

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი ბერძენაშვილი

წყალსაცავებში ღვარცოფებით და სპეციფიკური ტიპის  
მეწერებით წარმოქმნილი ჰიდროდინამიკური პროცესების  
პროგნოზირება

სპეციალობა: ჰიდროინჟინერია

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი, 2015 წელი

სადისერტაციო ნაშრომი შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის ჰიდროინჟინერიის დეპარტამენტში.

ხელმძღვანელი: ხვიჩა ირემაშვილი  
ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი,  
ასოცირებული პროფესორი

თეიმურაზ გველესიანი ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი
---

რეცენზენტები: გივი გავარდაშვილი  
ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი  
  
ნიკოლოზ თევდორაშვილი  
ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატი.

დისერტაციის დაცვა შედგება 2016 წლის „13“ თებერვალს, 14:00 საათზე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, 1-ლი კორპუსი, მე-3 სართული, სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიის აუდიტორია. მისამართი: ქ. თბილისი 0175, კოსტავას ქ. 68<sup>ბ</sup>.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში, მისამართი: ქ. თბილისი 0175, კოსტავას ქ. 77. ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე.

სადისერტაციო საბჭოს  
სწავლული მდივანი,  
პროფესორი

/დ.ტაბატაძე/

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

### საკვლევი თემის აქტუალურობა

საქართველო მსოფლიოში მთიან სახელმწიფოებს შორის ერთ-ერთ ყველაზე ღვარცოფსაშიშ რეგიონს წარმოადგენს. დღეისათვის საქართველოში ასზე მეტი ღვარცოფსაშიში აქტიური მოქმედი კერაა აღრიცხული, საიდანაც მოსახლეობას და სახალხო მეურნეობის ობიექტებს მუდმივი საფრთხე ემუქრება. ვინაიდან ტერიტორიის უმეტეს ნაწილს შეადგენს მთიანი სეისმოაქტიური რაიონები, ამიტომ მეწყერულ მოვლენებს მთისა და ხეობების ფერდობებზე ხშირად თან სდევს მნიშვნელოვანი მატერიალური ზარალი, ზოგჯერ კი კატასტროფული შედეგები ადამიანთა მსხვერპლის სახით.

ჰიდროკვანძის რაიონში მეწყერის ზემოქმედება გამოიხატება, როგორც უშუალოდ ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე ავარიული პირობების წარმოქმნით, ასევე წყალსაცავში დამანგრეველი ტალღების გენერაციის სახით. მეწყერის დარტყმითი ზემოქმედება ჰიდროტენჯიკურ და საინჟინრო ნაგებობებზე, მათ შორის კაშხლებზე, მილსადენებზე, ნავთობსადენებზე, საავტომობილო თუ სარკინიგზო გზებზე იწვევს ავარიებს და განაპირობებს შესაბამის უარყოფით ეკოლოგიურ და სოციალურ შედეგებს. ხოლო ხეობის ფერდიდან ჩამოზვავებულმა მეწყერმა შეიძლება გადახერგოს მდინარის კალაპოტი და შექმნას ბუნებრივი კაშხალი, რომლის წარეცხვა ხელოვნური ნაგებობებისგან განსხვავებით, ბევრად უფრო ადვილად შესაძლებელი, რასაც უცილობლად ვრცელი ტერიტორიების დატბორვა მოსდევს.

საქართველოს ღვარცოფული ნაკადების მოქმედების არემია მთელი რიგი დასახლებული პუნქტები (თელავი, ყვარელი, მცხეთა, დუშეთი, გორი, ყაზბეგი, ლენტეხი, ონი, ქედი, შუახევი, სხვა ქალაქები და რაიონები). ღვარცოფული ნაკადებისაგან გამოწვეული ზარალი ყოველწლიურად რამდენიმე ათეულ მილიონ ლარს აღწევს. ძალზედ შემაშფოთებელია, რომ მარტო ყვარელში მდ. დურუჯის ხეობაში, სხვადასხვა დროს გავლილმა

ღვარცოფებმა მრავალი ადამიანის სიცოცხლე შეიწირა. ამ მხრივ მდ. დურუჯი პირველ ადგილზეა საქართველოში.

ზემოაღნიშნულმა ფაქტორებმა განაპირობა საქართველოს ენერგეტიკისა და ენერგეტიკულ ნაგებობების სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში მრავალრიცხოვანი თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების ჩატარება (სამეცნიერო თემატიკის ხელმძღვანელი თ. გველესიანი და სხვები), რის შედეგადაც შეიქმნა საწყისი მეცნიერული საფუძვლები რომლებიც ძირითადად შეეხებოდა ჰიდროკვანძის წყალსაცავის რაიონში საგანგებო სიტუაციებით გამოწვეული საშიში ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების მათემატიკურ მოდელირებასა და პროგნოზირებას. ამის მიუხედავად აღნიშნული პრობლემის სირთულის გამო ბევრი მნიშვნელოვანი საკითხია არასაკმარისად შესწავლილი ან განხილვის გარეშე დარჩენილი. დღის წესრიგში დადგა არსებული საანგარიშო მეთოდების დახვეწა და მთელი რიგი საკითხების ახლებური გადაწყვეტის აუცილებლობა.

### **ნაშრომის ძირითადი მიზანი**

სამწუხაროდ კატასტროფულ მოვლენას საქართველოში ადგილი ჰქონდა მიმდინარე წელსაც (2015 წლის 13 ივნისი), როდესაც ძლიერმა წვიმამ მდინარე ვერეს ხეობაში გამოიწვია მეწყერის ჩამოწოლა და კალაპოტის გადაკეტვა, შეიქმნა ბუნებრივი კაშხალი რომელიც საკმაოდ სწრაფად შეივსო და დაიწყო გადადინების პროცესი. გადადინების ხარჯის სიდიდემ გამოიწვია ბუნებრივი კაშხლის წარეცხვა და შემდგომი სწრაფი რღვევა, რამაც თავის მხრივ წარმოშვა ექსტრემალური, სტრატეგიცირებული, ღვარცოფული ნაკადი. წყალმა მთლიანად დატბორა ზოოპარკის ტერიტორია, განადგურდა ქალაქის მიმდებარე ინფრასტრუქტურა, დაინგრა და დაიტბორა საცხოვრებელი სახლები, იმსხვერპლა ოცზე მეტი ადამიანი დაიხოცა მრავალი ცხოველი.

კატასტროფული შედეგების თავიდან აცილება ან შერბილება შესაძლებელია მხოლოდ პოტენციური მეწყერებისა და ღვარცოფების

შესაძლო დინამიკური ზეგავლენის მეცნიერულად დასაბუთებულ პროგნოზირებით.

ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს საკითხის ახლებური შესწავლა, რომელიც ეხება ღვარცოფის შედეგად წყალსაცავში ექსტრემალური ტალღების წარმოქმნასა და გადადინების საფრთხის პროგნოზირებას, შესაბამისი პროცესების მათემატიკური მოდელირების საფუძველზე. სადისერტაციო ნაშრომში განხილულია შემდეგი ამოცანები:

- წყალსაცავის ფსკერზე ღვარცოფისა და მეწყერის შემოდინების შედეგად წარმოშობილი ექსტრემალური გრძივი ტალღების პროგნოზირება;
- წყალსაცავის ფერდიდან ჩამოწოლილი მეწყერის ან ღვარცოფის შემოსვლის შედეგად წარმოშობილი ექსტრემალური განივი ტალღების პროგნოზირება;
- ტალღების ინტერფერენციული პროცესით მიღებული ექსტრემალური ონდულაციების შეფასება;
- ექსტრემალური ტალღური მახასიათებლების საფუძველზე გადადინების პარამეტრების განსაზღვრა და პროგნოზირება.

### **კვლევის ობიექტი და მეთოდები**

ნაშრომში დამუშავებულია მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის საფუძველზე მიღებული არასტაციონარული ტალღური სასაზღვრო ამოცანების ორ (2D) და სამ (3D) განზომილებიანი მათემატიკური მოდელის რიცხვითი ფორმულირება და ამოხსნა, როგორც სქემატიზირებულ, ისე რეალური ფორმის წყალსატევში ღვარცოფისა და მეწყერის დროს წარმოქმნილი ექსტრემალური ტალღური პროცესების შესასწავლად, კერძოდ:

- წყალსაცავის ფსკერზე ღვარცოფის შემოსვლით განპირობებული გრძივი ტალღური რყევების არასტაციონარული სასაზღვრო ამოცანის ორ განზომილებიანი (2D) მათემატიკური მოდელირება და რიცხვითი ამონახსნის მიღება სასრულ სხვაობითი მეთოდით;

- დახრილ ფერდობების მქონე კანიონის ტიპის წყალსაცავებსა და არხებში ღვარცოფის შემოსვლით განპირობებული განივი ტალღური რყევების არასტაციონარული სასაზღვრო ამოცანის ორ განზომილებიანი (2D) მათემატიკური მოდელირება და რიცხვითი ამონახსნის მიღება სასრულ სხვაობითი მეთოდით;
- რეალური ფორმის წყალსაცავის ფსკერზე და დახრილ ფერდობების მქონე კანიონის ტიპის წყალსაცავებსა და არხებში ღვარცოფის შემოსვლით განპირობებული გრძივი და განივი ტალღური რყევების არასტაციონარული სასაზღვრო ამოცანის სამ განზომილებიანი (3D) მათემატიკური მოდელირება და რიცხვითი ამონახსნის მიღება სასრულ სხვაობითი მეთოდით;
- სქემატიზირებული წყალსაცავის ფსკერზე მოძრავი ღვარცოფით წარმოქმნილი გრძივი და განივი ტალღური რყევების არასტაციონარული ჰიდროდინამიკური ტალღური პროცესის კანონზომიერების შესწავლა სასაზღვრო ამოცანის ორგანზომილებიანი (2D) ანალიზური მოდელის საფუძველზე;
- წყალსაცავში წარმოქმნილი მაღალი ღვარცოფული და მეწყერული ტალღის კაშხალზე გადადინების მახასიათებლების განსაზღვრა და გადადინების საფრთხის რისკის შეფასება ქვედა ბიეფში.

### **ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე**

დამუშავებულია მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის საფუძველზე მიღებული არასტაციონარული ტალღური სასაზღვრო ამოცანების ორ (2D) და სამ (3D) განზომილებიანი მათემატიკური მოდელების რიცხვითი ფორმულირება სასრულ-სხვაობითი სქემების საშუალებით და ახალი ტიპის არაცხადი, შერეული, ორი და სამ შრიანი იტერაციული ამონახსნი ალგებრული ოპერატორული მეთოდის გამოყენებით, როგორც სქემატიზირებული, ასევე რეალური ფორმის წყალსატევში.

ნაშრომში შესწავლილია ახალი საკითხი, რომელიც ეხება წყალსაცავებში ღვარცოფებითა და სხვადასხვა ტიპის მეწყერით გენერირებული ექსტრემალური ჰიდროდინამიკური პროცესების მათემატიკურ მოდელირებასა და იმ საშიშროების შეფასებას რომელიც საფრთხეს უქმნის წყალსატევის ნორმალურ ფუნქციონირებას და იწვევს ქვედა ბიეფში ეკოლოგიური წონასწორობის დარღვევას, ტალღის კაშხალზე გადადინების შედეგად.

ნაშრომში წარმოდგენილია აგრეთვე მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის საფუძველზე მიღებული არასტაციონარული ტალღური ვერტიკალურად ორგანზომილებიანი (2D) სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნის ანალიზური მეთოდები, მართკუთხედისა და სამკუთხედის ფორმის სქემატიზირებულ წყალსატევში ღვარცოფის სტრატეგიფიცირებული ნაკადის შესვლით გამოწვეული გრძივი და განივი რყევების შესწავლისათვის.

ნაშრომში მოცემულია ანალიზური ფორმულების გამოყენების არეალი და ინტენსიური ტალღების კაშხალზე გადადინების სწრაფი პროგნოზირების ფორმულები.

ნაშრომში განხილული თეორიული გათვლების შედეგები გვიჩვენებს, რომ გეოდინამიკური პროცესების დროს, როდესაც მეწყერული მასა მთლიანად ჩაიძირება და შეიწონება წყალში, ინტენსიური ტალღური პროცესის წარმოქმნა შესაძლებელია ერთნაირი ალბათობით ნებისმიერი მოცულობის მქონე ჰიდროკვანძებში, მათ შორის საშუალო და მცირე მოცულობის მიწის კაშხლის მქონე საირიგაციო დანიშნულების წყალსაცავებში, რომელთა რიცხვი საქართველოში საკმაოდ დიდია.

### **შედეგების გამოყენების სფერო**

ნაშრომის ახალ შედეგებს, ორ (2D) და სამ (3D) განზომილებიანი ტალღური ამოცანების რიცხვითი ამოხსნის მეთოდის, რიცხვითი და ანალიზური ამონახსნის მეშვეობით ტალღური ზემოქმედების გათვლის სწრაფ მეთოდის, მათი გამოყენებით შესრულებულ კომპიუტერულ

პროგრამებს, გააჩნიათ მნიშვნელოვანი პოტენციალი პრაქტიკაში გამოყენების მიზნით.

აღსანიშნავია, რომ დამუშავებული მეთოდით შესაძლებელია არა მარტო ღვარცოფული და მეწყერული მოვლენების დროს წარმოქმნილი ტალღების შესწავლა, არამედ წყალსატევებსა და მდინარეებში ნაპირსამაგრი და სხვა სახის ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე ექსტრემალური სიტუაციების მახასიათებლების, სიჩქარისა და წნევის გავლენის შეფასებაც. გარდა ამისა მოცემული მეთოდიკა შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ზღვის სანაპირო ზოლის ექსტრემალური სიტუაციების გამომწვევი მოვლენების შესწავლის დროსაც.

ნაშრომში განხილული ღვარცოფით გამოწვეული გადადინების რისკების შეფასების მეთოდიკა ეკონომიკური თვალსაზრისით საკმაოდ ეფექტურია მთის სეისმოაქტიურ რაიონებში წყალსაცავებისა და კაშხლების დაგეგმვის, მშენებლობისა და ექსპლუატაციის დროს, აგრეთვე ჰიდროკვანძების მონიტორინგის, მიმდებარე გარემოზე დამანგრეველი ტალღების ზემოქმედების პროგნოზირებისა და შეფასებისათვის, მოსალოდნელი კატასტროფებით გამოწვეული ეკონომიკური ზიანისა და ადამიანთა მსხვერპლის თავიდან ასაცილებლად.

ნაშრომში მიღებული შედეგების საფუძველზე შესაძლებელია დაიგეგმოს და განხორციელდეს ოპტიმალური, ტექნიკურად მიზანდასახული ეკონომიკური, სოციალური და უსაფრთხოების საკითხებთან დაკავშირებული გადაწყვეტილებები ჰიდროკვანძის პროექტირების, მშენებლობის, ექსპლუატაციისა და გარემოს დაცვის საკითხების გადაჭრის დროს, საგანგებო სიტუაციების გათვალისწინებით, მაგალითად:

- მოსახლეობის შეტყობინება კაშხლის მოსალოდნელი გარღვევის ან ქვედა ბიეფში კატასტროფული ტალღის გადადინება და გავრცელების შესახებ, მსხვერპლის თავიდან აცილების მიზნით;



- წყალსაცავში „უსაფრთხო“ დონის დადგენა, როდესაც იქმნება პოტენციური ღვარცოფის შემოდინებისა და გადადინების საფრთხე (უხვი ნალექების, მიწისძვრის და სხვა ანალოგიური მოვლენების დროს);

ორგანიზაციები რომლებსაც ენიჭებათ პასუხისმგებლობა და კონტროლი ჰიდროკვანძების საიმედო მუშაობაზე, აგრეთვე სახელმწიფო დეპარტამენტები და არასამთავრობო ორგანიზაციები, რომლებიც დაკავშირებულია წყლის რესურსებისა და გარემოს დაცვის უზრუნველყოფის პრობლემებთან, წარმოადგენენ ნაშრომის შედეგების პოტენციურ მომხმარებლებს.

### **ნაშრომის აპრობაცია და პუბლიკაციები**

ნაშრომში დამუშავებული მეთოდები და მიდგომები განხილულია თემატურ სემინარებსა და კოლოკვიუმებზე, წარმოდგენილია სამეცნიერო კონფერენციებსა და ჟურნალებში ქართულ, ინგლისურ და რუსულ ენებზე და შეტანილია საგრანტო პროექტებში, კერძოდ:

- წარმოდგენილია 5 (ხუთ) საერთაშორისო კონფერენციაზე, მათ შორის 4 (ოთხი) დოქტორანტურაში სწავლის პერიოდში;
- გამოქვეყნებულია 19 (ცხრამეტი) სტატია ამავე კონფერენციებისადმი მიძღვნილ და სხვადასხვა ჟურნალებში, მათ შორის 10 (ათი) სწავლის პერიოდში;
- ჩართულია 2 (ორი) სამეცნიერო საგრანტო პროექტში:
  - #FR/360/3-105/13 - ზღვის სანაპირო ზოლში ექსტრემალური ტალღების ჩამხშობი კონსტრუქციების ეფექტიანობის გამოსათვლელად;
  - #DI/14/3-109/14 - ღვარცოფით გამოწვეული ექსტრემალური ტალღების, კაშხალზე გადადინების პროგნოზირებისა და კაშხლის რღვევისა და ქვედა ბიეფში გავრცელება, დატბორვის ამოცანების გადაწყვეტისათვის;

- დამუშავებულია 2 (ორი) გამოგონება (პატენტი), მათ შორის ექსტრემალურ ტალღაჩამხშობ მოტივტივე კონსტრუქციაზე.

### **ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა**

ნაშრომი შედგება რეზიუმის (ქართულ და ინგლისურ ენაზე), შესავლის, თემატიკის აქტუალურობისა და ლიტერატურის მიმოხილვისაგან, შედეგებისა და მისი განსჯის 4 (ოთხი) თავის, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. ნაშრომი წარმოდგენილია 136 (ასოცდათექვსმეტი) ნაბეჭდ გვერდზე, მათ შორისაა 30 (ოცდაათი) ნახაზი და 5 (ხუთი) ცხრილი.

### **ნაშრომის მოკლე შინაარსი**

#### **რეზიუმე**

აღწერილი ნაშრომის აქტუალურობა, მეთოდოლოგია, შედეგები და გამოყენების სფერო.

#### **შესავალი**

განხილულია თუ რამ განაპირობა ნაშრომის აუცილებლობა და რა არის მისი არსი.

თუ კაშხალი აგებულია მიწის ან სხვა ბუნებრივი მასალისაგან, მაშინ ექსტრემალური ტალღების კაშხალზე გადადინებით შექმნილმა ნაკადმა შეიძლება გამოიწვიოს კაშხლის ნაწილობრივი ან მთლიანი წარეცხვა, რასაც თან სდევს ქვედა ბიეფში დამანგრეველი ღვარცოფული ნაკადის გავრცელება და კატასტროფული შედეგი.

საქართველოს მთიან და მთისწინა სეისმურ რაიონებში ამჟამად ფუნქციონირებს 70-დე ენერგეტიკული და ირიგაციული დანიშნულების ჰიდროკვანძი, რომელთა შემადგენლობაშია ძირითადად ბუნებრივი მასალისაგან აგებული კაშხლები, მათ შორისაა 90–100 მ სიმაღლის კაშხლებიც. ამგვარად, აღნიშნული კატასტროფული ჰიდროდინამიკური (ტალღური) ზემოქმედების საფრთხის პრევენცია ან მისი ინტენსივობის

შემცირება უაღრესად მნიშვნელოვანია და აუცილებელია ჰიდროკვანძის გარემოს დაცვისა და უსაფრთხოების უზრუნველყოფისათვის.

ნაშრომის ძირითადი მიზანია სამთო წყალსაცავში ღვარცოფით წარმოქმნილი ექსტრემალური ტალღური პროცესების აღწერის ახალი სრულყოფილი მეთოდის შექმნა მათემატიკური მოდელების საფუძველზე, რაც საშუალებას იძლევა განხორციელდეს კაშხალზე და წყალსაცავის მიმდებარე გარემოზე ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების პროგნოზირება და პოტენციური საფრთხის აღკვეთა ან მისი შემცირება, მათ შორის კაშხალზე გადადინება და წარეცხვის რისკების შეფასება.

### **1. თემის აქტუალურობა, მიზნები ამოცანები და ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვა**

განხილულია თუ რა ზიანი მოაქვს მსოფლიოს მასშტაბით მეწყერებსა და ღვარცოფებს, აღწერილია მეწყერებისა და ღვარცოფების არსი და გავლის სტატისტიკა საქართველოში.

ძირითადად განასხვავებენ მეწყერის ვარდნით, სრიალით და დინებით მოძრაობას. რაც განპირობებულია მეწყერის წარმოქმნილი ფაქტორების მოქმედებით, მეწყერის ქანის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებითა და მისი კერის რელიეფით.

ღვარცოფები ძირითადად იყოფა ორ ჯგუფად:

- ბმული-სტრუქტურული ნაკადები, რომლებიც წარმოგვიდგებიან ერთგვაროვანი კონგლომერატით ქვატალახიანი მასის შემადგენლობით 80-90 % მყარი კლდის მონატეხებით, ქვებით, კენჭნარით, ტალახიანი მასით, რომელთაც გაჩერების შემთხვევაში არ ეკარგებათ სტრუქტურა. ამ ნაკადებისათვის საშუალო სიმკვრივე იცვლება 1700-2500 კგ/მ<sup>3</sup>;
- არაბმული ღვარცოფები, რომლებიც ასევე ხასიათდებიან მყარი ფრაქციების კონცენტრაციით 15-60%-მდე მასაში, მაგრამ ითვლება წყლის მექანიკურ ნარევადა. ასეთი ნაკადების საშუალო სიმკვრივე იცვლება 1100-1700 კგ/მ<sup>3</sup>.

ბმული ღვარცოფებისათვის დამატებით საანგარიშო სიდიდედ უნდა ჩაითვალოს რეოლოგიური მაჩვენებლები - დინამიკური სიბლანტე, ძვრის საწყისი წინაღობა და მოდული, რომლებიც პრაქტიკულად ძირითადად ახასიათებენ ღვარცოფული მასის, როგორც დამაბულობას, ასევე დეფორმაციის მდგომარეობას. ღვარცოფის ტურბულენტურ რეჟიმს ადგილი აქვს მაშინ როდესაც მყარი შემადგენლის კონცენტრაცია მცირეა, ხოლო მოძრაობის სიჩქარე მაქსიმალური.

არაბმული ღვარცოფების ერთ-ერთ მახასიათებელ სიდიდედ უნდა ჩაითვალოს ჰიდრავლიკური სიმსხო.

საქართველოში ღვარცოფული ხასიათის მდინარეები და შენაკადები ღვარცოფული მასის გამოტანის მოცულობითა და დამანგრეველი ძალით ნაკლებად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან და შეუძლიათ გამოიტანონ მილიონზე მეტი კუბომეტრი მყარი მასალა. ყველაზე ხშირად ღვარცოფული ნაკადების გავლა ხდება აგვისტოს თვეში, დაახლოვებით წლიური მოცულობის 30-35%.

ლიტერატურული მასალის ანალიზიდან გამომდინარე აღნიშნული ტალღური პროცესების აღწერა შესაძლებელია:

- ერთგანზომილებიანი (1D) სითხის მოძრაობის მოდელით, მარჩხი წყლის (მწ) არაწრფივი თეორიის გამოყენებით;
- ორგანზომილებიანი (2D) (ვერტიკალურ სიბრტყეში) მოძრაობის მოდელით, წრფივი მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების (მატ) თეორიის გამოყენებით;
- ორგანზომილებიანი (2D) (გეგმაში) მოძრაობის მოდელით, მარჩხი წყლის (მწ) არაწრფივი თეორიის გამოყენებით;
- სამგანზომილებიანი (3D) (სივრცითი) მოძრაობის მოდელით, (მატ) თეორიის საფუძველზე.

მარჩხი წყლის თეორიის გამოყენება მეწყერით ან მიწისძვრით გამოწვეული ტალღების შესწავლის მიზნით საშუალო და დიდი სიღრმის წყალსაცავებში არ არის ეფექტური და მიზანშეწონილი, ვინაიდან სითხის

მოძრაობის ვერტიკალური მდგენელი არ მიიღება მხედველობაში, რაც გაანგარიშების შედეგებში მნიშვნელოვან ცდომილებას გვაძლევს მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების (მატ) თეორიის გამოყენებასთან შედარებით.

ღრმა წყალსაცავებში შეიძლება წარმოიქმნას მაქსიმალურად მაღალი ტალღები, ვინაიდან მეწყერის ჩამოწოლისას მთელი მასის ჩაძირვა ხდება წყალში (განსხვავებით მცირე სიღრმის წყალსაცავებისაგან) და სითხეს გადაეცემა მაქსიმალური ენერგია.

## 2. ტალღური მოძრაობის ძირითადი თეორიები, დებულებები და დაშვებები

განხილულია ტალღური მოძრაობის ჰიდროდინამიკური ამოცანების მათემატიკური მოდელირებისათვის გამოყენებული დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემები, რომლებიც ასახავენ ძირითად ფუნდამენტალურ კანონებს. მათ შორისაა:

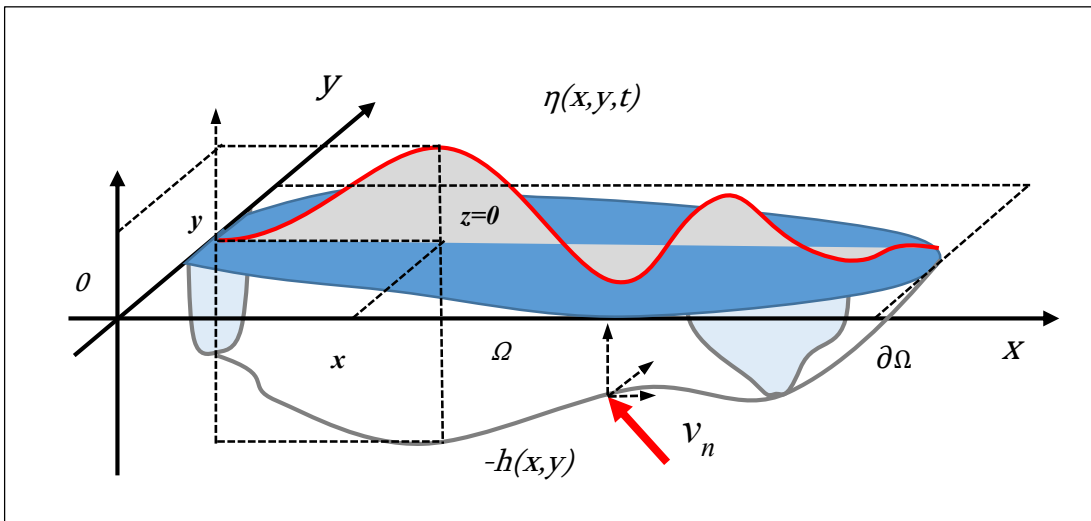
- მასის შენახვის კანონი (უწყვეტობის განტოლება);
- იმპულსის შენახვის კანონი (მოძრაობის რაოდენობის განტოლება);
- ენერგიის შენახვის კანონი (სითხოს გადატანის განტოლება).

ზოგადი სახით ჩამოყალიბებული ამოცანების ფორმულირება და ამოხსნა რთულია, ამიტომ საჭირო ხდება გარკვეული დაშვებების (შეზღუდვების) შემოღება, რომელიც ამარტივებს განტოლებებს და არ ეწინააღმდეგება განსახილველი ამოცანისათვის აუცილებელ პირობებს.

ერთ-ერთი ასეთი დაშვებაა *იდეალური სითხე*, როდესაც სითხის მოძრაობის დროს არ განიხილება და უგულვებელყოფილია თბოგამტარობა, ანუ სითხის ფიზიკური თვისებები და წნევის ცვალებადობაც არაა დამოკიდებული ტემპერატურის ცვლილებაზე. შემდგომი დაშვებაა *არაკუმშვადი სითხე*, როდესაც სითხის მოძრაობის დროს უგულვებელყოფილია ნაკადის სიბლანტე და სიმკვრივის ცვლილება, ანუ სითხე არის ერთგვაროვანი და არაკუმშვადი.

პრაქტიკული გამოყენების მიზნით საკმაოდ ფართო წრის ამოცანების გადაჭრისათვის სავსებით მისაღებია დავუშვათ, რომ მოძრაობა არის

არაგრიგალური. ასეთი მოძრაობის დახასიათება შეიძლება  $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$  სიჩქარის პოტენციალის შემოღებით. მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის თანახმად თუ წარმოქმნილი ტალღების შესაბამისი ამპლიტუდა  $\eta = \eta(x, y, z, t)$  რიცხობრივად მცირეა სხვა შესაბამის მახასიათებლებთან, მაგ. ტალღის სიგრძესთან ან საშუალო სიღრმესთან  $h_0$ , მაშინ  $\eta$ -ს წარმოებულები და მათი ნამრავლები წარმოადგენენ ასევე მცირე რიგის მცირე სიდიდეებს რომელთა უგულვებელყოფა განტოლებებში შესაძლებელია (ნახ.1).



ნახ.1. მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის გამოყენებით შემოსაზღვრულ არეზე ტალღური სამგანზომილებიანი (3D) ამოცანის შესწავლის საანგარიშო სქემა.

ზემოთ აღნიშნული დაშვებიდან გამომდინარეობს, რომ კინემატიკური და დინამიკური პირობები თავისუფალ ზედაპირზე შეგვიძლია განვიხილოთ შეუშფოთებელი თავისუფალი ზედაპირის სიბრტყეზე. ამიტომ მივიღებთ გამარტივებულ სასაზღვრო ამოცანას:

უწყვეტობის განტოლება

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi(x, y, z, t) = 0 \quad (2.1)$$

კინემატიკური სასაზღვრო პირობა

$$\frac{\partial}{\partial n} \varphi(x, y, z, t) \Big|_{z=-h} = v_n(x, y, z, t) \quad (2.2)$$

თავისუფალი ზედაპირის პირობა

$$-\frac{\partial}{\partial z} \varphi(x, y, z, t) \Big|_{z=0} = \frac{1}{g} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \varphi(x, y, z, t) \Big|_{z=0} \quad (2.3)$$

საწყისი პირობა

$$\varphi(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = \varphi_0(x, y, z) \quad (2.4)$$

$\varphi$  ფუნქციის საშუალებით შესაძლებელია განისაზღვროს:

ამპლიტუდა

$$\eta(x, y, t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} \varphi(x, y, z, t) \Big|_{z=0} \quad (2.5)$$

სიჩქარეები

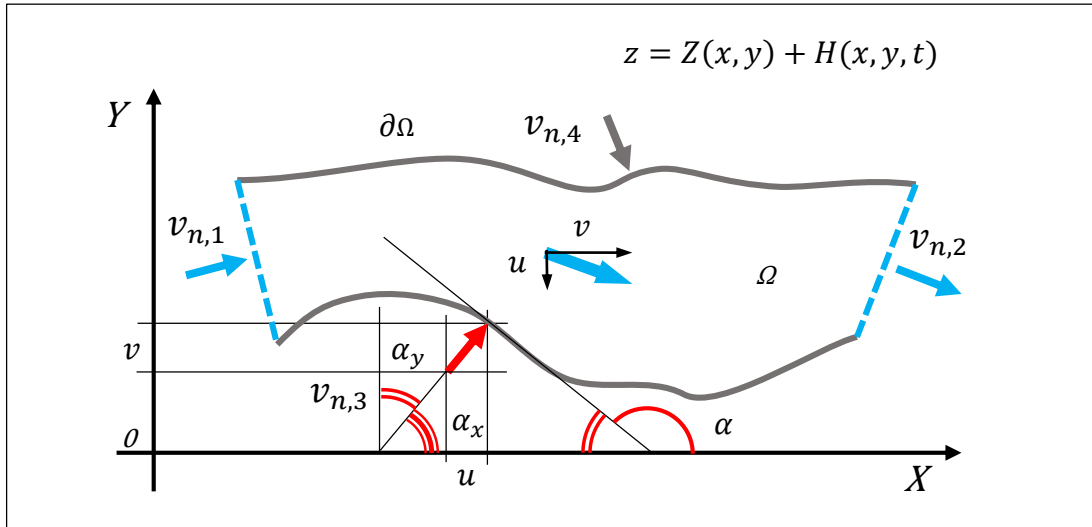
$$u = \frac{\partial}{\partial x} \varphi, \quad v = \frac{\partial}{\partial y} \varphi, \quad w = \frac{\partial}{\partial z} \varphi \quad (2.6)$$

ჰიდროდინამიკური წნევა

$$\frac{1}{\rho} p(x, y, z, t) = -gz - \frac{\partial}{\partial t} \varphi(x, y, z, t) \quad (2.7)$$

მთელი რიგი მეცნიერების აზრით მცირეამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის გამოყენება, მიუხედავად ზემოთ აღნიშნული დაშვებებისა, შესაძლებლობას იძლევა გადაწყვეტილი იქნას საინჟინრო ამოცანების ფართო არეალი.

შემდეგი მიახლოებაა დავუშვათ, რომ ვერტიკალური სიჩქარეები ჰორიზონტალურ სიჩქარეებთან მიმართებაში საკმარისად მცირეა  $w \ll u, v$  და ჰორიზონტალური სიჩქარეები პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული ვერტიკალურ კოორდინატზე  $u = u(x, y, t), v = v(x, y, t)$ . დამატებით თუ ჩავთვლით რომ  $\vec{F}$  ვექტორის ვერტიკალური მდგენელია მხოლოდ სიმძიმის ძალის ტოლქმედი  $f_w = -\rho g$ , ხოლო ჰორიზონტალური მდგენელია მხოლოდ ხახუნის ძალები, რომლებიც ასევე არაა დამოკიდებული ვერტიკალურ კოორდინატზე, მაშინ ნაკადის მოძრაობა შესაძლებელია განვიხილოთ XoY სიბრტყეზე (ნახ.2).



ნახ.2. მარჩხი წყლის თეორიის გამოყენებით ორგანზომილებიანი (2D) ბრტყელი სასაზღვრო ამოცანის შესწავლის საანგარიშო სქემა.

მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ სენ-ვენანის ორგანზომილებიანი (2D) განტოლებათა სისტემის ერთერთ ფორმას:

მარჩხი წყლის ორგანზომილებიანი (2D) განტოლებათა სისტემა:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} u + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u^2}{2} + gH \right) + v \frac{\partial}{\partial y} u + g(S_{f,x} - S_{g,x}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} v + u \frac{\partial}{\partial x} v + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v^2}{2} + gH \right) + g(S_{f,y} - S_{g,y}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} H + \frac{\partial}{\partial x} (Hu) + \frac{\partial}{\partial y} (Hv) &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

სადაც

$$\begin{aligned} S_f = \begin{pmatrix} S_{f,x} \\ S_{f,y} \end{pmatrix} &= \frac{n^2}{\sqrt[3]{R}} \cdot \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{H} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \\ S_g = \begin{pmatrix} S_{g,x} \\ S_{g,y} \end{pmatrix} &= -grad(Z) \end{aligned} \quad (2.9)$$

სასაზღვრო პირობები სველ საზღვარზე

$$\begin{aligned} v_n &= v_0(x, y, t) \\ H &= H_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

სასაზღვრო პირობები მყარ საზღვარზე

$$v_n = 0 \quad (2.11)$$

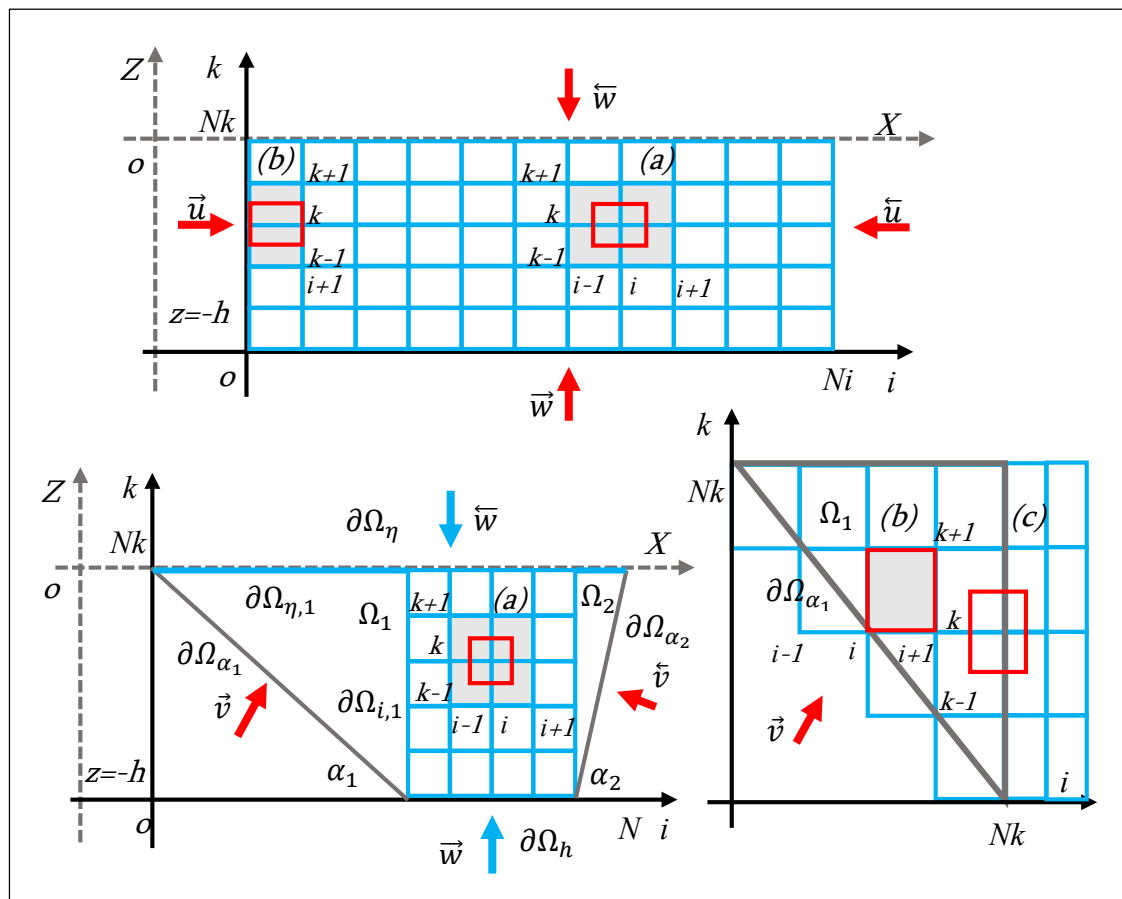
მიღებული განტოლებათა სისტემა შესაძლებელია გამოვიყენოთ სამთო განიერ წყალსაცავებსა და მდინარის დატბორილ ხეობებში



ღვარცოფული ნაკადის შემოდინების რიცხვითი მოდელირებისათვის, რაც შეეხება ვიწრო წყალსაცავებსა და მთის მდინარეებს უფრო ხშირად პრაქტიკაში გამოიყენება ერთგანზომილებიანი ფორმა.

**3. სამთო ვიწრო წყალსაცავში ღვარცოფული ნაკადის შემოდინების მათემატიკური მოდელირება მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის ორი და სამ განზომილებიანი (2D, 3D) განტოლების რიცხვითი ამონახსენის გამოყენებით**

განხილულია ნაკადის პოტენციური მოძრაობის ორგანზომილებიანი (2D) სასაზღვრო ამოცანა არაგანზომილებიანი სახით და მისი რიცხვითი აპროქსიმაცია მართკუთხედისა და ტრაპეციის ფორმის არეზე. მოცემულია საანგარიშო სქემები ორივე შემთხვევისათვის (ნახ.3).



ნახ.3. შემოსაზღვრულ მართკუთხედსა და ტრაპეციის (სამკუთხედის) ფორმის რიცხვით ბადეზე ტალღური ორგანზომილებიანი (2D) ამოცანის შესწავლის საანგარიშო სქემები

რიცხვითი ამონახსენის უპირატესობა კალაპოტის შემდგომ დაგვარად ზუსტი აპროქსიმაცია, მაგრამ საკმარისად ზუსტი

მიახლოვება ართულებს ამოცანის ამოხსნას. ჩვენ განვიხილავთ მიდგომას რომლის თანახმადაც შესაძლებელია გამოთვლითი არის დაყოფა რამოდენიმე მარტივ მართკუთხედის, სამკუთხედის ან/და ტრაპეციის ფორმის ქვეარედ. თვითოეული ფორმისათვის განისაზღვრება რიცხვითი ბადე, არეების ბმის სასაზღვრო პირობები და შემდგომ მიიღება მათი ერთობლივი რიცხვითი ამონახსენი, რაც გაცილებით ამარტივებს გამოთვლის პროცესს.

აღნიშნული პრინციპებით დამუშავებულია სამთო ვიწრო წყალსაცავში ღვარცოფული ნაკადის გრძივი და განივი შემოდინების რიცხვითი მოდელები, ორი (2D) და სამგანზომილებიანი (3D) სასრულ სხვაობითი ამონახსენის ოპერატორული ფორმით:

$$A\varphi - f = 0 \quad (3.1)$$

ამოხსნილია შერეული (ორი და სამშრიანი) იტერაციული მეთოდით:

$$\varphi^{s+1} = \varphi^s + \begin{cases} \frac{\tilde{\sigma}}{\delta} (\tilde{A}\varphi^{s,s+1} - \tilde{f}), & k = N_k \\ \frac{\sigma}{\delta} (A\varphi^{s,s+1} - f), & 0 \leq k < N_k \end{cases} ; n = 1, 2, \dots \quad (3.2)$$

სადაც  $0 < \sigma, \tilde{\sigma} < 2$  და  $\tau > 0$  არის იტერაციული პარამეტრები, სივრცითი და დროის მიხედვით და მაგალითისათვის მართკუთხა ფორმის სამგანზომილებიან არეზე ოპერატორებს აქვთ შემდეგი სახე:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= -\tilde{\vartheta}E + \tau A \\ \tilde{f} &= \tau f^n + \tilde{\vartheta}(-2\varphi^{n-1} + \varphi^{n-2}) - (1 - 2\tau)r^{n-1} - \tau r^{n-2} \\ r &= A\varphi - f, \quad \delta = 2\left(\frac{1}{\Delta_x^2} + \frac{1}{\Delta_y^2} + \frac{1}{\Delta_z^2}\right), \quad \tilde{\vartheta} = \frac{2}{\Delta_z \Delta_t^2}, \quad \tilde{\delta} = \tilde{\vartheta} + \tau\delta \\ A &= \sum_{\xi}^{x,y,z} A_{\xi}; \quad f = \sum_{\xi}^{x,y,z} f_{\xi} \\ A_{\xi}\varphi &= \begin{cases} +\frac{2}{\Delta_{\xi}}\varphi_{\xi}, & m = 0 \\ \varphi_{\xi\xi}, & m \in (0, N_m) \\ -\frac{2}{\Delta_{\xi}}\varphi_{\xi}, & m = N_m \end{cases}; \quad f_{\xi} = \begin{cases} \frac{2}{\Delta_{\xi}}\vec{v}_{\xi}, & m = 0 \\ 0, & m \in (0, N_m) \\ \frac{2}{\Delta_{\xi}}\vec{v}_{\xi}, & m = N_m, \xi \neq z \\ 0 & m = N_m, \xi = z \end{cases} \end{aligned} \quad (3.3)$$

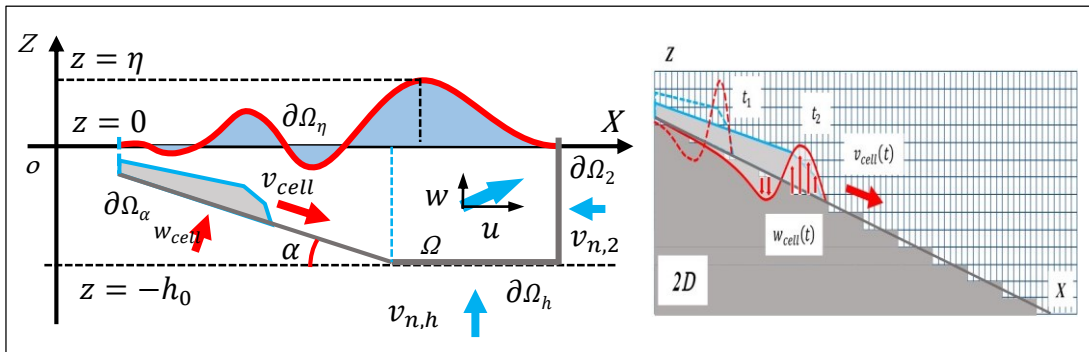
$$\varphi_\xi = \frac{1}{\Delta_\xi}(\varphi_{m+1} - \varphi_m); \quad \varphi_{\bar{\xi}} = \frac{1}{\Delta_\xi}(\varphi_m - \varphi_{m-1})$$

$$\varphi_{\bar{\xi}\bar{\xi}} = \frac{1}{\Delta_\xi^2}(\varphi_{m+1} - 2\varphi_m + \varphi_{m-1})$$

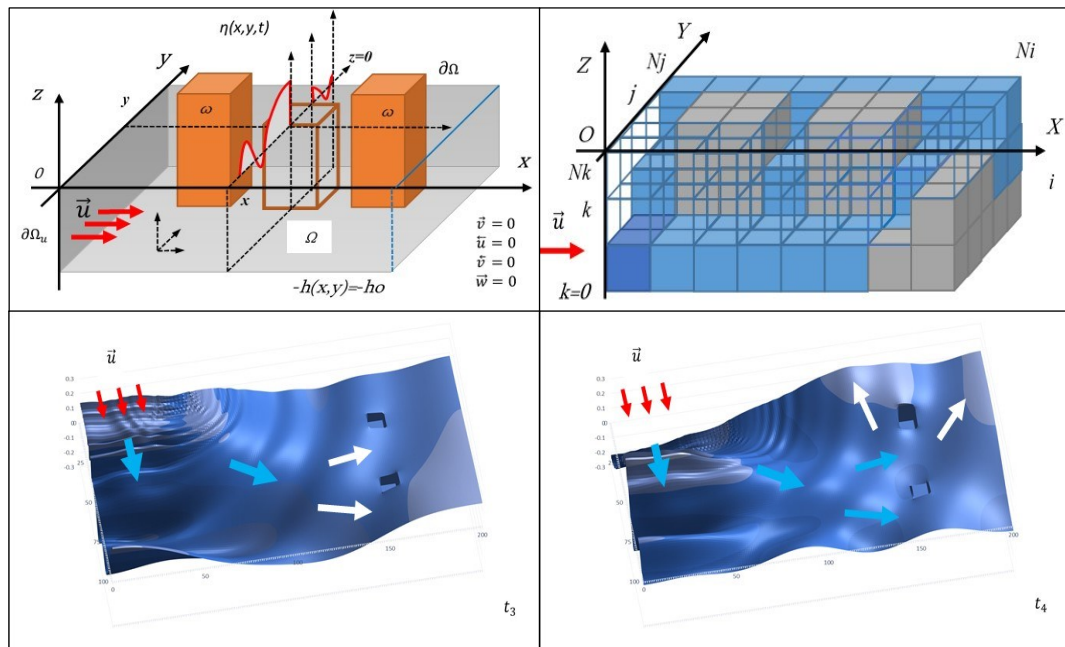
$$\xi = x, y, z; \quad \varphi_m = \varphi(\xi_m)$$

$$\xi_m = \xi_0 + m\Delta_\xi; \quad \xi_0 = \begin{cases} 0, & \xi = x, y \\ -h_0 = -N_k * \Delta_\xi, & \xi = z \end{cases}$$

ქვემოთ მოცემულია მაგალითის სახით განხილული საანგარიშო სქემები და მიღებული შედეგები (ნახ.4, ნახ.5).



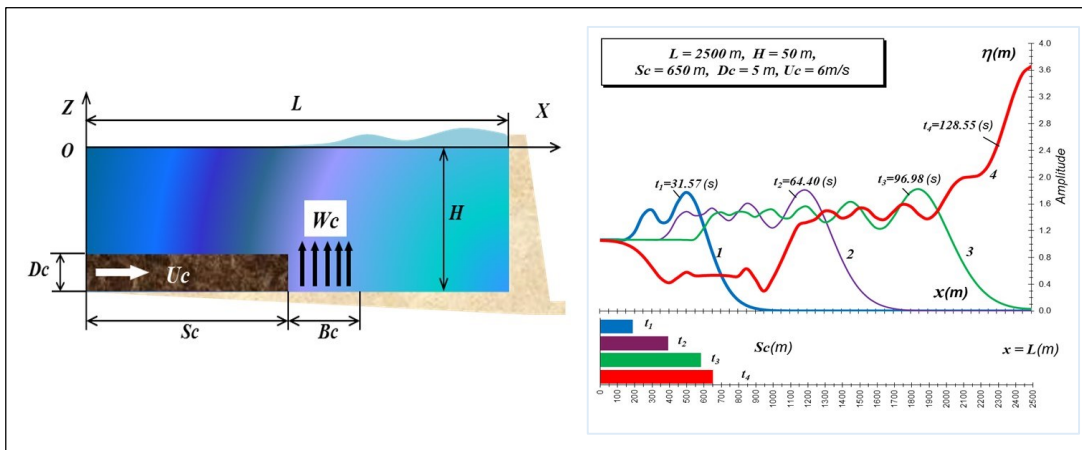
ნახ.4. დახრილი ფსკერის მქონე სამთო ვიწრო წყალსაცავში ღვარცოფული ნაკადის შემოდინების საანგარიშო სქემა და რიცხვითი ბადე სასრულ სხვაობითი მეთოდის (მარტუკუთხა აპროქსიმაცია) საფუძველზე.



ნახ.5. მაგისტრალურ ხიდთან ახლოს წყალდიდობის დროს დატბორილ ტერიტორიაზე ღვარცოფული/მეწყერული ნაკადის შედინების სამგანზომილებიანი (3D) საანგარიშო სქემა, რიცხვითი ბადე, განივი, გრძივი და ინტერფერენციული რყევებისა და ბურჯებზე ზემოქმედების ამსახველი პროფილები.

4. წყალსაცავში ღვარცოფული ნაკადის შემოდინების მათემატიკური მოდელირება, მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის ორგანოზომილებიანი (2D) განტოლების ანალიზური ამონახსნის გამოყენებით

განხილულია ვერტიკალურად ბრტყელი ორგანოზომილებიანი (2D) პოტენციური ამოცანის თ.გველესიანის მიერ მიღებული ანალიზური ამონახსნის გამოყენება წყალსაცავში ღვარცოფული ნაკადის შემოდინების გრძივი და განივი რყევების პროგნოზირებისათვის (ნახ.6, ნახ.7).



ნახ.6. სტრატეგიცირებული ღვარცოფის წყალსაცავში შემოდინებისა და მის ფსკერზე მოძრაობის შედეგად წარმოქმნილი არასტაციონარული ტალღური პროცესის საანგარიშო სქემა და მიღებული შედეგები

ამპლიტუდის გამოსათვლელი ფორმულა

$$\eta(x, t) = \eta_0(t) + \sum_{m=1}^{N_m} \eta_m(x, t)$$

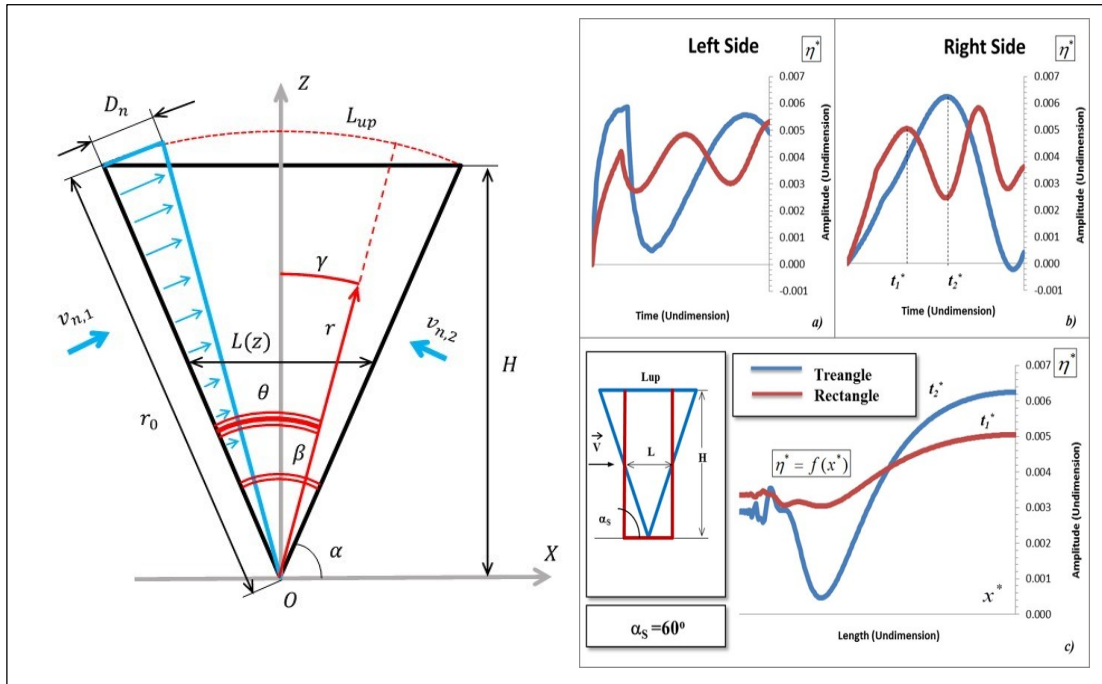
$$\eta_0(t) = \frac{w_c}{L} (B_c I_0(t)), \quad \eta_m(x, t) = \frac{w_c}{L} \left( \frac{2}{a_m} E_m(x) I_m(t) \right)$$

$$E_m(x) = \frac{\cos(a_m x)}{\text{ch}(a_m H)}, \quad w_c = \frac{D_c u_c}{B_c}$$

$$I_0(t) = \begin{cases} t & ; 0 \leq t \leq t_c \\ t_c & ; t_c < t \end{cases} \quad (4.1)$$

$$I_m(t) = \frac{(\cos b_m - 1) J_{1,m}(t) + \sin(b_m) J_{2,m}(t)}{c_m^2 - d_m^2}$$

$$\begin{aligned}
J_{1,m}(t) &= c_m \cos(d_m t) + \\
&+ \begin{cases} -c_m \cos(c_m t) & 0 \leq t \leq t_c \\ d_m \sin(c_m t_c) \sin(d_m \Delta t) - c_m \cos(c_m t_c) \cos(d_m \Delta t) & t_c < t \end{cases} \\
J_{2,m}(t) &= -d_m \sin(d_m t) + \\
&+ \begin{cases} c_m \sin(c_m t) & 0 \leq t \leq t_c \\ d_m \cos(c_m t_c) \sin(d_m \Delta t) + c_m \sin(c_m t_c) \cos(d_m \Delta t) & t_c < t \end{cases} \\
a_m &= \frac{\pi}{L} m, \quad b_m = a_m B_c, \quad c_m = a_m u_c \\
d_m &= \sqrt{g a_m \operatorname{th}(a_m H)}, \quad \Delta t = t - t_c, \quad N_m \rightarrow \infty
\end{aligned}$$



ნახ.7. კანონის ტიპის წყალსაცავის განივკვეთში არასტაციონარული ტალღების წარმოქმნის საანგარიშო სქემა ფერდობების სხვადასხვა დახრის კუთხის გათვალისწინებით

შესწავლილია მართკუთხედისა და სამკუთხედის ფორმის სქემატიზირებული ანალიზური ამონახსნების გამოყენების არეალი და შედარებულია შესაბამის რიცხვით ამონახსნთან.

სამკუთხედის ფორმის არე

$$\eta^*(\theta, t^*)|_{0 \leq t^* \leq t_0^*} = \frac{v_1^*}{2\beta} \left[ t^* + 2 \sum_{m=1}^{\infty} c_m^* \cos(a_m^* \theta) \sin(b_m^* t^*) \right] \quad (4.2)$$

$$\eta^*(\theta, t^*)|_{t^* > t_0^*} = \frac{v_1^*}{2\beta} \left[ t_0^* + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \left( c_m^* \cos(a_m^* \theta) \times \sin\left(b_m^* \frac{t_0^*}{2}\right) \cos\left(b_m^* \left(t^* - \frac{t_0^*}{2}\right)\right) \right) \right]$$

$\theta \in [0, \beta]; \beta = \pi - 2\alpha$

სადაც

$$a_m^* = \frac{\pi}{\beta} m; b_m^* = \sqrt{g \frac{a_m^*}{r_0}} \sqrt{\frac{r_0}{g}} = \sqrt{a_m^*}; c_m^* = \frac{2}{b_m^* (2 + a_m^*)}$$

$$t^* = t \sqrt{\frac{g}{r_0}}; t_0^* = t_0 \sqrt{\frac{g}{r_0}}; v_1^* = \frac{v_1}{\sqrt{g r_0}}; \eta^* = \frac{\eta}{r_0}$$

მართკუთხედის ფორმის არე

$$\eta^*(x^*, t^*)|_{0 \leq t^* \leq t_0^*} = \frac{u_1^*}{L^*} \left[ t^* + 2 \sum_{m=1}^{\infty} c_m^* \cos(a_m^* x^*) \sin(b_m^* t^*) \right]$$

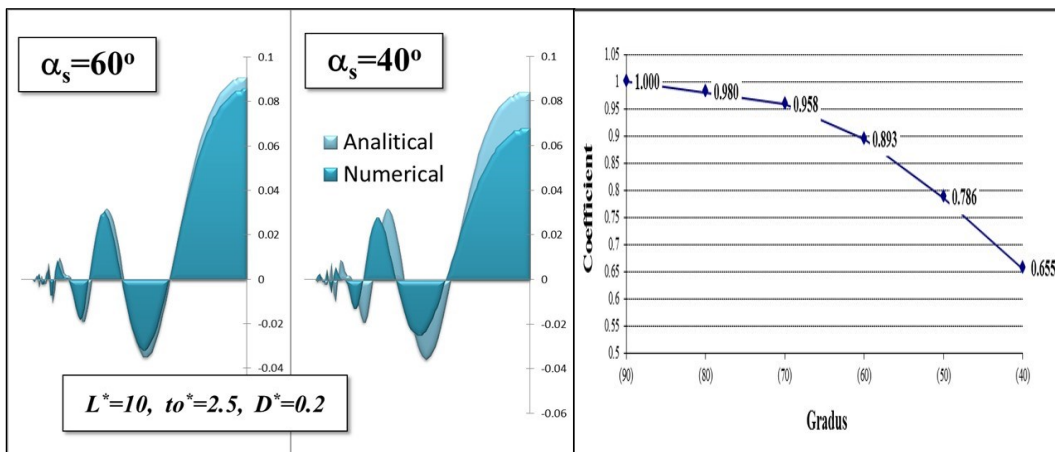
$$\eta^*(x^*, t^*)|_{t^* > t_0^*} = \frac{u_1^*}{L^*} \left[ t_0^* + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \left( c_m^* \cos(a_m^* x^*) \times \sin\left(b_m^* \frac{t_0^*}{2}\right) \cos\left(b_m^* \left(t^* - \frac{t_0^*}{2}\right)\right) \right) \right] \quad (4.3)$$

$x^* \in [0, L^*]$

სადაც

$$a_m^* = \frac{\pi}{L^*} m; b_m^* = \sqrt{a_m^* \operatorname{th}(a_m^*)}; c_m^* = \frac{\operatorname{th}(a_m^*)}{a_m^* b_m^*}$$

$$t^* = t \sqrt{\frac{g}{H}}; t_0^* = t_0 \sqrt{\frac{g}{H}}; u_1^* = \frac{u_1}{\sqrt{g H}}; \eta^* = \frac{\eta}{H}; L^* = \frac{L}{H}; x^* = \frac{x}{H}$$

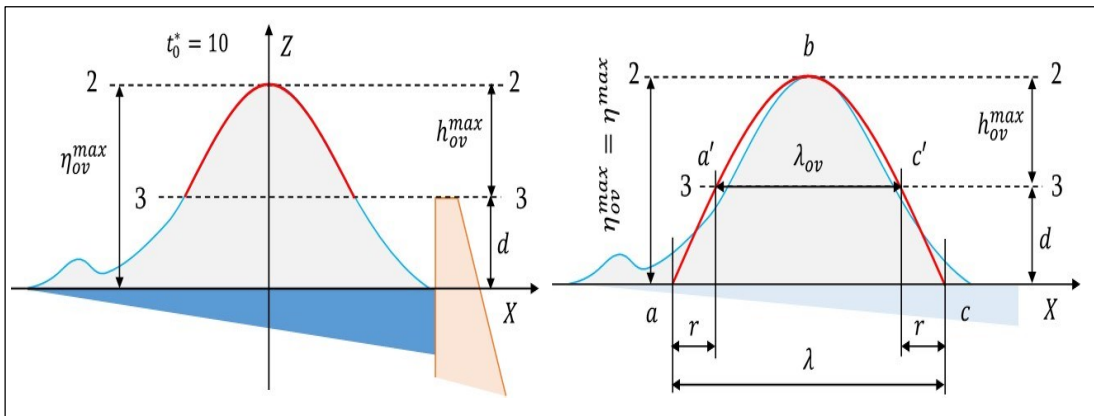


ნახ.8. მაქსიმალური ამპლიტუდის ფერდობის დახრის კუთხე დამოკიდებულების გრაფიკი: ა) მიღებული ანალიზური და რიცხვითი ამონახსნის შედარებითი პროფილები; ბ) ანალიზური და რიცხვითი ამონახსნის ფარდობითი გადახრის გრაფიკი

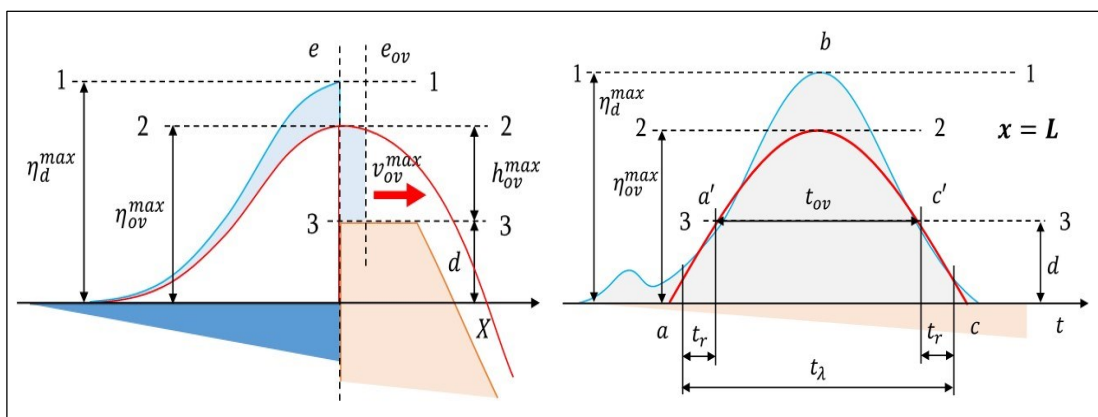
წარმოდგენილი გრაფიკები მოწმობს, რომ ანალიზური მეთოდით ტალღების გაანგარიშების სიზუსტე პრაქტიკული თვალსაზრისით სავსებით დამაკმაყოფილებელია, როდესაც ფერდობების დახრის კუთხე  $\alpha \geq \pi/3$ . ხოლო მიახლოებით შეფასების მიზნით ამ მეთოდით სარგებლობა შესაძლებელია აგრეთვე  $\pi/6 \leq \alpha < \pi/3$  (ნახ.8).

### 5. კაშხალზე მაღალი მეწყერული ტალღის გადადინების მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდი

მიღებულია პირველი მაქსიმალური ტალღის კაშხალზე გადადინების პარამეტრების გამოთვლა ტალღის კაშხალთან აგორების გარეშე და აგორების გათვალისწინებით (ნახ.9, ნახ.10).



ნახ.9. კაშხალზე გადადინების აპროქსიმაცია სინუსოიდით და გადადინების ტალღის სიგრძის განსაზღვრის საანგარიშო სქემა ტალღის კაშხალთან აგორების გარეშე.



ნახ.10. ღვარცოფით გამოწვეული ტალღის კაშხალთან მოსვლისა და გადადინების ხანგრძლივობის საანგარიშო სქემა ტალღის კაშხალთან აგორების გათვალისწინებით.



კაშხალთან მოსული მეწყერული ტალღის ამპლიტუდა სიგრძისა და დროის მიხედვით შეიძლება აპროქსიმირებული იქნას სინუსოიდალური ფუნქციის სახით და თუ ცნობილია  $\eta^{max}, \eta_d^{max}, d$  და  $\sigma_f, \mu$  მივიღებთ შემდეგს:

გადადინების მახასიათებელი პარამეტრები

$$\begin{aligned} \eta_{ov}^{max} &= \begin{cases} \eta^{max} & \text{აგორების გარეშე} \\ \delta \eta_d^{max} & \text{აგორებით} \end{cases} \\ t_{ov} &= \begin{cases} \delta \frac{\lambda}{\sqrt{gH}} & \text{აგორების გარეშე} \\ \delta t_\lambda & \text{აგორებით} \end{cases} \\ h_{ov}^{max} &= \eta_{ov}^{max} - d \\ v_{ov}^{max} &= \mu \sqrt{g} \sqrt{h_{ov}^{max}} \\ \delta \eta &= \frac{\sigma_f}{2 + \mu^2} \left( 2 - \mu^2 \frac{d}{\eta_d^{max}} \right) \\ \delta &= \left( 1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \left( \frac{d}{\eta_{ov}^{max}} \right) \right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

სადაც:

$\eta^{max}$  - ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდა კაშხალთან ახლოს ვიდრე დაიწყება არეკვლა;

$\eta_d^{max}$  - ტალღის მაქსიმალური აწევის (აგორება) დონე კაშხალთან არეკვლის შედეგად;

$d$  - მარაგი;

$\sigma_f, \mu$  - ხახუნისა და დანაკარგების კოეფიციენტები.

გარდა ამისა იმ დაშვებით, რომ ადგილი აქვს სინუსოიდალურ დამოკიდებულებას ტალღის სიჩქარესა და დროს შორის, მიღებულია გადადინების საშუალო მახასიათებლები:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{ov} &= \frac{2}{\pi} v_{ov}^{max} = \frac{2\mu\sqrt{g}}{\pi} \sqrt{h_{ov}^{max}} \\ \bar{q}_{ov} &= \bar{v}_{ov} \cdot \bar{h}_{ov} = \bar{v}_{ov} \frac{2}{\pi} h_{ov}^{max} = \frac{4\mu\sqrt{g}}{\pi^2} \sqrt{(h_{ov}^{max})^3} \\ \bar{h}_{ov} &= \frac{2}{\pi} h_{ov}^{max} \\ \bar{A}_{ov} &= \bar{h}_{ov} B \end{aligned} \quad (5.2)$$



$$\bar{Q}_{ov} = \bar{v}_{ov} \cdot \bar{A}_{ov} = \bar{q}_{ov} \cdot B = \frac{4\mu\sqrt{g}}{\pi^2} \sqrt{(h_{ov}^{max})^3} \cdot B$$

$$W_{ov} = \bar{Q}_{ov} t_{ov} = \frac{4\mu\sqrt{g}}{\pi^2} \sqrt{(h_{ov}^{max})^3} \cdot B \cdot t_{ov}$$

სადაც

$\bar{v}_{ov}$  გადადინების ტალღის საშუალო სიჩქარე;

$\bar{h}_{ov}$  გადადინების ტალღის საშუალო სიმაღლე;

$\bar{q}_{ov}$  გადადინების ხვედრითი ხარჯი;

$B$  კაშხლის ქიმის სიგრძე;

$\bar{A}_{ov}$  განივკვეთის საშუალო ფართობს;

$\bar{Q}_{ov}$  გადადინების სრული საშუალო ხარჯი;

$W_{ov}$  კაშხალზე გადადინებული მოცულობა.

რაც შეეხება ფორმულების გამოყენების სპეციფიკას, იმ შემთხვევაში, როდესაც ტალღა იმდენად დიდია, რომ პრაქტიკულად თავის ფორმის შეუცვლელად გადაედინება კაშხალზე, გამოიყენება ტალღის გადადინება აგორების გარეშე. ხოლო თუ ტალღა იმდენად მცირეა, რომ ადგილი აქვს არეკვლას, გამოიყენება აგორებული ტალღის გადადინება.

## 6. დასკვნა

ნაშრომში შესწავლილია საკითხი, რომელიც ეხება წყალსაცავებში ღვარცოფებითა და სხვადასხვა ტიპის მეწყერით გენერირებული ექსტრემალური ჰიდროდინამიკური პროცესების მათემატიკურ მოდელირებასა და იმ საშიშროების შეფასებას რომელიც საფრთხეს უქმნის წყალსატევის ნორმალურ ფუნქციონირებას და იწვევს ქვედა ბიეფში ეკოლოგიური წონასწორობის დარღვევას, ტალღის კაშხალზე გადადინების შედეგად.

ნაშრომში დამუშავებულია მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის საფუძველზე მიღებული არასტაციონარული ტალღური სასაზღვრო ამოცანების ორ (2D) და სამ (3D) განზომილებიანი მათემატიკური მოდელების რიცხვითი ფორმულირება სასრულ-სხვაობითი სქემების საშუალებით და ახალი ტიპის არაცხადი, შერეული, ორი და სამ შრიანი

იტერაციული ამონახსენი ალგებრული ოპერატორული მეთოდის გამოყენებით, როგორც სქემატიზირებული, ასევე რეალური ფორმის წყალსატევში, ღვარცოფისა და მეწყერის დროს წარმოქმნილი ექსტრემალური ტალღური პროცესების შესასწავლად.

ნაშრომში წარმოდგენილია აგრეთვე მცირე ამპლიტუდიანი ტალღების თეორიის საფუძველზე მიღებული არასტაციონარული ტალღური ვერტიკალურად ორგანზომილებიანი (2D) სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნის ანალიზური მეთოდები, მართკუთხედისა და სამკუთხედის ფორმის სქემატიზირებულ წყალსატევში ღვარცოფის სტრატეგიცირებული ნაკადის შესვლით გამოწვეული გრძივი და განივი რყევების შესწავლისათვის.

ნაშრომში მოცემულია ანალიზური ფორმულების გამოყენების არეალი და ინტენსიური ტალღების კაშხალზე გადადინების სწრაფი პროგნოზირების ფორმულები. ნაშრომში განხილული თეორიული გათვლების შედეგები აჩვენებს, რომ გეოდინამიკური პროცესების დროს, მაგალითად როდესაც მეწყერული მასა მთლიანად ჩაიძირა და შეიწონა წყალში, ინტენსიური ტალღური პროცესის წარმოქმნა შესაძლებელია ერთნაირი ალბათობით ნებისმიერი მოცულობის მქონე ჰიდროკვანძებში, მათ შორის საშუალო და მცირე მოცულობის მიწის კაშხლის მქონე საირიგაციო დანიშნულების წყალსაცავებში, რომელთა რიცხვი როგორც აღვნიშნეთ საქართველოში საკმაოდ დიდია.

ნაშრომის ახალ შედეგებს, ორ (2D) და სამ (3D) განზომილებიანი ტალღური ამოცანების რიცხვითი ამოხსნის მეთოდის, რიცხვითი და ანალიზური ამონახსენის მეშვეობით ტალღური ზემოქმედების გათვლის მეთოდის, მათი გამოყენებით შესრულებულ კომპიუტერული პროგრამებს, გააჩნიათ მნიშვნელოვანი პოტენციალი პრაქტიკაში გამოყენების მიზნით.

ნაშრომში განხილული მათემატიკური მოდელირების შედეგები საშუალებას მოგვცემს კომპიუტერული გათვლების შედეგად სწრაფად აღვწეროთ წყალსაცავში ექსტრემალური ტალღური მოძრაობის სრული

პროცესი, ტალღების წარმოქმნა, ტრანსფორმაცია–დისპერსია, კაშხლიდან არეკვლა, სუპერპოზიცია და სხვ. აგრეთვე განისაზღვრება მათი გარემოზე ზემოქმედების ხარისხი. აღნიშნულ მეთოდებს უპირატესობა გააჩნია სხვა მეთოდებთან შედარებით, ვინაიდან ითვალისწინებს მთელ რიგ ფაქტორს, რომლებიც ახასიათებენ, როგორც ჰიდროდინამიკურ, ასევე ღვარცოფულ პროცესებს. გათვლების პროცედურა შედარებით სწრაფია და ეკონომიური, ხოლო მათი შედეგები ზუსტია საანგარიშო პარამეტრების ცვლილებების ფართო დიაპაზონში.

აღსანიშნავია, რომ დამუშავებული მეთოდიკით შესაძლებელია არა მარტო ღვარცოფული და მეწყერული მოვლენების დროს წარმოქმნილი ტალღების შესწავლა, არამედ წყალსატევებსა და მდინარეებში ნაპირსამაგრი და სხვა სახის ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე ექსტრემალური სიტუაციების მახასიათებლების, სიჩქარისა და წნევის გავლენის შეფასებაც. გარდა ამისა მოცემული მეთოდიკა შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ზღვის სანაპირო ზოლის ექსტრემალური სიტუაციების გამომწვევი მოვლენების შესწავლის დროსაც.

ნაშრომში განხილული ღვარცოფით გამოწვეული გადადინების რისკების შეფასების მეთოდიკა ეკონომიკური თვალსაზრისით საკმაოდ ეფექტურია მთის სეისმოაქტიურ რაიონებში წყალსაცავებისა და კაშხლების დაგეგმვის, მშენებლობისა და ექსპლუატაციის დროს, აგრეთვე ჰიდროკვანძების მონიტორინგის, მიმდებარე გარემოზე დამანგრეველი ტალღების ზემოქმედების პროგნოზირებისა და შეფასებისათვის, მოსალოდნელი კატასტროფებით გამოწვეული ეკონომიკური ზიანისა და ადამიანთა მსხვერპლის თავიდან აცილების მიზნით.

**დისერტაციის ძირითადი შინაარსი ასახულია შემდეგ  
გამოქვეყნებულ ნაშრომებში**

1. Gvelesiani T., Danelia R., Berdzenashvili G. Mathematical model of unsteady hydrodynamic processes caused by mobile mud flow on the bottom of reservoir. Bull. of the Georg. Academ of Scien., Tbilisi, 1999. V.159, 3, p.457-459;
2. Gvelesiani T., Danelia R., Kvatashidze V., Berdzenashvili G. The Problem of Transverse Water oscillations in Canals upper pools and Downstream (river) Channels. "Energy", Tbilisi 1998. 4, p.91-95;
3. Gvelesiani T., Iremashvili Kh., Akhmedov A., Berdzenashvili G. RIVR FLOW VELOCITIES DISTRIBUTION AT THE TRANSVERSAL COAST-PROTECTING STRUCTURE ZONE. 5-th International Scientific and Technical Conference, Modern Problems of Water Management, Enviromental Protection, Architecture and Construction. 16-19 July, 2015. p45-48;
4. Gvelesiani T., Jinjikhashvili G., Berdzenashvili G., Stepania T., Aronia G. ON PREDICTION AND PREVENTION OF DEBRIS FLOW CATASTROFIC IMPACTS ON HYDRAULIC PROJECTS IN MOUNTAIN AREAS (Georgia, Israel). 5-th International Scientific and Technical Conference. Modern Problems of Water Management, Enviromental Protection, Architecture and Construction. 16-19 July, 2015. p49-54;
5. Gvelesiani T., Jinjikhasvili G., Berzenashvili G. Modeling of wave generation processes in reservoirs due to seismic effects. Transactions Seismic Resistance and Rahabilitation of buildings Universal, Tbilisi, 2014;
6. Gvelesiani T., Tsikhelashvili Z., Iremasvili Kh., Berdzenashvili G., Kodua M. On Research Aspects of a New-Type Floating Wave Damping Hydro-Technical Complex for Protection of Coastal Line and Open Ports from Storm Waves. 4-th International Scientific-Technical Conference, Modern Problems of Environmental Protection, Architecture and Construction. 27-30 September, 2014. p102-106;
7. Гвелесиани Т., Бердзенашвили Г. Параметры потока в русле на угастке его сужения. 2-nd International Scientific-Technical Conference, Modern Problems of Environmental Protection, Architecture and Construction. Tbilisi-Kobuleti (Georgia) July 24-31, 2012. (ISSN 1512-2344);
8. Гвелесиани Т., Бердзенашвили Г. Установление основных принципов гашения волн посредством демфера на основании аналитической модели. 3-th International Scientific-Technical Conference, Modern Problems of Environmental Protection, Architecture and Construction. Tbilisi, Borjomi, 2013. с.37-48;

9. გველესიანი Т., Бердзенашвили Г. Математическая модель гидродинамического процесса в водо-хранилище при продвижении по его дну селевого потока. 5-th Межд. конф. "Динамика и термика рек, вод-хран. и прибреж. зоны морей". 275 лет Российс. АН. М. 1999. с.10-12;
10. გველესიანი Т., Данелия Р., Бердзенашвили Г. Прогнозирование динамических параметров консеквентных (блоко-вых) оползней вдоль береговых склонов и по дну водоемов. Georgian Engineering News. Tbilisi. 4(8). 1998. p.61-64;
11. Иремашвили Х., Гвелესიანი Т., Бердзенашвили Г. Влияние берегозащитного сооружения на характеристики потока врусле реки. სამეცნიერო შრომათა კრებული N69 ეძღვნება წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის 85 წლის იუბილეს 2014წ, გვ.61-65;
12. გველესიანი თ., ბერძენაშვილი გ. არასტაციონარული ჰიდროდინამიკური მახასიათებლების განსაზღვრა ტრაპეციოდალური ფორმის წყალსატევებში მათი ფერდობების სხვადასხვა დახრილობისას. "ენერჯია", თბილისი, 1999. 3, გვ.78-82;
13. გველესიანი თ., ბერძენაშვილი გ. კატასტროფული ტალღის მათემატიკური მოდელირება ზონკარის კაშხლის გარღვევის შემთხვევაში. სტუ, წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი, სამეცნიერო ნაშრომთა კრებული, 2011. 66 (ISSN-1512-2344);
14. გველესიანი თ., ფალავანდიშვილი გ., მაღლაფერიძე ბ., ბერძენაშვილი გ. ალგეთისა და სიონის კაშხლების გარღვევის შედეგად ქვედა ბიეფში გამოწვეული ზემოქმედების პროგნოზირება. ენერჯია, 2008. 4(48);
15. გველესიანი თ., ყირიმლიშვილი-დავითაშვილი თ., ბერძენაშვილი გ. მათემატიკური ფორმულირების საკითხი წყალქვეშ მოძრავი მეწყერის ან სელური ნაკადის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების განსაზღვრის დროს. ენერჯია/Energy, 2008. 2(46) (ISSN 1512-0120);
16. გველესიანი თ., ციხელაშვილი ზ., ბერძენაშვილი გ., ირემაშვილი ხ. მცურავი ტალღაჩამქრობის (დემპფერის) მოქმედების მათემატიკური მოდელირების განხორციელების მეთოდის შესახებ. 5-th International Scientific and Technical Conference. Modern Problems of Water Management, Enviromental Protection, Architecture and Construction. 16-19 July, 2015. გვ.40-44;
17. დანელია რ., ბერძენაშვილი გ. წყალსაცავში სელის ზემოქმედებით წარმოქმნილი ონდულაციური პროცესის ანალიზი კაშხალთან. აგრარული მეცნიერების პრობლემები. საქართველოს სახელმწიფო აგრარული უნივერსიტეტი. თბილისი, 1999;

## **Abstract**

As is known in a number of cases a debris flow, when it is propagating on a dry channel, causes an environmental catastrophe in mountain and sub-mountain regions. The same type of catastrophic consequences happen as a result of debris flow large masses influx into the reservoir and moving in it that leads to the extreme wave generation on the surface of the reservoir. These waves, which may be called debris flow - genic (or impulse) waves are similar to tsunami waves.

In case a dam is built from natural materials (earth, rock fill or boulder dam) the water flow arising owing to the dam overtopping by extreme waves may cause complete or partial scour of the dam that leads to the destructive debris flow propagation at downstream and catastrophic consequences: victims, destruction of buildings, structures, traffic and irrigation systems, flooding of territories, etc. The same event may take place in case of the explosion of a small part of dam during the war or as a result of a terrorist act.

It should be noted that at present almost 70 hydroelectric and irrigation project are in operation in mountain and sub-mountain regions of Georgia, and many of them are earth and boulder dams. 90-100 meter high dams are among them. So the abovementioned catastrophic hydrodynamic (wave) influence risk prevention is very important or at least reduction of its intensity and it is necessary to secure hydro points environment protection.

So the ultimate goal of the project is developing the new refined technique based on mathematical modeling for the explicit description of whole processes of high (extreme) waves motion caused by a debris flow in mountain reservoirs including the reliable prediction of environmental impact and hydrodynamic loads on dams exerted by that waves, in order to prevent or eliminate potential hazards to adjacent regions, as well as to ensure adequate secure conditions for hydraulic projects operation.

Mathematic modeling results discussed in the thesis, as the result of computer calculation, enable us to quickly describe the whole process of extreme

wave movement in dams, wave formation, transformation-dispersion, reflection from dam superposition and the rest. The degree of their influence on environment is also defined. The above mentioned methods are superior to other methods because they take into consideration a number of factors that are characteristic both for hydrodynamic and debris flow processes. Calculation procedure is comparatively economic and quick and their results are exact in wide range of calculation parameters considerable changes.

Methodologically the research on the project chosen to reach the objectives will be developed involving modern technologies in solving boundary value problems on unsteady impulse wave motion by analytic and numerical methods. Accordingly, the finite integral transformation and finite difference methods will be used.

The above mentioned methods application is also perspective in other fields of hydrotechnic constructions, in particular in fields of new type seaside and river banks protection effective constructions testing.