

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ალექსანდრე ბუაჩიძე

სადაწნეო გვირაბის სიმტკიცისა და მდგრადობის
კვლევა ფილტრაციული რეჟიმის გათვალისწინებით

სადოქტორო პროგრამა: მშენებლობა
შიფრი 0732

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი
2022

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
სამშენებლო ფაკულტეტი
წყალმომარაგების, წყალარინების, თბოაირმომარაგების და
შენობათა საინჟინრო აღჭურვის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელები: პროფესორი დავით გურგენიძე
პროფესორი გელა ყიფიანი

რეცენზენტი: პროფესორი ზურაბ ციციშვილი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

რეცენზენტი: პროფესორი ზურაბ მეგრელიშვილი
ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელობის
სახელმწიფო უნივერსიტეტი

დაცვა შედგება _____ წლის „ _____“ _____, _____ საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე.

სტუ-ის _____ კორპუსი, აუდიტორია _____.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას ქ. 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,

პროფესორი

დემურ ტაბატაძე

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

კვლევის აქტუალურობა: სადაწნეო გვირაბების დიდი ნაწილი დაპროექტებულია არაბზარმედეგი ბეტონის მოკეთებით, თანაბარ-განაწილებული ბზარების ლიმიტირებული პარამეტრებით (რაოდენობა და გახსნა). ზოგადად, სტანდარტების შესაბამისად, გვირაბიდან ფილტრაციული დანაკარგების დასაშვები მნიშვნელობა არ უნდა აღემატებოდეს ჰესის საპროექტო ხარჯის 1%-ს. როგორც ჰესების ფუნქციონირების ანალიზიდან ჩანს ფილტრაციული დანაკარგების მოცულობა რეალურად დასაშვებზე გაცილებით მაღალია.

სადაწნეო გვირაბები რთული ჰიდროტექნიკური ნაგებობაა, რომლის დაპროექტება და მშენებლობა დიდ მატერიალურ დანახარჯებს და დროს მოითხოვს. ამასთან ჰიდროტექნიკური ნაგებობები, როგორც წესი, განლაგებულია დიდი დასახლებების შიგნით ან ზემოთ.

მათა არასწორმა ექსპლუატაციამ (ფილტრაციული რეჟიმის დარღვევამ) შეიძლება ტრიგერის როლი **ტექნოგენური კატასტროფების** გამოწვევაში. რასაც შედეგად მოყვება დიდი ადამიანური მსხვერპლი, მატერიალური ზარალი და ეკოლოგიური კატასტროფები. ადამიანის მიერ და არა ბუნებრივი კატაკლიზმებით გამოწვეული ტექნოგენური კატასტროფების შედეგად ეკონომიკური ზარალი XX საუკუნის შუა პერიოდიდან დღემდე დაახლოებით 10-ჯერ გაიზარდა – წელიწადში 60-დან 700 მილიარდ დოლარამდე; მათი რიცხვი საშუალოდ 3-ჯერ გაიზარდა, ხოლო მსხვერპლთა რაოდენობა – ორნახევარჯერ.

სადაწნეო გვირაბებში ფილტრაციის საპროექტო მაჩვენებელთან შედარებით გაზრდა იწვევს ჰესის **ენერგეტიკული პარამეტრების გაუარესებას.**

როგორც წესი, ფილტრაციას ადგილი აქვს სადაწნეო გვირაბებიდან არაბზარმედეგი, მოკეთების არსებობისას. იმ შემთხვევაში, თუ ფილტრაციის ნაკადი განვითარდება მაღალი გრადიენტებით, ამან შეიძლება გამოიწვიოს მიმდებარე ცემენტაციური ფარდის და ნაწილობრივ ქანების ეროზია

(გეოლოგიური ბზარების გამორეცხვა). ეს იწვევს გვირაბის მოკეთებაში ბზარების გახსნას და ფილტრაციის დანაკარგების გაზრდას, რასაც მოჰყვება ჰესის ელ. ენერჯის გამომუშავების შემცირება.

ენგურის სადაწნეო დერივაციულ გვირაბზე 2018 წლის თებერვალში 12 ქვეყნის სპეციალისტების (მათ შორის რუსეთიდან, შვეიცარიიდან, ავსტრიიდან, თურქეთიდან, საფრანგეთიდან და ჩინეთიდან) მონაწილეობით ჩატარებულმა მონიტორინგმა გამოავლინა ფილტრაციის მაღალი დონე 13 კუბური მეტრი წამში. გვირაბში წყლის გაჟონვის შედეგად დანაკარგების რაოდენობა წელიწადში 250 მილიონ კილოვატ საათამდე აღწევს. ეს არის აფხაზეთის მიერ წელიწადში მოხმარებული ელექტროენერჯის 10%. ენგურჰესზე სადერივაციო გვირაბის რეაბილიტაციის შემდეგ, მოსალოდნელია, რომ გაჟონვა 40-50%-ით შემცირდება, რაც წელიწადში დაახლოებით 100 მლნ კილოვატ/საათს შეადგენს.

მთიანი რელიეფის პირობებში ფილტრაციის ზრდამ შეიძლება გამოიწვიოს ხეობის **ფერდობების მდგრადობის დაკარგვა**.

1920 წელს რიტომსკის (შვეიცარია) სადაწნეო გვირაბი გაყვანილ იქნა ანიზოტროპულ კლდოვან ქანებში, სადაც შრეები გვირაბის ღერძის პარალელურად გადიოდა და ხეობის მხარეს განიცდიდა ვარდნას. ექსპლუატაციაში შესვლიდან მცირე პერიოდში გვირაბიდან დაიწყო ფილტრაცია. გამოკვლევების შედეგად დადგენილი იქნა, რომ გვირაბის ვარცლისებური კვეთის მომრგვალებულ კუთხეებში განვითარებულ იქნა წვრილი ბზარები. დადგინდა, რომ არ იყო სწორად შერჩეული კვეთის ფორმა და კონსტრუქცია (არაარმირებული ბეტონის მოკეთება). საჭირო გახდა სარეაბილიტაციო სამუშაოების ჩატარება.

ყოველივე ზემოაღნიშნული ასაბუთებს საკვლევი თემის **აქტუალობას**.

კვლევის მიზანი: ჰიდროსტატიკური სადაწნეოზე მოქმედება კონსტრუქციებზე იწვევს ბზარების წარმოქმნას, რასაც მოჰყვება ღვარცოფის არეალის შემდგომი გავრცელება კლდის მასივში (ჩაღრმავებისზედაპირი) დაპარამეტრების განაწილება. ფილტრაციის წნევა გავლენას ახდენს როგორც გვირაბის მოკეთებაზე გარე მხრიდან, ასევე კლდის მთელ

ზედაპირზე. ამდენად, ბზარზე გავლენას ახდენს როგორც ჰიდროსტატიკური წნევა, ასევე ფილტრაციის ძალები, ამიტომ ბზარის განვითარება და ფილტრაცია ურთიერთდამოკიდებულია და ამ პრობლემის გადასაჭრელად საჭიროა სტატიკური და ფილტრაციის პრობლემების ერთიანი გადაწყვეტა.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები: სადაწნეო გვირაბის სიმტკიცისა და მდგრადობის კვლევა ფილტრაციული რეჟიმის გათვალისწინებით.

კვლევისათვის გამოყენებულ იქნა:

- საექსპლუატაციო დატვირთვების გავლენით, სადაწნეო გვირაბებში, ბეტონისა და არაბზამედეგ რკინაბეტონში, წარმოქმილი ბზარებიდან, სტატიკური პარამეტრების და ფილტრაციის გასაერთიანებლად, სასრულ ელემენტთა მეთოდი;
- გვირაბის ირგვლივ ქანის მასივში მცირე სიხშირის სეისმური ტალღის გავლისას წარმოშობილი ძაბვების კონცენტრაციის შეფასების კრიტერიუმად, დრეკადობის თეორიის ორი ბრტყელი კვაზისტატიკური ამოცანის ამოხსნის სუპერპოზიციის პრინციპი;

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე:

- ფილტრაციული ნაკადის ზემოქმედების გათვალისწინებით გვირაბების მდგრადობის გაანგარიშების მეთოდიკის სრულყოფა, სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენებით;
- თეორიული გაანგარიშებით მიღებული ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრების თანხვედრა, გარემომცველ მასივში წყლის ფილტრაციულ ნაკადის მოცულობასთან;
- სტატიკური და დინამიკური დატვირთვების ერთდროულად ზემოქმედების ანალიზი იზოტროპულ ან ანიზოტროპულ მასივში გაყვანილი, პრაქტიკულად ნებისმიერი ფორმის (განივკვეთის) ერთი ან რამდენიმე გაუმაგრებელი გვირაბის შემთხვევაში;
- გვირაბის ირგვლივ ქანის მასივში მცირე სიხშირის სეისმური ტალღის გავლისას წარმოშობილი ძაბვების კონცენტრაციის შესასწავლად, პირველადაა გამოყენებული დრეკადობის თეორიის ორი ბრტყელი კვაზისტატიკური ამოცანის ამოხსნის სუპერპოზიცია.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება:

მიღებული შედეგები საშუალებას იძლევა:

- გვირაბისა და გარემომცველი მასივის ერთობრივი მუშაობისას, სტატიკის და ფილტრაციის საკითხების საანგარიშო მოდელის გამოყენებით, საპროექტო და სამეცნიერო-კვლევით ორგანიზაციებში, განხორციელდეს საპროექტო გადაწყვეტილებების დამუშავება და ექსპერტიზა საიმედოობის უფრო მაღალი ხარისხით.

ძირითადი შედეგების საიმედოობას:

- განსაზღვრავს მიღებული თეორიის დასაბუთებული ვარიანტები, რომლებიც საფუძვლად დაედო მიღებულ შედეგებს – გაანგარიშების შეფასების სიზუსტით, ასევე სხვადასხვა ავტორების მიერ მიღებული თეორიული და ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგებთან თანდამთხვევით.

ნაშრომის აპრობაცია: კვლევის შედეგად მიღებული შედეგები მოხსენებული იქნა საგანმანათლებლო პროგრამით გათვალისწინებული სამ კოლქვიუმზე, ასევე ორი საერთაშორისო ტექნიკურ კონფერენციაზე.

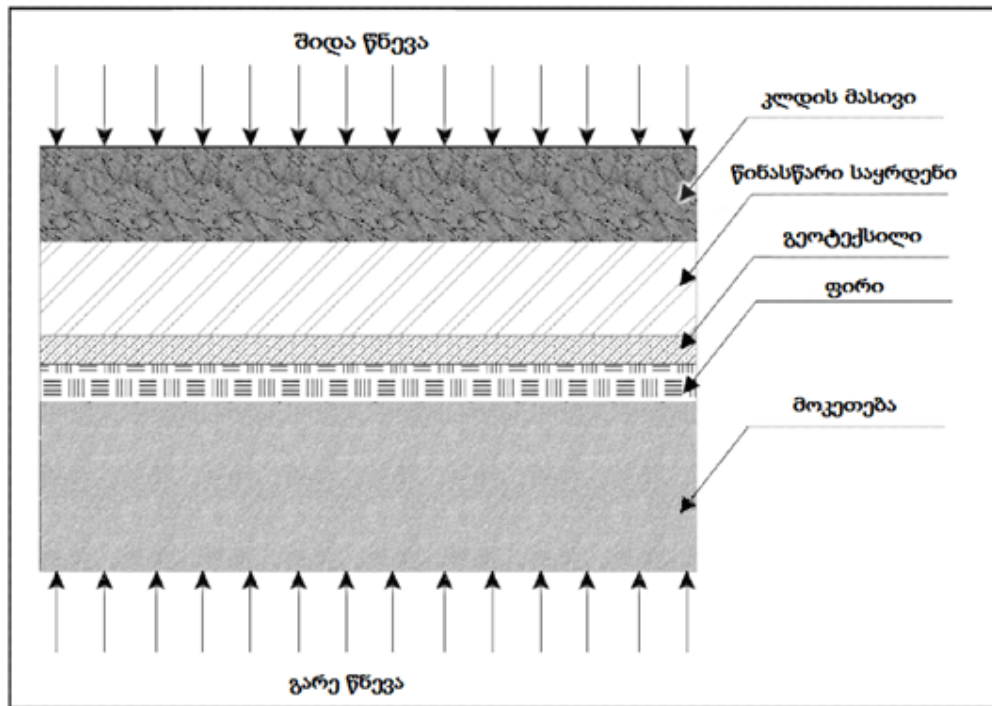
ნაშრომის მოცულობა: სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, სამი თავის, დასკვნის, ლიტერატურისაგან სიისაგან 90 დასახელებით. იგი მოიცავს 105 გვერდს. ნაშრომში წარმოდგენილია 19 ნახაზი და 5 ფოტო.

სადისერტაციო ნაშრომის შინაარსი

შესავალში: დასაბუთებულია კვლევის აქტუალობა, დასახულია კვლევის მიზანი, გადმოცემულია ნაშრომის მეცნიერული სიახლე, განხილულია ძირითადი შედეგების საიმედოობის საკითხი, ნაჩვენებია შედეგების გამოყენების სფერო.

პირველი თავი შეიცავს კვლევის საკითხისადმი მიძღვნილი ლიტერატურის მიმოხილვას ბოლო ათი წლის განმავლობაში, კრიტიკულ ანალიზს და ასევე დასმულია კვლევის ამოცანები. აღწერილია მიწისქვეშა ჰიდროტექნიკური ნაგებობების, კერძოდ გვირაბსამშენებლო

გეოტექნოლოგიის ჩამოყალიბების ისტორია, მიმდინარე კვლევები ისეთი საშენი მასალების შესაქმნელად, რომლებიც მაქსიმალურად დააკმაყოფილებენ განსაკუთრებულად არახელსაყრელ პირობებში მომუშავე მიწისქვეშა ნაგებობების კონსტრუქციებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს.

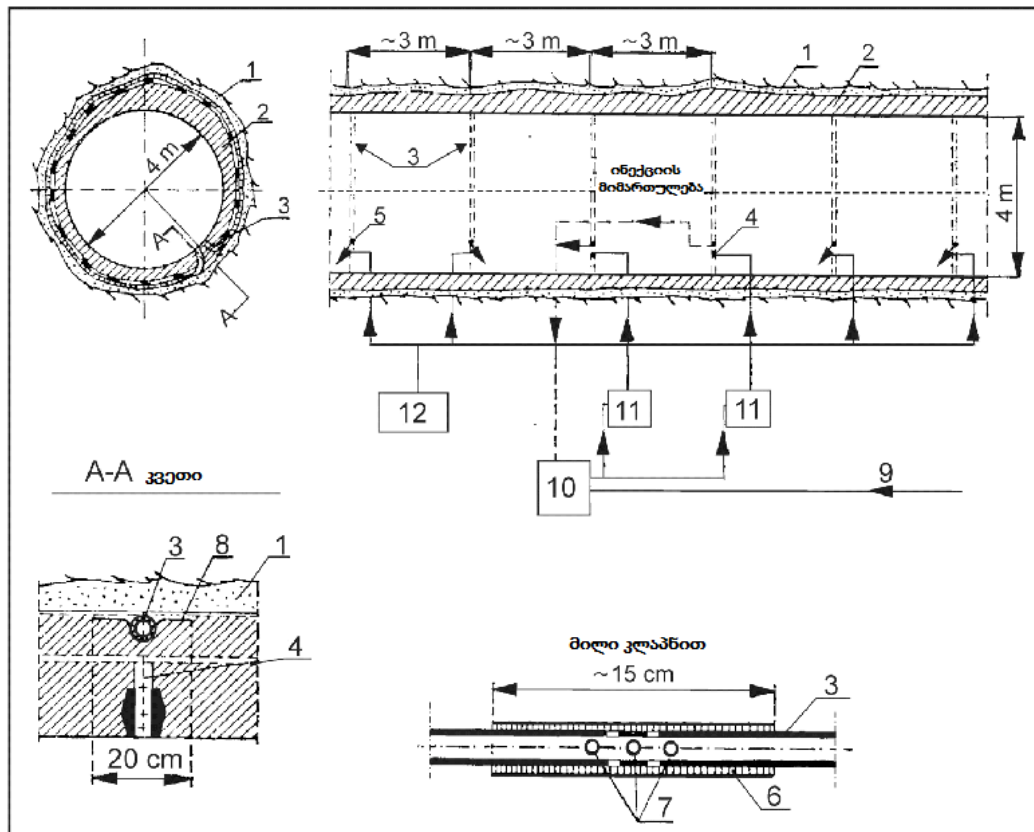


ნახ. 1. სადაწნეო ჰიდროტექნიკური გვირაბის წყალგაუმტარი გარსი

ნაჩვენებია ტორკრეტირების განვითარების ისტორია, აღწერილია გვირაბების გაყვანის ახალავსტრიული (NATM - The New Austrian Tunneling Method) ანუ ნაშხეფ-ბეტონით მათი მოპირკეთების მეთოდი (SCL – Sprayed Concrete Lining Method), ნორვეგიული მეთოდი (NMT), რომელიც ახალავსტრიული მეთოდისაგან განსხვავებით, ნაშხეფ-ბეტონში იყენებს ფიბროფოლადის დანამატებს, რომლებიც შესამჩნევად აუმჯობესებს ბეტონის თვისებებს, განსაკუთრებით გაჭიმულ ზონებში, გამაგრებული (ბოჭკოებით ან ფოლადით არმირებული) ნაშხეფ-ბეტონის სარტყლები (RRS) ანაცვლებენ გვირაბის ტრადიციულ მოკეთებებს, განსაკუთრებით სუსტი კლდოვანი ქანების შემთხვევაში. განხილულია ნაშხეფ-ბეტონის გამოყენების ეფექტურობისა და მიზანშეწონილობის უზრუნველყოფის

ფაქტორები, მონოლითური დატკეპნილბეტონით დაანკერული სამაგრის გამოყენების განვითარების ეტაპები.

აღწერილია სადაწნეო გვირაბის ჰიდროიზოლაციის ძირითადი ტრადიციული და თანამედროვე მეთოდები: ლითონის გარსით, რკინაბეტონით, ბეტონისა და PVC ფირის კომბინაციით მოკეთების ნახ.1. და მოკეთების უკან არსებულ ღიობის (სიცარიელე) ინექციის საკითხები.



ნახ. 3. საინექციო სისტემა: 1 – ნაშეფბეტონი, 2 – საბოლოო მოკეთება (ბეტონი), 3 – საინექციო არიალი, 4 – საინექციო ხვრელი, 5 – საცობი, 6 – რეზინის მანჟეტი, 7 – საინექციო ხვრელის პერფორაცია, 8 – PVC ფირი, 9 – ნარევის გამტარი სისტემა, 10 – მომრევი, 11 – საინექციო ტუმბო, 12 – წყლის ტუმბო.

ნაჩვენებია TIWAG-ის (Tiroler Wasserkraftwerke AG) მიერ შემუშავებული მეთოდის პრინციპები ნახ. 2, რომლის მიხედვითაც, ფირისა და მოკეთების მონტაჟამდე, გვირაბის კედლებზე ათავსებენ 1 მ ბიჯით პერფორირებულ პლასტმასის საინექციო მილებს, შემდეგ კი ინექციურ ნარევს მიმართავენ ამ მილებში სიცარიელისაკენ (4). რეზინის მანჟეტები (6) ჩამოცმულია მილებზე, რათა თავიდან აცილებულ იქნას ინექციის

უკუგამოდინება. ეს ოპერაცია უნდა ჩატარდეს გვირაბის წყლით შევსების პირველ ციკლში. ნარევი დაიჭირხნება ფირის უკან საინექციო არხებით (3) სანამ არ შეივსება სიცარიელე და არ მიიღწევა სავარაუდო წნევა. გვირაბის მოკეთებასა და ფირს შორის სივრცე უნდა მოეწყოს ისე, რომ არ მოხდეს ინექციის გაჟონვა გვირაბში.

ინექციის პარამეტრები და თვისებები, როგორცაა შემცველობა და სიმკვრივე უნდა შეირჩეს ნარევი, მისი წნევა და მილსადენების მდებარეობა უნდა შეირჩეს ემპირიულ საფუძველზე. ზედაპირული გვირაბის შემთხვევაში, წნევის ზღვარი მჭიდრო კავშირშია კლდის მასივში გვერდითი ჰორიზონტალური დამაბულობის მნიშვნელობასთან σ_x და არ უნდა იყოს ამ დამაბულობაზე მეტი. დასაშვებია რომ ის მერყეობდეს ვერტიკალური p წნევის 30-50%-მდე ($p = \gamma H$, სადაც γ არის კლდის მასივის კუთრი წონა და H არის სიღრმე).

ლიტერატურის მიმოხილვიდან გაკეთებულია დასკვნა, რომ არ არის სათანადოდ გამოკვლეული: გვირაბის გარემომცველი მასივისა და გვირაბის მოკეთების ერთობლივი მუშაობისას, გვირაბის სიმტკიცე და მდგრადობა, ფილტრაციული რეჟიმის გათვალისწინებით, სტატიკისა და ფილტრაციის საანგარიშო მოდელი, ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრების შეესაბამისობა წყლის ფილტრაციული ნაკადის დანაკარგებთან მიმართებაში გარემომცველ მასივში.

მეორე თავში განხილულია ფილტრაციის ამოცანების ამოხსნის ძირითადი მეთოდები და ალგორითმი სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით.

ფილტრაციული ნაკადის სტაციონალური მოძრაობა ორგანოზომილებიანი არეებისათვის აისახება კვაზიჰარმონიული დიფერენციალური განტოლებით, რომელსაც ორგანოზომილებიანი არეებისათვის აქვს სახე [85]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + Q = 0, \quad (1)$$

სადაც: φ – ფილტრაციული ნაკადის წნევა; K_x , K_y – ფილტრაციის კოეფიციენტებია ანიზოტროპიის ღერძების მიმართ; Q – ფილტრაციული

ნაკადის ხარჯია.

ზოგადად (10) განტოლების ამოხსნა სრულდება შემდეგი სასაზღვრო პირობებისათვის:

ს₁ ზედაპირზე – $\varphi = \varphi_0$;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + Q = 0. \quad (2)$$

ს₂ ზედაპირზე –

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) l_x + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) l_y + q = 0, \quad (3)$$

სადაც: l_x და l_y ზედაპირის ნორმალის მიმართულების კოსინუსებია; q – განსახილველი არის z ზედაპირზე გამავალი ნაკადის ხარჯია. s_1 და s_2 ზედაპირების გაერთიანება ქმნის განსახილველი არის სრულ ზედაპირს. თუ $q = 0$, მაშინ მეორე სასაზღვრო პირობა ღებულობს სახეს:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) l_x + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) l_y = 0. \quad (4)$$

უკანასკნელი წარმოადგენს შესაბამის ზედაპირზე წყალუქონადობის პირობას, ანუ

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0. \quad (5)$$

ექსტრემუმის ამოცანის თანახმად (10) განტოლების ამოხსნა (11) და (12) სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით შეესაბამება მოცემული ფუნქციონალის მინიმიზაციას:

$$\chi = \iiint_v \left[\frac{1}{2} \left\{ K_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right\} - Q\varphi \right] dx dy + \int_s q\varphi ds \quad (6)$$

წარმოდგენილი ფუნქციონალის მინიმიზაცია საჭიროა მოხდეს განსახილველი არის კვანძური წერტილების მნიშვნელობათა φ სიმრავლეზე (11) და (12) სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით.

ელემენტების უცნობი φ ფუნქცია მის კვანძურ მნიშვნელობებს უკავშირდება ფორმულით:

$$\{\varphi\} = [N_I, N_J, \dots, N_n] \begin{Bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{Bmatrix} = [N]\{\varphi\}^e, \quad (7)$$

სადაც: $\{\varphi\}$ და $\{\varphi\}^e$ ფუნქციის კვანძურ მნიშვნელობათა ვექტორია;

$[N]$ ელემენტის ფორმის ფუნქციაა, რომელიც აკმაყოფილებს სასაზღვრო პირობებს და უწყვეტობის პირობებს ელემენტის ფარგლებში.

მოელი სისტემის ფუნქციონალის მინიმიზაციის შედეგად ვღებულობთ:

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{u\}} = 0 = [H]\{\varphi\} + \{F\} = 0, \quad (8)$$

$$H_{ij} = \sum h_{ij}^e, \quad (9)$$

სადაც: $[H]$ – სისტემის ფილტრაციული სიხისტის მატრიცაა და მიიღება ელემენტების სიხისტის მატრიცათა გაერთიანებით,

$$h_{ij}^e = \int_v \left[\int_v [K_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + K_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y}] dx dy \right], \quad (10)$$

$\{F\}$ – სისტემის კვანძებში გამავალი ნაკადის ხარჯია,

$$F_j = \sum F_i^e,$$

$$F_i^e = \int_v Q N_i dV + \int_s q N_i dS, \quad (11)$$

$$\text{აქ } dV = dx dy.$$

სადაწნეო გვირაბიდან გარემომცველ იზოტროპულ მასივში ფილტრირებული წყლის ხარჯი განისაზღვრება დიუპუის კლასიკური ამონახსნით:

$$q = 2\pi K_\phi H / \ln(R_\phi / r), \quad (12)$$

სადაც q – გვირაბის 1 გრძ. მ-დან ფილტრირებული წყლის ხარჯია;

K_ϕ – მასივის ფილტრაციის კოეფიციენტია; H – მოქმედი დაწნევა;

r – გვირაბის რადიუსია; R_ϕ – ფილტრაციული არის რადიუსია.

ფილტრაციის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$H = q \cdot \ln(R_\phi / r) / (2\pi K_\phi). \quad (13)$$

გვირაბიდან წყლის ფილტრაციის დროს განიხილება სამი არე: მოსახვა, ცემენტაციური ზონა (ფარდა) და ძირითადი მასივი. ამ შემთხვევაში ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობათა შეჯამების მეთოდის გამოყენებით, ფილტრაციის საერთო წინააღმდეგობა შედგება თანმიმდევრულად დაკავშირებულ წინააღმდეგობათა ჯამისაგან:

$$H = H_c + H_{g.c} + H_m. \quad (14)$$

საბოლოოდ დაწნევის კარგვები განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$H = \frac{q}{2\pi} \left(\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k_c} + \frac{\ln \frac{R_{g.c}}{r_2}}{k_{g.c}} + \frac{\ln \frac{R_\phi}{R_{g.c}}}{k_\phi} \right), \quad (15)$$

სადაც r_2 და r_1 გვირაბის მოსახვის გარე და შიგა რადიუსებია; $R_{g.c}$ – ცემენტაციური ფარდის; მოსახვის, $k_c, k_{g.c}, k_m$ – ცემენტაციური ფარდის და მასივის ფილტრაციის კოეფიციენტებია შესაბამისად.

ფილტრაციული ნაკადის ჯამური ხარჯი განისაზღვრება ფორმულით:

$$Q = \frac{2\pi LH}{\frac{1}{k_c} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{k_{g.c}} \ln \frac{R_{g.c}}{r_2} + \frac{1}{k_\phi} \ln \frac{R_\phi}{R_{g.c}}}, \quad (16)$$

სადაც L – გვირაბის ან მისი უბნის სიგრძეა.

არაბზარმედეგი (ბზარების ლიმიტირებული პარამეტრებით) მოსახვის მქონე სადაწნეო გვირაბიდან ფილტრაციული ხარჯი ბეტონიდან, როგორც მცირე სიდიდე ბზარებიდან განვითარებული ხარჯის მნიშვნელობასთან შედარებით, მხედველობაში არ მიიღება.

იმ შემთხვევაში, თუ ცემენტაციური ფარად არ იქნება გათვალისწინებული დაწნევის კარგვები განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$H = H_c + H_m \quad (17)$$

სადაც H_m განისაზღვრება (8)-თი.

ბზარის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა H_c დამოკიდებულია ბზარში წყლის ჰიდრაულიკურ რეჟიმზე, რომელიც ძირითადად ლამინარულია.

უკანასკნელ შემთხვევაში ფილტრაციული ხარჯი მიიღება დარსის კანონის საფუძველზე:

$$q = n_T k_T \frac{H_T}{h_c}, \quad (18)$$

სადაც n_T – გვირაბის მოსახვის პერიმეტრზე განვითარებული ბზარების რაოდენობაა; k_T – ბზარების წყალჟონვადობის კოეფიციენტი, რომელიც გვირაბის 1 გრძ. მე გასული წყლის ხარჯია დაწნევის გრადიენტის $\frac{H_T}{h_c} = 1$

მ³/(წმ.მ) მნიშვნელობის დროს.

ბეტონში არსებული ბზარისათვის წყალჟონვადობის კოეფიციენტი-სათვის მიღებულია მისი საშუალო მნიშვნელობა:

$$k_T = 7 \cdot 10^4 \cdot a_0^3, \quad (19)$$

სადაც a_0^3 – ბზარის გახსნის სიგანეა ბეტონში.

(13)-დან განისაზღვრება H_T დაწნევის კარგვები ბზარში:

$$H_T = q \cdot h_c / (n_T k_T). \quad (20)$$

სრული ჰიდრავლიკური დანაკარგები ბზარებისა და მასივისათვის განისაზღვრება გამოსახულებით:

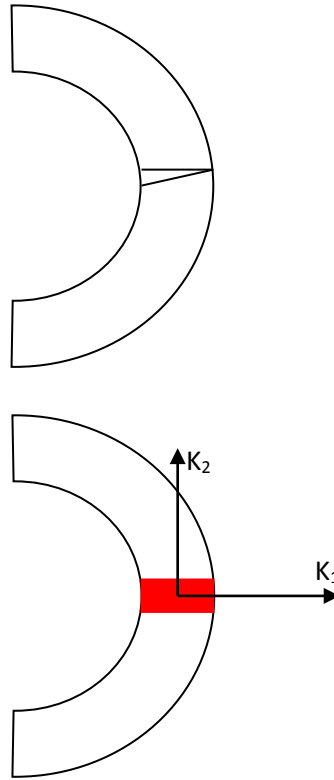
$$H = q \left(\frac{h_l}{n_T k_T c} + \frac{\ln \frac{R_\varphi}{r_2}}{2\pi k_\varphi} \right). \quad (21)$$

სრული ფილტრაციული ხარჯი განისაზღვრება ფორმულით:

$$Q = \frac{LH}{\frac{h_l}{n_T k_T c} + \frac{\ln \frac{R_\varphi}{r_2}}{2\pi k_\varphi}}. \quad (22)$$

ანიზოტროპული მასივისა და ცემენტაციური ფარდის არსებობისას წარმოდგენილი გაანგარიშებები უნდა ჩატარდეს სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით.

გვირაბის მოსახვაში ბზარებისა და ნაკერების სასრულ - ელემენტული მოდელი წარმოდგენილი იქნა სპეციალური „ნაკერის ელემენტი“-ს გამოყენებით, რომელსაც აქვს ანიზოტროპიის თვისება (ნახ. 3).



ნახ. 3. ბზარის სასრულ-ელემენტული მოდელი

ელემენტი გვირაბის ტანგენციური მიმართულებით არ მუშაობს, ხოლო რადიალური მიმართულებით მისი ფილტრაციის კოეფიციენტი განისაზღვრება ხარჯის უწყვეტობის პირობის მიხედვით:

$$K_{\varphi,e} = \frac{K_{\varphi,c} a_c}{a_e}, \quad (23)$$

სადაც: $K_{\varphi,e}$ და $K_{\varphi,c}$ – ელემენტისა და ნაკერის ფილტრაციის კოეფიციენტებია, ხოლო a_e , a_c – ელემენტისა და ნაკერის სიგანეებია შესაბამისად.

განიხილება დარსის კანონის ფარგლებში და ორგანზომილებიანი მასივისათვის სასრული ელემენტების მეთოდების გამოყენებით წარმოდგინდება შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kx \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ky \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0. \quad (24)$$

აღნიშნული განტოლების ამოხსნა ეკვივალენტურია მოცემული ფუნქციონალის მინიმიზაციისა:

$$\Phi = \int_{\nu} \frac{1}{2} \left[K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right] dx dy, \quad (25)$$

სადაც: K_x, K_y – ფილტრაციის კოეფიციენტებია ღერძების გასწვრივ;

H – დაწნევის ფუნქციაა; V – ფილტრაციული ნაკადის გავრცელების არეა.

ფუნქციონალის მინიმიზაციის დროს იძებნება უცნობი H_i ფუნქცია, რომელიც აკმაყოფილებს სასაზღვრო პირობებს.

უდაწნეო ფილტრაციის ამოცანის ამოსახსნელად კლდოვან მასივში გამოიყენება ლოკალური ვარიაციის მეთოდი, რომლის მიხედვით გამოსაკვლევი არისათვის საძიებელ ფუნქციას ენიჭება საწყისი მიახლოებითი მნიშვნელობა. H_i 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 ანალიზი 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.

სადაწნეო გვირაბისა და გარემომცველი მასივის ერთობლივი მუშაობის საკითხები, მათ შორის ენგურის სადაწნეო გვირაბის მაგალითზე. აღწერილია დერივაციული გვირაბის გარემომცველი მასივის გეოლოგიური თავისებურებები: საკმაოდ არაერთგვაროვან გეოლოგიურ გარემოში

გამავალი გვირაბის ტრასა, კარსტული ზონები გვირაბის ზედა ნახევარსა და თაღებში მილისებრი ფორმისა და ბზარების (სიმძლავრე დაახლოებით 0,5 მ) სახით.

წყალჟონვად გვირაბებში შიგა წნევის მოქმედების შედეგად მოკეთებაში გაჩენილი ბზარებიდან მასივში ვითარდება ფილტრაცია, რომელიც ქმნის დეპრესიის ზედაპირს. ბზარების პარამეტრებს განსაზღვრავს მოკეთების შიგა და გარე ზედაპირებზე მოქმედი წნევები, რომლებიც გამოწვეულია მასივში განვითარებული ფილტრაციული მოცულობითი ძალებით და გრუნტის ფიზიკო-მექანიკური მახასიათებლებით. გვირაბის შიგა ან გარე წნევების ცვლილების შედეგად ხდება ბზარების გახსნა-დახურვა და მასივში ვითარდება არასტაციონალური ფილტრაციული რეჟიმი.

გვირაბისა და გარემომცველი მასივის ერთობლივი მუშაობის შესწავლა განიხილულ იქნა სტატიკა-ფილტრაციის შეკავშირებული სქემის მიხედვით სასრულ ელემენტთა მოდელის გამოყენებით.

დასმული საკითხების შეფასება შესაძლებელია, სტატიკა-ფილტრაციის ამოცანათა (26) თანმიმდევრული ამოხსნით.

ფილტრაციის ამოცანის გადაწყვეტის შედეგად (26, ა) განისაზღვრება მასივში დეპრესიის მრუდი და ფილტრაციის ნაკადის პარამეტრები, მათ შორის დაწნევა მოკეთებაზე და ფილტრაციული მოცულობითი ძალები. დატვირთვების სიდიდის მიხედვით ამოიხსნება სტატიკური ამოცანა (26, ბ) და განისაზღვრება მასივისა და მოკეთების დამაბული მდგომარეობა (მათ შორის ბზარების რაოდენობა და გახსნა).

$$\begin{cases}
 \text{ა} & \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \chi}{\partial \{u\}} = 0 = [H]\{\varphi\} + \{F\} = 0 \\ \text{ბ} & \frac{\partial \chi}{\partial \{u\}} = [k]\{u\} + \{F\} = 0 \\ \text{გ} & P_x = -\gamma \alpha_2 \frac{\partial h}{\partial x} \\ \text{დ} & P_y = -\gamma \alpha_2 \left[\frac{\partial h}{\partial y} - (1-n) \right] \end{array} \right. \quad (26)
 \end{cases}$$

სადაც: – განტოლებები (26, ა) და (26, ბ) შესაბამისად წარმოდგენენ ფორმულებს სტატიკურ და ფილტრაციული გაანგარიშებებისათვის;

– განტოლებები (26, გ) და (26, დ) ფილტრაციის მოცულობითი ძალების ვექტორული შემადგენლები შესაბამისად X და Y ღერძებზე;

γ – წყლის მოცულობითი წონაა;

α_2 – უკუწნევის ეფექტური ფართის კოეფიციენტი;

n – მასალის ფორიანობა;

$\frac{\partial h}{\partial x}$ და $\frac{\partial h}{\partial y}$ დაწნევის გრადიენტებია x და y ღერძების მიმართულებით.

სადაც: K_x, K_y – ფილტრაციის კოეფიციენტებია ღერძების გასწვრივ;

H – დაწნევის ფუნქციაა;

სტატიკა-ფილტრაციის ამოცანათა შეკავშირებული სქემის გამოყენებით გაანგარიშებები მიმდინარეობს ციკლურ-იტერაციული თანმიმდევრობით.

გაანგარიშების პროცესი მთავრდება მაშინ, როდესაც მოკეთების რადიალური გადაადგილებები (შესაბამისად ბზარების გახსნა-დახურვა) გახდება სტაბილური, რასაც შეესაბამება ფილტრაციის სტაციონალურ რეჟიმს მასივში.

გვირაბის მოსახვაში ბზარებისა და ნაკერების სასრულ ელემენტთა მოდელი წარმოდგენილი იქნა სპეციალური ნაკერის (სასრული) ელემენტის გამოყენებით, რომელსაც აქვს ანიზოტროპის თვისება. ელემენტის წყალჟონვადობა განიხილება მხოლოდ რადიალური მიმართულებით და მისი

ფილტრაციის კოეფიციენტი განისაზღვრება ხარჯის უწყვეტობის პირობის მიხედვით:

$$K_{\phi,e} = \frac{K_{\phi,c} a_c}{a_e} \quad (27)$$

რკინაბეტონის კონსტრუქციებისათვის (ბეტონის მოკეთება, ტორკრეტი) ბზარების პარამეტრების (ბზარის გახსნა და რაოდენობა) შეფასება

სწარმოებს, როგორც ცენტრალურად, ასევე არაცენტრალურად გაჭიმული კვეთებისათვის.

ბზარებს შორის არმატურის დეფორმაციები და ძაბვები არათანაბარია. ბზარებს შორის ბეტონის არათანაბარი დეფორმაცია და შესაბამისად რკინაბეტონის არათანაბარი დეფორმაცია და ძაბვები განისაზღვრება ψ_s კოეფიციენტით:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s e} &= \psi_s \varepsilon_s \\ \sigma_{s e} &= \psi_s \sigma_s \end{aligned} \quad (28)$$

ფოლადის არმატურას ბეტონთან შეჭიდებისას უფრო მაღალი დეფორმაციის მოდული გააჩნია:

$$E_{s c} = \operatorname{tg} \alpha_c = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} = \frac{\sigma_s}{\psi_s \varepsilon_s} = \frac{E_s}{\psi_s} . \quad (29)$$

ψ_s კოეფიციენტი შემდეგი ფორმულით განისაზღვრება, როგორც არმატურის ძაბვის ეპიურის ფარდობა ბზარებს შორის მანძილთან:

$$\psi_s = \frac{\sigma_s l_c - \omega_0 \sigma_{s 2} l_c}{\sigma_s l_c} = 1 - \omega_0 \frac{\sigma_{s 2}}{\sigma_s} \quad (30)$$

ზემოთ განხილულ ბზარის გახსნის (σ_c) სიდიდე და ბზარებს შორის მანძილი (l_c) განისაზღვრება დამოკიდებულებებით:

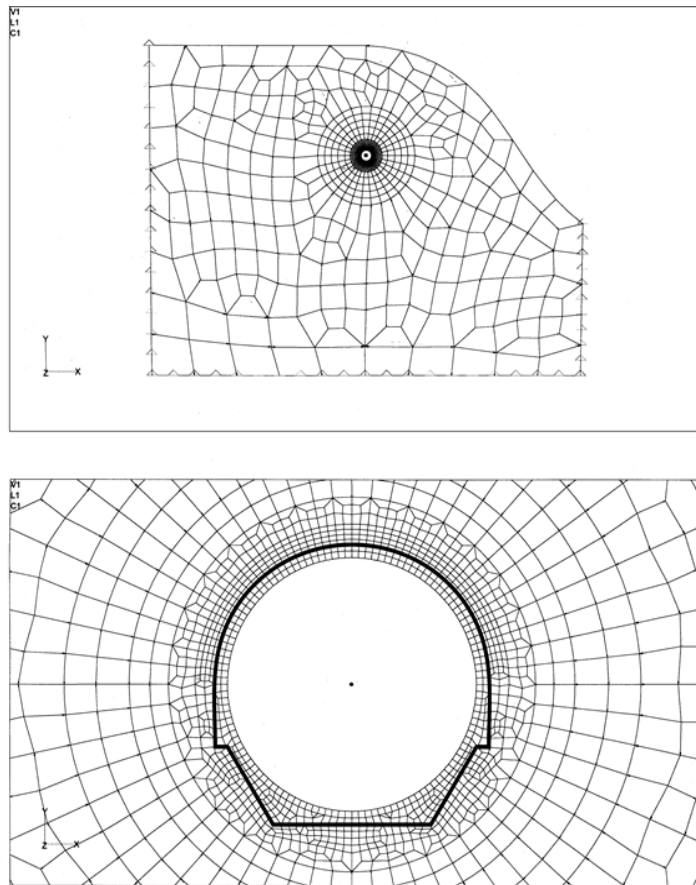
$$\begin{aligned} l_c &= \frac{U_s}{\mu_1} \eta \\ a_c &= \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_c \end{aligned} \quad (31)$$

სადაც:

$$\eta = \frac{R_c}{\tau}, \quad U = \frac{F_B}{S}, \quad \mu_1 = \frac{F_B}{F_c} \quad (7)$$

შეიქმნა „გვირაბიმასივი“ სისტემის საანგარიშების მოდელი (ნახ. 4). ეს მოდელი მოიცავს 2011 მარტუთხა 8-ერთეულიანი ზოპარამეტრულ ელემენტს, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია 5465 შეერთების წერტილში. გვირაბის სისქე 2 ფენიანია. მოდელი მოიცავს ბეტონით მოკეთებასა და ცემენტაციურ ფარდას (სისქით 6.0 მ). კლდოვანი მასივის

ზომები მოცემულია ისე, რომ გარე კონტურზე არსებული სასაზღვრო პირობები გავლენას არ ახდენს საკვლევ არიალზე.



ნახ. 4. გვირაბისა და კლდის ურთიერთქმედების სისტემა

გვირაბის შიდა ზედაპირი მოკეთებულია ტორკრეტით, გამაგრება-თაღოვანი ელემენტების სახით, რომელთა სიხისტე დამოკიდებულია არმატურისა და ტორკრეტის ზომებზე და მექანიკურ თვისებებზე. თაღის ელემენტებსა და იზოპარამეტრულ ელემენტებს შორის უზრუნველყოფილი უნდა იყოს წყვეტილი კავშირი.

გარემომცველი მასივის საკუთარი ძაბვები არ არის გათვალისწინებული. ფილტრაციული წნევების გაანგარიშება ჩატარებული იქნა გარემომცველი მასივის ანიზოტროპიის გათვალისწინებით.

გაანგარიშების დროს გათვალისწინებული იქნა გვირაბის ზომები და ფიზიკური და მექანიკური პარამეტრები: შიდა რადიუსი – 4,75 მ, გარე

რადიუსი – 5,25 მ, ტორკრეტის სისქე – 0,12 მ, დაწნევა გვირაბში – 140.0 მ, გარემომცველი მასივის ფილტრაციის კოეფიციენტები: (ღერძის გასწვრივ და ანიზოტროპიის განივად) $K_1=10^{-5}$ მ/წმ, $K_2=1,5 \cdot 10^{-5}$ მ/წმ, ბეტონის მოკეთების – $K_c=10^{-8}$ მ/წმ, ანიზოტროპიის ღერძის კუთხე ჰორიზონტთან $\beta = 42^\circ$; დრეკადობის მოდული:

გარემომცველი მასივის $E_r=8000$ მპა, ბეტონი - $E_c=25000$ მპა.

ფილტრაციის არიალის და ფილტრაციული ნაკადის დანაკარგების შესაფასებლად განხილული იყო შემთხვევა, როდესაც არ იყო გათვალისწინებული გვირაბის მოკეთება და ცემენტაციური ფარდა. გაანგარიშებიდან მიღებული იქნა შედეგები: მასივში ფილტრაციის ზონა ვრცელდება 50 მ სიმაღლეზე, 100 მ სიგრძის და მაქსიმალური ფილტრაციის ხარჯი არის 1,90 ლ/წმ, რაც შეესაბამება ფილტრაციის დანაკარგის მიღებულ მნიშვნელობას. უნდა აღინიშნოს, რომ თეორიული გაანგარიშების შედეგები შეესაბამება გვირაბის თავზე ფილტრაციული წყლების გავრცელების დონეს. ეს მიუთითებდა იმ ფაქტზე, რომ არსებული ცემენტაციური ფარდა დაშლილია და ამჟამად იგი პრაქტიკულად არ ახდენს გავლენას ფილტრაციულ რეჟიმზე.

გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა:

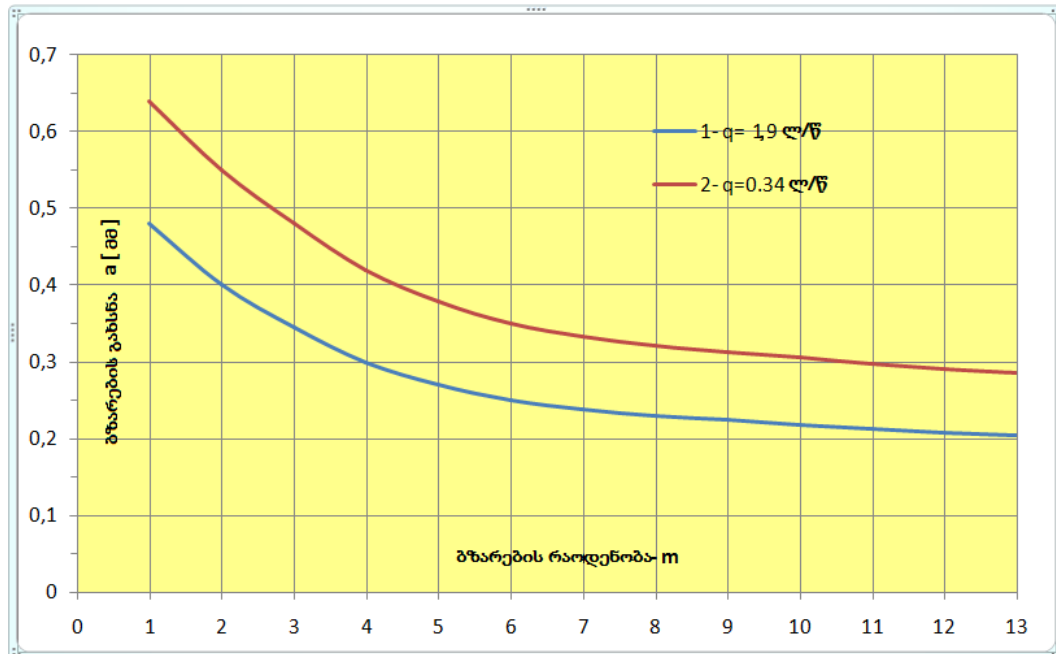
მხოლოდ ბეტონის მოკეთების არსებობის გათვალისწინებით (ცემენტაციური ფარდის გარეშე).

მიღებული იქნა შედეგები საანგარიშო პარამეტრები: გვირაბის მოკეთების ბზარების მაქსიმალური რაოდენობა $m=5$, ბზარების საშუალო გახსნა $a=0.4$ მმ, დაწნევის კარგვა გვირაბის მოკეთების შიდა და გარე ზედაპირებს შორის $h=4.9$ მ.

ნახ. 5-ზე წარმოდგენილია მრუდი, რომელიც საშუალებას იძლევა გამოვთვალოთ პოტენციური ბზარების რიცხვის და მათი გახსნის სხვადასხვა ვარიანტები მაქსიმალური ფილტრაციული ხარჯისას (1.9 ლ/წმ) (ცემენტაციური ხარჯის გარეშე).

ბეტონის მოკეთების არსებობისა და 6 მ სისქის ცემენტაციური ფარდის (ფილტრაციის კოეფიციენტით $K=10^{-6}$ მ/წმ) გათვალისწინებით.

განგარიშების შედეგად ფილტრაციული არის გავრცელებამ მასივში შეადგინა სიმაღლეში 10 მ და 16 მ სიგრძე.



ნახ. 5. ფილტრაციის ნაკადის ხარჯი ბეტონის მოკეთებაში არსებული ბზარების გათვალისწინებით. 1 – ბეტონის მოკეთება ($q = 1,9$ ლ/წმ); 2 – ბეტონის მოკეთება ცემენტაციურ ფარდასთან ერთად ($q = 0,34$ ლ/წმ).

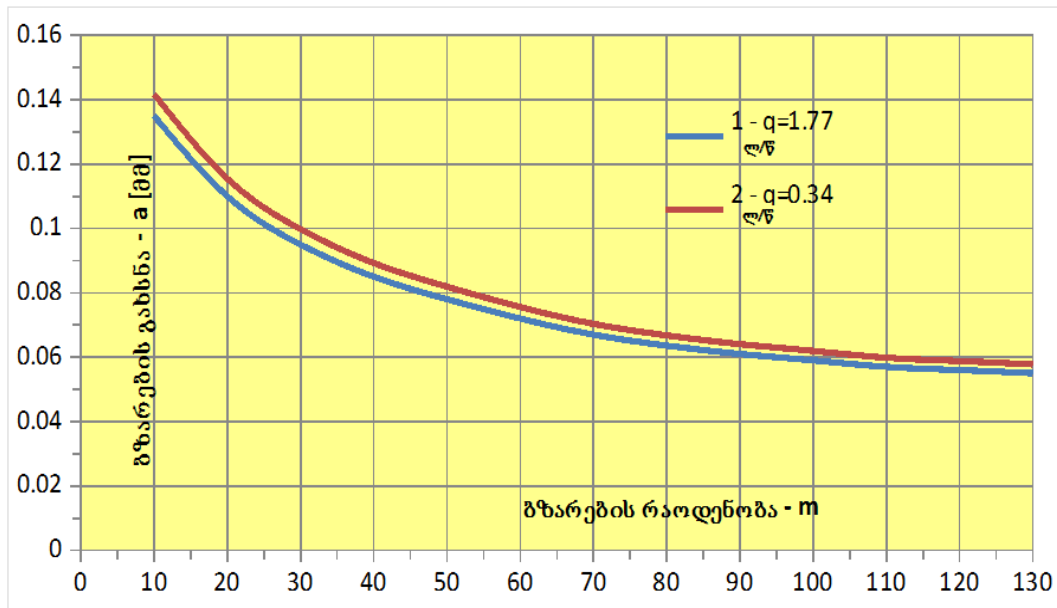
მიღებული იქნა შედეგები საანგარიშო პარამეტრები: ფილტრაციის ნაკადის ხვედრითი ხარჯი – $q_1=0,34$ ლ/წმ, ბზარების რაოდენობა - $m_1=4$, ბზარების საშუალო გახსნა – $a_1=0.3$ მმ, დაწნევის კარგვა – $h_1=2.1$ მ.

ნახ. 5-ზე წარმოდგენილია მრუდი, რომელიც საშუალებას იძლევა გამოვთვალოთ პოტენციური ბზარების რიცხვის და მათი გახსნის სხვადასხვა ვარიანტები, როდესაც $q = 0,34$ ლ/წმ (ცემენტაციური ფარდით).

გვირავი ბეტონის მოკეთებითა და ტორკრეტით. გამოთვლების შედეგად მიღებული იქნა შემდეგი შედეგები: ფილტრაციის ნაკადის ხვედრითი ხარჯი – $q_2=1,77$ ლ/წმ, ბზარების რაოდენობა - $m_2=119$, ბზარების საშუალო გახსნა – $a_2=0,06$ მმ, დაწნევის კარგვა – $h_2=11$ მ (8%).

ნახ. 6-ზე წარმოდგენილია ბზარების პოტენციურ რაოდენობასა და მათი გახსნის მნიშვნელობებს შორის დამოკიდებულების მრუდი.

გამოთვლების შედეგად მიღებული იქნა შემდეგი შედეგები: ფილტრაციული ნაკადის ხარჯი – $q_2=0,34$ ლ/წმ, ბზარების რაოდენობა – $m_2=119$, ბზარების საშუალო გახსნა – $a_2=0,056$ მმ, დაწნევის კარგვა – $h_2=2.5$ მ (1.7%).



ნახ. 6 ფილტრაციის ნაკადის ხარჯი ტორკრეტის ბზარების გათვალისწინებით.

1 – ტორკრეტით ($q = 1,77$ ლ/წმ); 2 – ტორკრეტით და ცემენტაციური ფარდით ($q = 0,34$ ლ/წმ).

ამდენად, ტორკრეტი ფაქტობრივად გავლენას ვერ ახდენს ფილტრაციული ნაკადის ხარჯზე, ცემენტაციური ფარდის გამოყენებისას. ასევე, ბზარების გახსნა ტორკრეტში ასევე უცვლელი რჩება, მაგრამ ტორკრეტში დაწნევის დანაკარგი მცირდება 7 %-ით.

გაუმაგრებელი გვირაბის ირგვლივ ქანის მასივში მცირე სიხშირის (გრძელი) სეისმური ტალღის გავლისას წარმოშობილი ძაბვების კონცენტრაციის შესაფასებლად გამოიყენება დრეკადობის თეორიის ორი ბრტყელი კვაზისტატიკური ამოცანის ამონახსნის სუპერპოზიცია (შეკრება). ეს ამოცანებია: გვირაბის განივკვეთის ფორმის შესაბამისი ხვრელით შესუსტებული სიბრტყის დაძაბული მდგომარეობის შეფასება, როდესაც მის

უსასრულო საზღვრებზე მოქმედებენ გრძივი ტალღის შესაბამისი კუმშვა-გაჭიმვის $\sigma_x^{(\infty)}$, $\sigma_y^{(\infty)}$ და განივი ტალღის შესაბამის ძვრის $\tau_{xy}^{(\infty)}$ ძაბვები.

ვთქვათ, გრძივი ტალღის გავრცელების მიმართულება შეადგენს α კუთხეს სტატიკური ველის მთავარი მაქსიმალური ძაბვების მოქმედების დერძთან, რომლიდანაც ვაწარმოებთ მასივის ნებისმიერი წერტილის პოლარული კოორდინატის ათვლას. განვიხილოთ ორი ამოცანა:

პირველი ამოცანის სასაზღვრო პირობა, რომელიც გამოხატავს გვირაბის ირგვლივ მასივის კუმშვას (გაჭიმვას), ჩაიწერება ასე:

$$\sigma_{x'}^{(\infty)} = P_b; \quad \sigma_{y'}^{(\infty)} = \lambda P_b, \quad (33)$$

სადაც

$$P_b = \pm \frac{1}{2\pi} k_b \gamma c_1 T_0; \quad \lambda = \frac{\mu_0}{1 - \mu_0}. \quad (34)$$

მეორე ამოცანის სასაზღვრო პირობა გამოხატავს მასივის სუფთა ძვრას უსასრულო საზღვრებზე მოქმედი მხები ძაბვებით

$$\tau_{x'y'}^{(\infty)} = Q_b = \pm \frac{1}{2\pi} k_b \gamma c_2 T_0. \quad (35)$$

პირველი კვაზისტატიკური ამოცანის ამონახსნები, ანუ გრძივი გრძელი ტალღის გვირაბზე გავლის შესაბამისი კუმშვა-გაჭიმვის ძაბვებით წარმოშობილი სეისმური რადიალური, წრიული და მხები ძაბვების გამოსახულებები, რომლებიც სასაზღვრო პირობების თვალსაჩინო მსგავსების გამო ფაქტიურად ემთხვევიან R -რადიუსიანი წრიული გვირაბის ირგვლივ სტატიკური ძაბვების კონცენტრაციის აღმწერ ფორმულებს, სტატიკური და დინამიკური ძაბვების მიმართულებით შორის რაიმე α კუთხის არსებობის შესაძლებლობის გათვალისწინებით ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\sigma_r(P) = \frac{P_b}{2} \left[(1 + \lambda) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + (1 - \lambda) \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2(\theta - \alpha) \right]; \quad (36)$$

$$\sigma_\theta(P) = \frac{P_b}{2} \left[(1 + \lambda) \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - (1 - \lambda) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2(\theta - \alpha) \right]; \quad (37)$$

$$\tau_{r\theta}(P) = \delta = \frac{q_H}{q_B} \rightarrow 1 (1 - \lambda) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \sin 2(\theta - \alpha). \quad (38)$$

მეორე ამოცანის ამოხსნა იძლევა სუფთა ძვრის სასაზღვრო პირობების შესაბამისი, ანუ განივი ტალღის გვირაბზე გავლით გამოწვეული სეისმური ძაბვების კომპონენტების გამოსახულებებს:

$$\sigma_r(Q) = -Q_b \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right) \sin 2(\theta - \alpha); \quad (39)$$

$$\sigma_\theta(Q) = Q_b \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2(\theta - \alpha); \quad (40)$$

$$\tau_{r\theta}(Q) = -Q_b \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos 2(\theta - \alpha). \quad (41)$$

გრძივი ტალღის შესაბამისი წრიული ძაბვები გვირაბის კონტურზე განისაზღვრება ფორმულით

$$\sigma_\theta(P) = P_b [1 + \lambda - 2(1 - \lambda)\cos 2(\theta - \alpha)], \quad (42)$$

ხოლო გვირაბის კონტურზე მოქმედი განივი ტალღის შესაბამისი წრიული ძაბვების განმსაზღვრელი ფორმულა კი ღებულობს სახეს

$$\sigma_\theta(Q) = 4Q_b \sin 2(\theta - \alpha). \quad (43)$$

როგორც აღვნიშნეთ, გვირაბებზე მოსალოდნელი დინამიკური დატვირთვის მავნე ზეგავლენის შესაფასებლად საკმარისი არ არის ცალკე გრძივი და განივი სეისმური ტალღებით გამოწვეული ძაბვების ცოდნა. ამისთვის საჭიროა მის ნებისმიერ წერტილში მაქსიმალური ჯამური ძაბვების დადგენა გრძივი და განივი ტალღების ყველაზე არახელსაყრელი კომბინაციისას, მათი ერთდროული მოქმედებისას და ბოლოს მათი შეკრება მასივში მოქმედი სტატიკური ველის შესაბამის ძაბვასთან.

სეისმური ძაბვების ნიშანცვალებადობის გამო გვირაბის კონტურზე მოქმედი გრძივი ტალღების შესაბამისი ძაბვების შეკრებისას შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ოთხ შემთხვევას:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_\theta(P) + \sigma_\theta(Q); & \sigma_2 &= \sigma_\theta(P) - \sigma_\theta(Q); \\ \sigma_3 &= -\sigma_\theta(P) - \sigma_\theta(Q); & \sigma_4 &= -\sigma_\theta(P) + \sigma_\theta(Q). \end{aligned}$$

ცხადია, აბსოლუტური მნიშვნელობით მაქსიმალური ძაბვა კონტურზე მიიღება გრძივი და განივი ტალღების შესაბამისი ერთნაირი ნიშნის ძაბვების შეკრებისას, ანუ თუ სრულდება პირობა

$$|\sigma_\theta(P) + \sigma_\theta(Q)| > \begin{cases} |\sigma_\theta(P)|, \\ |\sigma_\theta(Q)|. \end{cases}$$

ან სხვადასხვა ნიშნის ძაბვებისას, თუ

$$|\sigma_\theta(P) - \sigma_\theta(Q)| > \begin{cases} |\sigma_\theta(P)|, \\ |\sigma_\theta(Q)|. \end{cases}$$

გვირაბის კონტურზე მოქმედი ჯამური სეისმური ძაბვების გამოსახულება მიიღება (37) და (38) გამოსახულებების შეკრებით:

$$\sigma_{\theta(b)} = P_b [1 + \lambda - 2(1 - \lambda)\cos 2(\theta - \alpha) + \tilde{Q} \sin 2(\theta - \alpha)], \quad (44)$$

სადაც შემოღებულია აღნიშვნა

$$\tilde{Q} = \frac{Q_b}{P_b} = \frac{c_2}{c_1}, \quad (45)$$

იგი დამოკიდებულია გრძივი და განივი ტალღების გავრცელების სიჩქარეზე. თუ ამოვხსნით ექსტრემუმის ამოცანას, აღმოჩნდება, რომ ჯამური სეისმური ძაბვა მაქსიმალურ მნიშვნელობას ღებულობს წრიული გვირაბის კონტურის წერტილში, რომლის პოლარული კუთხე, ათვლილი სტატიკური ველის მთავარი მაქსიმალური ძაბვების მოქმედების ღერძიდან, გამოსახება შემდეგნაირად

$$\theta = \alpha - \frac{1}{2} \operatorname{Arctg} \frac{2\tilde{Q}}{1 - \lambda}. \quad (46)$$

ამ კუთხის განსაზღვრისას შერჩეულ უნდა იქნეს შებრუნებული ტრიგონომეტრიული ფუნქციის ის მნიშვნელობა, რომლის დროსაც ფორმულის ყველა წევრი დადებითი ნიშნის იქნება.

წრიული კვეთის გვირაბის კონტურზე მაქსიმალურ სეისმური ძაბვების ადგილი და შესაბამისად მათი ინტენსივობაც სხვა, ცნობილი პარამეტრების გარდა, მნიშვნელოვანწილადაა დამოკიდებული α კუთხეზე, რომელსაც

ერთმანეთთან ადგენენ სტატიკურ და დინამიკურ ძაბვათა ველების მთავარი სიბრტყეები. როგორც აღნიშნული იყო ამ უკანასკნელთა საჭირო სიზუსტით წინასწარ ცოდნა ხშირ შემთხვევებში შეუძლებელია. ამიტომ, გვირაბის ირგვლივ სტატიკური და დინამიკური წარმოშობის ძაბვების ერთობლივი კონცენტრაციის მოსალოდნელი მავნე ზეგავლენის შესაფასებლად წინასწარ კონტურის ყოველ წერტილში ნებისმიერი α -სათვის უნდა განისაზღვროს სეისმური ძაბვების ექსტრემალური მნიშვნელობები და შეიკრიბოს ისინი სტატიკური ძაბვების შესაბამის კომპონენტებთან. ამრიგად, მიღებული წრიული ძაბვების ეპიურა გამოსახავს არა სტატიკური და დინამიკური დატვირთვების რაიმე ერთ კონკრეტულ კომბინაციას, არამედ გვირაბის კონტურზე ძაბვების არახელსაყრელი განაწილების ყველა შესაძლო შემთხვევის ჯამს.

გვირაბის სამაგრი გრძივი და განივი ტალღებისგან გამოწვეული დინამიკური ძაბვების დასადგენად საჭიროა ორი კვაზისტატიკური საკონტაქტო ამოცანის ამოხსნა გამაგრებულხვრელიანი სიბრტყისათვის, რომლის უსასრული საზღვრებზე მყისიერად და ერთდროულად მოქმედებენ კუმშვა-გაჭიმვისა და ძვრის ძაბვები, რომელთა მიმართულებები სტატიკური ველის მთავარ სიბრტყეებთან შეადგენენ რაიმე α კუთხეს.

პირველი ამ კვაზისტატიკური ამოცანებიდან, ანუ გრძივი გრძელი ტალღის წრიული კვეთის გამაგრებულ გვირაბზე გავლისას სამაგრში წარმოშობილი შიგა ძაღვების განსაზღვრის ამოცანა სასაზღვრო პირობების იდენტურობის გამო ფაქტიურად ემთხვევა გვირაბზე წმენდითი სამუშაოების გავლენის შედეგად წარმოშობილი დამატებითი ძაბვების განსაზღვრის იმ კერძო შემთხვევას, როდესაც დამატებით ძაბვების მოქმედების დრო იმდენად მცირეა, რომ ისინი იწვევენ „სამაგრი-მასივის“ სისტემის მხოლოდ დრეკად დეფორმაციებს და დამატებითი რეოლოგიური პროცესები რეალიზაციას ვერ ასწრებენ.

განივი სეისმური ტალღით გამოწვეული შიგა ძაღვების განმსაზღვრელი ფორმულები მიიღება მეორე საკონტაქტო ამოცანის

ამოხსნით გამაგრებული ხვრელიანი სიბრტყისათვის, რომლის უსასრულო საზღვრებზე მოქმედებენ ძვრის ძაბვები.

წრიულისაგან განსხვავებული განივკვეთის ფორმის გვირაბის სამაგრზე გრძელტალღიანი სეისმური დატვირთვების ზემოქმედების შეფასების ამოცანა აგრეთვე მიიყვანება დრეკადობის თეორიის ბრტყელ საკონტაქტო ამოცანებამდე კონფორმულ გარდასახვათა მეთოდების გამოყენებით. ეს ამოცანები ხასიათდება მნიშვნელოვანი სირთულით და მათი კერძო მაგალითების დათვლა შესაძლებელია მხოლოდ პროგრამულად.

რაც შეეხება მაღალი სიხშირის სეისმურ ზეგავლენებს, ანუ მიწისქვეშა ნაგებობაზე დინამიკური ძაბვების ზემოქმედებას, რომელთა ტალღების ფარდობითი სიგრძე $d/\lambda < 0,333$ მათი შეფასების მეთოდები ჯერჯერობით შედარებით სუსტადაა დამუშავებული და მომავალი შესწავლის საგანს წარმოადგენს.

ჩატარებული გამოკვლევათა შედეგები საშუალებას იძლევიან გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები

1. გვირაბისა და გარემომცველი მასივის ერთობლივი მუშაობისას, სტატიკის და ფილტრაციის საკითხების საანგარიშო მოდელის შესაქმნელად, გამოყენებულ იქნა სასრული ელემენტების მეთოდი. ეს მოდელი საშუალებას იძლევა გაანგარიშებული იქნას ახალი ან რეაბილიტირებული სადაწნეო გვირაბი არაბზარმდეგი მოკეთებით ბზარების (ბზარების რაოდენობა და ბზარების გახსნა) შეზღუდული პარამეტრებით და თანმდევი ფილტრაციული დანაკარგებით. გაანგარიშების გამოყენებულ მოდელს გააჩნია სასრული ელემენტების მეთოდის დამახასიათებელი ყველა მიდგომა და საშუალებას იძლევა გავითვალისწინოთ სხვადასხვა სცენარი, განსხვავებული გეოლოგიით, ძაბვებით და საინჟინრო პარამეტრებით.
2. ენგურჰესის სადაწნეო გვირაბის გაანგარიშებებით მიღებული იქნა შემდეგი რეზულტატები:

- თეორიული გაანგარიშებით მიღებული ფილტრაციული ნაკადის პარამეტრები შეესაბამება წყლის ფილტრაციული ნაკადს და დანაკარგებს გარემომცველ მასივში. ეს მიუთითებს იმ ფაქტზე, რომ არსებული ცემენტაციური ფარდა გამოსულია მწყობრიდან და არ უწევს წინააღმდეგობას ფილტრაციას;
 - ტორკრეტის გამოყენება, შეავსებს ბევრი წვრილ ბზარს, გააუმჯობესებს გვირაბის საერთო მდგომარეობას, მოკეთებაში არსებული გადაბმების და დიდი ბზარების ტორკრეტირების ხარჯზე. ამ შემთხვევაში ფილტრაციული ნაკადი შემცირდება 7%-ით;
 - ცემენტაციური ფარდის რეაბილიტაცია საპროექტო რადიუსის შესაბამისად უზრუნველყოფს ფილტრაციისკოეფიციენტის – $K=10^{-6}$ მ/წმ და მნიშვნელოვნად შეამცირებს ფილტრაციულ დანაკარგებს (82%-ით);
 - დაცლილი გვირაბის შემთხვევაში, ცემენტაციის არარსებობისას, როდესაც ტორკრეტზე არსებობს ბზარების მცირე გახსნა, ბეტონის ნაშხეფზე ფილტრაციული დაწნევის მნიშვნელობა მაღალია, რაც მის მთლიანობას ემუქრება;
 - იმ შემთხვევისთვის, როდესაც ტორკრეტი მუშაობს ცემენტაციურ ფარდასთან ერთად ფილტრაციული დაწნევა ტორკრეტზე საგრძნობლად მცირდება და ამ დროს მისი მდგრადობა დამაკმაყოფილებელია, რაც პრობლემის საუკეთესო გადაწყვეტაა;
3. სტატიკურ და დინამიკური დატვირთვების ერთდროულად ზემოქმედების ანალიზი შეიძლება ჩატარდეს ერთგვაროვან, იზოტროპულ ან ანიზოტროპულ მასივში გაყვანილი, ერთი ან რამდენიმე გაუმაგრებელი, პრაქტიკულად ნებისმიერი ფორმის (განივკვეთის), გვირაბის, შემთხვევაში დრეკადობის თეორიის ბრტყელი ამოცანების ამოხსნის ნ. მუსხელიშვილის მიერ დამუშავებული მეთოდის მეშვეობით.
4. ჰიდროტექნიკური და ჰიდრომელიორაციული დარგების განვითარება მჭიდროდაა დაკავშირებული დერივაციული გვირაბების პროექტირებასთან და მის შემდგომ ექსპლუატაციასთან. ასევე ექსპლუატაციაში მყოფი ობიექტები ხასიათდება გაზრდილი ბზარიანობით და თანმდევი

ვილტრაციული დანაკარგებით, რაც შესაბამისად მოითხოვს რეაბილიტაციას.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ ნაშრომებში:

1. Kalabegishvili M., Kipiani G., Buachidze A.. Seepage analysis of a nonresistance pressure tunnel lining. International Scientific Journal “Problems of Mechanics” 4(85). Tbilisi, 2021.p.p. 35-44.
2. ა. ბუაჩიძე. ვილტრაციული ნაკადის ზემოქმედების გათვალისწინებით გვირაბების მდგრადობის საკითხები. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა“, №3 (59) თბილისი 2021. გვ. 38-41.
3. Alexander Buachidze. The concentration of seismic stress unreinforced Around the tunnels. // Moambe, XLII, Tbilisi 2021, p.p. 64-69.
4. Buachidze Al. Investigation of flat boundary problems of elongation by the theory of nonlinearity for the circular segment by the method of analytical continuity. The international and Technical conference “Problems of Engineering”. BOOK OF ABSTRACTS, Edited by Gela Kipiani. Yerevan University of International Relations named after A. Shirakatsi Yerevan – Republic of Armenia, May 20-22, 2022.p.17.
5. David Curgenidze, Cela Kipiani, Alexander Buachidze. Calculation of seismic impact on arch and dome dams. The international and Technical conference “Problems of Engineering”. BOOK OF ABSTRACTS, Edited by Gela Kipiani. Yerevan University of International Relations named after A. Shirakatsi Yerevan – Republic of Armenia, May 20-22, 2022. p. 24.
6. ალექსანდრე ბუაჩიძე. სეისმური დატვირთვების ზემოქმედება ქანის მასივთან ერთობლივი დეფორმაციის რეჟიმში მყოფი გვირაბის სამაგრ კონსტრუქციაზე საერთაშორისო რეფერირებული და რეცენზირებადი

Summary

Seepage occurring from cracks developed under operational loads in concrete or reinforced concrete in non-crack-resistant pressure tunnels has an adverse impact both on the rock massif and tunnel lining. This report documents the methodology that has been used for combining static and seepage parameters with the use of finite element method (FEM).

Based on cycle-iteration calculations crack development and accompanying seepage flow parameters have been determined to reflect the interaction between the rock and the tunnel lining (concrete or reinforced concrete). The calculation process is over when the radial motions of lining (accordingly, opening-closing of cracks) become stable, to which corresponds stationary seepage regime in massif. The report presents a general calculation model and certain results obtained during the investigation of the Enguri HPP Pressure Tunnel.

Different calculation stages and some results are given below for two options: tunnel with concrete lining (existing option) and tunnel with reinforced shotcrete (a rehabilitation option). During these calculations, consideration was also given to the potential use of the cement-grout curtain. For operational loads the following parameters have been considered: hydrostatic pressure on the inner tunnel surface and uplift forces within the rock massif. Natural stresses in rock have not been taken into account. The anisotropy of the rock massif has been taken into consideration for seepage calculations.

Criteria for estimating the concentration of stress generated during a low-frequency (long) seismic wave in a rock mass around an unreinforced tunnel are applied to the superposition of the solution of two flat quasistatic problems in the theory of elasticity, when on the borders of the infinite act pressing tension longitudinal wave and the wave of transverse shear stresses.

It is not sufficient to know the stresses caused by longitudinal and transverse seismic waves separately to estimate the adverse effects of the expected dynamic load on the tunnel. For this, it is necessary to determine the maximum total stress at any of its points in the most unfavorable combination of longitudinal and

transverse waves, their simultaneous action, and finally their assembly with the corresponding stress of the static field acting in the array.

The corresponding stresses reinforced tunnel for static loads are given to assess the simultaneous effect of static and dynamic loads, to which it is necessary to add the maximum stresses caused by longitudinal and shear waves in the most unfavorable combination from the point of view of strength and stability of the reinforced tunnel.

As a result of solving filtration task, the parameters in the investigating area have been determined: pressures, pressure gradients, velocities, quantity and filtration volumetric forces. Their calculation is of great importance, on the one hand, for suffosion processes and water losses, and on the other hand, for determining the forces acting on surrounding rock massif and constructions.