თავზე ტალღური ზედაპირის ფაზა $\sin(\sigma t - kx) < 0$, ანუ როცა ნაწილაკის თავზე გაირბენს ტალღის ღრმული. ის ძალის მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს ნაწილაკის თავზე ტალღის ფსკერის გავლისას, ანუ როცა $\sin(\sigma t - kx) = -1$.

გარდა ნაწილაკის წონის ფერდობის მიმართ ნორმალური მდგენელისა, შეკავშირებული გრუნტის არსებობის შემთხვევაში, ნაწილაკის დაძვრას Oz' ღერძის მიმართულებით წინაღობას უწევს შეჭიდულობის ძალა, რომელიც გამოისახება დამოკიდებულებით

$$P_3 = cd^2, \quad (4.12)$$

სადაც c ნაწილაკთა შეჭიდულობის კოეფიციენტი, რომლის დადგენა, შესაძლებელია აკადემიკოს ც. მირცხულავას რეკომენდაციებით [131].

ვინაიდან სანაპირო ფერდობზე ტალღური მოძრაობით გამოწვეული სიჩქარის ნორმალური მდგენელი უდრის ნულს, ცხადია, გარსდენის შუბლა-გამტაცი ძალების გეგმილიც ნულის ტოლი იქნება Oz' ღერძზე. ამგვარად, Oz' ღერძის გასწვრივ ნაწილაკის სტატიკური მდგრადობის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$P_1 + P_2 + P_3 = 0, \quad (4.13)$$

ან როცა $\sin(\sigma t - kx) = -1$

$$\gamma'_s \cos \theta_0 d + c - \gamma A = 0. \quad (4.14)$$

(4.14) განტოლებიდან ვღებულობთ გრუნტის ნაწილაკის იმ მინიმალურ ზომას, რომელიც უზრუნველყოფს მის მდგრადობას ფერდობის სიბრტყის ნორმალური მიმართულებით:

$$d_{z'} = \frac{\gamma A - c}{\cos \theta_0}. \quad (4.15)$$

როცა ფერდობი შედგება მსხვილი შეუკავშირებელი გრუნტისგან – ხრეშისგან ($c = 0$) შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ ფილტრაციული დეპრესიის მრუდი მცირედ ჩამორჩება ტალღას და ამიტომ $\gamma A = 0$, შესაბამისად $d_{z'} = 0$.

ფერდობის სიბრტყეში ნაწილაკის დაძვრას, გარდა შეჭიდულობის ძალისა, წინააღმდეგობას უწევს ხახუნის ძალა, რომელიც გამოისახება ნორმალური ძალების (4.13) ჯამის ნამრავლით ხახუნის f კოეფიციენტზე:

$$P_b = f(P_1 + P_2 + P_3) = -f\gamma'_s \cos \theta_0 d^3 - f\gamma A \sin(\sigma t - kx) d^2, \quad (4.16)$$

ხოლო ნაწილაკის დაძვრას განაპირობებს ნაწილაკის წონის მდგენელი Oy' ღერძის მიმართულებით

$$P_4 = \gamma'_s \sin \theta_0 d^3 \quad (4.17)$$

და შუბლა-გამტაცი ძალა, რომელიც გამოისახება ცნობილი დამოკიდებულებით

$$P_5 = \frac{\tilde{c}}{2} \rho \omega |\vec{V}| \vec{V}_{\text{შპ}}, \quad (4.18)$$

სადაც \tilde{c} შუბლა წინაღობის კოეფიციენტი; ρ – წყლის სიმკვრივე; ω წარმოადგენს ნაწილაკის განივკვეთის (ე. წ. მიდელის) ფართობს გარსდენის განივი მიმართულებით; $|\vec{V}|$ გამოსახავს ტალღური მოძრაობისას წყლის ნაწილაკთა სიჩქარის მოდულს, რომელიც იანგარიშება (4.4) დამოკიდებულებით; $\vec{V}_{\text{გვ}}$ – წარმოადგენს სიჩქარის გეგმილს შერჩეულ მიმართულებაზე.

შუბლა-გამტაცი ძალის გეგმილები ფერდობზე ნაპირგასწვრივ Ox ღერძისა და ნაპირის ხაზის მართობულ Oy' ღერძის მიმართულებით (4.12) და (4.13) დამოკიდებულებების საფუძველზე შესაბამისად გამოისახება ფორმულებით:

$$P_{\text{გ},x} = 0,5\tilde{c}\rho d^2 [U_0^2 \pm 2U_0AG \sin(\sigma - kx) + A^2C^2]^{1/2} [\pm U_0 + AG \sin(\sigma - kx)]; \quad (4.19)$$

$$P_{\text{გ},y'} = 0,5\tilde{c}\rho d^2 [U_0^2 \pm 2U_0AG \sin(\sigma - kx) + A^2C^2]^{1/2} AG \cos(\sigma - kx). \quad (4.20)$$

სხვა აქტიური ძალების ზემოქმედება ნაწილაკზე, მათი სიმცირის გამო, შეიძლება უგულებელყოფილ იყოს.

შევადგინოთ გრუნტის ნაწილაკის ზღვრული სტატიკური წონასწორობის განტოლებები Ox და Oy' ღერძების გასწვრივ.

Ox ღერძის მიმართულებით გვექნება

$$P_{\text{გ}x} + P_3 + P_b = 0, \quad (4.21)$$

Oy' ღერძის მიმართულებით

$$P_{\text{გ},y'} + P_3 + P_4 + P_b = 0. \quad (4.22)$$

თუ ჩავსვამთ (4.21) და (4.22) განტოლებებში შესაბამისი ძალების მნიშვნელობებს, Ox , Oy' და OZ' მიმართულებით მოქმედი სტატიკური და დინამიკურ დატვირთვათა გათვალისწინებით ნაწილაკის სტატიკური მდგრადობის (4.13), (4.14) და (4.22) განტოლებები ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\gamma'_s d^3 \cos \theta_0 + cd^2 + \gamma Ad^2 \sin \beta = 0; \quad (4.23)$$

$$\gamma'_s f d^3 \cos \theta_0 + cd^2 - \frac{1}{2} \tilde{c} \rho d^2 (U_0 + AG)(U_0 \pm AG \sin \beta) = 0; \quad (4.24)$$

$$\gamma'_s (f \cos \theta_0 - \sin \theta_0) d^3 + cd^2 - \frac{1}{2} \tilde{c} \rho d^2 (U_0 + AG) AG \cos \beta + f \gamma A |\sin \beta| d^2 = 0, \quad (4.25)$$

სადაც d კუბზე დაყვანილი გრუნტის ნაწილაკის სიმაღლეა; შეუკავშირებელი გრუნტის შემთხვევაში შეჭიდულობის კოეფიციენტი $C = 0$; $\beta = (\sigma - kx)$ - ტალღის ფაზა; A და G სიდიდეები ფერდობის ნებისმიერ წერტილში იანგარიშება (4.5) (4.6), (4.7) და (4.8) ფორმულებით, ტალღის ფრონტის n რიცხვის (3.56) და (3.57) ტალღის ზღვრული $\lambda_{\text{ხლ}}$ სიგრძის სიდიდეების მიხედვით;

ზემოთ მოყვანილი დამოკიდებულებები საშუალებას გვაძლევს შევავსოთ არხის ფერდობების მდგრადობა და განვსაზღვროთ არხის სანაპირო ფერდობების მოსალოდნელი დეფორმაციები მათზე ნაპირგასწვრივი ტალღების გარსდენისას. კერძოს გრუნტის სტატიკურად მდგრადი ნაწილაკის ზომის დასადგენად (4.24)-(4.25) განტოლებებიდან შესაბამისად მივიღებთ:

Ox ღერძის გასწვრივ ზღვრული დიამეტრი, განსაზღვრული (4.24)-დან

$$d_x = \frac{1}{\gamma'_s f \cos \theta_0} \left\{ 0,5\tilde{c} \rho d^2 [U_0^2 \pm 2U_0 AG \sin(\sigma - kx) + A^2 C^2]^{1/2} \cdot |\pm U_0 + AG \sin \beta| - c \right\}, \quad (4.26)$$

Oy' ღერძის გასწვრივ –

$$d_{y'} = [\gamma'_s (f \cos \theta_0 - \sin \theta_0)]^{-1} \left\{ 0,5\tilde{c} \rho [U_0^2 \pm 2U_0 AG \sin \beta + A^2 G^2]^{1/2} \times AG \cos \beta - f\gamma A |\sin \beta| - c \right\} \quad (4.27)$$

რაც შეეხება ზღვრული დიამეტრის დადგენას Oz' ვერტიკალური ღერძის გასწვრივ, ამ შემთხვევაში უნდა ვისარგებლოთ (4.15) დამოკიდებულებით, რომელშიც მიჩნეულია, რომ ნაწილაკის თავზე გადის ტალღის ღრმული, რომლის ფაზა $\beta = -\pi/2$.

როგორც გვიჩვენებს (4.15), (4.26) და (4.27) გამოსახულებების ანალიზი, ფერდობზე გრუნტის სტატიკურად მდგრადი ნაწილაკის ზომები დამოკიდებულია ნაწილაკის თავზე ტალღური ზედაპირის ფაზაზე. ფაზის მნიშვნელობაზე დამოკიდებულებით იცვლება დროში ნაწილაკზე მოსული დატვირთვები. კერძოდ, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, გრუნტის ნაწილაკზე ფერდობის მართობულად მოქმედი ამომგდები ძალა ირთვება მხოლოდ მაშინ, როცა ნაწილაკის თავზე გადის ტალღის ღრმული. ამავე დროს მცირდება როგორც ნაწილაკის დამჭერი ხახუნის, ასევე დამძრავი შუბლა-გამტაცი ძალები Ox ღერძის მიმართულებით, ხოლო ფერდობის დახრის Oy' ღერძის მიმართულებით, ნაწილაკის თავზე ტალღის ფსკერის გავლისას, ანუ როცა $\sin(\sigma t - kx) = -1$; $\cos(\sigma t - kx) = 0$, შუბლა-გამტაცი ძალები იცვლის მიმართულებას დაღმავლიდან აღმავლისკენ და დროებით, ტალღის ქიმის გავლამდე, ხელს უწყობს ფერდობზე ნაწილაკის შენარჩუნებას.

ცხადია, ნაკადის მიმართულებით ფაზის $-\beta = (\sigma - kx)$ -ის ექსტრემალური მნიშვნელობა, რომლის დროსაც (4.26) ფორმულით განსაზღვრული გრუნტის ნაწილაკის ზომა (სიმსხო) ღებულობს მაქსიმალურ მნიშვნელობას ტოლია $\pi/2$ -ის რაც შეესაბამება საანგარიშო ნაწილაკის თავზე ტალღის ქიმის გავლას. როცა ტალღები ნაკადის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული, ნაპირის გასწვრივ გრუნტის ნაწილაკის ზღვრული ზომა მიიღება ნაწილაკის თავზე ღრმულის ფსკერის გავლისას, ანუ როცა $\beta = -\pi/2$. ამის გათვალისწინებით (4.26) ფორმულა შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი გამარტივებული სახით:

$$d_x = \frac{1}{\gamma'_s f \cos \theta_0} [0,5\tilde{c} \rho (U_0 + AG)^2 - c]. \quad (4.28)$$

შედარებით რთულდება ნაკადზე ტალღის ფაზის ექსტრემალური მნიშვნელობის დადგენა მაშინ, როცა განიხილება გრუნტის ნაწილაკის მდგრადობა Oy' ღერძის მიმართულებით. ამ შემთხვევაში ზღვრული დიამეტრის საანგარიშოდ შეგვიძლია (4.21)-ის ნაცვლად ვისარგებლოთ შემდეგი გამოსახულებით

$$d_{y'} = [\gamma'_s (f \cos \theta_0 - \sin \theta_0)]^{-1} \left\{ 0,5\tilde{c} \rho [U_0^2 + 2U_0 AG \sin \beta + A^2 G^2]^{1/2} \times AG \cos \beta_{\text{მსბ.}} - f\gamma A |\sin \beta_{\text{მსბ.}}| - c \right\}, \quad (4.29)$$

სადაც ფაზის ექსტრემალური მნიშვნელობა იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$\beta_{\text{მსბ.}} \approx \arcsin \left\{ -\frac{1}{3} \left[\frac{(U_0 + AG)^2}{2U_0 AG} - 1 \right] + \sqrt{\frac{1}{9} \left[\frac{(U_0 + AG)^2}{2U_0 AG} - 1 \right]^2 + \frac{1}{3}} \right\}. \quad (4.30)$$

სანაპირო ფერდობის გრუნტის წარეცხვაზე მდგრადობის შესაფასებლად საჭიროა (4.15), (4.28) და (4.29) ფორმულებით გამოთვლილ ნაწილაკის ზომათაგან მაქსიმალური (d_{\max}) შევადაროთ რეალურ პირობებში ფერდობის გრუნტის ნაწილაკის მახასიათებელ ზომას (როგორც წესი, საანგარიშოდ იღებენ 90%-ით უზრუნველყოფილი ფრაქციების სიმსხოს $d_{90\%}$). თუ აღმოჩნდება, რომ $d_{\max} < d_{90\%}$, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ამ შემთხვევაში ადგილი არ აქვს სანაპირო ფერდობის გრუნტის წარეცხვას. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ანუ როცა $d_{\max} > d_{90\%}$ სანაპირო ფერდობი დაექვემდებარება წარეცხვას და საჭიროა გახდება, მივიღოთ ზომები მის გასამაგრებლად. ასეთ ღონიძიებათაგან ჩვენ განვიხილავთ სანაპირო ფერდობის გამაგრებას ქვაფენილით, ფილებით ან ქვაყრილით. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ **ფერდობზე წყლის სიღრმის მატებასთან ერთად მკვეთრად მცირდება წარეცხვების ინტენსივობა**. ამიტომ, ხშირ შემთხვევაში, ფერდობის გამაგრებას აზრი აქვს მხოლოდ ნაპირის ხაზის გასწვრივ, ფერდობის ზედა უბანზე.

4.2. სანაპირო ფერდობის დეფორმაციების გაანგარიშება

ცნობილია, რომ არხის ნაპირების შეუქცევად დეფორმაციებს განსაზღვრავს ტალღების მოძრაობისას აღძრული ინფილტრაციული (უკუწნევეთი) ძალები [73]. დეფორმაციის პროგნოზისათვის ვისარგებლოთ შეუკავშირებელი გრუნტის $c = 0$ სტატიკური წონასწორობის (4.23) განტოლებით, რომელშიც A -ს ნაცვლად უნდა ჩაისვას (4.5) აღნიშვნა

$$\gamma'_0 d^3 \cos \theta_0 - \gamma a \exp\left(-\frac{kH}{\sin \theta_0}\right) = 0. \quad (4.31)$$

გამოვსახოთ (4.31) განტოლებაში ტრიგონომეტრიული ფუნქციები ფერდობის დახრილობის კოეფიციენტის - $m_0 = \cot \theta_0$ -ის მეშვეობით და განვსაზღვროთ ფერდობზე წყლის ის ზღვრული $H = H'_0$ სიღრმე, რომლის ქვემოთ d ფრაქციის მქონე გრუნტი არ ექვემდებარება წარეცხვას ფილტრაციული უკუწნევის გამო:

$$H'_0 = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{1+m_0^2}} \ln\left(\frac{\gamma a \sqrt{1+m_0^2}}{\gamma'_s d m_0}\right) \quad (4.32)$$

ამ სიღრმის ზევით ფერდობი იწყებს წარეცხვას სიღრმის კლებასთან ერთად. ფერდობის წარეცხვის ზომები და მისი დეფორმაციის კონტური შეგვიძლია განვსაზღვროთ ამავე (4.32) დამოკიდებულებიდან. თუ დახრილობის m_0 კოეფიციენტს მივანიჭებთ უწყვეტად მზარდ მნიშვნელობებს და გამოვსახავთ მას $m = -dy/dH$ წარმოებულის სახით, სადაც y ღერძი მიმართულია ნაპირისკენ და სათავეს იღებს წყლის შეუშფოთებელ ზედაპირზე იმ წერტილში, რომლის ქვემოთ (4.32) დამოკიდებულებით დაფიქსირებულია საწყისი θ_0 კუთხის შესაბამისი უცვლელი H'_0 ჩაღრმავება (ნახ. 4.1).

როგორც წესი, მიწის არხებს აქვს საკმარისად დიდი ფერდობის კოეფიციენტი m_0 , რაც კიდევ უფრო მეტად იზრდება ფერდობის წარეცხვასთან ერთად. ეს გარემოება საშუალებას გვაძლევს (4.32) გამოსახულებაში (რომელშიც m_0 შეცვლილია m -ით, H'_0 კი H -ით) m^2 მივიჩნიოთ ერთზე გაცილებით დიდ სიდიდედ და (4.32) ჩავწეროთ შემდეგი დიფერენციალური განტოლების სახით

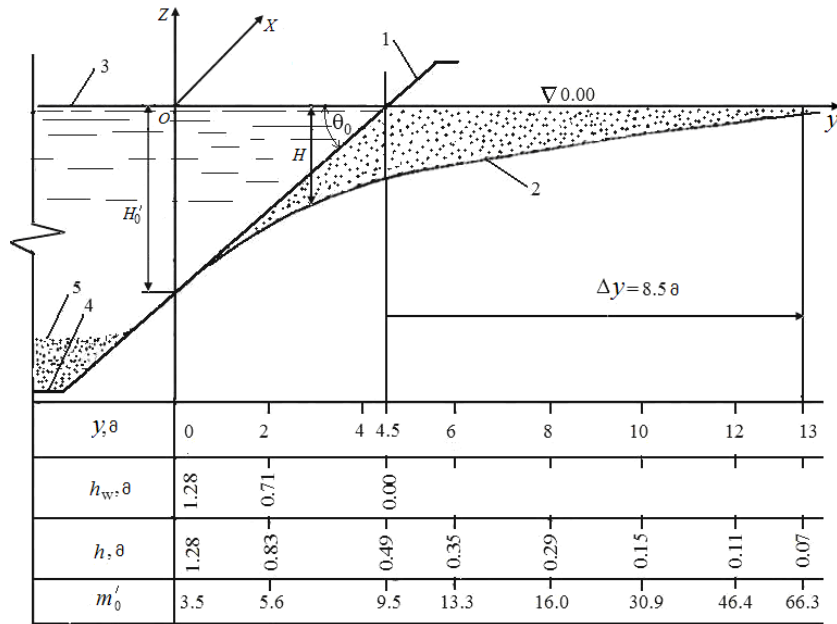
$$H = -\frac{1}{k} \frac{dH}{dy} \ln\left(\frac{\gamma}{\gamma'_s} \cdot \frac{a}{d}\right). \quad (4.33)$$

თუ მივიჩნევთ, რომ თავდაპირველი ნაპირის ხაზის გასწვრივ მოცემული ამპლიტუდა ფერდობის წარეცხვის გამო არ განიცდის არსებით ცვლილებას არხის გაგანიერებასთან ერთად, (4.33) განტოლების ამოხსნა, (4.32) ტოლობით დადგენილი საწყისი პირობით $H = H'_0$, როცა $y=0$, გვაძლევს წყლის სიღრმის მნიშვნელობას წარეცხილ ფერდობზე

$$H = H'_0 \exp\left[-ky / \ln\left(\frac{\gamma}{\gamma'_s} \cdot \frac{a}{d}\right)\right] \quad (4.34)$$

სადაც $k = 2\pi/\lambda$ ტალღური რიცხვია, ხოლო H'_0 გამოითვლება (4.32) ფორმულით. ცხადია, (4.34) დამოკიდებულებით შეიძლება ფერდობის დეფორმაციის კონტურის აგება. კერძოდ, ნახ.4.2-ზე წარმოდგენილი წარეცხვის კონტური აგებულია შემდეგი

მონაცემებით: არხის თავდაპირველი სიღრმე $H_0 = 5$ მ, არხის ფერდობის საპროექტო დახრილობა $m_0 = c \cdot \theta_0 = 3,5$; გრუნტის ნაწილაკთა საშუალო დიამეტრი $d = 0,5 \cdot 10^{-4}$ მ, $\gamma = 1 \text{ ტ/მ}^3$, $\gamma'_s = 1,6 \text{ ტ/მ}^3$; $\lambda = 4$ მ და $a = 0,35$ მ . ეს მონაცემები შეესაბამება ყარშინის (უზბეკეთი) სამელიორაციო არხს (იხ. ნახ.3.3.), სადაც არხის ნაპირდამცავი ფილების ნგრევა და ფერდობების წარეცხვა განაპირობა გემების მიმოსვლამ.



ნახ.4.2. ტრაპეციული არხის წარეცხვის კონტური მოკლე ნაპირგასწვრივი ტალღებით. 1. გრუნტში გაჭრილი არხის ფერდობის თავდაპირველი კონტური; 2. სანაპირო ფერდობის წარეცხილი კონტური; 3. წყლის ზედაპირი. 5. არხის ფსკერი 5. არხის ფსკერზე დაღეილი გრუნტი

უნდა აღინიშნოს, რომ ნახ.4.2.-ზე წარმოდგენილი შედეგები, შესრულებული (4.32) და (4.34) დამოკიდებულებებით, შესაბამისობაში აღმოჩნდა ამ არხზე ჩატარებულ ნატურული დაკვირვებების მონაცემებთან [73].

როცა არხში ვრცელდება ტალღები, რომელთა სიგრძე ეთანადება ან აღემატება არხის ზომებს – სიღრმესა და სიგანეს, (4.23) განტოლებაში უნდა ჩაისვას a_0 -ის (3.51) - ით და A -ს (4.7) დამოკიდებულებებით ნაანგარიშევი მნიშვნელობები, რაც $c = 0$ და $\beta = -\pi / 2$ პირობებისთვის, ფერდობის წარეცხვის კონტურის ასაგებად გვამღევს შემდეგ საანგარიშო დამოკიდებულებას:

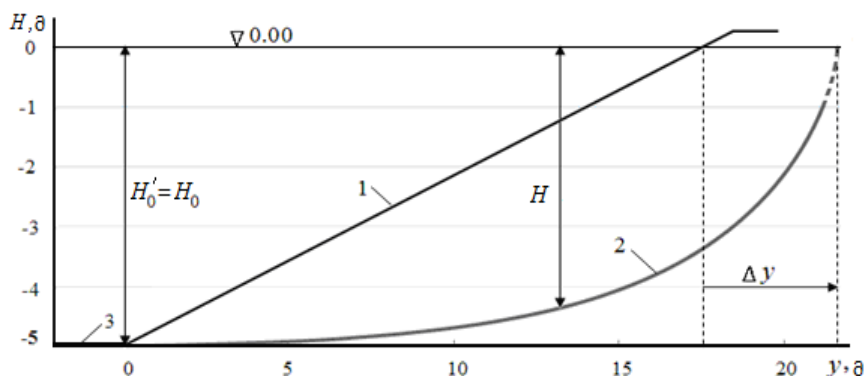
$$H'_0 = H_0 - \frac{\sin \theta_0}{k} \operatorname{acosh} \left(\frac{\gamma'_s d \cos \theta_0}{\gamma a_0} \cos m \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \cosh k H_0 \right), \quad (4.35)$$

სადაც a_0 ნაპირგასწვრივი ტალღის ამპლიტუდაა, მოცემული ფერდობის ფუძეზე აღმართულ ვერტიკალზე (ან განსაზღვრული (3.51) და (3.39) დამოკიდებულებებით - თუ ტალღის ამპლიტუდა მოცემულია თავდაპირველად წაურეცხავი ფერდობის

ნაპირის ხაზზე). ტალღის მოცემული სიგრძისთვის ($\lambda = 2\pi/k$) (4.35) ტოლობიდან შეგვიძლია უშუალოდ განვსაზღვროთ a_0 ტალღის ამპლიტუდის ის ზღვრული მნიშვნელობა $a_0 = a'_0$, რომლის დროსაც, მხოლოდ ტალღური ზემოქმედების გამო სანაპირო ფერდობის წარეცხვები აღწევენ არხის ფსკერს (ე.ი. სრულდება პირობა $H'_0 = H_0$). ამ ზღვრული ამპლიტუდის მნიშვნელობაა

$$a'_0 = \frac{\gamma'_s}{\gamma} d \cos \theta_0 \cos m \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \cosh kH_0 . \quad (4.36)$$

როცა $a_0 < a'_0$, ხდება ფერდობის მხოლოდ ნაწილობრივი წარეცხვა გრძელი ტალღებით, ხოლო როცა $a_0 > a'_0$ წარეცხვის კონტური მოიცავს არხის ფსკერსაც. ამასთან, ერთი კერძო შემთხვევის მაგალითზეც შეგვიძლია ვიმსჯელოთ თუ, ამ შემთხვევაში, როგორი ტენდენცია აქნება ფერდობის წარეცხვის კონტურის მრუდს. კერძოდ, თუ ტალღის ამპლიტუდას ფერდობის ფუძეზე აღმართულ ვერტიკალზე მივანიჭებთ მნიშვნელობას $a_0 = \frac{\gamma'_s}{\gamma} d \cos \theta_0 \cos m \left(\frac{\pi}{2} - \theta_0 \right)$, მაშინ, გამომდინარე (4.35)-დან ვღებულობთ, რომ წყლის სიღრმეები წარეცხილ ფერდობზე აღიწერება ტოლობით $H'_0 = H_0(1 - \sin \theta_0)$, რომლიც არ არის დამოკიდებული ტალღის სიგრძეზე. თუ ჩავთვლით, რომ $H'_0 = H(y)$ და $\sin \theta_0 = f(\theta)$, სადაც y განივი კოორდინატია, ხოლო θ წარმოადგენს წარეცხილი ფერდობის ჰორიზონტთან დახრის ცვლად კუთხეს, რომელიც იცვლება საზღვრებში $0 \leq \theta_0 \leq \pi/2$, მაშინ, თანდათანობითი მიახლოებით მივიღებთ, რომ გრძელი ტალღების ზემოქმედებით წარეცხილი სანაპირო ფერდობი ღებულობს ნახ.4.3-ზე მოყვანილ ფორმას.



ნახ.4.3. ტრაპეციული არხის წარეცხვის კონტური გრძელი ნაპირგასწვრივი ტალღებით 1. გრუნტში გაჭრილი არხის ფერდობის თავდაპირველი კონტური; 2. სანაპირო ფერდობის წარეცხილი კონტური; 3. არხის ფსკერი.

ამრიგად, მიღებული შედეგები გვაძლევს საშუალებას დავასკვნათ, რომ სანაპირო ფერდობებზე წყლის სიღრმესთან შედარებით მოკლე ნაპირგასწვრივი ტალღების

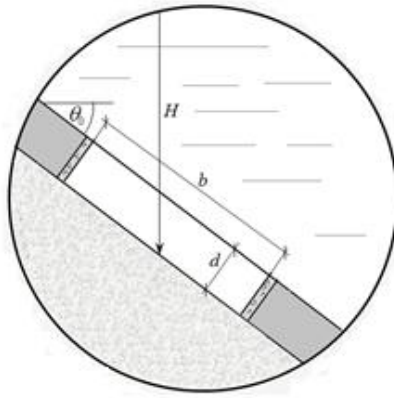
ზემოქმედებით წარეცხილი სანაპირო ფერდობი ღებულობს ამოზნექილ ფორმას, ხოლო გრძელი ტალღების ზემოქმედების შემთხვევაში - ჩაზნექილს.

4.3. ფერდობების გამაგრებისა და მოპირკეთების საანგარიშო მეთოდები

ქვაფენილით ან ფილებით არხის ფერდობების მოპირკეთების შემთხვევაში პირველ რიგში საჭიროა მოპირკეთების ელემენტის სისქის განსაზღვრა. ჩვეულებრივ ქვაფენილის თითოეული ქვა ან ფილა თავისი გვერდითი წახნაგებით ჩაჭედებულია მეზობელი ქვების მიერ შექმნილ ბუდეში და ამიტომ მისი გადაადგილება ფერდობის სიბრტყეში პრაქტიკულად გამორიცხებულია. შესაძლებელია მხოლოდ ქვის ამოგდება ბუდიდან ფერდობის სიბრტყის მართობული Oz' ღერძის მიმართულებით (ნახ.4.1), რასაც განპირობებს საანგარიშო ელემენტის ძირზე მოსული ფილტრაციული უკუწნევა. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ფილტრაციულ უკუქმედებას ადგილი აქვს მხოლოდ მაშინ, როცა დამცავი ელემენტის თავზე გაივლის ტალღური ზედაპირის ღრმული. ასეთ შემთხვევაში უნდა მივმართოთ წონასწორობის (4.14) განტოლებას, საიდანაც მოპირკეთების სისქე სანაპირო ფერდობის ნებისმიერ ჩაღრმავებაზე იანგარიშება ფორმულით

$$d = \frac{\gamma A - c}{\gamma'_s \cos \theta_0}. \quad (4.37)$$

აქ შეჭიდულობის c კოეფიციენტის ქვეშ ვგულისხმობთ ელემენტის ფერდობთან შეჭიდულობის ძაბვას, რაც ზღვრული წონასწორობის განხილვისას შეგვიძლია გავუტოლოთ ჩაანკერების გაჭიმვაზე ან, ბლოკის გვერდითი ზედაპირის ჩაცემენტების შემთხვევაში – ძვრაზე დასაშვებ ძაბვებს. როცა ფილა ან ბლოკი თავისუფლად ძევს შეუკავშირებელი გრუნტის ფერდობზე $c = 0$. გარდა ამისა, არხში მოკლე ტალღების გავრცელების შემთხვევაში A სიდიდის ანგარიშისას (4.17)-ში (განსხვავებით (4.15) ფორმულისაგან) შემავალი H სიღრმის ნაცვლად, ფილის d სისქისა და ფერდობის დახრის θ_0 კუთხის გათვალისწინებით უნდა ჩაისვას $H - d \cos \theta_0$ სიდიდე (ნახ.4.4.). ასეთი ჩასმის განხორციელება სტოქსის ტიპის ტალღების გავრცელების შემთხვევაში გვაძლევს



ნახ.4.4. მოპირკეთების ფილის საანგარიშო სქემა

შეიძლება დაისვას შებრუნებული ამოცანაც და განისაზღვროს ფერდობზე წყლის სიღრმე, რომელიც უზრუნველყოფს მოცემული d სისქის ფილების მდგრადობას. (4.36) ფორმულის საფუძველზე წყლის ეს სიღრმე იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$H = d \cos \theta_0 + \frac{\sin \theta_0}{k} \ln \left(\frac{\gamma}{\gamma'_s} \cdot \frac{a}{d \cos \theta_0} \right). \quad (4.39)$$

(4.38) დამოკიდებულებით შეგვიძლია ვისარგებლოთ აგრეთვე მოპირკეთებული ფერდობის მდგრადობის შესაფასებლად. კერძოდ, თუ შევადარებთ (4.39)-ით ნაანგარიშე წყლის სიღრმის მნიშვნელობას ნაპირთან ტალღის ამპლიტუდას და აღმოჩნდება, რომ $H < a$, მაშინ შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ d სისქის ფილებით ან იმავე d სიმაღლის ბლოკებით მოპირკეთებული ფერდობი მდგრადია, მისი ნაპირგასწვრივი ტალღებით გარსდენისას. წინააღმდეგ შემთხვევაში, საჭიროა გაიზარდოს მოსაპირკეთებელი ელემენტის სისქე ან შემცირდეს ფერდობების ჰორიზონტთან დახრის კუთხე.

სანაპირო ფერდობების ქვაყრილით დაცვას ადამიანი მრავალი საუკუნის წინათ მიმართავდა. ამჟამად სხვადასხვა ავტორების მიერ თეორიული თუ ექსპერიმენტალური მეთოდებით შექმნილია მთელი რიგი საანგარიშო ფორმულები, სქემები და გრაფიკები ქვაყრილის ლოდების დიამეტრის თუ წონის განსასაზღვრავად [92, 107, 138, 176], მაგრამ ეს ფორმულები, ითვალისწინებენ მხოლოდ ქვაყრილზე ტალღების ფრონტალურ ზემოქმედებას და ამიტომ მათი გამოყენება ქვაყრილის მდგრადობის შესაფასებლად მისი ნაპირგასწვრივი ტალღებით გარსდენისას მოითხოვს შესაბამის კორექტირებას. აქ, პირველ რიგში, მხედველობაში გვაქვს შაიტანის საანგარიშო სქემა [176], რომელიც შეეხება რა ქვაყრილზე ტალღების მხოლოდ ფრონტალურ ზემოქმედებას, ქვაყრილს წარმოგვიდგენს არა სფერული ფორმის ლოდების ნაყარის სახით, (რომლის ზედაპირული ქვეები ერთგვაროვანი ქვაყრილის შემთხვევაში მოთავსებული უნდა იყოს ერთმანეთთან მიბჯენილ იგივე დიამეტრის ქვებისაგან შექმნილ ბუდეებში ან, როცა ქვაყრილი შედგება არაერთგვაროვანი დიამეტრის მქონე ქვებისაგან, ნახევრად იყოს

ამოშვერილი ქვაყრილის ზედაპირიდან (ნახ.4.5, ა,ბ)), არამედ, თუ გავითვალისწინებთ [176]-ში საანგარიშო სქემაზე მოყვანილ ზომებს, – ცილინდრული ფორმის ქვებისაგან შემდგარი ნაყარის სახით, რაც, რა თქმა უნდა, არ ასახავს ქვაყრილის სფეროსებრი ქვების შესაძლო ნებისმიერ (შემთხვევით) განლაგებას სანაპირო ფერდობზე და მიგვითითებს [176]-ში წარმოდგენილი სქემის არაკორექტულობაზე.

ჩვენს მიერ შემოთავაზებულ სქემებზე (ნახ.4.5.გ) ქვაყრილის საანგარიშო ზედაპირული ქვა (ტალლის პარამეტრებთან შედარებით მცირე ზომის ლოდი) მოთავსებულია არა ორი, არამედ სამი იმავე ფორმისა და ზომის ქვებისაგან შექმნილ ბუდეებში, რომლთა ცენტრების შემაერთებელი სამკუთხედები შეიძლება ნებისმიერად იყოს განლაგებული სანაპირო ფერდობზე. ასეთი პირამიდული სქემები ერთნაირად ვარგისია ქვაყრილის მდგრადობის შესაფასებლად ფერდობზე, როგორც ფრონტალური, ასევე სამგანზომილებიანი ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედებისას.

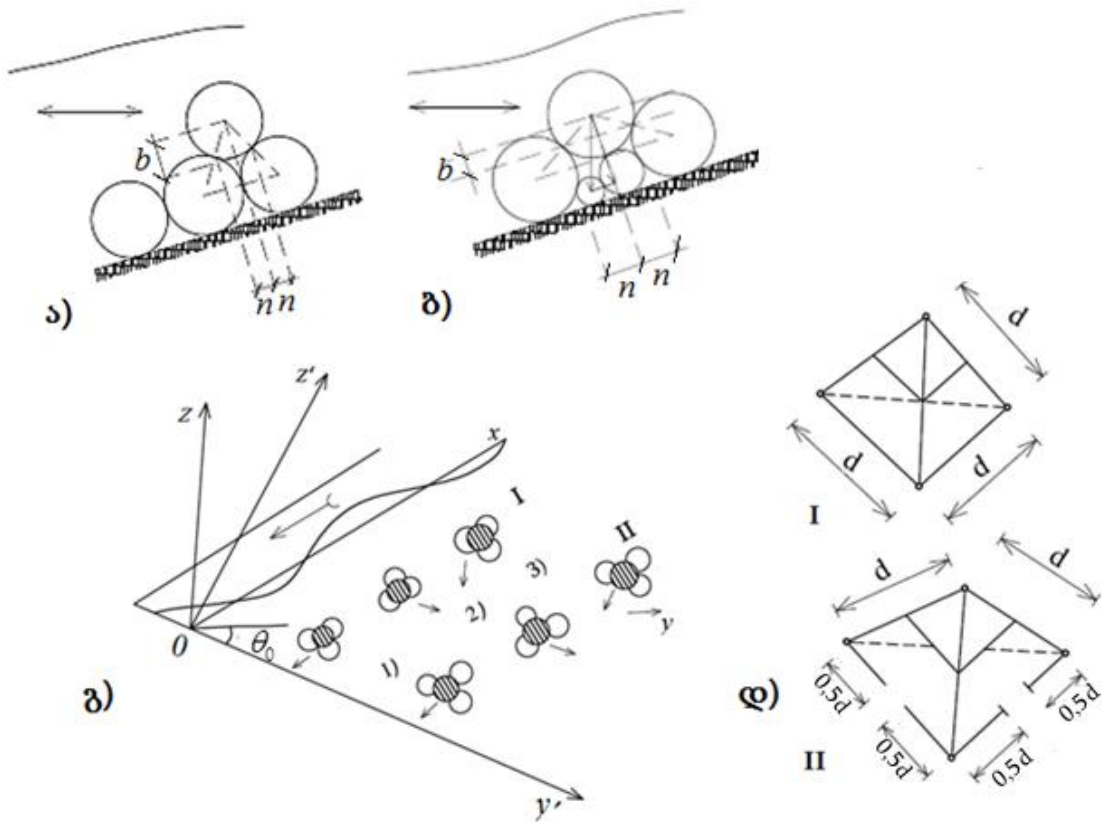
ქვემოთ შემოვიფარგლებით მხოლოდ ფერდობზე საანგარიშო პირამიდის სამკუთხა ფუძის სამი ყველაზე უფრო დამახასიათებელი მდებარეობის განხილვით (ნახ.4.5.)

ეს შემთხვევებია:

1. როცა ფერდობზე ბუდის შემქმნელი ქვები ისეა განლაგებული, რომ საანგარიშო ქვა მოთავსებული პირამიდის წვერზე ყველაზე ადვილად ყირავდება ტალღური ნაკადის, ანუ, ამ შემთხვევაში, ნაპირგასწვრივი მიმართულებით (ნახ.4.,5, გ, პოზიცია 1));

2. როცა საანგარიშო ქვა შეიძლება გადაყირავდეს ნაპირის ხაზის მართობულად, დიდი სიღმეებისკენ (ნახ. 4.5, გ, პოზიცია 2));

3. როცა გადაყირავების შესაძლო მიმართულება 30° -იან მსხვილ კუთხეს ადგენს ნაპირის ხაზთან, ანუ როცა პირამიდის ფუძის ტოლგვერდა სამკუთხედის ერთ-ერთი გვერდი ნაპირის ხაზის პარალელურია, ხოლო ამ გვერდის მოპირდაპირე წვერო ფერდობზე დიდი სიღრმეებისკენაა მიმართული (ნახ. 4.5, გ, პოზიცია 3)).



ნახ. 4.5. სანაპირო ფერდობზე ქვაყრილის მდგრადობის საანგარიშო სქემები

პირველ შემთხვევაში d დიამეტრის საანგარიშო ქვის სიმძიმის ცენტრზე მოდებულ ძალთა მომენტების განტოლება ბრუნვის მყისა ღერძის მიმართ (იგი ნახ. 4.5, დ) -ზე ნაჩვენებია სქელი ხაზით) ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$G' \cos \theta_0 n - 0,5 \tilde{c} \rho \omega |\vec{V}|^2 b = 0, \quad (4.40)$$

სადაც G' აღნიშნავს წყალქვეშ სფეროსებრი ქვის წონას

$$G' = 0,523 \gamma_s' d^3, \quad (4.41)$$

ω საანგარიშო ქვის მიდელის კვეთია Ox ღერძის მართობული მიმართულებით

$$\omega = 0,648 d^2, \quad (4.42)$$

n და b შესაბამისად ქვის სიმძიმისა და Ox ღერძის გასწვრივ მოქმედი შუბლა-გამტაცი ძალების მხრებია მყისა ღერძის მიმართ:

$$n = 0,145 d, \quad b = 0,41 d. \quad (4.43)$$

თუ მივიჩნევთ, რომ საანგარიშო ქვის სიმძიმის ცენტრი წყალში ჩაღრმავებულია H -ის ტოლ სიღრმეზე (4.40)-ში შემავალი სიჩქარის მოდული $|\vec{V}|$ შეგვიძლია ვიანგარიშოთ (4.9) გამოსახულებების საფუძველზე. მაშინ (4.40) განტოლების ამოხსნა d დიამეტრის მიმართ გვაძლევს ერთგვაროვანი ქვაყრილის შემადგენელი ქვების იმ ზღვრულ დიამეტრს, რომელიც უზრუნველყოფს ფერდობზე ქვაყრილის მდგრადობას

ტალღური ნაკადის გავრცელების მიმართულებით. ეს დიამეტრი იანგარიშება ფორმულით

$$d_1 = 1,75 \frac{\tilde{c}\gamma}{g\gamma'_s \cos \theta_0} (U_0 + AG)^2, \quad (4.44)$$

სადაც გათვალისწინებულია, რომ Ox ღერძის მიმართულებით ტალღის მაქსიმალური ზემოქმედება აღინიშნება საანგარიშო ქვის თავზე ტალღის ქიმის გავლისას, ანუ, როცა $\sin(\sigma t - kx) = 1$.

მეორე შემთხვევაში, როცა შესაძლებელია საანგარიშო ქვის ამოვარდნა ბუდიდან და მისი დაგორება ფერდობის სიბრტყეში არხის ფსკერისკენ, ზღვრული წონასწორობის (მომენტების) განტოლება ღებულობს სახეს:

$$G' \cos \theta_0 \cdot n - G' \sin \theta_0 b - 0,5\tilde{c}\rho\omega |\vec{V}| \vec{V}_{\text{გვ.}y'} b = 0. \quad (4.45)$$

თუ (4.45) განტოლებაში ჩავსვამთ ძალებისა და მხრების მნიშვნელობებს და გავითვალისწინებთ, რომ სიჩქარის მდგენელი Oy' ღერძის გასწვრივ

$$\vec{V}_{\text{გვ.}y'} = AG \cos(\sigma t - kx). \quad (4.46)$$

(4.45) განტოლებიდან მივიღებთ ფერდობზე დაგორების მიმართულებით ზღვრულ წონასწორობაში მყოფი ქვის დიამეტრის მნიშვნელობას, რომელიც გამოისახება ფორმულით:

$$d_2 = 0,133 \frac{\tilde{c}\gamma}{g\gamma'_s} \cdot \frac{AC \cos \beta [U_0^2 + 2U_0 AG \sin \beta + A^2 G^2]^{1/2}}{0,076 \cos \theta_0 - 0,214 \sin \theta_0}. \quad (4.47)$$

(4.47) ფორმულით ანგარიშისას მასში უნდა ჩაისვას ფაზის $\beta = (\sigma t - kx)$ -ის ექსტრემალური მნიშვნელობა, რომელიც ნაკადის ნულოვანი სიჩქარის შემთხვევაში ტოლია ნულის (შეესაბამება ტალღის ზურგზე არსებული საკვანძო წირის გავლას საანგარიშო ქვის თავზე), ხოლო როცა $U_0 \neq 0$ იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$\beta_{\text{მსბ.}} \approx \arcsin \left\{ -\frac{U_0^2 + A^2 G^2}{6U_0 AG} \pm \left[\left(\frac{U_0^2 + A^2 G^2}{6U_0 AG} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} \right\}. \quad (4.48)$$

მესამე შემთხვევაში, როცა საანგარიშო ქვის გადაყირავების შესაძლო მიმართულება ადგენს 30° -იან კუთხეს ნაპირის ხაზთან, მომენტების განტოლება ღებულობს სახეს:

$$G' \cos \theta_0 \cdot n - G' \sin \theta_0 \cos 60^\circ - 0,5\tilde{c}\rho\omega |\vec{V}| \vec{V}_{\text{გვ.}x} b = 0, \quad (4.49)$$

სადაც სიჩქარის ვექტორის გეგმილი გადაყირავების მიმართულებაზე იანგარიშება ფორმულით

$$\vec{V}_{\text{გვ.}x} = \frac{\sqrt{3}}{2} [U_0 + AG \sin \beta] + 0,5AG \cos \beta. \quad (4.50)$$

თუ (4.49) განტოლებიდან განვსაზღვრავთ დიამეტრის ზღვრულ მნიშვნელობას, მივიღებთ:

$$d_3 = 0,115 \frac{\tilde{c}\gamma}{g\gamma'_s} \cdot \frac{[U_0 + AG(\sin \beta + 0,585 \cos \beta)]}{0,076 \cos \theta_0 - 0,107 \sin \theta_0} \times [U_0^2 + 2U_0AG \sin \beta + A^2G^2]^{1/2} \quad (4.51)$$

(4.51) გამოსახულების საფუძველზე ფაზის ექსტრემალური მნიშვნელობის ანალიზური განსაზღვრა გრძელ გამოთვლებთანაა დაკავშირებული. ამ შემთხვევაში პრაქტიკისთვის სავსებით დასაშვებია სიზუსტით შეგვიძლია შემოვიფარგლოთ ფაზის იმ ექსტრემალური მნიშვნელობით, რომელიც შეესაბამება არხში ძირითადი ნაკადის ნულოვან სიჩქარეს და, როგორც ეს ადვილი დასადგენია, განისაზღვრება მნიშვნელობით $\beta_{\text{მსბ}} = \pi/3$. მაშინ (4.51) განტოლება დაიყვანება შემდეგ საანგარიშო სახეზე:

$$d_3 = 0,115 \frac{\tilde{c}\gamma}{g\gamma'_s} \cdot \frac{(U_0 + 1,16AG)(U_0^2 + 1,73U_0AG + A^2G^2)^{1/2}}{0,076 \cos \theta_0 - 0,107 \sin \theta_0}. \quad (4.52)$$

ერთგვაროვანი ქვაყრილის მოწყობის შემთხვევაში ზემოთმოყვანილი საანგარიშო ფორმულები იძლევა დიამეტრის ჭარბ მნიშვნელობებს, ვინაიდან მიღებული არიან ქვაყრილის ზედაპირული ქვების ყველაზე უფრო ზღვრული მდგომარეობის განხილვით.

უფრო ხშირად ქვაყრილი შედგება არაერთგვაროვანი ქვებისაგან, რომლებიც შესაძლოა ფერდობზე სრულიად სხვადასხვა ფორმით იქნენ განლაგებულნი. ამ ფორმათაგან ერთ-ერთი დამახასიათებელია საანგარიშო ზედაპირული ქვის ნახევრად ამოშვერილი მდებარეობა ბუდიდან, რომელიც შექმნილია იგივე დიამეტრის სამი ქვისგან (ნახ.4.5.გ, II). ამ შემთხვევაში ქვის შესაძლო გადაყირავების სამივე შერჩეულ მიმართულებზე იცვლება ძალთა მხრები (n , b) და მიდელის კვეთი ω , რომლებიც შესაბამისად ღებულობენ მნიშვნელობებს:

$$n = 0,217d; \quad b = 0,25d; \quad \omega = 0,785d^2. \quad (4.53)$$

უცვლელი რჩება მხოლოდ შუბლა-გამტაცი ძალების მნიშვნელობები.

ამ სიდიდეების გათვალისწინებით არაერთგვაროვანი ქვაყრილის ქვის ზღვრული დიამეტრი ტალღური ნაკადის მიმართულებით იანგარიშება ფორმულით

$$d_1^* = 0,86 \frac{\tilde{c}}{g} \cdot \frac{\gamma(U_0 + AG)^2}{\gamma'_s \cos \theta_0}. \quad (4.54)$$

ფერდობზე ნაპირის ხაზის მართობულად ჩამოგორების მიმართულებით

$$d_2^* = 0,057 \frac{\tilde{c}\gamma}{g\gamma'_s} \cdot \frac{m_0 - 2,82}{m_0 - 1,15} \frac{AG \cos \beta_{\text{მსბ}} [U_0^2 + 2U_0AG \sin \beta_{\text{მსბ}} + A^2G^2]^{1/2}}{0,076 \cos \theta_0 - 0,214 \sin \theta_0}, \quad (4.55)$$

ხოლო ნაპირის ხაზთან 30° -იანი კუთხის მიმართულებით

$$d_3^* = 0,05 \frac{\tilde{c}y}{g\gamma'_s} \cdot \frac{m_0 - 1,41}{m_0 - 0,58} \times \frac{(U_0 + 1,16AG)(U_0^2 + 1,73U_0AGs + A^2G^2)^{1/2}}{0,076 \cos \theta_0 - 0,107 \sin \theta_0}. \quad (4.56)$$

(4.54)-(4.56) გამოსახულებებში m_0 ფერდობის კოეფიციენტია, $m_0 = \cot \theta_0$; ზღვის ნაპირების შემთხვევაში (4.54)-(4.56) ფორმულებში უნდა ჩაისვას $U_0 = 0$; შუბლა წინალობის კოეფიციენტის დასადგენად შეგვიძლია ვისარგებლოთ [129]-ში მოყვანილია რეკომენდაციებით, რომელთა თანახმად $\tilde{c} \approx 1,05$; $\beta_{\text{კლბ}}$ იანგარიშება (4.48) დამოკიდებულებით, ან მიახლოებით, შეგვიძლია მივიჩნიოთ, რომ $\beta_{\text{კლბ}} = \pi/3$.

ამ დამოკიდებულებებით განვსაზღვრავთ რა ქვაყრილის ქვების ზღვრულ დიამეტრებს, მათ შორის საანგარიშოდ უნდა ავირჩიოთ უდიდესი.

ადვილი შესამოწმებელია, რომ ფერდობზე წყლის სიღრმის მატებასთან ერთად მცირდება ზღვრული დიამეტრების მნიშვნელობები (ანუ იზრდება ქვაყრილის მდგრადობა), ამიტომ თავდაპირველად ანგარიში უნდა ჩატარდეს ნაპირის ხაზის გასწვრივ, სადაც წყლის სიღრმე $H = 0$.

როცა ტალღები ვრცელდება დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით საანგარიშო ფორმულებში U_0 -ის ნაცვლად უნდა ჩაისვას $-U_0$, მაგრამ ამ შემთხვევაში იცვლება ფაზის ექსტრემალური მნიშვნელობების ნიშნებიც, ასე რომ საანგარიშო ფორმულები უცვლელი რჩება.

5. ზღვის წყლის ინტრუზია მდინარეთა შესართავებსა და სიღრმით წყალსაგდებ ნაგებობებში

ზღვისა და ჩამონადენი წყლის ურთიერთქმედების პრობლემა მდინარეთა შესართავ უბნებში, სიღრმით წყალსაგდებ ნაგებობებსა თუ ზღვის საკანალიზაციო კოლექტორებში სანაპირო არეების ჰიდროდინამიკის ერთ-ერთ ძირითად პრობლემას წარმოადგენს. ზღვის მარილიანი წყლი (ჰალოსოლი) იჭრება რა მდინარეთა შესართავებში, უდაწნეო თუ დაწნევით წყალსაგდებ ნაგებობებში ვრცელდება საკმაოდ დიდ მანძილზე და, მნიშვნელოვნად ართულებს ზღვისპირა დასახლებების წყალმომარაგებისა და საკანალიზაციო სისტემების ექსპლუატაციას, ხელს უწყობს მდინარეთა კალაპოტებში ნატანის დალექვისა და კუნძულების წარმოქმნის პროცესებს, ამცირებს კოლექტორების გამტარუნარიანობას, ქმნის სანაპირო ტერიტორიების დატბორვის საშიშროებას, განაპირობებს ზღვის წყლის დაბინძურებას, რაც განსაკუთრებით სახიფათოა საქართველოს შავიზღვისპირეთის სარეკრიაციო ზონებისათვის, რადგან აქ, როგორც მდინარეთა შესართავი უბნების, ასევე თვით ზღვის ფსკერის ქანობები ხშირად იმდენად დიდია და იმდენად უახლოვდება ნაპირს ზღვის დიდი – 200 მ-ზე მეტი სიღრმეები, რომ შეუძლებელი ხდება ნორმების მოთხოვნათა შესაბამისად, ნაპირიდან 13 კმ-ის დაშორებით

საკანალიზაციო და სანიაღვრე წყალგამშვები სისტემების გამოსავალი კვეთის მოწყობა. უფრო ახლო მანძილზე, წყალგამშვებების მოწყობა კი აუცილებელად მოითხოვს ეკოლოგიური უსაფრთხოების სათანადო დასაბუთებას, რაც უშუალოდ უკავშირდება სტრატეგიცირებული (სხვადასხვა სიმკვრივის მქონე) ნაკადების ჰიდროდინამიკის ურთულესი პრობლემების გადაჭრას და მათ დაყვანას პრაქტიკულად გამოყენებად მეთოდებზე. ზემოაღნიშნული ფაქტორების გათვალისწინების გარეშე საქართველოში, კერძოდ ფოთსა და ბათუმში, (ისევე, როგორც მსოფლიოს მრავალ ზღვისპირა ქალაქში) დაპროექტებული საკანალიზაციო და სანიაღვრე ნაგებობები, შტორმებისა და ხშირი წვიმების პერიოდში ვეღარ უზრუნველყოფენ ზედაპირული წყლების თავისუფალ ჩადინებას ზღვაში და განაპირობებენ ქალაქის ტერიტორიების კატასტროფულ დატბორვებს.

აქ ჩვენ შემოვიფარგლებით მხოლოდ მდინარეთა შესართავ უბნებში და სიღრმით წყალსაგდებ ნაგებობებში ზღვის მარილიანი წყლის სოლის შეჭრის გაბარიტების დადგენით, რაზეც დამოკიდებულია შესართავ უბნებში ნატანის აკუმულაცია, სასმელი წყლის ხარისხი, საკანალიზაციო და სანიაღვრე წყალსაგდები ნაგებობის გამტარუნარიანობა, მათი უსაფრთხო ექსპლუატაცია და ა.შ.

5.1. ჰალოსოლის გაანგარიშება მდინარეთა შესართავებში, ფსკერის ქანობის მხედველობაში მიღებით

როგორც აღვნიშნეთ, მდინარეთა შესართავ უბნებში, განსაკუთრებით წყალმარჩხოვის პერიოდში, ადგილი აქვს მდინარის ფსკერზე ზღვის მარილიანი წყლის – ჰალოსოლის შეჭრას, რომელიც ხშირად შთამბეჭდავ მანძილებზე ვრცელდება მდინარის აღმა მიმართულებით. მაგალითად, ჰალოსოლის სიგრძე მდ. მისისიპში აღწევს 24 კმ-ს, მდ. ჩრდილოეთ დვინაში 16 კმ-ს, როტერდამის არხში 118 კმ-ს, მდ. დელავარში 120 კმ-ს [5, 22] და ა. შ.

ამჟამად მდინარეთა შესართავ კალაპოტებში, საზღვაო საკანალიზაციო კოლექტორებსა და სანიაღვრე წყალსაგდებებში ჰალოსოლის შეჭრის პროგნოზირებისა და მისი გაბარიტების დადგენის არსებული მეთოდები ძირითადად მოიცავენ ბარის მდინარეებს, რომელთა ფსკერის ქანობები იმდენად მცირეა, რომ დასაშვებია მათი გავლენის უგულველყოფა. მაგრამ, როცა საქმე გვაქვს მთისწინა მდინარეთა შესართავ უბნებთან, ისეთებთან ვთქვათ, როგორცაა საქართველოს შავიზღვისპირეთის მდინარეები, ჰალოსოლის გაბარიტების საანგარიშოდ, არსებული მეთოდების გამოყენება იძლევა რეალურისაგან მნიშვნელოვნად განსხვავებულ შედეგებს.

ჰალოსოლის შეჭრა მდინარეების შესართავში, მდინარის ფაქტობრივად ნულოვანი ხარჯების შემთხვევაშიც კი შემოზღუდულია მდინარის შესართავი ყელიდან იმ მანძილით, რა მანძილზეც ზღვის ჰორიზონტალური ზედაპირის სიბრტყე კვეთს მდინარის ფსკერს. ასეთ შემთხვევაში, კერძოდ საქართველოს შავიზღვისპირა რეგიონისთვის, არსებული მეთოდებით ანგარიში იძლევა მდინარის კალაპოტში ჰალოსოლის შეჭრის სიგრძის გაცილებით უფრო დიდ მნიშვნელობას, ვიდრე ეს ფიზიკურადაა შესაძლებელი გამომდინარე ზღვის დონიდან და ხმალეთის რელიეფიდან.

ჰალოსოლის შეჭრას და მის უკანდახევას მდინარეთა შესართავ უბნებში თან სდევს ტურბულენტური დიფუზიისა და კონვექციური მასათა ცვლის პროცესები მტკნარ და მარილიანი წყლის ფენებს შორის. წყალმცრობის პერიოდის დამყარებასთან ერთად წყდება ჰალოსოლის მოძრაობა მდინარის ფსკერზე, ჰალოსოლი ღებულობს სტაბილურ, სტატიკურად უძრავი გრძელი ტალღის ფორმას, რომელიც ძლიერ წააგავს მყინვარის ტანს, ხოლო მისი სიგრძე არსებული ხარჯისთვის აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას, ამასთან, მინიმუმამდე დადის ტურბულენტური დიფუზია და მდინარის ჭავლსა და ჰალოსოლს შორის წარმოიშობა მკვეთრად გამოხატული გამყოფი (საკონტაქტო) ზედაპირი (ნახ. 5.1).

ჰალოსოლის უძრავი ტანი ფაქტობრივად წარმოადგენს ფსკერზე მდინარის ჰავლით შეჩერებულ ზღვის მარილიანი წყლის გრძელ შინაგან ტალღას. მისი სტატიკური წონასწორობის პირობა აისახება ეილერის განტოლებით, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$\text{grad}\left(z + \frac{P}{\gamma}\right) = 0, \quad (5.1)$$

სადაც z ჰალოსოლის ნებისმიერი წერტილის ვერტიკალური კოორდინატია (ნახ.5.1), P წნევაა ამ წერტილში; γ აღნიშნავს ზღვის წყლის ხვედრით წონას.

თუ წნევას მდინარის ფსკერზე (სადაც $z = z_0$) გამოვსახავთ ზღვის წყლისა და მდინარის ჰავლის სიღრმეების მეშვეობით (5.1) განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\text{grad}\left(z_0 + h + h' \frac{\gamma'}{\gamma}\right) = 0, \quad (5.2)$$

სადაც γ' მდინარის მტკნარი წყლის ხვედრითი წონაა, h და h' შესაბამისად წარმოადგენენ ზღვის (მაღალი სიმკვრივის) და მდინარის მტკნარი წყლის ჰავლის ფენათა სიღრმეებს.

შემდგომში განვიხილავთ ერთგანზომილებიან ბრტყელ ამოცანას. (5.2) განტოლების დაგეგმილებით x საკოორდინატო ღერძზე (ნახ. 5.1) მივიღებთ

$$\frac{dz_0}{dx} + \frac{dh}{dx} + \frac{\gamma'}{\gamma} \frac{dh'}{dx} = 0. \quad (5.3)$$

გამოვსახოთ მტკნარი წყლის სიღრმე შესართავში წყლის მთლიანი სიღრმისა და ჰალოსოლის სიღრმეთა სხვაობით

$$h' = H - h, \quad (5.4)$$

ან, რაც იგივეა - დამოკიდებულებით:

$$h' = z' - z_0 - h, \quad (5.5)$$

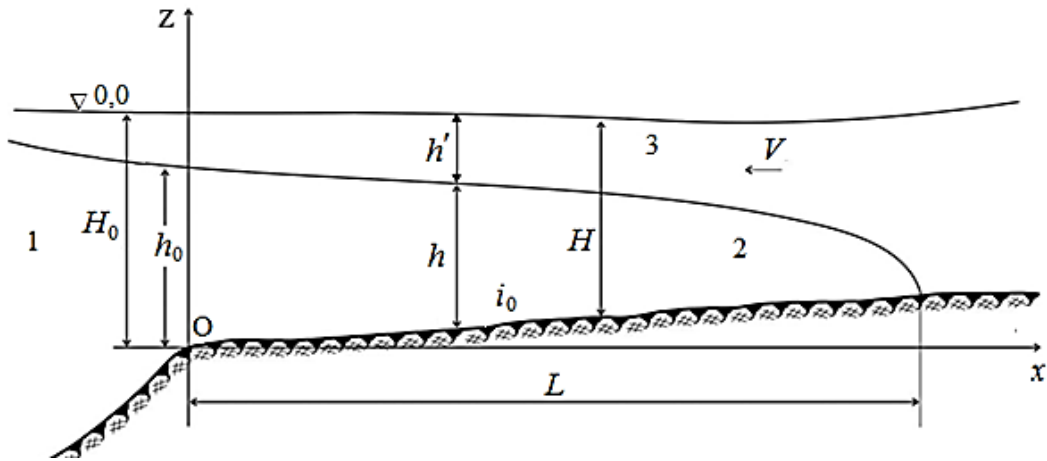
სადაც z' შესართავში მდინარის თავისუფალი ზედაპირის ნიშნულია, ხოლო z_0 - შესართავში ფსკერის ნიშნული. მაშინ (5.5)-ის გათვალისწინებით (5.3) განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma}\right) \frac{dz_0}{dx} + \left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma}\right) \frac{dh}{dx} + \frac{\gamma'}{\gamma} \frac{dz'}{dx} = 0. \quad (5.6)$$

ცხადია, (5.6) განტოლებაში წარმოებული $\frac{dz_0}{dx}$ წარმოადგენს მდინარის ფსკერის i_0

ქანობს (განსახილველ შემთხვევაში მიჩნეულია, რომ $\frac{dz_0}{dx} = i_0 = \text{const}$), ხოლო

წარმოებული $\frac{dz'}{dx}$ არის მდინარის ჰავლის თავისუფალი ზედაპირის ქანობი.



ნახ. 5.1. ჰალოსოლის საანგარიშო სქემა მდინარის შესართავში:
1 – ზღვა; 2 – ჰალოსოლი; 3 – მდინარე;

ბრტყელი ამოცანის პირობებში მდინარის თავისუფალი ზედაპირის ქანობს ჰალოსოლის ტანის თავზე ძირითადად განაპირობებს ხახუნის ძალა მდინარის ჭავლსა და ჰალოსოლის უძრავ ტანს შორის. მის გამოსარიცხად (5.6) განტოლების ზუსტი ამოხსნის მიზნით, საჭიროა მივმართოთ მდინარის ჭავლის მოძრაობის ამსახველ დინამიკის განტოლებას, მაგრამ ასეთი სიზუსტე ზედმეტად ართულებს ამოცანის ამოხსნას იმ დროს, როდესაც ამოხსნა მნიშვნელოვნად მარტივდება თუ მივმართავთ თ. ვონიჩ-სიანოჟენცკისა და ლ. ლოღელიანის კარგად აპრობირებულ დამოკიდებულებას და dz'/dx წარმოებულს შევცვლით გამოსახულებით [89]:

$$\frac{dz'}{dx} = \chi \frac{V'^2}{gh'} = \chi \frac{V'^2}{g(H-h)}, \quad (5.7)$$

სადაც χ წარმოადგენს გამყოფ ზედაპირზე მტკნარ და მარილიან წყლებს შორის აღძრულ ხახუნის კოეფიციენტს; V' – მდინარის ჭავლის საშუალო სიჩქარე; H – წყლის მთლიანი სიღრმე მდინარის კალაპოტში, რომელიც შეიძლება შეიცვალოს მიახლოებითი ტოლობით

$$H = H_0 - i_0 x, \quad (5.8)$$

სადაც, H_0 წყლის მთლიანი სიღრმეა მოცემული მდინარის შესართავი უბნის საწყის კვეთში.

თუ მოცემული გვაქვს მდინარის დაყვანილი ხარჯი q (5.8) გამოსახულების გათვალისწინებით მდინარის ჭავლის საშუალო სიჩქარე იანგარიშება ფორმულით

$$V' = \frac{q}{H_0 - i_0 x - h} \quad (5.9)$$

(5.7) და (5.9) აღნიშვნების გათვალისწინებით (5.6) განტოლება დაიყვანება პირველი რიგის არაწრფივ განტოლებაზე მდინარის ფსკერზე ჰალოსოლის შრის სისქის მიმართ

$$\frac{dh}{dx} + i_0 + \chi \frac{\gamma'}{\gamma - \gamma'} \frac{q^2}{g(H_0 - i_0 x - h)^3} = 0, \quad (5.10)$$

მარტივი გარდაქმნებით (5.10) განტოლების ამოხსნა შესაძლებელია ცვლადების განცალკევების მეთოდით, რის შედეგადაც, თუ გამოვიყენებთ სას

აზღვრო პირობას $h = h_0$, როცა $x = 0$, სადაც h_0 ჰალოსოლის ჯერ-ჯერობით უცნობი სიღრმეა მდინარის შესართავი უბნის კვეთში, მივიღებთ:

$$h = H_0 - i_0 - \left[4\chi \frac{\gamma'}{\gamma - \gamma'} \frac{q^2}{g} x - (H_0 - h_0)^4 \right]^{1/4} \quad (5.11)$$

ცხადია, ჰალოსოლის ბოლო კვეთში, რომელიც დაშორებულია შესართავიდან $x = L$ მანძილით, სრულდება პირობა $h = 0$.

ამ პირობის ჩასმით (5.11) გამოსახულებაში, მარტივი გარდაქმნების შემდეგ მივიღებთ დახრილ ფსკერზე ჰალოსოლის სიგრძის საანგარიშო ძირითად დამოკიდებულებას

$$\left(1 - i_0 \frac{L}{H_0} \right)^4 = 4\chi \frac{1 - \sigma}{\sigma} \frac{L}{H_0} Fr_0 + \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)^4, \quad (5.12)$$

(5.12) დამოკიდებულებაში L ჰალოსოლის სიგრძეა, σ აღნიშნავს გამოსახულებას

$$\sigma = 1 - \frac{\gamma'}{\gamma}, \quad (5.13)$$

ხოლო Fr_0 წარმოადგენს ფრუდის რიცხვს, განსაზღვრულს შესართავის საწყის კვეთში წყლის სრული სიღრმის მეშვეობით:

$$Fr_0 = \frac{q^2}{gH_0^3}. \quad (5.14)$$

იმისათვის, რომ ვისარგებლოთ (5.11) და (5.12) ფორმულებით, საჭიროა ვიცოდეთ ხახუნის კოეფიციენტისა (χ) და ჰალოსოლის საწყისი სიღრმის (h_0) მნიშვნელობები. მათი დადგენა შესაძლებელია ლ. ლოღელიანის ფორმულების მეშვეობით [50, 104], რომლებსაც შესაბამისად აქვთ სახე:

$$\chi = \frac{0,04}{Re^{1/4}} = \frac{0,04}{(q/\nu)^{1/4}}; \quad (5.15)$$

$$\frac{h_0}{H_0} = 1 - 1,01 \left[\frac{q}{H_0 (g\sigma H_0)^{1/2}} \right]^{2/3}, \quad (5.16)$$

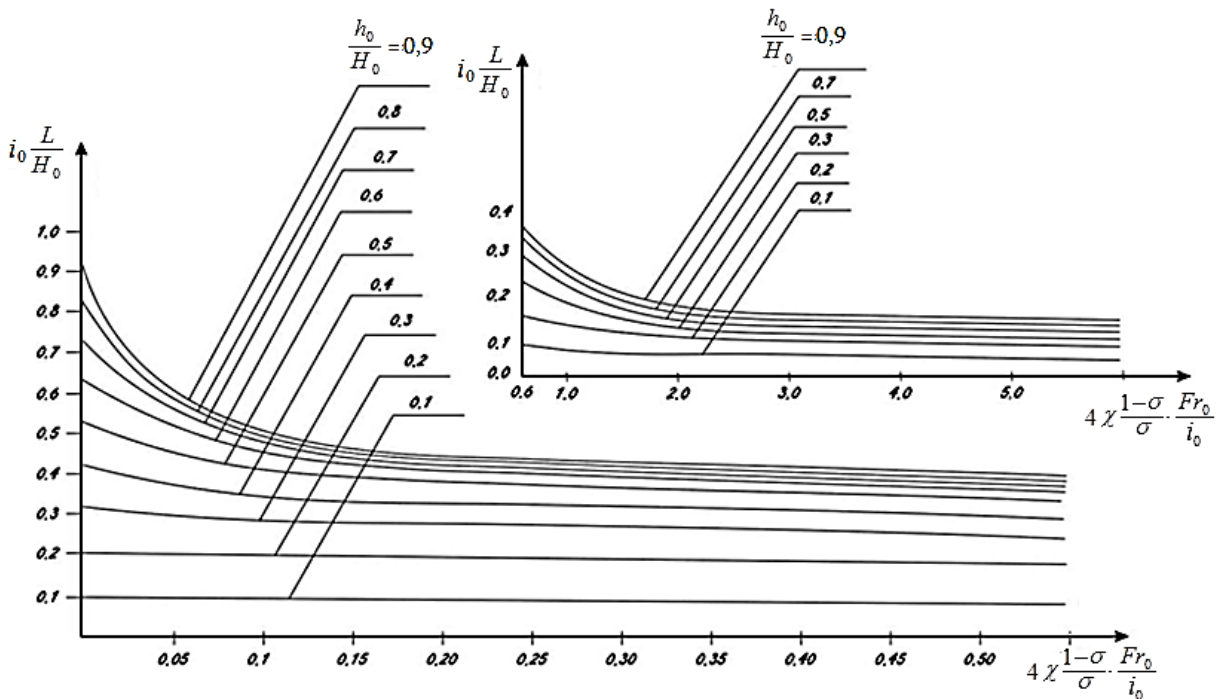
სადაც Re – რეინოლდსის რიცხვია მდინარის ჭავლისათვის; ν – მდინარის წყლის კინემატიკური სიბლანტე, რომელიც დამოკიდებულია ტემპერატურაზე [78].

ზოგი ავტორი (კერძოდ, სტომელი და ფარმერი [63], შიიფი და შრენფელდი [64]), ეყრდნობა რა კელვინ-ლამბისეულ ამოხსნებს [122], სავსებით სამართლიანად მიიჩნევს, რომ სტატიკური ჰალოსოლი წარმოადგენს გრძელ შინაგან გაჩერებულ ტალღას, რის გამოც, გრძელი ტალღის ფაზური სიჩქარის განსაზღვრელი დამოკიდებულების ნულთან გატოლებით საზღვრავს ჰალოსოლის (ქვედა მკვრივი შრის) h_0 სიღრმეს მდინარის შესართავ კვეთში. თ. ვოინიჩ-სიანოჟენცკი და ლ. ლოღელიანი [50, 104] გამოდიან მტკნარი და მარილიანი წყლების გამყოფი ზედაპირის მდგრადობის პირობიდან, რაც იძლევა ფაზური სიჩქარის ნულთან ტოლობის პირობისგან მცირედ განსხვავებულ შედეგს და დაიყვანება (5.16) გამოსახულებაზე. ავტორთა მტკიცებით, (5.16) დამოკიდებულება უკეთ შეესაბამება მოვლენის ფიზიკურ მხარეს და ამიტომ ჩვენც რეკომენდაციას ვუწევთ მას საწყის კვეთში ჰალოსოლის სიღრმის საანგარიშოდ.

ჰალოსოლის შეჭრა მდინარის კალაპოტში საერთოდ არ აღინიშნება, როცა მდინარის შესართავში მტკნარი წყლის ნაკადის სიჩქარე აჭარბებს კრიტიკულ მნიშვნელობას ორფაზა ნაკადებისათვის [104], ანუ სრულდება პირობა

$$V' \geq V_{gr} = 0,959(g\sigma H)^{1/2}. \quad (5.17)$$

(5.12) გამოსახულება წარმოადგენს მეოთხე ხარისხის ალგებრულ განტოლებას მასში შემავალი ჰალოსოლის სიგრძის (L) მიმართ, რომლის ამოხსნა შეიძლება შერჩევის გზით ან გრაფიკულად. ჰალოსოლის სიგრძის საანგარიშო გრაფიკები მოყვანილია ნახ.5.2-ზე.



ნახ.5.2. ჰალოსოლის სიგრძის საანგარიშო მრუდები

როცა ფსკერის ქანობი $i_0 = 0$ (5.12) იხსნება ცხადი სახით (L/H) ფარდობის მიმართ

$$\frac{L}{H} = \frac{1 - (1 - h_0 / H_0)^4}{4 \chi \cdot Fr_0 \frac{1 - \sigma}{\sigma}} \quad (5.18)$$

ამგვარად (5.18) დამოკიდებულება შეიძლება გამოვიყენოთ ბარის მდინარეებისთვისაც ჰალოსოლის შეჭრის სიგრძის საანგარიშოდ.

წყალმცრობის პერიოდში, როცა მდინარის ხარჯი მიისწრაფვის ნულისკენ, ე. ი. როცა $Fr_0 \rightarrow 0$, განსხვავებით სხვა ავტორთა დამოკიდებულებებისგან, (5.12)-ს არ მივყავართ ჰალოსოლის სიგრძის უსასრულო ზრდამდე. მართლაც, როცა $Fr_0 \rightarrow 0$, ანუ $q \rightarrow 0$, (5.16) და (5.12) ფორმულებით ვღებულობთ, რომ ჰალოსოლის სიგრძე $L \rightarrow H_0 / i_0$. ამრიგად, როგორც ეს მოსალოდნელი იყო, ამ შემთხვევაში ზღვის წყლით მთლიანად ივსება მდინარის შესართავი კალაპოტი.

მეორე მხრივ, (5.18)-ის თანახმად, როცა $i_0 = 0$, ხოლო $Fr_0 \neq 0$, ჰალოსოლის სიგრძე, ისევე როგორც სხვა ავტორთა დამოკიდებულებებში, შემოზღუდულია. კერძოდ, კეილეგანის [103] თანახმად ჰალოსოლის სიგრძე ვაკის მდინარეებისათვის

$$\frac{L}{H_0} = 6 \left[\frac{H_0 (g \sigma H_0)^{1/2}}{\nu} \right]^{1/4} \left[\frac{2q}{H_0 (g \sigma H_0)^{1/2}} \right]^{-5/2}; \quad (5.19)$$

ლ. ლელელიანის [104] თანახმად

$$\frac{L}{H_0} = 1,41 \frac{\sigma}{Fr_0} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{h_0}{H_0} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{h_0}{H_0} \right)^3 + \frac{1}{4} \left(\frac{h_0}{H_0} \right)^4 \right]; \quad (5.20)$$

შიიფისა და შონფელდის [63, 64] თანახმად

$$\frac{L}{H_0} = \frac{2}{\chi} \left[\frac{1}{5} \frac{1}{Fr_0^2} - 2 + 3Fr_0^{2/3} - \frac{1}{4} \left(\frac{h_0}{H_0} \right)^4 \right]. \quad (5.21)$$

(5.19), (5.20) და (5.21) გამოსახულებებში, ისევე როგორც სხვა ავტორთა ანალოგიურ ფორმულებში, მდინარის ფსკერის ქანობი საერთოდ არ ფიგურირებს, რის გამოც ისინი, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, იძლევა ჰალოსოლის სიგრძის უფრო დიდ მნიშვნელობებს, ვიდრე ეს ნატურაშია დაფიქსირებული. მაგალითად, მდ. მისისიპის განშტოებაში ჰალოსოლის სიგრძე აღწევს 22 კმ-ს [29] იმ დროს, როცა (5.19), (5.20) და (5.21) ფორმულები შესაბამისად იძლევა 25,3, 20,8 და 24,3 კმ-ს. როტერდამის არხში ჰალოსოლის სიგრძეა 118 კმ, ხოლო (5.19), (5.20) და (5.21) ფორმულებით ვღებულობთ 285, 135 და 116 კმ-ს. მდ. დელავარში ჰალოსოლის დაფიქსირებული სიგრძე აღწევს 120 კმ-ს, ხოლო მოყვანილი ფორმულები შესაბამისად გვაძლევს 658, 140 და 218 კმ-ს.

ეს ვითარება გვარწმუნებს, რომ ფსკერის ქანობი თითქმის ისეთივე როლს თამაშობს ჰალოსოლის სიგრძის ფორმირებაში, როგორც მდინარის სიჩქარე და სხვაობა მტკნარი და მარილიანი წყლის სიმკვრივეებს შორის. ამიტომ მისი გათვალისწინება აუცილებელია ვაკის მდინარეებისთვისაც.

5.2. ზღვის სიღრმითი წყალსაგდები კოლექტორების ჰიდრაულიკური გაანგარიშების მეთოდი

მილსადენში მტკნარი და მარილიანი წყლების გამყოფი ზედაპირი წარმოადგენს ჰორიზონტალურ სიბრტყეს, რომელიც მილსადენიდან მტკნარი წყლით მარილიანი წყლის გამოდევნასთან ერთად დეფორმაციის გარეშე თანდათანობით ეშვება გამოსავალი კვეთისკენ [69]. მიაღწევს რა გამოსავალ კვეთს, მტკნარი წყალი იწყებს გამოდინებას მარილიანი წყლით დაკავებულ სივრცეში და გამყოფი ზედაპირი კარგავს პირველად ჰორიზონტალურ ზედაპირს და მრუდდება. ამას ადასტურებს „თბილწყალგეო“-ში პროფ. თ. ვოინიჩ-სიანოჟენცკის მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტები. ამასთან მტკნარი წყლის ხარჯების გარკვეულ დიაპაზონში, წყალსაგდები მილსადენის განივკვეთისა და მილსადენის დახრილობაზე დამოკიდებულებით, მარილიანი წყალი კვლავ რჩება მილსადენის ფსკერზე, რომლის სიღრმისა და სიგრძის განსაზღვრა მილსადენში ადვილად ხერხდება ნახ. 5.3-ზე მოყვანილი საანგარიშო სქემის საფუძველზე.

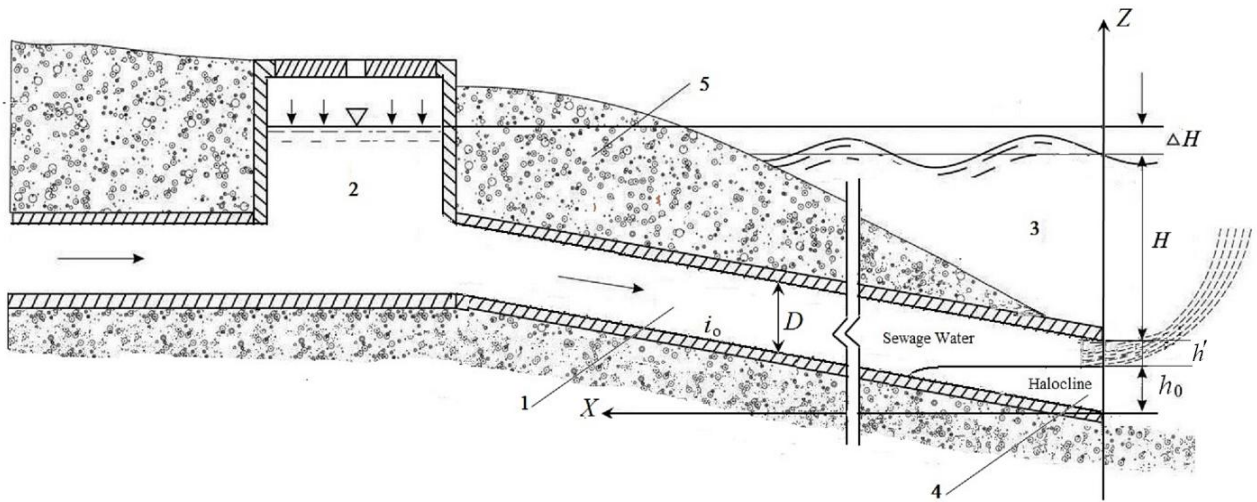
თავდაპირველად მივიჩნით, რომ სიღრმით წყალსაგდებს გააჩნია პრიზმატული კვეთი და განვიხილოთ ბრტყელი ამოცანა. ჰალოსოლი ზღვის სიღრმით წყალსაგდებში შეიძლება განხილულ იქნას, როგორც მტკნარი წყლის დინებით შეჩერებული გრძელი შინაგანი ტალღა, რომლის თავზე მტკნარი წყლის სიჩქარე აღწევს კრიტიკულ მნიშვნელობას, რაც იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით [47, 69]:

$$V_{კრ}^2 = g \frac{\rho - \rho'}{\rho'} h', \quad (5.22)$$

სადაც ρ და ρ' შესაბამისად ზღვისა და მდინარის წყლის სიმკვრივეებია, ხოლო h' მტკნარი წყლის სიღრმე გამოსავალ კვეთში, ჰალოსოლის თავზე (ნახ.5.3).

შავ ზღვაში წყლის სიმკვრივე შესამჩნევად იცვლება როგორც დროში, ისე სივრცეში. გაზაფხულზე და ზაფხულში ზედა ფენებში იგი მცირდება. ზღვის ცენტრალურ რაიონებში წყლის საშუალო სიმკვრივე ზედაპირულ ფენაში უახლოვდება 1,0123-გრ/სმ³, ხოლო მაქსიმალურ სიღრმეებზე აღწევს 1,0173 გრ/სმ³-ს. შავი ზღვის გამტკნარებულ სანაპირო არეებში სიმკვრივე მცირდება, მისი საშუალო მნიშვნელობაა

დაახლოებით 1,0115, ზოგჯერ, ზაფხულობით, მდინარეების შესართავთან ეს მაჩვენებელი მცირდება 1 გრ/სმ³-მდე [30].



ნახ. 5.3. ჰალოსოლის საანგარიშო სქემა ზღვის სიღრმით წყალსაგდებ კოლექტორში
 1 - წყალსაგდები კოლექტორი; 2 - სანიაღვრე - სათვალთვალო ჭა; 3 - ზღვა;
 4 - ჰალოსოლი; 5 - ნაპირი

თუ გამოვსახავთ მტკნარი ჩამონადენი წყლის სიჩქარეს სიღრმითი წყალსაგდების გამოსავალ კვეთში დაყვანილი ხარჯისა და ჩამონადენი წყლის ფენის სიმაღლის (სიღრმის) მეშვეობით მაშინ, გამომდინარე (5.22) ტოლობიდან, შეგვიძლია დავწეროთ

$$\frac{q^2}{(D - h_0)^2} = g \frac{\rho - \rho'}{\rho'} (D - h_0) , \quad (5.23)$$

სადაც, $q = Q/B$ გამოსავალ კვეთში ჩამონადენი წყლის დაყვანილი ხარჯია; Q - სრული საანგარიშო ხარჯი; B - წყალსაგდების სიგანე; h' - მტკნარი წყლის სიღრმე გამოსავალ კვეთში, $h' = D - h_0$; D - წყალსაგდების სიმაღლე; h_0 - მარილიანი წყლის საძიებელი სიღრმე გამოსავალ კვეთში.

(5.23) დამოკიდებულებიდან ზღვის მარილიანი წყლის სიღრმე მილსადენის გამოსავალ კვეთში

$$h_0 = D - \left(\frac{q^2 (1 - \sigma)}{g \sigma} \right)^{1/3} , \quad (5.24)$$

სადაც შემოღებულია აღნიშვნა $\sigma = 1 - \gamma' / \gamma$. γ' და γ ჩამონადენისა და ზღვის წყლების ხვედრითი წონებია, ($\gamma' < \gamma$). (5.3) დამოკიდებულების თანახმად, ზღვის უძრავი წყალი იკავებს სიღრმითი მილსადენის მთელ გამოსავალ კვეთს მაშინ, როცა მდინარის წყლის ხარჯი უდრის ნულს, (ე.ი. $h_0 = D$, როცა $q = 0$). მეორე მხრივ, ზღვის წყალი მთლიანად იდევნება მილსადენიდან, როცა მასში მტკნარი წყლის დაყვანილი ხარჯი გადააჭარბებს კრიტიკულ მნიშვნელობას

$$q_{კრ} = \left(\frac{\sigma}{1-\sigma} g D^3 \right)^{1/2}. \quad (5.25)$$

ეს ნიშნავს, რომ როცა $q > q_{კრ}$, მარილიანი წყლის სიღრმე მილსადენის გამოსავალ კვეთში $h_0 = 0$.

ვთქვათ, სიღრმით წყალსაგდებში ხდება მდინარის კრიტიკულზე ნაკლები ხარჯების მიწოდება. განვსაზღვროთ ამ შემთხვევაში წყალსაგდებში შეჭრილი მარილიანი წყლის სოლის სიგრძე. ამისათვის ვისარგებლოთ ეილერის განტოლებით და ნახ.5.3-ზე მოყვანილ სქემის შესაბამისად მივიჩნიოთ, რომ მილსადენში მარილიანი და მტკნარი წყლის გამყოფი ზედაპირის კოორდინატი

$$z = z''. \quad (5.26)$$

მაშინ, მტკნარი წყლის ნაკადის წნევა ჯერ-ჯერობით უცნობ გამყოფ ზედაპირზე წარმოგვიდგება ჰიდროსტატიკური და ნაკადის სიჩქარით გამოწვეული წნევათა ჯამის სახით

$$p' = \gamma'(H + \Delta H - z'') + \gamma' \frac{q^2}{2g(z'_0 - z'')^2}, \quad (5.27)$$

სადაც H ზღვის სიღრმეა მილსადენის გამოსავალი კვეთის თავზე; ΔH მდინარის წყლის დონეა სათვალთვალო ქაში; z'_0 – წყალსაგდების ქერის წახნაგის კოორდინატი.

(5.26) და (5.27) გამოსახულებების გათვალისწინებით მილსადენში მარილიანი წყლის სოლის სტატიკური წონასწორობის ეილერის განტოლება დებულობს შემდეგ სახეს:

$$\left(1 - \frac{\gamma'}{\gamma} \right) \frac{dz'}{dx} + \frac{\gamma'}{\gamma} \frac{q^2}{2g} \frac{d}{dx} \frac{1}{(z'_0 - z'')^2} = 0. \quad (5.28)$$

შევცვალოთ (5.28) განტოლებაში მარილიანი და მტკნარი წყლების გამყოფი ზედაპირის z'' კოორდინატი ჯამით

$$z'' = z_0 + h, \quad (5.29)$$

სადაც z_0 წყალსაგდების ფსკერის კოორდინატია, ხოლო h – ჰალოსოლის სიღრმე მის ნებისმიერ კვეთში. თუ გავითვალისწინებთ, რომ

$$\frac{dz_0}{dx} = i_0 \quad \text{და} \quad z'_0 - z_0 = D, \quad (5.30)$$

სადაც i_0 წყალსაგდების ფსკერის ქანობია, (5.28) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\sigma \frac{dh}{dx} + \sigma i_0 + (1-\sigma) \frac{(q')^2}{2g} \frac{d}{dx} \frac{1}{(D-h)^2} = 0. \quad (5.31)$$

(5.31) განტოლების ინტეგრირება გვაძლევს

$$\sigma h + (1 - \sigma) \frac{(q')^2}{2g} \frac{1}{(D - h)^2} = -\sigma_0 x + C . \quad (5.32)$$

ინტეგრირების C მუდმივას გამოსარიცხად ვისარგებლოთ სასაზღვრო პირობით $h = h_0$, როცა $x = 0$, სადაც h ჰალოსოლის საწყისი სიღრმეა წყალსაგდების გამოსავალ კვეთში. მარტივი გარდაქმნების შედეგად (5.32) განტოლებიდან მივიღებთ

$$(h_0 - h) + \frac{1 - \sigma}{\sigma} \frac{q^2}{g} \left[\frac{1}{(D - h_0)^2} - \frac{1}{(D - h)^2} \right] = i_0 x . \quad (5.33)$$

ცხადია, რომ წყალსაგდებში, იქ სადაც მარილიანი წყლის სიღრმე $h = 0$ გრძივი x კოორდინატი გამოსახავს ჰალოსოლის მაქსიმალურ შეჭრას, ანუ ჰალოსოლის სიგრძეს, რომელიც (5.31) გამოსახულების საფუძველზე იანგარიშება ფორმულით

$$L = \frac{1}{i_0} \left\{ h_0 + \frac{1 - \sigma}{\sigma} \frac{q^2}{2g} \left[\frac{1}{(D - h_0)^2} - \frac{1}{D^2} \right] \right\} . \quad (5.34)$$

(5.34) -ში h_0 წინასწარ უნდა იქნას დადგენილი (5.24) დამოკიდებულებით.

იმ შემთხვევაში, როცა სიღრმით წყალსაგდებს აქვს წრიული კვეთი, საანგარიშო გამოსახულებები დებულობს შედარებით რთულ სახეს, რომლებიც იძლევა (5.12) და (5.34) დამოკიდებულებებისაგან მხოლოდ უმნიშვნელოდ განსხვავებულ შედეგებს, თუ მათში D -ს მივიჩნევთ მილსადენის დიამეტრად, ხოლო დაყვანილ ხარჯს ვიანგარიშებთ ფორმულით

$$q = \frac{Q}{\omega^{1/2}} = \frac{2Q}{D\pi^{1/2}} = \frac{1,13Q}{D} \quad (5.35)$$

ამგვარად, ამ დაშვების გათვალისწინებით, (5.24) და (5.34) ფორმულებით შეიძლება ვისარგებლოთ აგრეთვე წრიული კვეთის სიღრმით მილსადენში მარილიანი წყლის სოლის საანგარიშოდ.

ვისარგებლოთ მიღებული შედეგებით და განვიხილოთ რიცხვითი მაგალითი:

ვთქვათ, საჭიროა განისაზღვროს ზღვის მარილიანი წყლის სოლის შეჭრის შესაძლებლობა და მისი გაბარიტები წრიული კვეთის საკანალიზაციო კოლექტორში შემდეგი მონაცემების საფუძველზე:

$$D = 0,63 \text{ მ-ს}; \quad \rho' = 1 \text{ ტ/მ}^3; \quad \rho = 1,008 \text{ ტ/მ}^3; \quad i_0 = 0,0125; \quad Q = 0,006 \text{ მ}^3/\text{წმ-ში};$$

წინასწარ ვანგარიშობთ სიდიდეებს

$$\sigma = \frac{\rho - \rho'}{\rho} = 1 - \frac{\gamma'}{\gamma} = 1 - \frac{1}{1,008} = 0,008;$$

$$(5.28) \text{ ფორმულიდან მივიღებთ } q_{კრ} = (9,8 \times 0,008 \times (0,63)^3)^{1/2} = 0,14 \text{ მ}^2/\text{წმ};$$

$$\text{ხოლო (5.38) ფორმულიდან } - q = 1,13 \frac{0,006}{0,63} = 0,0108 \text{ მ}^2/\text{წმ}.$$

ვინაიდან $q < q_{კრ}$, საკანალიზაციო მილსადენში ზღვის მხრიდან მოხდება მარილიანი წყლის შეჭრა. ზღვის წყლის სიღრმე გამოსავალ კვეთში (5.24) ფორმულის თანახმად ტოლია:

$$h_0 = 0,63 - \left(\frac{0,0108^2 \times 0,9921}{9,8 \times 0,0079} \right)^{1/3} = 0,63 - 0,114 = 0,52 \text{ მ},$$

ხოლო მისი შეჭრის სიღრმე საკანალიზაციო მილსადენში, ნაანგარიშები (5.13) ფორმულით შეადგენს

$$L = \frac{1}{0,0125} \left\{ 0,52 + \frac{1}{0,008} \cdot \frac{0,010^2}{2 \cdot 9,8} \left[\frac{1}{(0,63 - 0,52)^2} - \frac{1}{0,63^2} \right] \right\} = 46 \text{ მ-ს}.$$

ეს მანძილი უნდა აითვალოს მილსადენის გამოსავალი კვეთიდან დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით.

როცა ხარჯი $q = 0$, მაშინ $L = 50,4$ მ-ს და ზღვის წყალი მოიცავს კოლექტორის მთელ სიგრძეს ზღვის დონემდე.

ლიტერატურა:

1. ანაკლიის სანაპირო ზოლის რეაბილიტაციისა და ნაპირების ეროზიისაგან პროექტის ტექნიკურ-ეკონომიკური დასაბუთება. შპს „ნაპირდაცვა“, თბილისი 2010. 32 გვ.
2. ანაკლიაში ზღვის სანაპირო ზოლის გაუმჯობესების პროექტი. შემსრ. შპს „DOHWA Engineering“ (კორეა), დამკვეთი: საქართველოს მუნიციპალური განვითარების ფონდი, თბილისი, 2013.
3. ასკურავა ზ., ხატიაშვილი ე. ლაზიკაში პირსის მშენებლობისთვის ზღვის პარამეტრების განსაზღვრა 1%-იანი ალბათობით 8 ბალიანი შტორმის შემთხვევაში, სსიპ „თბილწყალგეოს“ სამეცნიერო ანგარიში. 2012. 22 გვ.
4. ბალაშვილი ზ. უკლება ბ., ანაკლიის ზღვის ნაპირსამაგრი ნაგებობის მშენებლობის პროექტი (ჰიდროლოგიური ნაწილი). სსიპ „თბილწყალგეოს“ სამეცნიერო ანგარიში. 2011.24 გვ.
5. გაგოშიძე შ. წყლის დამყარებული ტალღური მოძრაობის თეორია სანაპირო არეებსა და გრძივი განფენილობის ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებში. დისერტაცია დოქტორის ხარისხის მოსაპოვებლად. თბილისი, 1994. 265 გვ.
6. გაგოშიძე შ. სითხის მოძრაობის მდგრადობის პრობლემა წრიული კვეთის წყალსატარებში სტუ-ს საერთაშორისო სიმპოზიუმი, თბილისი.1997.
7. გაგოშიძე შ., კოდუა მ., რურუა ლ. ქალაქ ფოთის წარეცხილი სანაპირო ზოლის აღდგენის ღონისძიებათა შესახებ, მე-6 საერთ. კონფ. „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენ. თანამედრ. პრობლემები. მოხს. კრ. თბილისი 2016. გვ.11-17.
8. გაგოშიძე შ., ქადარია ი., გოგოლაძე ა., გიორგაძე ც., კოდუა მ. კალაპოტური პროცესების შესახებ მდ. რიონის წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფში. სამეცნ.-ტექნ. ჟურნალი „ჰიდროინჟინერია“ 2012წ, # 1-2(13-14). გვ.64-73.
9. გაგოშიძე შ., მეტრეველი თ., ქადარია ი., დოხნაძე კ., ლაკერბაია გ. კალაპოტური პროცესებისა და ზღვის ფაქტორის გავლენა მდ. რიონის წყალგამყოფი კვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის მდგრადობაზე, სამეცნ-ტექნ. ჟურნალი „ენერჯია“ თბილისი, 2004, # 2(30), გვ.46-51.
10. გაგოშიძე შ., ლოღელიანი ლ., ქადარია ი. ჰიდროსაინჟინრო და გარემოსდაცვითი პრობლემები და მათი გადაჭრის გზები ქალაქ ფოთის შავიზღვისპირა რეგიონში. რუსთაველის ეროვნული ფონდი, საგრანტო პროექტი # 480. 2009-2012 წწ. 149გვ.
11. გაგოშიძე შ., ქადარია ი., ჭილაძე ვ., წყალსატარი არხის ფერდობის მდგრადობისა და დეფორმაციის შეფასება ნაპირგასწვრივი ტალღური დინების გათვალისწინებით, „ენერჯია“, სამეცნ. ტექნ. ჟურნალი, თბილისი, 2002 წ., # 4 (24), გვ. 158-166.
12. გოგოლაძე ა., გაგოშიძე შ., რაზმაძე დ., კოდუა მ. კურორტ ანაკლიასთან ზღვის სანაპირო ზოლის მოწესრიგების ღონისძიებათა შესახებ. მე-3 საერთ. კონფ „გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები. მოხსენებათა კრებული, თბილისი-ბორჯომი, 2013. გვ.49-53.

13. გედენიძე ზ., ამბროლაძე თ. წყლის მეურნეობა, თბილისი, სტუ. 2009. გვ.242.
14. დიაკონიძე რ., ჩახაია გ., წულუკიძე ლ., შავიზღვისპირეთის ეკოლოგიური უსაფრთხოების დაცვა ზღვისმიერი აბარაზიული პროცესებისგან მდინარეთა მყარი ნატანის დარეგულირების გზით. სამეცნ. ტექნ. ჟურნალი „ჰიდროინჟინერია“; 2011. #1-2 (11-12). გვ.12-27.
15. კიკნაძე ა., რუსო გ., ხორავა ს. ზღვის ნაპირდაცვის პრობლემების გადაჭრა აჭარაში. საქართველოს საინჟინრო პრობლემები: მდგომარეობა და პერსპექტივები. საქართველოს საინჟინრო აკადემია თბ. 1998. გვ. 137-147.
16. კოდუა მ. მდინარეთა შესართავ უბნებში წარმოქმნილი ჰიდროსაინჟინრო პრობლემები და მათი გადაჭრის გზები საქართველოს შავიზღვისპირა რეგიონებში. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, სადოქტორო დისერტაცია. სტუ, თბილისი 2016.
17. კოდუა მ. გრძელი ტალღების ტრანსფორმაციის შესახებ მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში. სამეცნ. ტექნ. ჟურნალი „ჰიდროინჟინერია“; #1-2 (21-22). 2016. გვ.12-27.
18. მდ. აჭარისწყალზე შუახევი ჰესის მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტი გარემოზე ზემოქმედების შეფასების ანგარიში, შპს „გამა კონსალტინგი“ 2013 წელი
19. მდინარე რიონზე (ქ. ფოთთან მე-7 კმ) არსებული წყალგამყოფი კვანძის ექსპლუატაციის დროებითი ინსტრუქცია, საქართველოს მეცნიერებათა აკადემია. წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტი. თბილისი, 1997 წ.
20. მდინარე რიონის წყალგამყოფი კვანძის ჰიდრაულიკური გაანგარიშება და კაშხლის ქვედა ბიეფის სარეაბილიტაციო ღონისძიებათა შეფასება. ენერგეტიკისა და ენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტი. თბილისი 2003. 52 გვ.
21. მელაძე თ., საყვარელიძე ვ. და სხვ. ზღვის დონის აწევის გავლენა ქ. ფოთის სანაპირო ზოლის ათვისებაზე. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის მოამბე. თბილისი, 1994. ტ.149. გვ.440-443.
22. წყალგამყოფი კვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის (რისბერმის) რეკონსტრუქცია-რეაბილიტაციის და წყალქვეშა სამუშაოების წარმოების ტექნოლოგია (რეკომენდაციები). საქართველოს მეცნიერებათა აკადემია. წყალთა მეურნეობისა და საინჟინრო ეკოლოგიის ინსტიტუტი. თბილისი. 1978 წ.
23. მუნიციპალური წყლის რესურსების ინტეგრირებული მართვის პროექტი საქართველოში. ძირითადი ანგარიში MUB 97016P1. ARCADIS Euroconsult ფოთი. 2000 წ. 397 გვ.
24. სალინაძე ი., გაგოშიძე შ., ქადარია ი. გარემოსდაცვითი ჰიდროსაინჟინრო პრობლემებისა და მათი გადაჭრის გზების შესახებ ქალაქ ფოთის შავიზღვისპირა რეგიონში. ელექტრონული ჟურნალი Energyonline №1(6), 2012. <http://www.energyonline.ge>.

25. ქადარია ი. გაგოშიძე შ., სალინაძე ი., სანაპირო არეების ჰიდროდინამიკა და მისი საინჟინრო ასპექტები საქართველოს შავიზღვისპირა რეგიონებისათვის რუსთაველის ეროვნული ფონდი, საგრანტო პროექტი 10-15. 2012-14 წ.წ. 112 გვ.
26. ქადარია ი. ზღვასთან მიმდებარე ჰიდროტექნიკური ნაგებობების გაანგარიშების მეთოდები, სადოქტორო დისერტაცია, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. 2005. 140 გვ.
27. ქადარია ი., მარილიანი წყლის ინტრუზია ზღვის სიღრმით წყალსაგდებ ნაგებობებში, „ენერჯია“, სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი, თბილისი, # 4(24), 2002 წ., გვ. 183-185.
28. ქალაქ ფოთში ახალი ღრმაწყლიანი ნავსადგურის მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტი. გარემოზე ზემოქმედების შეფასების ანგარიში, არატექნიკური რეზიუმე, 2015წ. 34 გვ. <http://moe.gov.ge/files>.
29. ლოღელიანი ლ., გაგოშიძე შ., გ. ჭილაძე; ჰალოსოლი. მონოგრაფია, ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 2006. 77 გვ.
30. ლოღელიანი ლ., გაგოშიძე შ., ქადარია ი., ზღვის წყლის ინტრუზია მდინარეთა შესართავებში და სიღრმით წყალსაგდებ ნაგებობებში, „მრომები“, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საიუბილეო გამოცემა, თბილისი, # 7(446), 2002 წ., გვ. 168-171.
31. ჭოროხის ჰესების კასკადის 110 და 35 კვ ეგზ-ების მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტი გამა კონსალტინგი. <http://moe.gov.ge/files>.
32. ხელვაჩაური 1 და ხელვაჩაური 2 ჰესების მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტი. ჰესების მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტებში შეტანილი ცვლილებების გარემოზე ზემოქმედების შეფასების ანგარიში. შპს „გამა კონსალტინგი“. 2013 (ხელმისაწვდომია). 214 გვ. <http://moe.gov.ge/index.php>.
33. ჯაოშვილი შ. რუსო გ. ინერტული მასალების მოპოვების გავლენის შესწავლა მდინარე ჭოროხის კალაპოტის და შესართავის თანამედროვე მდგომარეობაზე. სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაო, ზღვებისა და მდინარეების სანაპიროთა მორფოდინამიკის სკი „სანდი“. 1996. 42 გვ.
34. Adams L.K., Buchwold V.T. The generation of continental shelf waves. J. Fluid Mech., 1969., 35, No.5, p. 815-826.
35. Berkhof J.C.W. Mathematica models for simple harmonic liner water waves. Wave diffraction and refraction. Delft University of technology. Publ. N 163, 1976, p. 108.
36. Bretshneider C.U. Selection of design wave for offshore structures. J. of the Waterways and harbours Division, W,2, 1958.
37. BÜLOW FR. V. Die Leistungsfähigkeit von Flug BachWerkgraben, Kanal und Rohrquerschnitten. Gesundheits Ingenier, 1927. v. 50. h.262.
38. Gagoshidze SH.N. Calculation of three-dimensional regular waves over the slope bed having arbitrary steepness. In XXIV Congr. IAHR, v.B. Madrid, 1991, p. 143-150.
39. Gagoshidze Sh., Kadaria J., Long wave on variable stationary flow, Proceedings of Long Waves Symposium, in parallel with the XXX IAHR Congres, Thessaloniki, Greece, August 25-27, 2003. p. 223-228.

40. Gagoshidze Sh., Gogoladze A., Kodua M., on the action of longitudinal waves on bank slopes of the soil channels, Scientific-Technical Journal HydroEngineering. # 1-2 (15-16). 2013.p.57-61.
41. Gagoshidze SH.N. Calculation of three-dimensional regular waves over the slope bed having arbitrary steepness. In XXIV Congr. IAHR, v.B. Madrid, 1991, p. 143-150.
42. Gagoshidze Sh., To the Theory of a Hydraulic Jump, RollingWaves and Transformation of Long Waves on Flows of Variable Depth EGU General Assembly 2013. Geophysical Research Abstracts. Vol. 15, EGU2013,7-12 April 2013 Vienna, Austria
43. Gagoshidze sh., Kodua M. Hydraulic calculation method for sea bottom spillway sewers. Energyonline №2(8), 2014. 8 p.
44. Gagoshidze Sh., Kodua M. Applied Analytical Methods for Solving Some Problems of Wave Propagation in the Coastal Areas. European Geosciences Union General Assembly EGU 2016, Vienna, Austria 17-22 April, 2016.
<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-1677-2.pdf>
45. Dean W.R. On the refrction of surface waves by a submerged plane barrier. Cambridge Phil. soc., vol. 41, 1945, p. 231-238.
46. Dressler R.F. Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels. Comm. Pume Appl. Math., 1949, N2, p. 149-194.
47. Estuary And Coastline Hydrodynamics. eEd. by A. T. Ippen. McGraw-Hill Book Co New York, 1966., p. 744.
48. Gourret M. Sur certains mouvements periodiquer de la met au voisinage d'une paroi oblique on courble. Annales des pouts et Cheusueur, vol. 107, N3, 1937, p. 319-359.
49. Harleman D., Moopes J., The prediction of salinity intrusionchanges in partially mixed estuaries. Proc. X Congress IAHR, London, 1963.
50. Horikawa K. Nearshore dynamics and coastal processes. Tokyo: Univ. press. 1988, pp.522.
51. Irirarren R., Cavaniles and Casto Nogales Y Olando. Generalization of the formula for calculation of Rockfill Dikes and verification of its coefficients. Bull., Beach Erosion Board, vol. 5, 1952
52. Isaaks I.D. Discussion of Refraction in surface waves by currents. Trans. Am. Geophys. Un., 1948, v. 29, N25, p. 739-742.
53. Isaacson M. de St. Q. Solitary wave diffraction around large cylinder. J. Mater Waves Port Coast. Ocean, Div., ASCE, 1983, v. 109, n1, p. 121-127.
54. Iwata K., Sawagart T. Wave deformation in the surf zone Eng, Nagoya Univ., 1982, v.34, N2, p. 239-284.
55. Jaoshvili Sh. The rivers of the Black Sea. European Environment Agency. Technical report, No 71, 2003, p. 58.
56. Jonson I.W. The retract of surface waves by currents. Trans. Amer. Geophys. Union, 1947, vol. 28, N 6, 1.
57. Kondo H. Reflection and transmission of shallow water waves at the previous coastal structures on solid step. In: Congress IAHR, v.7, Moscow, 1988, p. 236-239.

58. Longuet-Higgins M.S., Steward R.W. The Changes in Amplitude of Short Gravity Waves on Steady Non Uniform Currents *J.Fluid Mechanic* №10, 1961, pp. 56 – 73.
59. Mich M. Mouvements Underlatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. *Annales des ponts et Cheusseer*, vol. 114, N3, 1944, pp. 270-292, N4, pp 369-406.
60. O'brien M.P. A summary of the theoric of oscillatory waves. Beach Erosion Board Techn. Rep., 1944, No.2.
61. Perroli G. Linfbucua Della forma del foundo sui moti ondosi u “alti e ress techn.soc.ing.e archit” Torino, 23, 1969, NIO, p. 244-247.
62. Saghinadze I., Pkhakadze M., Kodua M. Gagoshidze Sh. Hydro-engineering and environmental problems in Poti Black Sea region and ways of their solution European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria 17-22 April 2016.
<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-1745-2.pdf>
63. Schijf J.B., Schomfeld J.C. Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water, Proo. Minnesota Intern. Hydraulics Conven. Minn., 1953, p.321.
64. Schonfeld J.C. Distortion of long waves equilibrium and stability. *Union Geodes. et Geoph. Intern.* 1951, vol. 4.
65. Stoker J.J., *Water Waves*. Sec. 5.3. Three-dimensional waves against a vertical cliff. 1957.
66. Taylor G. the action of a surface current used as breakwater. *Proc. Roy.Soc.* 1955, n.1187, p.231.
67. Togonidze N.V., Gagoshidze SH.N. One-dimensional hydrodynamic model of propagation of long baric and surface waves in extended aquatoria in the presence of a current. In XY Congress IAHR, Turkey, Istanbul, vol.5, 1973
68. Unna P.I. *Waves and Tidal Streams Nature*, V . 149, 1942 pp. 124-143
69. Voinich-Sianojentsky. T.G. Hydtodynamics of river estuaries of nontidal seas, *Gidrometeoizdat*, Leningrad, 1972.
70. Wang H. Non-stationary wave spectral transformation. In:XX Congress IAHR, Moscow, 1983, vol. 7, p.91-94.
71. Watanabe. A., Y. Riho, and K. Horikawa, 1980: Beach profile and on-offshore sediment transport. *Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE*, pp. 529-548
72. Агроскин И.И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И., *Гидравлика*, Изд. «Энергия». Л. 1964, 352 с.
73. Алтунин В. С. Мелиоративные каналы в землянных руслах. М.:1979, 255 с.
74. Акопян Ю.Р., Оганесян Л.А. Вариационно-разностный метод решения двумерный линейных параболических уравнений. *Журн. вычис. математики и мат. физики.* 1977, Т.1. с.109-119.
75. Башкиров Г. С. Динамика прибойной зоны моря. М.: морской транспорт, 1961, 219 с.
76. Бигелоу Г., Эдмондсон Р. В. Теория мелкой воды. *Океанографические задачи и численные методы*. Л.: Гидрометеоиздат 1977. 207 с.

77. Богаевский Р. Н., Повзнер А. Я. Алгебраические методы в нелинейной теории возмущений. М.: Наука, 1987, 255 с.
78. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика. М.: Стройиздат, 1972, 648 с
79. Брегвадзе А.В. Монография “Численное моделирование динамики морских течений”. Потти-1996, 64с.
80. Бретшнайдер К.Л. Рефракция. Дифракция и отражение волн. В кн.: Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. Л.: Гидрометеиздат, 1970. с. 92-113
81. Бровиков И. С. Изменение элементов волн при их выходе на мелководье. Тр. ГОИН, вып. 50. М., 1960, с. 27-32
82. Бронштейн И.М., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука , Лейпциг: Тойбнер, 1981, 720 с.
83. Вайсфельд И.А. Влияние течения на параметры волн. Тр.ВНИИ ВОДГЕО, вып. 6. 1967.
84. Ватсон Г.Н. Беселевые функции. М.: ИЛ 1949. 276 с.
85. Вигель Р. Экспериментальное исследование поверхностных волн на мелководье. В сб. “Основы предсказания ветровых волн, зыби и прибоа”, М.: ИЛ., 1952
86. Вольцингер Н. Е., Клеваниный К. А., Пелиновский Е. Н., Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Гидрометеиздат, Л. 1989, 271 с.
87. Вольцингер Н.Е. Длинные волны на мелкой воде. Л., Гидрометеиздат, 1985, 160 с
88. Войнич-Сяноженцкий Т.Г. Проблема устойчивости течения потока реальной жидкости в каналах конечной глубины. Тбилиси: Изв. ТНИСГЭИ, т. 16. Изд. “Энергия”, 1965, с 18-38.
89. Войнич-Сяноженцкий Т.Г. Гидродинамика устьевых участков рек и взморий бес приливных морей. Тр.ЗакНИГМИ, вып. 46(52), Гидрометеиздат, Л., 1972, 204 с.
90. Войнич-Сяноженцкий Т.Г., Кереселидзе Н.Б., Итонишвили Ю.В., Сакварелидзе В.В., Хатиашвили Э.Б. Определение трансформированных на наклонном дне поверхностных волн. Сообщения АН Грузинской ССР. 1973, т. 93 №1, с. 113-116.
91. Воойнич-Сяноженцкий Т.Г., Тогоидзе Н.В., Трагсформация поверхностных волн на течения в условиях изменения глубин. Тр. ЗакНИГМИ, вып. 32(38), Гидрометеиздат, Л., 1969, с. 132-149.
92. Гагошидзе Ш.Н. К описанию картины волнения у берегового склона океана. Изв. АН СССР, “Физика атмосферы и океана”, т. 26, №10. 1990. с. 1103-1110.
93. Гагошидзе Ш.Н. К исследованию распространения поверхностных волн жидкости над наклонным дном. Совещание по цунами, ИПФ АН СССР, Горкий, 1984, с. 28-30.
94. Гагошидзе Ш.Н. Влияние ширины горных водохранилищ на параметры поверхностных волн. Сб. Научно технический прогресс в гидротехническом строительстве. Информэнерго, М., 1988, с. 35-36.
95. Гагошидзе Ш.Н. Прямой метод решения задачи о регулярных волнах над наклонным дном. Океанология, ж. АН СССР т. XXIX, М., 1989, с. 64-65.

96. Гагошидзе Ш.Н. К исследованию распространения волн в суживающихся акваториях. Сб. Колебания и волны в механике сплошной среды. Горький, 1989, с. 14-22.
97. Гагошидзе Ш.Н., Хатиашвили Э.Б. Трансформация поверхностных волн на крутых подводных склонах. Тр. ЗакНИГМИ, вып. 62(68) Л., Гидрометеиздат, 1975, с. 3-17.
98. Гагошидзе Ш. Н., Кадария Ю. Р., Длинные волны на потоках переменной глубины, Известия Академии Инженерных Наук им. А. М. Прохорова, Научно-Технический Журнал «Прикладная Математика и Механика», том 4, Москва, 2003. с. 181-187.
99. Гагошидзе Ш., К оценке воздействия вдольбереговых волн на береговые откосы открытых морских и речных каналов, Н.Т. журнал Росс.А.Н. «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», Санкт-Петербург, №4 , 2010. с . 102-113.
100. Гагошидзе Ш., Кодуа М. Трансформация длинных волн в при устье во взморье, сборник научных трудов Государственного инженерного университета Армении "ВЕСТНИК" №1(17), 2014. с . 44-50.
101. Гагошидзе Ш., Наниташвили М.К исследованию волнового движения в безнапорных тунелях круглого сечения Материялы Всесофзной конф. молодых учен. специалистов, Кобулети, 1989.
102. Гидравлические исследования прибрежной полосы моря и устья р. Ингури. Отчет ГрузНИИЭГС, Тбилиси, 1988.
103. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев; перевод с английского; 1970г. Гидромедиздат. стр. 393.
104. Гогелиани Л. Д. Вопросы гидравлики галоклина в устьях рек бесприливных морей. Тр. ЗакНИГМИ, вып 31(37), Л.: Гидрометеиздат 1973, с. 129-160.
105. Гогелиани Л. Гидравлика Разноплотностных Потоков в Гидротехнике , монография , изд. Грузинский технический университет. Тбилиси 2005.187 стр.
106. Дин Р.Г., Харлеман Д.Р. Взаимодействие между волнами и береговыми сооружениями. В кн.: Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. Л.: Гидрометеиздат, 1970, с. 167-228.
107. Джунковский Н. М., Каспарсон А.А. и др. Порты и портовые сооружения. Ч. II. М.:Госстройиздат, 1967, 447 с.
108. Дорфман А.А. О неустновившихся волновых движениях жидкости над наклонным дном. Изв. АН СССР МЖГ, 1984, №6 с. 63-70.
109. Еврейнов В. Н. Гидравлика. Изд. Водный транспорт, М., Л. 1939, 632 с.
110. Защита от размыва русел нижних бьефов водосбросов (рекомендации по проектированию). -М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1974.
111. Иппен А.Т., Харлеман Д.Р. Динамика приливов в эстуариях. В кн. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. Ил Л., 1970, с. 229-272.
112. Канторович Л.В. Один прямой метод приближенного решения задачи о минимуме двойного интеграла. ИЗВ. АН СССР, ОМЭН, №5, 1933, с. 647-652.

113. Канторович Л.В., Крылов В.Н. Приближенные методы высшего анализа. Физматгиз, 1962, 708 с.
114. Картвелишвили Н.А. Неустановившиеся открытые потоки. Л.: Гидрометеоздат, 1968, 126 с.
115. Кереселидзе Н.Б., Масс Е.И., Кантаржи И.Г., Метревели Т.И. Применение информационно-вычислительных комплексов и ЭВМ в гидравлических исследованиях. Тбилиси, Мецниереба, 1986, 231 с
116. Киселев, П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1972.–312 с.
117. Комахидзе, Д. Выдающийся градостроитель Д. Д. Свищевский : [Листая страницы истории Аджарии...] / Д. Комахидзе // Советская Аджария. - Батуми, 1974. - 25 июня [MFN: 613077] UDC: 71(470)(092)
118. Кочин Н.Е. Собрание сочинений, т 2. М.: Гостехиздат, 1949
119. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, Т.1. М.: физматгиз, 1963, 727 с.
120. Крылов Ю.М. К теории рефракции морских волн. Тр. ГОИН. вып. 16, М., 1950, с. 95-103.
121. Крылов Ю.М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л.: Гидрометеоздат, 1966, 255 с.
122. Ламб Г. Гидродинамика. *Гостехиздат, М., 1947. 928 с.*
123. Ле Меоте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. Л.: Гидрометеоздат, 1953, 788 с.
124. Лаппо Д.Д. Силовое воздействие гравитационных волн при обтекании гидротехнических сооружений. М.: Изд. АН СССР, 1962, 116 с.
125. Лонге-хиггинс М.С. Механика прибрежной зоны. Механика, 1974, I, 143, с. 84-103
126. Лятхер В.М., Мишуев А.В., Милитеев А.Н., Сладкевич М.С. Численные методы расчета наката длинных волн на берег. В кн. процессы возбуждения и распространения цунами. М.: ИОАН, 1982, с. 103-108
127. Мамрадзе Г.П., Музаев И.Д. Определение колебания воды в водохранилище при опознях с учетом изменения очертания водохранилища в плане. Сообщения АН ГССР, т. 69, №3, 1973, с. 653-656.
128. Марчук Г.И., Численное решение задач динамики атмосферы и океана на основе метода расщепления. Новосибирск: Наука, 1972, 170с.
129. Месхели К.П. Экспериментальное исследование сопротивления тел при их колебательном движении в жидкости. Тр. ГрузНИИЭГС, Энергия, М., 1984, с. 48-53 .
130. Метьюз Дж., Уокер Р. Математические методы физики. М.: Атомиздат, 1972, 400 с.
131. Мирцхулава Ц.Е. размыв русел и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967, 179 с.

132. Мишуев А.В., Сладкевич М.С., Исследование параметров прерывной волны в зонах резкого изменения ширины канала. Тез. тсообщ. Всесоюзного симпоз. "Численные методы в гидравлике". Л.: 1980, с. 38-41.
133. Музаев И.Д. Волновое движение воды в бьефах горных гидроузлов. Диссертация доктора техн. наук. Тбилиси, 1987, 317 с.
134. Музаев И.Д. Задачи о волновом движении воды в водохранилищах в приложении к гидротехническому строительству в горных и предгорных условиях. В сб.: Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. М.: Наука, 1985, с. 22-25.
135. Музаев И.Д., Гвелесиани Т.Л., К исследованию волн возникающих в водохранилище при обвальных явлениях с учетом изменения ширины каньона. Тезисы докл. молодых ученых и специалистов. Тбилиси. Мецниереба, 1975, с. 17-19.
136. Михлин, С.Г. Метод Граничных интегральных уравнений. Механика, новое в зарубежной науке. №15, М.: Мир, 1978, 209.
137. Моделирование динамики отложений влекомых и взвешенных наносов в левой потоке дельты р. Риони и прилегающем участке моря с учетом разработки отложений методом гидромеханизации. Отчет по теме № 70 ГрузНИИЭГС, 1975, 220с.
138. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновых и от судов). СНиП 2.06.04.82. М.: Стройиздат, 1983.
139. Некрасов А.В., Пелиновский Е.Н. (Редакторы) Практикум по динамике океана СП, Гидрометеоздат, 1992, 320 с.
140. Никифоров А.Ф., Сидорчук В.М., Уваров В.В. Основы теории специальных функции. М.: Наука, 1974, 304 с.
141. Никифоров А.Ф., Уваров В.В. Специальные функции математической физики. М.: Наука, 1984, 344 с.
142. Оганесян Л.А., Ривкинд В.Я., Руховец Л.А. Вариационно-разностные методы решения эллиптических уравнений. С. 818. Дифференциальные уравнения и их применение. Вильнюс, 1973, вып, 5, с.394.
143. Островский Л.А., Пелиновский Е.Н. Трансформация волн на поверхности жидкости переменной глубины. Изв. АН СССР ФАО, 6, №9, 1970, с. 934-939.
144. Пелиновский Е.Н. Нелинейная динамика волн цунами. ИПФ АН СССР, Горький, 1982, 226 с.
145. Практикум по динамике океана. Под редакцией Пелиновского Е. Н., Гидрометеоздат, С-П. 1992, 318 с.
146. Праудмен Д.Ж. Динамическая океанография. М.: ИЛ, 1957, 610 с.
147. Пышкин Б.А. Вопро10, 16, сы динамики берегов водохранилищ. Изд. АН УССР, Киев, 1963, 332 с.
148. Проект развития порта Поты в Грузии. Группа "SAPROF" фонда зарубежного экономического сотрудничества Японии (OECEP). 1999, 358с.

149. Руководство по определению нагрузок и воздействию на гидротехнические сооружения волновых, ледовых и от судов. 11 58-76 Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1977, 316 с.
150. Руководство по расчету морского волнения и ветра над морем. М.: Гидрометеиздат, 1960.
151. Румянцев Б.М. К теории волн Коши-Пуассона у наклонного берега. Докл. АН СССР, т.135, №2, 1960, с. 287-289.
152. Руруа Г. Исследования мероприятия по регулированию устьевое участка. Г.П.И. 1985 г. удк.627.
153. Сагинадзе И.С. Эжекторное устройство для поднятия донных наносов. Georgian Engineering News, №1, 2000, с.68-70.
154. Сагинадзе И.С. Математическая модель волновых движений в прибойной зоне Черного моря Потийского региона. Georgian Engineering News, №1, 2002.
155. Сагинадзе И.С., Брегвадзе А.В. Математическая модель транспорта наносов в прибрежной зоне Черного моря в районе Поти(Модель и алгоритм). Проблемы прикладной механики. Международный научный журнал. Тбилиси, №1(16), 2002, с.77-80.
156. Сагинадзе И., Кадария Ю., Кодуа М. Анализ основных данных ветровых и волновых режимов Потийского побережья Черного моря. сборник трудов V межд. н-техн. конф. „современные проблемы водного хозяйства, охраны окружающей среды, архитектуры и строительства“ 16-19 Июля, 2015.с. 244-248.
157. Сакварелидзе В.В. Определение профиля динамического равновесия галечных пляжей. Гидротехническое строительство №7, 1975, с. 22-23.
158. Сакварелидзе В. В., Провести исследования и разработать инженерные мероприятия для защиты участков пляжевой полосы побережья ГССР, отчет Груз. НИИЭГС для Госстроя ГССР, Тбилиси, 1980, 107 с .
159. Смирнов Г.Н. Океанология. М.: Высшая школа, 1987, 408 с.
160. СНИП 92-60, Госстрой СССР. Технические условия определения волновых воздействия на морские, речные сооружения и берега. М.: Госстройиздат, 1960.
161. СНИП 92-60, Госстрой СССР. Технические условия определения волновых воздействия на морские, речные сооружения и берега. М.: Госстройиздат, 1960.
162. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: НКТП СССР, 1936, 303 с.
163. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977, 815 с.
164. Стокер Дж. Волны на воде. М.:ИЛ, 1959, 618 с.
165. Теория поверхностных волн. Сб. переводов, М.: ИЛ, 1959, 538 с.
166. Технический проект регулирующего сооружения на р. Риони с мостовым переходом. Том II , Книга 2 М.: Гипроводхоз. 1951 г.
167. Технология производства работ по использованию дельты – эстуария р. Риони для размыва больших массивов Колхидской низменности. Отчет по теме №736/74. ГПИ. Тбилиси. 1976 г. 262 с.

168. Триккер Р. Бор прибой волнение и корабельные волны. Гидрометеиздат. Л. 1969. 286 с.
169. Труды координационных совещаний по гидротехнике. Волны и их воздействие на сооружения, вып. 50, М.: Энергия, 1969
170. Федорук М.В. Асимптотические методы для линейных обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1983, 352 с.
171. Филлипс О. Динамика верхнего слоя океана. М.: Мир, 1969, 267 с.
172. Чанишвили А. Г. Безнапорное равномерное движение жидкостей в трубопроводах. Изв. ТНИГЭИ, №1, Тбилиси, 1947, с. 69-85.
173. Чертоусов М.Д. Гидравлика. Специальный курс. М. Л.: Госэнергоиздат, 1962.
174. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Госэнергоиздат, 1982, 672 с.
175. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. М.: Высшая школа. 1973.
176. Шайтан В.С. Исследование устойчивости камня в неоднородной наброске при действии волн. Тр. гидр. лаборатории ВНИИ ВОДГЕО, сб. XII, М.: ГСИ, 1965.
177. Шоу Р.П. Применение метода граничных интегральных уравнений к теории волн на поверхности воды. Механика, новой в зарубежной науке №15. М.: Мир. 1978, с. 18-30.
178. Шулейкин В.В. Рефракция волн на материковой отмели. Изв. АН СССР, №10, 1935, с. 1355-1370.
179. Янке Е., Емде Ф., Леш Ф. Специальные функции, формулы, графики, таблицы. Перевод с немецкого. М.: Наука, 1968, 344 с.
180. http://ponce.sdsu.edu/chow_froude_and_vedernikov.html.
181. <http://blacksea-education.ru/2-2.shtml>.
182. <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulics>.
183. http://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_flow.
184. <http://netgazeti.ge/business/25652/>.