

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი ახვლედიანი

სადაწნეო გვირაბების მუშაობა არაერთგვაროვან  
გეოლოგიურ გარემოში

დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი 2014

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
სამშენებლო ფაკულტეტის ჰიდროსაინჟინრო დეპარტამენტში

**სამეცნიერო ხელმძღვანელი** სტუ-ის ტ.მ.დ. სრული პროფესორი  
**მირიან ყალაბეგიშვილი**

**რეცენზენტები :** სტუ-ის ტ.მ.დ. სრული პროფესორი **ირაკლი გუჯაბიძე**  
სტუ-ის ტ.მ.კ. ასოც. პროფესორი **ჯუმბერ ნიჟარაძე**

დისერტაციის დაცვა შედგება 2014 წლის 4 ივლის 14 სთ-ზე

საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის  
სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე.

მისამართი: 0170, ქ. თბილისი, მ. კოსტავას №68, I სასწავლო კორპუსი,  
სამშენებლო ფაკულტეტი, აუდ. № 222

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია საქართველოს ტექნიკურ

უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში.

მისამართი: 0175, ქ. თბილისი, მ.კოსტავას №77.

ავტორეფერატი დაიგზავნა "———" ————— 2014 წ.

სადისერტაციო საბჭოს

თავმჯდომარე

მდივანი

პროფესორი **ლ.კლიმიაშვილი**

პროფესორი **დ. ტაბატაძე**

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

**პრობლემის აქტუალობა .** სამთო პირობებში ჰიდროენერგეტიკული და ჰიდრომელიორაციული დარგის განვითარება მჭიდროდაა დაკავშირებული გვირაბების მშენებლობასთან, რასაც მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს თეორიული მეთოდების დამუშავება და სრულყოფა, ასევე მშენებლობის ტექნოლოგიის თანამედროვე დონე, მათ შორის მაღალი წარმადობის გვირაბი გამყვანი მანქანის პრაქტიკაში დანერგვა. მუამად, საქართველოში ჰიდროენერგეტიკული რესურსების მხოლოდ მცირე ნაწილია ათვისებული. აღნიშნული კი ზრდის დარგის აქტუალობას და ასევე დიდ პერსპექტივებს სახავს .

კლდოვანი მასივის პირობებში სადაწნო დერივაციული გვირაბების უმეტესობა, ეკონომიკური შეფასებების გათვალისწინებით, პროექტირდება როგორც არაბზარმდეგი. ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედების შედეგად ადგილი აქვს გვირაბის მოსახვაში არსებული ნაკერებისა და ბზარების გახსნას, საიდანაც მასივში ვითარდება ფილტრაცია. გვირაბის გარემომცველი მასივის გეოლოგიური აღნაგობა (არაერთგვაროვნება, ანიზოტროპია, რღვევები, ბზარები და სხვა) შესაბამისად მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გვირაბის გარემომცველი მასივის ფილტრაციულ რეჟიმზე, რაც აისახება “**მოკეთება – მასივი**” სისტემის დაძაბულ მდგომარეობაზე.

საშუალო და მაღალდაწნევიან ჰესების პროექტირების დროს მნიშვნელოვანია ხეობის ფერდის სიახლოვეს გამავალი გვირაბის ტრასის შერჩევა. საკითხის სწორად გადაწყვეტა მოითხოვს ფუძის გეოლოგიური მონაცემების გათვალისწინებით მიღწეული იქნას:

- მისაღები ფილტრაციული რეჟიმი მასივში (რომლის დროს დეპრესიის ზედაპირი არ უნდა აღწევდეს ფერდამდე, ხოლო ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრები, მათ შორის დაწნევის გრადიენტები და სიჩქარეები უნდა იყოს დასაშვები, რათა უზრუნველყოფილი იქნას მასივის ფილტრაციული სიმტკიცე).

- გვირაბისა და ფერდის მდგრადობა, რომლის დროს ხეობის ზედაპირიდან მოკეთებამდე მანძილი იქნება მინიმალური.

გასათვალისწინებელია, რომ ფუძეების უმეტესობა ხასიათდება ანიზოტროპიით, შრეობრიობითა და ბზარიანობით, რომელთა განლაგება ქმნის ძვრის პოტენციურად საშიშ ზედაპირს. მასივში განვითარებული ფილტრაციული ნაკადი ერთის მხრივ წარმოშობს ფილტრაციულ მოცულობით (შემატივტივებელ და ჰიდროდინამიურ) ძალებს, მეორეს მხრივ - დაცურების ზედაპირებზე (ბზართა შემავესებლებზე) ამცირებს ძვრის პარამეტრებს. აღნიშნული ფაქტორების გავლენა მიმართულია მდგრადობის მარაგების შემცირებისაკენ.

ფილტრაციული დანაკარგები ნორმებით არ უნდა აღემატებოდეს გვირაბის საანგარიშო ხარჯის 1%, რაც უმეტეს შემთხვევაში დარღვეულია. ფილტრაციის განვითარებისას შესაძლებელია თავი იჩინოს დაწნევის გრადიენტების, სიჩქარეებისა და ხარჯების ზრდამ, რაც ძირითადად აისახება:

- მასივში სუფოზიური მოვლენების განვითარებაზე;
- ქანების დეფორმაციის მოდულის, სიმტკიცის, ძვრის მახასიათებლებისა და შესაბამისად - გვირაბის მოსახვის ზიდვის უნარიანობის შემცირებაზე;
- ჰესის ენერგეტიკულ პარამეტრების გაუარესებაზე.

აღსანიშნავია, რომ ამჟამად ექსპლუატაციაში მყოფი ობიექტების უმეტესობა ხასიათდება გაზრდილი ბზარიანობით და თანამდევი ფილტრაციული დანაკარგებით, რაც შესაბამისად მოითხოვს რეაბილიტაციას.

ზემოთხსენებული პრობლემები დგას, როგორც პროექტირების ასე ექსპლუატაციაში მყოფი გვირაბების წინაშე. მათ გადაწყვეტაში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება გვირაბის გარემომცველი ცემენტაციური ზონას, რომლის პარამეტრების (სიღრმე, ხვედრითი წყალშთანმტემელობის კოეფიციენტი) სწორად განსაზღვრის შემთხვევაში შესაძლებელია მიღწეული იქნას:

- ფილტრაციული ნაკადის გავრცელების დასაშვები არე მასივში;
- ენერგო-ეკონომიურად მისაღები ფილტრაციული დანაკარგები;
- გვირაბის მოსახვის ზიდვის უნარიანობა საანგარიშო მნიშვნელობით;
- მდგრადი ფერდი.

წარმოდგენილი ადასტურებს გვირაბმშენებლობის წინაშე მდგარი პრობლემების აქტუალობას, რაც მოითხოვს გაანგარიშების სათანადო მეთოდის დამუშავებასა და შესაბამისი საინჟინრო კვლევების ჩატარებას.

კვლევის თანამედროვე დონეზე დასმული საკითხების გადაწყვეტა კლასიკური მეთოდების გამოყენებით აწელება ცნობილ მათემატიკურ სიძნელეებს. ყოველივე დღის წესრიგში აყენებს თანამედროვე რიცხვითი (სასრული და სასაზღვრო) მეთოდების გამოყენების აუცილებლობას. ვარიანტული კვლევების რიცხვითი შედეგების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია მიღწეული იქნას გვირაბის ღერძის მისაღები მდებარეობა, აგრეთვე მოკეთების გარემომცველი ცემენტაციურ ზონის პარამეტრები, რომლის დროს დაკმაყოფილებული იქნება უსაფრთხოების პირობები.

**სამუშაოს მიზანია - შეფასებული იქნას:**

- საპროექტო და საექსპლუატაციო პერიოდებში გვირაბის მოკეთებისა და ხეობის ფერდის ერთობლივი მუშაობა მასივში განვითარებული ფილტრაციული რეჟიმის გათვალისწინებით. ამასთან დაკავშირებით ფერდამდე დასაშვები მინიმალური მანძილი, სიმტკიცისა და მდგრადობის პირობების მიხედვით.
- ცემენტაციური ზონის გაგლენა:
  - გვირაბის გარემომცველ მასივში ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრებზე (მათ შორის, დეპრესიის ზედაპირის გავრცელების არეზე), აგრეთვე, მოკეთებაში ბზარების გახსნის სიდიდეზე;
  - ხეობის ფერდის მდგრადობაზე.

აღნიშნული საკითხები განიხილება გვირაბის გარემომცველი მასივის გეოლოგიური სტრუქტურის, მათ შორის არაერთგვაროვნების, ანიზოტროპულობის და სხვადასხვა სახის რღვევების გათვალისწინებით.

- მიზნის მისაღწევად საჭიროა დამუშავებული იქნას კვლევის სათანადო მეთოდთა და საანგარიშო პროგრამა **სასაზღვრო და სასრული ელემენტების** მეთოდების გამოყენებით, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ჩატარებული იქნას **“მოკეთება - გარემომცველი მასივი”** ერთიანი სისტემის გაანგარიშებები ფუძის გეოლოგიური აღნაგობის, აგრეთვე ცემენტაციური ზონის გავლენით მასივში განვითარებული ფილტრაციული რეჟიმის თანმხლები მოცულობითი ძალების გათვალისწინებით.
- აღნიშნულის საფუძველზე ჩატარდეს **ენგურჰესის** დერივაციული გვირაბის გამოკვლევა ზემოთხსენებული ფაქტორების გათვალისწინებით.

**კვლევის მეთოდთა** \_ძირითად აპარატად გამოყენებულია სტატიკისა და ფილტრაციის შეკავშირებული სქემა. სტატიკის ამოცანებში გამოიყენება სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდები ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში.

**მეცნიერული სიახლე.** ორ განზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში დამუშავებული იქნა კვლევის მეთოდთა სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდის ერთობლივი გამოყენებით, რომელიც საშუალებას იძლევა შეფასებული იქნას:

- გვირაბის მოკეთებისა და გარემომცველი მასივის ერთობლივი მუშაობა არაბზარმდეგი მოკეთების მქონე სადაწნო გვირაბების არსებობისას, გეოლოგიური და ფილტრაციული მოცულობითი ძალების გათვალისწინებით;
- დასაბუთებული იქნა ხეობის ფერდის სიახლოეს გამავალი გვირაბის ტრასის - დასაშვები მინიმალური მანძილი;

- ცემენტაციური ზონის გავლენა გვირაბის გარემომცველ მასივში ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრებზე მათ შორის, დეპრესიის ზედაპირის გავრცელების დასაშვებ არეზე, ბზარების გახსნის სიდიდეზე და რაოდენობაზე, ხეობის ფერდის მდგრადობაზე;
- ენერგო-ეკონომიურად მისაღები ფილტრაციული დანაკარგები.

### **ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება.**

კვლევის მეთოდოლოგია, და გაანგარიშების შედეგები შესაძლებელია გამოყენებული იქნას არაბზარმედები მოკეთების მქონე სადაწნო (ასევე უდაწნო) გვირაბების პროექტირებისას და რეაბილიტაციის დროს:

- გვირაბის ტრასის დასაბუთებისათვის, როდესაც გვირაბის ღერძი გადის ხეობის ფერდის სიახლოვეს;
- გვირაბის მოკეთების გარემომცველი ცემენტაციურ ფარადის პარამეტრების (სიღრმე, ხვედრითი წყალშთანმტკმელობის კოეფიციენტი) სწორად განსაზღვრისათვის, რომლის დროს მიღწეული იქნება:
  - ფილტრაციული ნაკადის გავრცელების დასაშვები არე მასივში;
  - გვირაბი - მოსახვისა და ხეობის ფერდის მდგრადობა გეოლოგიური აღნაგობის (მათ შორის შრეობრიობა და ბზარიანობა);
  - ენერგო-ეკონომიურად მისაღები ფილტრაციული დანაკარგები.

გაანგარიშების შედეგები გათვალისწინებული იქნა ენგურჰესის დერივაციული გვირაბიდან განვითარებული ფილტრაციული დანაკარგების შეფასებისათვის.

### **მეცნიერული დებულებების, დასკვნებისა და რეკომენდაციების სარწმუნოების დასაბუთება.**

სადისერტაციო ნაშრომში მოყვანილი ყველა შედეგის დამაჯერებლობა განსაზღვრულია სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდის თეორიით, წარმოდგენილი დრეკადობისა და ფილტრაციის თეორიების ამონახსნებით ორგანზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში.

### **სამუშაოს რეალიზაცია:**

ჩატარებული კვლევები მოხსენებული იქნა სტუ-ს ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა და ჰიდროენერგეტიკული მშენებლობის მენეჯმენტის კათედრაზე.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სტუდენტთა 81-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე. სამშენებლო ფაკულტეტი, სექცია ჰიდროინჟინერია. 10.06.2013წ. (მეორე ადგილი).

**პუბლიკაციები:** ორი სტატია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალში „მშენებელი“, ერთი სტატია სამეცნიერო ტექნიკურ ჟურნალში „ინჟინერია“

### **სამუშაოს სტრუქტურა და მოცულობა.**

სადისერტაციო ნაშრომში შედგება შესავალის, ხუთი თავის, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. სამუშაოს საერთო მოცულობა შეადგენს 108 ნაბეჭდ გვერდს, მათ შორის 36 ნახაზს. გამოყენებული ლიტერატურული წყაროების რაოდენობაა 83.

**პირველი თავი.** ეძღვნება სადაწნეო ჰიდროტექნიკური გვირაბებისადმი არსებული კვლევების მიმოხილვას და კრიტიკული ანალიზს.

გვირაბის გარშემო ძაბვების გაანგარიშება დაკავშირებულია კლდოვან მასივში გრავიტაციული ველით გამოწვეული საწყისი ძაბვების არსებობასთან. არსებული გაანგარიშებები, რომლებიც ემყარება კლასიკურ ამონახსნებს განიხილავს ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებით გვირაბის გარემომცველ მასივში განვითარებული ძაბვების ანალიზს. აღნიშნული ემყარება სქელკედლიანი მილის დაძაბული მდგომარეობის თეორიას, რომელიც პირველად გამოყენებული იყო გვირაბებისათვის მოსახვის არ არსებობისას, ხოლო შემდეგ მოსახვის არსებობის გათვალისწინებით. წარმოდგენილია დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის მეთოდთა (საველე გამოცდების ავსტრიული მეთოდი), ასევე ამონახსნები მიღებული

წრიული კვეთის მქონე სადაწნეო გვირაბებისათვის, თანაბრად განაწილებული შიგა ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებისას.

გვირაბის თეორიულ კვლევებში მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანა მრავალმა მკვლევარმა, მათ შორის აღსანიშნავია: ბ.გ. გალიორკინის, გ.ნ. სავინის, გ.გ. კოლოსოვის, ნ.ი. მუსხელიშვილის, ს.გ. ლეხნიცკის, ბ.პ. ბოდროვის, ლ.ნ. გორელიკის, გ. კირშის, გ.ნ. სავინის ნ.ნ. ფოტიევას, მ.ნეილორის, რ.ჰილის ს. ჯეგერის, ვ.მ. მოსტკოვის, ნ.ს. ბულიჩევის, გ.გ. ზურაბოვის, ნ.ა. კასიროვას, ნ.ს. როზანოვის, ვ.ნ. სუდაკოვის შრომები. ფილტრაციულ კვლევებში მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანეს: ი.ბ. სოკოლოვის, ვ.ნ. ქილენკოვის, დ.დ. საპეგინის, გ.მ. ზადვორნის, რ.რ. ჩუგაევის, ა.ა. ხრაპკოვის, ვ.ა. საპეგინის ე.ს. რომის, გ.ს. გეინაცის, ც.ფ. კნუტსონის, ბ.ფ. ბოხოვის, კ.ა. მაღცოვისა და სხვათა შრომებმა.

გვირაბის გარშემო ძაბვების გაანგარიშება დაკავშირებულია კვლევან მასივში საწყისი ძაბვების არსებობასთან. ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებით გვირაბის გარშემო ძაბვების ანალიზი ემყარება სქელკედლიანი მილის დაძაბული მდგომარეობის თეორიას, რომელიც პირველად გამოყენებული იყო გვირაბებისათვის მოსახვის არ არსებობისას, ხოლო შემდეგ მოსახვის არსებობის გათვალისწინებით. წრიული კვეთის გვირაბის შიგნიდან თანაბრად განაწილებული ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებით დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის მეთოდის (საველე გამოცდების ავსტრიული მეთოდი) უკავშირდება ამონახსნებს მიღებულთ სადაწნეო გვირაბებისათვის. ასეთი კვლევების შედეგები შესაძლებელია ასევე გამოყენებულნი იქნას სადაწნეო გვირაბების უსაფრთხოების თვალსაზრისით მინიმალური ჩაღრმავების განსაზღვრისათვის.

სადაწნეო გვირაბში ძაბვების გაანგარიშება, მტკიცე არაბზარმედვებ ქანებში, ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებისას, მიღებული იქნა ბ.გ. გალიორკინის, გ.ნ. სავინის, გ.გ. კოლოსოვის, ნ.ი. მუსხელიშვილის, ს.გ. ლეხნიცკისა და სხვა მეცნიერების მიერ. ბ.გ. გალიორკინის ფორმულები

საშუალებას იძლევა მაგარ კლდოვან ქანებში მოუპირკეთებელი გვირაბისათვის ჩატარებული იქნას გაანგარიშებები.

დრეკადობის თეორიის ზუსტი ამონახსნები არ იძლევა საშუალებას მიღებული იქნას საანგარიშო ფორმულები შემთხვევისათვის, როცა მოსახვის ნაწილზე გარედან (მაგ. სამთო წნევის სახით) მოქმედებს განაწილებული დატვირთვა. ამ შემთხვევაში შესაზღებელია გამოყენებული იქნას ბ.პ. ბოდროვის და ლ.ნ. გორელიკის ამონახსნები (ინსტიტუტ “მეტროგიპროტრანსის“ 1936 წ.) ეს ამონახსნები იყენებენ დრეკად გარემოში რგოლის პოტენციალური ენერგიის მინიმუმის პრინციპს. მიჩნეულია, რომ მოსახვის მასივის მხარეს დეფორმირებისას აღძრული რეაქცია დეფორმაციის სიდიდის პროპორციულია (ვინკლერის ჰიპოთეზა). სადაც კუთხის შერჩევა მოხდება იტერაციულიული გაანგარიშებებით, უკუწნევის ეპიურის ნულოვანი მნიშვნელობის ძებნისას. თუ განვსაზღვრავთ რგოლის პოტენციალურ ენერგიას, როგორც გარე ძალების, რეფორმაციის შიგა ძალების და დრეკადი რეაქციის მიერ შესრულებულ მუშაობათა ჯამს. მაშინ უცნობი კოეფიციენტები მოიძებნება პოტენციური ენერგიის მინიმუმის პირობიდან. აღნიშნული დაიყვანება განტოლებათა სისტემის ამოხსნაზე. საძიებელი კოეფიციენტების ცნობილი მნიშვნელობების მიხედვით განისაზღვრება მომენტები განივი და გრძივი ძალები, ნებისმიერ კვეთის კუთხის მიხედვით.

დრეკადობის თეორიის ამოცანის ამოხსნა საშუალებას იძლევა გაანგარიშებული იქნას ერთგვაროვან დრეკად მასივში წრიული ხერხელის გარშემო ძაბვები.

მუდმივი კვეთის წრიული რგოლით გამაგრებული ხერხელის შემთხვევაში სურათი იცვლება. გვირაბის დაშორებით მასივზე  $P$  და  $\lambda P$  წნევების (მაგ. სეისმური დატვირთვების) ზემოქმედებისას შესაძლებელია გამოყენებული იქნას გ.ნ. სავინის ამონახსნები. ძაბვები მასივში განისაზღვრება გ. კირშის ფორმულებით:

ანალოგიური ფორმით შესაძლებელია მიღებული იქნას საანგარიშო ფორმულები გვირაბის გარედან და შიგნიდან წყლის წნევების, მოსახვის საკუთარი წონის და ა.შ. გათვალისწინებით.

პრაქტიკაში გავრცელებული წრიული კვეთის მოსახვის გაანგარიშების მეთოდთა ემყარება მრავალშრიანი რგოლის სქემას. ასეთი საანგარიშო სქემა ასახავს, ნაწილობრივ წრიული კვეთის სადაწნო გვირაბების მუშაობას გარედან და შიგნიდან წყლის ჰიდროსტატიკური წნევების მოქმედებისას, მოსახვასა და გრუნტის მასივში ბზარების გაჩენის, ბუნებრივი დაბაბული მდგომარეობისა და სეისმური ზემოქმედების გათვალისწინებით.

ამოცანის ზუსტი ამონახსენი მიიღება დრეკადობის თეორიის წონასწორობის განტოლებებში რადიალური და კუთხური ცვლადების გაყოფით და ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებების ზუსტი ამონახსენით. გაანგარიშების შედეგს წარმოადგენს გადაადგილებების ვექტორი, ძაბვების ტენზორი პოლარულ კოორდინატებში და მთავარი ნორმალური და მხები ძაბვები. აღნიშნულ ალგორითმის მიხედვით დამუშავებული იქნა საანგარიშო პროგრამა.

გაუმაგრებელი და გამაგრებული დრეკადი რგოლის გარშემომცველ მასივში ძაბვების განაწილების ამოცანა, როგორც წესი იხსნება საერთო მეთოდით, რომლებიც დაიყვანება კომპლექსური ცვლადის ანალიტიკური ფუნქციების სასაზღვრო ამოცანებზე. კომპლექსური პოტენციალების მოძებნა, შემდგომ ერთეული წრის გარე ან შიგა კონტურის კომფორმული გარდასახვით განსახილველ არეებზე და კოშის ტიპის ინტეგრალების ამონახსნები მიღებული იქნა გ. ვ. კოლოსოვ - ნ. ი. მუსხელიშვილის მიერ.

არაწრიული გვირაბების მოსახვისათვის, რომლებიც ამაგრებენ წრფივად დეფორმირებად, ერთგვაროვან და იზოტროპულ მასივს, საკონტაქტო ზედაპირზე დეფორმაციათა თავსებადობის პირობის საფუძველზე დაყრდნობით ნ. ნ. ფოტიევას მიერ დამუშავებული იქნა გაანგარიშების

მეთოდთა ( რომელიც ემყარება წინა მიმართულებას). კომფორტული გარდასახვის ფუნქციების კოეფიციენტები, რომლებიც ახასიათებენ მოსახვის კვეთის ფორმას განისაზღვრება წინასწარ გრაფიკული მეთოდი ან გამოითვლება პროგრამულად.

ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში სადაწნო დერივაციული გვირაბების პროექტირებისას მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენს მინიმალური ჩაღრმავების განსაზღვრა. წარმოდგენილი საკითხი მოიცავს აგრეთვე გამთანაბრებელი რეზერვუარების არსებობას და ჰიდროდინამიკური წნევების გაგლენას გვირაბში.

ფერდის სიახლოეს არსებული სადაწნო გვირაბის გაანგარიშება ჰორიზონტისადმი  $\alpha$  კუთხით დახრილი ფერდის არსებობისას გაანგარიშება წარმოებს ზემოთმოყვანილი გვირაბის ანალოგიურად. წერტილში უსაფრთხო ძაბვების არსებობისათვის საჭიროა სრულდებოდეს სიმტკიცის I პირობა.

**მეორე თავში** მოცემულია ფილტრაციის ამოცანების ამოხსნის ძირითადი მეთოდთა და ალგორითმი სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით.

მოცემულია - სიმტკიცის ამოცანების ამოხსნის ძირითადი მეთოდთა და ალგორითმი, რომელიც ემყარება სასაზღვრო ელემენტების (ფიქტიურ დატვირთვათა) მეთოდს, აგრეთვე ფილტრაციის ამოცანის ამოხსნა სასრული ელემენტების მეთოდ.

ფილტრაცია კლდოვან მასივში განიხილება დარსის კანონის ფარგლებში და ორ განზომილებიანი მასივისათვის სასრული ელემენტების მეთოდების გამოყენებით წარმოდგინდება შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kx \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Ky \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 . \quad (2.1)$$

აღნიშნული განტოლების ამოხსნა ექვივალენტურია მოცემული ფუნქციონალის მინიმიზაციისა:

$$\Phi = \int_v \frac{1}{2} [Kx \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + Ky \frac{\partial^2 H}{\partial y^2}] dx dy, \quad (2.2)$$

სადაც:  $Kx, Ky$  - ფილტრაციის კოეფიციენტებია ღერძების გასწვრივ;  
**H** - დაწნევის ფუნქციაა; **V** – ფილტრაციული ნაკადის გავრცელების არეა. ფუნქციონალის მინიმიზაციის დროს იძებნება უცნობი **Hi** ფუნქცია, რომელიც აკმაყოფილებს სასაზღვრო პირობებს.

უდაწნეო ფილტრაციის ამოცანის ამოსახსნელად კლდოვან მასივში გამოიყენება ლოკალური ვარიაციის მეთოდი, რომლის მიხედვით გამოსაკვლევი არეებისათვის საძიებელ ფუნქციას ენიჭება საწყისი მიახლოებითი მნიშვნელობა. **Hi** ფუნქციის ვარიაციის წარმოებით ყველა “ლოკალურ უბნებში” განსაზღვრული ბიჯის მიხედვით გამოითვლება ფუნქციონალის მნიშვნელობა, ისე, რომ კმაყოფილდებოდეს ამოცანის სასაზღვრო პირობები. როდესაც ფუნქციონალი აღარ შემცირდება, ანუ ვარიაციის მოცემული ბიჯის მიხედვით სისტემა აღარ მოახდენს რეაგირებას არც ერთ “ლოკალურ” არეზე, ვარიაციის ბიჯი მცირდება. იტერაციული გაანგარიშება მიმდინარეობს ფუნქციონალის ანალიზის ფონზე და გრძელდება წინასწარ მოთხოვნილი სიზუსტის დაკმაყოფილებამდე.

ამოცანის ამოხსნის შედეგად გამოსაკვლევ არეში განისაზღვრება ფილტრაციული ნაკადის ძირითადი პარამეტრები: დაწნევები, დაწნევის გრადიენტები, სიჩქარეები, ხარჯები და ფილტრაციული მოცულობითი ძალები. მათი გაანგარიშება მნიშვნელოვანია ერთის მხრივ სუფოზიური პროცესებისა და წყლის კარგვების, მეორეს მხრივ მასივსა და ნაგებობაზე ძალების განსაზღვრისათვის.

ფილტრაციული ხარჯის განსაზღვრა იზოტროპული და ერთგვაროვანი არეებისათვის ემყარება დიუპუი-ს კლასიკური ამონახსნებს. არაბზარმედვეი მოკეთების არსებობისას განიხილება მხოლოდ მოკეთებაში არსებული ბზარებიდან განვითარებული ფილტრაციული ხარჯი. ამ დროს გაითვალისწინება ბზარის ჰიდრავლიკური

წინააღმდეგობა, რომელიც დამოკიდებულია ბზარში ფილტრირებული წყლის ჰიდრაულიკურ რეჟიმზე, რაც ძირითადად ლამინარულია. უკანასკნელ შემთხვევაში ფილტრაციული ხარჯი მიიღება დარსის კანონის საფუძველზე  $q = n_T k_T \frac{H_T}{h_c}$ , სადაც  $n_T$  - გვირაბის მოსახვის პერიმეტრზე განვითარებული ბზარების რაოდენობა;  $k_T$  - ბზარების წყალჟონვადობის კოეფიციენტი, რომელიც გვირაბის 1 რძ. მ-ზე გასული წყლის ხარჯია დაწნევის გრადიენტის  $\frac{H_T}{h_c} = 1$  მპ/(წმ.მ) მნიშვნელობის დროს.

ბეტონში არსებული ბზარისათვის წყალჟონვადობის კოეფიციენტისათვის მიღებულია მისი საშუალო მნიშვნელობა  $k_T = 7 \cdot 10^4 \cdot a_0^3$ , სადაც  $a_0^3$  - ბზარის გახსნის სიგანეა ბეტონში.

გვირაბის მოსახვაში ბზარებისა და ნაკერების სასრულ-ელემენტული მოდელი წარმოდგენილია სპეციალური “ბზარის ელემენტი-ს” გამოყენებით, რომელსაც ააქვს ანიზოტროპიის თვისება. ელემენტი გვირაბის ტანგენციური მიმართულებით არ მუშაობს, ხოლო რადიალური მიმართულებით მისი ფილტრაციის კოეფიციენტი განისაზღვრება ხარჯის უწყვეტობის პირობის მიხედვით:

$$K_{\phi,e} = \frac{K_{\phi,c} a_c}{a_e} \quad (2.3)$$

სადაც:  $K_{\phi,e}$  და  $K_{\phi,c}$  - ელემენტისა და ბზარის (ნაკერის) ფილტრაციის კოეფიციენტებია შესაბამისად;  $a_e$ ,  $a_c$  - ელემენტისა და ნაკერის სიგანეებია შესაბამისად;

**მესამე თავში** - მოცემულია სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის ძირითადი ალგორითმი. ხსენებული მეთოდი ამყარებს დამოკიდებულებებს განსახილველი არის შიგნით და არის კონტურზე

საძიებელ ფუნქციებს შორის. ამდენად, დიფერენციალური განტოლებები, რომელთა ამონახსნები წარმოადგენენ უცნობ ფუნქციებს არის შიგნით, იცვლებიან ექვივალენტური ინტეგრალური განტოლებებით, რომლებშიც უცნობი ფუნქციები ასახავენ მხოლოდ გარე კონტურს. ზოგადად, ასეთი განტოლებები წარმოადგენენ ინტეგრალურ განტოლებებს. ამდენად, სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი, რომელიც ზემოხსენებული განტოლებების ამონახსნების რიცხვით რეალიზაციას წარმოადგენენ, აგრეთვე იწოდებიან სასაზღვრო ინტეგრალური განტოლებების მეთოდად.

სასაზღვრო ამოცანათა ამოხსნაში, სინგულარიულ ფუნქციათა სხვადასხვა კლასისათვის, დიდი როლი შეიტანა მრავალმა მეკლევარმა, მათ შორის აღსანიშნავია: ე. ბეტი, ვ. ვოლტერი, ს. ლაპუნოვი, კ. ნეიმანი, ა. კუანკარე, ს. სომილიანი, ე. ფრედგოლმი, ს. მიხლიანი და სხვა. მ მხრივ აღსანიშნავია ქართველ მათემატიკოსთა დიდი ღვაწლი, მათ შორის: ნ. მუსხელიშვილის, ი. ვეკუას, ვ. კუპრაძის, ა. გორგიძის და ა. რუხაძის. განსაკუთრებით დიდ აღიარებას იმსახურებენ ნ. მუსხელიშვილის შრომები რომელიც გამოქვეყნდა ჩვენი საუკუნის 30-40-იან წლებში და ეძღვნებოდა სასაზღვრო ინტეგრალური განტოლებების კვლევას დრეკადობის თეორიის ორგანზმილებიანი ამოცანის ფარგლებში. ხსენებული განტოლებების რიცხვითი ამონახსნები მიღებულ იქნა მისი მოწაფეების – ა. გორგიძის და ა. რუხაძის მიერ. აღნიშნულ ამონახსნებში წარმოდგენილია სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის ყველა კომპონენტი.

სასაზღვრო ინტეგრალური რიცხვითი ამონახსენი, რომელიც ეხებოდა სიბრტყეში ორი ჭრილის არსებობას, მიღებული იქნა ც. ლევინისა და ს.ს. მიხლინის მიერ. აღნიშნული არე კომფორმულად იქნა ასახული წრიულ რგოლზე, რომლისთვისაც გამოიყენებოდა გრინის ფუნქციები.

ელექტრონული მანქანების გაჩენამ შეამსუბუქა ხსენებული განტოლებათა ამოხსნის სირთულე. აღნიშნულმა კვლევებმა ინტენსიური განვითარება ჰპოვა წინა საუკუნის 60-იან წლებში. ამ პერიოდისათვის გაჩნდნენ

საზღვარგარეთული მეცნიერები: ფ. რიცოს, მ. ჯეუსონის, ტ. კრუზიას, დ. შიპის, კ.ბრეზიას, ს. კუკერის. პ. ბენერჯის, რ. ბატერფილდის და სხვათა მეტად მნიშვნელოვანი შრომები. აღნიშნულ შრომებში განიხილებოდნენ საკითხები, რომლებიც ეძღვნებოდნენ გაანგარიშების მაღალ სიზუსტესა და საიმედოობას, აგრეთვე კვლევებს, ზედაპირის სხვადასხვა განსაკუთრებული წერტილების არსებობისას.

ნაშრომში გამოყენებულია ამონახსნები სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის ძირითადი ალგორითმი ფიქტიურ დატვირთვათა და სასაზღვრო ინტეგრალების პირდაპირი მეთოდის ფორმებით.

ფიქტიურ დატვირთვათა მეთოდის მიხედვით შესასწავლი არის კონტური წარმოდგინდება წრფივი ელემენტების სახით. კონტურზე მოცემული სასაზღვრო პირობების (გადაადგილებების ან ძაბვების) მიხედვით განისაზღვრება გადაადგილებები და ძაბვები არის შიგნით. არსებული სასაზღვრო პირობების მიხედვით მოხდება  $P_s$  და  $P_N$  ფიქტიური დატვირთვათა განსაზღვრა.

სასაზღვრო ინტეგრალების პირდაპირი მეთოდის სარეალიზაციო ძირითადი განტოლების ანალიზი გვიჩვენებს. რომ მისი გამოყენებით შესაძლებელია უშუალოდ განსაზღვრულ იქნას კონტურის ერთ ნაწილში გადაადგილებები და ძაბვები, მეორე ნაწილში სასაზღვრო პირობების არსებობის შემთხვევაში.

არაერთგვაროვანი არეების კვლევისათვის გამოიყენება საკონტაქტო ამოცანების ფორმულირება, რომელიც გულისხმობს საკონტაქტო ზედაპირებზე ძაბვებისა და გადაადგილებების უწყვეტობის პირობას. ამდენად მეზობელი არეების საკონტაქტო ელემენტების  $N$  წყვილი შეიცავს  $4N$  უცნობს, საიდანაც 2 კომპონენტი წარმოადგენს ძაბვებს  $\sigma_s, \sigma_n$ , ხოლო 2 კომპონენტი გადაადგილებებს  $U_s, U_n$ . სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის სარეალიზაციო განტოლებათა სახე ფიქტიურ

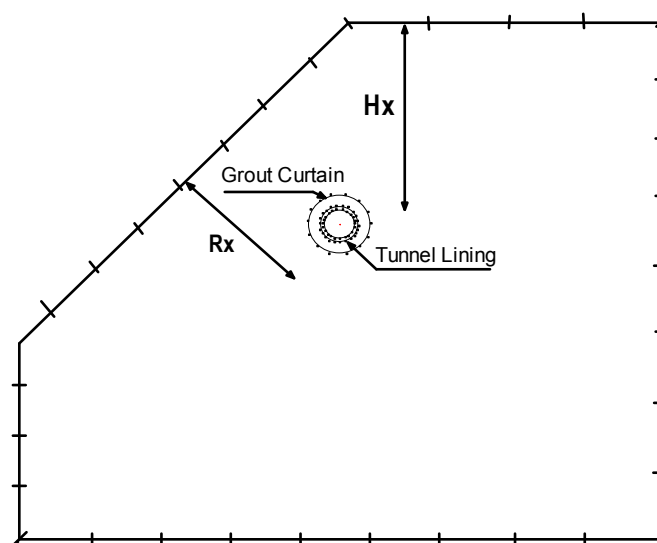
დატვირთვათა მეთოდის განზოგადოებული ფორმით წარმოდგინდება შემდეგი სახით:

$$\left. \begin{aligned} b_s^i &= \sum_{j=1}^N C_{ss}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{sn}^{ij} P_n^j \\ b_n^i &= \sum_{j=1}^N C_{ns}^{ij} P_s^j + \sum_{j=1}^N C_{nn}^{ij} P_n^j \end{aligned} \right\} i=1, \dots, N \quad (3.1)$$

სადაც:  $b_s^i$  და  $b_n^i$  აღნიშნავენ კონტურზე საწყის სასაზღვრო პირობებს მოცემულს ან ძაბვებით ან გადაადგილებებით;  $\sum_{j=1}^N C_{ns}^{ij}$ ,  $\dots$ ,  $\sum_{j=1}^N C_{nn}^{ij}$  გაელენის განზოგადოებული სასაზღვრო კოეფიციენტებია ან ძაბვებში ან გადაადგილებებში;  $P_s^j$ ,  $P_n^j$  - ფიქტიური დატვირთვებია.

“მოკეთება-გარემომცველი მასივი” სისტემისათვის მოცემულია შემდეგი სასაზღვრო პირობები (ნახ.1):

- ვერტიკალური წახნაგებისათვის -  $\sigma_s = 0$ ;  $U_n = 0$ ;
- ქვედა წახნაგისათვის -  $U_s = 0$ ;  $U_n = 0$ ;
- ფერდის ზედაპირისათვის -  $\sigma_s = 0$ ;  $\sigma_n = 0$ ;
- ზედა წახნაგზე გაითვალისწინება მასივის ზედა ნაწილის საკუთარი წონა. აქ,  $\sigma_s, \sigma_n, U_s, U_n$  - მხები, ნორმალური ძაბვები და გადაადგილებებია შესაბამისად.



ნახ. 1 “მოკეთება-მასივი” სისტემის საანგარიშო სქემა სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის.

განსახილველი არის შიგნით ნებისმიერ წერტილში გადაადგილებები და ძაბვები განისაზღვრება სომილიანის გარდაქმნებით. სტატიკის ამოცანის გაანგარიშებების დროს საექსპლუატაციო დატვირთვების სახით გათვალისწინებული იყო ფილტრაციული მოცულობითი ძალები, რომლებიც განისაზღვრებოდა ფილტრაციის ამოცანის ამოხსნის დროს.

გაანგარიშება მიმდინარეობს ციკლურ-იტერაციული თანმიმდევრობით (მოცემული ალგორითმის მიხედვით) მანამ სანამ ციკლებს შორის შედეგებს შორის განსხვავება არ იქნება მისაღები სიზუსტის ფარგლებში.

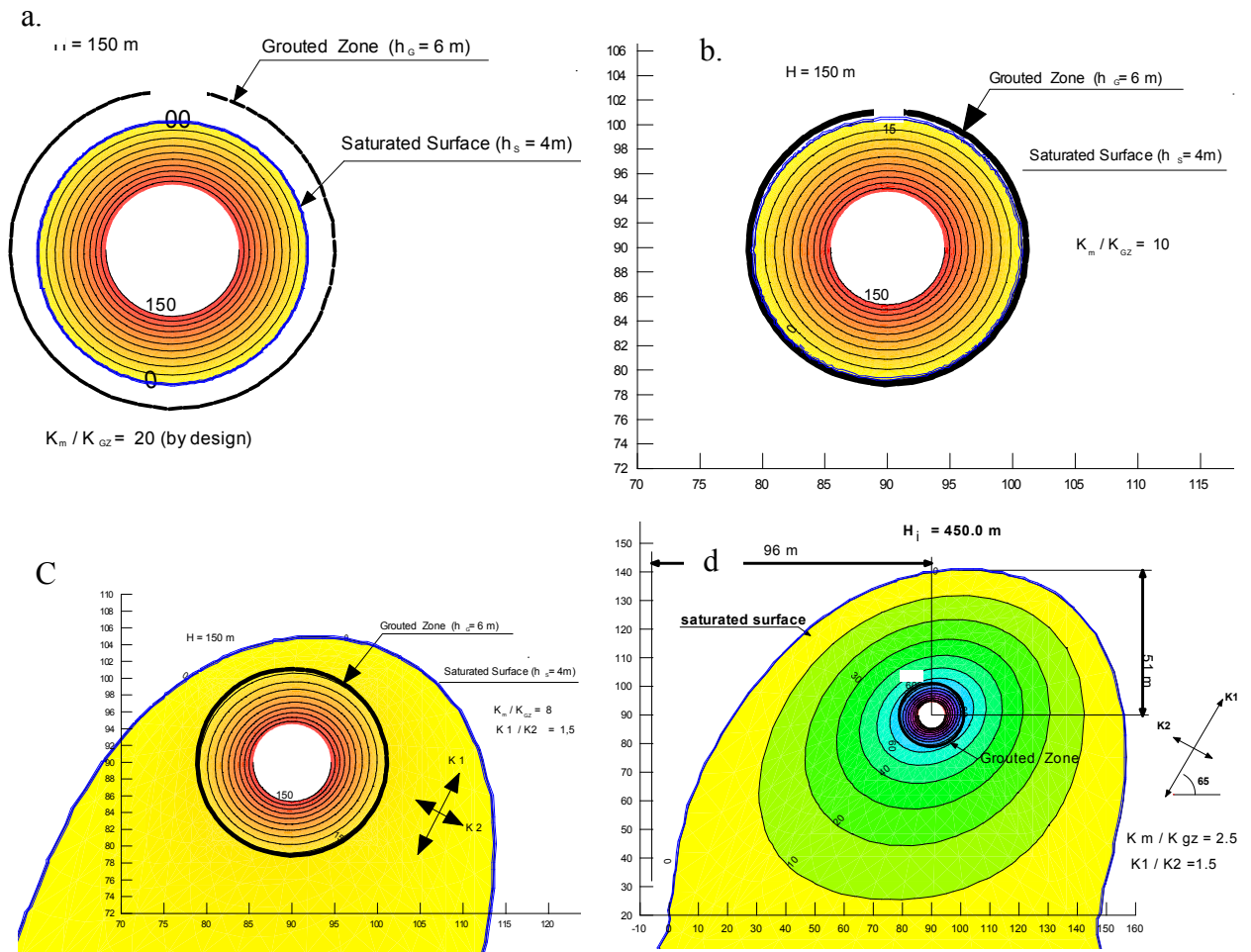
**მეოთხე თავში** მოცემულია ხეობის ფერდის სიახლოვეს გამავალი გვირაბის გარემომცველ მასივში განვითარებული ფილტრაციული რეჟიმისა და პარამეტრების ანალიზი.

ხეობის ფერდის სიახლოვეს არსებული სადაწნო გვირაბები არაბზარმედები მოსახვით, მნიშვნელოვან პრობლემებს ქმნის. ფილტრაციული ნაკადი საშიშროებას ქმნის, ერთის მხრივ სუფოზიური პროცესების, ხოლო მეორეს მხრივ მდგრადობის დაკარგვის განვითარების თვალსაზრისით. ასე მაგალითად, მდ. ოლორის გადასასვლელთან ენგურჰესის დერივაციული გვირაბის (1997 წელს) ფერდში ფილტრაციამ სუფოზიური პროცესების განვითარებასთან დაკავშირებით მდგრადობის დაკარგვის რეალური საშიშროება შექმნა.

პროექტირებისათვის საზოგადოდ მნიშვნელოვანია დერივაციული გვირაბების ღერძიდან ფერდის ზედაპირამდე დასაშვები მანძილის განსაზღვრა, რომლის დროს კმაყოფილდება უსაფრთხოების ანუ ფილტრაციული სიმტკიცისა და სტატიკური მდგრადობის პირობები.

ფილტრაციული სიმტკიცის შეფასება წარმოებს დაწნევის გრადიენტების დასაშვები მნიშვნელობის მიხედვით:  $I < I_{\text{დ}}$ . სადაც,  $I$  და  $I_{\text{დ}}$  მასივში განვითარებული ფილტრაციული ნაკადის დაწნევის გრადიენტების საანგარიშო და კრიტიკული მნიშვნელობებია შესაბამისად.

გვირაბის ექსპლუატაციის დროს ფილტრაციული პროცესების პროგნოზირებისათვის ჩატარებული იქნა კვლევათა სერიები, რომლის დროს გაითვალისწინებოდა გამაგრებითი ცემენტაციური ზონის ფილტრაციის კოეფიციენტის, როგორც საპროექტო და ასევე გაზრდილი მნიშვნელობი:  $K_m / K_{gz} = 20, 10, 9, 8, \dots, 3$ .  
გაანგარიშებებით მიღებული იქნა ნახ. 2, რომ:



ნახ. 2 ფილტრაციული წნევების განაწილება გვირაბის გარემომცველ მასივში:

- $K_m / K_{gz} = 20 \text{--} 10$  დიაპაზონში დეპრესიის ზედაპირი რჩება ცემენტაციური ზონის ფარგლებში;
- ცემენტაციური ზონის დაბალი ხარისხის არსებობის პირობებში (ან სუფოზიური პროცესის არსებობისას), როდესაც  $K_m / K_{gz} = 8$

და მასალა ნაწილობრივ იმეორებს მასივის ანიზოტროპიას, დებრესიის ზედაპირი უკვე გადის ცემენტაციური ზონიდან;

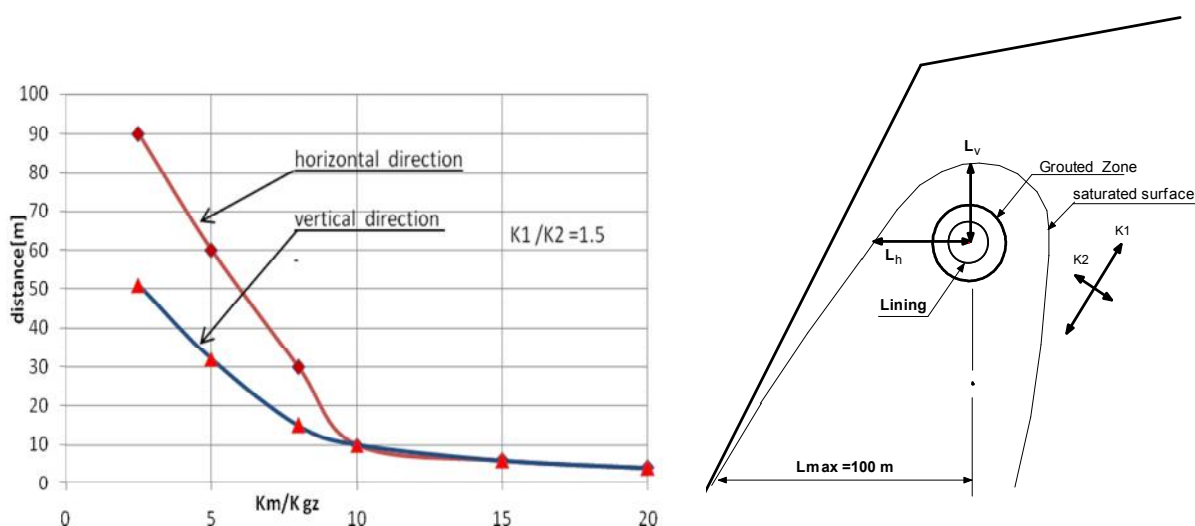
- $K_m/K_{gz}=2,5$  წარმოადგენს დებრესიის ზედაპირის კრიტიკულ მნიშვნელობას (გვირაბის დერძიდან მნიშვნელოვნად შორდება და იწყება ხეობის ფერდის დასველება), რომლისთვისაც ჯერ არ მიუღწევია (ნახ. 3, 2).

a).  $K_m/K_{gz}=20:-10$  საპროექტო მდგომარეობისათვის;

b). დებრესიის ზედაპირი თავსდება ცემენტაციური ზონის ფარგლებში  $K_m/K_{gz}=10$ ;

c). ცემენტაციური ზონის დაბალი ხარისხის არსებობისას  $K_m/K_{gz}=8$ ;

d). დებრესიის ზედაპირის უახლოვდება ხეობის ფერდს  $K_m/K_{gz}=2,5$ .



ნახ. 3 დებრესიის ზედაპირის კორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებებით გავრცელების მრუდები.

შეგვიძლია ვივარაუდოდ, რომ გამაგრებითი ცემენტაციური ზონის არსებული მდგომარეობისათვის უფრო რეალისტურია  $K_m/K_{gz} \approx 4$ .

ნაშრომში მოცემული ყველა სახის გაანგარიშება ჩატარებული იქნა ენგურის გვირაბის გეომეტრიული პარამეტრებისა და ფუძის მახასიათებლების შესაბამისად.

გაანგარიშებებში მიიღებოდა, რომ:

- გვირაბის მოსახვაში არსებობს ბზარები, რომელთა გამტარუნარიანობა (შიგა წნევის მოქმედებისას) მეტია ვიდრე მასივის;
- გარემომცველი ცემენტაციური ფარდის სიღრმე ტოლია ენგურჰესის დერივაციული გვირაბის პროექტით განხორციელებული სიღრმის შესაბამისად  $h_{ც.ფ} = 6.0$  მ;
- ცემენტაციური ფარდის ფილტრაციის კოეფიციენტი (ხვედრითი წყალშთანმთქმელობის კოეფიციენტის) განიცდის ვარირებას.

$K_{ც.ფ}$  შერჩევა სწარმოებდა ფილტრაციის კოეფიციენტთა ფარდობის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის ( $K_g / K_{ც.ფ} = 1, 2, 3, \dots$ ), ფუძის გეოლოგიური სტრუქტურის, გვირაბის რადიუსისა და დაწნევის მიხედვით, რომელთა დროს არ მოხდება დეპრესიის ზედაპირის გამოსოღვა და შესაბამისად ფერდში სუფოზიური მოვლენების განვითარება.

ჩატარებული იქნა გაანგარიშებათა სერიები, რომლებშიც განიხილებოდა გვირაბის დაბზარული წყალჟონვადი მოსახვა, რომლის გამტარუნარიანობა მეტია ვიდრე გარემომცველი მასივისა. ამდენად, მასივში ფილტრაციულ რეჟიმს მთლიანად განსაზღვრავს მისი ფილტრაციის კოეფიციენტები.

**მესუთე თავში** მოცემულია ხეობის ფერდის სიახლოეს გამავალი გვირაბის მდგრადობის საკითხები სტაციონალური ფილტრაციის რეჟიმის (დეპრესიის ზედაპირის არსებობის მაქსიმალური მოხაზულობის), აგრეთვე გამაგრებითი ცემენტაციური ზონის გავლენის გათვალისწინებით.

გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა სასაზღვრო და სასრული ელემენტების მეთოდის ერთობლივი გამოყენებით.

საექსპლუატაციო დატვირთვების სახით გაითვალისწინებოდა:

- საწყისი ძაბვები მასივში;

- ჰიდროსტატიკური წნევა მოსახვის ზედაპირზე.

$$q_x = \gamma(1 - \alpha_2)h; \quad (5.1)$$

- გვირაბიდან განვითარებული ფილტრაციული წნევები  $P_x, P_y$  მასივში, რომელიც გამოითვლება ფორმულებით:

$$\begin{aligned} P_x &= -\gamma \alpha_2 \frac{\partial h}{\partial x} \\ P_y &= -\gamma \alpha_2 \left[ \frac{\partial h}{\partial y} - (1 - n) \right] \end{aligned} \quad (5.2)$$

სადაც:  $p_x, p_y$  - ფილტრაციული მოცულობითი ძალების

მდგენელებია ღერძების მიმართ;

$\alpha_2$  - უკუწნევის ეფექტური ფართის კოეფიციენტი;

$n$  - მასალის ფორიანობა;

$\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}$  - წნევის გრადიენტებია ღერძების მიმართ.

გაანგარიშებათა სერიები ჩატარების დროს ძვრის ზედაპირზე მდგრადობის შეფასება სწარმოებდა ინტეგრალური მარაგის კოეფიციენტებით, ძვრაზე სიმტკიცის მარაგის ლოკალური კოეფიციენტების გათვალისწინებით:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_i, \quad (5.3)$$

სადაც :  $n$  - ძვრის უბნის ლოკალური არეების რაოდენობაა, რომელთა ფარგლებშიც  $\eta_i$  შესაძლებელია ჩაითვალოს მუდმივად.

$\eta_i$  - ძვრაზე სიმტკიცის მარაგის ლოკალური კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით:

$$\eta_i = \frac{\sigma_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + c_i}{\tau_a}. \quad (5.4)$$

$\sigma_i, \tau_a$  - ძვრის სიბრტყეზე ნორმალური და მხები ძაბვებია;

$\varphi_i, c_i$  - გრუნტი შიგა ხახუნის კუთხე და შეჭიდულობაა ლოკალურ არეებში;

როცა  $\eta_i \ll 1$ , მაშინ ლოკალურ არეებში ძვრაზე სიმტკიცე უზრუნველყოფილია, ხოლო როცა  $\eta_i \approx 1$ , მაშინ ძვრაზე სიმტკიცე დარღვეულია.

**განხილული იქნა 2 საანგარიშო ვარიანტი:**

ა) იზოტროპული მასივის და

ბ) ანიზოტროპული მასივი შრეების ფერდის პარალელური მიმართულებით ორიენტირებისას. ამ დროს დეფორმაციის მოდულების ფარდობა შრეების გრძივად და განივად შეადგენდა  $\frac{E_1}{E_2}=1.6$ .

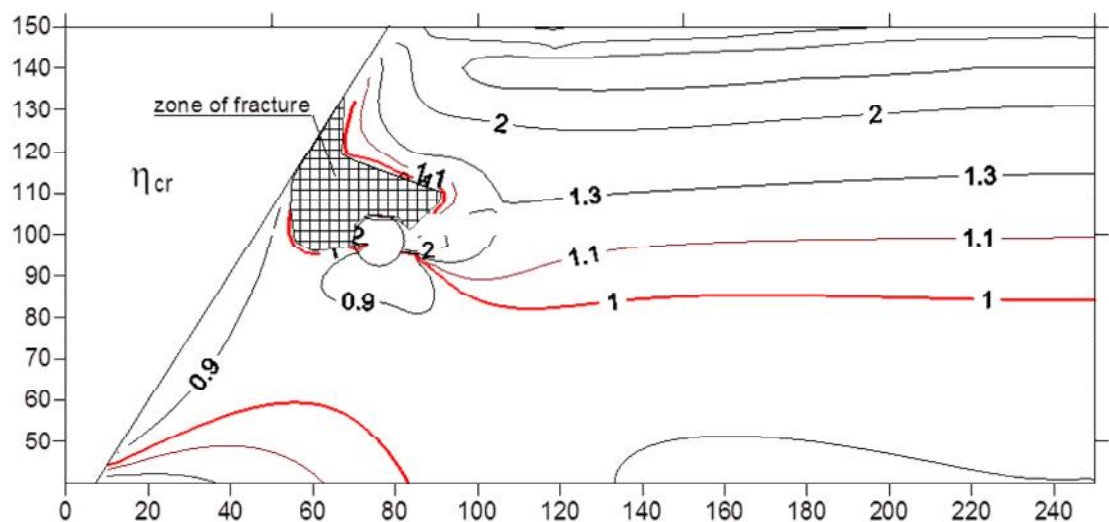
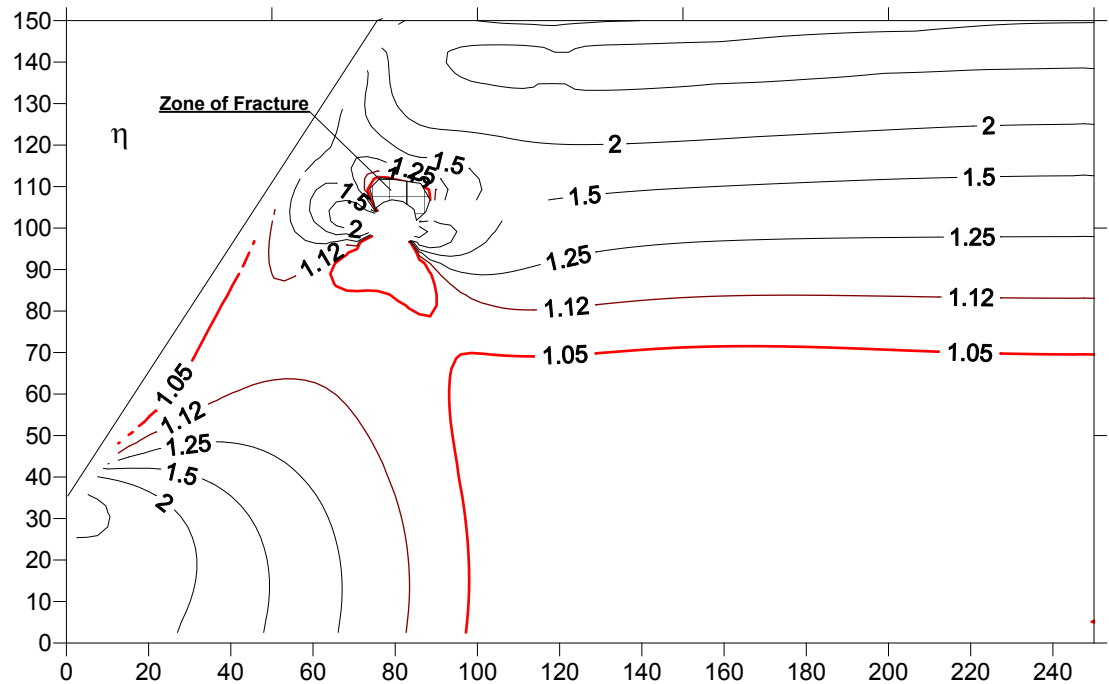
გაანგარიშების შედეგებით მიღებული იქნა (ნახ. 4), რომ:

- იზოტროპული მასივის შემთხვევაში, როდესაც გვირაბიდან ღერძამდე დაშორება შეადგენდა
  - $R_x=30M$ , რღვევის ზონამ გვირაბის თავზე მიაღწია 6.3 მ-მდე (ნახ.2). ამ დროს გამჭიმავი ძაბვების ზონამ გვირაბის თაღის ზონაში მიაღწია 7 მ-მდე;
  - $R_x = 25M$ , მასივში მყარდება ზღვრული მდგომარეობა. ამ დროს ადგილი აქვს მასივის მთლიან რღვევას.
- ანიზოტროპული მასივის შემთხვევაში მარაგის კოეფიციენტები ძვრაზე შემცირდა 25%-ით.

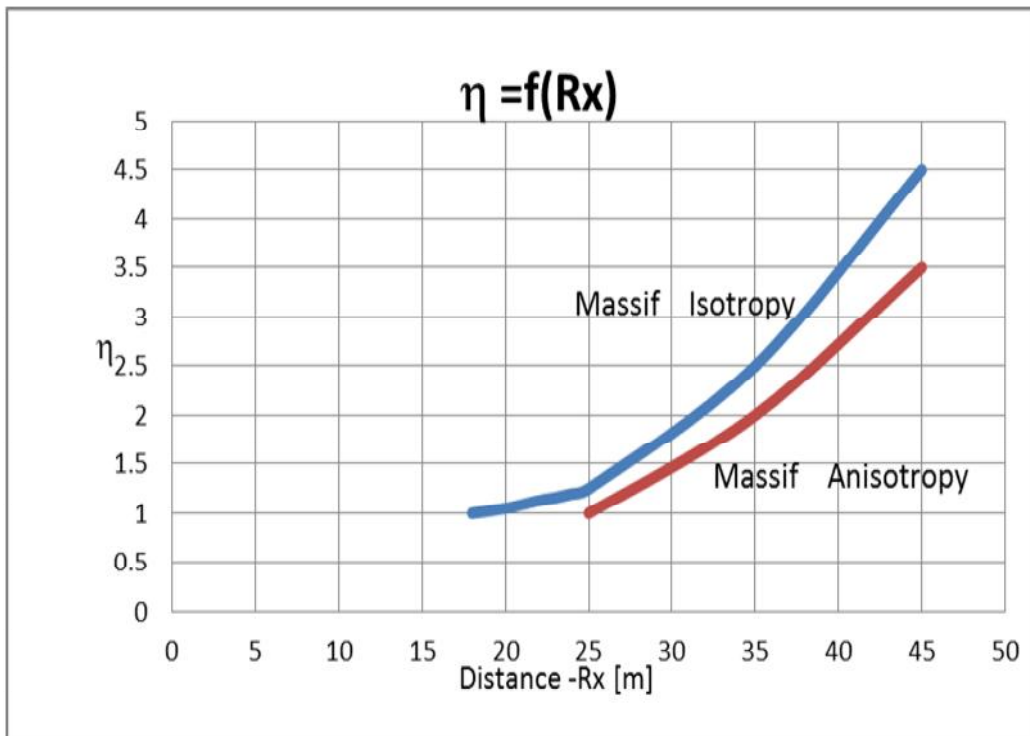
ძვრის პოტენციურად ყველაზე საშიში ზედაპირის ინტეგრალური მარაგის კოეფიციენტმა ცემენტაციის არ არსებობისას შეადგინა  $K=1.21$ , რაც არადამაყოფილებელია. ცემენტაციური ფარდის მოწყობის შედეგად ძვრის პოტენციურად საშიში ზედაპირის (ნახ.5) მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტმა მიაღწია  $K = 4.8$ -ს, რაც მაღალი მარაგით აკმაყოფილებს მდგრადობის პირობას.

მასივში განვითარებული ფილტრაცია გვირაბის გარშემო ქმნის დეპრესიის ზედაპირს, რომლის ფარგლებში ადგილი აქვს კლდოვანი გრუნტის შეტივტივებას, ამასთან დაკავშირებით გვირაბის კონცენტრაციის ზონებში ძაბვების გადანაწილებას და აგრეთვე მასალის ძვრის მახასიათებლების გაუარესებას. აღნიშნული პროცესები მით უფრო მნიშვნელოვანია, იმ შემთხვევაში, როდესაც ფერდში

არსებობს ხეობის მიმართულებით ორიენტირებული დაცურების სიბრტყე. ფიტრაციული პროცესები ამ მხრივ მნიშვნელოვნად რეაგირებს ფერდის მდგრადობის მარაგებზე გაუარესების მიმართულებით.



**ნახ. 4** ფერდის სიახლოეს გამაგალი სადაწნეო გვირაბების მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტების იზოხაზები.



**ნახ. 5** მდგრადობის მარაგის კოეფიციენტების გრაფიკი, იზოტროპიისა და ანიზოტროპიის დროს, გვირაბის ღერძიდან ფერდამდე დაშორების მანძილის მიხედვით.

ხსენებულ საკითხს მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს გვირაბის მოკეთების შიგა ზედაპირზე მოქმედი ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდე, ფერდის გეოლოგიური აღნაგობა (ანიზოტროპია, სხვადასხვა შრეობრიობა) და გვირაბის გარემომცველი ცემენტაციური ზონა.

ექსპლუატაციის პერიოდში ზოგადად ადგილი აქვს ცემენტაციური ზონის ეფექტურობის ვარდნას, რომლის მიზეზები უკავშირდება მასივში ბზარების გახსნას, ასევე გამოტუტვის და სუფოზიური პროცესების განვითარებას.

აღნიშნული საკითხები აქტუალურია ენგურჰესის გვირაბისათვის, სადაც ცალკეულ უბნებში, ექსპლუატაციის პერიოდში მოხდა ფილტრაციული დანაკარგების ზრდა. ხსენებული საკითხები მნიშვნელოვანია, ერთის მხრივ ენერგეტიკული თვალსაზრისით, მეორეს მხრივ კი მასივის მდგრადობის მხრივ, მით უფრო, როდესაც ფერდის შრეობრიობა დაცურების სიბრტყის ორიენტაციისაა.

ენგურჰესის სადაწნეო გვირაბის მაგალითზე ნაშრომში მოცემულია ფერდის მდგრადობაზე გაანგარიშების შედეგები დაცურების პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე, მასივისა და ცემენტაციური ზონის ფილტრაციის კოეფიციენტთა ფარდობის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის  $K_m/K_{gc} = 2 \div 10$ .

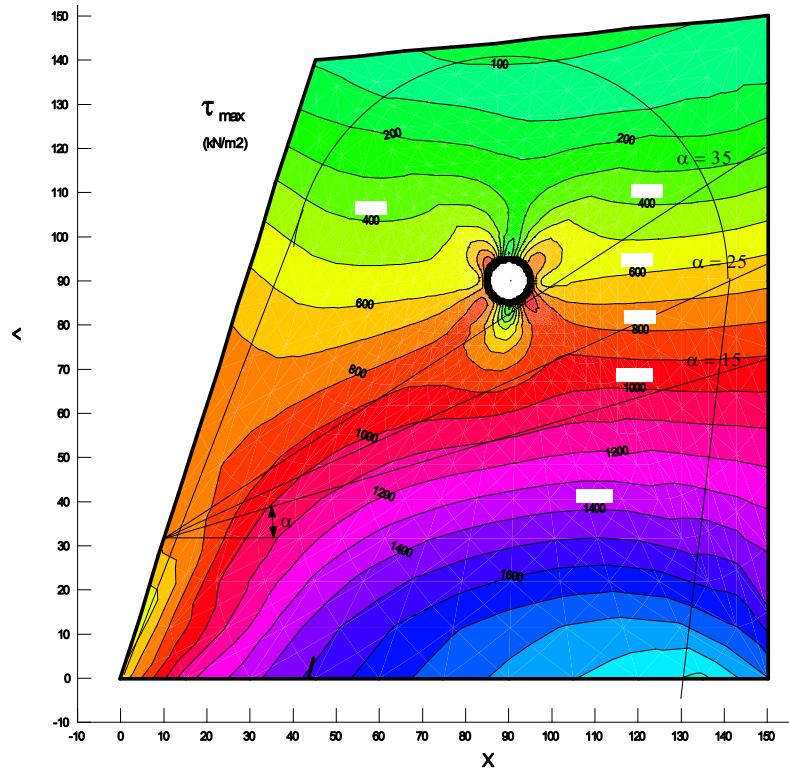
ენგურჰესის სადაწნეო გვირაბის ტრასა გადის საკმაოდ რთულ გეოლოგიურ გარემოში. აღსანიშნავია, რომ აქ ადგილი აქვს ქანების შრეობრიობას, რომელიც მასივს წარმოადგენს, როგორც ანიზოტროპულს, რომლის გამოხატულება იცვლება ბზარიანობის მიხედვით. ანიზოტროპიის კოეფიციენტის ხასიათდება მაღალი მნიშვნელობით 1.4–1.6. საცდელი ექსპერიმენტული კვლევების შედეგებით მიღებული იქნა, რომ გამაგრებითი ცემენტაციით შედეგად ანიზოტროპიის კოეფიციენტის დაყვანილი იქნა მინიმუმამდე 1.04.

“მოკეთება-მასივი” სისტემის გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა მასივის საწყისი დაძაბული მდგომარეობის, გვირაბის ზედაპირზე მოქმედი ჰიდროსტატიკური წნევის და ფილტრაციული მოცულობითი ძალების (შემატივტივებელი წნევის) ზემოქმედების გათვალისწინებით.

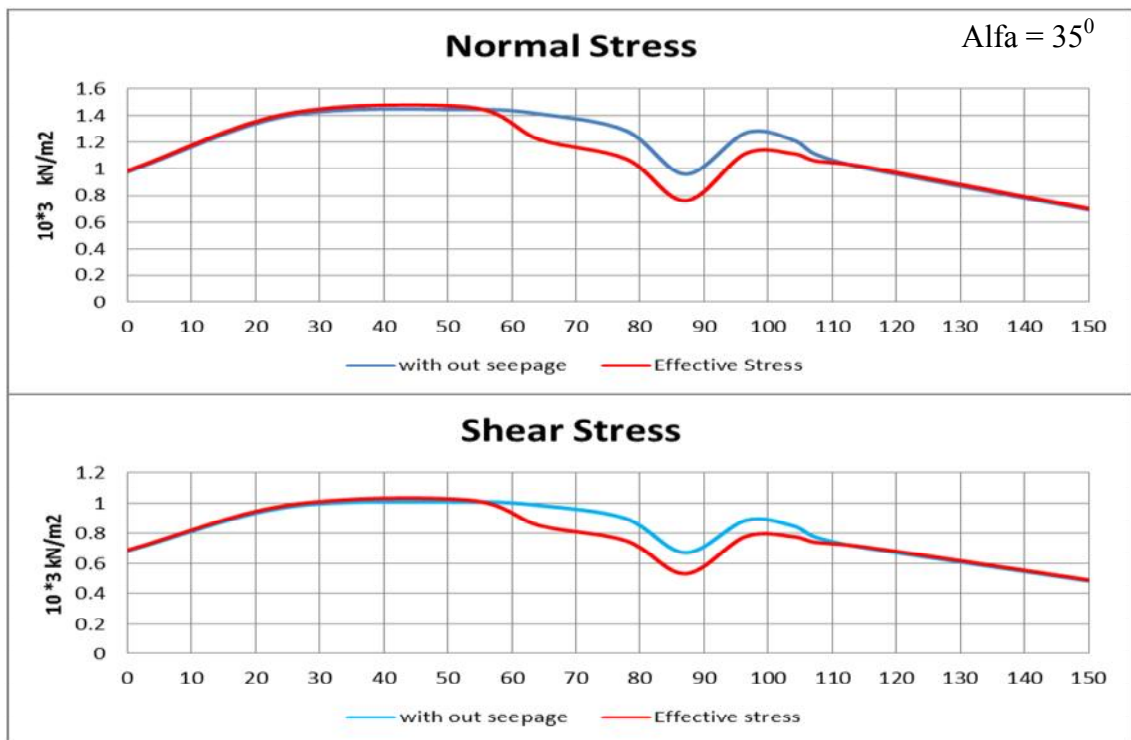
ძვრზე მდგრადობის შეფასება ჩატარებული იქნა ეფექტური ძაბვის მიხედვით:

$$K = \frac{(\sigma - p) \operatorname{tg} \varphi + cF}{\tau_c} \quad (5.5)$$

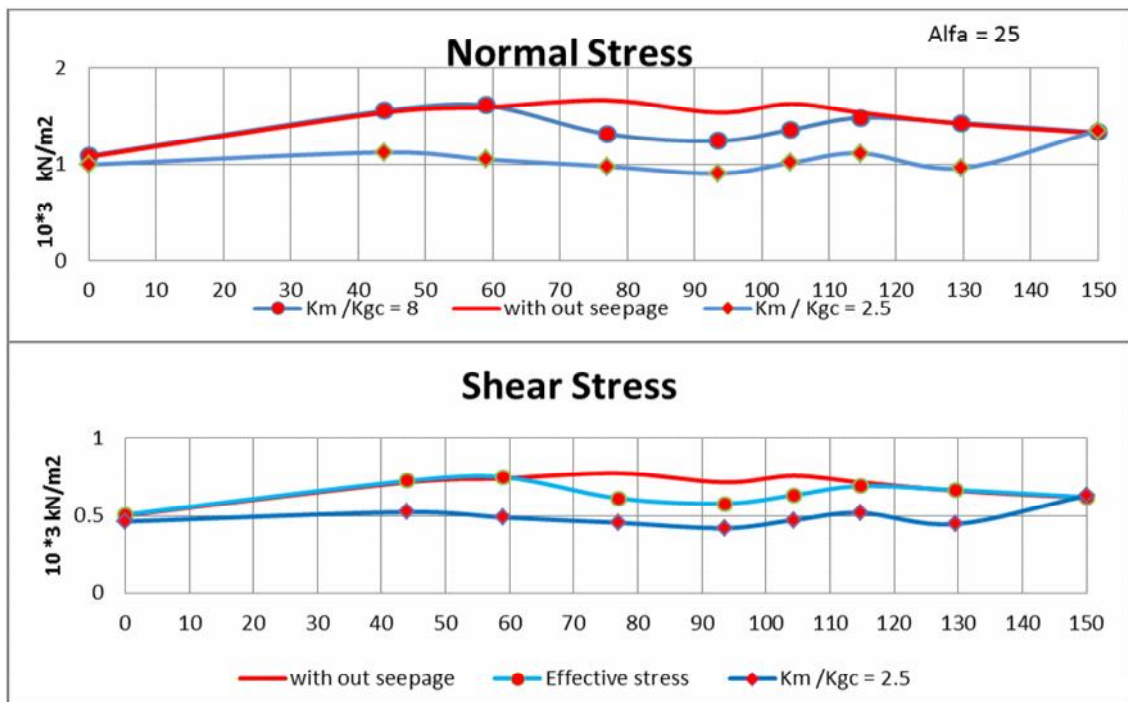
სადაც,  $\sigma$  - ნორმალური ძაბვაა ძვრის ზედაპირზე;  $p$  - ფილტრაციული წნევაა,  $\operatorname{tg} \varphi$ ,  $c$  - ხახუნის კოეფიციენტი და ხვედრითი შეჭიდულებაა ძვრის ზედაპირზე;  $F$ - ძვრის ზედაპირის ფართობი;  $\tau_c$ - მხები ძაბვის საანგარიშო მნიშვნელობაა ძვრის ზედაპირზე. სამშენებლო ნორმების მიხედვით I და II კლასის ობიექტებისათვის ძვრზე მდგრადობის მარაგი უნდა აკმაყოფილებდეს პირობას  $K > 1.25$



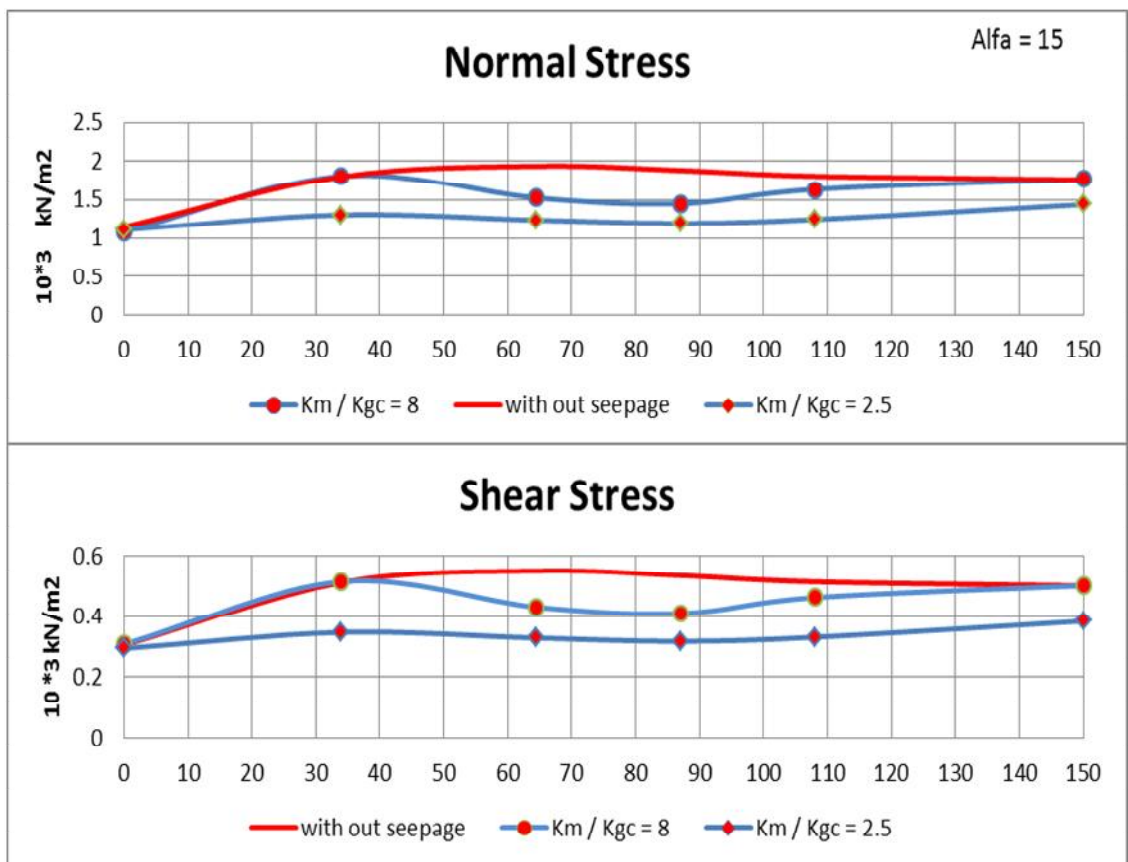
ნახ. 6 მაქსიმალური მხები ძაბვების განაწილება მასივში ღებრესიის ზედაპირის არსებობის გათვალისწინებით, როცა  $K_m/K_{gz} = 2.5$ .



ნახ. 7 ნორმალური და მხები ძაბვების განაწილება პოტენციურად საშიშ ზედაპირზე, როცა  $K_m/K_{gz} = 2.5$  ( $\alpha = 35^\circ$ ).

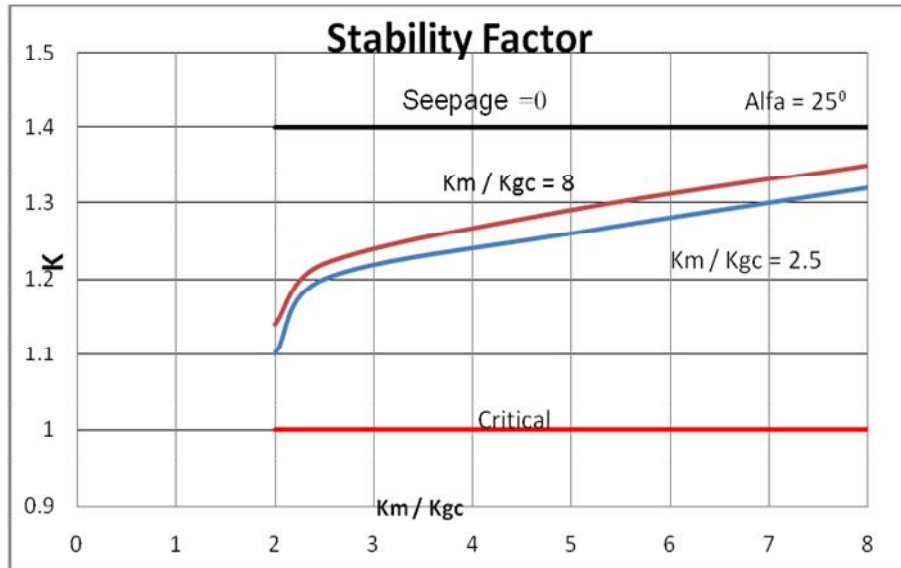


დაცურების პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე ძაბვების განაწილების



**ნახ. 8** ნორმალური და მხები ძაბვების განაწილება პოტენციურად საშიშ ზედაპირზე, როცა  $K_m / K_{gz} = 2.5$  ( $\alpha = 15^\circ, 25^\circ$ ).

ეპიურების (ნახ. 6,7) ანალიზი აჩვენებს, რომ  $K_m/K_{gz}$  ფარდობის ზრდისას მცირდება ფილტრაციის არეში ეფექტური ნორმალური და მხები ძაბვები, მცირდება დამჭერი ძალები და შესაბამისად ძვრაზე მდგრადობის მარაგები. როდესაც ფარდობა აღწევს  $K_m/K_{gz} = 2.5$  მარაგი უახლოვდება კრიტიკულ მნიშვნელობას (ნახ. 9).



ნახ. 9 მდგრადობის მარაგების დამოკიდებულება  $K_m/K_{gz}$  ფარდობაზე, როცა  $\alpha = 25^\circ$ .

#### დასკვნა:

- სასაზღვრო ელემენტების მეთოდის გამოყენებით დამუშავებული იქნა მეთოდოლოგია და საანგარიშო პროგრამა 2 განზომილებიანი ამოცანების სტატიკური გაანგარიშებისათვის. სასრული ელემენტების მეთოდთან შედარებით სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი ხასიათდება საანგარიშო სქემის მნიშვნელოვანი სიმარტივით, (რაც კარგ საფუძველს ქმნის იტერაციული კვლევების ჩატარებისას დროს) და საშუალებას იძლევა:
  - “მოკეთება-გარემომცველი მასივი” სისტემის კვლევის დროს გვირაბის ცენტრის კოორდინატების მარტივი ცვლილებით გარდაიქმნას ხსენებული სისტემა ისე, რომ უცვლელი დარჩეს გარემომცველი კონტურის სასაზღვრო ელემენტებით აპროექციმაცია და მიღწეული იქნას გვირაბის ტრასის ვარირება;

- დასაბუთებული იქნას ფერდის სიახლოეს მეოფი გვირაბის ტრასის საპროექტო ვარიანტი, ასევე შეფასებული იქნას ექსპლუატაციის პერიოდში ხსენებული სისტემის მუშაობა (მასივის ფილტრაციული და სტატიკური სიმტკიცის, აგრეთვე მდგრადობის პირობების მიხედვით) - ხეობის ტოპოგრაფიული და გეოლოგიური პირობების, გარემომცველი ცემენტაციური ზონის, აგრეთვე მასივში განვითარებული თანამდგომი ფილტრაციული რეჟიმის გათვალისწინებით.

- ენგურჰესის სადაწნო გვირაბის არაარმირებული მოკეთება, საპროექტო გადაწყვეტის შესაბამისად, წარმოადგენს წყალჟონვად კონსტრუქციას, სადაც შიდა წნევის მოქმედებისას, ჩნდება ბზარები ლიმიტირებული პარამეტრებით. ამდენად, გამაგრებითი ცემენტაცია, როგორც ფილტრაციის საწინააღმდეგო ძირითად საშუალების ეფექტურობას განსაზღვრავს ძირითადი მასივისა და ცემენტაციური ზონის ფილტრაციის კოეფიციენტთა ფარდობა, რომლის მისაღები მნიშვნელობაა -  $K_m/K_{gz}=10$ . ამ დროს დეპრესიის ზედაპირი მთლიანად თავსდება ცემენტაციური ზონის ფარგლებში (საპროექტო გადაწყვეტა).
- მიღებული იქნა, რომ  $K_m/K_{gz}$  ფარდობის ზრდისას, რასაც თან ახლავს დეპრესიის ზედაპირის გაბარიტების შემცირება, მდგრადობის მარაგები იზრდება. როდესაც აღნიშნული ფარდობა აღწევს მაჩვენებელს  $K_m/K_{gz} = 2.5$ , მარაგი უახლოვდება კრიტიკულ მნიშვნელობას, ხოლო ფარდობა  $K_m/K_{gz} = 4$  მისაღებია, რომლის დროს კმაყოფილდება მდგრადობის პირობები.
- შეფასებული იქნა ცემენტაციური ზონის ამჟამინდელი მდგომარეობა. მშენებლობის დროს ცემენტაციის დაბალი ხარისხის არსებობის, ან ექსპლუატაციის პერიოდში სუფოზიური პროცესის განვითარებისას, როდესაც  $K_m/K_{gz} > 10$  დეპრესიის ზედაპირი გადის ცემენტაციური ზონიდან, ხოლო, ფარდობა  $K_m/K_{gz} = 2.5$  წარმოადგენს დეპრესიის ზედაპირის კრიტიკულ

მნიშვნელობას, რომლის დროს ადგილი აქვს ხეობის ფერდის დასველებას. ამ დროს ფილტრაციული ხარჯი საპროექტოსთან შედარებით იზრდება  $\approx 2.5$ -ჯერ.

- ცემენტაციური ზონის ფარგლებში ფილტრაციული გრადიენტები აკმაყოფილებენ ფილტრაციული სიმტკიცის პირობას, თუმცა არაა გამორიცხული მოხდეს შრეებს შორის ბზარების გახსნა და სუფოზიური პროცესების განვითარება, რაც გვირაბის რეაბილიტაციის საკითხს უფრო აქტუალურს ხდის.
- წყალჟონვადი მოკეთების არსებობის პირობებში, მასივში განვითარებული ფილტრაციული ძალების ზემოქმედებით, მნიშვნელოვნად იცვლება ხეობის ფერდის დაძაბული მდგომარეობა. შესაბამისად, დაცურების პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე მდგრადობის მარაგების შეფასებისათვის საჭიროა გათვალისწინებული იქნას ფილტრაციული მოცულობითი ძალები.
- გარემომცველი ზონის ცემენტაცია წარმოადგენს მძლავრ საინჟინრო საშუალებას, რომლის გამოყენებით შესაძლებელია მოხდეს, როგორც ფილტრაციული დანაკარგების შემცირება, ასევე პოტენციურად საშიშ ზედაპირებზე მდგრადობის მარაგების გაზრდა, რაც საჭიროა გათვალისწინებული იქნას პროექტირების დროს.

### პუბლიკაციები სადისერტაციო თემაზე

1. მ.ყალაბეგიშვილი, გ.ახვლედიანი. სტატია – სტუ, ISSN 1512-3936, სამეცნიერო - ტექნიკური ჟურნალი „მშენებელი“ №4(31). 2013წ.  
ქ. თბილისი. *სადაწნო გვირაბების ფილტრაციული ანალიზი გამაგრებითი ცემენტაციის ხარისხის გათვალისწინებით*“ (გვ.115-120)
2. მ.ყალაბეგიშვილი, გ.ახვლედიანი. სტატია – სტუ, ISSN 1512-3936, სამეცნიერო - ტექნიკური ჟურნალი „მშენებელი“ №1(32). 2014წ.  
ქ.თბილისი. *„Устойчивость напорного туннеля находящегося вблизи откоса ущелья“* (გვ.115-120 )
3. გ.ახვლედიანი. სტატია – სტუ, ISSN 1512-410X სამეცნიერო - ტექნიკური ჟურნალი „ჰიდროინჟინერია“ №1-2(15-16). 2014წ. ქ. თბილისი.  
*„ ხეობის ფერდის მდგრადობის საკითხები სადაწნო გვირაბის არსებობისას“*

4. გახელდენი. სტუ, სტუდენტთა 81-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. „ სადაწნო გვირაბების მდგრადობის ანალიზი, ფილტრაციული ძალების გათვალისწინებით, სამშენებლო ფაქტორები, სექცია ჰიდროინჟინერია. 10.06.2013წ. (მეორე ადგილი.)

## **Operation of pressure Tunnels in heterogeneous geological mass**

It is important to select the pressure tunnel route during designing medium and high-pressure hydro power plant in the vicinity of the slope of the valley. The correct solution requires considering the basis of geological data to be achieved:

- Admission seepage mode in the massif (which is not to be reached during the depression in the surface of the slope) and the seepage flow parameters, including pressure gradients and velocities should be allowed to ensure massive seepage resistance).
- tunnel and slope stability, during which the distance from the lining to a slope surface would be the minimum;

It should be noted that the bases are characterized by anisotropy, and cracking whose layout creates a potentially dangerous shear surface. Seepage flow creates the body (uplift and hydrodynamic) forces, on the one hand, and decreasing shear parameters of the slope surfaces (crack filler ) on the other hand. These factors influence on the stability are aimed at reduction.

The scientific novelty. The two-dimensional problem of research methodology has been developed within the framework of the joint using boundary element and the finite element methods, which allows for assessment to be:

- Pervious pressure tunnel lining and the surrounding massif joint operation with existence of geological conditions and seepage body forces;
- justification the tunnel route the minimum allowable distance in the vicinity of the slope of the valley;

- influence of the grouting zone on the tunnel surrounding massive seepage flow parameters (including the depression curve of the admissible area, cracks parameters) and slope stability;
- Energy - economically acceptable seepage losses.

The practical value of the work.

Research methodology, and results can be used for design and rehabilitation of pervious pressure (also for unpressured) tunnels:

- Study the route of the tunnel, when the tunnel axis runs through the valley in the vicinity of the slope;
- tunnel lining surrounding grouting zone parameters (depth, density ratio permeability) correctly identify which can be reached at:
- the allowable spread of flow seepage area of the mass;
- tunnel – lining and slope stability ;
- Energy - economically acceptable filtration D losses.

Engurhesi tunnel lining not reinforced, the reinforcing grouting as a main seepage resistance solution efficiency is determined by the ratio of massive and grouting zone permeability coefficients ( $K_m / (K_{gr})$ ),

- within the range of  $K_m / K_{gr} = 20 \div 10$  depression surface remains in the limits of grouting zone;
- at the low quality of grouting zone (or in the presence of erosive leakage process), when  $K_m / K_{gr} = 8$  and material partially repeats the anisotropy of massif, depression surface already escapes grouting zone;
- $K_m / K_{gr} = 2.5$  is a critical value of depression surface (moves away significantly from the axis of tunnel and the wetting begins of the gorge slope), which it has not reached yet.

Therefore we may assume that more realistic for the present condition of strengthening grouting zone is  $K_m / K_{gr} \approx 4$ .

