

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მანონი კოდუა

**მდინარეთა შესართავ უბნებში წარმოქმნილი  
ჰიდროსაინჟინრო პრობლემები და მათი  
გადაჭრის გზები საქართველოს  
შავიზღვისპირა რეგიონებში**

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
სადოქტორო პროგრამა -ჰიდროინჟინერია, შიფრი 0406

2016 წლის 29 ივნისი

თბილისი 0171 საქართველო

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით მანონ კოდუას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით - „**მდინარეთა შესართავ უბნებში წარმოქმნილი ჰიდროსაინჟინრო პრობლემები და მათი გადაჭრის გზები საქართველოს შავიზღვისპირა რეგიონებში**“ და ვუწევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას, დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

დისერტაციის ხელმძღვანელი:

ტმდ, პროფესორი

**შ. გაგოშიძე**

რეცენზენტები:

ტმდ, პროფესორი

**დ. ნამგალაძე**

ტმკ, ასოც. პროფესორი

**გ. ზალიკაშვილი**

თარიღი

-----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

წარდგენილია სადისერტაციო საბჭოში 2016 წელს

მანონ კოდუას მიერ

*მდინარეთა შესართავ უბნებში წარმოქმნილი ჰიდროსაინჟინრო პრობლემები და მათი გადაჭრის გზები საქართველოს შავიზღვისპირა რეგიონებში*

სამშენებლო ფაკულტეტზე

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სხდომა ჩატარდა: 2016 წლის 20 მაისს

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემოთ მოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

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

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

---

ავტორის ხელმოწერა

## რეზიუმე

სადისერტაციო ნაშრომი შეეხება საქართველოს შავიზღვისპირეთის ძირითადი მდინარეების - რიონის, ენგურისა და ჭოროხის შესართავ უბნებსა და ზღვის მიმდებარე სანაპირო ზოლში ამჟამად არსებული ჰიდროსაინჟინრო, გეომორფოლოგიური და გარემოსდაცვითი ხასიათის პრობლემების გამოკვლევას და ამ პრობლემების აღმოფხვრის მეცნიერულად დასაბუთებული გზების დასახვას.

ნაშრომში ნაჩვენებია საქართველოს შავიზღვისპირეთში ჰიდრომშენებლობით განპირობებული გარემოსდაცვითი ხასიათის პრობლემებისა და თვით ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მწყობრიდან გამოსვლის მიზეზები უნდა ვეძებოთ არა მხოლოდ მშენებლობის ხარისხსა და ნაგებობების დაპროექტებისას დაშვებულ შეცდომებში, არამედ განგარიშების არსებული მეთოდების უზუსტობასა და უკმარისობაში.

გამომდინარე აქედან, ცხადია თუ რამდენად აქტუალურია საქართველოს შავიზღვისპირა რეგიონებში არსებული ჰიდროსაინჟინრო და გარემოსდაცვითი ხასიათის პრობლემების მეცნიერულად დასაბუთებული გამოკვლევა.

ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს ზღვის სანაპირო არეებსა და შესართავ უბნებში კალაპოტური პროცესებისა და საზღვაო-სამდინარო ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ჰიდრაულიკური გაანგარიშების იმგვარი, მათემატიკურად დასაბუთებული მეთოდების შემუშავება, რომელთა გამოყენება განაპირობებს აღნიშნული ნაგებობების ხანგრძლივ და ეკოლოგიურად უსაფრთხო ექსპლუატაციას.

სადისერტაციო ნაშრომში დასმული ტალღური ჰიდროდინამიკის ამოცანების გადასაწყვეტად გამოყენებულია მათემატიკური ფიზიკის მიახლოებითი, კერძოდ პირდაპირი და ასიმპტოტური მეთოდები, ევოლუციური გზით მიღებულია ცვლადკოეფიციენტებიანი დიფერენციალური განტოლებები, რომლებიც იხსნება ინჟინრებისთვის მისაწვდომ ელემენტარულ ფუნქციებში.

სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში შესრულებულია შემდეგი სახის კვლევითი სამუშაოები:

ა) გაანალიზებულია მდინარეების ენგურის, რიონის და ჭოროხის შესართავ უბნებთან მოპოვებული უახლესი ჰიდროლოგიური, მეტეოროლოგიური და ზღვის ტალღური რეჟიმების მონაცემები. ეს მონაცემები ვრცელდება შემდეგ ობიექტებზე:

- ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლში, ქალაქის არხის შესართავიდან პორტის სამხრეთ მოლომდე;

- მდ.რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძზე, კაშხლის ქვედა ბიეფში;

- მდ. ენგურის შესართავი კალაპოტსა და ანაკლიის სანაპირო ზოლში;

- მდ. ჭოროხის შესართავ უბანზე და მასთან მიმდებარე ბათუმი-გონიოს სანაპირო ზოლში.

გამოკვლევულია აგრეთვე ამ უბნებზე არსებული ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მწყობრიდან გამოსვლის მიზეზები.

ბ) მიმოხილულია ჰორიზონტთან ნებისმიერი კუთხით დახრილ სანაპირო ფერდობებთან ტალღების ტრანსფორმაციისა და რეფრაქციის საანგარიშო უახლესი ანალიზური მეთოდები, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ წყლის ნაწილაკების სიჩქარეთა ველი და ტალღების მიერ დახრილ ფსკერზე პლაჟწარმომქმნელი მასალის ნაპირგასწვრივი და სიღრმით მიგრაცია, რაც აქამდე ვერ ხერხდებოდა არსებული სხივურ-ენერგეტიკული მეთოდების გამოყენებით;

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

დ) თეორიულად დასაბუთებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში შემუშავებული მდ. რიონის წყალგამყოფი რაბ-რეგულატორის ფარების რენტაბელური საექსპლუატაციო რეჟიმები ქალაქ ფოთის წარეცხილი ნაპირის აღდგენის მიზნით;

ე) ნებისმიერი დახრილობის სანაპირო ფერდობების მქონე ტრაპეციულ და სამკუთხა არხებში წყლის ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობების ამსახველი განტოლებების პირდაპირი მეთოდით ამოხსნის საფუძველზე შეფასებულია არხების სანაპირო ფერდობების მდგრადობა და შემუშავებულია ზღვაში შემავალი არხებისა და მდინარეთა კალაპოტების მოსალოდნელ განივ დეფორმაციათა პროგნოზირების მეთოდი;

ვ) მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის კაპიტალური რეაბილიტაციის მიზნით შემუშავებულია ჩამქრობი ჭის მოწყობის ახალი, ჰიდრავლიკურად დასაბუთებული სქემა;

ზ) შემუშავებულია რეკომენდაციები ნაპირდაცვითი ღონისძიებების ჩასატარებლად მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავ აკვატორიებსა და ზღვის მიმდებარე სანაპირო ზოლში.

დისერტაციაში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნას საქართველოში და მის ფარგლებს გარეთ არსებულ ჰიდროსაინჟინრო პროფილის, საზღვაო-სამდინარო და სატრანსპორტო დანიშნულების საპროექტო და სამეცნიერო-კვლევითი ორგანიზაციების მიერ. იგი გადაეცემა სს „საქწყალპროექტს“; შპს „ჰიდროპროექტს“, სს „საქნაპირდაცვას“, შპს „ჰიდროსფეროს“, „თბილწყალგეოს“ და სხვა სამშენებლო და საპროექტო ორგანიზაციებს და ფოთის, ბათუმის, ყულევის და ანაკლიის ადგილობრივი მმართველობისა და საზღვაო პორტების საპროექტო - სამშენებლო სამსახურებს.

დისერტაცია შედგება შესავლის, 5 თავის, დასკვნებისა და 89 დასახელების ლიტერატურული წყაროსგან. დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 139 გვერდს, 35 ნახაზის და 23 ცხრილის ჩათვლით.

## SUMMARY

The doctoral dissertation is concerned with the investigation of the currently existing hydro-engineering, geo-morphological and environmental problems currently existing in the estuaries and the adjoining areas of the Rioni, Inguri and Chorokhi which are the main rivers of the Black Sea coast region in Georgia. The project also indicates the ways of solving these problems and obtaining scientifically substantiated solutions.

The causes of the negative influences on the environment may lie not only in the poor quality of the building work, but also in the mistakes made in the designing stage and in the imprecision of the available applied prediction methods and calculation formulas and often even in the non-existences of such methods. **Hence, it obviously follows how topical is to develop the scientifically justified methods of investigation of hydroengineering and environment protection problems which nowadays exist in the Black Sea region of Georgia, and to indicate the hydroengineering tools by means of this kind of problems can be solved.**

The objective of doctoral thesis was to elaborate the mathematically justified methods of calculations of fluvial and marine riverbed processes in the coastal and estuary areas since the application of such methods makes the exploitation of hydroengineering structures long-term and ecologically safe.

For the solution of the theoretical tasks set in the doctoral thesis, the methods of mathematical physics were used. By transformation of three-dimensional hydrodynamic equations there was obtained two- and one-dimensional hydraulic differential equations with a variable coefficient, which will be solved by the exact, direct and asymptotic methods using the basic functions which engineers have. In particular, for the solution of the obtained equations the direct method of reduction of three-dimensional equations of wave hydrodynamics has been used, which is proposed by Academician L. Kantorovich, a Nobel Prize winner and also the asymptotic method of WKB (Wentzel-Kramers-Briulen), widely used in quantum mechanics.

The following activities have been performed:

- The analysis of the latest data on hydrological, meteorological and sea wave regimes in the tributary areas of the Enguri, Rioni and Chorokhi rivers will be made; also river bed processes occurring in these areas will be investigated; the factors causing the destruction of the hydroengineering structures will be identified and studied; measures of restoration of the washed-out sea coast will be indicated and the prospects of the future port construction will be considered.

- The methodology was developed taking into consideration the boundary rules of wave hydrodynamics. The methods were based on mathematical models enabling hydraulic engineers and other interested specialists to understand the

refraction and wave transformation processes occurring at any coast slope angle values. The velocity field of water particles motion is determined so that it makes possible to forecast the motion of coastal and deep-water motion of the coast forming material at any angle of slope –so far this could not be done by the existing radiation-energy technique.

- Methods of calculating the dimensions of coast protection structures will be developed; the procedure of predicting the rate of their deformation under the action of sea waves and also the rate of deformation of the slopes of trapezoidal and triangular cross-sectional channels will be described. In the existing normative documents, similar calculation methods are used only for the waves directed to the shore frontally.

- In the frame of the long-wave theory, the influence of the river flow velocity and of the river bottom configuration on the wave movement parameters in estuaries have been studied, which makes it possible to develop the cost-saving and efficiently operating water dividing rub-regulator to be used for the restoration of the washed out sea coast of the town of Poti.

- Recommendations were prepared on the design of hydroengineering structures in river estuary areas.

- The design and research organizations, schools of higher learning and other organizations of hydroengineering profile, which are concerned with the solution of irrigation, drainage, navigation and electric power production problems are considered as potential customers. The findings of the doctoral thesis will be handed over in the form of recommendations to the ports of Poti and Kulevi, Tskalproject (Water-Design) company, the group of World Bank experts who are working on the project of rehabilitation and restoration of irrigation and drainage systems, Saknapirdatsva (Georgian Coast Protection) company and other governmental and municipal organizations.

## შინაარსი

<b>შესავალი</b> . . . . .	<b>14</b>
<b>თავი 1. ღასავლეთ საქართველოს კირითაღ მღინაჩეთა</b> <b>შესართავ უბნეზე არსეპული ბარემოსღაცვითი ხასიათის ღა</b> <b>ჰიდროსაინჰინრო პრობლემების მიმოხილვა</b> . . . . .	<b>19</b>
1.1. მდინარე ენგურის ჰიდროლოგიური დახასიათება მის შესართავ აკვატორიაში არსებული გეომორფოლოგიური პროცესების გათვალისწინებით . . . . .	<b>20</b>
1.2. მდ. რიონის ჰიდროლოგიური რეჟიმები და ჰიდროსაინჰინრო და გარემოსღაცვითი ხასიათის პრობლემები ქალაქ ფოთის რეგიონში . . . . .	<b>27</b>
1.3 მდინარე ჭოროხის აუზის ჰიდროლოგიური დახასიათება მის აუზში ჰესების კასკადის მშენებლობის გათვალისწინებით . . . . .	<b>41</b>
<b>თავი 2. წყლის ტალღური მოძრაობათა კლასიკური</b> <b>თეორიის ელემენტები ღა სანაპირო არეებში ტალღურ</b> <b>მოძრაობათა გაანგარიშების არსეპული მეთოდების</b> <b>მიმოხილვა</b> . . . . .	<b>51</b>
2.1. მუდმივი და ცვალეზადი სიღრმის მქონე წყლის ზედაპირზე წრფივ ტალღურ მოძრაობათა ამსახველი ძირითადი განტოლებები და სასაზღვრო პირობები . . . . .	<b>52</b>
2.2. სანაპირო ფერდობზე ტალღების ტრანსფორმაციის, რეფრაქციული სურათისა და სიჩქარეთა ველის საანგარიშო მეთოდები . . . . .	<b>56</b>
<b>თავი 3. ტალღების გაანგარიშების ანალიზური მეთოდები</b> <b>მღინაჩეთა შესართავ უბნეზე ღა საზღვაო არხებში</b> . . . . .	<b>67</b>
3.1. გრძელი ტალღების ტრანსფორმაცია მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში . . . . .	<b>67</b>
3.2. ნაპირგასწვრივი ტალღები სამკუთხა და ტრაპეციულ არხებში . .	<b>73</b>
3.2.1. ნაპირგასწვრივი ტალღების გაანგარიშების მეთოდების ანალიზი . . . . .	<b>73</b>
3.2.2 წყლის ტალღური მოძრაობის გაანგარიშება ნებისმიერად დახრილი ფერდობების მქონე არხებში . . . . .	<b>80</b>
3.2.3. არხებში გრძივი ტალღური მოძრაობის გაანგარიშების მაგალითები . . . . .	<b>91</b>



<b>თავი 4. სანაპირო ფერდობების მდგრადობისა და დეფორმაციის საკითხები მათი ნაპირბასწვრივი ტალღური ნაკადით გარსდენისას . . . . .</b>	<b>101</b>
4.1. ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობების საანგარიშო დამოკიდებულებები . . . . .	101
4.2. ტალღური ნაკადით გარსდენისას არხის სანაპირო ფერდობების მდგრადობისა და დეფორმაციების პროგნოზირების მეთოდები . . . .	104
4.3. ნაპირდამცავი ფილების გაანგარიშება . . . . .	115
<b>თავი 5. ჰიდროსაინჟინრო პრობლემების ბალაჰრის ბზები მდინარეების რიონის, ენბურისა და ჭოროხის შესართავ აკვატორიუმში . . . . .</b>	<b>117</b>
5.1. კურორტ ანაკლიასთან სანაპირო ზოლის აღდგენის არსებულ ღონისძიებათა შეფასება და რეკომენდაციები . . . . .	117
5.2. რეკომენდაციები ჰიდროსაინჟინრო პრობლემების გადასაჭრელად ქალაქ ფოთის რეგიონში . . . . .	121
5.3. გარემოსდაცვითი ღონისძიებების დასახვა მდ. ჭოროხის შესართავ აკვატორიაში . . . . .	129
<b>ძირითადი დასკვნები . . . . .</b>	<b>132</b>
<b>გამოყენებული ლიტერატურის სია . . . . .</b>	<b>133</b>

## ცხრილების ნუსხა:

ცხრილი 1. მდინარე ენგურის მაქსიმალური ხარჯები ენგურჰესის კაშხლის აშენებამდე .....	22
ცხრილი 2. მდინარე ენგურის მაქსიმალური ხარჯები ენგურჰესის კაშხლის აშენების შემდგომ .....	22
ცხრილი 3. ტალღების მიმართულებები და განმეორებადობა ზღვის დიდ სიღრმეებზე .....	23
ცხრილი 4. ტალღების პარამეტრები 8 ბალიანი ლელვისას .....	24
ცხრილი 5. მდ.რიონის მაქსიმალური წლიური ხარჯები .....	27
ცხრილი 6. ტივტივა ნატანის საშუალო თვიური ხარჯი .....	28
ცხრილი 7. ფსკერული ნატანის ანგარიშის შედეგები .....	28
ცხრილი 8. ტივტივა ნატანის ფრაქციული შემადგენლობა ..	29
ცხრილი 9. ნატანის ჰიდრავლიკური სიმსხოს მნიშვნელობები .....	29
ცხრილი 10. ტალღური რეჟიმების მახასიათებლები ქალაქ ფოთთან	31
ცხრილი 11. ფოთის რეგიონის ტალღების საპროექტო მახასიათებლები .....	31
ცხრილი 12. ქარების წლიური განაწილება .....	32
ცხრილი 13. ზღვის დონეები ფოთის სანაპირო რეგიონში .....	33
ცხრილი 14. ფსკერის ნიშნულები კაშხლის ქვედა ბიეფის კალაპოტში .....	37
ცხრილი 15. მდ. რიონის წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფის ჰიდრავლიკური მახასიათებლები .....	39
ცხრილი 16. მდ. ჭოროხის მაქსიმალური ჩამონადენის მახასიათებლები .....	42
ცხრილი 17. მდ. ჭოროხის 50%-იანი უზრუნველყოფის ჩამონადენი	42
ცხრილი 18. მაქსიმალური ხარჯები ჰიდროსადგურებზე .....	42
ცხრილი 19. ტალღური მახასიათებლები აჭარის სანაპირო ზოლში .	43
ცხრილი 20. ტალღის პარამეტრები სხვადასხვა უზრუნველყოფის სიმაღლეებისთვის შპს „ნაპირდაცვას“ მონაცემებით ..	43
ცხრილი 21. პლაჟების ფართობების ცვლილება 1980 წ. შედარებით .	48
ცხრილი 22. ძლიერი შტორმების განაწილება წლების მიხედვით ..	48
ცხრილი 23. ტალღური ზედაპირის საანგარიშო მახასიათებლები ..	99

## ნახაზების ნუსხა:

1. ნახ.1.1. მდ. ენგურის შესართავი უბნის ხედი . . . . .	20
2. ნახ. 1.2. მდ. ენგურის წყლის მაქსიმალურ ხარჯებსა და დონეებს შორის $Q=f(H)$ დამოკიდებულების მრუდები შავ ზღვაზე 100 წლიანი განმეორადობის მაქსიმალური დონის დგომის პირობებში . . . . .	22
3. ნახ.1.3 შტორმული ადინების საანგარიშო სქემა . . . . .	25
4. ნახ. 1.4. ფოთის პორტთან გამოთვლილი და გაზომილი ტალღის სიმაღლეების შედარება . . . . .	32
5. ნახ.1.5. ფოთის საზღვაო რეგიონში არსებული გეომორფოლოგიური და ჰიდროსაინჟინრო პრობლემების ლოკაციები . . . . .	34
6. ნახ.1.6. ნგრევების კონტური მდ. რიონის წყალგამყოფი კვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფში . . . . .	36
7. ნახ.1.7. დეფორმირებული ფსკერის ნიშნულები და ჰალოსოლის დონეები მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფში . . . . .	37
8. ნახ. 1. 8. გაბიონების განთავსების სქემა მდ. რიონის წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფში . . . . .	40
9. ნახ. 1.9. მდ. ჭოროხის შესართავი უბანი . . . . .	41
10. ნახ. 1.10. კახაბერის ვაკის განვითარების ეტაპები . . . . .	44
11. ნახ.1.11. მდ. ჭოროხზე მოქმედი და მშენებარე კაშხლების სქემატური ჭრილები . . . . .	46
12. ნახ. 1.12. მდ. ჭოროხის კალაპოტის დინამიკა სოფ. ერგესთან . . . . .	47
13. ნახ. 1.13. მდ. ჭოროხის კალაპოტის განივი ჭრილი გონიოს ხიდან 1999 წ. . . . .	48
14. ნახ.2.1 სხივურ-ენერგეტიკული მეთოდით ტალღების რეფრაქციის საანგარიშო სქემა . . . . .	57
15. ნახ.2.2. სანაპირო ფერდობთან ტალღების რეფრაქციის საანგარიშო სქემა . . . . .	62
16. ნახ. 2.3. ვერტიკალურ კედელთან $30^\circ$ კუთხით მოსული ტალღის რეფრაქციული სურათი . . . . .	64
17. ნახ. 2.4. ტალღების რეფრაქციის ფოტოსურეთები : ა) - საათის მრგვალი საფარი მინის თავზე; ბ) - ოკეანის ერთ-ერთ ნაპირთან . . . . .	66
18. ნახ. 3.1. გრძელი ტალღების ტრანსფორმაციის სქემა მდინარის შესართავ უბანზე . . . . .	68
19. ნახ.3..2. ტალღის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტების დამოკიდებულება ფრუდის რიცხვზე მდინარის შესართავ უბანში: ა) ტალღის ამპლიტუდის ტრანსფორმაციის	

კოეფიციენტის მრუდები; ბ) ტალღის სიგრძის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტების მრუდები . . . . .	72
20. ნახ.3.3. ოკეანის ზვირთცემით გამოწვეული ნაპირგასწვრივი ტალღები მდინარე სევერნის შესართავში . . . . .	74
21. ნახ. 3.4. ნაპირგასწვრივი ტალღები ლაბორატორიულ პირობებში . . . . .	74
22. ნახ. 3.5. ნაპირგასწვრივი ტალღების საანგარიშო სქემები, ა) ცალი მხრიდან შემოზღუდულ წყლის ზედაპირზე (სტოქსის ამოცანა); ბ) გ) სამკუთხა არხებში ვერტიკალთან ფერდობის $45^\circ$ (კელანდი) და $60^\circ$ (მაკდონალდი) დახრილობის შემთხვევაში . . . . .	76
23. ნახ.3. 6. ნაპირგასწვრივი ტალღების საანგარიშო სქემა სანაპირო ფერდობების ჰორიზონტთან ნებისმიერი $0 < \theta_0 \leq \pi/2$ კუთხით დახრილ ტრაპეციულ არხში . . . . .	81
24. ნახ. 3.7. არხის განივი მიმართულებით ტალღის ამპლიტუდის ზრდის მახასიათებელი $m$ კოეფიციენტის მრუდი . . . . .	92
25. ნახ. 3. 8. ნაპირგასწვრივი ტალღების განივი პროფილები ტრაპეციულ არხებში . . . . .	97
26. ნახ. 3.9. ნაპირგასწვრივი მოკლე ტალღის განივი პროფილი ტრაპეციულ არხში . . . . .	100
27. ნახ. 4.1. ფერდობზე ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედების საანგარიშო სქემა . . . . .	105
28. ნახ.4.2. ტრაპეციული არხის სანაპირო ფერდობის წარეცხვის ამოზნექილი კონტური განპირობებული წყლის სიღრმესთან შედარებით მოკლე ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედებით . . . . .	113
29. ნახ.4.3. ტრაპეციული არხის სანაპირო ფერდობის წარეცხვის ჩაზნექილი კონტური განპირობებული წყლის სიღრმესთან შედარებით გრძელი ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედებით . . . . .	114
30. ნახ.5.1. მდ.ენგურის შესართავში არხის გაჭრის სქემა. (ენერგეტიკის სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტი ,1982 წ) . . . . .	117
31. ნახ.5.2. ლაბორატორიული კვლევები ენერგეტიკის ს.კ. ინსტიტუტის დიდ ტალღათწარმომქმნელ აუზში . . . . .	117
32. ნახ.5. 3. „DOHWA Engineering“- ის საპროექტო წინადადება . . . . .	118
33. ნახ.5.4. წყალქვეშა ნაპირდამცავი ბანკეტების მოწყობის მათემატიკური მოდელირების შედეგები . . . . .	119
34. ნახ. 5.5. ფოთის „საქალაქო არხის“ შესართავში მაქსიმალურ სიჩქარეთა განაწილების მრუდები . . . . .	124
35. ნახ.5.6. მდ. რიონის წყალგამყოფი კვანძის ქვედა ბიეფის რეაბილიტაციის სქემა . . . . .	127

## მადლიერების გვერდი

წინამდებარე ნაშრომის შესრულებაში დახმარებისთვის დიდ მადლობას ვუხდით:

❖ სამეცნიერო ხელმძღვანელს - პროფესორ **შალვა გაგოშიძეს** გაწეული დიდი ღვაწლისთვის;

❖ **რუსთაველის სამეცნიერო ფონდს** ფინანსური მხარდაჭერისთვის, სწავლის პროცესი მთლიანად დაფინანსებულ იქნა აღნიშნული ფონდის მიერ გამოცხადებული საგრანტო პროექტებიდან, მომეცა საშუალება ჩამეტარებინა დამოუკიდებლად ექსპედიციები, მიმეღო მონაწილეობა საერთაშორისო კონფერენციებში, ვღებულობდი სტიპენდიას;

❖ შპს „თბილწყალგეოს“ თანამშრომლებს **ზურაბ ბაღაშვილს**, **ზაალ ასკურავას** და **ელიზბარ ხატიაშვილს** მდინარე ენგურზე ჩატარებულ ნატურული დაკვირვებებისა და ჰიდროლოგიური მასალების მოპოვებისას გაწეული დახმარებისთვის.

❖ ქუთაისის აკაკი წერეთლის უნივერსიტეტის პროფესორს **ივანე სალინაძეს** მდინარე რიონის და მისი შესართავი უბნის მიმდებარე აკვატორიის შესწავლაში დახმარებისთვის;

❖ ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტის პროფესორს **ნოდარ ჩხეიძეს** და ღვაწლმოსილ ჰიდროტექნიკოსს **შოთა ფალავას** აჭარის სანაპირო ზოლზე წარმოებულ კვლევებში გაწეული დახმარებისთვის;

❖ ჰიდროინჟინერიის დეპარტამენტის ყველა თანამშრომელს გვერდში დგომისთვის.

## შესავალი

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

ამგვარი ცვლილებები განსაკუთრებით შეეხო და პრობლემატური აღმოჩნდა საქართველოს შავიზღვისპირეთისათვის, რომლის 312 კილომეტრიანი სანაპირო ზოლის 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 უნიკალურ 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 ქალაქ ფოთის ნაპირალმდგენით დანიშნულებას მდ. რიონზე აგებული წყალგამანაწილებელი ჰიდროკვანძი.

მდ. ენგურზე თაღოვანი კაშხლის აგების შემდეგ ანალოგიურ მოვლენებთან გვაქვს საქმე მდინარის 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 ფართომასშტაბიანი სამუშოები, რასაც ჯერ-ჯერობით არ მოჰყოლია სასურველი შედეგები (ხშირ შემთხვევაში გატარებულ საინჟინრო ღონისძიებათა დაუსაბუთებლობის გამო).

შექმნილი მძიმე ვითარების ზემოთმოყვანილი მოკლე დახასიათებიდან 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 არა მხოლოდ საზღვაო და სამდინარო ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობების ხარისხში, არამედ ამ ნაგებობების პროექტირებისას დაშვებულ შეცდომებსა და გაანგარიშების არსებული მეთოდების სიზუსტეში.

სწორედ, გაანგარიშების არსებული მეთოდების დახვეწა და მათი შეცვლა უფრო მაღალი სიზუსტის და ამავე დროს ინჟინრებისთვის ადვილად მისაწვდომი ანალიზური მეთოდებით წარმოადგენს სადისერტაციო ნაშრომის შესრულების **მთავარ მიზანსა და მეცნიერულ სიახლეს.**

მდინარეთა შესართავ უბნებში კალაპოტური პროცესებისა და ტალღურ მოძრაობათა ჰიდრაულიკური გაანგარიშების მეთოდები,

მოყვანილი სადისერტაციო ნაშრომში, გამოირჩევა მაღალი მათემატიკური სიზუსტით.

ავტორს მიაჩნია, რომ საზღვაო და სამდინარო ჰიდროტექნიკური ნაგებობების პროექტირებისას დისერტაციაში შემუშავებული გაანგარიშების მეთოდებითა და რეკომენდაციებით სარგებლობა ხელს შეუწყობს ამ ნაგებობების ხანგრძლივ და საიმედო ექსპლუატაციას.

#### **დისერტაციის კვლევის ობიექტებია:**

1. მდ. ენგურის შესართავი კალაპოტი და ანაკლიის სანაპირო ზოლი;
2. ქალაქ ფოთის სანაპირო ზოლი ქალაქის არხის შესართავიდან პორტის სამხრეთ მოლომდე;
3. მდ.რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის ქვედა ბიეფები;
4. მდ. ჭოროხის შესართავი უბანი და მასთან მიმდებარე ზღვის სანაპირო ზოლი.

**კვლევის მეთოდები.** სადისერტაციო ნაშრომში დასმული თეორიული ამოცანები ძირითადად წყდება მისი ხელმძღვანელის, პროფესორ შ. გაგოშიძის მიერ შემუშავებული მიდგომების საფუძველზე, რაც მდგომარეობს ტალღური ჰიდროდინამიკის სამგანზომილებიანი ამოცანების ამოხსნისას უმაღლესი მათემატიკის მიახლოებითი და ასიმპტოტური მეთოდების გამოყენებაში. კერძოდ, დისერტაციაში ძირითადად გამოყენებულია ნობელის პრემიის ლაურეატ კანტოროვიჩის პირდაპირი და ვენტცელ-კრამერს-ბრიულენის ასიმპტოტური WKB მეთოდები.

რაც შეეხება დისერტაციაში მოყვანილ ჰიდროლოგიური და ჰიდრავლიკური ხასიათის ნატურული დაკვირვებებისა და ექსპერიმენტალური კვლევების მასალებს, ისინი ეფუძნება სხვადასხვა დროს სხვადასხვა ორგანიზაციებისა და თვით ავტორის უშუალო მონაწილეობით რუსთაველის სამეცნიერო ფონდის მიერ დაფინანსებულ რამდენიმე საგრანტო პროექტის ფარგლებში განხორციელებულ სავსე



ექსპედიციების შედეგებს მდინარეების ენგურის, რიონის და ჭოროხის შესართავ უბნებში.

### **ნაშრომის ძირითადი შედეგები.**

კვლევის ობიექტების ირგვლივ წარმოქმნილ ჰიდროსაინჟინრო პრობლემებთან დაკავშირებით, სადისერტაციო ნაშრომში 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 გამოკლუელია მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავი უბნების კალაპოტური პროცესებისა და ზღვის მიმდებარე სანაპირო ზოლის გეომორფოლოგიური ცვლილებები, განპირობებული ამ მდინარეებზე განხორციელებული ჰიდროტექნიკური მშენებლობით;

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

- სამკუთხა და ტრაპეციულ არხებში ნაპირგასწვრივ ტალღურ მოძრაობათა თეორიის საფუძველზე შემუშავებულია გაანგარიშების მეთოდიკა;

- დამუშავებულია სანაპირო ფერდობების მდგრადობისა და გამაგრების საკითხები მათი ნაპირგასწვრივი ტალღური ნაკადით გარსდენისას;

- ჰიდრავლიკურად გამოკვლეულია ქალაქ ფოთთან მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის ნგრევის მიზეზები;

- დასახულია მდინარეების რიონის, ენგურისა და ჭოროხის შესართავ უბნებში ჰიდროსაინჟინრო პრობლემების გადაჭრის გზები.

**შედეგების გამოყენების სფერო.** დისერტაციის შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნას ჰიდროსაინჟინრო პროფილის საზღვაო-სამდინარო და სატრანსპორტო დანიშნულების საპროექტო და სამეცნიერო-კვლევითი ორგანიზაციების მიერ. იგი განსახილველად და დასანერგად გადაეცემა სს «საქწყალპროექტს»; შპს «ჰიდროპროექტს», სს «საქნაპირდაცვას», შპს „ჰიდროსფეროს“, „თბილწყალგეოს“ და სხვა სამშენებლო და საპროექტო ორგანიზაციებს და აგრეთვე, ფოთის, ბათუმის, ყულევის და ანაკლიის ადგილობრივი მართველობისა და საზღვაო პორტების საპროექტო - სამშენებლო სამსახურებს.

**ნაშრომის აპრობაცია და პუბლიკაციები.** დისერტაციაში მიღებული შედეგები მოხსენებული იყო შემდეგ საერთაშორისო კონფერენციებზე და კონგრესებზე:

- „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“-ის მე-3 (ბორჯომი, 2013), მე-4 და მე-5 საერთაშორისო კონფერენციებში (თბილისი 2014, 2015);

- ევროკავშირის პროგრამის „BLACK SEA BASIN 2007-2013“ (BLACK SEA) „საზღვაო საპორტო რეგიონებში გარემოსდაცვითი პრობლემების გაერთიანებული მონიტორინგი და მათი გადაჭრის გზები“ ICME-ს მე-2 (ტრაბზონი, თურქეთი, 2014) და მე-3 (ერევანი, სომხეთი, 2015) ვორკშოპებზე;

- ევროპის გეოფიზიკოსთა კავშირის გენერალურ ასამბლეაზე EGU 2016 (ვენა, ავსტრია, 2016).

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია შვიდი სტატია.

**დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა.** დისერტაცია შედგება შესავალის, 5 თავის, დასკვნებისა და 89 დასახელების ლიტერატურული წყაროსგან. დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 137 გვერდს 35 ნახაზის და 23 ცხრილის ჩათვლით.

**თავი 1. დასავლეთ საქართველოს ძირითად  
მდინარეთა შესართავ უბნებზე არსებული  
ჰიდროსაინჟინრო და გარემოსდაცვითი ხასიათის  
პრობლემების მიმოხილვა**

ზღვის ტალღებისა და მდინარეთა თხევადი და მყარი ჩამონადენის ჰიდროლოგიური რეჟიმების ბუნებრივი თუ ხელოვნური ცვლილებები გადამწყვეტ ზეგავლენას ახდენს ზღვებისა და ოკეანეების სანაპირო ზოლის ფორმირებაზე, მის გეომორფოლოგიასა და ეკოლოგიურ პროცესებზე, აჩქარებს ან აფერხებს მდინარეთა შესართავებში დელტათ წარმოქმნისა და ზღვის სანაპირო ზოლის აბრაზიულ პროცესებს და განაპირობებს გარემოსდაცვითი ხასიათის მასშტაბურ ცვლილებებს, რომელთა აღმოსაფხვრელად, გარდა ამ პრობლემების გამომწვევი მიზეზების მეცნიერული ანალიზისა, მნიშვნელოვანი კაპიტალდაბანდებები და წლებია საჭირო.

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 მყარი ნატანი. გასულ საუკუნეში ამ მდინარეებზე განხორციელებულმა ჰიდროტექნიკურმა მშენებლობამ და სხვა ხასიათის ანთროპოგენურმა ჩარევამ მათ კალაპოტურ პროცესებში, განაპირობა მრავალი, დღეს-დღეობით გადაუჭრელი პრობლემა, მიუხედავად იმისა, რომ მათ აღმოსაფხვრელად ადრე მეტნაკლები ეფექტურობით ხორციელდებოდა და ამჟამადაც ხორციელდება მრავალი საინჟინრო ღონისძიება. აღსანიშნავია სსიპ „თბილწყალგეოს“, შპს „გამა კონსალტინგის“, შპს „ნაპირდაცვა“, მიერ შესრულებული პროექტები [3,18, 23, 27].

ქვემოთ მოგვყავს აღნიშნული მდინარეების ჰიდროლოგიური და მათ შესართავ აკვატორიებში აღძრული გეომორფოლოგიური ცვლილებების მოკლე დახასიათება.

**1.1. მდინარე ენგურის ჰიდროლოგიური დახასიათება  
მის შესართავ აკვატორიაში არსებული  
გეომორფოლოგიური პროცესების გათვალისწინებით**

მდინარე ენგური სათავეს იღებს კავკასიონის ქედზე, 2520 მ სიმაღლეზე ზღვის დონიდან და ერთვის შავ ზღვას სოფ. ანაკლიასთან. მდინარის სიგრძეა 213 კმ, საშუალო ქანობი 1,8 ‰, წყალშემკრები აუზის ფართობი 4060 კმ<sup>2</sup>, აუზის საშუალო სიმაღლე 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].

დაბლობ ზონაში წყალშემკრები აუზის ზოგიერთი მონაკვეთი მდებარეობს ზღვის დონის დაბლა, რის გამოც წყალდიდობების პერიოდში მდ. ენგური ტბორავს და აჭაობებს ამ ტერიტორიებს. წლის თბილ პერიოდში ჩამოედინება წლიური ჩამონადენის 80-82%, ხოლო ცივ პერიოდში - მხოლოდ 7-8%.



**ნახ.1.1. მდ. ენგურის შესართავი უბნის ხედი**

მდინარე წარმოადგენს საქართველოს მთავარ ენერგეტიკულ არტერიას. მასზე შექმნილია 271,5 მეტრის სიმაღლის ბეტონის თაღოვანი კაშხალი წყალსაცავით, რომლის მთლიანი მოცულობა – 1100, ხოლო სასარგებლო მოცულობა კი 680 მლნ.მ<sup>3</sup>-ია.

მდინარე ენგურზე ჰიდროელექტროსადგურის აშენების შედეგად მდინარის ძირითადი ნაკადი გადაგდებულ იქნა მდ. ერისწყლის

კალაპოტში, რის გამოც მნიშვნელოვნად შემცირდა ხარჯების გატარება მდინარის ძველ კალაპოტში. იგი ამჟამად ატარებს მხოლოდ მცირე შენაკადების, სანიტარულ და ენგურჰესის კაშხლიდან გადმოგდებული ჭარბი ნაკადის ხარჯებს.

ენგურის კალაპოტის ჰიდროლოგიური რეჟიმის ცვლილებამ და ხარჯების კლებამ გამოიწვია მისი ფსკერის დონის აწევა, ხოლო შესართავში ზღვის ტალღებმა შექმნეს დაახლოებით 2.5 კმ სიგრძისა და 100მ სიგანის ქვიშის ცელის ფორმის ზვინული, რომელმაც მნიშვნელოვნად შეაფერხა წყალდიდობისა და კაშხლიდან გადმოგდებული წყლის შედარებით დიდი ხარჯების გატარების პროცესი (ნახ.1.1).

ამჟამად მდ. ენგურის შესართავთან მდებარე დაბა ანაკლიის პლაჟები მცირე რაოდენობის წვრილფრაქციული ნატანითა და შესართავიდან ჩრდილოეთით არსებული ნაპირების წარეცხილი მასალით იკვებება, რის გამოც სანაპირო ზოლი განიცდის ინტენსიურ წარეცხვას.

მდ. ენგურის მაქსიმალური ხარჯების 39 წლიანი დაკვირვების მონაცემების ვარიაციული რიგის სტატისტიკური დამუშავების შედეგად მომენტების მეთოდით მიღებულია განაწილების მრუდის შემდეგი პარამეტრები:

მაქსიმალური ხარჯების საშუალო მრავალწლიური სიდიდე ბუნებრივ პირობებში  $Q_0 = \frac{\sum Q_i}{n} = 772 \text{ მ}^3/\text{წმ-ს};$

მდ. ენგურის წყლის მაქსიმალური ხარჯები შესართავთან, დადგენილი ბუნებრივი პირობებისთვის, მოცემულია ცხრილ 1-ში.

აქ მოყვანილი მონაცემები ვრცელდება 1976 წლამდე - ენგურის თაღოვანი კაშხლის ექსპლუატაციაში შესვლამდე. 1976 წლის შემდეგ, სოფელ ანაკლიასთან, ანუ მდ. ენგურის შესართავში, ემპირიული ფორმულით [4, 10] მაქსიმალური ხარჯები დადგენილი მოყვანილია ცხრილ 2-ში, სადაც გათვალისწინებულია წყალსაცავის სრული შევსებისას კატასტროფული წყალსაგდებიდან წყლის გარკვეული რაოდენობის (2500

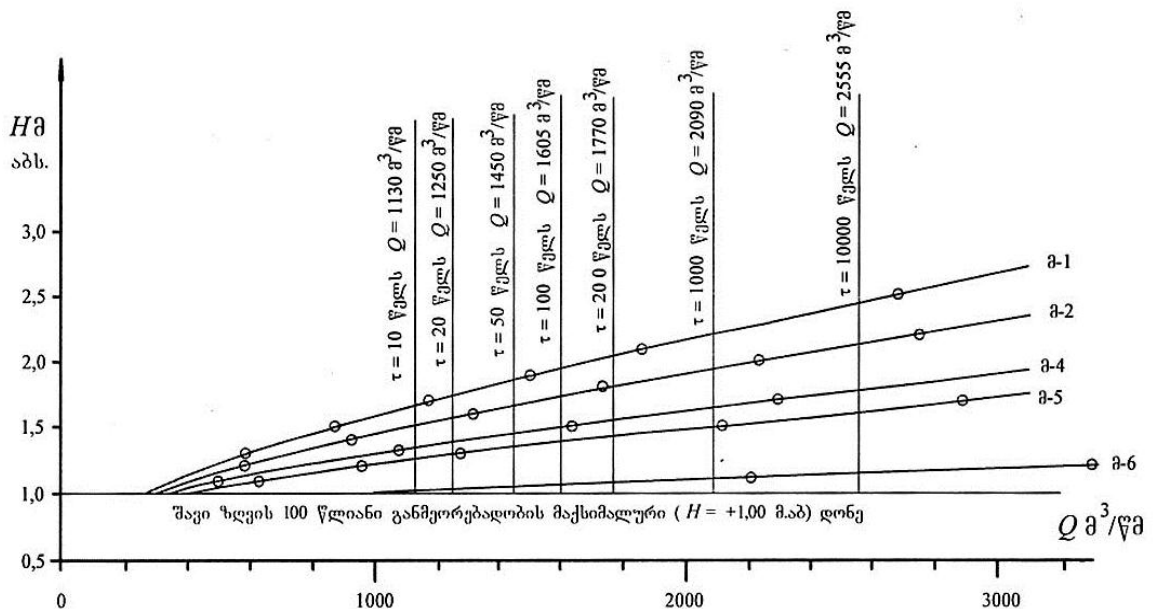
მ<sup>3</sup>/წმ) გადმოშვება, რაც დაემატება წყალშემკრებ აუზში ჩამოყალიბებულ მაქსიმალურ ხარჯებს.

**ცხრილი 1. მდინარე ენგურის მაქსიმალური ხარჯები ენგურჰესის კაშხლის აშენებამდე, მ<sup>3</sup>/წმ-ში [4].**

კვეთი	F კმ <sup>2</sup>	Q <sub>0</sub> მ <sup>3</sup> /წმ	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	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 2. მდინარე ენგურის მაქსიმალური ხარჯები ენგურჰესის კაშხლის აშენების შემდგომ, მ<sup>3</sup>/წმ-ში**

მაქსიმალური ხარჯი	უზრუნველყოფა P%						
	0,01	0,1	0,5	1	2	5	10
კაშხლიდან შესართავამდე	2055	1590	1270	1105	950	750	630
კაშხლიდან გადმოშვებული	500	500	500	500	500	500	500
საანგარიშო მაქს. ხარჯი	2555	2090	1770	1605	1450	1250	1130



**ნახ. 1.2. მდ. ენგურის წყლის მაქსიმალურ ხარჯებსა და დონეებს შორის  $Q=f(H)$  დამოკიდებულებების მრუდები შავ ზღვაზე 100 წლიანი განმეორადობის მაქსიმალური დონის დგომის პირობებში [4].**

ნახ. 1.2-ზე წარმოდგენილი მდ. ენგურის წყლის მაქსიმალური დონეები აგებულია შეზი-მაინინგის ცნობილი ფორმულით:  $V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \cdot I^{1/2}$  იმ შემთხვევისათვის, როცა შავ ზღვაზე დგას 100 წლიანი განმეორებადობის მაქსიმალური დონე (+1,00 მ.აბს).

წყლის მაქსიმალურ ხარჯებსა და დონეებს შორის  $Q = f(H)$  დამოკიდებულების მრუდები ერთმანეთთან შებმულია ორ საანგარიშო კვეთს შორის ნაკადის ჰიდრაულიკური ქანობის შერჩევის გზით. ამასთან სიმქისის კოეფიციენტი  $n$  მიღებულია 0,022-ის ტოლი მდინარის კალაპოტისთვის და 0,055-ის ტოლი – ჭალისთვის.

ტალღების საანგარიშო პარამეტრები ანაკლიასთან. ანაკლის რეგიონის სანაპირო ზოლში მაქსიმალურად სახიფათო მიმართულების და სიმძლავრის დასავლეთის შტორმული 8 ბალიანი ღელვის 1%-იანი უზრუნველყოფის მქონე ტალღების გაანგარიშების შედეგები მოცემულია ცხრილ 3-ში. გაანგარიშება შესრულებულია არსებული სამშენებლო ნორმებისა და წესების მიხედვით, აგრეთვე სხვადასხვა ინსტიტუტებისა და ორგანიზაციების მონაცემების საფუძველზე. ტალღების მახასიათებლების განსაზღვრისას ძირითადად გამოყენებულია „ჰიდრომეტსამსახურის“ მონაცემები [3].

ცხრილი 3. ტალღების მიმართულებები და განმეორებადობა ზღვის დიდ სიღრმეებზე

ბალიანობა	სსდ		სდ		დსდ		დ		დჩდ		ჩდ		ჩჩდ		ჩ		შტოლი		ჯამი	
	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%	რაოდენობა	%		
0																	343	39,6	343	39,6
1	2	0,2	9	1,0	31	3,6	70	8,1	59	6,8	51	5,9	22	2,5	1	0,1			245	28,2
2	1	0,1	3	0,4	14	1,6	40	4,6	26	3,0	9	1,0	5	0,6					98	11,3
3			2	0,2	12	1,4	42	4,9	16	1,9	5	0,6	1	0,1	1	0,1			79	9,2
4			1	0,1	11	1,3	19	2,2	11	1,3	1	0,1							43	5,0
5			1	0,1	3	0,4	27	3,1	5	0,6	2	0,2							38	4,4
6							13	1,5	6	0,7									19	2,2
7							1	0,1											1	0,1
	3	0,3	16	1,8	71	8,3	212	24,5	123	14,3	68	7,8	28	3,2	2	0,2	343	39,6	866	100

აღვნიშნავთ, რომ ტალღების საწყისი (ღრმა წყლის ტალღები) პარამეტრების დადგენისას საკმაო განსხვავებაა დაკვირვებებით და ანგარიშით მიღებულ სიდიდეებს შორის, რაც აიხსნება პროცესის სირთულით და გამომწვევი მიზეზების მრავალფეროვნებით. ამიტომ, აღნიშნული მონაცემები განისაზღვრება ნატურული დაკვირვების და გაანგარიშების მონაცემების ანალიზის საფუძველზე. კერძოდ, ღია ზღვის ტალღების პარამეტრების დადგენისას საანგარიშოდ ვღებულობთ ქარის მაქსიმალურად სახიფათო მიმართულებას - დასავლეთის ქარებს, ხოლო ქარის მაქსიმალურ სიჩქარედ მივიჩნევთ  $W=25$  მ/წმ სიჩქარეს (რადგან მეტი სიჩქარის მქონე ქარების ხანგრძლივობა იმდენად მცირეა, რომ მათგან გამოწვეული ტალღები ვერ ასწრებს სრულ განვითარებას).

ცხრილ 4-ში მოყვანილია სხვადასხვა ორგანიზაციების მიერ („საქართველოს ჰიდრომეტსამმართველოს“, „საქნაპირდაცვის“) მოწოდებული მასალების მიხედვით დადგენილი ღრმა წყლის გასაშუალებული ტალღების პარამეტრების მნიშვნელობები 8 ბალიანი ღელვისას.

**ცხრილი 4. ტალღების პარამეტრები 8 ბალიანი ღელვისას.**

ორგანიზაცია	ტალღის საშუალო პარამეტრები ღრმა წყალში, ღელვის მიმართულება – დასავლეთი			
	სიღრმე $\bar{h}_{ღრ}$ , მ	პერიოდი $\bar{T}_{ღრ}$ , წმ	ტალღის სიგრძე $\bar{\lambda}_{ღრ}$ , მ	სიღრმე 3%-იანი უზრ. $\bar{h}_{ღრ 3\%}$ , მ
ჰიდრომეტსამმართველო, თბილჰიდროპროექტი	4,6	10,3	165	–
საქნაპირდაცვა	4,6	9,9	152	8,5 - 11
თბილწყალგეო - ანაკლიასთან მშენებარე პირსთან	4,8	2,59	147	6,25

ზღვის თავთხელ ზონაში, ტალღების განვითარებაზე და მის ძირითად მახასიათებლებზე დიდ გავლენას ახდენს ფსკერი.

თავთხელზე სრულდება უტოლობა

$$\frac{\bar{\lambda}_{ღრ}}{2} \geq H > H_{კრ},$$



აქ  $H_{კრ}$  – ტალღის დამსხვრევის სიღრმეა.

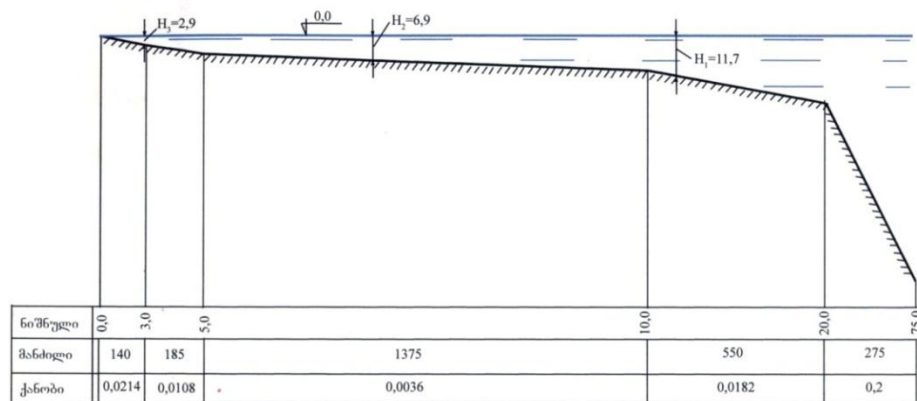
$i\%$  -იანი უზრუნველყოფის მქონე ტალღის სიმაღლე  $h_i$  მ, როდესაც თავთხელში ფსკერის ქანობი განისაზღვრება დამოკიდებულებით

$$h_i = k_{\delta} \cdot k_{რეფ} \cdot k_{დან} \cdot k_i \cdot \bar{h}_{ღრ} \quad (2)$$

სადაც  $k_{\delta}$  – ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი;  $k_{რეფ}$  – რეფრაქციის კოეფიციენტი;  $k_{დან}$  – დანაკარგების განზოგადოებული კოეფიციენტი;  $k_i$  –  $\bar{h}_{ღრ}$ -ის  $i\%$  -იან უზრუნველყოფაზე გადამყვანი კოეფიციენტი.

აღნიშნულ კვეთში დასავლეთის მიმართულების 1%-იანი ტალღებისათვის. ვითვალისწინებთ ტალღების მოსვლის კუთხეს  $\alpha = 40^\circ$ , მივიღეთ ასეთ შედეგები: ტალღის სიმაღლე  $\bar{h}_{1\%} = 8,6$  მ, ტალღის სიგრძე-  $\lambda_{1\%} = 111,0$  მ, ტალღის ქიმის გადაჭარბება საშუალო დონეზე  $\eta_{1\%} = 6,88$  მ

ზღვის დონის რყევაზე ინსტრუმენტალური დაკვირვებები კოლხეთის რეგიონში ტარდებოდა გასული საუკუნის 20-ანი წლებიდან. ზღვის დონის დღე-ღამური ცვალებადობის დიაპაზონი ბალტიის ათვის სისტემაში შეადგენს  $\pm 30-40$  სმ-ს. შტორმული ზემოქმედებით ზღვის დონის აწევა (შტორმული ადინება) გაანგარიშებულ იქნა დასავლეთის ქარებისათვის ( $W = 25$  მ/წმ) ნაპირიდან  $L=8$  კმ-ის დაშორებით შეადგენს 0,88 მ-ს (ნახ.1.3).



ნახ.1.3. შტორმული ადინების საანგარიშო სქემა [3].

სხვა ფაქტორების, (კერძოდ მიქცევა-მოქცევის, ახლომდებარე მდინარეების წყალდიდობების, შავი ზღვის აკვატორიაში ატმოსფერული

წნევების ცვალებადობის, ანუ ბარიული სეიშების ანუ ე.წ. „ტიაგუნების“ და სხვ.) გათვალისწინებით ზღვის დონის მაქსიმალური აწევა ანაკლიასთან შეადგენს  $\Delta H = 40 + 88 = 128$  მ-ს, ხოლო ზღვის  $H = -3,0$  მ სიღრმეზე ზღვის დონის ჯამური აწევა (1%-იანი) ალბათობით შეადგენს  $\eta_{\text{გაღ.}} + \Delta H = 1,95 + 1,28 = 3,23$  მ, რომელიც უნდა გადაიზომოს ზღვის საშუალო მრავალწლიური დონიდან.

პლაჟის ბოლოს, ხმელეთის ნიშნულები ხშირად პლაჟის ნიშნულებზე მნიშვნელოვნად დაბალია. 4 კმ-იანი უბნის საწყის მონაკვეთში, ენგურის შესართავთან, კვების წყაროს სიახლოვე უზრუნველყოფს პლაჟების გარკვეულ სტაბილურობას, ცენტრალურ ნაწილში პლაჟის სიგანე 5–10 მეტრამდეა შემცირებული, სამხრეთ ნაწილში შედარებით ფართოვდება და 30–40 მეტრს აღწევს. წარეცხვების გააქტიურება შეინიშნება მდ. ხობისწყლის შესართავის მიმდებარე ნაპირებზე ყულევის პორტის მშენებლობის გამო.

ამჟამად მდ. ენგურის შესართავთან მდებარე დაბა ანაკლიის პლაჟები მცირე რაოდენობის წვრილფრაქციული ნატანითა და შესართავიდან ჩრდილოეთით არსებული ნაპირების წარეცხილი მასალით იკვებება, რის გამოც სანაპირო ზოლი განიცდის ინტენსიურ წარეცხვას. ნაპირის ცენტრალურ და სამხრეთ ნაწილში, სადაც ბოლო 10 წელიწადში წარეცხვის ზომიერი ტემპია დაფიქსირებული (2–4 მ/წ), უკანასკნელ 25 წელიწადში წაირეცხა დაახლოებით 30 ჰა სანაპირო ზოლი.

ნაპირის წარეცხვის ძირითადი ფაქტორებია:

- საზღვაო და სამდინარო ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობით გამოწვეული პლაჟამგები მასალის მკვეთრი შემცირება და ნაპირის ფორმირებაში უარყოფითი ბალანსის ჩამოყალიბება;
- წარეცხვებით გამოწვეული სანაპირო ხაზის აზიმუტის შეცვლის შედეგად, გაბატონებული მიმართულების ტალღების აგრესიულობის ზრდა;
- ტალღური რეჟიმის გაუარესება, რაც გამოიხატება ბოლო ათწლეულში შტორმების მაღალი ბალიანობისა და განმეორებადობის გახშირებით.

**1.2 მდ. რიონის ჰიდროლოგიური რეჟიმები და  
ჰიდროსაინჟინრო და გარემოსდაცვითი ხასიათის პრობლემები  
ქალაქ ფოთის რეგიონში**

დასავლეთ საქართველოს ყველაზე წყალუხვი მდინარეა რიონი, რომელიც სათავეს იღებს კავკასიონის ქედზე, ზღვის დონიდან 2960 მ-ზე, 327 კმ სიგრძისაა, ხოლო წყალშემკრები აუზის ფართობი 13400 კმ<sup>2</sup>, საშუალო ქანობი 7,2 ‰, ერთვის შავ ზღვას ფოთთან. ნაკადის სიგანე იცვლება 6-დან 60 მეტრამდე, სიღრმე 0,5-დან 3,5 მეტრამდე, ხოლო სიჩქარე 2,0-4,2 მ/წმ-დან 0,7-1,5 მ/წმ-მდე.

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

ჩვენი გაზომვებით მდ. რიონის ჩრდილოეთ არხის სიგანე იცვლება 150-450მ დიაპაზონში, სიღრმე 1-9მ, დინების საშუალო სიჩქარე 0,3-2მ/წმ. ძლიერი ქარებისა და ზღვის დღევების ზემოქმედებით შეინიშნება წყლის დონის აწევა, რომელიც ვრცელდება ჰიდროკვანძამდე. ეს მოვლენა არსებითია, როცა წყლის ხარჯი აღწევს 1100 მ<sup>3</sup>/წმ.

საქოჩაკიდის ჰიდროლოგიურ საგუშაგოზე წყლის ხარჯებზე და მრავალწლიანი დაკვირვებების მონაცემები მოყვანილია ცხრილ 5-ში [18].

**ცხრილი 5. მდ.რიონის მაქსიმალური წლიური ხარჯები  $Q_{max}$  (მ<sup>3</sup>/წმ) .**

№	წლები	$Q_{max}$ (მ <sup>3</sup> /წმ)	წლები	$Q_{max}$ (მ <sup>3</sup> /წმ)
1	1958	1815	1968	1815
2	1959	1435	1969	1013
3	1960	1782	1970	1782
4	1961	1602	1971	1264
5	1962	2013	1972	1154
6	1963	2402	1973	1121
7	1964	1460	1974	1815
8	1965	998	1975	1462
9	1966	1856	1976	2270
10	1967	1790	1977	2840

შპს „გამა კონსალტინგი“-ს მიერ ჩატარებული კვლევების მიხედვით მდინარეს ყოველწლიურად თავის ზღვიურ შესართავში გამოაქვს დაახლოებით 3.5-4,0 მლნ.მ<sup>3</sup> ნაპირფორმირებადი ნატანი. აკუმულაციის შედეგად დელტის წინ მდებარე წყალქვეშა ფერდის სიღრმეები 15 მეტრიან იზობატამდე ყოველწლიურად მცირდება დაახლოებით 0,1 მეტრით. ძლიერი დასილვების გამო ფოთის საზღვაო ნავსადგურის შემოსასვლელ არხში განუწყვეტლივ მიმდინარეობს დაღრმავებითი სამუშაოები.

გუმათისა და ვარციხის წყალსაცავების შექმნის შემდეგ მდინარის ნატანის მეტი ნაწილი მასში ილექება, რის გამოც 2010 წლისათვის წყალსაცავების მოცულობა 95-97%-ით შემცირდა.

ტივტივა ნატანის რაოდენობაზე 1970–1994 წლებში დაკვირვებების შედეგები ნაჩვენებია ცხრილ 6-ში.

**ცხრილი 6. ტივტივა ნატანის საშუალო თვიური ხარჯი ( $G$ , კგ/წმ)**

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

ფსკერული ნატანის ხარჯებზე დაკვირვებები არ ჩატარებულა. [17] - ში ემპირიული ფორმულების საშუალებით მიღებულია ფსკერული ნატანის ხარჯების მნიშვნელობები (ცხრ.7).

**ცხრილი 7. ფსკერული ნატანის ანგარიშის შედეგები**

დღეები	$Q_{საშ}$ , მ <sup>3</sup> /წმ	$V$ , მ/წმ	$G$ (მლნ.მ <sup>3</sup> )-ნატანი
1	1700	1,6	0,042
2	1600	1,6	0,084
3	1250	1,45	0,085
3	1150	1,42	0,0785
4	1050	1,40	0,0950
4	950	1,28	0,0870
4	900	1,15	0,0495
14	800	1,05	0,137
40	650	1,00	0,320
43	500	0,90	0,215
60	400	0,80	0,185
70	300	0,60	0,066
117	200	0,50	0,045
სულ			1,6

ზღვაში შეტანილი ნატანის განაწილება არათანაბარია. ნატანის მაქსიმალური წლიური შემონატანი 90-95% ემთხვევა წყალდიდობებს. მდინარე რიონის მიერ შემოტანილი საშუალო წლიური ნატანის რაოდენობა შეადგენს 8 მილიონ მ<sup>3</sup>, აქედან 7,25მ<sup>3</sup>-ია ტივტივა ნატანი, ხოლო 0,75მ<sup>3</sup> ფსკერული. ფსკერული ნატანის რაოდენობა ნაანგარიშევია გველესიანის ფორმულის მიხედვით. ხოლო ტივტივა ნატანის ფრაქციული შემადგენლობა და ჰიდრავლიკური სიმსხოს მნიშვნელობები ნაწილაკების დიამეტრთან დამოკიდებულებით მოცემულია ცხრილ 8 და ცხრილ 9-ში [17,18].

**ცხრილი 8. ტივტივა ნატანის ფრაქციული შემადგენლობა**

ხარჯები მ <sup>3</sup> /წმ	მლნ. ტონა	22% d>1მმ.	3,9% 0,5-1,0მმ.	34,75% 0,5-0,2მმ.	51,2% 0,2-0,05მმ.	4,95% d<0,05მმ.
1700-1250	0,126	0,0028	0,0049	0,0438	0,066	0,0063
1250-950	0,260	0,0057	0,0100	0,0900	0,133	0,018
950-650	0,274	0,0060	0,0107	0,0950	0,140	0,0137
650-300	0,720	0,0159	0,0280	0,0250	0,368	0,036
300-200	0,110	0,0024	0,0043	0,0390	0,564	0,055

**ცხრილი 9. ნატანის ჰიდრავლიკური სიმსხოს მნიშვნელობები.**

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

ფსკერული ნატანის, რომლის დიამეტრია 0,05-1მმ, ზღვაში შეტანის სიგრძე იცვლება დიაპაზონში 1-35მ ამრიგად, შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ მდინარის ფსკერული ნატანი მთლიანად რჩება სანაპირო ზოლში [13].

მდინარეში წყალდიდობების დროს ზღვაში შტორმების არსებობამ შეიძლება მნიშვნელოვნად შეცვალოს ზღვაში ნატანის დალექვის სურათი, რადგანაც ამ დროს შემოდის ნატანის მნიშვნელოვანი რაოდენობა. პირველ რიგში, რადგან ტალღები ნაპირთან მოდიან კუთხით, იქმნება ნაპირგასწვრივი დინება რომელიც იწვევს მდინარის ნაკადის გადახრას და შესაბამისად ნატანის მოძრაობას ნაპირის მიმართულებით. თავის მხრივ მდინარის ნაკადი იწვევს ნაპირგასწვრივი მოძრაობის მიმართულების გადახრას, თითქოს იცავს ნაპირს მისი გარეცხვითი ზემოქმედებისაგან. ამ პროცესების გათვალისწინებისათვის

აუცილებელია განისაზღვროს რამდენად მოსალოდნელია წყალდიდობების დამთხვევა (როცა შემოდის ნატანის 70%) 4 ბალზე მეტი ზღვის შტორმებთან. მხედველობაში ვღებულობთ, რომ წყალდიდობების დროს წყლის ხარჯი მეტია  $600\text{მ}^3/\text{წმ}$ , რომელსაც მრავალწლიან ჭრილში აქვს უზრუნველყოფა 2 თვე წელიწადში. ამ დროს წყლის საშუალო სიჩქარე არის  $1\text{მ}/\text{წმ}$  რიგის. სიჩქარე არჩეულია შემდეგი მოსაზრებით,  $2,6\text{მმ}$  დიამეტრის მქონე ნატანის მოძრაობის დაწყების სიჩქარე (კრიტიკული სიჩქარე) შეადგენს  $0,4\text{ მ}/\text{წმ}$ , ხოლო მასიური მოძრაობის სიჩქარე ორჯერ აღემატება კრიტიკულ სიჩქარეს, ასეთი სიჩქარე რიონში არის  $1\text{მ}/\text{წმ}$ , რომელიც შეესაბამება ხარჯს  $600\text{მ}^3/\text{წმ}$ . მდინარის ხარჯებს, რომელიც მეტია  $600\text{მ}^3/\text{წმ}$ -ზე წელიწადში ზღვაში შეაქვს მთლიანი ნატანის 70%. ზღვის შტორმში იგულისხმება 4 ბალზე მეტი ტალღები, რადგანაც 4 ბალზე ნაკლები ტალღების ენერგეტიკული წილი შეადგენს წლიური სრული ტალღური ენერჯის რაოდენობის 10%-ზე ნაკლებს [17,18, 38, 80].

**ტალღების პარამეტრები რიონის შესართავ უბანთან.** რიონის შესართავიდან სამხრეთით, მდებარეობს ფოთის პორტი, სადაც ტალღებზე დაკვირვებები მიმდინარეობდა დიდი ხნის განმავლობაში. პორტის მიმდებარე აკვატორიაში ტალღების განაწილება გვიჩვენებს, რომ ძირითადი ტალღები არის დასავლეთის მიმართულების – 44,7%, რომლის შემდეგ მოდის სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულების ტალღები – 39%, ხოლო სამხრეთის შეადგენს – 6,3%. სეზონების მიხედვით: ზაფხულში არის ძირითადად სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულების ტალღები, ხოლო ზამთარში – დასავლეთის მიმართულების [18,19,].

ტალღის სიმაღლეები შემდეგნაირადაა განაწილებული: ტალღებზე, რომლის სიმაღლეები ნაკლებია –  $0,7\text{მ}$  მოდის 63,4%,  $0,7 - 2\text{მ}$  ტალღების – 29%, ხოლო ტალღები რომლის სიმაღლეები მეტია  $2\text{მ}$ -ზე – 7,3%.

შავი ზღვის სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტის (ЧНИИПИ) დაკვირვებებით დასავლეთის მიმართულების ტალღები შეადგენს –

92,5% დასავლეთის – 44,7, სამხრეთ-დასავლეთის 39%, ჩრდილო-დასავლეთის – 8,8%).

**ცხრილი 10. ტალღური რეჟიმების მახასიათებლები ქალაქ ფოთთან**

მიმართულება	თარიღი	ხანგრძლივობა	ქარის საშ. სიჩქარე (მ/წმ)	ტალღის გარბენის სიგრძე (კმ)	ტალღის სიმაღლე $H_{1/3}$ (მ)	ტალღის პერიოდი $T$ (წმ)
ჩრდ. - დას.	02.05. 1959	7სთ 35წთ	13.0	298	2.0	5.5
ჩრდ. - დას.- ჩრდ.	02.09. 1959	13სთ 20წთ	16.5	450	3.7	7.5
დას.	10.09. 1962	32სთ 30წთ	16.5	504	4.9	9.0
დას. – სამხრ. - დას.	10.09.1962	32სთ 30წთ	16.5	428	4.6	8.5
სამხ. - დას.	02.05.1959	23სთ 50წთ	20	266	5.0	8.5

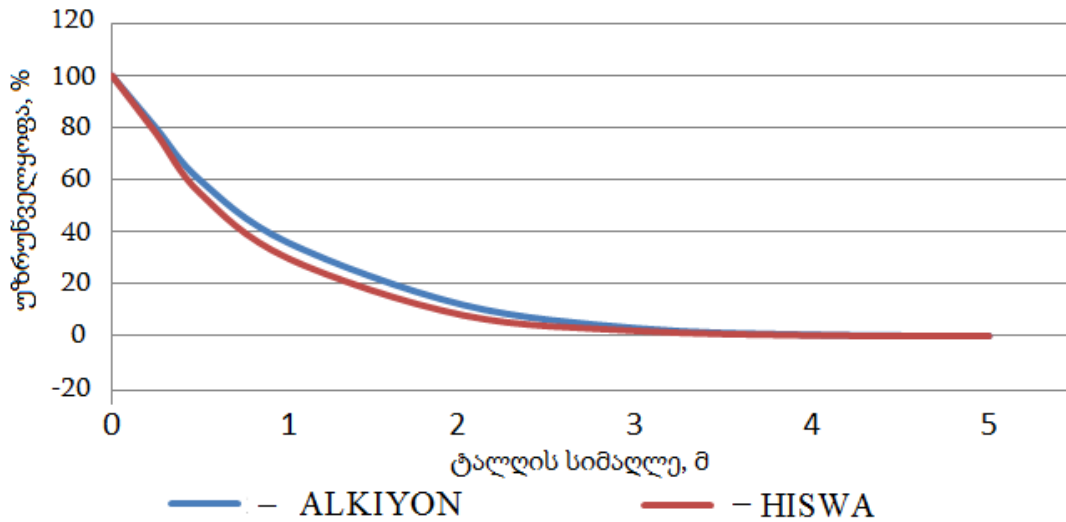
დაკვირვებების დროის შუალედი შემოსაზღვრულია, ამიტომ მიჩნეულ იქნა, რომ საპროექტო ტალღის მნიშვნელობა 1,2-ჯერ აჭარბებდეს საპროგნოზოს, რისთვისაც ჩატარდა დამატებითი გაანგარიშებები (ცხრ. 11).

**ცხრილი 11. ფოთის რეგიონის ტალღების საპროექტო მახასიათებლები.**

მიმართულება	ტალღის სიმაღლე(მ)	ტალღის პერიოდი(წმ)
ჩრდილო - დასავლეთი	2.4	5.5
ჩრდილო – დასავლეთი - ჩრდილოეთი	4.4	7.5
დასავლეთი	5.9	9.0
დასავლეთი-სამხრეთი-დასავლეთი	5.4	8.5
სამხრეთ - დასავლეთი	6.0	8.5

შავი ზღვის აღმოსავლეთ ნაწილში ქარებისა და ტალღების რეჟიმებზე დაკვირვებების რამდენიმე წყარო არსებობს. მათ შორის აღსანიშნავია ALKIYON–ს მონაცემთა ბაზა, რომელიც შეიცავს დიდი რაოდენობის ინფორმაციას მსოფლიოს მასშტაბით, დაკვირვებები მიღებულია გემებიდან 1960–1994 წლებში. პორტის ახლოს მიღებული მონაცემების შედარება,

რომელიც მიღებულია გაზომვებით და ჰოლანდიელი მეცნიერების მიერ 2000 წელს მოდელ HISWA-ს მემშვეობით გამოთვლილი შედეგები მოყვანილია ნახ.1.4-ზე. ტალღური რეჟიმის გამოთვლა გვიჩვენებს, რომ დაწეულია მაღალი ტალღების პროცენტი. დაწევა გამოწვეულია იმით, რომ მოდელი HISWA არ ითვალისწინებს პორტის ნაგებობების დიფრაქციულ ეფექტს.



ნახ. 1.4. ფოთის პორტთან გამოთვლილი და გაზომილი ტალღის სიმაღლეების შედარება

ქალაქი ფოთი გეოგრაფიული მდებარეობიდან გამომდინარე, ხშირად განიცდის აღმოსავლეთის ქარების გავლენას. ზაფხულში უმეტესად ქრის სამხრეთ-დასავლეთის, დასავლეთისა და ჩრდილო-დასავლეთის ქარები, მაშინ როცა ზამთარში ძირითადად ქრის სამხრეთ-აღმოსავლეთისა და ჩრდილო-აღმოსავლეთის ქარები. ცხრილ 12-ში მოყვანილია ქარების წლიური განაწილება (პროცენტებში) [19].

ცხრილი 12. ქარების წლიური განაწილება.

0	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 ÷	—	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 მინიმალური ცვლილებით. მოქცევების შედეგად წყლის დონის ცვლილება შეადგენს  $\approx 10$ სმ (მაქსიმუმ 20-25სმ), ხოლო ქარების ზემოქმედების შედეგად - 20-40სმ.

ცხრილ 13-ში წარმოდგენილია საშუალო თვიური, აგრეთვე მაღალი და დაბალი წყლის დონეების მნიშვნელობები, რომელიც გაზომილია 1993-1998 წლებში. მონაცემების წყაროა ფოთის მეტეოროლოგიური სადგური. განვლილი პერიოდის მონაცემები გვჩვენებს, რომ წყლის ყველაზე მაღალი დონე იყო პორტში 1998 წლის თებერვალში და იგი შეადგენდა +129სმ. ამ დროს პორტის ნაწილი დაიტბორა. როგორც ვხედავთ, რომ წყლის ძალიან მაღალი დონეა - 1,3მ; მაღალი დონე - 0,5მ; დაბალი დონე - 0,2მ; მინიმალური დონე - 0მ.

**ცხრილი 13. ზღვის დონეები ფოთის სანაპირო რეგიონში 1993-1998წ.).**

	საშუალო მნიშვნელობა(მ)		აბსოლუტური მნიშვნელობა(მ)	
	წყლის მაღალი დონე	წყლის დაბალი დონე	წყლის მაღალი დონე	წყლის 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.წელიწ.	0.47	0.18	1.29	0.01

მთავარი და სანაპირო დინებები იცვლება ქარებისა და მდინარეთა შენაკადების ცვლილებების შესაბამისად. პორტის მიდამოებში სანაპირო დინებები წარმოებს სამხრეთიდან დასავლეთით, მაშინ, როცა რიონის ჩრდილო ტოტსა და პორტს შორის დინება არის ჩრდილოეთიდან სამხრეთით. დინების ასეთი მიმართულება გამოწვეულია რიონის სამხრეთ

ტოტის მდებარეობით, რომელიც მიმართულია სამხრეთიდან დასავლეთით. პორტის რაიონში სანაპირო დინებების საშუალო სიჩქარე არის 10-25სმ/წმ დიპაზონში, რაც არ შეიძლება ჩაითვალოს ძლიერ დინებად, რომელიც ხელს შეუშლიდა ნავიგაციას ან სამშენებლო კონსტრუქციების პროექტირებას.

მასშტაბური გეომორფოლოგიური ცვლილებები ფოთის სანაპირო ზოლში დაიწყო მას შემდეგ, 1939 წელს რიონზე აგებულმა ჰიდროკვანძმა მდინარე გაყო სამხრეთ (ქალაქის) და ჩრდილოეთ ტოტებად. მდინარე რიონის სამხრეთ ტოტში შეიცვალა წყლისა და ნატანის ხარჯები და შესართავთან ახლოს გამოიწვია ნაპირის ეროზია. სანაპირო ზოლის გამოკვლევისათვის აუცილებელია მდინარის ორივე ტოტის ძირითადი პარამეტრების ცოდნა (წყლისა და ნატანის ხარჯები, ნატანის გრანულიმეტრიული ზომები, წყლის დონეები, დინების სიჩქარეები და ა.შ.). ჰიდროკვანძს აქვს საშუალება სამხრეთ და ჩრდილოეთ ტოტებში წყლის ხარჯების რეგულირების, მაგრამ წყალდიდობის დროს რეგულირება შეუძლებელია, რადგან სამხრეთის არხის გამტარუნარიანობა შეზღუდულია (არაუმეტეს 300-350მ<sup>3</sup>/წმ) [6,21].



**ნახ.1.5. ფოთის საზღვაო რეგიონში არსებული გეომორფოლოგიური და ჰიდროსაინჟინრო პრობლემები.**

- - საზღვაო სანაპირო ზოლი 1938 წელს; — საზღვაო სანაპირო ზოლი 2012 წელს.

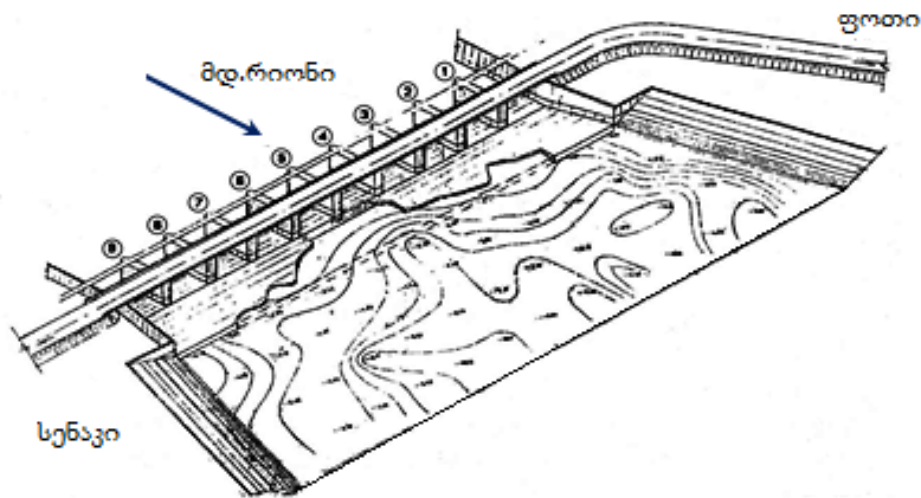
აქედან გამომდინარე, ამ ღონისძიებამ მართალია თვით ქალაქი იხსნა ხშირი დატბორვებისაგან, მაგრამ ქალაქის ნაპირზე შექმნა პლაჟწარმომქმნელი ნატანის აუნაზღაურებელი დეფიციტი. ზღვამ კატასტროფულად წარეცხა ფოთის სანაპირო ზოლი და ასეულობით მეტრით დაახვეინა უკან. ფოთის ნაპირზე აიგო მრავალი ბუნი და ტალღამრიდი, დაიყარა 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.მ<sup>3</sup>-დან 1,35 მლნ.მ<sup>3</sup>-მდე წელიწადში).

გარდა ამისა, პორტის ჩრდილოეთით მდ. რიონის გადაგდებამ დღემდე გამოუსწორებელი პრობლემა შეუქმნა უშუალოდ ფოთის პორტს, რადგან ჩრდილო-დასავლეთის შტორმებმა და სამხრეთით მიმართულმა ზღვის დინებებმა განაპირობა პორტში შესასვლელი არხისა და თვით პორტის შიგა აკვატორიის მოსილვები მდ. რიონის ნატანით.

1959 წელს რიონზე, ფოთის ჩრდილო-აღმოსავლეთით მეშვიდე კილომეტრზე, აშენდა წყალგამყოფი კვანძი კაშხალ-ხიდით და რაბ-რეგულატორით. მისი დანიშნულება იყო 500 მ<sup>3</sup>/წ-მდე მდინარის ხარჯების დაბრუნება ქალაქის ძველ კალაპოტში და ამ გზით ზღვის ნაპირზე ნატანის არსებული დეფიციტის (600 ათასი მ<sup>3</sup>/წლ.) შევსება. მაგრამ 200 მ<sup>3</sup>/წმ-ზე მეტი ხარჯების გაშვებისას, არხის კალაპოტის დაღექვისა და ზღვაში გასასვლელი კვეთის დეფორმაციების გამო, ქალაქი კვლავ დაექვემდებარა დატბორვებს. ამიტომ, გასული საუკუნის 80-იან წლებში, ფოთის ნაპირის აღსადგენად, დამონტაჟდა პულპასადენი, რომელიც ქალაქის არხის ჯებირის გაყოლებით ახდენდა სათავე ნაგებობასთან აკუმულირებული ინერტული მასალის ტრანსპორტირებას და დაყრას უშუალოდ ზღვის

ნაპირზე, მაგრამ ცვეთის გამო იგი მალე გამოვიდა მწყობრიდან და სხვადასხვა მიზეზით მისი აღდგენა ველარ მოხერხდა [21].

დროთა განმავლობაში მნიშვნელოვნად დაინგრა აგრეთვე თვით კაშხალ-ხიდის ქვედა ბიეფიც, რომელიც 2006 წელს ნაწილობრივ (უფრო ზუსტად დროებითი ღონისძიების გატარებით) იქნა რეაბილიტირებული „საქწყალპროექტის“ მიერ შესრულებული პროექტით. მაგრამ ეს პროექტი არ შეეხო რაბ-რეგულატორის ექსპლუატაციის და გამომდინარე აქედან ფოთის სანაპირო ზოლის აღდგენის საკითხებს.



**ნახ.1.6. ნგრევების კონტური მდ. რიონის წყალგამყოფი კვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფში.**

ამჟამად წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფში აღარ არსებობს რისბერმა, დამსხვრეულია წყალსაცემი ფილების უდიდესი ნაწილი, განსაკუთრებით, კაშხლის ცენტრალური 4, 5 და 6 მალეების წინ ამასთან. როგორც ჩატარებულმა დაკვირვებებმა გვიჩვენა წყალსაცემის დამსხვრეული ფილების უკან და უშუალოდ კაშხლის ტანის ცენტრალური ბლოკების ქვეშ გაჩნდა გამორეცხვის ღრმულები (ნახ.1. 6) [6].

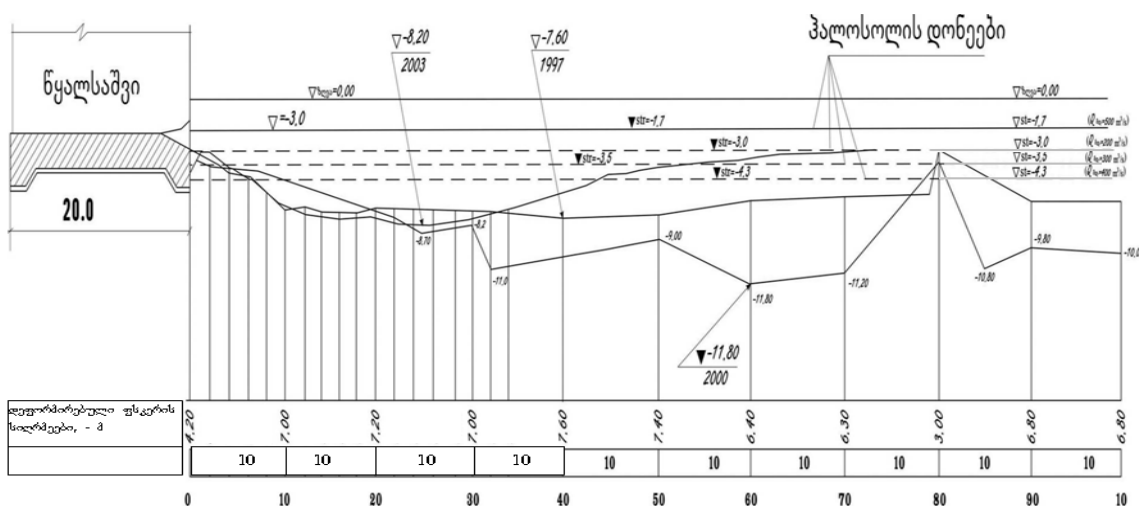
გასული საუკუნის 70-იანი წლების ბოლოს, როდესაც კაშხლის წინ წარეცხვის სიღრმეებმა მიაღწია 8-9 მ-ს და წარეცხვები უშუალოდ მიუახლოვდნენ რისბერმას, მდგომარეობა მიჩნეულ იქნა სახიფათოდ. ამასთან დაკავშირებით საქართველოს წყალთა მეურნეობის სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტის რეკომენდაციებით „საქწყალპროექტმა“ შეიმუშავა

კაშხლის ქვედა ბიეფის გამაგრების პროექტი. კაშხლიდან 80 მ დაშორებით, მდინარის კალაპოტის განივად, ჩასვეს ლითონის ნარანდი -3მ ნიშნულამდე, და რისბერმასა და ნარანდს შორის არსებული წარეცხილი ფსკერის შეივსო დიდი ზომის ლოდებით საპროექტო ნიშნულამდე. პროექტი 1982-1983 წწ. განახორციელა „კოლხიდმშენმა“, მაგრამ ამ ღონისძიებამ არა თუ შეაფერხა, არამედ კიდევ უფრო მეტად შეუწყო ხელი ქვედა ბიეფის წარეცხვისა და ნგრევის პროცესების განვითარებას.

ცხრ. 14-ში და ნახ.1.7-ზე ნაჩვენებია სხვადასხვა წელს კაშხლის ქვედა ბიეფის კალაპოტში დაფიქსირებული ფსკერის მინიმალური ნიშნულები (ანუ წარეცხვის მაქსიმალური სიღრმეების შესაბამისი ნიშნულები), ათვლილი ბალტიის ზღვის ეტალონური დონიდან: თავად შავი ზღვის ზედაპირი ქალაქ ფოთთან მერყეობს -0.61-დან +0.2 ნიშნულებს შორის.

**ცხრილი 14. ფსკერის ნიშნულები 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
დაშორება წყალსაცემიდან,მ	70	70	60	65	60	70	80	45	40	25	25



**ნახ.1.7. დეფორმირებული ფსკერის ნიშნულები და ჰალოსოლის დონეები მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფში; - - - ნარანდის მოწყობამდე; ——— ნარანდის მოწყობის შემდეგ.**

თუ ვისარგებლებთ დაბალდაწნევიანი კაშხლების ცნობილი სპეციალისტის ბ. სტუდენიჩნიკოვის რეკომენდაციებით და ზოგადად შევაფასებთ კაშხლის ქვედა ბიეფის კონსტრუქციულ გადაწყვეტილებების დადებით და უარყოფით მხარეებს, ადვილად დავრწმუნდებით, რომ თითქმის არც ერთი ნიშნით კაშხლის ქვედა ბიეფი არ პასუხობდა ჰიდრავლიკური თვალსაზრისით „წარმატებულად“ დაპროექტებული კაშხლებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს [65].

ჩვენ შევეცადეთ თეორიულად შეგვეფასებინა კაშხლის ქვედა ბიეფის წარეცხვების მნიშვნელობები. ეს შეფასება ჩატარდა შ. გაგოშიძის მიერ შემუშავებული შემდეგი პოსტულატების საფუძველზე [7]:

ა) წყნარ რეჟიმში ( $Fr < 1$ ) მდინარის ფსკერის წარეცხვის მაქსიმალური სიღრმეები ემთხვევა მდინარის ამა თუ იმ კვეთში თანაბარი მოძრაობის სიღრმეებს, განსაზღვრულს შეზის კანონის საფუძველზე წყლის ზედაპირის მოცემული ნიშნულებისა და ქანობების მეშვეობით;

ბ) წარეცხვის ეს მაქსიმალური სიღრმეები მყარდება წყალსაცემიდან იმ მანძილზე, რა მანძილიც საჭიროა მისგან ჰორიზონტალურად გამოდინებული ტურბულენტური ჭავლის სიჩქარის შესამცირებლად ქვედა ბიეფში ნაკადის თანაბარი მოძრაობით განსაზღვრულ სიჩქარემდე.

ამ პოსტულატებით სარგებლობისას გათვალისწინებულ იქნა, 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 [30]. ამასთან, სიმქისის კოეფიციენტი ნარანდის ჩასმამდე მიჩნეულ იქნა  $n = 0.04$ , ნარანდის ჩასმის შემდეგ -  $n = 0.06$ . რაც შეეხება მდინარის სხვადასხვა ხარჯის შესაბამის მაქსიმალური სიღრმეების დაშორებას წყალსაცემიდან, ისინი გაანგარიშებულ იქნა გ. აბრამოვიჩის დამოკიდებულებით [30,69] :

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

სადაც  $h_0$  და  $V_0$  ტურბულენტური ჭავლის სიღრმე და სიჩქარეა წყალსაცემი ფილის თავზე;  $V_{j\lambda}$  – პირველი პოსტულატის საფუძველზე შეზის დამოკიდებულებით დადგენილი მაქსიმალური სიღრმის შესაბამისი სიჩქარე მდინარის კალაპოტის ქვედა ბიეფში.

**ცხრილი 15. მდ. რონის წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფის ჰიდრაულიკური მახასიათებლები**

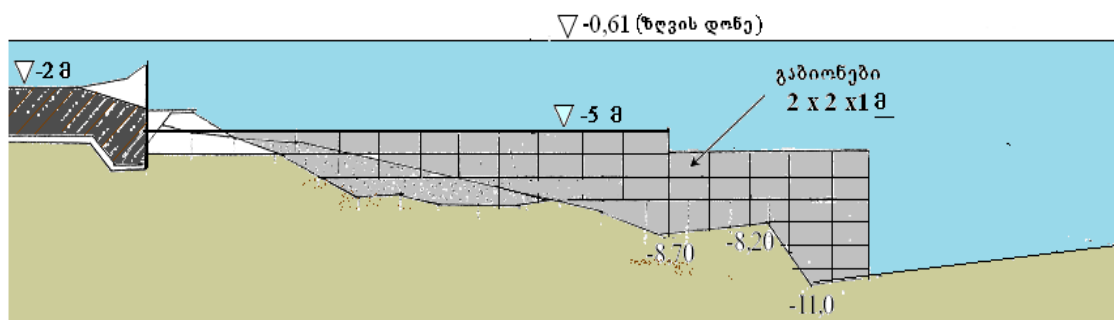
ხარჯი, მ <sup>3</sup> /წმ	ნაკადის სიღრმე წყალსაცემის თავზე, მ	სიჩქარე წყალსაცემის ბოლოს $V_{\lambda}$ , მ/წმ	თავისუფალი ზედაპირის ქანობი, $\times 10^4$	ნარანდის ჩასმამდე				ნარანდის ჩასმის შემდეგ წარცხვის ნიშნული
				ნაკადის სიღრმე $h_{j\lambda}$ , მ	ნაკადის სიჩქარე $V_{j\lambda}$ , მ/წმ	ფსკერის წარცხვის ნიშნული, $V_{ფს}$	დაშორება წყალსაცემის 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	2.50	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

ამ მიდგომამ, განსხვავებით გარეცხვების საანგარიშოდ არსებული დიდი რაოდენობის დამოკიდებულებებისგან, შეიძლება ითქვას თითქმის ზუსტად ასახა კალაპოტის გარეცხვის ის მაქსიმალური სიღრმეები და წყალსაშვიდან მათი დაშორების კოორდინატები, რომლებიც დაფიქსირებულია „საქწყალპროექტის“ მიერ მოწოდებულ წარცხვების ამსახველ გრაფიკულ მასალებზე. კერძოდ, ცხრილ 15-ის მიხედვით, ნარანდის მოწყობამდე კაშხალთან მიმდებარე მდინარის კალაპოტის გარეცხვის მაქსიმალური ნიშნული  $\nabla_{ფს} = -9,4$  მ (რომელიც შეესაბამება წყალდიდობის 3610 მ<sup>3</sup>/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.

ამგვარად, ეჭვს არ იწვევს ის გარემოება, რომ მდინარე ყოველთვის მოითხოვს საკუთარ სიღრმეს და რომ კაშხლის ქვედა ბიეფის კალაპოტის თავდაპირველი ფსკერის ნიშნული  $\nabla_{\text{ფსკ.}} = -3$  მ აუცილებლად უნდა დაქვემდებარებოდა წარეცხვებს, რაც არ იქნა გათვალისწინებული.

2006 წელს მსოფლო ბანკის დაფინანსებით „საქწყალპროექტმა“ შეიმუშავა და განახორციელა კაშხლის ქვედა ბიეფის გამაგრების პროექტი გაბიონების მეშვეობით (ნახ. 1.8):



**ნახ. 1. 8. გაბიონების განთავსების სქემა მდ. რიონის წყალგამყოფი კაშხლის ქვედა ბიეფში (სს საქწყალპროექტი);**

წარეცხვის ორმოები -5 მ-მდე შეივსო გაბიონებით, მაგრამ ამ ღონისძიების შემდეგ კაშხლის ქვედა ბიეფში არ ჩატარებულა ნატურული დაკვირვებები და უცნობია, თუ რა ეფექტი მოახდინა ამ ღონისძიებამ.

ამგვარად, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ მდ. რიონზე გატარებულმა კაპიტალურმა საინჟინრო ღონისძიებებმა ფაქტობრივად არა თუ ვერ გაამართლა თავისი პირდაპირი დანიშნულება დაეცვათ ქალაქ ფოთის ნაპირი წარეცხვებისაგან, არამედ ან გამოვიდა მწყობრიდან ან აღმოჩნდა დანგრევის საფრთხის წინაშე.



### 1.3. მდინარე ჭოროხის ჰიდროლოგიური დახასიათება მის აუზში ჰესების კასკადის მშენებლობის გათვალისწინებით

მდინარე ჭოროხი სათავეს იღებს თურქეთში, ოკუს-ბადაცაგის მთებში ზღვის დონიდან 2700 მ სიმაღლეზე და ჩაედინება შავ ზღვაში, ბათუმიდან სამხრეთ-დასავლეთით 6 კმ-ის დაშორებით. მდინარის საერთო სიგრძე 438 კმ-ია (საქართველოს ფარგლებში - 26 კმ). შესართავთან იკეთებს დელტას, რომელიც მოიცავს სანაპირო ტერიტორიას საქართველო-თურქეთის სახელმწიფო საზღვრიდან მდინარე ყოროლისწყლის შესართავამდე, დელტის ფართობია 85 კმ<sup>2</sup>.



*ნახ. 1.9. მდ. ჭოროხის შესართავი უბანი*

საქართველოს შავიზღვის აუზის მდინარეთაგან მდ. ჭოროხს ვერცერთი სხვა მდინარე ვერ გაუტოლდება წყალშემკრები აუზის ფართობის (22100 კმ<sup>2</sup>, მთ შორის საქართველოს ტერიტორიაზე - 2 090 კმ<sup>2</sup>) მიხედვით. იგი გამორჩეულია, აგრეთვე, აუზის საშუალო დახრილობით-30‰, საქართველოს ტერიტორიაზე მდინარის საერთო ვარდნა 56 მ-ს შეადგენს. სიგანე იცვლება 48 მ-დან 120 მ-მდე. სიღრმე 1.5–4.8 მ-ია. ნაკადის საშუალო სიჩქარე მერყეობს 0.7–2.5 მ/წმ ფარგლებში.

დონეების წლიური რყევადობის ამპლიტუდა სოფ. ერგესთან 686 სმ-ს, ხოლო ს. მარადიდთან 793 სმ-ს აღწევს. მდ. ჭოროხის აუზში საშიში ჰიდროლოგიური მოვლენები არ ფიქსირდება. საშუალო წლიური ხარჯები ს. ერგესთან იცვლება 159–409 მ<sup>3</sup>/წმ ფარგლებში.

**ცხრილი 16. მდ. ჭოროხის მაქსიმალური ჩამონადენის მახასიათებლები**

მდინარე- ჰიდროპოსტი	მდინარის ხარჯი მ <sup>3</sup> /წმ	Cv	Cs	სხვადასხვა უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯები მ <sup>3</sup> /წმ				
				1	2	5	10	25
ჭოროხი-ს. ერგე	1540	0.50	1,7	4210	3750	3070	2560	1888

**ცხრილი 17. მდ. ჭოროხის 50%-იანი უზრუნველყოფის ჩამონადენი.**

მდინარე- ჰიდრო- პოსტი	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	უზრუნველყოფის სეზონი		ლიმიტირებუ სეზონი	
													თვეებ	%	თვეები	%
ჭოროხი- ს. ერგე	3.8	5.1	8.1	16.8	20.7	13.8	6.7	3.9	4.1	5.9	6.0	5.1	III-V	45.6	VI-VIII	24.4

1978 წლის მონაცემების მიხედვით დადგენილია, რომ საქართველოს ტერიტორიიდან მდინარეებს შავ ზღვაში წელიწადში საშუალოდ 30 მლნ ტონა მყარი ნატანი ჩაჰქონდა და აქედან 17 მლნ ტონა მარტო ჭოროხზე მოდიოდა, რაც მთლიანი ნატანის 57%-ს შეადგენდა [12].

ცხრილ 18-ში მოცემულია მაქსიმალური ხარჯების მნიშვნელობები სამი ჰიდროსადგურის წყალსაცავებისთვის.

**ცხრილი 18. მაქსიმალური ხარჯები ჰიდროსადგურებზე**

ჰიდრო- სადგურის დასახლება	წყალშემკრები აუზის ფართობი, კმ <sup>2</sup>	დაკვირვების ხანგრძლივობა წელი	განმეორებადობის სიხშირე						
			2.33	5	10	25	50	100	500
ერგე	21713	41	1248	1588	1814	2099	2310	2520	3009
კარსიკოი	19654	37	1038	1373	1610	1927	2177	2439	3012
ალტინსუ	18326	29	878	1085	1214	1369	1480	1588	2846

აჭარის სანაპირო ზონა და, მათ შორის კახაბერის ვაკე, ძირითადად აგებულია მდ. ჭოროხის ალუვიონით. ბუნებრივ პირობებში, ზღვიურ შესართავში მოხვედრილი მდ. ჭოროხის მყარი ნატანი ქმნიდა პლაჟმექმნელ ნაპირგასწვრივ ნაკადს, რომელიც გაბატონებული, დასავლეთის მიმართულების შტორმების ზემოქმედებით გადაადგილდებოდა ჩრდილოეთისაკენ და აღწევდა მდ. ნატანების შესართავამდე .

სანაპირო ზოლის დინამიკურობა ტალღის რეჟიმზეა დამოკიდებული. მკვებავი მდინარეების მიერ მოტანილი დანალექები სანაპირო ზოლზე

მოძრაობენ ტალღის ძალისა და მიმართულების შესაბამისად. აჭარის ტერიტორიაზე დინების სიჩქარე საშუალოდ 0.3-0.5 მ/წმ უდრის, ხოლო ძლიერი ქარის დროს იგი 1 მ/წმ-ს აღწევს. ხოლო ტალღის მიმართულება ძირითადად შემდეგნაირია:

დასავლეთით-57%, ჩრდ-დას-18% და სამხ-დას-15%.

**ცხრილი 19. ტალღური მახასიათებლები აჭარის სანაპირო ზოლში**

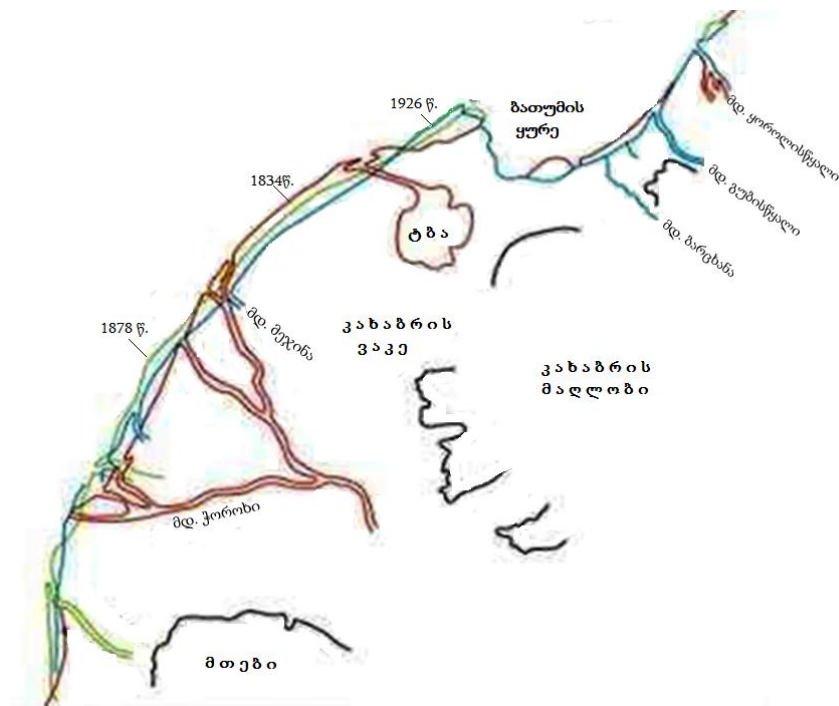
ტალღები ბალებში	ტალღის საშუალო პარამეტრები			ტალღის განმეორებადობა მიმართულების მიხედვით, დღე-ღამე					
	სიღრმე $\bar{h}$ , მ	პერი- ოდი $\bar{\tau}$ , წმ	ტალღის სიგრძე $\bar{\lambda}$ , მ	სდ	დ	ჩდ	ჩ	ჩა	შტილი
0	0	0	0	-	-	-	-	-	91
1	0.06	1.4	3.0	5.1	23.8	16.7	17.2	3.7	-
2	0.23	1.8	5.0	8.5	50.0	27.0	18.0	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	-	-	-

**ცხრილი 20. ტალღის პარამეტრები სხვადასხვა უზრუნველყოფის სიმაღლეებისთვის შპს „ნაპირდაცვას“ მონაცემებით**

ზღვის სიღრმე, მ	ტალღის სიგრძე $\lambda$ , მ	პერიოდი $\tau$ , წმ	ტალღის სიმაღლე, მ		
			$h_{1\%}$	$h_{5\%}$	$h_{13\%}$
ღრმა წყალი >60	150	5,0	12,0	9,8	7,8
20	136	4,0	9,2	7,5	6,2
15	119	4,0	9,0	7,4	6,1
10	112	3,9	-	-	-
მსხვრევის სიღრმე	-	6,8	14,0	12,5	10,2

1832 წლის კარტოგრაფიული მასალების მიხედვით, მდინარე ჭოროხი ზღვაში ორი ძირითადი ტოტით ჩაედინებოდა, სამხრეთით - თანამედროვე შესართავის სიახლოვეს და ჩრდილოეთი - ადღიაში,

მდინარე მეჯინის შესართავთან. ორივე ტოტი ქმნიდა ფართო დელტებს განშტოებებით, რაც იმდროინდელი ჭოროხის წყალუხვობასა და აქტიურ ჰიდროლოგიურ რეჟიმზე მეტყველებს. 1890 წლის რუკაზე ჩრდილოეთი ტოტის სისტემა გაუქმებულია და მის ადგილზე გამოსახულია მდინარე მეჯინისწყლის შესართავი, რაც იმას ნიშნავს, რომ ამ დროისათვის ჩრდილოეთ ტოტს უკვე დაკარგული აქვს კავშირი მდინარე ჭოროხის ძირითად სისტემასთან [13, 25, 26, 27].



**ნახ. 1.10. კახაბრის ვაკის განვითარების ეტაპები (დ. ი. სვიშვესკი 1939 წ.)**

შესაბამისად, ადღია-ბათუმის სანაპიროზე ჩამოყალიბდა ნაპირშემქმნელი ნატანის მწვავე დეფიციტი. 1930-80 წლებში ადღია-ბათუმის სანაპირო ზოლში წაირეცხა 40 ჰა-ზე მეტი ტერიტორია [13,25].

70-იან წლებში, მდ. ჭოროხის დელტის მარცხენა ნაპირის გასწვრივ წყალდიდობის პერიოდში სავარგულების დატბორვისგან დასაცავად, მოეწყო ნაყარი დამბა, რამაც შესართავი საბოლოოდ დააფიქსირა წყალქვეშა კანიონის სათავეებთან. შედეგად, მდინარის გამოტანილი მყარი ნატანის 90% და მეტი იკარგებოდა წყალქვეშა კანიონის სიღრმეებში. ამავე პერიოდიდან მდ. ჭოროხის კალაპოტში ფუნქციონირება დაიწყო

ინერტული მასალების ქარხანამ, რომლის წარმადობა შეადგენდა დაახლოებით 0,5 მლნ მ<sup>3</sup>/წ, ძირითადად მოიპოვებოდა პლაჟმემქნელი მსხვილფრაქციული მასალა.

შესაბამისად, მკვეთრად შემცირდა ზღვის სანაპირო ზონაში მოხვედრილი მასალის როგორც მოცულობა, ასევე მისი სიმსხო. კერძოდ, ნატანის საშუალო დიამეტრი 1979 წლიდან 2000 წლამდე 53 მმ-დან 18 მმ-მდე შემცირდა [13,25].

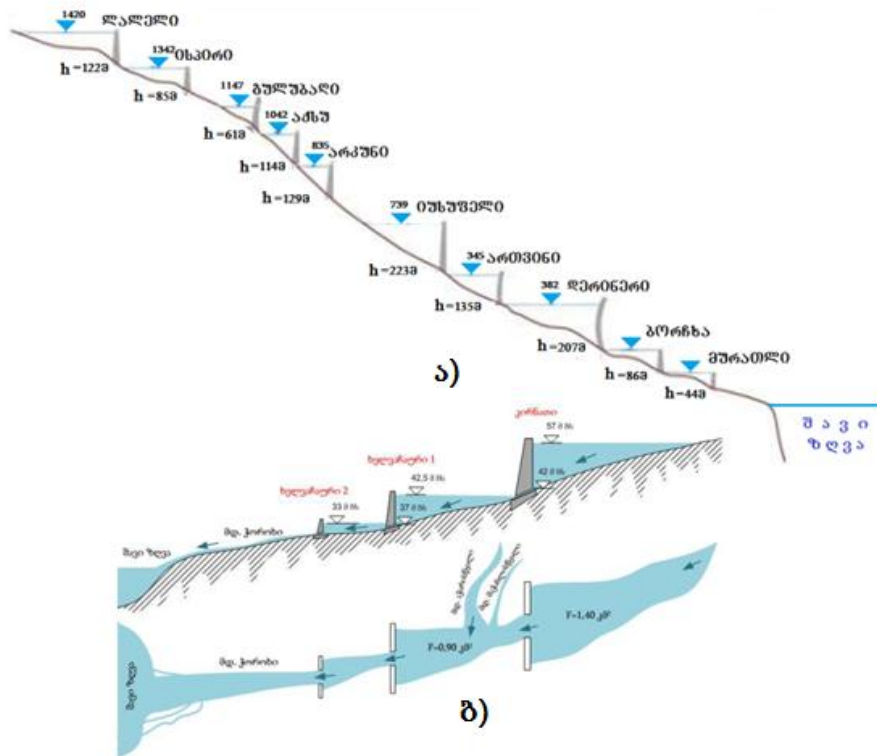
ჭოროხის დელტის ევოლუციას თან ახლავდა ღრმა კანიონების და წყალქვეშა ალუვიური მარაოს წარმოქმნა. დელტისებური წყალქვეშა მარაო ზღვაშია შეჭრილი (25-30 კმ). მარაოს ჩრდილო მხარეს რიფისა და კონტინენტური ფერდობის სიღრმე არ აღემატება 3-4 მ.

მდ. ჭოროხის თურქეთის ტერიტორიაზე მოქცეული მონაკვეთის ენერგეტიკული პოტენციალის ათვისების მიზნით მოწყობილია ან და მშენებლობის პროცესშია დაახლოებით 27-მდე კაშხალი (ნახ. 1.6), მათ შორის ყველაზე მასშტაბურია დერინერის 249 სიმაღლის კაშხალი, რომლის მშენებლობა დაიწყო 1998 წელს, მდინარის კალაპოტი გადაკეტეს 2005 წელს, ხოლო 2012 წელს დაიწყო 1969 მლნ მ<sup>3</sup> მოცულობის წყალსაცავის ავსება, ექსპლუატაციაში შევიდა 2013 წელს. ცხადია, მაღლივი თაღოვანი კაშხლების მშენებლობის შედეგად წყალშემკრებ აუზში წარმოქმნილი 5,3 მლნ კუბური მეტრი მყარი ნატანის მნიშვნელოვანი ნაწილი ყოველწლიურად ილექება ამ კაშხლების ზედა ბიეფებში [26, 27].

საქართველოს საზღვართან ყველაზე ახლოს მდებარე მურათლის კაშხლის აშენების შემდეგ ნატანის ტრანსპორტირება პრაქტიკულად აღარ ხდება.

თურქეთის ტერიტორიაზე არსებული, მშენებარე და საპროექტო წყალსაცავების მოცულობების გათვალისწინებით დღეს არსებული მდგომარეობა გაგრძელდება 300-350 წლის განმავლობაში და შესაბამისად შავი ზღვის სანაპირო ზოლი ამ პერიოდის განმავლობაში ვერ მიიღებს

მდ. ჭოროხის მყარ ნატანს, რაც დაკავშირებულია მნიშვნელოვან ნეგატიურ ზემოქმედებასთან.



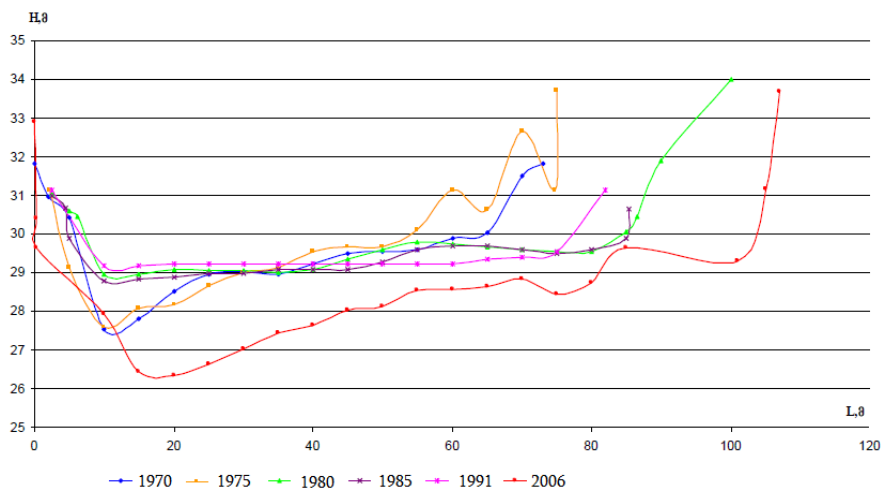
ნახ. 1.11. მდ. ჭოროხზე მოქმედი და მშენებარე კაშხლების სქემატური ჭრილები.  
 ა) თურქეთის ტერიტორიაზე; ბ) საქართველოს ტერიტორიაზე

საქართველოს ფარგლებში მურათლის კაშხლის ქვედა ბიეფში თხევადი ხარჯი საშუალოდ შეადგენს 200 მ<sup>3</sup>/წმ. აქ შედის მდ. ჭოროხის ორი შენაკადის მდ. აჭარისწყლისა და მაჭახელას საშუალო წლიური ხარჯებიც,  $\approx 52$  მ<sup>3</sup>/წმ და 18 მ<sup>3</sup>/წმ. ამ შენაკადების პლაჟმექმნელი ნატანის ჯამური მოცულობა არ აღემატება 80 000 მ<sup>3</sup>-ს წელიწადში. თუმცა ეს ნატანიც ვერ აღწევს ზღვამდე. თხევადი ხარჯის დარეგულირების გამო მდინარეს აღარ აქვს ნატანის ტრანსპორტირებისათვის საჭირო პოტენციალი. შენაკადების ნატანი ილექება მდ. ჭოროხის კალაპოტში მათი შესართავების უბნებზე [25].

2002 წლიდან მდ. ჭოროხის კალაპოტში წარსულში აკუმულირებული ნატანის ტრანსპორტირება ზღვისკენ ხდებოდა მხოლოდ მურათლის წყალსაცავიდან ჭარბი წყლის გაშვების პერიოდში. 2003-2007 წლებში მდინარეს შესართავის რაიონში გამოჰქონდა კალაპოტში აკუმულირებული მასალის ნაწილი, რომელიც დელტის წარეცხვის პროდუქტთან ერთად

ქმნიდა ნატანის ნაპირგასწვრივ ნაკადს-საკვლევი რაიონის სანაპიროზე წარეცხვის ფართმა შეადგინა 5 ჰა. უნდა აღინიშნოს, რომ ამავე პერიოდში წარეცხვის რაოდენობრივი მხარე დელტის სამხრეთით (დელტის სამხრეთი ფლანგი და გონიო) პრაქტიკულად არ შეცვლილა.

2007-2009 წლებში მდ. ჭოროხის კალაპოტში დარჩა მხოლოდ ეკოლოგიური ხარჯი. მიმდინარეობს შესართავის წინა წყალზედა და წყალქვეშა სივრცის გადამუშავება, ხოლო კანიონი საკმაოდ მოშორებულია სანაპიროს ამჟამად აქტიურ ზონას (შესაძლოა ხვდებოდეს არაპლაჟმექმნელი წვრილფრაქციული მასალა) და ნეგატიურ გავლენას ვერ ახდენს ნაპირფორმირების პროცესზე.



**ნახ. 1.12. მდ. ჭოროხის კალაპოტის დინამიკა სოფ. ერგესთან [25]**

2007-2009 წ.წ. გონიო-ბათუმის სანაპირო ზონის მატებამ შეადგინა დაახლოებით 5 ჰა. კიდის ხაზის ცვალებადობა არაერთგვაროვანია სხვადასხვა უბნებზე. მიუხედავად წყალზედა პლაჟის ფართის ჯამური მატებისა, წყალქვეშა ფერდის გასწვრივ (ადლია-ბათუმი) დაფიქსირდა გადარმავეების საგანგაშო პროცესი 5-10 მ სიღრმემდე, რომლის სიდიდე მერყეობდა 1,0-1,5 მ-დან 2,0-3,0 მ-მდე (ბათუმის ბულვარის შესასვლელი). გადარმავეების ინტენსიური ზრდა ხდებოდა 2003 წლიდან. ამის მიზეზი შეიძლება ყოფილიყო როგორც სანაპირო ნატანის დეფიციტი, ასევე წყალზედა პლაჟის მასალის საშუალო დიამეტრის შემცირება.

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

**ცხრილი 21. პლაჟების ფართობების ცვლილება 1980 წელთან შედარებით (კა)**

წელი რაიონი	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
ადღია	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

1997-2007 წლებში ასევე მკვეთრად იზრდება ძლიერი შტორმების წილი მათ საერთო რაოდენობაში.

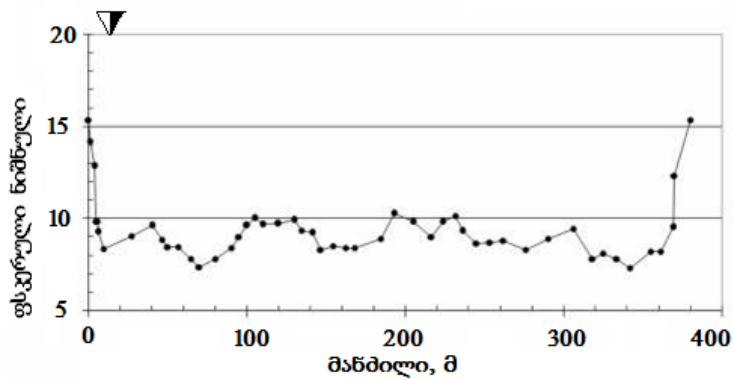
**ცხრილი 22. ძლიერი შტორმების განაწილება წლების მიხედვით**

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

დარეგულირებული მდინარის ტრანსპორტუნარიანობის შემცირება კარგად აისახა ჭოროხის ქვემო წელში გონიოს ხიდთან (ნახ.1.13). კალაპოტის ცენტრალურ ნაწილში ჩამოყალიბდა ალუვიონის აკუმულაციის მდგრადი ზონა, რომლის გარეცხვა და ზღვის სანაპირო ზონაში მოხვედრა პრაქტიკულად გამორიცხულია.

საქართველოს ტერიტორიაზე, ჭოროხის ბოლო 26 კმ-იან მონაკვეთზე მიმდინარეობს კალაპოტური ტიპის ჰესების კასკადის მშენებლობა, რომლის შემადგენლობაში შედის კირნათის, ხელვაჩაური I-ის და ხელვაჩაური II-ის ჰესები. ამ მოვლენებმა აჭარის საზღვაო სანაპიროს გონიო-ბათუმის მონაკვეთის ეროზიის პრობლემა განსაკუთრებით აქტუალური გახადა. რადგან ამ ჰესების ექსპლუატაციაში შესვლის შემდგომ მდინარე ჭოროხი აჭარისწყლისა და მაჭახელადანაც ვეღარ მიიღებს ფსკერულ ნატანს, რომელიც  $\approx 28000\text{მ}^3/\text{წლ}$  (ჭოროხის ფსკერული ნატანის დაახლოებით 6%) შეადგენს.





ნახ. 1.13. მდ. ჭოროხის კალაპოტის განივი ჭრილი გონიოს ხიდთან 1999 წ[26].

მდ. ჭოროხის ზღვიური შესართავის რაიონში უშუალოდ მდ. ჭოროხის შესართავის მარცხენა ნაპირის გასწვრივ ზღვის სანაპირო ზონის წარეცხვის სიგანემ 1984 -დან -2007 წლამდე შეადგინა 180-185მ. 2007-2011 წლებში პლაჟის მატებამ ნაპირსამაგრი სამუშაოების შედეგად შეადგინა დაახლოებით 50-55 მ.

მარჯვენა ნაპირის გასწვრივ წარეცხვის მასშტაბები ყველაზე შთამბეჭდავია: 1984-2001 წლებში წარეცხილია 120 მ სიგანის პლაჟი, 2001-2007 წლებში - 125 მ, საშუალოდ 10-11 მ-ს წელიწადში. ცხადია, ამ გარეცხვებში იგულისხმება შესართავის დროებითი მორფოლოგიური ფორმის წარეცხვის მონაცემებიც.

2009-2012 წლებში ადლიის სანაპიროზე მდ. ჭოროხის კალაპოტიდან შეტანილ იქნა 100 ათასი მ<sup>3</sup> ინერტული მასალა, რის შედეგად, პლაჟი აღდგა ადლიის ნაპირისათვის ოპტიმალურ პარამეტრებში და სიგანეში მიაღწია 30-დან 50 მ-მდე. ხოლო უფრო ჩრდილოეთით, ბათუმისაკენ, პლაჟების მატების ტემპი კლებულობს და ამ პერიოდში წელიწადში საშუალოდ 2-7მ შეადგინა. ამ ღონისძიების ეფექტურობაზე ინსტრუმენტალური დაკვირვება არ ხდება.

ამრიგად, მიმდინარეობს წინა წლებში მდ. ჭოროხის ზღვისკენ გაწეული დელტის აქტიური გადაფორმირების პროცესი. წარეცხილი მასალის ერთმა ნაწილმა უზრუნველყო გონიოს პლაჟების ფართის

დროებითი ზრდა, ხოლო მეორე ნაწილი მონაწილეობს ადლია-ბათუმის ნაპირფორმირების პროცესში.

**ჭოროხის შესართავიდან 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 პლაჟური მასალის საშუალო დიამეტრი შეადგენს 32 მმ-ს.

გონიოს ზღვის კიდის ხაზის დინამიკა არაერთგვაროვანია მის სხვადასხვა უბანზე. კერძოდ, უშუალოდ მდ. ჭოროხის შესართავი უბნის საზღვართან 1984-2001 წლებში გარეცხვის სიგანეა დაახლოებით 60 მ, 2001-07-ში 33-35 მ; წარეცხვის ჯამური მაჩვენებელი შეადგენს  $\approx 95$  მ.

2007-2011 წლებში გონიოს სამხრეთ და ცენტრალურ ნაწილში პლაჟის სიგანე მომატებულია 4-10 მ.

მთლიანობაში, გონიოს პლაჟები ქმნის მდგრადობის ილუზიას, თუმცა სხვადასხვა პერიოდის მასალის შედარებამ კარგად ასახა ამ რაიონში მიმდინარე ნეგატიური, წარეცხვის პროცესები [25].

## თავი 2. წყლის ტალღური მოძრაობათა კლასიკური თეორიის ელემენტები და სანაპირო არეებში ტალღურ მოძრაობათა გაანგარიშების არსებული მეთოდების მიმოხილვა

ზღვის ფსკერის ტოპოგრაფია გადამწყვეტ გავლენას ახდენს ტალღების ფორმირებაზე სანაპირო არეებში, იწვევს მათი სიგრძისა და სიმაღლის ტრანსფორმაციას, რეფრაქციას, მსხვრევას, არეკვლას და ა. შ. ტალღური მოძრაობის ამ მახასიათებლების დადგენა აუცილებელია სანაპირო ზოლის დეფორმაციების პროგნოზირებისათვის, კონტინენტალურ შელფზე და სანაპირო ხაზის სიახლოვეს ჰიდროტექნიკური მშენებლობის განსახორციელებლად, გარემოს დაცვით ღონისძიებათა გასატარებლად.

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 შეუხელებელი 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 [84].

საინჟინრო დაპროექტებაში ყველაზე ფართო გავრცელება ჰპოვა ტალღების ტრანსფორმაციის თეორიამ (ენერგეტიკულმა მეთოდმა), რომელიც დახრილი ფსკერის სხვადასხვა კვეთში ტალღების პარამეტრებს შორის კავშირს ამყარებს ერთი სიღრმიდან მეორეზე ტალღების მიერ გადატანილი ენერგიის ნაკადის მუდმივობის კანონის საფუძველზე. ენერგეტიკული მეთოდის შემუშავებაში დიდი წვლილი

მიუძღვით რელეის, მიშს, ო. ბრინეს, ბრეტშნაიდერს, დინს, მეზონს, ვ.მ. მაკავეევს, ვ. ვ. შულეიკნს, ი. მ. კრილოვს და სხვ [29, 36, 42, 43, 63, 71, 89].

ამ მოდელების შემუშავებასა და დახვეწაში გადამწყვეტი როლი შეასრულეს ჯონსონის, უნას, მიშის, ტეილორის, ლონგე-ხიგინსისა და სტიუარტის, ფილიპსის, თ. გ. ვოინიჩ-სიანოჟეცკისა და სხვათა პუბლიკაციებმა [40, 42, 45, 46, 47, 49, 50]. გააჩნია რა დიდი ოპერატიული შესაძლებლობები საინჟინრო ამოცანების გადაწყვეტისას, ტალღების ტრანსფორმაციის თეორიის გამოყენების არე ამავ დროს ერთგვარად შეზღუდულია, რადგან მას საფუძვლად უდევს სითხის ბრტყელი ჰორიზონტალური შრის ზედაპირზე ტალღების გავრცელების წრფივი (ან არაწრფივი) თეორიის შედეგები, რის გამოც მასში ფსკერის დახრის კუთხე ან საერთოდ არ ფიგურირებს, ან მხოლოდ ხელოვნურადაა შეყვანილი.

## **2.1. მუდმივი და ცვალებადი სიღრმის მქონე წყლის ზედაპირზე წრფივ ტალღურ მოძრაობათა ამსახველი ძირითადი განტოლებები და სასაზღვრო პირობები**

სითხის თავისუფალ ზედაპირზე აღძრული გრავიტაციული ტალღების მოძრაობა განეკუთვნება პოტენციალურ მოძრაობათა კლასს, რაც საშუალებას გვაძლევს ტალღური მოძრაობის მახასიათებლების განსაზღვრა დავიყვანოთ მხოლოდ ერთი პარამეტრის – სიჩქარეთა ველის  $\varphi$  პოტენციალის განსაზღვრაზე. კერძოდ, თუ გავითვალისწინებთ კავშირს სიჩქარეთა ველის პოტენციალსა და სითხის ნაწილაკების სიჩქარეთა მდგენელებს შორის შესაბამისად ჰორიზონტალურ  $x$ ,  $y$  და ვერტიკალურ  $z$  ღერძებზე [85].

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad \omega = \frac{\partial \varphi}{\partial z}; \quad (2.1)$$

სითხის უწყვეტობის განტოლება დაიყვანება ლაპლასის განტოლებაზე

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2.2)$$

რომელიც სრულდება სითხის მიერ დაკავებულ ნებისმიერ წერტილში.

სითხის შემომფარგვლელ უძრავ  $B$  ზედაპირზე (ფსკერზე, კედლებზე) სრულდება ამ ზედაპირის მიმართ სიჩქარის ნორმალური მდგენელის ნულთან ტოლობის პირობა, რომელიც პოტენციალის საშუალებით გამოისახება დამოკიდებულებით

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad B \text{ ზედაპირზე} \quad (2.3)$$

სადაც  $n$  უძრავი მყარი ზედაპირის ნორმალია.

სითხის თავისუფალ (ტალღურ) ზედაპირზე სრულდება ორი სასაზღვრო პირობა: დინამიკური – გამოხატული ლაგრანჟ-ბერნულის ინტეგრალის სახით და კინემატიკური, რომელიც ითვალისწინებს იმ გარემოებას, რომ სითხის თავისუფალ  $z = \eta(x, y, t)$  ზედაპირზე მდებარე ნაწილაკი, ტალღური მოძრაობისას მუდამ ამავე ზედაპირზე რჩება. მათემატიკურად ეს პირობები შემდეგი სახით ჩაიწერება

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\Delta \varphi)^2 + g\eta = -\frac{p}{\rho}, \quad \text{როცა} \quad z = \eta \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \varphi \nabla \eta - \frac{d\varphi}{dz} = 0, \quad \text{როცა} \quad z = \eta \quad (2.5)$$

სადაც  $t$  დროა,  $g$  – თავისუფალი ვარდნის აჩქარება;  $z$  – ტალღის ზედაპირის ვერტიკალური კოორდინატი;  $p$  – წნევა სითხის თავისუფალ ზედაპირზე;  $\rho$  – სითხის სიმკვრივე;  $\Delta$  ოპერატორი წარმოადგენს ლაპლასის ოპერატორს  $\Delta = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$ ,  $\nabla$  ოპერატორი აღნიშნავს გრადიენტს ჰორიზონტალური ღერძების მიმართულებით. როცა საკითხი ეხება დამყარებულ რეგულარულ ტალღებს, წნევას სითხის თავისუფალ ზედაპირზე, როგორც ნებისმიერ მუდმივ სიდიდეს უგულვებელყოფენ.

თუ განვიხილავთ ტალღებს, რომელთა ამპლიტუდა გაცილებით ნაკლებია მათ სიგრძეზე, მაშინ ამ ტალღების შესაბამისი  $\varphi$  პოტენციალიც ასევე მცირე სიდიდე იქნება ტალღის სიგრძის მასშტაბში.

ეს საშუალებას გავძლევს გავაწრფივოთ (2.4) და (2.5) სასაზღვრო პირობები და ამასთან მოვიტხოვოთ მათი შესრულება არა ტალღურ  $\eta$  ზედაპირზე, არამედ თავდაპირველად შეუშფოთებელ  $z=0$  ზედაპირზე. მაშინ გაწრფივებული (2.4) და (2.5) სასაზღვრო პირობები ლებულობენ შემდეგ სახეს:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + g\eta = 0; \quad \text{როცა } z = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0; \quad \text{როცა } z = 0 \quad (2.7)$$

თუ (2.6) სასაზღვრო პირობას გავაწარმოებთ დროით და გამოვრიცხავთ თავისუფალი ზედაპირის  $\eta$  კოორდინატას (2.6) და (2.7) პირობებიდან, მივიღებთ ერთ სასაზღვრო პირობას თავისუფალ ზედაპირზე, ჩაწერილს მხოლოდ სიჩქარეთა ველის პოტენციალის მიმართ:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}; \quad \text{როცა } z = 0 \quad (2.8)$$

ამგვარად გაწრფივებული, ტალღური მოძრაობის პოტენციალის განსაზღვრის ამოცანა ლებულობს შემდეგ სახეს:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0; \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}; \quad \text{როცა } z = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{B ზედაპირზე} \quad (2.11)$$

როცა  $B$  ზედაპირი წარმოადგენს მხოლოდ ნებისმიერი უწყვეტი კონფიგურაციის წყალუქონად ფსკერს (2.11) პირობა, ჩაწერილი დეკარტის კოორდინატებში, გამოისახება დამოკიდებულებით

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial H}{\partial x} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial y} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad \text{როცა } z = -H(z, y), \quad (2.12)$$

სადაც  $H(z, y)$  წყლის ცვალებადი სიღრმეა.

ბრტყელი ჰორიზონტალური ფსკერის შემთხვევაში (2.9)-(2.10) წრფივი ამოცანის ფუნდამენტური ამოხსნა გამოისახება ფორმულით [71,74] :

$$\varphi = \frac{a\sigma}{k} \cdot \frac{\cosh k(z-H)}{\cosh kH} \cos(\sigma t + k_1 x + k_2 y) \quad (2.13)$$

სადაც  $k$  ტალღური რიცხვი დაკავშირებულია ტალღის მუდმივ  $\lambda$  სიგრძესთან თანაფარდობით  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $k_1$  და  $k_2$  მუდმივებია, რომლებიც უკავშირდება  $k$  - სიდიდეს შემდეგი ეკონალური დამოკიდებულებით

$$k_1^2 + k_2^2 = k^2 \quad (2.14)$$

$a$  წარმოადგენს ტალღის ამპლიტუდას, რომელიც რეგულარული ტალღური მოძრაობის შემთხვევაში მოცემულ მუდმივ სიდიდეა;

$\sigma$  ტალღური რხევების წრიული სიხშირეა,  $\sigma = 2\pi/\tau$ ;  $\tau$  - ტალღური მოძრაობის პერიოდი.

დისპერსიული კავშირი ტალღურ რიცხვსა და წრიულ სიხშირეს შორის დგინდება (2.10) სასაზღვრო პირობის საფუძველზე. მასში (2.13) გამოსახულების ჩასმის შედეგად:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kH} \quad (2.15)$$

(2.15) დისპერსიული გამოსახულება წრფივი ტალღური მოძრაობის უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია.

უსასრულოდ ღრმა წყალზე ტალღების გავრცელების შემთხვევაში ( $H \rightarrow \infty$ ) (2.15) დებულობს სახეს

$$\sigma = \sqrt{gk} \quad (2.16)$$

(2.16) პირობის საფუძველზე მიიღება სითხის ტალღური ზედაპირის ამსახველი განტოლება

$$\eta = a \sin(\sigma t + k_1 x + k_2 y), \quad (2.17)$$

იგი გვიჩვენებს, რომ თუ ფსკერი ჰორიზონტალურია, მაშინ სითხის თავისუფალ ზედაპირზე საქმე გვაქვს ჩვეულებრივ სინუსოდალურ ტალღებთან. (2.17) ფორმულაში ფრჩხილებში მოთავსებული გამოსახულება წარმოადგენს ტალღის ფაზას. ტალღის ფაზის კოორდინატის ცვლილების სიჩქარე დროში იგივეა, რაც ტალღის ფრონტის გადაადგილების სიჩქარე, რასაც ფაზურ სიჩქარეს უწოდებენ.

(2.14-2.17) ფორმულების საფუძველზე ადვილად შეგვიძლია დავრწმუნდეთ, რომ ტალღის გავრცელების მიმართულებით მისი ფაზური სიჩქარე გამოიანგარიშება ტოლობით:

$$C = \frac{\sigma}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kH} , \quad (2.18)$$

დიდი სიღრმეების შემთხვევაში ( $H \rightarrow \infty$ )

$$C = \sqrt{\frac{g}{k}} ; \quad (2.19)$$

მცირე სიღრმეებისას ( $H \rightarrow 0$ ) -

$$C = \sqrt{gH} . \quad (2.20)$$

## 2.2. სანაპირო ფერდობზე ტალღების ტრანსფორმაციის, რეფრაქციული სურათისა და სიჩქარეთა ველის საანგარიშო მეთოდები

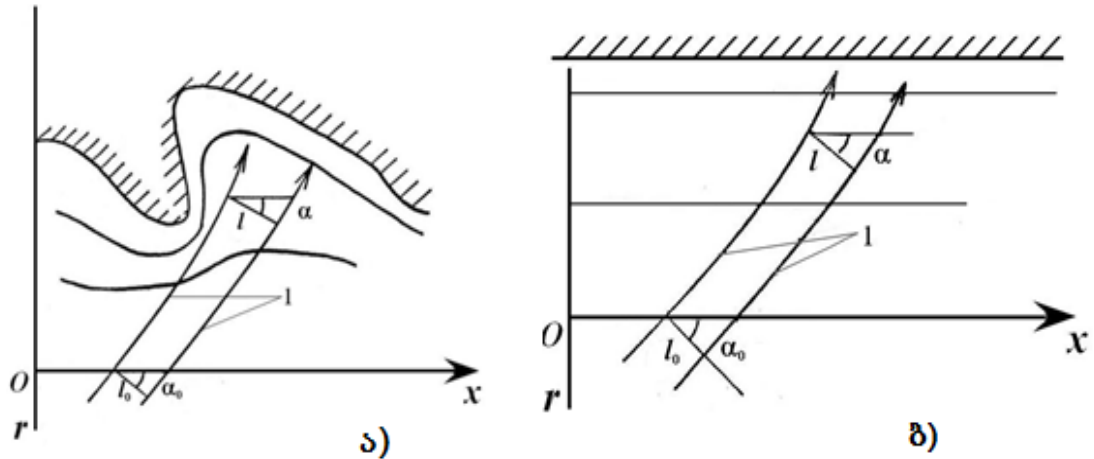
ამჟამად სამშენებლო თუ სხვა ნორმატიულ დოკუმენტებში მოყვანილი საანგარიშო მეთოდები პასუხობს ტალღების გავრცელებას მხოლოდ ისეთ ფერდობებზე, რომელთა დახრილობა არ აჭარბებს 0,1-ს (ე.ი.  $\approx 6^\circ$ -ს), ამასთან სანაპირო ფერდობებთან ტალღების მოძრაობის რეფრაქციული სურათის აღწერისას გამოიყენება ე.წ. სხივურ-ენერგეტიკული მეთოდი, შემუშავებული ბერკოფის, სვერდრუპის, მუნკის, არტურის, ჯონსონის, ო. ბრაინის, ისაკსონის, პოჩინკის, შულეიკინის, კრილოვისა და სხვათა შრომებში [28, 40, 68, 73, 89]. რეფრაქციული სურათის საანგარიშო სქემა მოყვანილია ნახ.2.1.-ზე.

ტალღების მიმართულების გამომხატველ ორ მეზობლად განლაგებულ ვექტორს (სხივს) შორის ენერგიის ნაკადის ბალანსურ განტოლებას, ჩაწერილს ინტეგრალური ფორმით გააჩნია შემდეგი სახე:

$$I_0 E_0 U_0 = I E U \quad (2.21)$$



სადაც  $I_0 E_0 U_0$  და  $IEU$  - შესაბამისად სხივებს შორის არსებული მანძილები, ენერგია და ტალღების ჯგუფური სიჩქარეებია წყლის ღრმა (სადაც ეს სიდიდეები მოცემულია) და არაღრმა (დასადგენია) უბნებზე.



**ნახ. 2.1** სხივურ-ენერგეტიკული მეთოდით ტალღების რეფრაქციის საანგარიშო სქემა: ა) ფსკერის ცვალებადი რელიეფის შემთხვევაში; ბ) ბრტყელი დახრილი ფსკერის შემთხვევაში;  $l$  – ტალღების მიმართველი სხივები [73].

ამოცანა მდგომარეობს მცირე სიღრმეებზე ტალღების პარამეტრების (სიმაღლის და ტალღის სიგრძის) დადგენასა და მათი გავრცელების მიმართულების განსაზღვრაში დახრილი ფსკერის თავზე, ნებისმიერ ვერტიკალურ კვეთში. ეს ამოცანა ცხადია მხოლოდ (2.21) განტოლებაზე დაყრდნობით ვერ გადაწყდება, რადგან მასში ფერდობზე ტალღების პარამეტრებზე დამოკიდებული ენერგიისა და ჯგუფური სიჩქარის გარდა შედის უცნობი მანძილი  $l$  მეზობელ სხივებს შორის. ამოცანის გადასაწყვეტად მიმართავენ ორ ძირითად დაშვებას: პირველი დაშვება ეყრდნობა ფენომენოლოგიურ ანალოგიას დახრილ სიბრტყეზე რეგულარული ტალღების გავრცელებასა და არაერთგვაროვან არეში სინათლის სხივების გავრცელებას შორის. ეს ანალოგია გამოიხატება სინათლის სხივების გარდატეხის სნელიუსის ოპტიკური კანონის გამოყენებაში სითხის ზედაპირული ტალღების მიმართულების განსაზღვრავად. სნელიუსის კანონის თანახმად სინათლის სხივების გავრცელებისას არაერთგვაროვან არეში სრულდება ტოლობა:

$$\sin \alpha / C = \text{const} \quad (2.22)$$

რომელიც, პირველი დაშვების თანახმად, სითხის ტალღებზეც ვრცელდება. (2.22) ტოლობაში  $\alpha$  კუთხეა ტალღის მიმართულების გამომხატველ სხივსა და იზობატის ნორმალს შორის ან, რაც იგივეა, ტალღის ქიმების ფრონტალურ მრუდებსა და იზობატას შორის<sup>1</sup>;  $C$  -ტალღის გავრცელების ფაზური სიჩქარეა.

იზობატების ნებისმიერი ურთიერთგანლაგების შემთხვევაში კავშირი  $l$  და  $l_0$  სიდიდეებს შორის დგინდება გრაფიკულად, (2.22) განტოლების საფუძველზე, ხოლო როცა იზობატები ნაპირის ხაზის პარალელურად არიან მიმართული (2.22) განტოლება საშუალებას გვაძლევს ანალიტიკურად განვსაზღვროთ  $l/l_0$  ფარდობის მნიშვნელობა.

**მეორე დაშვება**, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მდგომარეობს ბრტყელ ჰორიზონტალურ ფსკერზე წყლის ტალღური მოძრაობის ამსახველი ამონახსნების გამოყენებაში დახრილ ფსკერზე ტალღების ენერჯისა და ჯგუფური სიჩქარეების დადგენისას (რაც, რა თქმა უნდა, მხოლოდ მცირედ დახრილი სანაპირო ფერდობების შემთხვევაშია დასაშვები).

ამ დაშვების თანახმად (2.21) განტოლებაში შემავალი სიდიდეები გამოხატება შემდეგი ფორმულების მეშვეობით [74]:

$$E_0 = \frac{\gamma h_0^2}{8}; \quad E = \frac{\gamma h^2}{8}; \quad U_0 = \frac{C_0}{2}; \quad U = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kH}{\sinh 2kH} \right);$$

$$C_0 = \frac{g\lambda_0}{2\pi}; \quad C = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \left( \frac{2\pi H}{\lambda} \right) \quad (2.23)$$

სადაც  $h_0$ ,  $C_0$ ,  $\lambda_0$  და  $h$ ,  $C$ ,  $\lambda$  – ტალღის სიმაღლეები, ფაზური სიჩქარეები და სიგრძეებია შესაბამისად ღრმა წყალსა (სადაც ისინი ითვლებიან მოცემულ ანუ წინასწარ დადგენილ სიდიდეებად ზღვაზე არსებულ საანგარიშო შტორმული ვითარებიდან გამომდინარე) და ტალღების რეფრაქციის ზონაში ;  $\gamma$  – წყლის ხვედრითი წონაა;  $g$  –

<sup>1</sup> აქ და ყველგან ქვევით, შედარების გაადვილების მიზნით ლიტერატურულ პირველწყაროებში შემოღებული აღნიშვნები შესაბამისობაშია ავტორის მიერ შემოღებულ აღნიშვნებთან.

სიმძიმის ძალის აჩქარება;  $H$  – წყლის ნელცვლადი სიღრმე საანგარიშო ვერტიკალზე.

სნელიუსის კანონის საფუძველზე ადვილად დგინდება კავშირი  $l$  და  $l_0$  მანძილებს შორის:

$$\frac{l}{l_0} = \frac{\sqrt{1 - \tilde{C}^2 \sin^2 \alpha_0}}{\cos \alpha_0}, \quad (2.24)$$

სადაც შემოღებულია აღნიშვნა

$$\tilde{C} = C / C_0 = \lambda / \lambda_0 = 1 / k_\lambda; \quad (2.25)$$

$$k_\lambda = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{k}{k_0} \quad \text{აღნიშნავს ტალღური რიცხვის, (ანუ ტალღის$$

გავრცელების

მიმართულებით გაზომილი ტალღის სიგრძის შებრუნებული სიდიდის -  $k = 2\pi/\lambda$  ტრანსფორმაციის კოეფიციენტს. იგი განისაზღვრება დამყარებული ტალღური მოძრაობის სიხშირის (პერიოდის) მუდმივობის პირობიდან გამომდინარე (2.15), როცა  $\sigma = const$  და დაიყვანება შემდეგი ტრანსცენდენტული განტოლების ამოხსნაზე:

$$k_\lambda = \frac{1}{\tanh k_\lambda k_0 H}, \quad (2.26)$$

სადაც  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  - ღრმა წყალზე ტალღის გავრცელების მიმართულებით გაზომილი (მოცემული) ტალღის სიგრძის ( $\lambda_0$ ) შესაბამისი ტალღური რიცხვია.

(2.22) - (2.26) ფორმულების გათვალისწინებით ტალღების ენერჯის ნაკადის ბალანსის (2.21) განტოლების ამოხსნა საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ დახრილ ზედაპირზე ტალღების  $h$  სიმაღლის (ან ამპლიტუდის -  $a = h/2$ ) ტრანსფორმაციის კოეფიციენტები

$$K_a = \frac{h}{h_0} = \frac{a}{a_0} = M \sqrt{\cos \alpha_0} (k_\lambda^2 - \sin^2 \alpha_0)^{-1/4}, \quad (2.27)$$

(2.27) -ში შემოღებულია აღნიშვნა

$$M = k_\lambda \cdot \left( 1 + \frac{2k_\lambda k_0 H}{\sinh 2k_\lambda k_0 H} \right)^{-1/2} \quad (2.28)$$

$\alpha_0$  წარმოადგენს კუთხეს ტალღების ქიმებსა და ნაპირის ხაზს შორის, ღრმა წყალში, ნაპირიდან მნიშვნელოვანი დაშორებით (ნახ. 2.1).

იმ შემთხვევაში, როცა ტალღები ფრონტალურად არიან მიმართული ნაპირისკენ (2.27) ფორმულაში უნდა ჩაისვას  $\alpha_0 = 0^\circ$ .

ხაზგასმით უნდა აღინიშნოს, რომ (2.27) დამოკიდებულება ვრცელდება მხოლოდ ნაპირისადმი  $90^\circ$ -ზე ნაკლები კუთხით მიმართულ ტალღებზე: - ნაპირგასწვრივი ( $\alpha_0 = 90^\circ$ ) ე.წ. „სტოქსის ტიპის კიდურა ტალღები“ ქმნიან ტალღურ მოძრაობათა დამოუკიდებელ კლასს [63]. ამ ტალღების ქიმები ადგენენ მართ კუთხეს სანაპირო ხაზთან, ხოლო მათი ამპლიტუდა, მოცემული უმრავლეს შემთხვევაში ნაპირის ხაზის გასწვრივ, ექსპონენციალურად მცირდება ნაპირიდან დიდი სიღრმეების მიმართულებით. ძირითადად ამ ტიპის ტალღები და მათი ზემოქმედება სანაპირო ფერდობებზე წარმოადგენს ჩვენი კვლევის ძირითად თეორიულ მიმართულებას (III და IV თავები).

სანაპირო ფერდობების მახლობლად ტალღების გავრცელებაზე ექსპერიმენტული და ნატურული დაკვირვებების რიცხვი შედარებით მცირეა. არსებული დაკვირვებები ძირითადად მოიცავენ მცირე დახრილობის მქონე ( $6^\circ$ -მდე) სანაპირო ფერდობებთან ტალღების ფრონტალურად მოსვლის შემთხვევებს [5, 64, 84] და ძირითადად ადასტურებენ მცირედ დახრილ ფსკერის შემთხვევებში სხივურ-ენერგეტიკული მეთოდის სიზუსტეს.

ბოლო ხანებში ინტენსიურად ვითარდება ტალღური ჰიდროდინამიკის ამოცანების გადაწყვეტის პირდაპირი მეთოდები, დაფუძნებული ნობელის პრემიის ლაურეატ, აკადემიკოს ლ. ვ. კანტოროვიჩის შრომებზე [57] კანტოროვიჩის მეთოდის არსი მდგომარეობს კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალური განტოლებებიდან ერთ-ერთი დამოუკიდებელი ცვლადის გამორიცხვაში რიტც-გალიორკინის პირდაპირი მეთოდის გამოყენებით [65]. ეს საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ ამოცანის განზომილება და მისი ამოხსნა დავიყვანოთ შედარებით უფრო მარტივ – ერთგანზომილებიანი ევოლუციური განტოლების ამოხსნაზე.

ტალღურ ჰიდრომექანიკაში კანტოროვიჩის პირდაპირი მეთოდი პირველად გამოყენებულ იქნა ბერკჰოფის მიერ 1976 წელს [28], მაგრამ მის მიერ დეკარტის საკოორდინატო სისტემაში შერჩეული საბაზისო ფუნქცია ზუსტად არ აკმაყოფილებს დახრილ ფსკერზე სიჩქარის ნორმალური მდგენელის ნულთან ტოლობის (2.11) და (2.12) პირობას, რის გამოც მისი ამონახსნები, ისევე როგორც სხივურ-ენერგეტიკული მეთოდით მიღებული (2.26) - (2.28) დამოკიდებულებები, ფაქტობრივად ისევ მცირედ დახრილი ფსკერისათვის არის სამართლიანი და ცხადი სახით არ ასახავენ ფსკერის დახრის კუთხის გავლენას ტალღების რეფრაქციასა და ტრანფორმაციაზე.

პროფესორი შ. გაგოშიძე კანტოროვიჩის პირდაპირი და ვენტცელ-კრამერს-ბრიულენის ასიმპტოტური WKB მეთოდების [66,67] გამოყენებით ანალოგურ ამოცანას ხსნის ცილინრულ საკოორდინატო სისტემაში, დახრილი ფსკერის თავზე პერიოდული ტალღების გავრცელების ყველა სასაზღვრო პირობის ზუსტი დაცვით, რის გამოც მისი შედეგები საშუალებას იძლევა ცხადი სახით ავსახოთ სანაპირო ფერდობის დახრის კუთხის გავლენა ნაპირთან ტალღების მოძრაობაზე, მაშინაც კი, როცა საქმე გვაქვს ციცაბო და უარყოფითად დახრილ სანაპირო ფერდობებთან [5, 33, 35,70].

შ. გაგოშიძის მიერ ცილინდრულ  $r, \theta, x$  საკოორდინატო სისტემაში (ნახ.2.2) გამოყვანილი ევოლუციური განტოლება განეკუთვნება შრედინგერის ტიპის განტოლებათა კლასს, რომლის ამოხსნა ასიმპტოტური WKB მეთოდებით ჰორიზონტთან ნებისმიერად დახრილი სანაპირო ფერდობისათვის გვამლევს ტალღური მოძრაობის  $\varphi$  პოტენციალის, ტალღების ზედაპირის ვერტიკალური  $\eta$  კოორდინატისა და რეფრაქციული სურათის ამსახველი ფაზური  $\beta(r)$  ფუნქციების შემდეგ დამოკიდებულებებს:

$$\varphi = a_0 \frac{g}{\sigma} K_a \frac{\cosh[kr(\theta + \theta_0)]}{\cosh kr\theta_0} \cos[\sigma + k_0 x \sin \alpha_0 + \beta(r)] \quad (2.29)$$

$$\eta = a_0 K_a \sin[\sigma + k_0 x \sin \alpha_0 + \beta(r)] \quad (2.30)$$

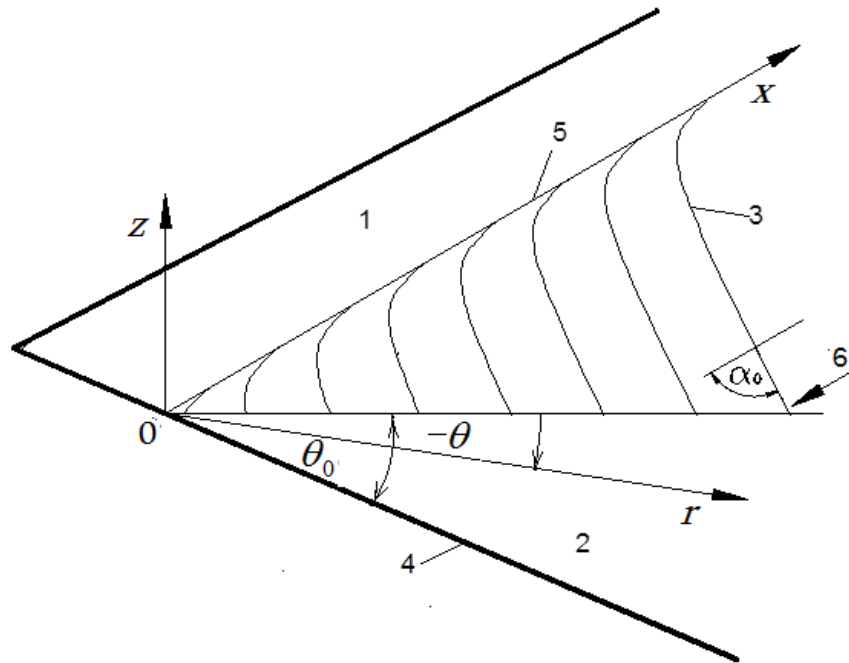
$$\beta(r) = \frac{1}{\theta_0} \int_0^{k_0 r \theta_0} \sqrt{(k/k_0)^2 + (R-N)\theta_0^2 - \sin^2 \alpha_0} \cdot d(k_0 r \theta_0) \quad (2.31)$$

სადაც ინდექსით 0 აღნიშნულია ნაპირის ხაზიდან დიდ მანძილებზე (უსასრულობაში) მოცემული ტალღის ამპლიტუდა  $a_0$  და ტალღური რიცხვი

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{\sigma^2}{g};$$

$\theta_0$  - სანაპირო ფერდობის ჰორიზონტთან დახრის კუთხეა, რომელიც შეიძლება დებულობდეს მნიშვნელობებს  $0 < \theta_0 \leq 180^\circ$ ;

$\alpha_0$  - კუთხეა, რომელსაც ადგენენ ტალღების ქიმები უსასრულობაში ნაპირის ხაზის აღმნიშვნელ  $x$  საკოორდინატო ღერძთან (ნახ. 2.2);



**ნახ.2.2. სანაპირო ფერდობთან ტალღების რეფრაქციის საანგარიშო**

*სქემა:* 1 - სანაპირო ფერდობი; 2 - ზღვა; 3- ტალღის ქიმები, 4 - დახრილი ფსკერი; 5 - ნაპირის ხაზი; 6- ტალღის მიმართულება ღრმა წყალზე.

ნებისმიერი  $\theta_0$  -დახრის კუთხისთვის ტალღების ამპლიტუდის (სიმაღლის) ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის (2.27) ფორმულა დებულობს შემდეგ სახეს:

$$K_a = \frac{a}{a_0} = \frac{(k/k_0) \sqrt{\cos \alpha_0}}{(1 + 2kr\theta_0 / \sinh 2kr\theta_0)^{1/2}} [(k/k_0)^2 + (R-N)\theta_0^2 - \sin^2 \alpha_0]^{-1/4} \quad (2.32)$$

$R$ ,  $N$  და  $k/k_0$  სიდიდეები გამოიანგარიშება შემდეგი ფორმულებით:

$$R = \frac{1}{4(k_0 r \theta_0)^2} \quad (2.33)$$

$$N = \frac{(k/k_0)^2}{\left(1 + \frac{2kr\theta_0}{\sinh 2kr\theta_0}\right)^3} \left[ 1 - \frac{\coth 2kr\theta_0}{kr\theta_0} + \frac{1}{2(kr\theta_0)^2} - \frac{2kr\theta_0}{3\sinh 2kr\theta_0} - \frac{(\coth 2kr\theta_0 - 1/2kr\theta_0)^2}{1 + 2kr\theta_0/\sinh 2kr\theta_0} \right] \quad (2.34)$$

$$\frac{k}{k_0} = \left[ \tanh \left( \frac{k}{k_0} k_0 r \theta_0 \right) \right]^{-1} \quad (2.35)$$

შ. გაგოშიძის ზემოთმოყვანილ ამოხსნათა მოდიფიცირებას ასიმპტოტური WKB მეთოდის მოთხოვნათა შესაბამისად (რაც დაიყვანება ამ ამონახსნებში, ნაპირის ხაზთან ახლო მანძილებზე, მეორე რიგის პოლუსის შემცველი  $R = \frac{1}{4(k_0 r \theta_0)^2}$  წევრის უგულველყოფაში) მიყვავართ

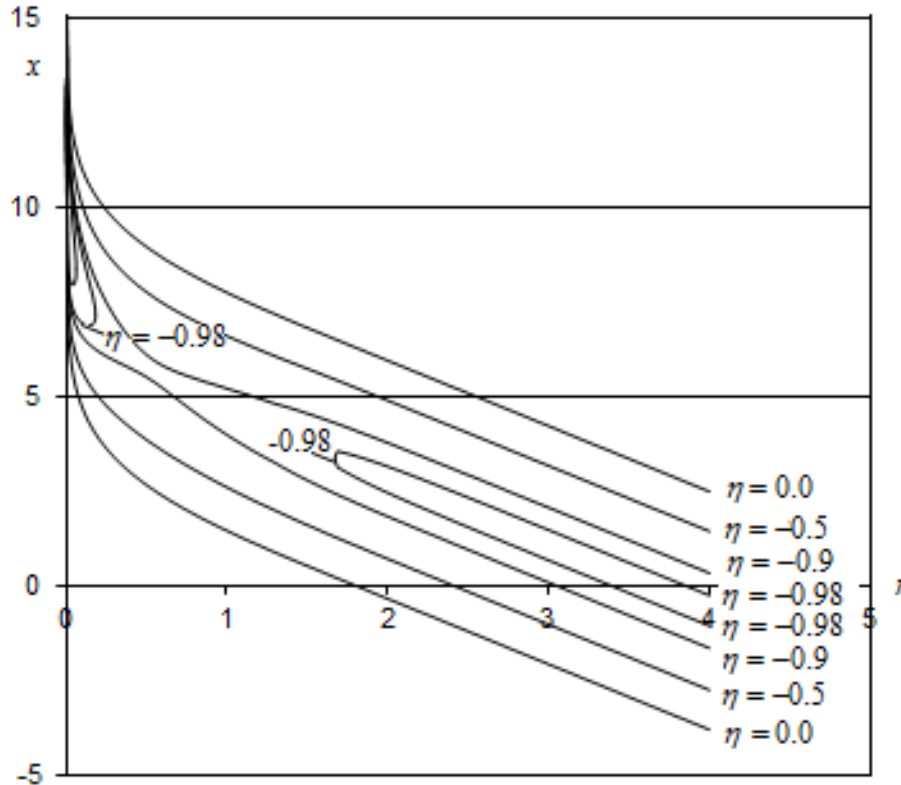
შემდეგ მნიშვნელოვან დასკვნებზე:

- ტალღების რეფრაქციას განაპირობებს არა მხოლოდ სიღრმეთა ცვალებადობა (როგორც ეს ადრე იყო მიჩნეული რეფრაქციის განმსაზღვრელ ერთადერთ პირობად), არამედ სანაპირო ფერდობის დახრის კუთხე და ტალღის ფრონტის ფარდობითი დაშორება ნაპირის ხაზიდან. ამ მიზეზით, ტალღების რეფრაქციას ადგილი აქვს როგორც მცირედ დახრილ, ასევე ციცაბო და თვით უარყოფითი დახრილობის მქონე ფერდობებთან, რომელთა წინ წყლის სიღრმე პრაქტიკულად უსასრულოა. ეს შედეგი დადასტურდება სტოკერის ერთი კერძო, (მაგრამ ასევე რთული) ამოხსნით, რომელიც მოყვანილია მის ცნობილ მონოგრაფიაში ტალღები წყალზე“ და შეეხება ვერტიკალურ კედელთან სამგანზომილებიანი ტალღების რეფრაქციას [5,45, 57, 70].

- ძალზე მცირედ დახრილი სანაპირო ფერდობების შემთხვევაში, ანუ როცა  $\theta_0^2 \ll 1$  და  $r\theta_0 \approx H$ , სადაც  $H$  - ზღვის სიღრმეა, (2.32) დამოკიდებულება ზუსტად გადადის სხივურ-ენერგეტიკული მეთოდით გამოყვანილ (2.27) დამოკიდებულებაში;

- რაოდენობრივი თვალსაზრისით ტალღის ამპლიტუდის სიდიდე ნაპირთან მიახლოებისას ძირითადად დამოკიდებულია ნაპირის

ხაზიდან ტალღის  $k_0 r \theta_0$  ფარდობით დაშორებაზე და შედარებით ნაკლებადაა დამოკიდებული უშუალოდ სანაპირო ფერდობის დახრის  $\theta_0$  კუთხეზე;



**ნახ. 2.3.** ვერტიკალურ კედელთან  $30^\circ$  კუთხით მოსული ტალღის რეფრაქციული სურათი აგებული ელემენტალურ ფუნქციებში ზემოთმოყვანილი (2.30)-(2.35) დამოკიდებულებების საფუძველზე. ეს რეფრაქციული სურათი, თითქმის ზუსტად ემთხვევა სტოკერის ამოცანის შესაბამისი სურათს ([35, 45, (ნახ. 5.3.2)].

- განსაკუთრებული რელიეფურობით ტალღების მოსვლისა ( $\alpha_0$ ) და სანაპირო ფერდობის დახრის ( $\theta_0$ ) კუთხეები, როგორც დამოუკიდებელი პარამეტრები, გავლენას ახდენენ სანაპირო ფერდობთან ტალღური მოძრაობის თვისებებზე: - კერძოდ, როცა  $\theta_0 \leq 90^\circ$ , ხოლო ტალღების მოსვლის კუთხე უსასრულოებაში  $\theta_0 \leq 45^\circ$ , ტალღის ამპლიტუდა მოცემული ნაპირიდან დიდ მანძილზე ნაპირთან მიახლოებასას ჯერ მცირდება გარკვეულ მინიმუმამდე, ხოლო შემდეგ მატულობს და მიისწრაფის უსასრულობისკენ უშუალოდ ნაპირის ხაზის სიახლოვეს (ანუ ტალღა განიცდის მსხვრევას);

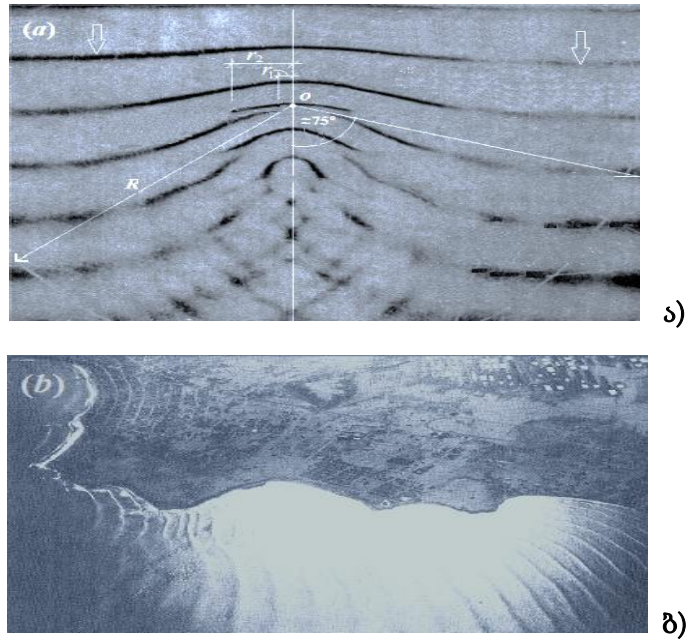


- ციკაბო ფერდობების შემთხვევაში იცვლება ნაპირისაკენ ტალღების მოძრაობის ხასიათი: ტალღის ამპლიტუდა, მოცემული უსასრულობაში, ჯერ მატულობს (თუმცა უმნიშვნელოდ), შემდეგ მცირდება, ხოლო ნაპირის სიახლოვეს ისევ იწყებს მატებას და მიისწრაფის უსასრულობისაკენ. ეს პირველად აღინიშნება როცა  $\theta_0 = 90^\circ$  და  $\alpha_0 = 60^\circ$ . სანაპირო ფერდობის დახრის შემდგომ მატებასთან ერთად, ე. ი. კიდური ფერდობების შემთხვევაში, იგივე ხდება მოსვლის კუთხეების უფრო მცირე მნიშვნელობების დროსაც;

- როცა უსასრულობაში ტალღების მოსვლის კუთხე  $\alpha_0 \geq 75^\circ$  და ფერდობების დახრის კუთხე  $\theta_0 \geq 45^\circ$  -ზე, ნაპირიდან გარკვეულ მანძილებზე ტალღები ვარდებიან ე. წ. „პოტენციალურ ორმოში“, სადაც ხდება ტალღის ქიმის გამრუდება, წყვეტა და ფაზების წანაცვლება.

შ. გაგომიძის თეორიული შედეგებიდან გამომდინარე ეს ეფექტი პოულობს შესანიშნავ დადასტურებას პირსონის, ჰოდგინსისა და სხვა ავტორთა ლაბორატორიული და ნატურული დაკვირვებების შედეგებში [5, 63, 85].

ნახ.2.4-ს ა) სურათზე ნაჩვენებია კედლის საათის მრგვალი საფარი მინის თავზე მოძრავი ტალღები, პირველ წყვეტას მართლაც მაშინ აქვს ადგილი, როცა კუთხე ტალღის ქიმებსა და საათის მინის ხუფის ღერძზე ტალღების გადაღუნვის წერტილებს შორის, ანუ კუთხე საათის ფარგლებს გარეთ ტალღის ქიმებსა და წარმოდგენით ნაპირის ხაზს შორის (ამ კუთხის გვერდები ფოტოსურათზე ჩვენს მიერ დატანილია თეთრი ხაზებით) უტოლდება  $75^\circ$ -ს, ხოლო ნახ. 2.4. ბ)-ზე გამოსახულ ოკეანის ტალღების აეროფოტოსურათზე ჩანს, რომ მარცხენა კუთხეში ტალღის ქიმები განიცდიან წყვეტას და ფაზათა წანაცვლებას, რადგან მათი მოსვლის კუთხე ნაპირის მიმართ აჭარბებს  $75^\circ$ -ს. მარჯვენა კუთხეში გამოსახული ტალღის ქიმები კი არ განიცდიან წყვეტას, რადგან ეს კუთხე  $75^\circ$ -ზე ნაკლებია.



**ნახ. 2.4. ტალღების რეფრაქციის ფოტოსურათები : ა) - საათის მრგვალი საფარი მინის თავზე; ბ) - ოკეანის ერთ-ერთ ნაპირთან .**

მიუხედავად იმისა, რომ ზემოთმოყვანილი ამოხსნები გამოისახება ელემენტარულ ფუნქციებში, ისინი მაინც საჭიროებს ადაპტაციას ინჟინერ-ჰიდროტექნიკოსებისთვის, რაც გარკვეულწილად, ჩვენს მიერ დისერტაციის მომდევნო თავებშია განხორციელებული.

### **თავი 3. ტალღების გაანგარიშების ანალიზური მეთოდები მდინარეთა შესართავ უბნებსა და საზღვაო არხებში**

საინჟინრო პრაქტიკაში, მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში გრძელი ზედაპირული ტალღების გაანგარიშება დღეს-დღეობით წარმოებს მდინარის დინების შემხვედრი მიმართულებით ტალღის მიერ გადატანილი ენერჯის ბალანსის განტოლების გამოყენებით.

ქვემოთ, ამავე ამოცანის ჩვენს მიერ შემოთავაზებული გადაწყვეტა ეფუძნება მცირე წყლის განტოლებათა სისტემის უშუალო ამოხსნას, რაც საშუალებას გვაძლევს მეტი სიზუსტით გავიანგარიშოთ ზღვიდან მდინარის შესართავ აკვატორიაში შეჭრილი ტალღების პარამეტრები: - ტალღის სიგრძე, სიმაღლე, და დავადგინოთ მდინარის დინებით ტალღის შეჩერების კრიტერიუმები.

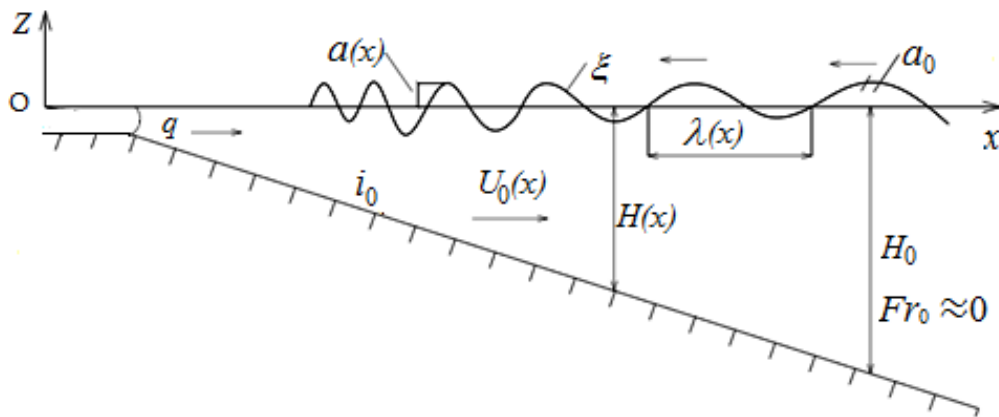
ამოცანა იხსნება წრფივი მიახლოებით, დეკარტის საკოორდინატო სისტემაში, რომლის ათვლის ნულოვანი წერტილი, ამოხსნათა გამარტივების მიზნით მიჩნეულია დინების წერტილოვან წყაროდ, ხოლო მდინარის შესართავი უბნის ფსკერი წარმოადგენს მცირედ დახრილ სიბრტყეს, რომლის თავზე მდინარის სტაციონარული სიჩქარე ზღვის მიმართულებით კლებულობს, სიღრმის უკუპროპორციულად.

#### **3.1. გრძელი ტალღების ტრანსფორმაცია მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში**

წყლის სიღრმეები მდინარის ზღვაში შესართავ აკვატორიებში უმრავლეს შემთხვევაში გაცილებით ნაკლებია ზღვის მხრიდან შემოჭრილი ტალღების სიგრძეზე, რის გამოც ამ უბნებში ტალღური მოძრაობების გაანგარიშებისას სავსებით დასაშვებია ვისარგებლოთ დინებაზე გრძელი ტალღების გავრცელების წრფივ განტოლებათა სისტემით, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე [74]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + U_0 \frac{\partial u}{\partial x} &= -g \frac{\partial \xi}{\partial x}, \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \xi}{\partial x} &= -\frac{\partial H u}{\partial x}, \end{aligned} \quad (3.1.1)$$

სადაც  $U_0(x)$  და  $H(x)$  – მდინარის ტალღებით შეუშფოთებელი დამყარებული ნაკადის ცვალებადი სიჩქარე და სიღრმეა  $Ox$  ღერძის გასწვრივ (ნახ.3.1);  $Oz$  ღერძი მიმართულია ვერტიკალურად ზემოთ;  $u(x,t)$  – სითხის ნაწილაკების გრძივი სიჩქარეა, წარმოქმნილი ზღვიდან მომავალი გრძელი ტალღების ზემოქმედებით;  $\xi(x,t)$  - თავისუფალი ტალღური ზედაპირის ვერტიკალური კოორდინატია. განტოლებათა (3.1.1) წრფივი სისტემის გამოყვანისას მიჩნეულია, რომ მდინარის ნაკადის სიჩქარე ზღვის მიმართულებით გადაადგილებისას იცვლება ტალღური შეშფოთებების სიჩქარეზე გაცილებით უფრო მცირედ, ანუ სრულდება პირობა  $\frac{\partial U_0}{\partial x} \ll \frac{\partial u}{\partial x}$ .



**ნახ. 3.1. გრძელი ტალღების ტრანსფორმაციის სქემა მდინარის შესართავ უბანზე**

ნახ. 3.1-ზე მოცემული საანგარიშო სქემის მიხედვით სტაციონარული დინების ძირითადი მახასიათებლებს შორის დამოკიდებულება შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$H_0 = i_0 x, \quad U_0 = \frac{q}{H_0} = \frac{q}{i_0 x} \quad (3.1.2)$$

სადაც  $q$  – შესართავ აკვატორიაში მდინარის სიგანის მიხედვით დაყვანილი ხვედრითი ხარჯია;  $i_0$  აღნიშნავს ფსკერის ქანობს.

თუ  $u(x,t)$  და  $\xi(x,t)$  სიდიდეებს წარმოვადგენთ დროზე პერიოდულად დამოკიდებული ფუნქციების სახით  $u = \bar{u}(x)e^{i\sigma t}$ ,  $\xi = \bar{\xi}(x)e^{i\sigma t}$ , (სადაც  $i$  – წარმოსახვითი ერთეულია;  $\sigma = \frac{2\pi}{\tau}$  – ტალღურ რხევათა სიხშირე;  $\tau$  – პერიოდი, ხოლო  $\bar{u}(x)$  და  $\bar{\xi}(x)$  – წყლის ნაწილაკების სიჩქარეებისა და წყლის ზედაპირის ტალღურ რხევათა მხოლოდ  $x$  კოორდინატზე დამოკიდებული ფუნქციები) და (3.1.1) სისტემიდან გამოვრიცხავთ ტალღურ შემფოთებათა  $\xi(x,t)$  კოორდინატს (3.1.2) დამოკიდებულებების გათვალისწინებით მიღებით

$$\left( gi_0 x - \frac{q^2}{(i_0 x)^2} \right) \cdot \frac{d^2 \bar{u}}{dx^2} + \left( 2gi_0 - \frac{2gi_0 \sigma}{i_0 x} \right) \cdot \frac{d\bar{u}}{dx} + \sigma^2 \bar{u} = 0 . \quad (3.1.3)$$

სითხის სტაციონარული მოძრაობის უგულვებელყოფის შემთხვევაში, ე.ი. როცა  $q=0$  (3.1.3) განტოლება დაიყვანება ბესელის განტოლებაზე, რომლის ასიმპტოტური ამოხსნა ემთხვევა ნაპირთან მიახლოებისას გრძელი ტალღების ამპლიტუდის ცვალებადობის გრინის ცნობილ კანონს: - უძრავ თავთხელ წყალზე ტალღის ამპლიტუდა იზრდება  $\sqrt[4]{1/x}$  -ის პროპორციულად, ანუ წყლის სიღრმის კლებისთან ერთად ამპლიტუდა მატულობს გრინის ფორმულის შესაბამისად  $\bar{\xi}(x) = \sqrt[4]{1/H(x)}$  [74,85].

განვიხილოთ ტალღური მოძრაობები, როცა  $q \neq 0$  და იმ შუალედებისთვის, სადაც  $gi_0 x > \frac{q^2}{(i_0 x)^2}$ , ე.ი.  $Fr \ll 1$ , რაც სრულდება თითქმის ყველა მდინარის შესართავ უბანზე. ამ შემთხვევაში (3.1.3) ბესელის ტიპის განტოლება შემდეგ სახეს ღებულობს

$$x^2 \frac{d^2 \bar{u}}{dx^2} + \left( 2x - \frac{2i\sigma q}{gi_0^2} \right) \cdot \frac{d\bar{u}}{dx} + \frac{\sigma^2}{gi_0} x \bar{u} = 0 , \quad (3.1.4)$$

რომლის ამონახსნს გამოსახულს ჰანკელის ფუნქციის დახმარებით აქვს შემდეგი სახე:

$$u(x,t) = Cx^{-\frac{1}{2}} e^{\frac{i\sigma q}{q_0^2 x}} \cdot H_1^{(1,2)} \left( 2\sqrt{\frac{\sigma^2 x}{gi_0}} \right) e^{i\sigma t} , \quad (3.1.5)$$

აქ  $H_1^{(1,2)}$  – ჰანკელის I და II გვარის პირველი რიგის ფუნქციებია;  $C$  – ინტეგრირების მუდმივა, ანუ მანორმალიზებული ამპლიტუდაა [59].

ჰანკელის პირველი და მეორე გვარის ფუნქციებიდან, საანგარიშოდ ვირჩევთ პირველი გვარის ფუნქციას, რომელიც შეესაბამება ზღვიდან მდინარის შესართავისკენ მიმართულ ტალღებს.

წარმოვადგინოთ (3.1.5) ფორმულა ასიმპტოტურად და გამოვყოთ ამონახსნის ნამდვილი ნაწილი. მივიღებთ წყლის ნაწილაკების ტალღური შემფოთებით განპირობებულ რხევით მოძრაობათა სიჩქარის გამოსათვლელ მარტივ დამოკიდებულებას:

$$u(x,t) = C \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{gi_0}{\sigma^2}} \cdot x^{-3/4} \cdot \cos\left(\sigma - \frac{\sigma q}{gi_0^2} \cdot \frac{1}{x} + 2\sqrt{\frac{\sigma^2 x}{gi_0}} - \frac{3}{4}\pi\right) \quad (3.1.6)$$

ნაკადის თავისუფალი ზედაპირისთვის, (3.1.5)-ის გათვალისწინებით, (3.1.1) სისტემის მეორე განტოლება ტალღური ზედაპირისთვის გვამღევს:

$$\xi = C' \sqrt{\frac{1}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{gi_0}{\sigma^2}} \cdot x^{-1/4} \cdot \left(-\sqrt{\frac{i_0}{g}} + \frac{q^3}{g^2 i_0^4} \cdot x^{-4.5} + \frac{q^2}{g^{3/2} i_0^{5/2}} \cdot x^{-3}\right) \sin\left(\sigma + 2\sqrt{\frac{\sigma^2 x}{gi_0}} - \frac{\sigma q}{gi_0^2} \cdot \frac{1}{x} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (3.1.7)$$

(3.1.6) და (3.1.7) დამოკიდებულებებში  $C$  და  $C'$  ინტეგრების ნებისმიერი მუდმივები – საწყისი ამპლიტუდებია, ხოლო  $x$  კოორდინატზე დამოკიდებული კოეფიციენტები კოსინუსისა და სინუსის წინ განსაზღვრავენ სიჩქარისა და ტალღური ზედაპირის ამპლიტუდების მნიშვნელობებს კოორდინატთა სათავიდან  $x$  მანძილით დაშორებულ ნებისმიერ კვეთში.

აღვნიშნოთ ტალღის ამპლიტუდები, სიგრძეები და მდინარის არათანაბარი მოძრაობის სიჩქარის პარამეტრები. კერძოდ, ფრუდის რიცხვი  $Fr = q^2 / gH^3$  0 და  $x$  ინდექსებით შესართავიდან შესაბამისად შორ მანძილზე, სადაც ტალღური მოძრაობის პარამეტრები ითვლება მოცემულ სიდიდეებად, ხოლო მდინარის ჭავლის სიჩქარე ახლოსაა ნულთან და ნებისმიერ შუალედურ მანძილებზე, სადაც საჭიროა ამ პარამეტრების გაანგარიშება.

მაშინ, მიღებული ამონახსნების თანახმად ტალღის ამპლიტუდის (რაც იგივეა სიმაღლის) ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი იანგარიშება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$K_a = \frac{a_x}{a_0} = \sqrt[4]{H_0/H_x} \cdot \frac{1 - Fr_0^{3/2} (H_0/H_x)^{3/2} - Fr_0 (H_0/H_x)}{1 - Fr_0^{3/2} - Fr_0} \quad (3.1.8)$$

(3.1.7) და (3.1.8) ფორმულების თანახმად შესართავ აკვატორიაში მდინარის შემხვედრი დინების გარეშე მხოლოდ წყლის სიღრმეების შემცირება იწვევს ტალღის სიმაღლის ზრდას: - ტალღა ხდება სულ უფრო და უფრო ციცაბო და ბოლოს იმსხვრევა, როცა მისი ამპლიტუდა აღწევს მნიშვნელობას  $a_x < 0,39H_x$  [41,72]. მაგრამ მდინარის შემხვედრი დინების გათვალისწინებით მდინარის სიჩქარის მატება, ამცირებს სიღრმის შემცირებით განპირობებული ტალღის სიმაღლის ზრდის ინტენსივობას. უფრო მეტიც, შესართავ უბანში დინების აღმა მდინარის სიჩქარის შემდგომმა მატებამ შეიძლება ტალღის ამპლიტუდების ზრდის პროცესი, განპირობებული სიღრმეთა კლებით შეცვალოს ამპლიტუდების კლების პროცესით და საერთოდ დაბლოკოს ტალღის გავრცელება მდინარის საწინააღმდეგო მიმართულებით, რაც (3.1.8) დამოკიდებულების თანახმად გამოიხატება ტალღის ამპლიტუდის განულებადში. უფრო მეტიც, თუ საწყის კვეთში მდინარის ფრუდის რიცხვი  $Fr_0 \geq 0,57$  ზღვიდან მოსული ტალღები საერთოდ ვერ შედიან მდინარის კალაპოტში მათი ამპლიტუდის მკვეთრი განულების გამო. ზემოთქმული თვალნათლივ დემონსტრირებულია ნახ.3.2. ა)-ზე წარმოდგენილი მრუდებით, რომლებიც აგებულია (3.1.8) დამოკიდებულების საფუძველზე.

რაც შეეხება ტალღის სიგრძეს, მისი ცვლილება განისაზღვრება გამომდინარე ტალღის ფაზის ანუ (3.1.6) და (3.1.7) დამოკიდებულებებში ტრიგონომეტრიული ფუნქციების ფრჩხილებქვეშ მოთავსებული მრავალწევრიანი გამოსახულების ქცევიდან. კერძოდ, როცა  $q \neq 0$  ტალღის სიგრძის ცვლილება დამოკიდებული გამოდის არა მხოლოდ შესართავის სიღრმესა და და მდინარის ფრუდის რიცხვზე, არამედ ტალღურ რხევის  $\sigma$

სიხშირეზე (პერიოდზე), რომელიც ითვლება მოცემულ მუდმივ სიდიდედ მდინარის შესართავის მთელ სიგრძეზე და ამიტომ იგი სავსებით დასაშვებად შეგვიძლია მივიჩნიოთ [50,79]

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \frac{q}{H_0} - \sqrt{gH_0} \right] = const \quad (3.1.9)$$

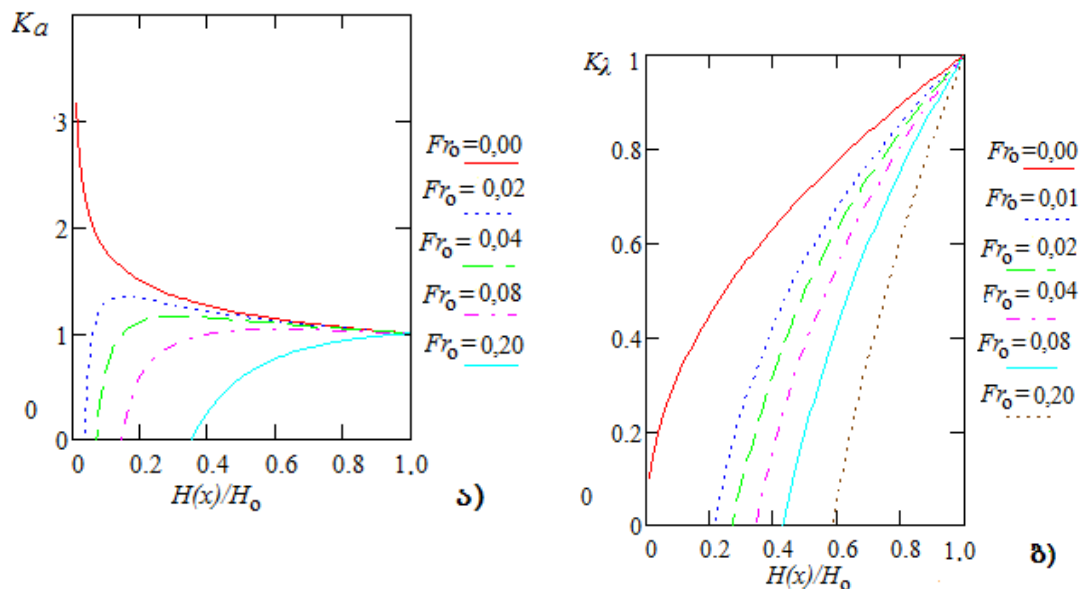
მაშინ, გამომდინარე (7)-დან,  $t$  დროის იმ მომენტისათვის, ვთქვათ როცა

$$\sigma t = \frac{\pi}{4} \text{ ვლელულობთ ტალღის სიგრძის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის}$$

განმსაზღვრელ შემდეგ დამოკიდებულებას:

$$K_\lambda = \frac{\lambda_x}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{H_x}{H_0}} \left[ \frac{1}{1 - \sqrt{Fr_0}} - \frac{\sqrt{Fr_0}}{1 - \sqrt{Fr_0}} \left( \frac{H_0}{H_x} \right)^{3/2} \right] \quad (3.1.10)$$

სადაც  $\lambda_0$  და  $Fr_0$  – შესაბამისად ტალღის სიგრძე და ფრუდის რიცხვია მოცემული  $H_0$  სიღრმეზე, სადაც დინების გავლენა უმნიშვნელოა. (3.1.10) გამოსახულების მიხედვით ნახ. 3.2 ბ)-ზე აგებულია მდინარის შესართავში ტალღის სიგრძის განმსაზღვრელი მრუდები.



**ნახ.3.2. ტალღის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტების დამოკიდებულება ფრუდის რიცხვზე მდინარის შესართავ უბანში: ა) ტალღის ამპლიტუდის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტის მრუდები; ბ) ტალღის სიგრძის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტების მრუდები.**



როგორც ნახ. 3.2. ბ)-ზე წარმოდგენილი მრუდებიდან გამომდინარეობს, მდინარის სიჩქარის მატება სიღრმეების გამო მართლაც აფერხებს ზღვის მხრიდან შემოჭრილი ტალღების სიგრძის კლებას, განპირობებულს წყლის სიღრმეთა კლებით. აქედან, შეგვიძლია დავასკვნათ:

1. კლებადი სიღრმის შემთხვევაში, როცა ტალღა ვრცელდება მდინარის შესართავისკენ, მდინარის ნაკადი ინტენსიურად ამცირებს ტალღის სიმაღლეს და ამავდროულად იწვევს მისი სიგრძის კლებას.

2. ტალღის სიგრძის ტრანსფორმაცია დამოკიდებულია არამარტო მდინარის ნაკადის პარამეტრებსა და ზღვის სიღრმეზე, არამედ გარკვეულწილად ტალღური რხევის სიხშირეზეც.

## **3.2. ნაპირგასწვრივი ტალღები სამკუთხა**

### **და ტრაპეციულ არხებში**

#### **3.2.1. ნაპირგასწვრივი ტალღების გაანგარიშების**

##### **მეთოდების ანალიზი**

მდინარეთა შესართავ უბნებში, მთის ვიწრო წყალსაცავებში, საპორტო-საზღვაო, სატრანსპორტო, ენერგეტიკული თუ მელიორაციული დანიშნულების არხებში, აღძრულ ტალღებს ძირითადად გააჩნიათ ნაპირგასწვრივი მიმართულება. ასეთი ტალღები შეიძლება გამოწვეულ იქნას 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 მიმართული ტალღების ზემოქმედებას.

ნაპირგასწვრივი მიმართულების ტალღების ფორმირებაზე დიდ გავლენას ახდენს სანაპირო ფერდობები, მათ დახრილობაზეა დამოკიდებული ტალღების სიმაღლე. ფერდობის დახრილობის

მიხედვით იცვლება ორგანოზომილებიანი სტრუქტურას, რაც ტალღებს გააჩნიათ წყლის კალაპოტის ცენტრალურ ნაწილში ტალღების მუდმივი სიღრმის წყლის ზედაპირზე ზედდებისას.



*ნახ.3.3. ოკეანის ზვირთვებით გამოწვეული ნაპირგასწვრივი ტალღები მდინარე სევერნის შესართავში (ინგლისი)*

ეს გარემოება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია წყლის სიღრმესთან შედარებით მოკლე (დისპერსიული) ტალღებისთვის, რომელთა ამპლიტუდის ზრდა სანაპირო ფერდობის განივი მიმართულებით განსაკუთრებული რელიეფურობითაა გამოხატული.



*ნახ. 3.4. ნაპირგასწვრივი ტალღები ლაბორატორიულ პირობებში*

ჩვენი კვლევის მიზანს წარმოადგენს მხოლოდ ნაკადების ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობის შესწავლა სწორედ სანაპირო

ფერდობების დახრილობის მხედველობაში მიღებით. დღესდღეობით, უაღრესად დიდი მათემატიკური სირთულეების გამო, არ არსებობს ზოგადი ამოხსნა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს აგვესახა წყლის ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობა სანაპირო ფერდობების ნებისმიერი დახრილობის შემთხვევაში თუ კალაპოტის სიღრმე შემოსაზღვრულია. არსებული კერძო ამოხსნები მოიცავენ ან „უსასრულოდ“ დიდი სიღრმის წყალსატევებს (ზღვებს, წყალსაცავებს) ან განიხილავენ მხოლოდ ჰორიზონტთან  $45^\circ$  და  $30^\circ$ -ით დახრილი ფერდობების მქონე სამკუთხა კვეთის არხებს.

ნაპირგასწვრივი ტალღების დამანგრეველი ზემოქმედება არხების, მდინარეთა თუ წყალსაცავების სანაპირო ფერდობებზე მრავალ მკვლევარს აქვს აღწერილი. ვ. ს. ალტუნინს თავის მონოგრაფიაში „მელიორაციული არხები მიწის კალაპოტებში“, სადაც არხის ფერდობის ნგრევისა და წარეცხვის ერთ-ერთ მათავარ მიზეზად სავსებით სამართლიანად მიიჩნევს ქარით გამოწვეულ ტალღებს [48].

როგორც ქართველი მეცნიერების კვლევებიდან ჩანს, საქართველოში რიონჰესის, ვარციხეჰესებისა და ვარდნილჰესების მიმყვანი და გამყვანი არხების და აგრეთვე ქალაქ ფოთთან მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფის კალაპოტის ფერდობების გამაგრების ამჟამინდელი ავარიული მდგომარეობა ასევე განაპირობა მათში დამყარებული და დაუმყარებელი ტალღური მოძრაობის დამანგრეველმა ზემოქმედებამ. მიზეზი უნდა ვეძებოთ საშუალო და მსხვილი არხების საანგარიშო-ნორმატიულ დოკუმენტებში, სადაც მხედველობაში მიღებული არ არის ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედება [5, 20, 21, 23].

ქვემოთ მოყვანილი გაანგარიშების მეთოდები ერთ-ერთი მცდელობაა ამ მიმართულებით არსებული ხარვეზის შევსებისა. მას საფუძვლად უდევს ნაპირგასწვრივი დამყარებული ტალღური მოძრაობის ჰიდროდინამიკური განტოლებების არსებული და ნაწილობრივ ჩვენს მიერ მიღებული ამოხსნები ტრაპეციული არხებისათვის.

ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელება უსასრულოდ დიდი სიღრმის წყალსატევებში, რომლებიც მხოლოდ ცალი მხრიდანაა შემოსაზღვრული სანაპირო ფერდობით, ჯერ კიდევ სტოქსის მიერ იქნა შესწავლილი [70, 74].

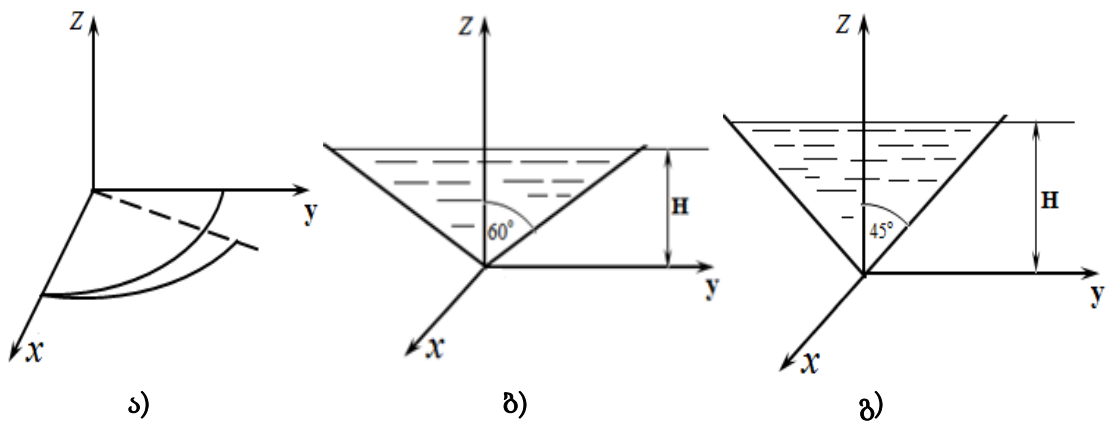
ნახ.3.5-ზე მოყვანილია სტოქსის ამოცანის საანგარიშო სქემა, სადაც ნაპირგასწვრივი  $x$ , ზღვისკენ მიმართული  $y$  და ვერტიკალური  $z$  კოორდინატები ლეზულობენ ნებისმიერად დიდ მნიშვნელობებს;  $\theta_0$  წარმოადგენს სანაპირო ფერდობის ჰორიზონტთან დახრის კუთხეს. კოორდინატთა ასეთ სისტემაში ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობის სტოქსის მიერ განსაზღვრულ პოტენციალს აქვს სახე:

$$\varphi = a \frac{g}{\sigma} \exp(kz \sin \theta_0 - ky \cos \theta_0) \cos(\sigma t - kx) \quad (3.2.1)$$

ხოლო წყლის ტალღური ზედაპირი აღიწერება განტოლებით

$$\eta = a \cdot \exp(-ky \cos \theta_0) \sin(\sigma t - kx), \quad (3.2.2)$$

სადაც  $a$  ნაპირის ხაზის ( $zy=0$ ) გასწვრივ მოცემული ტალღის ამპლიტუდაა;  $k$  ტალღური რიცხვია,  $k = 2\pi / \lambda$ ;  $\lambda$  - ნაპირგასწვრივი ტალღის სიგრძე;  $\sigma$  - ტალღურ რხევათა სიხშირე,  $\sigma = 2\pi / \tau$ ;  $\tau$  - პერიოდი.



ნახ. 3.5. ნაპირგასწვრივი ტალღების საანგარიშო სქემები, ა) ცალი მხრიდან შემოზღუდულ წყლის ზედაპირზე (სტოქსის ამოცანა); ბ) გ) სამკუთხა არხებში ვერტიკალთან ფერდობის  $45^\circ$  (კელანდი) და  $60^\circ$  (მაკდონალდი) დახრილობის შემთხვევაში.

ნაპირგასწვრივი ტალღების ქიმები გეგმაში წარმოადგენს სანაპირო ხაზის პერპენდიკულარულ წრფეებს, ხოლო ამპლიტუდა სანაპირო ხაზის გასწვრივ ექსპონენციალურად კლებულობს ზღვის მიმართულებით და

ნულს უახლოვდება ტალღის ნაპირგასწვრივი სიგრძის -  $\lambda = 2\pi/k$  ტოლ მანძილზე.

პოტენციალის (3.2.1) გამოსახულება აკმაყოფილებს დახრილი ფსკერის მიმართ სიჩქარის მდგენელის ნულთან ტოლობის პირობას.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \operatorname{tg} \theta_0, \quad \text{როცა } z = -y \tan \theta_0 \quad (3.2.3)$$

ხოლო დინამიკური სასაზღვრო პირობა წყლის თავისუფალ ზედაპირზე

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -g \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad \text{როცა } z = 0 \quad (3.2.4)$$

იძლევა შემდეგ დისპერსიულ დამოკიდებულებას

$$\sigma^2 = gk \sin \theta_0 \quad (3.2.5)$$

პოტენციალის გამოსახულების გაწარმოებით და კოორდინატებით მიიღება სტოქსის ტალღების სიჩქარეთა ველის მახასიათებლები ნაპირგასწვრივი, განივი და ვერტიკალური მიმართულებებით:

$$u = a \sqrt{\frac{gk}{\sin \theta_0}} \exp(kz \sin \theta_0 - ky \cos \theta_0) \sin(\sigma t - kx); \quad (3.2.6)$$

$$V = a \sqrt{\frac{gk}{\sin \theta_0}} \cos \theta_0 \exp(kz \sin \theta_0 - ky \cos \theta_0) \cos(\sigma t - kx); \quad (3.2.7)$$

$$w = a \sqrt{\frac{gk}{\sin \theta_0}} \sin \theta_0 \exp(kz \sin \theta_0 - ky \cos \theta_0) \cos(\sigma t - kx). \quad (3.2.8)$$

სამკუთხა განივკვეთის არხებისთვის ორგანზომილებიანი ტალღების გავრცელების ორი ზუსტი ამოხსნა არსებობს. ერთ-ერთი ეკუთვნის კელანდს, რომელიც ნაანგარიშევია სიმეტრიის ღერძთან  $45^\circ$ -ით დახრილი ფერდობისთვის და აქვს შემდეგი სახე:

$$\varphi = a \frac{g}{\sigma} \coth \frac{ky}{\sqrt{2}} \coth \frac{kz}{\sqrt{2}} \cos kx \cdot \sin \sigma t \quad (3.2.9)$$

აქ ღერძი მიჰყვება ფსკერის ხაზს; მდგარი ტალღების სიხშირე გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\sigma^2 = \frac{gk}{\sqrt{2}} \tanh \frac{kH_0}{\sqrt{2}} \quad (3.2.10)$$

სადაც  $H_0$  წყლის მაქსიმალური სიღრმეა სამკუთხა არხში.

წყლის თავისუფალი ზედაპირი აღიწერება განტოლებით

$$\eta = a \coth \frac{kH_0}{\sqrt{2}} \coth \frac{ky}{\sqrt{2}} \cos kx \cdot \sin \sigma \quad (3.2.11)$$

რომლის თანახმად, როცა არხში აღინიშნება გრძელი ტალღების რხევა, ანუ როცა არხში აღინიშნება გრძელი ტალღების რხევა, ანუ როცა  $kH_0$  ან  $H_0/\lambda$  მცირე რიცხვები, თავისუფალ ზედაპირს გააჩნია ჩვეულებრივი სინუსოიდალური სახე მუდმივი ამპლიტუდით:

$$\eta = a \cos kx \cdot \sin \sigma \quad (3.2.12)$$

მოკლე ტალღების შემთხვევაში, ანუ როცა  $kH_0$  დიდი რიცხვია

$$\eta = \frac{a}{4} \exp \frac{kH_0}{\sqrt{2}} \exp \left( \pm \frac{ky}{\sqrt{2}} \right) \cos kx \cdot \sin \sigma = a_0 \exp \left( \pm \frac{ky}{\sqrt{2}} \right) \cos kx \cdot \sin \sigma \quad (3.2.13)$$

სადაც  $a_0$  ტალღის ამპლიტუდაა სითხის ზედაპირზე არხის სიმეტრიის ღერძის გასწვრივ; ნიშნები „ $\pm$ “ შეესაბამება სიმეტრიის ღერძიდან ფერდობის მიმართულებით ტალღის სიმაღლის ექსპონენციალურ ზრდას (ისევე, როგორც სტოქსის ამოხსნაში).

სამკუთხა არხის ვერტიკალთან  $60^\circ$ -ით დახრილი ფერდობების შემთხვევაში მაკდონალდის ამოხსნა პოტენციალის მიმართ გამოსახება დამოკიდებულებით:

$$\begin{aligned} \varphi = & a \frac{g}{\sigma} \left( \coth k(z - H_0) + \frac{\sigma^2}{gk} \sinh k(z - H_0) \right) \cdot \cos kx \cos \sigma + \\ & + 2 \frac{a\sigma^2}{gk} \cosh \frac{ky\sqrt{3}}{2} \left( \cosh k \left( \frac{z}{2} + H_0 \right) - \frac{\sigma^2}{gk} \sinh k \left( \frac{z}{2} + H_0 \right) \right) \cdot \cos kx \cos \sigma \end{aligned} \quad (3.2.14)$$

ხოლო ტალღის სიხშირე აკმაყოფილებს შემდეგი სახის ბიკვადრატულ განტოლებას

$$2 \left( \frac{\sigma^2}{gk} \right)^2 - 3 \left( \frac{\sigma^2}{gk} \right) \coth 3 \frac{kH_0}{2} + 1 = 0 \quad (3.2.15)$$

(3.2.15) განტოლების ამოხსნა იძლევა  $\sigma$  -ს ოთხ მნიშვნელობას.

არხში ნაპირგასწვრივი მოკლეტალღოვანი რხევების შემთხვევაში ანუ, როცა  $\coth 3 \frac{kH_0}{2} = 1$  (3.2.15) განტოლების ამოხსნა იძლევა ფესვების შემდეგ მნიშვნელობებს:

$$\sigma^2 = gk \quad \text{და} \quad \sigma^2 = \frac{gk}{2} \quad (3.2.16)$$

პირველი მათგანი შეესაბამება სითხის თავისუფალ ზედაპირს

$$\eta = -a \cos kx \cdot \sin \sigma t - 2a \cosh \frac{ky\sqrt{3}}{2} \left( \cosh \frac{3kH_0}{2} - \sinh \frac{3kH_0}{2} \right) \cos kx \cdot \sin \sigma t \quad (3.2.17)$$

რომლის თანახმად ტალღის სიმაღლე (ამპლიტუდა) თითქმის არ იცვლება არხის განივი მიმართულებით. მეორე ფესვის გამოყენებით ვღებულობთ:

$$\eta = -a \cos kx \cdot \sin \sigma t - 2a \cosh \frac{ky\sqrt{3}}{2} \left( \cosh \frac{3kH_0}{2} - \frac{1}{2} \sinh \frac{3kH_0}{2} \right) \cos kx \cdot \sin \sigma t, \quad (3.2.18)$$

რაც მიგვითითებს ტალღების ამპლიტუდის მნიშვნელოვან ზრდაზე სიმეტრიის ღერძიდან განივი მიმართულებით.

როგორც ვხედავთ, რამდენადაც ეს პარადოქსულად არ უნდა გვეჩვენოს, სამკუთხა არხებში ერთი და იგივე სიგრძის ტალღები შესაძლოა ვრცელდებოდეს სხვადასხვა სიხშირით (პერიოდით) და აქედან გამომდინარე - სხვადასხვა სიჩქარით, მაგრამ უნდა აღინიშნოს ისიც, რომ ერთიდაიგივე სიგრძისა და სხვადასხვა სიხშირის ტალღებს გააჩნიათ სხვადასხვა ტალღური რელიეფი, რაც მიგვანიშნებს იმაზე, რომ განხილულ წრფივ ამოცანაში, მსგავსად არაწრფივი მიახლოებისა, აღინიშნება (თუმცა არაცხადი სახით) სიხშირის დამოკიდებულება ტალღის რელიეფზე ანუ ტალღის ამპლიტუდაზე.

მხოლოდ ამ სამი ზუსტი ამოხსნით შემოიფარგლება პრაქტიკისთვის მეტად მნიშვნელოვანი ამოცანა ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელების თაობაზე.

როგორც ზემოთ მოყვანილი ამოხსნები გვიჩვენებს, ნაპირგასწვრივი ტალღების ამპლიტუდის ზრდა სანაპირო ფერდობებზე აღინიშნება ან „უსასრულოდ“ დიდი სიგანისა და სიღრმის წყალსატევებში, ან  $90^\circ$  და  $120^\circ$

გაშლილობის მქონე სამკუთხა არხებში მათში სიღრმესა და სიგანესთან შედარებით მოკლე სიგრძის ტალღების გავრცელების შემთხვევაში.

რაც შეეხება ნებისმიერი გაშლილობის სამკუთხა და მითუმეტეს ტრაპეციულ არხებს, მათში დისპერსიული ტალღების სასაზღვრო პირობები იმდენად რთულდება, რომ ასეთ არხებში გარდა გარკვეული მიახლოებისა ტალღური განტოლებების ამოხსნა შეუძლებელი ხდება.

ქვემოთ მოგვყავს სამკუთხა და ტრაპეციულ არხებში ნაკადზე ზედდებული ტალღური მოძრაობის ამსახველი განტოლებების მიახლოებითი ამოხსნა, როცა სანაპირო ფერდობების დახრის კუთხე ნებისმიერია.

### 3.2.2. წყლის ტალღური მოძრაობის გაანგარიშება ნებისმიერად დახრილი ფერდობების მქონე არხებში

ვთქვათ, ნებისმიერი  $2\alpha_0$  გაშლილობის კუთხის მქონე სამკუთხა არხში მუდმივი  $U_0$  სიჩქარით მოძრავ წყლის ზედაპირზე აღიძრება  $\lambda$  სიგრძის მქონე გრძივი მიმართულების რეგულარული ტალღები. ჩვენი მიზანია ამ ტალღების თავისუფალი ზედაპირისა და სიჩქარეთა ველის განსაზღვრა ნაკადის ნებისმიერ წერტილში.

ნახ.5.3-ზე მოყვანილ დეკარტის საკოორდინატო სისტემაში, სადაც  $X$  ღერძი ემთხვევა ფსკერის ხაზს,  $Z$  –სიმეტრიის ვერტიკალურ ღერძს, ხოლო  $Y$  მიმართულია სიმეტრიის ღერძიდან ფსკერის ხაზის მართობულად, ტალღური მოძრაობის სიჩქარეთა ველის პოტენციალის გაწრფივებულ განტოლებებს აქვთ სახე:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.2.19)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + U_0^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2U_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x \partial t} = -g \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \text{ როცა } z = H_0 \quad (3.2.20)$$

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial z} \sin \alpha_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cos \alpha_0 = 0, \text{ როცა } z = \pm y \tan \alpha_0 \quad (3.2.21)$$





$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} = 0 \quad (3.2.25)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + U_0^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2U_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x \partial t} = -g \left( \cos \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\sin \alpha}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \right), \text{ როცა } r \cos \alpha = H_0 \quad (3.2.26)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} = 0, \text{ როცა } \alpha = \pm \alpha_0 \quad (3.2.27)$$

ნიშანი „+“ აიღება მარჯვენა, ხოლო - „-“ მარცხენა ნახევარსექტორში.

ვინაიდან განვიხილავთ  $X$  ღერძის გასწვრივ მოძრავ მუდმივი სიგრძის მქონე პერიოდულ ტალღებს, სიჩქარეთა ველის პოტენციალი შეიძლება წარმოვიდგინოთ ნამრავლის სახით:

$$\varphi = \psi(r, \alpha) \exp[i(\sigma t - kx)] \quad (3.2.28)$$

სადაც  $i$  კომპლექსური რიცხვია;  $\sigma = 2\pi/\tau$  - ტალღურ რხევათა სიხშირე;  $\tau$  წარმოადგენს პერიოდს;  $k = 2\pi/\lambda$  - ტალღურ რიცხვს. მაშინ (3.2.25)–(3.2.27) განტოლებები დებულობენ სახეს:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \alpha^2} - k^2 \psi = 0 \quad (3.2.29)$$

$$(\sigma - kU_0)^2 \psi = g \left( \cos \alpha \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\sin \alpha}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \alpha} \right) \text{ როცა } r \cos \alpha = H_0 \quad (3.2.30)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \alpha} = 0, \text{ როცა } \alpha = \pm \alpha_0 \quad (3.2.31)$$

(3.2.29-2.2.31) განტოლებები ვრცელდება ფერდობის ფუძეზე აღმართულ ვერტიკალსა და სანაპირო ხაზს შორს მდებარე სამკუთხა არეში. რაც შეეხება ტრაპეციული არხის დარჩენილ მართკუთხა უბანს, აქ ტალღური მოძრაობა უნდა იქნას შეზღუდული სამკუთხა უბნებზე (3.2.29-2.2.31) 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 (3.2.29-2.2.31) ამოცანის ამოხსნას კანტოროვიჩის

პირდაპირი მეთოდით (ვინაიდან, როგორც აღვნიშნეთ, ამ ამოცანის ზუსტი ამოხსნა გადაულახავ მათემატიკურ სირთულეს წარმოადგენს).

ამისთვის წარმოვიდგინოთ  $\psi$  ფუნქცია

$$\psi = f(r)F(\alpha) \quad (3.2.32)$$

ნამრავლის სახით, მივიჩნიოთ  $f(r)$  ფუნქცია საბაზისო ფუნქციად და მივანიჭოთ მას მნიშვნელობა

$$f(r) = r \cosh kr \quad (3.2.33)$$

ადვილი შესამჩნევია, რომ (3.2.32) და (3.2.33) გამოსახულებების გათვალისწინებით (3.2.29-2.2.31) განტოლებები ღებულობენ სახეს:

$$\frac{d^2 F}{d\alpha^2} f + r \frac{df}{dr} F = 0; \quad (3.2.34)$$

$$(\sigma - kU_0)^2 fF = g \cos \alpha F \frac{df}{dr} + \frac{g \sin \alpha}{r} \cdot f \frac{dF}{d\alpha}, \text{ როცა } r \cos \alpha = H_0 \quad (3.2.35)$$

$$\frac{dF}{d\alpha} = 0, \text{ როცა } \alpha = \pm \alpha_0 \quad (3.2.36)$$

კანტოროვიჩის მეთოდის შესაბამისად გავამრავლოთ (3.2.34) განტოლება საბაზისო (3.2.33) ფუნქციაზე და გავაინტეგროთ იგი  $r$ -ის ცვლილებების მთელ არეში 0-დან  $H_0/\cos \alpha_0$ -მდე. ინტეგრების შედეგად მივიღებთ:

$$\left[ \frac{\sinh(2k H_0/\cos \alpha_0)}{4k} + \frac{H_0}{2 \cos \alpha_0} \right] \cdot \frac{d^2 F}{d\alpha^2} + \left[ \frac{H_0}{4 \cos \alpha_0} \cosh(2k H_0/\cos \alpha_0) - \frac{\sinh(2k H_0/\cos \alpha_0)}{8k} \right] \cdot F = 0 \quad (3.2.37)$$

(3.2.37) განტოლება წარმოადგენს მუდმივ კოეფიციენტებიან მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლებას. მის ზოგად ამონახსნს აქვს სახე:

$$F = C_1 e^{im_1 \alpha} + C_2 e^{-im_2 \alpha} \quad (3.2.38)$$

სადაც  $C_1$  და  $C_2$  ინტეგრების მუდმივებია; ხოლო მახასიათებელი განტოლების ფესვები განისაზღვრება დამოკიდებულებით

$$m = \pm \left[ \frac{(kH_0/\cos \alpha_0) \cdot \coth(2kH_0/\cos \alpha_0) - 1/2}{1 + (2kH_0/\cos \alpha_0)/\sinh(2kH_0/\cos \alpha_0)} \right]^{1/2} \quad (3.2.39)$$

სანაპირო ფერდობზე (3.2.36) პირობის გამოყენებით  $c_1$  და  $c_2$  მუდმივები დაიყვანება ერთ  $C$  მუდმივზე, რის შემდეგაც (3.2.38) ამონახსნის რეალური ნაწილი ღებულობს სახეს:

$$F(\alpha) = C \cos m(\alpha \pm \alpha_0) \quad (3.2.40)$$

თუ შემოვიტანთ აღნიშვნას

$$C = \frac{g}{(\sigma - kU_0)} \cdot \frac{a_0}{\cosh H_0 \cos m\alpha_0} \quad (3.2.41)$$

(3.2.33), (3.2.38) და (3.2.40) გამოსახულებების გათვალისწინებით სიჩქარეთა ცვლის პოტენციალის რეალური ნაწილი მიიღებს სახეს:

$$\varphi = a_0 \frac{g}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\cosh kr}{\cosh kH_0} \frac{\cos m(\alpha \mp \alpha_0)}{\cos m\alpha_0} \cos(\sigma - kx) \quad (3.2.42)$$

ხოლო (3.2.22) პირობის საფუძველზე, (3.2.41) აღნიშვნის გათვალისწინებით სითხის ტალღური ზედაპირი აღიწერება განტოლებით:

$$\eta = a_0 \frac{\cosh(kH_0/\cos \alpha_0)}{\cosh kH_0} \cdot \frac{\cos m(\alpha \mp \alpha_0)}{\cos m\alpha_0} \sin(\sigma - kx) \quad (3.2.43)$$

სადაც  $\alpha_0$   $\alpha$  იცვლება 0-დან  $\pm \alpha_0$ -მდე.

როგორც ეს (3.2.42) და (3.2.43) გამოსახულებებიდან ჩანს, სამკუთხა არხის სიმეტრიის ღერძზე ან ტრაპეციული არხის შუა, მართკუთხა უბანზე ტალღებს აქვთ ჩვეულებრივი სინუსიოდალური სახე მუდმივი  $a_0$  ამპლიტუდით. მართლაც, როცა  $\alpha = 0$ , (3.2.43)-დან ვღებულობთ

$$\eta = a_0 \cdot \sin(\sigma - kx) \quad (3.2.44)$$

ხოლო პოტენციალის (3.2.42) გამოსახულება ღებულობს მნიშვნელობას:

$$\varphi = a_0 \frac{g}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\cosh kz}{\cosh kH_0} \cos(\sigma - kx) \quad (3.2.45)$$

(3.2.44) და (3.2.45) გამოსახულებები ზუსტად ემთხვევა მუდმივი სიღრმის ნაკადზე ტალღების მოძრაობის კლასიკურ ამოხსნებს, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ მათში, ისევე როგორც (3.2.42) და (3.2.43) დამოკიდებულებებში, ტალღურ რხევათა სიხშირე  $\sigma$ , მსგავსად

მაკდონალდის ზემოთმოყვანილი ამოხსნისა, აღარ არის ცალსახად დამოკიდებული არხში ნაპირგასწვრივი ტალღების სიგრძეზე. კერძოდ, იგი შეიძლება ღებულობდეს როგორც მაქსიმალურ მნიშვნელობებს, განსაზღვრულს ცნობილი დამოკიდებულებით

$$(\sigma - kU_0)^2 = gk \tanh kH_0 \quad (3.2.46)$$

ასევე მინიმალურს, განსაზღვრულს ფორმულით

$$(\sigma - kU_0)^2 = gk \cos \alpha_0 \tanh \left( \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} \right), \quad (3.2.47)$$

ტალღური მოძრაობის სიხშირეთა ზღვრული მნიშვნელობები გამოსახული (3.2.46) და (3.2.47) დამოკიდებულებებით, მიიღება თავისუფალ ზედაპირზე სასაზღვრო პირობებში  $\psi$  ფუნქციის მიახლოებითი მნიშვნელობის ჩასმისა და ზღვრული გადასვლის განხორციელების შედეგად. კერძოდ, (3.2.32), (3.2.33) და (3.2.40) ფორმულათა გათვალისწინებით (3.2.30) სასაზღვრო პირობა ღებულობს სახეს:

$$(\sigma - kU_0)^2 = gk \cos \alpha_0 \tanh \left( \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} \right) + \frac{gm \sin 2\alpha}{2H_0} \tanh m(\alpha - \alpha_0), \quad (3.2.48)$$

რაც ზღვრულ შემთხვევაში, როცა  $\alpha = 0$  და  $\alpha = \alpha_0$  დაიყვანება შესაბამისად (3.2.46) და (3.2.47) გამოსახულებებზე.

სიხშირის შუალედური მნიშვნელობების მისაღებად საჭიროა გაწარმოვდეს (3.2.48) გამოსახულება  $\alpha$  კუთხით, წარმოებული გაუტოლდეს ნულს, ვინაიდან  $\sigma - kU_0 = const$  და შემდგომ მიღებული და (3.2.48) განტოლებათა სისტემიდან გამოირიცხოს  $\alpha$ , ასეთი პროცედურის შედეგად მიღებული განტოლების ამონახსნი  $\sigma - kU_0$  გამოსახულების მიმართ მოგვცემს სიხშირის საძიებელ მნიშვნელობებს. თეორიულად შესაძლებელია აგრეთვე ტალღურ რხევათა სიხშირის ერთი შუალედური მნიშვნელობის პოვნაც, თუ გამოვიყენებთ რელის ცნობილ მეთოდს [74.] და მიახლოებითი ამოხსნების საფუძველზე განვსაზღვრავთ ტალღური მოძრაობის პოტენციალური და კინეტიკური ენერგიების ფარდობას, რაც იძლევა

სიხშირის შუალედურ მნიშვნელობას. მაგრამ ამ ორივე გზის განხორციელება, თუ გავითვალისწინებთ ერთის მხრივ (3.2.48) გამოსახულების სირთულეს, ხოლო მეორეს მხრივ ნაკადის სიღრმის ცვალებადობას განივი მიმართულებით, დაკავშირებულია უაღრესად გადატვირთულ მათემატიკურ გარდაქმნებთან. უფრო მეტიც, რომც ვფლობდეთ ასეთ შედეგებს, მსგავსად მაკდონალდის ზუსტი ამოხსნებისა, ტალღების სიხშირის (ან პერიოდით - სიგრძის) ანგარიშისას ვერ მივანიჭებდით უპირატესობას რომელიმე მათგანს. ამიტომ განსახილველ შემთხვევაში დავჯერდეთ მხოლოდ ინტუიციურ წარმოდგენებს: ჩვენი აზრით ტრაპეციული კვეთის არხებში ერთიანი ფრონტის ტალღური მოძრაობის სიხშირის ან რაც იგივეა - ტალღების გადაადგილების ფაზური სიჩქარის ჩამოყალიბებაში განმსაზღვრელ როლს თამაშობს არხის სიგანე ფუძეში. თუ იგი მცირეა წყლის ზედაპირზე ნაპირგასწვრივი ტალღის სიგრძესთან შედარებით, მაშინ სიხშირის გაანგარიშებისას უპირატესობა უნდა მიენიჭოს (3.2.47) დამოკიდებულებას, თუ ტრაპეციული არხის სიგანე ფუძეში მნიშვნელოვნად აჭარბებს ტალღის სიგრძეს, სიხშირე უნდა ვიანგარიშოთ (3.2.46) დამოკიდებულების საფუძველზე.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ სამკუთხა და ფუძეში ვიწრო სიგანის ტრაპეციულ არხებში სიხშირის საანგარიშო (3.2.47) ფორმულა დაიყვანება სტოქსის (3.2.5) 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 -  $\tanh\left(\frac{KH_0}{\cos \alpha_0}\right) \approx \frac{KH_0}{\cos \alpha_0}$ , სიხშირე იანგარიშება ცნობილი ფორმულით

$\sigma = kU_0 \pm k\sqrt{gH_0}$ , სადაც ნიშანი „+“ აიღება ნაკადისა და ტალღების გავრცელების ერთიდაიგივე მიმართულების შემთხვევაში, ხოლო „-“ ნიშანი ტალღების ნაკადის საწინააღმდეგო მიმართულებით გავრცელებისას. თუ

$$\text{არხს გააჩნია ვერტიკალური ფერდობები } \alpha_0 = 0, \quad \theta_0 = \frac{\pi}{2} \quad (3.2.47)$$

გამოსახულება ემთხვევა (3.2.46)-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 სიღრმესთან შედარებით გრძელი ტალღები, ანუ როცა სრულდება მიახლოებითი ტოლობები:

$$\coth\left(\frac{2kH_0}{\cos \alpha_0}\right) \approx \cos \frac{\alpha_0}{2kH_0}; \quad \sinh \frac{2kH_0/\cos \alpha_0}{(2kH_0/\cos \alpha_0)} \approx 1; \quad m \rightarrow 0; \quad \cos m\alpha_0 \approx 1 \quad (3.2.49)$$

გამომდინარე (3.2.43) დამოკიდებულებიდან არხში განივი მიმართულებით ცენტრიდან სანაპირო ფერდობებისკენ აღინიშნება ამპლიტუდის შედარებით ნაკლები ინტენსივობით მატება, ვიდრე მოკლე ტალღების გავრცელების შემთხვევაში გვაქვს

$$\tanh\left(\frac{kH_0}{\cos \alpha_0}\right) \approx 1; \quad \frac{2kH_0/\cos \alpha_0}{\sinh(2kH_0/\cos \alpha_0)} \approx 0; \quad m \approx \left(\frac{kH_0}{\cos \alpha_0} - \frac{1}{2}\right)^{1/2} \quad (3.2.50)$$

და (3.2.43) გამოსახულების თანახმად ნაპირგასწვრივი ტალღის ამპლიტუდა ფერდობებზე, სანაპირო ხაზის გასწვრივ, ტოლია

$$a = a_0 \frac{\coth(kH_0/\cos \alpha_0)}{\coth kH_0} \cdot \frac{1}{\cos m\alpha} \quad (3.2.51)$$

რაც  $(\cos m\alpha_0)^{-1}$  -ჯერ აჭარბებს ნაპირის ხაზზე გრძელი ტალღების ამპლიტუდას.

პოტენციალის ტრაპეციულ და სამკუთხა არხებში ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელებისას სითხის ნაწილაკების სიჩქარის მდგენელი სანაპირო ფერდობის  $(\alpha = \alpha_0)$  ნებისმიერ წერტილში იანგარიშება შემდეგი დაკიდებულების საფუძველზე:

– სანაპირო ფერდობის ( $x$  ღერძის) გასწვრივ

$$U = U_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial x} = U_0 + \frac{a_0 g k}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\sinh kr}{\cosh kH_0} \cdot \frac{1}{\cos m\alpha_0} \cdot \sin(\sigma - kx) \quad (3.2.52)$$

–სანაპირო ფერდობის სიბრტყეში, ქვევით და ზევით  $x$  ღერძის ნორმალური მიმართულებით.

$$V = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{a_0 g k}{\sigma - k U_0} \cdot \frac{\sinh kr}{\cosh k H_0} \cdot \frac{1}{\cos m \alpha_0} \cdot \cos(\sigma - kx) \quad (3.2.53)$$

ფერდობის სიბრტყის ნორმალური მიმართულებით (3.2.36) სასაზღვრო პირობის შესაბამისად (3.2.42) გამოსახულების საფუძველზე, სიჩქარის  $w$  მდგენელი უდრის ნულს.

(3.2.42) და (3.2.53) გამოსახულებებში  $m$  კოეფიციენტი იანგარიშება (3.2.43) გამოსახულების საფუძველზე, ხოლო რადიუს-ვექტორი  $r$  ღებულობს მნიშვნელობებს

$$r = \frac{H_0 - H}{\cos \alpha_0} \quad (3.2.54)$$

სადაც  $H$  წყლის სიღრმეა სანაპირო ფერდობის ნებისმიერი წერტილის თავზე; არხის ფსკერზე და სიჩქარის მდგენელი ემთხვევა რა ვერტიკალურ მდგენელს (3.2.53)-ის თანახმად უდრის ნულს. სანაპირო ხაზის გასწვრივ  $H = 0$  და  $r = H_0 / \cos \alpha_0$ .

ზემოთმოყვანილ ფორმულებში, სტოქსის, კელანდის 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. ამ უკანასკნელის საანგარიშოდ საჭიროა ტალღური ზედაპირის (3.2.43) გამოსახულება, როცა  $\sin(\sigma - kx) = 1$  გავუტოლოთ  $\alpha_0$  -ს ფერდობის განტოლებას და ვიპოვოთ პოლარული  $\alpha$  კუთხის ის მნიშვნელობა, რომელიც აკმაყოფილებს ამ გატოლების შედეგად მიღებულ ტრანცენდენტულ განტოლებას.

იგი შეიძლება აპრაქტიკისთვის საკმარისი სიზუსტით შეიცვალოს მარტივი დამოკიდებულებით



$$h' = \frac{a}{\cos \alpha_0} \quad (3.2.55)$$

სადაც  $h'$  გრძივი მიმართულების ტალღით ფერდობის დასველების მაქსიმალური სიმაღლეა ათვლილი წყლის შეუშფოთებელი ზედაპირიდან;  $a$  ნაპირგასწვრივი ტალღის ამპლიტუდაა და გამოითვლება (3.2.41)-ით.

მიღებული შედეგები ვრცელდება გრძელ და ისეთ დისპერსიულ ტალღებზე, რომელთაც ერთი მთლიანი ფრონტი გააჩნიათ არხის მთელ სიგანეზე ანუ რომელთათვისაც სრულდება პირობა  $\cos m\alpha_0 \geq 0$ . ეს პირობა (3.2.39) დამოკიდებულების საფუძველზე დაიყვანება შემდეგი სახის უტოლობაზე :

$$\lambda \geq \lambda_{\text{ზღ}} = \frac{2\pi H_0}{\left(0,5 + \frac{\pi^2}{4\alpha_0^2}\right) \cos \alpha_0} \quad (3.2.56)$$

სადაც  $\alpha_0$  რადიანებშია გამოსახული.

როცა  $\lambda \geq \lambda_{\text{ზღ}}$  ტალღის ფრონტი აღარ იკავებს არხის მთელ სიგანეს და წარმოიშობა ნაპირგასწვრივი საკვანძო წირები, რომელთა რიცხვი ერთ რომელიმე სანაპირო ფერდობზე განისაზღვრება

$$n = \frac{m}{\pi} \alpha_0 + 0,5 \quad (3.2.57)$$

დამოკიდებულების მთელი ნაწილით.

ამ შემთხვევაში არხში წარმოიშობა სტოქსის ტიპის ტალღები, რომელთა ამპლიტუდა არხის ფერდობებზე, სანაპირო ხაზის გასწვრივ, დიდად აჭარბებს ტალღების ამპლიტუდას არხის ცენტრალურ ნაწილში.

როცა  $\lambda < \lambda_{\text{ზღ}}$  -ზე, მსგავსად სტოქსის ამოხსნისა, უმჯობესია მივმართოთ (3.2.57) განტოლების ინტეგრების მუდმივის ნორმირებას ნაპირის ხაზის გასწვრივ მოცემული ამპლიტუდის მეშვეობით, ანუ ნაცვლად (3.2.41) გამოსახულებისა, ვისარგებლოთ აღნიშვნით

$$C = \frac{g}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{a}{\coth(kH_0/\cos \alpha_0)} \quad (3.2.58)$$

სადაც  $a$  - ნაპირის ხაზის მოცემული ამპლიტუდაა.

(3.2.58) აღნიშვნის გათვალისწინებით სიჩქარეთა ველის პოტენციალისა და თავისუფალი ზედაპირის ამსახველი დამოკიდებულებები შესაბამისად დებულობენ სახეს:

$$\varphi = \frac{ag}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\cosh kr}{\cosh kH_0} \cos m(\alpha - \alpha_0) \cos(\sigma - kx) \quad (3.2.59)$$

$$\eta = a \cdot \frac{\cosh(kH_0/\cos \alpha)}{\cosh(kH_0/\cos \alpha_0)} \cos m(\alpha - \alpha_0) \sin(\sigma - kx) \quad (3.2.60)$$

(3.2.60) 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

$$a_0 = a \cdot \left| \frac{\cosh kH_0 \cos m\alpha_0}{\cosh(kH_0/\cos \alpha_0)} \right| \quad (3.2.61)$$

რომელიც ფაქტიურად უმნიშვნელოა ნაპირზე ტალღის ამპლიტუდასთან შედარებით.

(3.2.59) დამოკიდებულების საფუძველზე ადვილად განისაზღვრება აგრეთვე წყლის ნაწილაკთა სიჩქარეები. როცა  $\lambda < \lambda_{\text{კლ}}$  ტალღური მოძრაობის სიხშირის საანგარიშოდ ვღებულობთ ნაკადზე სტოქსის განზოგადოებულ ფორმულას

$$\sigma = kU_0 \pm \sqrt{gk \cos \alpha_0} \quad (3.2.62)$$

ზედაპირზე ნაპირგასწვრივი საკვანძო წირების დაშორება ნაპირის ხაზიდან იანგარიშება ფორმულით

$$l = H \left( \tan g \alpha_0 - \tan \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{m} (n - 0,5) \right) \right) \quad (3.2.63)$$

რომელიც მიიღება  $c \cdot \sin(\alpha - \alpha_0) = 0$  განტოლების ამოხსნის საფუძველზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ ნაპირიდან პირველ საკვანძო წირსა და ნაპირის ხაზს შორის მოთავსებულ არეში ტალღური ზედაპირის საანგარიშო (3.2.60) გამოსახულება, როგორც ეს ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, იძლევა პრაქტიკულად ისეთივე შედეგს, რასაც სტოქსის ზუსტ ამოხსნა. ამავე დროს ისევე როგორც სტოქსის ზუსტ ამოხსნაში ფერდობზე, ნაპირის ხაზის ზევით მოკლე ტალღური ზედაპირის  $\eta$  კოორდინატი იზრდება იმდენად ინტენსიურად, რომ გარდა ძალზე მცირე ამპლიტუდის ტალღებისა, არ ხდება ტალღური ზედაპირის ამსახველი მრუდისა და სანაპირო ფერდობზე, ნაპირის ხაზს ზევით გრძივი მიმართულების მოკლე ტალღები განიცდიან მსხვრევას. ასეთ შემთხვევაში ფერდობის დასველების სიმაღლის საანგარშოდ დასაშვებია კვლავ ვისარგებლოთ (3.2.55) ფორმულით, მხოლოდ უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ნაპირის ხაზს ზევით ფერდობის დასველებას განაპირობებს არა უწყვეტი ზედაპირის მქონე, არამედ დამსხვრეული ტალღები.

მიღებული შედეგები, მიუხედავად მათი მიახლოებითი ხასიათისა, პრაქტიკული თვალსაზრისით მისაღებად უნდა ჩაითვალოს, რადგან ისინი აკმაყოფილებენ ზღვრული გადასვლის პირობებს და ამავე დროს შესაბამისობაშია ზემოთ მოყვანილ (3.3.2.1) ზუსტ ამოხსნებთან.

### 3.2.3. არხებში გრძივი ტალღური მოძრაობის გაანგარიშების მაგალითები

ტრაპეციულ არხებში ტალღური მოძრაობის ანგარიშისას გადამწყვეტი მნიშვნელობა ენიჭება ფერდობზე ტალღის ამპლიტუდის ზრდის მახასიათებლის  $m$  კოეფიციენტის დადგენას. (3.2.39) ფორმულის საფუძველზე ნახ.3.6.-ზე აგებულია  $m = f(kH_0 / \cos \alpha_0)$  მრუდი, რომელიც მნიშვნელოვნად ამარტივებს  $m$  კოეფიციენტის განსაზღვრის პროცედურას.

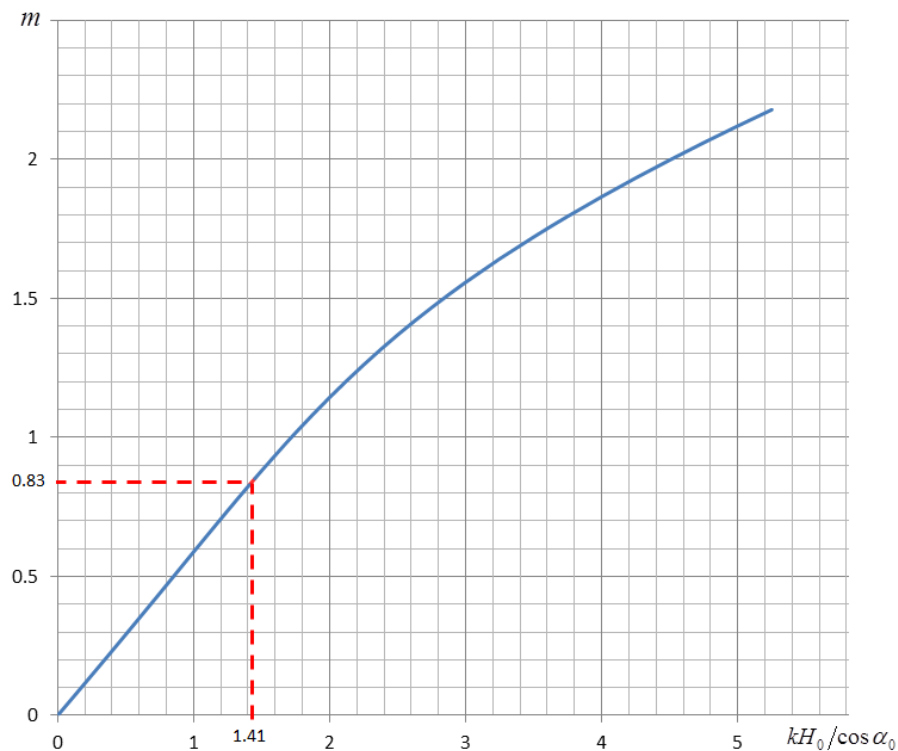
ქვემოთ მოყვანილ მაგალითებში განხილულია ტრაპეციულ არხებში ნაპირგასწვრივი ტალღების მოძრაობა, რომელთაც გააჩნიათ როგორც უწყვეტი ფრონტი არხის მთელ სიგანეზე, ასევე ნაპირგასწვრივი საკვანძო

წირები. ნაჩვენებია, რომ ამ უკანასკნელ შემთხვევაში, უშუალოდ ფერდობის სიახლოვეს, ჩვენს მიერ მიღებული მიახლოებითი ამონახსნები პრაქტიკულად ემთხვევა სტოქსის ზუსტ ამოცანას.

**მაგალითი 1.** ვთქვათ, ფუძეში  $b = 2.5$  მ სიგანის ტრაპეციულ არხში  $U_0 = 1.5$  მ/წმ სიჩქარისა  $m$  და  $H_0 = 1.0$  მ სიღრმის მქონე ნაკადზე ვრცელდება პერიოდული ტალღები, რომელთა სიგრძე  $\lambda = 0.5$  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  $H = 0.5$  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 (6,28) აჭარბებს როგორც (3.2.56) გამოსახულებით ნაანგარიშებ მნიშვნელობას :

$$\lambda_{\text{ხლ}} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1}{\left(0.5 + \frac{3 \cdot 14^2}{40.785^2}\right) \cdot 0.707} = 2.0 \text{ მ};$$



**ნახ. 3.7. არხის განივი მიმართულებით ტალღის ამპლიტუდის ზრდის მახასიათებელი  $m$  კოეფიციენტის მრუდი;**

ასევე არხის სიგანეს ფუძეში, ასეთი ტალღის ფრონტი დაიკავებს არხის მთელ სიგანეს ნაკადის ზედაპირზე ( $B=4,5$  მ), ხოლო მისი სიხშირე განისაზღვრება (3.2.57) დამოკიდებულების საფუძველზე. ვინაიდან, ტალღური რიცხვი  $k = 2 \cdot 3,14 / 6,28 = 1$ , ხოლო კომპლექსი  $\frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 1,41$ ,

(3.2.47) გამოსახულება გვაძლევს

$$\sigma - kU_0 = \sqrt{9,8 \cdot 1 \cdot 0,707 \cdot \tanh 1,41} = \sqrt{6,1} = 2,47 \text{ წმ}^{-1},$$

საიდანაც ტალღურ რხევათა სიხშირე ნაკადზე

$$\sigma = 1 \cdot 1,5 + 2,47 = 3,97 \text{ წმ}^{-1},$$

ხოლო პერიოდი და ფაზური სიჩქარე შესაბამისად

$$r = 2\pi / \sigma = 1,58 \text{ წმ}, \quad C = \sigma / k = 3,97 \text{ მ/წმ}.$$

არხში ტალღის ზედაპირის კოორდინატისა და სიჩქარეთა ველის საანგარიშოდ წინასწარ ვადგენთ (3.2.51)- (3.2.53) დამოკიდებულებებში შემავალ სიდიდეთა მნიშვნელობებს:

$$\cosh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 2,17 ; \quad \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 2,83 ; \quad \sinh \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 8,43 ; \quad \coth \frac{2kH_0}{\cos \alpha_0} = 1,01 ;$$

$$\cosh kH_0 = 1,54 ; \quad \sinh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 1,99 \quad \tanh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} = 0,89 .$$

მაშინ (3.2.39) დამოკიდებულების საფუძველზე არხის განივი მიმართულებით ტალღის ამპლიტუდის ზრდის მახასიათებელი კოეფიციენტი ტოლი იქნება (ნახ.3.2)

$$m = \sqrt{\frac{1,14 \cdot 1,01 - 0,5}{1 + \frac{2,83}{8,43}}} = 0,83 ,$$

ხოლო თვით ტალღის ამპლიტუდა სანაპირო ფერდობზე, ნაპირის ხაზის გასწვრივ (3.2.41) 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, ტალლის ამპლიტუდა სანაპირო ფერდობის გასწვრივ  $0,35:0,2=1,75$ -ჯერ აჭარბებს ამპლიტუდას არხის ცენტრალურ ნაწილში – სანაპირო ფერდობის ფუძეზე აღმართული ვერტიკალის გასწვრივ.

სანაპირო ფერდობზე ნაპირის ხაზის გასწვრივ წყლის ნაწილაკების მაქსიმალური სიჩქარე მიიღება (3.2.52) დამოკიდებულების საფუძველზე ტალლის ქიმის გავლის დროს, ანუ როცა  $\sin(\sigma - kx) = 1$ , ხოლო მინიმალური - ტალლის ფსკერის გავლისას, ანუ როცა  $\sin(\sigma - kx) = -1$ , ადვილი შესამჩნევია, რომ ამ შემთხვევაში გამომდინარე (3.2.33) და (3.2.34) ფორმულებიდან

$$U_{\max}^{\min} = U_0 \pm a \frac{gk}{\sigma - kU_0} \quad (3.2.64)$$

სადაც  $a$  იანგარიშება (3.2.52) ფორმულით, ხოლო ნიშნები „+“ და „-“ შესაბამისად აიღება მაქსიმალური და მინიმალური სიჩქარეების ანგარიშისას, როცა ტალლების გავრცელების მიმართულება ემთხვევა ნაკადის მიმართულებას. როცა ნაკადი და ტალლები ურთიერთსაწინააღმდეგოდ არიან მიმართულნი (3.2.64)-ში აიღება მოპიდაპირე ნიშნები.

ანალოგიურად, გამომდინარე (3.2.53) ფორმულიდან, სანაპირო ფერდობზე, ნაპირის ხაზის ზევით და ქვევით სითხის აცურება-ჩამოცურების მაქსიმალური სიჩქარე იანგარიშება ფორმულით

$$V = \pm a \frac{gk}{\sigma - kU_0} \tanh \frac{kH_0}{\cos \alpha_0} \quad (3.2.65)$$

ან თუ გავითვალისწინებთ (3.2.21) დისპერსიულ გამოსახულებას (3.35)-ში მივიღებთ:

$$V = \pm a \cdot \frac{\sigma - kU_0}{\cos \alpha_0} \quad (3.2.66)$$

განსახილველ შემთხვევაში (3.2.64) და (3.2.66) დამოკიდებულებები გვაძლევენ

$$U_{\max} = 1,5 + 0,35 \frac{9,8 \cdot 1}{2,47} = 2,9 \text{ მ/წმ};$$

$$U_{\min} = 1,5 - 0,35 \frac{9,8 \cdot 1}{2,47} = 0,1 \text{ მ/წმ};$$

$$\sigma - kU_0 = \sqrt{9,8 \cdot 1 \cdot 0,707 \cdot \tanh 1,41} = \sqrt{6,1} = 2,47 \text{ წმ}^{-1};$$

$$a = 0,2 \cdot \frac{2,17}{1,54} \cdot \frac{1}{\cos(0,83 \cdot 0,785)} = 0,35 \text{ მ. } \theta_0 = \alpha_0 = 0,785 \text{ რად, } \cos \alpha_0 = 0,707);$$

$$V = \pm 0,35 \cdot \frac{2,47}{0,707} = \pm 1,22 \text{ მ/წმ};$$

სანაპირო ფერდობის შუა ხაზზე, სადაც წყლის სიღრმე აღწევს  $H_0 = 0,5$  მ-ს, სიჩქარის მდგენელების ანგარიშისას (3.2.52)-(3.2.53) ფორმულებში უნდა ჩაისვას  $r$  -ის მნიშვნელობა განსაზღვრული (3.2.54) ტოლობით:

$$r = \frac{1 - 0,5}{0,707} = 0,707 \text{ მ}$$

მაშინ (3.2.51), (3.2.52) და (3.2.53) ფორმულების საფუძველზე მივიღებთ

$$U_{\min}^{\max} = U_0 \pm a \frac{gk}{\sigma - kU_0} \cdot \frac{\cosh kr}{\cosh kH_0 / \cos \alpha_0} \quad (3.2.67)$$

$$V = \pm a \cdot \frac{\sigma - kU_0}{\cos \alpha_0} \cdot \frac{\sinh kr}{\cosh kH_0 / \cos \alpha_0} \quad (3.2.68)$$

ჩვენს შემთხვევაში, როცა  $\cosh kr = \cosh 0,707 = 1,26$ ;  $\sinh 0,707 = 0,77$

(3.2.67) და (3.2.68) ფორმულები გვაძლევენ:

$$U_{\max} = 1,5 + 0,35 \frac{9,8 \cdot 1}{2,47} \cdot \frac{1,26}{2,17} = 2,31 \text{ მ/წმ};$$

$$U_{\min} = 1,5 - 0,35 \frac{9,8 \cdot 1}{2,47} \cdot \frac{0,77}{2,17} = 0,7 \text{ მ/წმ};$$

$$V = \pm 0,35 \cdot \frac{2,47}{0,707} \cdot \frac{0,77}{2,17} = \pm 0,12 \text{ მ/წმ};$$

როგორც ვხედავთ, ფერდობზე წყლის სიღრმის მატებასთან ერთად აღინიშნება წყლის ნაწილაკების სიჩქარეთა კლება.

ნახ.3.8.ა)-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

ტალლის ფსკერს). პროფილები აგებულია (3.2.43) დამოკიდებულების საფუძველზე, რისთვისაც მასში შემავალ პოლარულ  $\alpha$  კუთხეს მინიჭებული აქვს მნიშვნელობები 0-დან  $\alpha_0$  -მდე ფერდობების დასველების სიმაღლე ნაანგარიშვია (3.2.37) დამოკიდებულებით:

$$h' = 0,35 / 0,707 = 0,5 \text{ მ}$$

**მაგალითი 2.** ვთქვათ ტრაპეციულ არხში, რომლის ფერდობები ვერტიკალთან ადგენენ  $\alpha_0 = 60^\circ = 1,047$  რად, ვრცელდება ტალღები, რომელთა სიგრძე  $\lambda = 62,8$  მ-ს მნიშვნელოვნად აჭარბებს არხში  $U_0 = 1$  მ/წმ სიჩქრით მოძრავი წყლის ცოცხალი კვეთის ზომებს, კერძოდ, სიღრმეს -  $H_0 = 2,0$  და სიგანეს ფუძეში  $b = 15$  მ-ს, საჭიროა განისაზღვროს ტალლის ამპლიტუდა სანაპირო ხაზის გასწვრივ და მაქსიმალური სიჩქარეები თუ ტალლის 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 (3.2.21) ფორმულის თანახმად

$$m = \pm \left[ \frac{(kH_0 / \cos \alpha_0) \cdot \coth(2kH_0 / \cos \alpha_0) - 1/2}{1 + (2kH_0 / \cos \alpha_0) \cdot 1 / \sinh(2kH_0 / \cos \alpha_0)} \right]^{1/2} = \left( \frac{0,4 \cdot 1,51 - 0,5}{1 + 0,8 / 0,89} \right)^{1/2} = 0,23$$

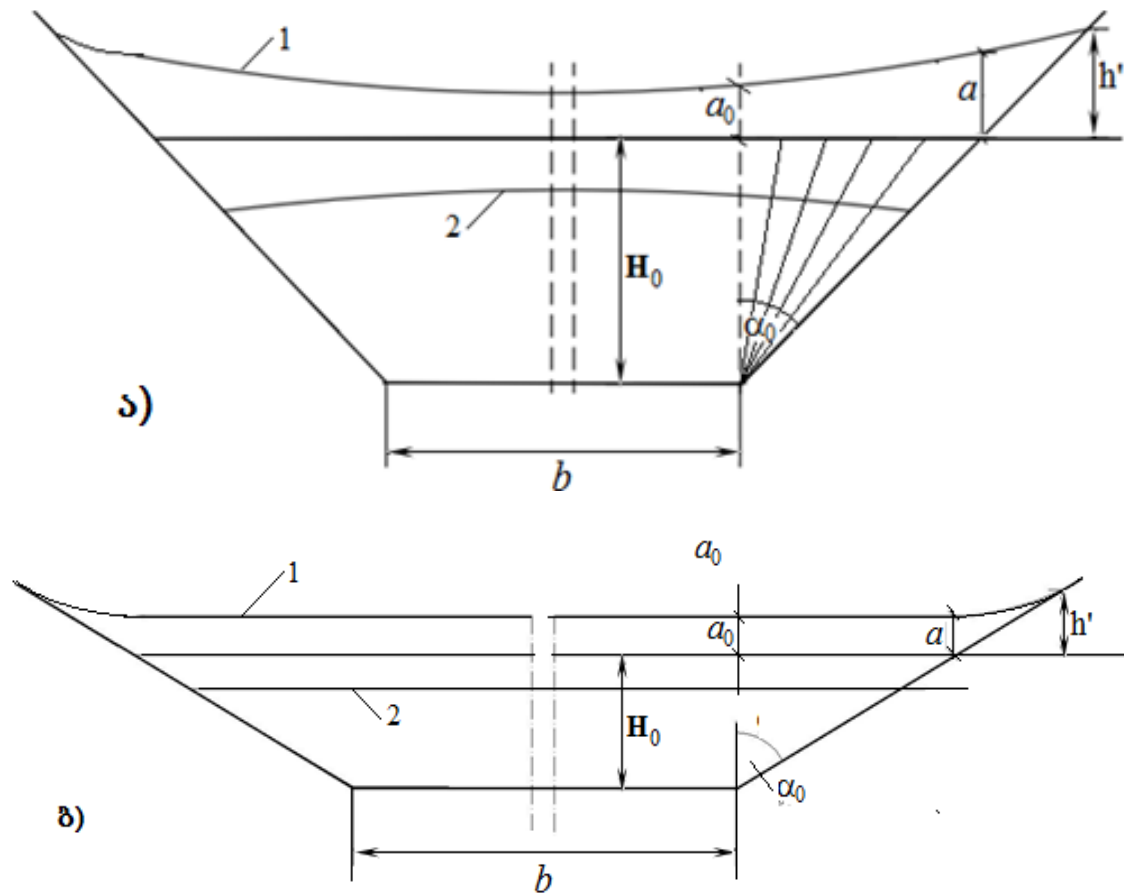
;

ხოლო ტალლის ამპლიტუდა ნაპირის ხაზის გასწვრივ, ნაანგარიშები (3.2.33) გამოსახულებით აღწევს მნიშვნელობას

$$a = 0,2 \cdot \frac{1,08}{1,02} \cdot \frac{1}{\cos(0,23 \cdot 1,04)} = 0,55 \text{ მ.}$$



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 (ნახ.3.8. ბ).



**ნახ. 3. 8. ნაპირგასწვრივი ტალღების განივი პროფილები ტრაპეციულ არხებში. ა) დისპერსიული ტალღები,  $H_0 = 1$  მ,  $b = 2,5$  მ,  $\alpha_0 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 62,8$  მ,  $a_0 = 0,2$  მ,  $a = 0,35$  მ,  $h' = 0,5$  მ; ბ) გრძელი ტალღები,  $H_0 = 2$  მ,  $b = 15$  მ,  $\alpha_0 = 60^\circ$ ,  $\lambda = 62,8$  მ,  $a_0 = 0,5$  მ,  $a = 0,55$  მ,  $h' = 1,1$  მ;  $b = 2,5$ . 1-ტალღის ქიმი, 2- ტალღის ფსკერი.**

გრძელი ნაპირგასწვრივი ტალღების რხევათა სიხშირე (3.2.47) 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 –  $\tau = 2\pi/\sigma = 12,1\text{მ}$ , ფაზური სიჩქარე –  $C = \lambda/\tau = 5,2\text{მ/წმ}$ .

სანაპირო ხაზის გასწვრივ წყლის ნაწილაკების მაქსიმალური სიჩქარეები (3.2.64) და (3.2.65) გამოსახულებების თანახმად ღებულობს 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  $\lambda = 62,8\text{მ}$  ( $k = 1$ ), ხოლო ამპლიტუდა ნაპირს ხაზის გასწვრივ –  $a = 0,5\text{მ}$ .

ვინაიდან  $\lambda < \lambda_{\text{ზღვრ}}$ , სადაც  $\lambda_{\text{ზღვრ}}$  (3.2.56) ფორმულით ტოლია 9მ-ის, ტრაპეციულ არხში აღნიშნული მოკლე ტალღების გავრცელებისას, გარდა ნაპირის ხაზის მართობული (განივი) საკვანძო წირებისა, წარმოიშობა ნაპირგასწვრივი საკვანძო წირები, რომელთა რიცხვი თითოეულ ფერდობზე (3.2.50) და (3.2.56) ფორმულების თანახმად

$$m = (1 \cdot 2 / 0,5 - 0,5)^{0,5} = 1,87; \quad n = \frac{1,87}{3,14} \cdot 1,043 - 0,5 = 1,18$$

არ აჭარბებს 1-ს. (3.2.45) დამოკიდებულების თანახმად ეს საკვანძო წირი ნაპირის ხაზებიდან არის დაშორებული მანძილით

$$l = 2 \cdot \left( \tan 1,04 - \tan \left( 1,04 - \frac{3,14}{1,87} \cdot (1 - 0,5) \right) \right) = 3,03 \text{ მ}.$$

ტალღურ რხევათა სიხშირე იანგარიშება (3.2.44) ფორმულით:

$$\sigma = 0,1 + (9,8 \cdot 0,1 \cdot 0,5)^{0,5} = 3,2 \text{ წმ}^{-1}; \quad \text{პერიოდი} - \tau = 2\pi/\sigma = 1,96 \text{ წმ}.$$

როცა საქმე გვაქვს „სტოქსის ტიპის“ მოკლე ტალღებიან წყლის თავისუფალი ზედაპირის ამსახველი (3.2.60) დამოკიდებულება შეიძლება შევცვალოთ ასიმპტოტური გამოსახულებით:

$$\eta = a \cdot \exp \left[ kH_0 \left( \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \alpha_0} \right) \right] \cos m(\alpha - \alpha_0) \sin(\sigma t - kx) \quad (3.2.69)$$

ტალღის განივი პროფილის ასაგებად, დროის იმ მომენტისთვის, როცა  $\sin(\sigma t - kx) = \pm 1$ ,  $\alpha$ -ს ვანიჭებთ მნიშვნელობებს  $60^\circ \geq \alpha \geq 0^\circ$ , ვანგარიშობთ

$$\exp \left[ kH_0 \left( \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \alpha_0} \right) \right] = e^{\beta(\alpha)} \text{ და } \cos m(\alpha - \alpha_0) \text{ კოეფიციენტებს, ვადგენთ}$$

ცხრილ 23-ს.

**ცხრილი 23. ტალღური ზედაპირის საანგარიშო მახასიათებლები**

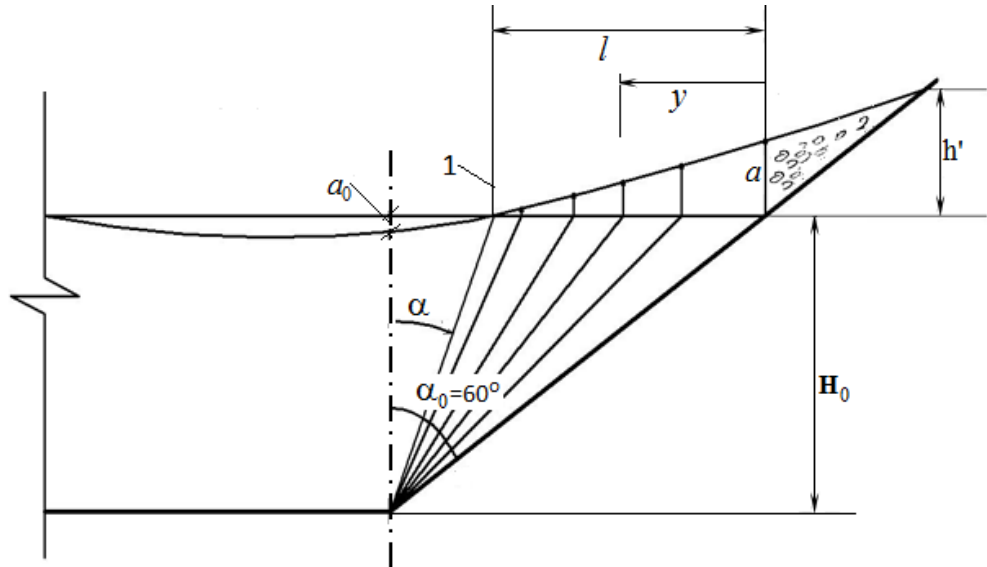
$\alpha, ^\circ$	$\cosh m(\alpha - \alpha_0)$	$e^{\beta(\alpha)}$	y, მ	$\mp \eta$	
				ავტ.2,51	სტოქსი(1,7)
60	1,00	1,0	0	0,5	0,5
54	0,98	0,551	0,71	0,27	0,27
48	0,92	0,363	1,24	0,16	0,17
42	0,83	0,270	1,66	0,11	0,2
30	0,56	0,184	2,31	0,05	0,07
24	0,39	0,164	2,57	0,03	0,05
12	0,002	0,142	3,01	0,00	0,04
11,7	0,000	0,141	3,03	0,00	0,037
0	-0,38	0,135	3,46	-0,03	0,03

ცხრილ 23-ში გარდა (3.2.51) ფორმულით საანგარიშევი ამპლიტუდის მნიშვნელობებისა, შედარების მიზნით მოყვანილია აგრეთვე სტოქსის ფორმულით (4.1.7) გამოთვლილი ტალღის ზედაპირის ვერტიკალური კოორდინატები ნაპირის ხაზიდან გაშლილობის სხვადასხვა კუთხით შესაბამისი y დაშორებისთვის.

როგორც მიღებული შედეგების შედარება გვიჩვენებს (3.2.69) და (3.2.7) 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 გამოწვეული სიჩქარეთა ველის განსაზღვრას, შესაძლებელია ვისარგებლოთ სტოქსის ზუსტი ამოხსნებით, რომლებიც

შეესაბამება უსასრულოდ ღრმა წყალზე ტალღების ნაპირგასწვრივ მოძრაობის შემთხვევას.

ცხრილ 23-ში მოყვანილი სიდიდეების საფუძველზე აგებულია ტალღური ზედაპირის განივი ჭრილი (ნახ.3.9).



**ნახ. 3.9.** ნაპირგასწვრივი მოკლე ტალღის განივი პროფილი ტრაპეციულ არხში:

$H_0 = 2d$ ,  $b = 1,5d$ ,  $\alpha_0 = 60^\circ$ ;  $\lambda = 62,8d$ ,  $a = 0,5d$ . 1- ნაპირგასწვრივი საკვანძო წირი.

## თავი 4 . სანაპირო ფერდობების მდგრადობისა და დეფორმაციის საკითხები მათი ნაპირგასწვრივი ტალღური ნაკადით გარსდენისას

### 4.1 . ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობების პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებები

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 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 ამონახსნებით რომლისკენაც, როგორც ეს წინა თავშია ნაჩვენები, მიისწრაფიან კელანდისა და მაკდონალდის ზუსტი ამონახსნები, თუ მასში ტალღის სიგრძეს მივიჩნევთ მოკლედ არხში წყლის სიღრმესთან შედარებით (პ. 3.2.1). აქვე პროფ. შ. გაგოშიძის მიერ მიღებული მიახლოებით ამონახსნების საფუძველზე ნაჩვენებია, რომ სტოქსის ზუსტი ამონახსნებით შეგვიძლია ვისარგებლოთ აგრეთვე ტრაპეციული ან სამკუთხა არხების ფერდობების მახლობლად ტალღების პარამეტრების დადგენისას თუ ნაპირგასწვრივი ტალღების ამპლიტუდა მოცემულია ნაპირის ხაზის გასწვრივ, ხოლო ტალღის სიგრძე არ აჭარბებს (3.2.56) ფორმულით ნაანგარიშვე ზღვრულ  $\lambda_{\text{ხლ}}$  მნიშვნელობას.

პ. 3.2.1–ში მოყვანილი სტოქსის ამონახსნები შეესაბამება უსასრულო სიღრმის უძრავ წყალზე ნაპირგასწვრივი ტალღების გავრცელებას. ეს ამონახსნები 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

$$(\sigma - kU_0)^2 = gk \sin \theta_0, \quad (4.1)$$

ხოლო სიჩქარეთა ველის კომპონენტებიდან, რომლებიც გამოისახებიან (3.2.6)÷(3.2.8) ფორმულებით, შეიცვლება მხოლოდ ნაპირგასწვრივი სიჩქარის გამოსახულება, რომელსაც დაემატება (ან გამოაკლდება – თუ ტალღები და ნაკადი ურთიერთ საწინააღმდეგოდ არიან მიმართულნი) 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 ჩაწერილ იქნას 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  $\gamma$  – წყლის ხვედრითი წონაა;  $H$  – ფერდობზე ნაკადის ცვალებადი სიღრმე, ხოლო  $A$  და  $G$  კოეფიციენტების მნიშვნელობები დამოკიდებულია იმაზე, თუ წყალსატარში რა სიღრმის ტალღებთან გვაქვს საქმე. კერძოდ, თუ წყალსატარში აღინიშნება „სტოქსის ტიპის“ ტალღების ( $\lambda < \lambda_{\text{სტ}}$ ) 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 რიცხვია;  $\lambda$  – ტალღის სიგრძე;  $\theta_0$  – ჰორიზონტთან სანაპირო ფერდობის დახრის კუთხე.

არხში შედარებით გრძელი ტალღების გავრცელების შემთხვევაში, როცა  $\lambda > \lambda_{\text{სვ}}$ , ჩვენს მიერ მიღებული ამონახსნების საფუძველზე,  $A$  და  $G$  კოეფიციენტები დებულობენ სახეს:

$$A = a_0 \operatorname{ch} \left( k \frac{H_0 - H}{\cos \alpha_0} \right) / \cosh kH_0 \cdot \cos m\alpha_0, \quad (4.7)$$

$$G = \sqrt{(gk/\cos \alpha_0) \coth(kH_0/\cos \alpha_0)}, \quad (4.8)$$

სადაც  $a_0$  – ტალღის ამპლიტუდაა არხის ცენტრალურ ნაწილში (ფერდობის ფუძეზე აღმართულ ვერტიკალზე);  $H_0$  – წყლის მაქსიმალური სიღრმეა;  $\alpha_0$  – წარმოადგენს სანაპირო ფერდობის ვერტიკალთან დახრის კუთხეს;  $\alpha_0 = \frac{\pi}{2} - \theta_0$ ;  $m$  - კოეფიციენტი იანგარიშება (3.2.39) დამოკიდებულების საფუძველზე.

(4.2) და (4.3) ფორმულების გამოყენებით ფერდობზე სითხის ნაწილაკთა სიჩქარის მოდული გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებით

$$|\vec{V}| = [U_0^2 \pm 2U_0AG \sin(\sigma - kx) + A^2G^2]^{1/2}, \quad (4.9)$$

რომლის მაქსიმალური მნიშვნელობა  $|\vec{V}| = U_0 + AG$  მიიღება ფერდობზე ტალღის ქიმის გავლისას ანუ როცა  $\sin(\sigma - kx) = +1$ . (4.2) გამოსახულებაში “+“ ნიშანი აიღება ტალღებისა და ნაკადის ერთნაირი მიმართულების შემთხვევაში; “-“ როცა ტალღები ნაკადის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული.

#### 4.2. ტალღური ნაკადით გარსდენისას არხის სანაპირო ფერდობების მდგრადობისა და დეფორმაციების პროგნოზირების მეთოდები

განვიხილოთ სანაპირო ფერდობის შემადგენელი გრუნტის რაიმე ნაწილაკის მდგრადობა, როცა ნაპირის გასწვრივ მიმართულ ნაკადზე ხდება ნაპირგასწვრივი ტალღების ზედდება.

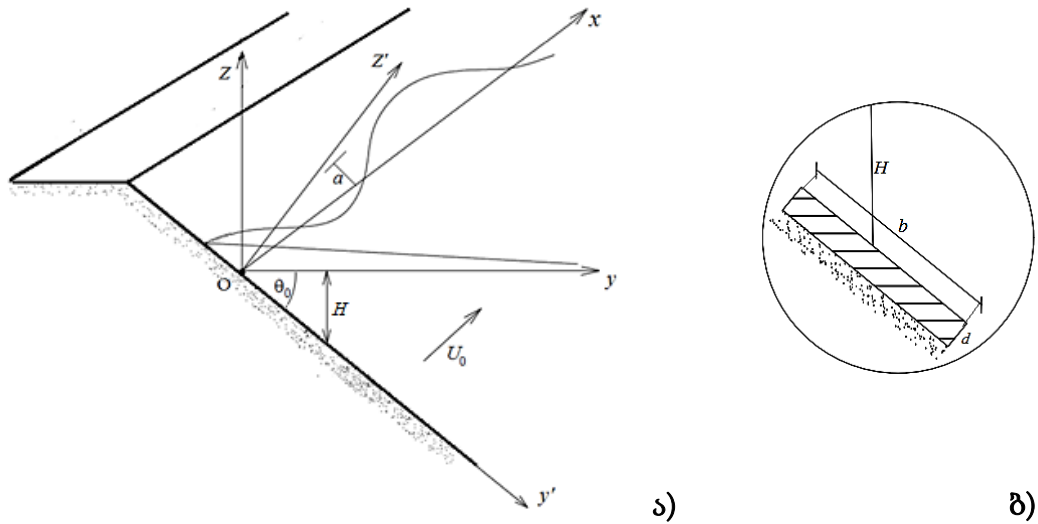
ვთქვათ, წყლის სიღრმე საანგარიშო ნაწილაკის თავზე უდრის  $H$ -ს, ხოლო გრუნტის ნაწილაკის ზომები გაცილებით ნაკლებია ტალღის სიგრძესა ( $\lambda$ ) და ნაპირთან ტალღის ამპლიტუდასთან ( $a$ ) შედარებით. დავუშვათ აგრეთვე, რომ კრისტალურ ნაწილაკს გააჩნია კუბთან მიახლოებული ფორმა, რომლის გვერდის ზომაა  $d$ .

ვინაიდან ფერდობზე მდებარე ნაწილაკზე მოქმედებენ სამგანზომილებიანი ტალღები, ნაწილაკის დაძვრა შესაძლებელია განვიხილოთ სამი მიმართულებით: კერძოდ  $x$  ღერძის გასწვრივ, რომელიც ემთხვევა ნაპირის ხაზის მიმართულებას;  $y'$  ღერძის გასწვრივ, რომელიც მდებარეობს ფერდობზე და მიმართულია ქვევით, წყლის დიდი სიღმეებისაკენ და  $z'$  ღერძის, ანუ სანაპირო ფერდობის სიბრტყის მართობული მიმართულებით (ნახ. 4.1). ამასთან მივიჩნით, რომ ნაწილაკის სიმცირის გამო მასზე მოქმედი ძალები მოდებულია დახრილი 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 უგულვებელყოფილ იქნას [5].

\* განხილულ შემთხვევაში გრუნტის ნაწილაკის სიმცირის გამო ნაწილაკის ფორმას გადამწყვეტი მნიშვნელობა არ ენიჭება; კერძოდ  $d$  ზომის ქვეშ შეიძლება ვიგულისხმოთ სფეროს ფორმაზე დაყვანილი ნაწილაკის დიამეტრიც.





**ნახ. 4.1. ფერდობზე ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედების საანგარიშო სქემა**

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.

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;  $\gamma_s$  ნაწილაკის კუთრი წონაა;  $\gamma$  - წყლის ხვედრითი წონა.

ნაწილაკის ზედაპირზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური წნევა გამოისახება (4.4) ტოლობით, ხოლო ნაწილაკის ძირზე მოსული ფილტრაციული უკუწნევა შეგვიძლია გავუტოლოთ ჰიდროსტატიკურ წნევას ათვლილს სითხის შეუმფოთებელი შეუმფოთებელი 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 გამოწვეულია ნაწილაკის ამომგდები ძალა იმოქმედებს მხოლოდ მაშინ, როცა ნაწილაკის თავზე ტალღური ზედაპირის ფაზა  $\sin(\sigma t - kx) < 0$ , ანუ როცა ნაწილაკის თავზე გადაირბენს ტალღის ღრმული. ამომგდები ძალის მაქსიმალური მნიშვნელობა მიიღება ნაწილაკის თავზე ტალღის ფსკერის გავლისას, ანუ როცა  $\sin(\sigma t - kx) = -1$ .

გარდა ნაწილაკის წის ფერდობის მიმართ ნორმალური მდგენელისა შეკავშირებული გრუნტის არსებობის შემთხვევაში ნაწილაკის დამკვრას  $Oz'$  ღერძის მიმართულებით წინაღობას უწევს შეჭიდულობის ძალა, რომელიც გამოისახება დამოკიდებულებით

$$P_3 = cd^2, \quad (4.12)$$

სადაც  $c$  ნაწილაკთა შეჭიდულობის კოეფიციენტია, რომლის დადგენა, შესაძლებელია აკადემიკოს ც. მირცხულავას რეკომენდაციებით [76].

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 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 გრუნტისაგან - ხრემისაგან ( $c = 0$ ) 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:

$$P_b = f(P_1 + P_2 + P_3) = -f\gamma'_s \cos \theta_0 d^3 - f\gamma A \sin(\sigma - kx) d^2, \quad (4.16)$$

ხოლო ნაწილაკის დაძვრას განაპირობებენ 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

$$P_5 = \frac{\tilde{c}}{2} \rho \omega |\vec{V}| \vec{V}_{\text{გვ}}, \quad (4.18)$$

სადაც  $\tilde{c}$  შუბლა წინაღობის კოეფიციენტია;  $\rho$  – წყლის სიმკვრივე;  $\omega$  წარმოადგენს ნაწილაკის განივკვეთის (მოდელის) ფართს გარსდენის განივი მიმართულებით;  $|\vec{V}|$  – გამოსახავს ტალღური მოძრაობისას წყლის ნაწილაკთა სიჩქარის მოდულს, რომელიც იანგარიშება (4.3) დამოკიდებულებით;  $\vec{V}_{\text{გვ}}$  – წარმოადგენს სიჩქარის გეგმილს რაიმე გარკვეული მიმართულებით.

შუბლა-გამტაცი ძალის გეგმილები ფერდობზე ნაპირგასწვრივ  $Ox$  ღერძისა და ნაპირის ხაზის მართობულ  $Oy'$  ღერძის მიმართულებით (4.2) და (4.3) 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 უგულვებელყოფილ იქნას.

შევადგინოთ გრუნტის ნაწილაკის ზღვრული სტატიკური წონასწორობის განტოლებები  $Ox$  და  $Oy'$  ღერძების გასწვრივ.

$Ox$  ღერძის მიმართულებით გვექნება

$$P_{gx} + P_3 + P_b = 0, \quad (4.21)$$

$Oy'$  ღერძის მიმართულებით

$$P_{g,y'} + P_3 + P_4 + P_b = 0. \quad (4.22)$$

თუ ჩავსვავთ (4.21) და (4.22) განტოლებებში შესაბამისი ძალების მნიშვნელობებს და განვსაზღვრავთ ზღვრულ მდგომარეობაში გრუნტის სტატიკურად მდგრადი ნაწილაკის ზომას  $Ox$  ღერძის გასწვრივ მივიღებთ

$$d_x = \frac{1}{\gamma'_s f \cos} \left\{ 0,5\tilde{c} \rho d^2 [U_0^2 \pm 2U_0 AG \sin(\sigma - kx) + A^2 C^2]^{1/2} \times \right. \\ \left. \times [|\pm U_0 + AG \sin(\sigma - kx)| - c] \right\}, \quad (4.23)$$

ხოლო  $Oy'$  ღერძის გასწვრივ

$$d_{y'} = [\gamma'_s (f \cos \theta_0 - \sin \theta_0)]^{-1} \left\{ 0,5\tilde{c} \rho [U_0^2 \pm 2U_0 AG \sin(\sigma - kx) + \right. \\ \left. + A^2 G^2]^{1/2} \times AG \cos(\sigma - kx) - f\gamma A |\sin(\sigma - kx)| - c \right\}. \quad (4.24)$$

როგორც გვიჩვენებს (4.15), (4.23) და (4.24) 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  $\sin(\sigma - kx) = -1$ ;  $\cos(\sigma - kx) = 0$ , შუბლა-გამტაცი ძალები იცვლიან მიმართულებას დაღმავლიდან აღმავლისაკენ და

დროებით, ტალღის ქიმის გავლამდე, ხელს უწყობენ ფერდობზე ნაწილაკის მდგრადობის შენარჩუნებას.

ცხადია ნაკადის მიმართულებით ფაზის  $\beta = (\sigma t - kx)$  -ის ექსტრემალური მნიშვნელობა, რომლის დროსაც (4.23) ფორმულით განსაზღვრული გრუნტის ნაწილაკის ზომა (სიმხსო) ღებულობს მაქსიმალურ მნიშვნელობას ტოლია  $\pi/2$  -ის რაც შეესაბამება საანგარიშო ნაწილაკის თავზე ტალღის ქიმის გავლას. როცა ტალღები ნაკადის საწინააღმდეგოდ არიან მიმართული ნაპირის გასწვრივ გრუნტის ნაწილაკის ზღვრული ზომა მიიღება ნაწილაკის თავზე ღრმულის ფსკერის გავლისას, ანუ როცა  $\beta = -\pi/2$ . ამის გათვალისწინებით (4.23) ფორმულა შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგი გამარტივებული სახით:

$$d_x = \frac{1}{\gamma'_s f \cos \theta_0} [0,5\tilde{c} \rho (U_0 + AG)^2 - c]. \quad (4.25)$$

შედარებით რთულდება ნაკადზე ტალღური ფაზის ექსტრემალური მნიშვნელობის დადგენა როცა განიხილება გრუნტის ნაწილაკის მდგრადობა  $Oy'$  ღერძის მიმართულებით. ამ შემთხვევაში ზღვრული დიამეტრის საანგარიშოდ შეგვიძლია (4.20)-ის ნაცვლად ვისარგებლოთ შემდეგი გამოსახულებით

$$d_{y'} = [\gamma'_s (f \cos \theta_0 - \sin \theta_0)]^{-1} \left\{ 0,5\tilde{c} \rho [U_0^2 + 2U_0 AG \sin + A^2 G^2]^{1/2} \times AG \cos \beta_{\text{მსბ.}} - f \gamma A |\sin \beta_{\text{მსბ.}}| - c \right\}, \quad (4.26)$$

სადაც ფაზის ექსტრემალური მნიშვნელობა იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$\beta_{\text{მსბ.}} \approx \arcsin \left\{ -\frac{1}{3} \left[ \frac{(U_0 + AG)^2}{2U_0 AG} - 1 \right] + \sqrt{\frac{1}{9} \left[ \frac{(U_0 + AG)^2}{2U_0 AG} - 1 \right]^2 + \frac{1}{3}} \right\}. \quad (4.27)$$

სანაპირო ფერდობის გრუნტის წარეცხვაზე მდგრადობის შესაფასებლად საჭიროა (4.15), (4.25) და (4.26) ფორმულებით ნაანგარიშებ ნაწილაკის ზომათაგან მაქსიმალური ( $d_{\max}$ ) შევადართოთ რეალურ პირობებში ფერდობის გრუნტის ნაწილაკის მახასიათებელ ზომას (როგორც წესი

სანაგარიშოდ იღებენ 90%-ით უზრუნველყოფილი ფრაქციების სიმსხოს – +  $d_{90\%}$  ) და თუ აღმოჩნდება, რომ სრულდება უტოლობა

$$d_{\max} < d_{90\%}. \quad (4.28)$$

შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ სანაპირო ფერდობის გრუნტის მდგრადობა წარეცხვაზე მისი გრძივი მიმართულების ტალღური ნაკადით გარსდენისას უზრუნველყოფილია. წინააღმდეგ შემთხვევაში, როცა  $d_{\max} > d_{90\%}$  აღინიშნება სანაპირო ფერდობის წარეცხვა და საჭიროა მიღებულ იქნას ზომები მის გასამაგრებლად. ასეთ ზომათაგან 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.

ზემოთ მოყვანილი დამოკიდებულებები საშუალებას გვაძლევენ შევავსოთ არხის ფერდობების მდგრადობა და განვსაზღვროთ არხის სანაპირო ფერდობების მოსალოდნელი დეფორმაციები მათზე ნაპირგასწვრივი ტალღების გარსდენისას.  $Ox$ ,  $Oy'$  და  $OZ'$  მიმართულებით მოქმედი სტატიკური და დინამიკურ დატვირთვათა გათვალისწინებით ნაწილაკის სტატიკური მდგრადობის (4.13), (4.21) და (4.22) განტოლებები ჩაიწერებინ შემდეგ სახით:

$$\gamma'_s d^3 \cos \theta_0 + cd^2 + \gamma Ad^2 \sin \beta = 0; \quad (4.29)$$

$$\gamma'_s f d^3 \cos \theta_0 + cd^2 - \frac{1}{2} \tilde{c} \rho d^2 (U_0 + AG)(U_0 \pm AG \sin \beta) = 0; \quad (4.30)$$

$$\gamma'_s (f \cos \theta_0 - \sin \theta_0) d^3 + cd^2 - \frac{1}{2} \tilde{c} \rho d^2 (U_0 + AG) AG \cos \beta + f \gamma A |\sin \beta| d^2 = 0, \quad (4.31)$$

სადაც  $d$  - კუბზე დაყვანილი გრუნტის ნაწილაკის სიმსხოა; შეუკავშირებელი გრუნტის შემთხვევაში  $C = 0$  ;  $A$  და  $G$  სიდიდეები ფერდოს ნებისმიერ წერტილში იანგარიშება (4.5), (4.6) და (4.7), (4.8) ფორმულებით, ტალღის ფრონტის  $n$  რიცხვის (3.2.57) და (3.2.56) ტალღის

ზღვრული  $\lambda_{\text{ხღ}}$  სიღრმის სიდიდეების მიხედვით; (4.29)-ის თანახმად, გრუნტის მდგრადობისთვის ყველაზე საშიშია  $\beta = -\pi/2$  ფაზა, როცა ნაწილაკის თავზე გადის ტალღის ფსკერი; (4.30)-ის მიხედვით ყველაზე სახიფათოა  $\beta = \pi/2$  ფაზა, როცა ნაწილაკის თავზე გადის ტალღის ქიმი და ტალღის მიმართულევა ემთხვევა ემთხვევა სტაციონარულ დინებას და  $\beta = -\pi/2$  ფაზა, როცა ნაწილაკზე თავზე გადის სტაციონარული დინების საწინააღმდეგოდ მიმართული ტალღის ფსკერი. (4.31)-ის მიხედვით  $\beta$  ფაზის ექსტრემალური მნიშვნელობა დამოკიდებულია  $U_0$  სიჩქარეზე და  $AG$  ამპლიტუდაზე, პირველ მიახლოებად შეიძლება მივიღოთ  $\beta \approx \pi$ .

ცნობილია, არხის ნაპირების შეუქცევად დეფორმაციებს განსაზღვრავს ტალღების მოძრაობისას აღძრული ინფილტრაციული (უკუწნევითი) ძალები [48]. დეფორმაციის პროგნოზისათვის ვისარგებლოთ შეუკავშირებელი გრუნტის  $C = 0$  სტატიკური წონასწორობის (4.30) განტოლებით, რომელშიც  $A$  სიდიდის ნაცვლად უნდა ჩაისვას (4.5)

$$\gamma'_s d^3 \cos \theta_0 - \gamma u \exp\left(-\frac{kH}{\sin \theta_0}\right) = 0 \quad (4.32)$$

გამოვსახოთ (4.32) განტოლებაში ტრიგონომეტრიული ფუნქციები ფერდობის დახრილობის კოეფიციენტის  $m_0 = \cot g \theta_0$  -ის მეშვეობით და განვსაზღვროთ ფერდობზე წყლის ის ზღვრული  $H = H'_0$  სიღრმე, რომლის ქვემოთ  $d$  ფრაქციის მქონე გრუნტი არ ექვემდებარება წარეცხვას ფილტრაციული უკუწნევის გამო. მაშინ (4.32)-დან მივიღებთ:

$$H'_0 = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{1+m_0^2}} \ln\left(\frac{\gamma a \sqrt{1+m_0^2}}{\gamma'_s d m_0}\right) \quad (4.33)$$

ამ სიღრმის ზევით ფერდობი იწყებს წარეცხვას სიღრმის კლებასთან ერთად. დეფორმირებული ფერდობის მოხაზულობა და წარეცხვის ზომები შეიძლება განისაზღვროს ამავე (4.33) დამოკიდებულებიდან. თუ დახრილობის  $m_0$  კოეფიციენტს მივანიჭებთ უწყვეტად მზარდ მნიშვნელობებს და გამოვსახავთ მას  $m = -dy/dH$  წარმოებულის სახით,

სადაც  $y$  ღერძი (ნახ. 4.2) მიმართულია ნაპირისაკენ და სათავეს იღებს წყლის შეუშვოთებელ ზედაპირზე იმ წერტილში, რომლის ქვემოთ (4.33) დამოკიდებულებით დაფიქსირებულია საწყისი  $\theta_0$  -ის შესაბამისი უცვლელი  $H'_0$  ჩაღრმავება.

როგორც წესი, მიწის არხებს გააჩნია საკმარისად დიდი ფერდოს კოეფიციენტი  $m_0$ , რაც კიდევ უფრო მეტად იზრდება ფერდობის წარეცხვასთან ერთად. ეს გარემოება საშუალებას გვაძლევს (4.33) გამოსახულებაში (რომელშიც  $m_0$  შეცვლილია  $m$ -ით, ხოლო  $H'_0 - H$  ით)  $m^2$  მივიჩნიოთ ერთზე გაცილებით დიდ სიდიდედ და ჩავწეროთ შემდეგი დიფერენციალური განტოლების სახით

$$H = -\frac{1}{k} \frac{dH}{dy} \ln \left[ \frac{\gamma}{\gamma_s} \frac{a}{d} \right] \quad (4.34)$$

თუ მივიჩნევთ, რომ თავდაპირველი ნაპირის ხაზის გასწვრივ მოცემული ამპლიტუდა ტალღის დამსხვრევის გამო არ განიცდის არსებით ცვლილებას არხის გაგანიერებასთან ერთად, (4.34) განტოლების ამოხსნა, (4.33) ტოლობით დადგენილი საწყისი პირობით  $H = H'_0$  და  $y = 0$ , გვაძლევს ფერდოს დეფორმაციის საანგარიშო მარტივ გამოსახულებას:

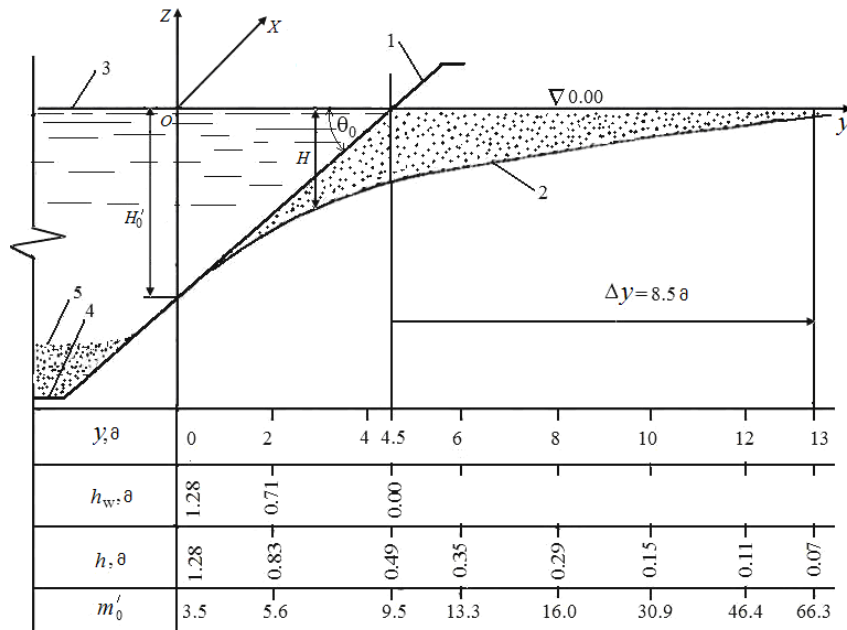
$$H = H_0 \exp \left[ -ky / \ln \left( \frac{\gamma}{\gamma_s} \frac{a}{d} \right) \right] \quad (4.35)$$

რომლითაც ვსაზღვრავთ წარეცხილი ფერდობის წყლის სიღრმეს და აიგოს წარეცხვის შედეგად დეფორმირებული ფერდობის მოხაზულობას (ნახ.4.2)  $k = 2\rho/\lambda$  ტალღური რიცხვია, ხოლო  $H'_0$  გამოითვლება (4.33) ფორმულით.

ნახ.4.2-ზე წარმოდგენილ წარეცხვის კონტურის ასაგებად აღებულიქნა მონაცემები: არხის თავდაპირველი სიღრმე  $H_0 = 5$  მ, არხის ფერდობის საპროექტო დახრილობა  $m_0 = \cot \theta_0 = 3,5$ ; გრუნტის ნაწილაკთა საშუალო დიამეტრი  $d = 0,5 \cdot 10^{-4}$  მ,  $\gamma = 1$  ტ/მ<sup>3</sup>,  $\gamma_s = 1,6$  ტ/მ<sup>3</sup>;  $\lambda = 4$  მ და  $a = 0,35$  მ.



გამოთვლების შედეგები შესაბამისობაში აღმოჩნდა ზღვის საპორტო არხებზე ნატურული დაკვირვებების შედეგებთან.



**ნახ.4.2.** ტრაპეციული არხის სანაპირო ფერდობის წარეცხვის ამოზნექილი კონტური განპირობებული წყლის სიღრმესთან შედარებით მოკლე ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედებით; 1. გრუნტში გაჭრილი არხის ფერდობს თავდაპირველი კონტური; 2. სანაპირო ფერდობის წარეცხილი კონტური; 3. წყლის ზედაპირი. 4. არხის ფსკერი 5. არხის ფსკერზე დალექილი გრუნტი.

როცა ტრაპეციულ არხების ზომებს (სიღრმე, სიგანე) ბევრად აღემატება მასზე მოქმედი ნაპირგასწვრივი ტალღების სიგრძე, (4.29-31) განტოლებებში ვსვამთ  $a_0$  -ის (3.2.61) და  $A$  -ს (4.7) გამოსახულებებს,  $c = 0$  და  $\beta = -\pi/2$ , პირობებისთვის მივიღებთ დამოკიდებულებას

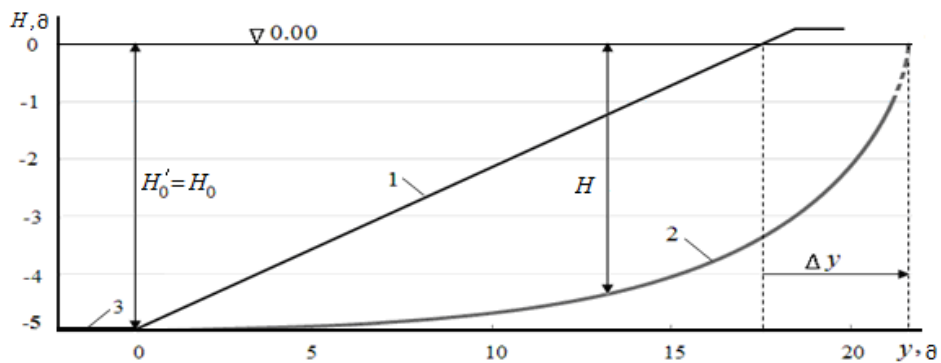
$$H'_0 = H_0 - \frac{\sin \theta_0}{k} a \cosh \left[ \frac{\gamma'_s}{\gamma} \frac{d \cos \theta_0}{a_0} \cos m \left( \frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \cosh k H_0 \right] \quad (4.36)$$

მოცემული ტალღის სიგრძისთვის ( $\lambda = 2\pi/k$ ) ვსაზღვრავთ  $a_0$  - ს და ვანიჭებთ სასაზღვრო პირობას  $a_0 = a'_0$ , ამ შემთხვევაში ნაპირის წარეცხვა მოიცავს არხის ფსკერსაც, ე.ი. სრულდება პირობა  $H'_0 = H_0$  და  $U_0 = 0$ . კერძო შემთხვევაში, თუ დავუშვებთ, რომ ზღვრული ამპლიტუდა დებულობს მნიშვნელობას:

$$a'_0 = \frac{\gamma'_s}{\gamma} d \cos \theta_0 \cos m \left( \frac{\pi}{2} - \theta_0 \right) \cosh k h_0 \quad (4.37)$$

მაშინ, როცა  $a_0 < a'_0$ , ხდება ფერდობის მხოლოდ ნაწილობრივი წარეცხვა, ხოლო როცა  $a_0 > a'_0$  წარეცხვის კონტური მოიცავს არხის ფსკერს.

ამ კერძო შემთხვევაში (4.36) გამოსახულება დაიყვანება სახეზე:  $H'_0 = H_0(1 - \sin \theta_0)$ , რომელიც არ არის დამოკიდებული ტალღის სიგრძეზე. თუ ჩავთვლით, რომ  $H'_0 = H(y)$  და  $\sin \theta_0 = f(\theta)$ , სადაც  $y$  განივი კოორდინატია, ხოლო  $\theta$  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 სანაპირო ფერდობის წარეცხვის ჩაზნექილი კონტური განპირობებული წყლის სიღრმესთან შედარებით გრძელი ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედებით; 1. გრუნტში გაჭრილი არხის ფერდოს თავდაპირველი კონტური; 2. სანაპირო ფერდობის წარეცხილი კონტური; 3. არხის ფსკერი.**

ამრიგად, მიღებული შედეგები გვაძლევენ 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. ნაპირდამცავი ფილების განგარიშება

ქვაფენილით ან ფილებით არხის ფერდობების მოპირკეთების შემთხვევაში მთავარ პრობლემას წარმოადგენს მოპირკეთების ელემენტის სისქის განსაზღვრა. ჩვეულებრივ ქვაფენილის თითოეული ქვა ან ფილა თავისი გვერდითი წახნაგებით ჩაქედილია მეზობელი ქვების მიერ შექმნილ ბუდეში და ამიტომ მისი გადაადგილება ფერდობის სიბრტყეში პრაქტიკულად გამორიცხულია. შესაძლებელია მხოლოდ ქვის ამოგდება ბუდიდან ფერდობის სიბრტყის მართობული  $Oz'$  (ნახ. 4.1 ა) ღერძის მიმართულებით, რაც განპირობებულია საანგარიშო ელემენტის ძირზე არსებული ფილტრაციული უკუწნევის ზემოქმედებით. როგორც აღვნიშნეთ ფილტრაციული უკუქმედება შეიძლება ხდებოდეს მხოლოდ ელემენტის თავზე ტალღური ზედაპირის ღრმულის გავლისას. ასეთ შემთხვევაში უნდა მივმართოთ წონასწორობის (4.14) განტოლებას, საიდანაც მოპირკეთების სისქე სანაპირო ფერდობის ნებისმიერ ჩაღრმავებაზე იანგარიშება ფორმულით

$$d = \frac{\gamma A - c}{\gamma'_s \cos \theta_0}. \quad (4.38)$$

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 დევს შეუკავშირებელი გრუნტის ფერდობზე  $c=0$ . გარდა ამისა, არხში მოკლე ტალღების გავრცელების შემთხვევაში  $A$  სიდიდის ანგარიშისას (4.38)–ში (განსხვავებით (4.15) ფორმულისაგან) შემავალი  $H$ –ის ნაცვლად, ფილის  $d$  სისქის და დახრილობის  $\theta_0$  კუთხის გათვალისწინებით უნდა ჩაისვას  $H - d \cos \theta_0$  (ნახ.4.1.ბ) ასეთი ჩასმის განხორციელება სტოქსის ტიპის ტალღების გავრცელების შემთხვევაში გვაძლევს

$$d = \frac{\gamma}{\gamma'_s \cos \theta_0} a \exp\left(-k \frac{H - d \cos \theta_0}{\sin \theta_0}\right) - \frac{c}{\gamma'_s \cos \theta_0}. \quad (4.39)$$

შეიძლება დაისვას შებრუნებული ამოცანაც და განისაზღვროს ფერდობზე წყლის სიღრმე, რომელიც უზრუნველყოფს ფერდობზე მოცემული სისქის ფილების მდგრადობას. (4.39) ფორმულის საფუძველზე წყლის ეს სიღრმე იანგარიშება დამოკიდებულებით

$$H = d \cos \theta_0 + \frac{\sin \theta_0}{k} \ln\left(\frac{\gamma}{\gamma'_s} \cdot \frac{a}{d \cos \theta_0}\right). \quad (4.40)$$

(4.40) დამოკიდებულებით შეგვიძლია ვისარგებლოთ აგრეთვე მოპირკეთებული ფერდობის მდგრადობის შესაფასებლად. კერძოდ თუ შევადარებთ (4.40)-ით ნაანგარიშებ წყლის სიღრმის მნიშვნელობას ნაპირთან ტალღის ამპლიტუდასთან და აღმოჩნდება, რომ  $H < a$ , მაშინ შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ  $d$  სისქის ფილებით ან იმავე  $d$  სიმაღლის ბლოკებით მოპირკეთებული ფერდობი მდგრადია მისი ნაპირგასწვრივი ტალღები გარსდენისას. წინააღმდეგ შემთხვევაში, საჭიროა გაიზარდოს მოსაპირკეთებელი ელემენტის სისქე ან შემცირდეს ფერდობების ჰორიზონტთან დახრის კუთხე.

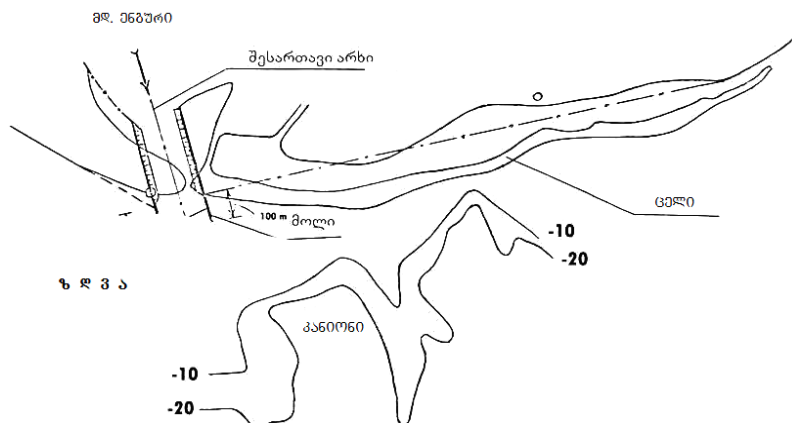
**თავი 5. ჰიდროსაინჟინრო პრობლემების გადაჭრის გზები მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავ აკვატორიებში**

**5.1. კურორტ ანაკლიასთან სანაპირო ზოლის აღდგენის არსებულ ღონისძიებათა შეფასება და რეკომენდაციები**

მდინარე ენგურის შესართავ უბანზე წყალდიდობის ხარჯების გატარების გაუმჯობესებისა და შესართავთან ქვიშის ზვინულის (ცელის) წარმოქმნის აღკვეთის მიზნით 1981-86 წლებში ენერგეტიკის სამეცნიერო კვლევით ინსტიტუტში პროფესორების ვახტანგ საყვარელიძისა და შალვა გაგომიძის ხელმძღვანელობით ტარდებოდა ლაბორატორიული კვლევები (ნახ.5.1). მათ მიერვე შემუშავებულ იქნა მდ.ენგურის შესართავში არხის გაჭრის სქემა (ნახ.5.2).



**ნახ.5.1. ლაბორატორიული კვლევები ენერგეტიკის ს.კ. ინსტიტუტის დიდ ტალღათწარმოქმნელ აუზში [60], (1984-1985წ.წ.)**

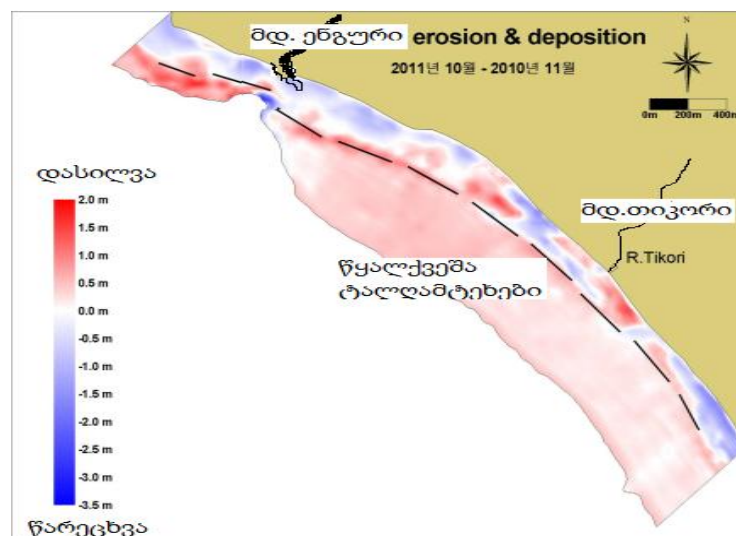


**ნახ.5.2. მდ.ენგურის შესართავში არხის გაჭრის სქემა , 1982 წ. [60].**

შემდგომ, ცნობილმა გეომორფოლოგმა არჩილ კიკნაძემ („საქზღვანაპირდაცვა“, 1988) შეიმუშავა კონცეფცია რომელიც გულისხმობდა მდ. ენგურის შესართავში პორტის მოწყობას, მაგრამ ეს ჩვენი აზრით გამართლებული იდეა, აღარ განხორცილდა.

შ კ ს „ნაპირდაცვამ“ 2010 წელს წარმოადგინა ანაკლიის საზღვაო ნაპირის დაცვის პროექტი [1], რომელიც გულისხმობდა ნაპირგასწვრივი ბეტონის წყალქვეშა ტალთამრიდი ბლოკების მოწყობას და წარეცხილი ნაპირის აღდგენას ინერტული მასალით. ამავე დროს ეს პროექტიც, ითვალისწინებდა არხის გაჭრას მდ. ენგურის შესართავში, მაგრამ „ნაპირდაცვის“ მიერ შემოთავაზებული არხი, რომელიც ფაქტობრივად იმეორებდა ენერგეტიკის სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტისა და საქზღვანაპირდაცვის 1982 წლის წინადადებას, არ იყო ჰიდრაულიკურად გაანგარიშებული.

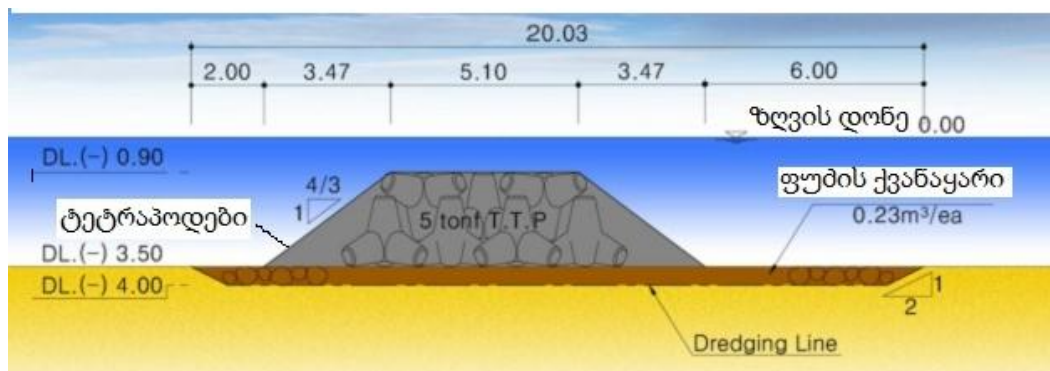
2011-2013 წლებში კორეულმა შპს „DOHWA Engineering“-მა და საქართველოს ასოციაცია „ჰიდროსფერომ“ წარმოადგინეს პროექტი [2], რომელიც გულისხმობს ორ ეტაპად ანაკლიის 4.5 კმ სიგრძის ზღვის სანაპირო ზოლის დაცვას ნაპირიდან დაახლოებით 200-250 მ-ში განთავსებული 10 წყალქვეშა ტალღამტეხი ბარიერით (ნახ. 5.3. და 5.4).



**ნახ.5.3.** „DOHWA Engineering“-ის საპროექტო წინადადება და წყალქვეშა ნაპირდამცავი ბანკეტების მოწყობის მათემატიკური SWAN მოდელირების შედეგები [2]; წითელ ფერში აღნიშნულია დასიღვის, ხოლო ლურჯ ფერში - ეროზიის პროცესები.

ტალღების ზემოქმედების შესწავლა ხდებოდა კომპიუტერული SWAN მოდელის საფუძველზე. SWAN მოდელი არ ითვალისწინებს ტალღის მიმართულების ცვალებადობას. მოდელი განიხილავს მხოლოდ წყალქვეშა ბარიერებისკენ ფრონტალურად მიმართულ, ანუ მხოლოდ დასავლეთის მიმართულების ტალღებს იმ დროს, როდესაც ანაკლიის ნაპირის დაფორმაციებს განსაზღვრავს ჩრდილო და სამხრეთ-დასავლეთის მიმართულების უფრო მძლავრი შტორმები;

ბარიერები წარმოადგენენ ტეტრაპოდებით შექმნილ 300 მ-დე სიგრძისა და 3,5 მ სიმაღლის ტრაპეციული კვეთის ბანკეტებს, რომელთა ქიმი, სიგანით 5 მ, ჩაღრმავებულია წყალქვეშ 0.9 მ-ით (ნახ. 5. 4). ბანკეტები ერთმანეთისგან დაშორებულია დაახლოებით 50-50 მ-ით. გარდა წყალქვეშა ტალღამტეხების მშენებლობისა პროექტი ითვალისწინებს პლაჟწარმოქმნელი მასალის დაყრას ზღვის ნაპირის ხაზის გასწვრივ .



ნახ. 5. 4. „DOHWA Engineering“- ის წყალქვეშა ტალღამტეხების ტიპური ჭრილი

მაგრამ ნახ. 5.3-ზე „DOHWA Engineering“- ის მიერვე წარმოდგენილი SWAN სურათის თანახმად, წყალქვეშა ბარიერის მოწყობის შემთხვევაში კლების ნაცვლად იზრდება ფსკერის წარეცხვის პროცესი: - ნახ. 5.3-ზე წარეცხვის ლურჯი ლაქები წყალქვეშა ბარიერებსა და ანაკლიის ნაპირის ხაზს შორის მართლაც აშკარად ჭარბობს ნაპირის მოსილვის მოწითალო ლაქებს, რაც ამავე დროს საფრთხეს შეუქმნის ბანკეტების მდგრადობას;

გარდა ამისა, პროექტში არ განიხილება მდინარის დინების გავლენა ანაკლიის სანაპირო ზოლის დეფორმაციებზე; პროექტი არ ითვალისწინებს მდინარის ნაკადის ორგანიზებულ შეყვანას ზღვაში.

რის გამოც მდინარე ყოველთვის მიმართული იქნება დასაცავი სანაპირო ზოლის თითქმის გასწვრივ, რაც განაპირობებს ზღვის წყლის მაღალ სიმღვრივეს, სანაპირო ზოლის წარეცხვებსა და დეფორმაციებს. ყოველივე ეს უარყოფითად იმოქმედებს ანაკლიის პლაჟის რეკრეაციულ დანიშნულებაზე; ზღვაზე ხანგრძლივი შტორმული ვითარების შემთხვევაში ნაპირგასწვრივმა წყალქვეშა ბარიერებმა შეიძლება ხელი შეუწყონ არა იმდენად ანაკლიის ნაპირის დაცვას, არამედ პირიქით - დატბორვას - ნაპირთან ზღვის დონის შტორმულ აწევის გამო, (რაც აგრეთვე არ არის გათვალისწინებული პროექტში).

ამჟამად ანაკლიასთან იგეგმება მსხვილი პორტის მშენებლობა. პორტის ასაშენებლად აქ ხელსაყრელ პირობებს ქმნის ახლომდებარე ღრმაწყლიანი კანიონი, რის გამოც:

- ა) იქმნება პორტში დიდი წყალწყვის გემების შესვლის შესაძლებლობა;
- ბ) პორტში შესასვლელი არხები აღარ საჭიროებენ მოსიღვეებისაგან სისტემატიურ დაცვას (როგორც მაგალითად ფოთის პორტის შემთხვევაში);
- გ) ტალღების სიმაღლე კანიონის თავზე უფრო ნაკლებია ვიდრე მეზობელ თავთხელ უბნებზე.

ანაკლიასთან ღრმაწყლიანი პორტის მშენებლობა მდ. ენგურის შემცირებული ნატანის პირობებში ნაპირდაცვითი პრობლემების გადაწყვეტასაც შეუწყობს ხელს, რადგან შესაძლებელი იქნება საპორტო აკვატორიიდან ამოღებული ინერტული მასალა გამოვიყენოთ ანაკლიის და საქართველოს შავიზღვისპირეთის წარეცხილი ნაპირების აღსადგენად.

ამ გარემოებების გათვალისწინებით შეიძლება ჩამოვაცალიბოთ შემდეგი სახის რეკომენდაციები:

1. საჭიროა განხორციელდეს მდინარის ორგანიზებული შეყვანა ზღვაში ხელოვნურად გაჭრილი არხის მეშვეობით. ჩვენი ჰიდრაულიკური გაანგარიშებებით ტრაპეციული არხს, გათვლილს მდინარე ენგურის საანგარიშო კატასტროფულ ხარჯზე - 2550 მ<sup>3</sup>/წმ უნდა გააჩნდეს: 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; არხში ნაკადის მაქსიმალური სიჩქარე - 1.6 მ/წმ.

2. სასურველია არხის ფერდების მოპირკეთება მოხდეს ფილებით ან აიგოს ტეტრაპოდებით;

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

4. მდინარის ნაკადით ანაკლიის ტერიტორიის დატბორვებისაგან დაცვის მიზნით მდინარის შესართავში გაჭრილი არხის მარცხენა ბორტი სასურველია შეუუღლდეს კანიონთან მიმდებარე წყალქვეშა ტალღამტეხ ბარიერს (თუ ეს უკანასკნელი მაინც იქნა განხორციელებული „DOHWA Engineering“- ის პროექტით).

## 5.2. რეკომენდაციები ჰიდროსაინჟინრო პრობლემების გადასაჭრელად ქალაქ ფოთის რეგიონში

როგორც I თავში აღვნიშნეთ, XX საუკუნის 50-იან წლებში ქალაქ ფოთიდან მე-7 კილომეტრზე აშენდა წყალგამყოფი ჰიდროკვანძი, რომელმაც მდ. რიონი მიმართა ფოთის ნავსადგურის ჩრდილოეთით დაუსახლებელი ტერიტორიების გავლით. ხოლო ქალაქის არხით ტარდებოდა მხოლოდ 400 მ<sup>3</sup>/წმ-მდე ხარჯები, 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 2კმ 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 გაზრდა.

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 გააჩნია პლაჟის ვიწრო ზოლიც კი და კვლავ გრძელდება ზღვის შემოტევა.

ფოთის სანაპირო ზოლის დაცვის მიზნით 80-იან წლებში სხვა სამეცნიერო-კვლევით ორგანიზაციებთან ერთად მონაწილეობას იღებდნენ საქართველოს პოლიტექნიკური ინსტიტუტის „ჰიდროავლიკისა და ჰიდრომანქანების“ კათედრის თანამშრომლები, რომლებმაც პროფესორების გ. რურუას და ნ.დანელიას ხელმძღვანელობით შეიმუშავეს ფოთთან მდ. რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის ექსპლუატაციის ისეთი რეჟიმები, რომელსაც უნდა აღმოეფხვრა ზემოაღნიშნული (I თავი) ნეგატიური პროცესები. ეს რეჟიმები გულისხმობდა:

1. ქალაქის არხში მდინარის წყალდიდობის ნატანით გაჯერებული ხარჯების გატარებას მხოლოდ მაშინ, როდესაც ზღვა იმყოფება წყნარ მდგომარეობაში. მხოლოდ ამ პირობებშია შესაძლებელი ნატანის აკუმულაცია შესართავ უბანში. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ანუ როცა ზღვა დელავს, მდინარის წყალდიდობის ხარჯების გავლისას იზრდება შესართავი უბნის წარეცხვების ინტენსივობა.

2. წყალდიდობის ხარჯების გავლის შემდეგ, ზღვის ფრონტალური და არაფრონტალური ტალღების მეშვეობით მოხდება დალექილი ნატანის გადანაწილება და ზღვის სანაპირო ზოლის (პლიაჟის) ზრდა.

აღნიშნული რეკომენდაციები განხორციელდა დროის მცირე მონაკვეთში. მიუხედავად ამისა მდ. რიონის შესართავ უბანთან

მართლაც აღინიშნა ზღვის ნაპირის სტაბილური ზრდა. ნატურულმა დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ ქალაქის არხის შესართავთან აშენებულ შუქურასთან შესამჩნევად გაიზარდა. მაგრამ 90-იან წლებში შეწყდა როგორც სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოები, ასევე წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის ექსპლუატაცია აღნიშნული რეჟიმით.

ამავდროულად, ავარიულ მდგომარეობაში აღმოჩნდა წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის კაშხლის ქვედა ბიეფი.

ტექნიკურ უნივერსიტეტში ჩატარებული ლაბორატორიული და საველე კვლევის შედეგები დაფუძნებული ზემოთ ჩამოთვლილ ავტორთა მოსაზრებებზე სრულ შესაბამისობაში აღმოჩნდა ჩვენი თანამონაწილეობით პროფესორებთან შ.გაგომიძესა და ი. ქადარიასთან რუსთაველის ფონდის 2011 წლის გრანტ 480-ის ფარგლებში მიღებულ თეორიულ შედეგებთან [8, 22].

ნათქვამის საილუსტრაციოდ, ვისარგებლოთ მდინარეთა შესართავ უბნებში, სითხის ნაწილაკთა სიჩქარის გამოყვანილი საანგარიშო დამოკიდებულებით [8,22]:

$$U = U_0 - a_0 \frac{\sigma}{\sqrt[4]{(k_0 H)^3}} \left( \frac{U_0}{\sqrt{gH}} \pm 1 \right) \sin \left( \sigma - \frac{\sigma U_0}{g i_0} \pm 2 \sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}} \right), \quad (5.1)$$

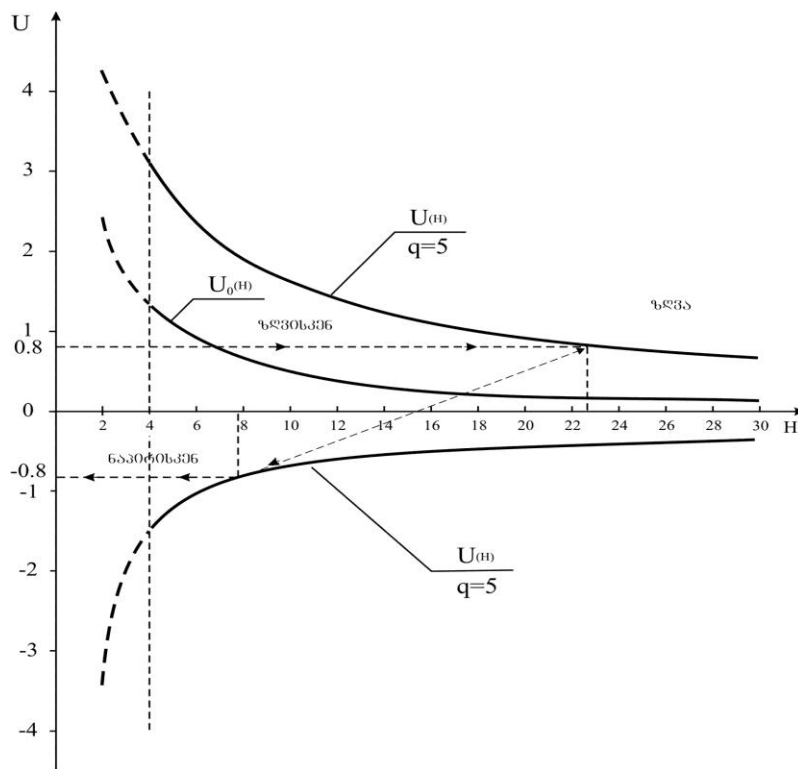
და ავგოთ ფოთის საქალაქო არხის შესართავ აკვატორიაში სითხის ნაწილაკების მაქსიმალურ სიჩქარეთა განაწილების მრუდები, როგორც ზღვაზე ღელვის პროცესში, ასევე წყნარი ზღვის (ე.წ. შტილის) პირობებში.

ფოთის საქალაქო არხის სიგანე –  $b_0 = 80$  მ; სიღრმე –  $H_0 = 4$  მ; გასატარებელი ხარჯი  $Q = 400$  მ<sup>3</sup>/წმ; დაყვანილი ხარჯი  $q = 5$  მ<sup>2</sup>/წმ; არხის შესართავ აკვატორიაში ზღვის ფსკერის ქანობი  $i_0 = 0.0067$ , პლიაჟ წარმომქმნელი ნატანის გამრეცხი სიჩქარე  $U_{პა} = 0.8$  მ/წმ,

ვთქვათ, ზღვის მხრიდან შესართავისკენ მოემართებიან 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  $k_0 = 2\pi/\lambda_0 = 0.058 \text{ მ}^{-1}$ , ტალღურ რხევათა პერიოდი პერიოდი  $\tau = 8,26 \text{ წმ}$ , (სიხშირე  $\sigma = 2\pi/\tau = 0.76 \text{ წმ}^{-1}$ ).

ნახ. 5.5–ზე წარმოდგენილია (5.1) დამოკიდებულებით აგებული ნაპირისაკენ მიმართული ღელვისას წყლის ნაწილაკთა დადებითი (ზღვისკენ მიმართული) და უარყოფითი (ნაპირისკენ მიმართული) მაქსიმალური სიჩქარეების ცვლილების მრუდები შესართავ აკვატორიაში ზღვის სხვადასხვა სიღრმეებისათვის, როცა (5.1)-ში აიღება ზედა „+“ ნიშანი, და ამავე დროს  $\sin\left(\sigma - \frac{\sigma U_0}{gi_0} \pm 2\sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}}\right) = -1$ , ანუ, როცა ნაპირისკენ გადაადგილება ტალღის ფსკერი და  $\sin\left(\sigma - \frac{\sigma U_0}{gi_0} \pm 2\sqrt{\frac{k_0 x}{i_0}}\right) = +1$  როცა ხდება დინების საწინააღმდეგოდ ხდება ტალღის ქიმის გადაადგილება.



**ნახ. 5.5. ფოთის „საქალაქო არხის“ შესართავში მაქსიმალურ სიჩქარეთა განაწილების მრუდები**

ნატანგამრეცხი სიჩქარის ამსახველი წრფეების გადაკვეთა აღნიშნულ მრუდებთან და აგრეთვე მდინარის  $U_0$  ჭავლის 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 რომ არ გვექონდა ღელვა ( $\sigma = 0$ ) მდინარის მიერ გამოტანილი ნატანი დაილექებოდა  $H = q/0.8 = 6.25$  მ სიღრმეზე, ანუ გაცილებით ახლოს, ნაპირიდან მაქსიმუმ 335 მ მანძილზე, რაც შემდგომ მართლაც მოხმარდება ნაპირის ზრდას, თუ ღელვის პროცესში წყალგამყოფი ჰიდროკვანძიდან შევწყვეტთ მდინარის წყლის მიწოდებას ქალაქის არხში.

ზემოთ მოყვანილი მაგალითი ერთის მხრივ თეორიულად ასაბუთებს პროფესორ გ. რურუას მიერ შემოთავაზებულ ფოთის წყალგამანაწილებელი რეგულატორის საექსპლუატაციო რეჟიმების მართებულობას, ხოლო მეორეს მხრივ მეტყველებს (5.1) დამოკიდებულების როგორც თეორიულ ასევე პრაქტიკულ მნიშვნელობაზე. გამომდნარე აქედან, მიგვაჩნია, რომ პროფესორ გ. რურუას მიერ შემოთავაზებული ღონისძიება აუცილებლად უნდა აღდგეს და დაიხვეწოს წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის რეაბილიტაციის და ქალაქის არხის გაწმენდის შემდეგ.

მდ.რიონის წყალგამყოფი ჰიდროკვანძის (წყალგამანაწილებელი რაბ-რეგულატორის) კაშხლის ქვედა ბიეფის ნგრევის მიზეზების შესწავლამ ჰიდრავლიკურ გაანგარიშებებზე დაყრდნობით გვაჩვენა, რომ ნგრევის მიზეზები საძიებელია ჰიდროკვანძის პროექტირებისას (1957-59 წ.წ.) დაშვებულ ხარვეზებში. კერძოდ:

1. კაშხლის ქვედა ბიეფი არ უნდა ყოფილიყო აღჭურვილი გამჭოლი ჩამქრობი კონსტრუქციებით - რეზოკის კბილებით, ვინაიდან ისინი მუშაობენ ძალზე ცუდად და არ ასრულებენ დადებით როლს განსაკუთრებით ბიეფების ზედაპირულ რეჟიმებში შეუღლებისას და ზრდიან წარეცხვებს. ამიტომ კაპიტალურ სარეაბილიტაციო სამუშაოთა ჩატარებისას უარი უნდა ითქვას ამგვარ ღონისძიებებზე;

2. რისბერმის ნიშნული კაშხლის ქვედა ბიეფში არ უნდა ყოფილიყო წყალსაცემის ნიშნულის დონეზე, ვინაიდან ამ შემთხვევაში დიდი სიჩქარეები რისბერმაზე განაპირობებდა ნაკადის მხარქვევით მოძრაობას

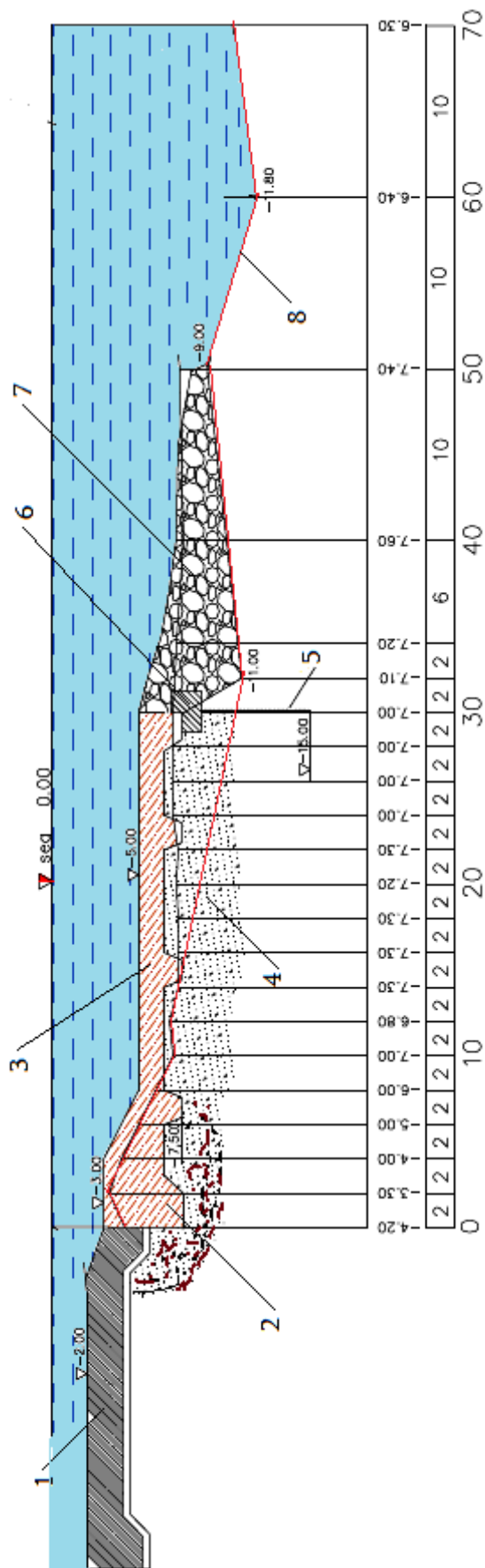
მორევებისა და დიდი გარეცხვების წარმოქმნით ქვედა ბიეფის მიმდებარე კალაპოტში;

3. წყალსაცემის ფილის სისქე (0,4 მ) არასაკმარისი აღმოჩნდა, რათა რისბერმას გაედლო ხანგრძლივი პულსაციური და ტალღური დატვირთვებისათვის და არ დამსხვრეულიყო კაშხლის თითქმის მთელ სიგრძეზე;

4. 1982-1983 წლებში „კოლხიდმშენის“ მიერ შესრულებული სარეაბილიტაციო ღონისძიებების გატარებამდე, ზღვის უძრავი წყალი (ჰალოსოლი) მდინარის ფსკერზე ქმნიდა შედარებით მკვრივი წყლის ბალიშს, რომლის გამო მასზე მოსრიალე მდინარის მტკნარი წყლის ჭავლი ფაქტობრივად არ ზემოქმედებდა მდინარის ფსკერზე. ეს უძრავი ბალიში ხელს უწყობდა მდინარის მყარი ჩამონადენის სწრაფ დალექვას და გარკვეულწილად აფერხებდა ფსკერის წარეცხვის პროცესებს რისბერმის წინ მდებარე კალაპოტში. ნარანდის ჩასმით ფაქტობრივად შეწყდა ნაგებობამდე ზღვის წყალის შემოდინება, რამაც დააჩქარა ქვედა ბიეფის გამორეცხვისა და ნგრევის პროცესები;

5. დროებითი სარეაბილიტაციო ღონისძიებები, რომლებიც მსოფლიო ბანკის კურატორობით განახორციელა „საქწყალპროექტმა“ 2005-2006 წლებში (ნახ.5.8), განსხვავებით 1982-1983 წლებში „კოლხიდმშენის“ მიერ შესრულებული სარეაბილიტაციო ღონისძიებებისგან, ამ ეტაპზე დადებითად უნდა იქნას შეფასებული, მაგრამ აუცილებლად მიგვაჩნია მასზე პერიოდული წარმოებდეს დაკვირვებები, რაც აღნიშნული ღონისძიების გატარების შემდეგ (2007წ.) არც ერთხელ შესრულებულა;

ჩვენ რეკომენდაციას ვუწევთ წყალსაცემი ფილის მოწყობას უფრო დაბალ - -5მ ნიშნულზე 1,5მ სისქით, მის ბოლო კბილთან ჩასმულ იქნას ნარანდი -15მ ნიშნულამდე, რომელიც კაპიტალურად დაიცავს წყალგამყოფი კვანძის კაშხლის ტანს გამორეცხვებიგან (ნახ.5.6).



ნახ.5.6. მდ. როინის წყალგამყოფი კვანძის ქვედა ბიეფის რეაბილიტაციის სექცია: 1.წყალსაშვი; 2. სიღრუეთა ცემენტაცია; 3. წყალსაცემი ფილა; 4. ქვიშის ფენა; 5. ნარანდი; 6. ბოლვერკი; 7. ქვიშით შევსებული ტომრები. 8. წარეცხვის კონტური (2005წ.)

6. დადასტურებულია, რომ ქალაქის არხში მდინარის წყალდიდობის ნატანით გაჯერებული ხარჯები უნდა გატარდეს მაშინ, როდესაც ზღვა იმყოფება წყნარ მდგომარეობაში, რადგან მხოლოდ ამ პირობებშია შესაძლებელი ნატანის აკუმულაცია შესართავ უბანში, ზღვის ნაპირთან ახლოს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, ანუ როცა ზღვა დელავს, მდინარის წყალდიდობის ხარჯების გავლისას იზრდება შესართავი უბნის წარეცხვების ინტენსივობა. წყალდიდობის ხარჯების გავლის შემდეგ, ზღვის ფრონტალური და არაფრონტალური ტალღების მეშვეობით ხდება დალექილი ნატანის გადანაწილება და ზღვის სანაპირო ზოლის (პლიაჟის) ზრდა.

შეიძლება განვიხილოთ 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  $250\text{მ}^3/\text{წმ}$ , რაც არასაკმარისია ნატანის ტრანსპორტირებისათვის. ამიტომ წყლის ხარჯისა და სიჩქარის გაზრდის მიზნით საჭიროა სამხრეთი არხის გაწმენდა.

ამოღებული მასალა ( $\approx 1$  მლნ.  $\text{მ}^3$ ) შეიძლება გამოყენებულ იქნას სანაპირო ზოლის ეროზიისაგან დასაცავად. მათემატიკური მოდელირების შედეგები გვიჩვენებს, რომ ასეთი ღონისძიება აღადგენს დარღვეულ წონასწორობას, ხოლო შემდგომში ხელს შეუწყობს პლაჟის აღდგენასაც.

II. ფსკერული ნატანის ამომღები მოწყობილობის 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 ტრანსპორტირებისათვის. კონვეიერის გამოყენებისას პლაჟის კვება ხორციელდება მიზანდასახულად ეროზიის რეალური სურათის გათვალისწინებით.

### **5.3. 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 წარეცხვის 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 დელტის და მიმდებარე ტრანზიტული ზონის წარეცხვის 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 ხარჯები, რომლებიც ჩვეულებრივ საკმაოდ ზუსტად ითვლება, მაგრამ ნატანის გადაადგილებისათვის განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს იმ პიკურ ხარჯებს, რომლებსაც პერიოდულად გაუშვებენ ექსპლუატაციაში არსებული კაშხლები.

ჩატარებული გათვლების მიხედვით, პლაჟარმომქმნელი ნატანის ბუნებრივად არსებული რაოდენობა – 400 000 მ<sup>3</sup>/წელი, რომელიც კაშხლების მშენებლობამდე აღწევდა ზღვას, შემცირდება 100% -დან (2000 წ.) 2% -მდე (2025 წ.).

მომავალ ათწლეულებში ზღვის დონის აწევით სანაპირო ხმელეთის მოსალოდნელი ინტენსიური წარეცხვისა 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 შეიტანეს 300 ათასი მ<sup>3</sup> -მდე ინერტული მასალა ამ ღონისძიებების შედეგად, პლაჟი აღდგა ადლიის ნაპირისათვის 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 სავალალოა ის ფაქტი, რომ ამ მასალის მოპოვება ხდება თვით ნატანისგან თითქმის დაცლილი მდინარე ჭოროხიდან, რაც აუცილებლად გამოიწვევს მისი კალაპოტის ეროზიას.

როგორც საინფორმაციო წყაროებიდან ირკვევა ჭოროხის დელტიდან ინერტული მასალას იღებენ სხვადასხვა სამშენებლო კომპანიები.

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

არსებობს 2000 წელს მომზადებული ადღია-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 [15].

**რეკომენდაციის სახით ვთვლით, რომ ნაპირსამაგრი ღონისძიებები უნდა იყოს გაანგარიშებული ფერდობების დეფორმაციების პროგნოზირებისა და ნაპირსამაგრი კონსტრუქციების (ქვაყრილი, ფილები, ტატრაპოდები და ა.შ.) ელემენტების გაანგარიშების მეთოდების გამოყენებით მათზე მდინარის დინებისა და ნაპირგასწვრივი ტალღების ზემოქმედების გათვალისწინებით; გაანგარიშებულ უნდა იქნას ჭოროხის შესართავ უბანსა 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 დეტალური ანალიზის 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, უნდა გამოყენებულ იქნას სხვადასხვა სახის ხისტი საინჟინრო ნაგებობები.

## ძირითადი დასკვნები:

1. გამოკვლეულია მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის დარეგულირების შედეგად გამოწვეული ჰიდროლოგიური ცვლილებები და ამ ცვლილებებით განპირობებული ჰიდროსაინჟინრო პრობლემები;
2. შემუშავებულია მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში, არათანაბარ დინებებზე ზედდებული გრძელი ტალღების გაანგარიშების თეორია;
3. გრძელტალღოვანი მიახლოების ფარგლებში თეორიულად პირველად განიხილება მდინარის ჭავლის გავლენა ზღვის მხრიდან ნაპირისაკენ ფრონტალურად მიმართულ ტალღებზე. ნაჩვენებია, რომ კლებადი სიღრმის შემთხვევაში, როცა ტალღა ვრცელდება მდინარის შესართავისკენ, მდინარის ნაკადი ინტენსიურად ამცირებს ტალღის სიმაღლეს და ამავდროულად აფერხებს მისი სიგრძის კლებას;
4. ნებისმიერი დახრილობის სანაპირო ფერდობების მქონე ტრაპეციულ და სამკუთხა არხებში წყლის ნაპირგასწვრივი ტალღური მოძრაობის ამსახველი განტოლებების პირდაპირი მეთოდით ამოხსნის შედეგად შეფასებულია მოუპირკეთებელი და მოპირკეთებული არხების სანაპირო ფერდობების მდგრადობა;
5. შემუშავებულია ზღვაში შემავალი არხების კალაპოტების მოსალოდნელ განივ დეფორმაციათა პროგნოზირების მეთოდი;
6. დახრილ ზედაპირებთან ტალღური მოძრაობის რთული პროცესები ელემენტარულ ფუნქციებში აღიწერება შედარებით მარტივი საანგარიშო დამოკიდებულებებით, რომლებიც ამავე დროს გამოირჩევა მაღალი სიზუსტით და შესაბამისობაშია არსებულ ნატურულ და ექსპერიმენტულ დაკვირვებებთან;
7. შემუშავებულია რეკომენდაციები ნაპირდაცვითი ღონისძიებების გასატარებლად მდინარეების ენგურის, რიონისა და ჭოროხის შესართავ აკვატორიებსა და ზღვის მიმდებარე სანაპირო ზოლში.

## გამოყენებული 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 მშენებლობისათვის ზღვის პარამეტრების განსაზღვრა 1%-იანი ალბათობით 8 ბალიანი შტორმის შემთხვევაში, სსიპ „თბილწყალგეოს“ სამეცნიერო ანგარიში. 2012. 22 გვ.
4. ბაღაშვილი 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., 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.
7. 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
8. გაგოშიძე შ., ლოდელიანი ლ., ქადარია ი. ჰიდროსაინჟინრო და გარემოსდაცვითი პრობლემები და მათი გადაჭრის გზები ქალაქ ფოთის შავიზღვისპირა რეგიონში. რუსთაველის ეროვნული ფონდი, საგრანტო პროექტი № 480. 2009-2012 წ.წ. 149გვ.
9. 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.
10. 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, გვ.49-53. 2013;
11. გედენიძე ზ., ამბროლაძე თ. წყლის მეურნეობა, თბილისი, სტუ. 2009. გვ.242.
  12. 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.
  13. 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.
  14. კოდუა მ. გრძელი ტალღების ტრანსფორმაციის შესახებ მდინარეთა შესართავ აკვატორიებში. სამეცნ. ტექნ. ჟურნალი „ჰიდროინჟინერია“; №1-2 (21-22). 2016. გვ.12-27.
  15. მდ. აჭარისწყალზე შუახევი ჰესის მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტი გარემოზე ზემოქმედების შეფასების ანგარიში, შპს „გამა კონსალტინგი“ 2013 წელი
  16. 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.
  17. 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.
  18. 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.
  19. მუნიციპალური წყლის რესურსების ინტეგრირებული მართვის პროექტი საქართველოში. ძირითადი ანგარიში MUB 97016P1. ARCADIS Euroconsult ფოთი. 2000 წ. 397 გვ.
  20. საღინაძე 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>

21. ქადარია ი. გაგოშიძე შ., სალინაძე ი., სანაპირო არეების ჰიდროდინამიკა და მისი საინჟინრო ასპექტები საქართველოს შავი ზღვისპირა რეგიონებისათვის რუსთაველის ეროვნული ფონდი, საგრანტო პროექტი 10-15. 2012-2014 წ.წ. 112 გვ.
22. ქადარია ი., ზღვასთან მიმდებარე ჰიდროტექნიკური ნაგებობების გაანგარიშების მეთოდები, სადოქტორო დისერტაცია, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. 2005. 140 გვ.
23. ქ. ფოთში ახალი ღრმა წყლიანი ნავსადგურის მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტი. გარემოზე ზემოქმედების შეფასების ანგარიში, არატექნიკური რეზიუმე, 2015წ. 34 გვ. <http://moe.gov.ge/files>
24. ლღელიანი ლ., გაგოშიძე შ., გ. ჭილაძე; ჰალოსოლი. მონოგრაფია, ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 2006. 77 გვ.
25. ჭოროხის ჰესების კასკადის 110 და 35 კვ ეგზ-ების მშენებლობის და ექსპლუატაციის პროექტი გამა კონსალტინგი. <http://moe.gov.ge/files>.
26. 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>;
27. ჯაოშვილი შ. რუსო გ. ინერტული მასალების მოპოვების გავლენის შესწავლა მდ. ჭოროხის კალაპოტის და შესართავის თანამედროვე მდგომარეობაზე. სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაო, ზღვებისა და მდინარეების სანაპიროთა მორფოდინამიკის სკი „სანდი“. 1996. 42 გვ.
28. 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.
29. Bretshneider C.U. Selection of design wave for offshore structures. J. of the Waterways and harbours Division, W,2, 1958.
30. Gagoshidze Sh., Kadaria J., Long wave on variable stationary flow, Proceedings of Long Waves Symposium, in parallel with the XXX IAHR Congress, Thessaloniki, Greece, August 25-27, 2003. p. 223-228
31. 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.
32. 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.
33. 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
34. Gagoshidze Sh., Kodua M. Hydraulic calculation method for sea bottom spillway sewers. *Energionline №2(8)*, 2014 .8 p.
  35. 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>
  36. Dean W.R. On the reflection of surface waves by a submerged plane barrier. *Cambridge Phil. soc.*, vol. 41, 1945, p. 231-238.
  37. *Estuary And Coastline Hydrodynamics*. eEd. by A. T. Ippen. McGraw-Hill Book Co New York, 1966., p. 744.
  38. Horikawa K. *Nearshore dynamics and coastal processes*. Tokyo: Univ. press. 1988, pp.522.
  39. Jaoshvili Sh. *The rivers of the Black Sea*. European Environment Agency. Technical report, No 71, 2003, p. 58.
  40. Jonson I.W. The reflection of surface waves by currents. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 1947, vol. 28, N6, 1.
  41. **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
  42. Mich M. Mouvements Underlatatoires de la mer en profondeur constante ou decroissante. *Annales des ponts et Cheusseer*, vol. 114, N3, 1944, pp. 270-292, N4, pp 369-406.
  43. O’breien M.P. A summary of the theoric of oscillatory waves. *Beach Erosion Board Techn. Rep.*, 1944, No.2.
  44. 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>
  45. Stoker J.J. *Water Waves*. Sec. 5.3. Three-dimensional waves against a vertical cliff. 1957.
  46. Taylor G. the action of a surface current used as breakwater. *Proc. Roy.Soc.* 1955, n.1187, p.231.
  47. Unna P.I. *Waves and Tidal Streams Nature*, V . 149, 1942 pp. 124-143
  48. Алтунин В. С. Мелиоративные каналы в землянных руслах. М.:1979, 255 с.
  49. 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.



50. **Войнич-Сяноженцкий Т.Г.** Гидродинамика устьевых участков рек и взморий бес приливных морей. *Тр.ЗакНИГМИ, вып. 46(52), Гидрометеоиздат, Л., 1972, 204 с.*
51. 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
52. Гагошидзе Ш.Н. К исследованию распространения поверхностных волн жидкости над наклонным дном. Совещание по цунами, ИПФ АН СССР, Горький, 1984, с. 28-30
53. Гагошидзе Ш.Н. Влияние ширины горных водохранилищ на параметры поверхностных волн. Сб. Научно технический прогресс в гидротехническом строительстве. Информэнерго, М., 1988, с. 35-36
54. Гагошидзе Ш.Н. Прямой метод решения задачи о регулярных волнах над наклонным дном. Океанология, ж. АН СССР т. XXIX, М., 1989, с. 64-65
55. Гагошидзе Ш.Н. К исследованию распространения волн в суживающихся акваториях. Сб. Колебания и волны в механике сплошной среды Горький, 1989, с. 14-22
56. Гагошидзе Ш.Н., Хатиашвили Э.Б. Трансформация поверхностных волн на крутых подводных склонах. Тр. ЗакНИГМИ, вып. 62(68) Л., Гидрометеоиздат, 1975, с. 3-17
57. 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
58. 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
59. 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.
60. Гидравлические исследования прибрежной полосы моря и устья р. Ингури. Отчет ГрузНИИЭГС, Тбилиси, 1988.
61. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев; перевод с английского; 1970г. Гидромедиздат. стр. 393.
62. Гогелияни Л. Гидравлика Разноплотностных Потоков в Гидротехнике , монография , изд. Грузинский технический университет . Тбилиси 2005.187 стр.
63. Дин Р.Г., Харлеман Д.Р. Взаимодействие между волнами и береговыми сооружениями. В кн.: Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. Л.: Гидрометеоиздат, 1970, с. 167-228
64. Джунковский Н. М., Каспарсон А.А. и др. Порты и портовые сооружения. Ч. II. М.:Госстройиздат, 1967, 447 с.

65. Защита от размыва русел нижних бьефов водосбросов (рекомендации по проектированию). -М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1974.
66. Канторович Л.В. Один прямой метод приближенного решения задачи о минимуме двойного интеграла. ИЗВ. АН СССР, ОМЕН, №5, 1933, с. 647-652
67. Канторович Л.В., Крылов В.Н. Приближенные методы высшего анализа. Физматгиз, 1962, 708 с.
68. Картвелишвили Н.А. Неустановившиеся открытые потоки. Л.: Гидрометеоздат, 1968, 126 с.
69. Киселев, П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1972.–312 с.
70. Кочин Н.Е. Собрание сочинений, т 2. М.: Гостехиздат, 1949
71. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, Т.1. М.: физматгиз, 1963, 727 с.
72. Крылов Ю.М. К теории рефракции морских волн. Тр. ГОИН. вып. 16, М., 1950, с. 95-103.
73. Крылов Ю.М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Л.: Гидрометеоздат, 1966, 255 с.
74. Ламб Г. Гидродинамика. *Гостехиздат, М., 1947. 928 с.*
75. Месхели К.П. Экспериментальное исследование сопротивления тел при их колебательном движении в жидкости. Тр. ГрузНИИЭГС, Энергия, М., 1984, с. 48-53
76. Мирцхулава Ц.Е. размыв русел и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967, 179 с.
77. 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.
78. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновых и от судов). СНиП 2.06.04.82. М.: Стройиздат, 1983.
79. Некрасов А.В., Пелиновский Е.Н. (Редакторы) Практикум по динамике океана СП, Гидрометеоздат, 1992, 320 с.
80. Проект развития порта Поты в Грузии. Группа “SAPROF” фонда зарубежного экономического сотрудничества Японии (ОЕСФ). 1999, 358с.
81. 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.
82. 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 .
83. СНиП 92-60, Госстрой СССР. Технические условия определения волновых воздействиях на морские, речные сооружения и берега. М.: Госстройиздат, 1960.

84. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977, 815 с.
85. Стокер Дж. Волны на воде. М.:ИЛ, 1959, 618 с.
86. Технический проект регулирующего сооружения на р. Риони с мостовым переходом. Том II , Книга 2 М.: Гипроводхоз. 1951 г.
87. 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.
88. Шайтан В.С. Исследование устойчивости камня в неоднородной наброске при действии волн. Тр. гидр. лаборатории ВНИИ ВОДГЕО, сб. XII, М.: ГСИ, 1965
89. Шулейкин В.В. Рефракция волн на материковой отмели. Изв. АН СССР, №10, 1935, с. 1355-1370.