

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

მიხეილ სანიკიძე

კაშხლისა და ფუძის მდგრადობის ანალიზი

ექსპლუატაციის პერიოდში

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0732

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი

დისერტაციის

ავტორ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2022 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში

მშენებლობის ფაკულტეტი

ჰიდროინჟინერიის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი:

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი მირიან ყალაბეგიშვილი

რეცენზენტი:-----

რეცენზენტი:-----

დაცვა შედგება 2022 წლის 18 ივლისს, 11:00 საათზე,

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და

საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე,

კორპუსი I, აუდიტორია 508

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი: დემური ტაბატაძე

სამეცნიერო თემის აქტუალობა

ჰიდროენერგეტიკულ და ჰიდრომელიორაციულ მშენებლობას წამყვანი ადგილი უკავია ქვეყნის ეკონომიკურ განვითარებაში. გასათვალისწინებელია, რომ საქართველო წყლის რესურსებით მდიდარი ქვეყანაა, რაც სამომავლოდ ბევრ სასიკეთო პერსპექტივებს სახავს ამ მიმართულებით.

კაშხლებს, როგორც ყველაზე საპასუხისმგებლო წყალშემტბორავ ნაგებობებს, წამყვანი ადგილი უკავია ჰიდროკვანძებში. საშუალო და მაღალდაწნევიანი ობიექტების შემთხვევაში, კაშხლები ყველაზე უფრო მეტად ძვირადღირებული ნაგებობებია და მათი გამართული მუშაობა მნიშვნელოვან წილად განსაზღვრავს მთლიანად ჰიდროკვანძების საიმედოობას. კაშხლების სიმტკიცისა და მდგრადობის პირობები პროექტირების წამყვანი საკითხებია, ხოლო ექსპლუატაციის პერიოდში კი, ნაგებობათა საიმედოობაზე კონტროლი ხორციელდება ინსტრუმენტული გაზომვებისა და შესაბამისი კვლევების გზით.

ბეტონის წყალშემტბორავ ნაგებობათა შორის ერთ-ერთ ტრადიციულ და ფართოდ გავრცელებულ სახეს წარმოადგენს გრავიტაციული კაშხალი. ამ ტიპის კაშხლებმა, როგორც მაღალი საიმედოობის მქონე ნაგებობებმა, დიდი ხანია დაიმკვიდრეს თავი მსოფლიო კაშხალთმშენებლობის პრაქტიკაში. ისინი წარმატებით მუშაობენ მკაცრი კლიმატური და მაღალი სეისმიურობის პირობებშიაც კი. გრავიტაციული კაშხლები ფართოდაა წარმოდგენილი საქართველოს ჰიდროენერგეტიკულ ობიექტებზე. მათ შორისაა ზაჰესის, რიონჰესის, გუმათჰესის, აბაშაჰესის, ცაგერის გრავიტაციული კაშხლები. ისინი ასევე გამოიყენება როგორც დამოუკიდებელი წყალსაგდები ნაგებობები, რის გამოც მათი როლი ასევე გამორჩეულად მაღალია ჰიდროკვანძების საიმედოობაში. ამ მხრივ აღსანიშნავია ჟინვალჰესის (14 მ), სიონჰესის (8 მ), თეძამის (დაპროექტებულია) და სხვა წყალსაგდები კაშხლები.

კაშხლების გაანგარიშებისას ერთ-ერთ მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენს მასალათა (ბეტონისა და ფუძის გრუნტის) არაწრფივობა. საკითხის მნიშვნელობა განსაკუთრებით ძლიერდება არაკლდოვანი ფუძის პირობებში, სადაც გრუნტის კუმშვის დიაგრამა ($\sigma = f(\varepsilon)$) მკვეთრად არაწრფივია. ასეთ პირობებში კი, ადგილი აქვს ნარჩენი დეფორმაციების განვითარებას, რაც თავს იჩენს ობიექტის ექსპლუატაციის დროს. შესაბამისად, აღნიშნული საკითხი მოითხოვს სიღრმისეულ შესწავლას და პროექტირების დროს გათვალისწინებას.

წყალსაშვიანი გრავიტაციული კაშხლების საიმედო ექსპლუატაციას მნიშვნელოვან წილად განსაზღვრავს ქვემო ბიეფში ენერჯის ჩამქრობი ჭის გამართული მუშაობა, რომლის დაზიანებას ყოველთვის თან ახლავს ფუძის გამორეცხვა, რაც შესაბამისად დიდ საშიშროებას ქმნის ნაგებობის მდგრადობის დაკარგვის მხრივ, მისი მნიშვნელობა განსაკუთრებით იმატებს არაკლდოვანი ფუძის პირობებში.

ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილის სიმტკიცესა და მდგრადობას განსაზღვრავს ქვემო ბიეფში განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმი. ბიეფების შეუღლების დროს განვითარებული მაღალი ტურბულენტობა წარმოქმნის ენერჯის დეფიციტს და ვიბრაციულ დატვირთვებს, რაც ფილტრაციულ უკუწნევასთან ერთად ხშირ შემთხვევაში ფილის ნგრევის მიზეზს წარმოადგენს.

გრავიტაციული კაშხლების პროექტირების დროს, მათი კონსტრუქციების დამუშავებისას, გადამწყვეტი როლი აკისრია ფუძეებს. სწორედ ამიტომ, სამშენებლო ნორმებში, ბეტონის კაშხლები ორ ძირითად ჯგუფადაა წარმოდგენილი: 1) კაშხლები კლდოვან და 2) კაშხლები არაკლდოვან ფუძეებზე.

მოცემული საკითხები, საზოგადოდ, მეტად აქტუალურია კაშხალთმშენებლობის პრაქტიკაში, არამარტო მაღალდაწნევიანი, არამედ

საშუალო და დაბალდაწნევიანი ჰიდროკვანძების დროსაც, მით უფრო არაკლდოვანი ფუძეების არსებობისას.

ხსენებულ საკითხებთან დაკავშირებით ჩვენს ქვეყანაში მეტად სერიოზული პრობლემები შეიქმნა ზაჰესის, ორთაჭალჰესისა და ცაგერის ჰიდროკვანძებში. თუმცა, ეს არ არის პრობლემური ჰიდროკვანძების სრული ჩამონათვალი, რადგან ექსპლუატაციაში მყოფი კაშხლების მდგომარეობა ამ მხრივ ჯერ შეუსწავლელი და შესაბამისად უცნობია.

წარმოდგენილი პრობლემები უმნიშვნელოვანესია და დიდწილად განსაზღვრავენ კაშხლების საიმედოობას. სამწუხაროდ, იმ საკითხებს, რაც მოცემულია ნაშრომში, არ ეთმობა სათანადო ყურადღება პროექტირების დროს, ხოლო მათი გაუთვალისწინებლობით გამოწვეული შედეგები კი ვლინდება ობიექტების ექსპლუატაციის პერიოდში, სხვადასხვა დეფექტების სახით. ცალკეულ შემთხვევებში გვაქვს ფატალური შედეგებიც, ხოლო ჰიდროკვანძების რეაბილიტაცია მნიშვნელოვან ფინანსურ დანახარჯებთან არის დაკავშირებული.

ნაშრომში განხილულია ორი ერთმანეთთან დაკავშირებული მეტად მნიშვნელოვანი საკითხი: 1) ენერჯის ჩამქრობი ჭის წყალსაცემ ფილაზე განვითარებული ჰიდროდინამიკური დატვირთვები და ფილის მდგრადობის კვლევები და 2) არაკლდოვან ფუძეზე მყოფი გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობის შეფასება (ფუძის დაზიანების პირობებში) გრუნტის არაწრფივი დეფორმირების გათვალისწინებით. რიცხვითი გაანგარიშებები ჩატარებული იქნა ცაგერის გრავიტაციული კაშხლის მაგალითზე.

ზემოთხსენებული საკითხები სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ძირითად ობიექტს წარმოადგენს.

კვლევის მიზანი და სამეცნიერო სიახლე

შემუშავდეს წყალსაცემი ფილის სიმტკიცეზე და მდგრადობაზე გაანგარიშების მეთოდოლოგია, ექსპერიმენტული კვლევის შედეგებისა და ბიეფების შეუღლების პროცესში განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის თანმხლები დატვირთვის (ენერჯის დეფიციტი, პულსაციური დატვირთვები და ფილტრაციული უკუწნევა) გათვალისწინებით; განისაზღვროს ცაგერის კაშხლის ქვემო ბიეფში ჰიდრავლიკური რეჟიმები, მისი თანმხლები დატვირთვის პარამეტრები და მათი ზემოქმედებით წყალსაცემი ფილის სიმტკიცე და მდგრადობა (სარეაბილიტაციო პროექტის დამუშავებასთან დაკავშირებით); გაანალიზდეს ცაგერის კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო ძაბვები გრუნტის არაწრფივობის გათვალისწინებით; შეფასდეს ცაგერის გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობა ქვემო ბიეფში განვითარებული გამორეცხვების გათვალისწინებით.

დამუშავდა გაანგარიშების კომპლექსური მეთოდოლოგია, ბიეფების შეუღლების ჰიდრავლიკური და სტატიკური გაანგარიშებისათვის. მეთოდოლოგის საფუძველზე შესაძლებელია:

- დიფერენცირებულად იქნას შეფასებული ექსპლუატაციის პერიოდში ფილაზე განვითარებული დატვირთვების გავლენა წყალსაცემი ფილის სიმტკიცესა და მდგრადობაზე;
- გაანგარიშდეს ენერჯის ჩამქრობი ჭის ყველა საპროექტო პარამეტრი (ფილის სისქე, არმირება, ანკერების ზომები).

სასრული ელემენტების მეთოდის ბაზაზე დამუშავდა „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის გაანგარიშების მეთოდოლოგია, გრუნტის მასალის არაწრფივი დეფორმაციის ($\sigma = f(\varepsilon)$), ასევე ფილტრაციული დატვირთვების გათვალისწინებით, რაც საშუალებას იძლევა შეფასდეს ხსენებული სისტემის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა (დდმ), კაშხლის მდგრადობის მარაგები ფუძის გრუნტის ზიდვის უნარიანობის გათვალისწინებით.

ნაშრომის პრაქტიკული მნიშვნელობა

დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე, შესაძლებელია გაანგარიშდეს ენერჯის ჩამქრობი ჰის გეომეტრიული ზომები, წყალსაცემი ფილის ყველა საანგარიშო პარამეტრი, მათ შორის ფილის სისქე, არმირება, ანკერების ზომები (კლდოვანი ფუძის შემთხვევაში), როგორც საპროექტო ასევე სარეაბილიტაციო ობიექტისათვის; „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის გაანგარიშების მეთოდის, გრუნტის მასალის არაწრფივი დეფორმაციის გათვალისწინებით, საშუალებას იძლევა გაანალიზდეს ხსენებული სისტემის დამ, ასევე სისტემის ზიდვის უნარიანობა საპროექტო პირობებისა და ფუძის გეოლოგიური მახასიათებლების გათვალისწინებით; ნაშრომში წარმოდგენილი მეთოდის გამოყენებით ჩატარდა ცაგერის ჰიდროკვანძის გრავიტაციული კაშხლის სარეაბილიტაციო გაანგარიშებები, რომლის საფუძველზე მიღებულ იქნა წყალსაცემი ფილის პარამეტრები (სისქე, არმირებისა და ანკერების ზომები); შეფასდა კაშხლის დამ და მდგრადობის მარაგები ფუძეში (ქვემო ბიეფის მხარეს) გაჩენილი გამორეცხილი 5 მ-იანი ორმოს გავლენის გათვალისწინებით; გაანგარიშდა წყალსაცავში წყლის დამუშავების ის მინიმალური დონე, რომლის არსებობის დროს მიღწეულ იქნა რეაბილიტაციის პერიოდში უსაფრთხოების პირობები: ფუძის ფილტრაციული სიმტკიცე და კაშხლის მდგრადობა.

სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს შესავალს, ლიტერატურის მიმოხილვას, კვლევას, შედეგებსა და მათ განსჯას, დასკვნას, გამოყენებულ ლიტერატურას და დანართს. ნაშრომი წარმოდგენილია 115 ნაბეჭდ გვერდზე, რომელიც მოიცავს 39 ნახაზს, 3 ცხრილსა და 2 დანართს.

სადისერტაციო მასალები მოხსენიებულ იქნა აბრეშუმის გზის მე-16 დისტანციურ საერთაშორისო კონფერენციაზე, თბილისი 2021.

სადისერტაციო ნაშრომის თემასთან დაკავშირებით დღეისათვის გამოქვეყნებულია ოთხი სამეცნიერო სტატია, საქართველოში აკრედიტირებულ რეფერირებულ ჟურნალებში.

სამეცნიერო ლიტერატურის მიმოხილვა

განხილულია კლდოვან და არაკლდოვან ფუძეებზე არსებული ბეტონის გრავიტაციული კაშხლების კონსტრუქციები, წყალსაგდები ნაგებობების ენერჯის ჩამქრობი ჭის კონსტრუქციების ექსპერიმენტულ კვლევები, ასევე მსხვილფრაქციული გრუნტების არაწრფივი დეფორმაციულობის ანალიზი.

სტაბილომეტრული ექსპერიმენტული კვლევების შედეგებმა, რომლებიც ჩაატარეს მარსალმა, მარაჩიმ და გუპტამ, აჩვენეს მსხვილფრაქციული გრუნტების დეფორმაციულობის არაწრფივი ხასიათი, რომლის დროს თავს იჩენს არა მხოლოდ პლასტიკური, არამედ დილატანსიური თვისებებიც.

კაშხლისა და ფუძის მდგრადობის ანალიზი მოიცავს სხვადასხვა საკითხს, რომელთა შორის უმნიშვნელოვანესია გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები, მათი სიმტკიცე ძვრაზე, ბზართა სისტემაზე და უკუწნევის მნიშვნელობებზე. შესაბამისად, ფუძის გეოლოგიური შესწავლა და მისი საინჟინრო პარამეტრების დადგენა, ძირითად როლს თამაშობს კაშხლისა და მისი შემადგენელი ელემენტების სწორად განსაზღვრისა და პროექტირებისთვის.

არაკლდოვან ფუძეზე არსებული ბეტონის გრავიტაციული კაშხლის მდგრადობაზე ანალიზი მოითხოვს მარაგების შეფასებებს, როგორც კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო სიბრტყის, ასევე გეოლოგიური ბზარებისა და სიღრმული ძვრის ზედაპირების მიმართ.

გაანგარიშებების დროს გამოიყენება ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობა და მასზე დაყრდნობით: ბიშოპის, ჯანბუს, მორგენსტერნ-პრაისის და ორდინარის კრიტერიუმები. ფუძეში არსებული ბზარების პირობებში საკითხი უფრო რთულდება, რაც მოითხოვს დამატებით მდგომარეობის ანალიზს.

პროექტირების თანამედროვე ეტაპზე, ნაგებობათა გაანგარიშებისას ძირითადად გამოიყენება სასრული და სასაზღვრო ელემენტების მეთოდი. აღსანიშნავია, რომ „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის შესწავლისას, მაინც უპირატესობით ხასიათდება სასრული ელემენტების მეთოდი, რომელიც მაღალი სიზუსტით ითვალისწინებს როგორც ნაგებობის გეომეტრიულ და ფუძის გეოლოგიურ სირთულეებს (კლდოვანი და არაკლდოვანი მასივების არსებობისას), ასევე ფუძის დამუშავებისა და მშენებლობის ეტაპობრივობას.

ენერგიის ჩამქრობი ჭის პროექტირებასთან დაკავშირებით ჩატარებული კვლევების დიდი რაოდენობის მიუხედავად, ჰიდრავლიკური ნახტომის სახეები, თავიანთი სირთულის გამო, ჯერ კიდევ ბოლომდე არ არის შესწავლილი. მიღებულმა შედეგებმა აჩვენეს ცვლადების მკაფიო დამოკიდებულება ფრუდის რიცხვზე და ჰიდრავლიკური ნახტომის მანძილზე. ექსტრემალური წნევის პულსაციის მაქსიმალური მნიშვნელობები ვითარდება ჰიდრავლიკური ნახტომის დიაპაზონში, რის გამოც მიზანშეწონილად ითვლება ენერგიის ჩამქრობი ჭის გამაგრება.

ჰიდრავლიკური ნახტომები კლასიფიცირებულია ფრუდის რიცხვის მიხედვით. ყველაზე ეფექტური ჰიდრავლიკური ნახტომი ენერგიის ჩაქრობის პირობებით, მოქცეულია დიაპაზონში $4.5 < Fr < 10$, რაც ამცირებს ენერგიის ჩამქრობი ჭის სიგრძეს. ნახტომის ბოლოში, სადაც ზედა ბიეფის დინება ერწყმის ქვედა ბიეფის რეგიონს, ადგილი აქვს ერთეულოვანი სიჩქარისა და წნევის ველების წყვეტას. წნევების ასეთმა პულსაციებმა შეიძლება გამოიწვიოს მძიმე დაზიანება, რომელიც გამოიხატება ფილების მდგრადობის დაკარგვით, მასალების ეროზიით და კავიტაციის განვითარებით.

ცალკეულმა კვლევამ აჩვენა, რომ წნევის პულსაციის უგანზომილებო ინდექსის პიკური მნიშვნელობა დამოკიდებულია ჰიდრავლიკური ნახტომის სიგრძეზე, ენერგიის ჩამქრობი ჭის ფილის დახრილობაზე და ფრუდის რიცხვზე. შედეგებით დადგინდა, რომ ჰიდრავლიკური ნახტომის

მთელ სიგრძეზე, მაქსიმალური და მინიმალური პოზიტიური და ნეგატიური წნევის პულსაციები დასაწყისში მკვეთრად იზრდება და ნახტომის ბოლოს თანდათან იკლებს. მოდელების უმეტეს შემთხვევებში, ფრუდის რიცხვის დიდი მნიშვნელობის დროს, აირის ჩართულობა ჰიდრავლიკურ ნახტომებში მნიშვნელოვანია, როგორც ნახტომის ბოლოს, ასევე მისი ბრუნის ადგილებში (რეცირკულაციის რეგიონში), სადაც აირის უმეტესი ნაწილი წარმოიქმნება და ტრანსპორტირდება ქვედა ბიეფის მხარეს.

კვლევაში წარმოდგენილ იქნა ენერჯის ჩამქრობ ჭებში სივრცითი ჰიდრავლიკური ნახტომების ყველაზე რელევანტური ჰიდროდინამიკური მახასიათებლები, გაფართოების სხვადასხვა კოეფიციენტებით. მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ ტურბულენტობის ინტენსივობის მატებას და ფრუდის რიცხვის ზრდას, თან ახლავს წნევის პულსაციების ზრდაც. კვლევები ასევე აჩვენებს, რომ ექსტრემალური წნევის პულსაციის მნიშვნელობები დამოკიდებულია ჰიდრავლიკური ნახტომის სიგრძეზე. ამასთან ერთად, დადებითი და უარყოფითი წნევის კოეფიციენტები გვხვდება გარკვეულ უბნებში, რის გამოც მიზანშეწონილია ასეთ ზონებში ყურადღება მიექცეს ენერჯის ჩამქრობი ჭის ფილების გამაგრების საკითხებს. საშუალო წნევების ანალიზი მიუთითებს, რომ ჰიდრავლიკური ნახტომის ბოლოს წარმოქმნილი წნევები, სივრცითი ნახტომის შემთხვევაში, გაცილებით მეტია ვიდრე კლასიკური ჰიდრავლიკური ნახტომის დროს, ვინაიდან კედლების თანდათანობითი გაფართოება ამცირებს ხვედრით სიღრმეს.

სადისერტაციო ნაშრომი შეეხება სწორედ კაშხლების და მათი შემადგენელი ელემენტების მდგრადობის ანალიზს. კვლევის ობიექტად შერჩეული იქნა ლაჯანურ ჰესის სათავე კვანძის შემადგენლობაში არსებული ცაგერის კაშხალზე ექსპლუატაციის პერიოდში შექმნილი პრობლემები.

წარმოდგენილ კვლევებში განხილულია საკითხები, რომლებიც ეხება ბიეფების შეუღლების დროს ენერჯის დეფიციტისა და პულსაციური დატვირთვების ზემოქმედებას ჩამქრობი ჭის კონსტრუქციაზე, რაც სამწუხაროდ ნაკლებად გაითვალისწინება პროექტირების დროს. პროექტანტები, ძირითადად შემოიფარგლებიან მხოლოდ ჭის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებით. ექსპლუატაციის პერიოდში კი, უმეტეს შემთხვევაში, თავს იჩენს წყალსაცემი ფილის დაზიანების და მთლიანი დანგრევის ფაქტებიც კი. ასე მაგალითად, მნიშვნელოვანი დაზიანებები განვითარდა ორთაჭალჰესის ენერჯის ჩამქრობ ჭაში, ხოლო ზაჰესის და ცაგერის ჰიდროკვანძების წყალსაცემი ფილები საერთოდ აღარ არსებობდა, და ფუძის გარეცხვამ ქვემო ბიეფში ≈ 6 მ-ს მიაღწია, რამაც მნიშვნელოვანი პრობლემები შექმნა.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ექსპლუატაციისას, განსაკუთრებით კი არაკლდოვანი ფუძის არსებობისას მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს გრუნტის არაწრფივი დეფორმირების საკითხი, რაც მით უფრო აქტუალურია მარეგულირებელი წყალსაცავების არსებობისას. ექსპლუატაციის პერიოდში ფუძის დატვირთვა-განტვირთვას თან ახლავს ნარჩენი დეფორმაციების განვითარება და მასთან დაკავშირებული სხვა არასასურველი პროცესები. აღნიშნული საკითხები სწორედ სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ძირითად ამოცანებს წარმოადგენს.

კვლევის ძირითადი შედეგები

ნაშრომში განხილულია ენერჯის ჩამქრობი ჭის წყალსაცემ ფილაზე განვითარებული ჰიდროდინამიკური დატვირთვების (წყალდიდობის ხარჯების გატარების დროს) გაანგარიშების მეთოდოლოგია. აღნიშნული პროცესის შესასწავლად მნიშვნელოვანია გაანალიზდეს ჰიდრაულიკური რეჟიმები ენერჯის ჩამქრობ ჭაში, ბიეფების შეუღლების გაანგარიშებით, ფარის გაღების სხვადასხვა ვარიაციის დროს.

ჰიდროდინამიკური დატვირთვის მაქსიმალური და მინიმალური ორდინატები განისაზღვრება ფორმულით:

$$h_{d,max} = \left[0.85 \left(1 - 0.55 \sqrt[3]{\frac{h}{h_2} - 1} \right) \cdot \sqrt{\frac{T_0}{h_{cr}} - 2} \right] h_{cr}$$
$$h_{d,min} = 0.15h_{cr}$$

სადაც,

h - წყლის სიღრმე ქვემო ბიეფში;

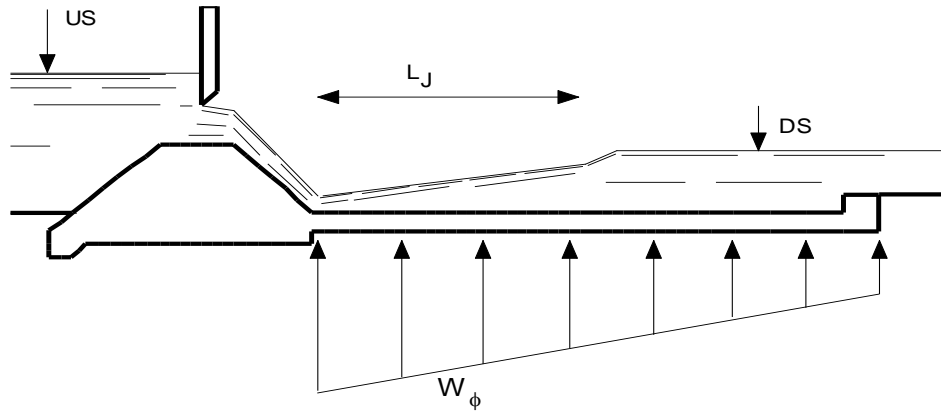
h_2 - შეკუმშული ნაკადის შეუღლებული სიღრმე;

h_{cr} - კრიტიკული სიღრმე;

T_0 - დაწნევა ფილაზე.

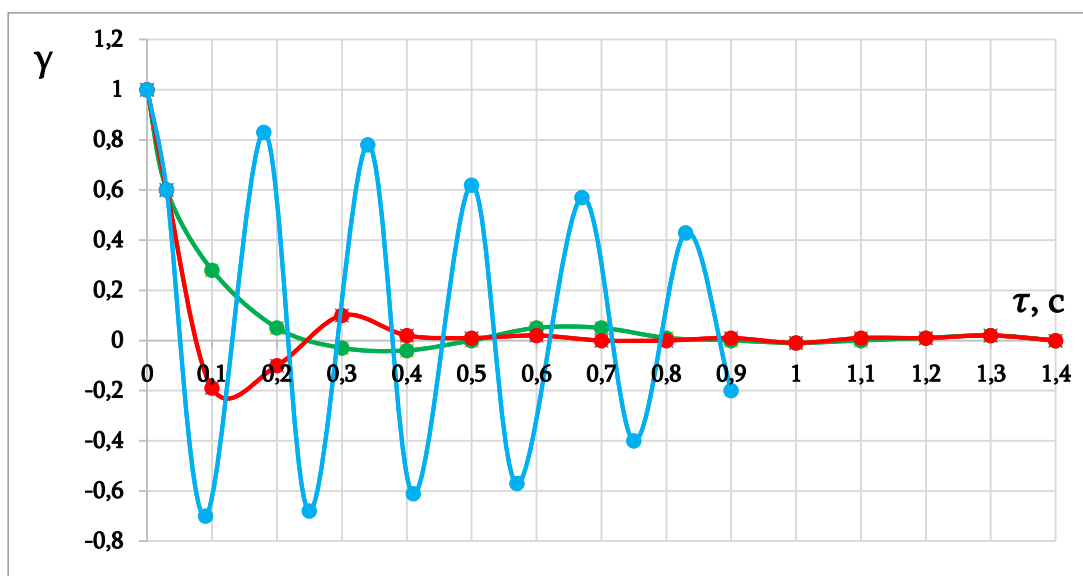
ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ეპიურა წყალსაცემ ფილაზე, ზოგადად წარმოდგინდება ტრაპეციის სახით. დატვირთვის მაქსიმალური ორდინატა განთავსებულია ნაკადის შეკუმშულ კვეთში, ხოლო მინიმალური ორდინატა ნახტომის ბოლოში, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. #1-ზე.

ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ექსპლუატაციისას, განსაკუთრებით წყალსაგდებ ნაგებობებში, ნაკადის მოძრაობა ტურბულენტურია, რომლის მთავარი მახასიათებელი ნიშნებია სიჩქარისა და წნევის პულსაცია. უკანასკნელი ზემოქმედებას ახდენს წყალსაცემ ფილაზე და შესაბამისად მოითხოვს შეფასებას.



ნახაზი #1 - ჰიდროდინამიკური და ფილტრაციული უკუწნევის მოქმედების სქემა ჰიდრავლიკური ნახტომის ფარგლებში

ამდენად, წყლის ხარჯების გატარებისას ენერგიის ჩამქრობი ჰის ფილაზე, გარდა ენერგიის დეფიციტისა, ადგილი აქვს აგრეთვე ნაკადის ტურბულენტური რეჟიმის თანმხლები წნევის პულსაციას და შესაბამის დატვირთვას. ჰიდროდინამიკური დატვირთვის პულსაციური კომპონენტები განისაზღვრება ექსპერიმენტული ჰიდრავლიკური კვლევების შედეგების მიხედვით. წნევის პულსაციის სტანდარტები σ ექსპერიმენტული კვლევებისა და გამოთვლების მიხედვით, შეჯამებული სახით, ნაჩვენებია ნახ. #2-ზე.



ნახაზი #2 - ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქცია

ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ხვედრითი პულსაციის კომპონენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა ფილაზე განისაზღვრება „წერტილებში“ პულსაციური წნევების მონაცემთა საფუძველზე დამოკიდებულებით:

$$p' = \sigma k_n k_0$$

სადაც,

σ - წნევის პულსაციის სტანდარტი (სტანდარტული გადახრა) წერტილში;

k_n - გასაშუალების კოეფიციენტი, რომელიც ტოლია წნევის პულსაციის სტანდარტის თანაფარდობისა წერტილზე პულსაციის დატვირთვის სპეციფიკურ სტანდარტზე σ_n განაწილებული ფილის ფართობზე;

k_0 - პროპორციულობის კოეფიციენტი წნევის პულსაციის ამპლიტუდასა და მის სტანდარტს შორის.

საბოლოოდ, ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ჯამური მნიშვნელობა ფილაზე განისაზღვრება ფორმულით:

$$p = p_0 \pm \frac{A}{2}$$

სადაც,

p_0 - დროში გასაშუალებული დატვირთვა ფილაზე;

A - პულსაციური დატვირთვის მაქსიმალური ამპლიტუდა.

კაშხალი-ფუძე სისტემის სტატიკური გაანგარიშებების ძირითადი თეორიული საფუძვლები სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით, ეფუძნება განტოლებას (არაწრფივი გაანგარიშებების ძირითადი თეორიული არსი), რომელიც ასახავს წონასწორობის პირობას, სადაც მიღებულია წრფივი სტატიკური გაანგარიშების შემთხვევები.

გრუნტის მასალის არაწრფივობის დეფორმაციის შემთხვევაში გლობალური ხისტი მატრიცა $[K]$ აღარ არის წრფივი, ხოლო არაწრფივი ამონახსენი ემყარება იტერაციულ გაანგარიშებებს (ნახ. #3).

ზოგადად, არაწრფივი ანალიზის ძირითადი პრობლემა ემყარება განსახილველი კონსტრუქციის წონასწორობის მდგომარეობის განსაზღვრას, რომელიც შეესაბამება მასზე მოქმედ დატვირთვებს. თუ ეს დატვირთვები დროის ფუნქციაა, t მომენტში არაწრფივი წონასწორობის პრობლემა შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგი განტოლების ამოხსნის სახით:

$$\{^t\psi\} = \{^tR(a)\} - \{^tF\} = 0$$

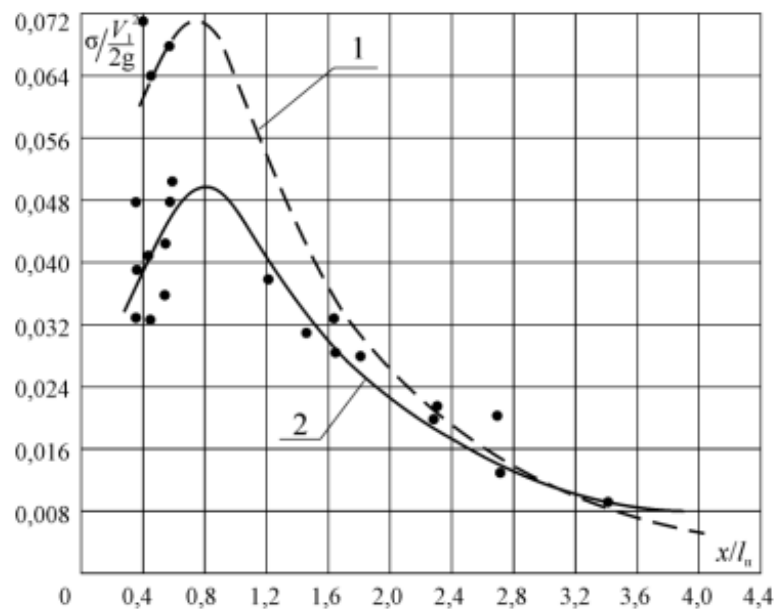
სადაც:

ψ - კვანძური გაუწონასწორებელი დატვირთვები;

F - გარედან გამოყენებული კვანძური დატვირთვები;

R - ელემენტის დამაბულობით გამოწვეული კვანძური დატვირთვები;

a - კვანძური გადაადგილებები.



ნახაზი #3 - წნევის პულსაციის სტანდარტის ცვლილება ნახტომის სიგრძეზე

ლაჯანურჰესის ჰიდროკვანძში შემავალ ნაგებობაზე და მის ელემენტებზე განვითარებული პრობლემების ანალიზში განიხილება ცაგერის საშუალოდაწნევიანი ბეტონის გრავიტაციული კაშხალი. ბათიმეტრული გაზომვების შედეგად დადგინდა, რომ კაშხლის პირველი

და მეორე ფარის გასწვრივ, ქვედა ბიეფის მიმართულებით წყალჩამქრობი აუზის წყალსაცემი ფილა აღარ არსებობდა, ხოლო ფუძე ამორეცხილი იყო (ნახ. #4).

ზემოაღნიშნულმა გამოიწვია მარცხენა ფერდის ქვედა წყალქვეშა ნაწილზე (სადაც განთავსებულია გამრეცხი გალერეები), საყრდენის (პასიური უკუწნევა) გამოცლა. პროცესების განვითარება თანდათანობით მიმდინარეობდა, რასაც ხელს უწყობდა ფერდში არსებული ფილტრაცია და მარცხენა ფერდში განვითარდა სიღრმული ძვრა და დიდი კარსტი დიამეტრით ≈ 5 მ (სურ. #1).

ცაგერის ჰიდროკვანძის ბიეფების შეუღლების გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა ძირითადი განმსაზღვრელი განტოლებებით, ასევე ფრუდის რიცხვის გამოყენებით. ენერჯის ჩამქრობ ჭაში ჰიდრავლიკური რეჟიმის შეფასება ჩატარებულ იქნა 4 საკეტის თანმიმდევრულად ჩართვისას, მათი გახსნის სხვადასხვა მნიშვნელობების გათვალისწინებით.

გაანგარიშებათა შედეგებით მიღებული იქნა, რომ მაქსიმალური ხარჯების გატარების დროს, 1-ლი, მე-2 და მე-3 საკეტების თანმიმდევრული ჩართვისას ვითარდება განდევნილი ნახტომი, ხოლო მე-4 საკეტის დამატებისას კი დაძირული ჰიდრავლიკური ნახტომი (ნახ. #5).

ფილტრაციული გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა სისტემისთვის „კაშხალი-ფუძე“ ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში სასრულ-ელემენტთა მოდელის გამოყენებით.

გაანგარიშების შედეგებით მიღებული იქნა ფილტრაციული პარამეტრების სრული სპექტრი, მათ შორის ფილტრაციული უკუწნევისა და გრადიენტების განაწილება, კაშხლის ფუძეში ფილის საპროექტო და დაზიანებული მდგომარეობისთვის (ნახ. #6).

ამდენად, ქვემო ბიეფში ორმოს გაჩენის შედეგად, ფილტრაციული დაწნევები კაშხლის ძირზე სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგების ქვეშ შემცირდა 2-დან 8 მ-მდე (1200 კნ-ით).

წყალსაცემი ფილის მდგრადობის შეფასების თავში, წყალსაცემების მუშაობისას განდევნილი ნახტომის გავლენით, წყალსაცემ ფილაზე ვითარდება ენერჯის დეფიციტი და არსებული ტურბულენტური რეჟიმის თანმხლები პულსაციური დატვირთვები.

წყალსაცემი ფილის სისქე და მისი არმირება (კლდოვანი ფუძის შემთხვევაში მათი ანკერირება) უნდა აკმაყოფილებდეს სიმტკიცისა და მდგრადობის პირობებს, ნორმატიული მოთხოვნების შესაბამისად.

ფილის სიმტკიცეზე გაანგარიშებები საჭიროა ჩატარდეს ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით.

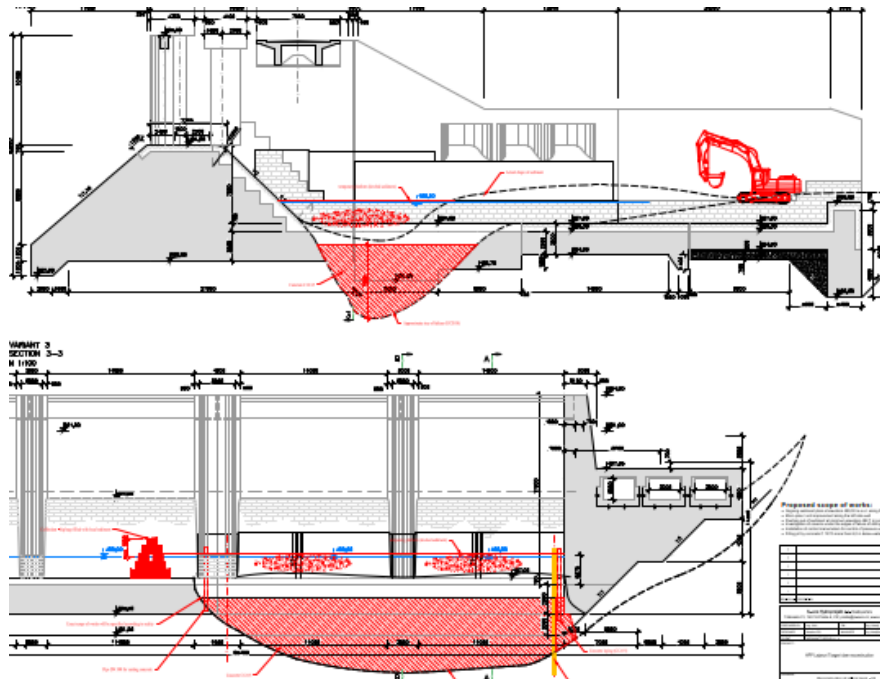
ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების განსაზღვრა ფილაზე მოიცავს ორ ამოცანას. კერძოდ, უნდა განისაზღვროს:

- ფილის ზედაპირზე განვითარებული დატვირთვა ენერჯის დეფიციტის და პულსაციის შედეგად;
- ფილის ძირზე ფილტრაციის შედეგად განვითარებული უკუწნევა.

ზემოაღნიშნულის საფუძველზე მიიღება, რომ ენერჯის დეფიციტი დამოკიდებულია ქვემო ბიეფში განვითარებულ ჰიდრავლიკურ რეჟიმზე და დრენაჟის კონსტრუქციაზე (ჭების რაოდენობასა და მათ განლაგებაზე).

ორგანზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში, დაწნევის დეფიციტი ჰიდრავლიკური ნახტომისას, შესაძლებელია წარმოდგენილ იქნას ფილაზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური დატვირთვებისა და ფილტრაციული უკუწნევის ერთობლივი ზემოქმედების მიხედვით.

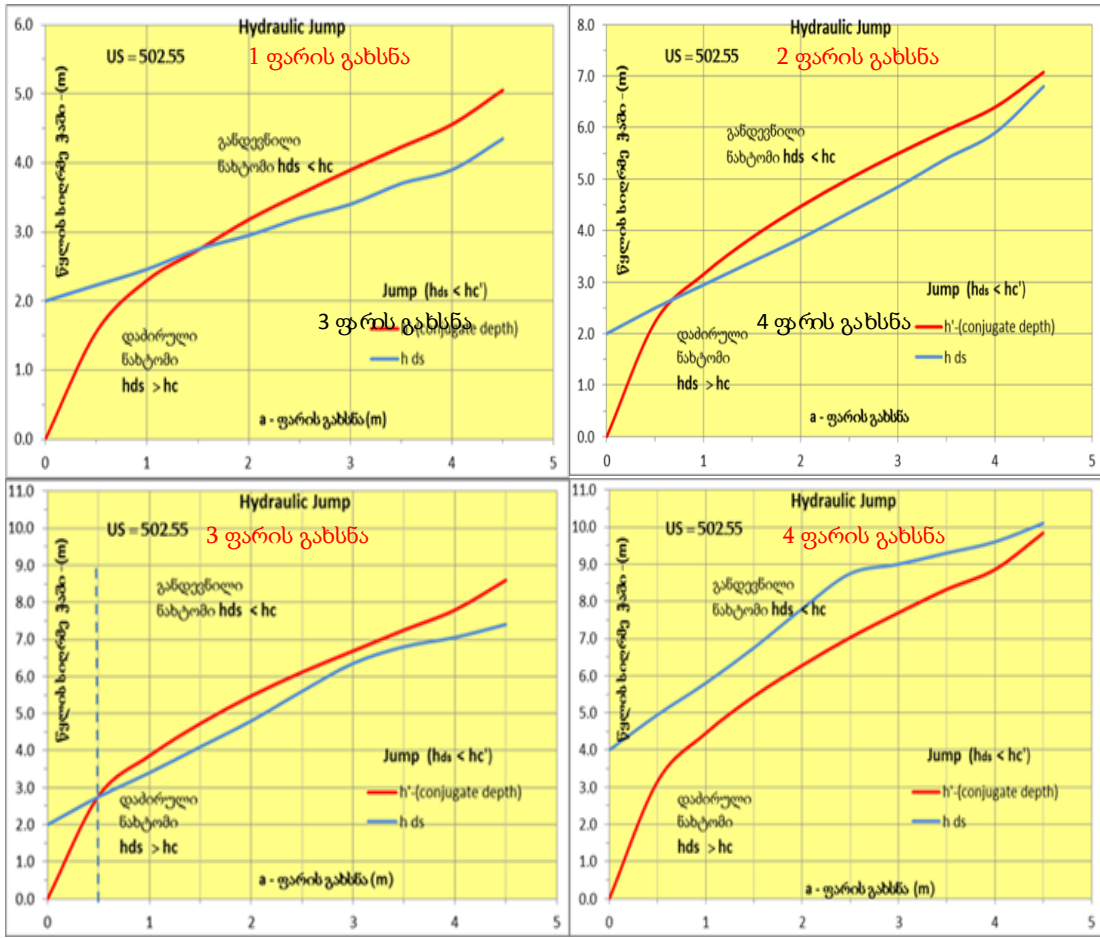
განგარიშებით მიღებულ იქნა, რომ ჰიდროდინამიკური დატვირთვის მაქსიმალური მნიშვნელობა აღწევს 3 ფარის ერთდროული გახსნისას, რომლის დროს $q = 22.42$ მ³/წმ (ნახ. #7). ამდენად, ფილის მდგრადობის განგარიშება ჩატარდა სწორედ 3 ფარის გახსნისას განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის პარამეტრებისათვის.



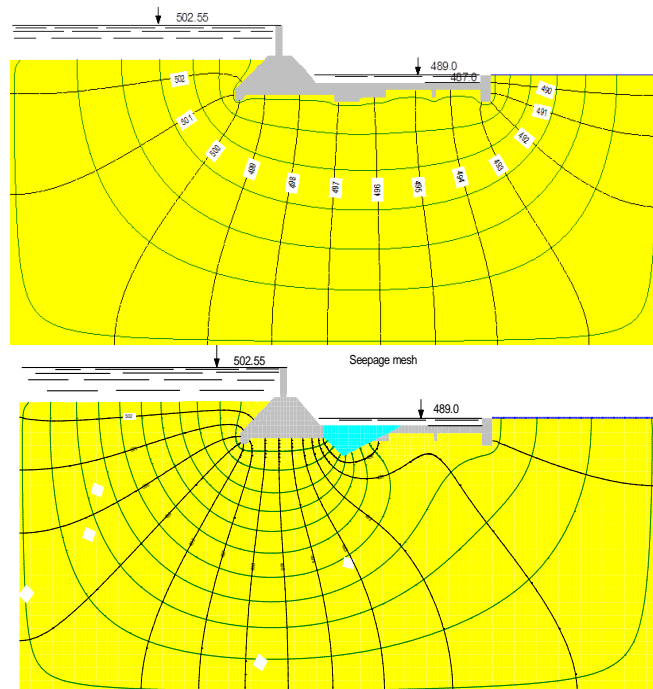
ნახაზი #4 - ქვემო ბიეფში ფუძის გარეცხილი ზონა გალერეების ქვეშე განვითარებული დაცურების ზედაპირით.



სურათი #1 - მარცხენა ფერდის მხარეს განვითარებული კარსტული სივრცე



ნახაზი #5 - ჰიდრავლიკური ნახტომის რეჟიმი წყალსაშვის ფარების თანმიმდევრული გახსნისას.



ნახაზი #6 - ფილტრაციული ბადე კაშხლის ფუძეში წყალსაგემი ფილის საპროექტო და დაზიანებული მდგომარეობებისათვის.

განგარიშების შედეგების საფუძველზე მიღებულ იქნა, რომ ფილა ვერ აკმაყოფილებდა მდგრადობის პირობას. საბოლოოდ, მდგრადობის უზრუნველსაყოფად საჭირო გახდა ანკერების დაპროექტება, რომლის პარამეტრების (რაოდენობა, სიგრძე და დიამეტრი) განსაზღვრა მოხდა ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ექსტრემალური მნიშვნელობებისათვის.

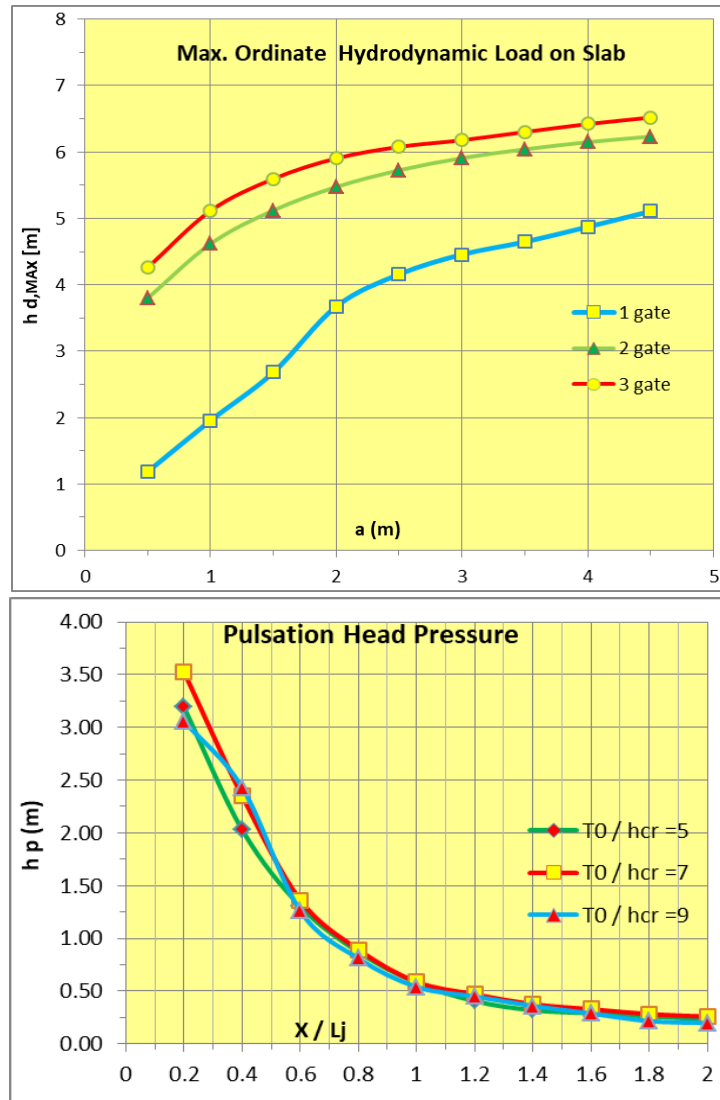
განხილულ იქნა „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის მდგრადობის ანალიზი წრფივი განგარიშების მიხედვით, სადაც განგარიშებები ჩატარდა სასრული ელემენტების მეთოდის გამოყენებით, ორგანოზომილებიანი ამოცანის ფარგლებში. სისტემის არაწრფივი სიხისტის მატრიცის ფორმირება შესრულდა იტერაციული განგარიშებების გზით.

მიღებულ იქნა, რომ კაშხლისა და ფუძის საკონტაქტო ზონაში (ფუძეში არსებული გამორეცხვის უბანთან) მკუმშავი ძაბვების კონცენტრაციის გავლენით, პლასტიკური დეფორმაციები გაზრდილია. აღნიშნულის შედეგად ადგილი აქვს ძაბვების გადანაწილებას. კერძოდ, მაღალი კონცენტრაციის ზონაში ადგილი აქვს დაძაბული მდგომარეობის განტვირთვას, ხოლო საკონტაქტო ზონის უფრო სიღრმისეულ კვთებში კი დატვირთვას.

განსახილველ შემთხვევაში განსაკუთრებით აქტუალურია სწორედ შერეული ძვრა. აღნიშნული გულისხმობს, რომ ძვრის სიბრტყე გადის არა კაშხლისა და ფუძის კონტაქტზე, არამედ შესაძლებელია, რომ ძვრის სიბრტყემ მოიცვას კონტაქტის ნაწილი სადაწნეო წახნაგის ქვეშ და ასევე სიღრმისეული ზონა - უდაწნეო წახნაგის ქვეშ.

კაშხლის ფუძეში შექმნილი დაძაბული მდგომარეობის განგარიშებები ჩატარდა „კაშხალი-ფუძე“ სისტემისთვის, დატვირთვების ეტაპობრივი ცვლილებების გათვალისწინებით. უკანასკნელი გულისხმობს საპროექტო გადაწყვეტისათვის ფუძეში არსებული დაძაბული მდგომარეობის ცვლილებას, ექსპლუატაციის დროს ფილისა და ფუძის

გარეცხვის შედეგად მომხდარი დატვირთვების გადანაწილების გათვალისწინებით.



ნახაზი 7 - ჰიდროდინამიკური დატვირთვა და წნევის პულსაცია ფილაზე, განსაზღვრული q , L_j და $\frac{T_0}{h_{cr}}$ პარამეტრების მიხედვით.

ფუძის მდგრადობაზე გაანგარიშებები ჩატარდა: წრიულ-ცილინდრულ ზედაპირებზე დაცურების მეთოდის მიხედვით - ბიშოპის, მორგენსტერნ-პრაისის, ორდინარის და ჯანბუს კრიტერიუმებით (ნახ. 8); წრიულ-ცილინდრულ ზედაპირებზე ცოცვის მეთოდის მიხედვით, ფუძის დაძაბული მდგომარეობის გათვალისწინებით (სასრული ელემენტების

მეთოდის მიხედვით); კაშხლისა და ფუძის ერთობლივი მუშაობის გათვალისწინებით, გრუნტის ძვრაზე სიმტკიცის ლოკალური მარაგების მიხედვით.

წრიულ-ცილინდრულ ზედაპირებზე ცოცვის მეთოდის მიხედვით მიღებულ იქნა, რომ კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ არსებული გრუნტის მდგრადობის მარაგები სხვადასხვა კრიტერიუმების მიხედვით იმყოფება ზღვრულ მდგომარეობაში, კერძოდ: მორგენსტერნ-პრაისის და ბიშოპის მიხედვით - $K = 1.0$; ორდინარისა და ჯანბუს მიხედვით - $K = 0.9$.

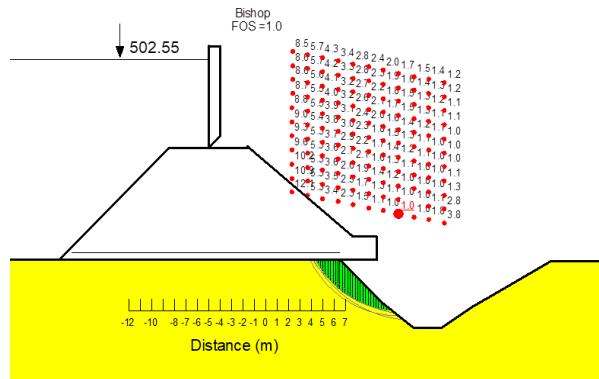
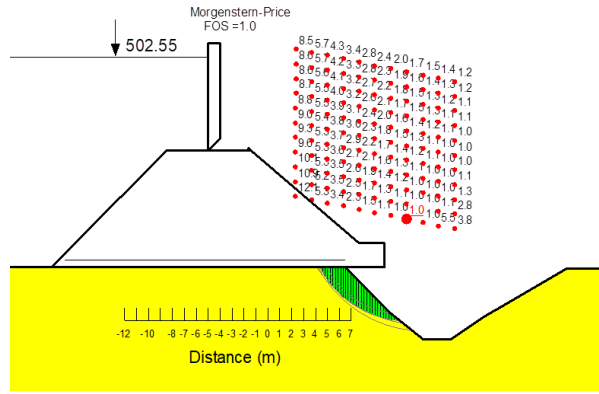
„კაშხალი-ფუძე“ სისტემისათვის ჩატარებული გაანგარიშებებით (ნახ. #9) მიღებულ იქნა: მაქსიმალური და მინიმალური მთავარი ძაბვები; მაქსიმალური მხები ძაბვები; ვერტიკალური (მათ შორის ეფექტური) ძაბვების ეპიურები კაშხალი-ფუძის საკონტაქტო კვეთისთვის.

ფუძის დაძაბული მდგომარეობის გათვალისწინებით (სასრული ელემენტების მეთოდის მიხედვით) მიღებულ იქნა ანალოგიური შედეგები $K \approx 1.0$ (ნახ. #10).

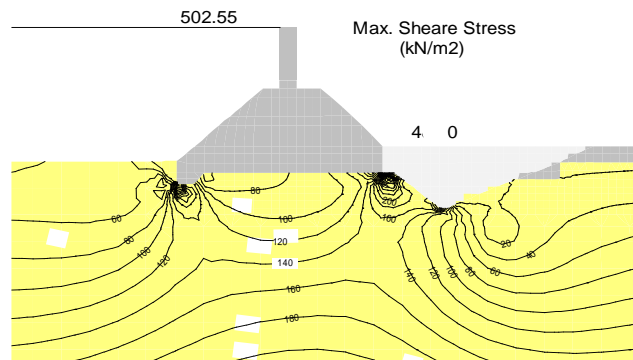
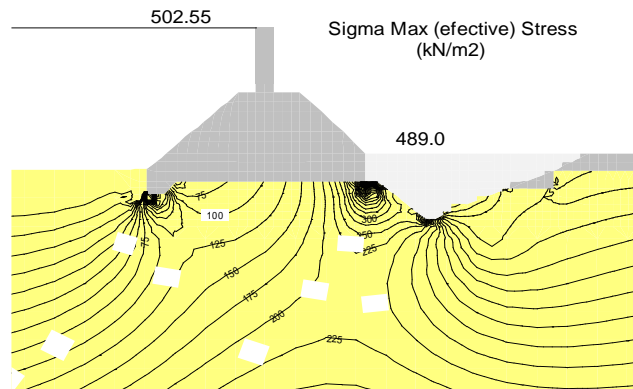
ამდენად, ჩატარებული გაანგარიშებების შედეგები იდენტურია და ერთდროულად ადასტურებს, რომ კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ (სიღრმეში ≈ 5 მ-მდე) მდგომარეობა შეიძლება შეფასდეს როგორც არამდგრადი.

მდგრადობის ანალიზის არაწრფივ გაანგარიშებაში, კაშხლის ფუძის მსხვილფრაქციული გრუნტების " $\sigma - \varepsilon$ " მრუდის აპროქსიმაციისთვის გამოყენებულ იქნა ანალიტიკური დამოკიდებულება, რომელიც ემყარება დატვირთვის დევიატორული უბნის ანალიზს, მარსალის ექსპერიმენტული კვლევების შედეგების მიხედვით.

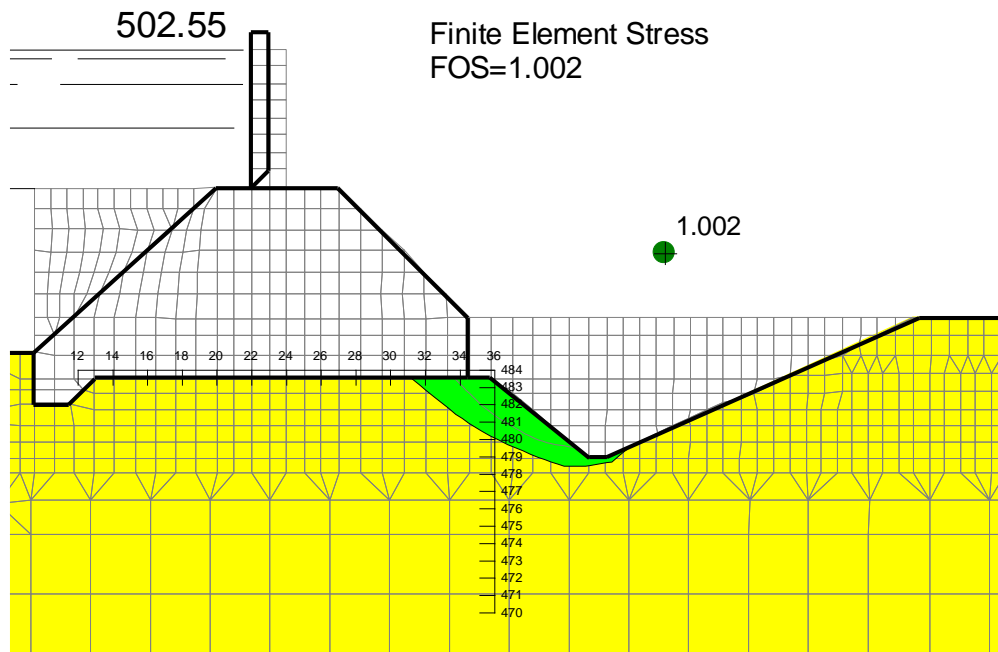
„კაშხალი-ფუძე“ სისტემის სტატიკური გაანგარიშებები ჩატარებულ იქნა ორი ვარიანტისათვის. განხილულ იქნა ფილის მყისიერი და თანდათანობითი ნგრევის სქემები.



ნახაზი #8 - მდგრადობის მარაგები მორგენსტერნ-პრაისისა და ბიშოპის საანგარიშო სქემის მიხედვით



ნახაზი #9 – მაქსიმალური მთავარი ძაბვები კაშხლის ფუძეში.



ნახაზი #10 - მდგრადობის მარაგები კაშხლისა და ფუძის ერთობლივი მუშაობისას

გრუნტის მასალის არაწრფივი გაანგარიშების შედეგების მიხედვით მიღებულ იქნა, რომ კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ, განსაკუთრებით მაღალი მკუმშავი ძაბვების ზონაში, მოხდა ძაბვების მნიშვნელოვანი გადანაწილება, რაც შესაბამისად აისახა ფუძის საკონტაქტო c-c კვეთზე (ნახ. #11). კერძოდ: σ_y ვერტიკალური მკუმშავი ძაბვების მაღალი კონცენტრაციის ზონაში, არაწრფივი გაანგარიშების შედეგებით მიღებული ძაბვები მცირდება წრფივი ანგარიშების შედეგებთან შედარებით, ხოლო კაშხლის ცენტრალური კვეთისკენ აღნიშნული ძაბვები უფრო იზრდება. ასეთი კანონზომიერება შენარჩუნებულია ფილის როგორც მყისიერი, ასევე თანდათანობითი ნგრევის სქემების დროს; ფილის თანდათანობითი ნგრევის დროს σ_y ძაბვების მნიშვნელობა, მყისიერი ნგრევის სქემასთან შედარებით, იზრდება გრუნტის მასალის არაწრფივობის გათვალისწინებისას; კაშხლის მდგრადობის შეფასება, სიღრმული ძვრის სქემის მიხედვით, ჩატარებული იქნა გრუნტის ძვრაზე სიმტკიცის პირობის მიხედვით:

$$\tau < \tau_{cr}$$

რასაც შეესაბამება პირობა $\theta_{max} < \varphi$.

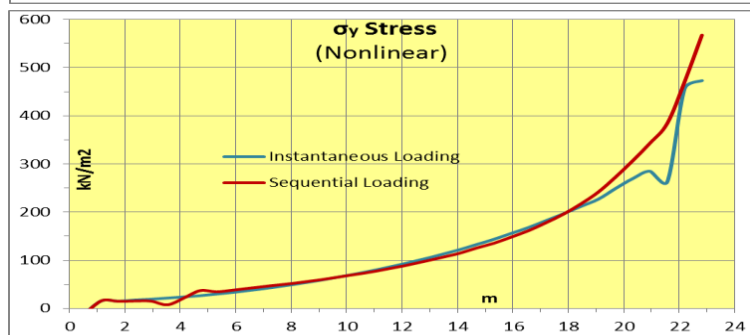
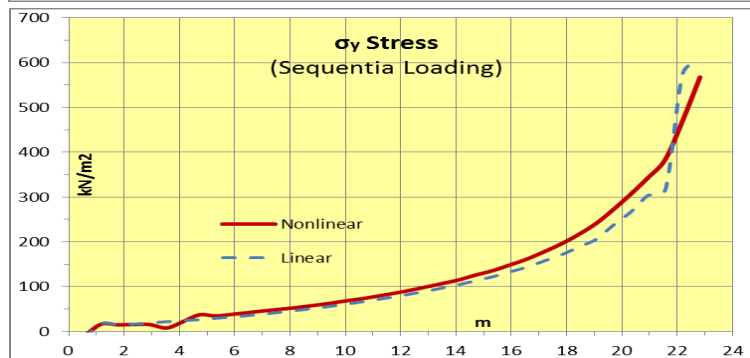
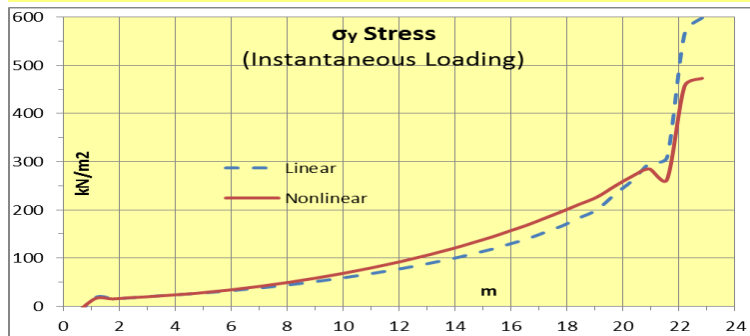
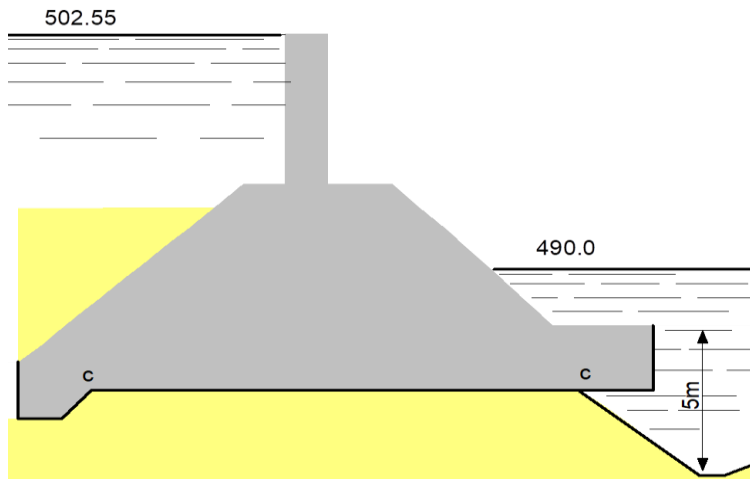
სადაც,

- τ, τ_{cr} - მხები ძაბვების საანგარიშო და ზღვრული მნიშვნელობები დაცურების საშიშ ზედაპირზე;
- θ_{max} - დამაბული მდგომარეობის შესაბამისი კუთხე;
- φ - გრუნტის შიდა ხახუნის კუთხე.

კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ (გარეცხვის ორმოსთან) არსებული ზღვრული მდგომარეობის ზედაპირი ($K \approx 1$), მიღებული არაწრფივი გაანგარიშების შედეგების მიხედვით, წრფივი გაანგარიშების შედეგებთან შედარებით, გადაადგილდა კაშხლის ფუძის სიღრმისაკენ (ნახ. #12).

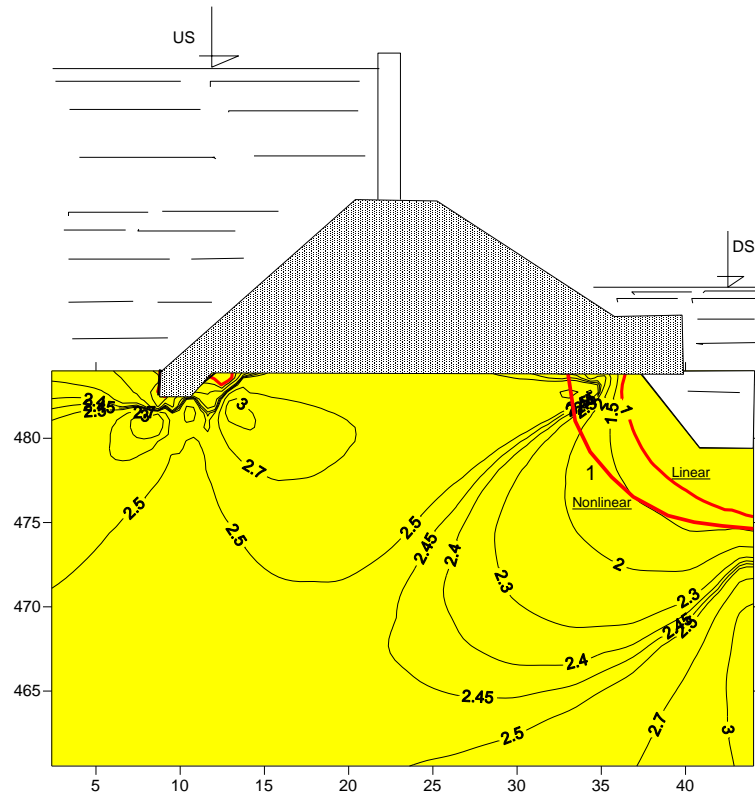
კვლევის შედეგად მიღებული პარამეტრები გამოყენებულ იქნა ქვედა ბიეფში სარეკონსტრუქციო სამუშაოების უსაფრთხოდ წარმოებისათვის. კერძოდ, წყალსაცავში წყლის მაქსიმალური საექსპლუატაციო დონის დროს კაშხალი ვერ აკმაყოფილებდა მდგრადობის პირობას ($K \approx 1$), რასაც მნიშვნელოვნად ამძიმებდა კაშხლის უდაწნეო წახნაგის ქვეშ (ორმოს ზონაში) ფილტრაციული ნაკადის გრადიენტების მაღალი მნიშვნელობა, რის გამოც ფილტრაციული სიმტკიცის მარაგები პრაქტიკულად ამოწურული იყო.

გაანგარიშების შედეგით დადგინდა, რომ: წყალსაცავში წყლის დონის 1 მ-ით დაწვევის შემთხვევაში, კაშხალი აკმაყოფილებდა მდგრადობის პირობას რეაბილიტაციის პერიოდში (ნახ. #13); კაშხლის ფუძეში არსებული 5 მ-იანი ორმოს მთლიანად ბეტონით შევსება, სრულად აკმაყოფილებდა ნაგებობის უსაფრთხოების მოთხოვნებს.

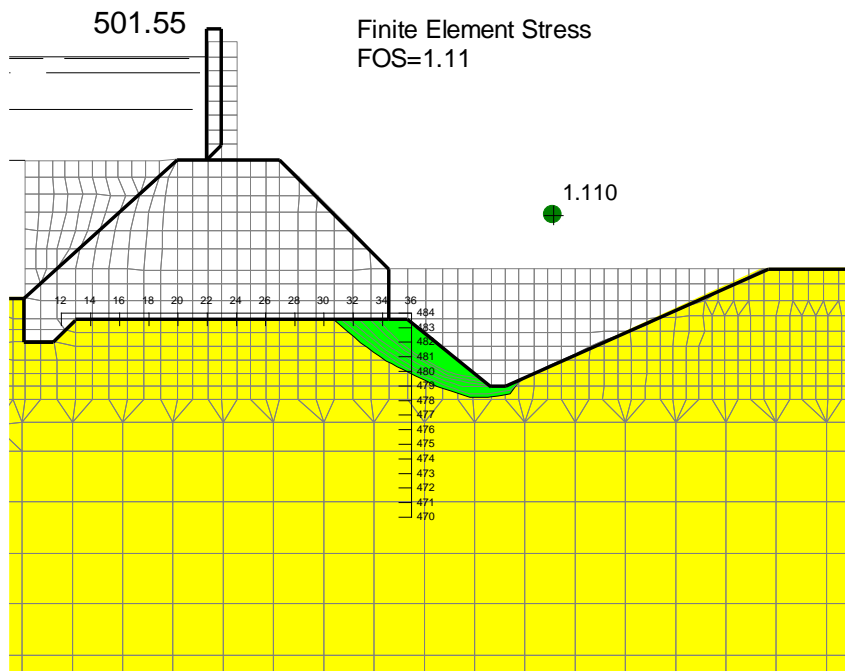


ნახაზი #11 - σ_y ძაბვების განაწილების ეპიურები კაშხალი-ფუძის საკონტაქტო c-c კვეთზე, არაწრფივობის გათვალისწინებით:

- ა) ფილის მყისიერი წგრევისას;
- ბ) ფილის თანდათანობითი წგრევის დროს;
- გ) ფილის მყისიერი და თანდათანობითი წგრევისას.



ნახაზი #12 - მარაგის კოეფიციენტების (K) განაწილება კაშხლის ფუძეში წრფივი და არაწრფივი განაგარიშებებისას.



ნახაზი #13 - მდგრადობის მარაგები ძვრაზე სიმტკიცის პირობის მიხედვით წყალსაცავში წყლის დონის 1 მ-ით დაწევისას.

ზოგადი დასკვნები

დამუშავდა ენერჯის ჩამქრობი ჭის წყალსაცემი ფილის სიმტკიცეზე და მდგრადობაზე გაანგარიშების მეთოდის, ექსპერიმენტული კვლევის შედეგებისა და ბიეფების შეუღლების დროს განვითარებული ჰიდრავლიკური რეჟიმის თანმხლები ჰიდროდინამიკური დატვირთვის (ენერჯის დეფიციტი, პულსაციური დატვირთვები და ფილტრაციული უკუწნევა) გათვალისწინებით. მეთოდის საფუძველზე შესაძლებელია: დიფერენცირებულად იქნას შეფასებული ექსპლუატაციის პერიოდში ფილაზე განვითარებული დატვირთვების (ენერჯის დეფიციტი, პულსაციური დატვირთვები და ფილტრაციული უკუწნევა) გავლენა წყალსაცემი ფილის სიმტკიცესა და მდგრადობაზე; გაანგარიშებული იქნას ენერჯის ჩამქრობი ჭის ყველა საპროექტო პარამეტრი (ფილის სისქე, არმირება, ანკერების ზომები).

სასრული ელემენტების მეთოდის ბაზაზე დამუშავდა „კაშხალი-ფუძე“ სისტემის გაანგარიშების მეთოდის, გრუნტის მასალის არაწრფივი დეფორმაციის ($\sigma = f(\varepsilon)$), ასევე ფილტრაციული დატვირთვების გათვალისწინებით. აღნიშნული საშუალებას იძლევა შეფასდეს ხსენებული სისტემის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და კაშხლის მდგრადობის მარაგები ფუძის გრუნტის ზიდვის უნარიანობის გათვალისწინებით.

ცაგერის საშუალოდაწნევიანი ჰიდროკვანძის ბიეფების შეუღლების ჰიდრავლიკური ანალიზის შედეგად მიღებული იქნა, რომ დაბალი ხარჯების გატარებისას, ($q < 2.0$ მ³/წმ) ადგილი აქვს დაძირულ ჰიდრავლიკურ ნახტომს; უფრო მაღალი ხარჯების გატარებისას კი ($q > 2.0$ მ³/წმ) - ვითარდება სხვადასხვა სახის (ძლიერი, დამყარებული) განდევნილი ჰიდრავლიკური ნახტომი.

ამდენად, ექსპლუატაციის პერიოდში ენერჯის ჩამქრობ ჭაში ძირითადად მყარდებოდა განდევნილი ნახტომი. ასეთი ჰიდრავლიკური

რეჟიმის პირობებში კი, წყალსაცემ ფილაზე ვითარდებოდა მაღალი სიდიდის ჰიდროდინამიკური დატვირთვები, რომელიც მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევდა 3 ფარის გახსნისას. წყალსაცემ ფილაზე ჰიდროდინამიკური დატვირთვების პერიოდული მოქმედება (ხანგრძლივი დროის განმავლობაში), გახდა მისი დაშლის ძირითადი მიზეზი.

საჭიროა აღინიშნოს, რომ ცაგერის ჰიდროკვანძის წყალსაცემი ფილის შემთხვევაში, პულსაციის გავლენა, ჰიდროდინამიკური დატვირთვის ჯამურ მნიშვნელობაში, აღმოჩნდა საკმაოდ მნიშვნელოვანი - მიაღწია 35%-ს. საშუალო და მაღალდაწნევიანი ჰიდროკვანძების შემთხვევაში, ბიეფებს შორის დაწნევის ზრდის შედეგად, პულსაციის როლი მოსალოდნელია რამდენადმე კიდევ გაიზარდოს, რაც ამ ფაქტორის მნიშვნელობაზე მიუთითებს.

სამწუხაროდ, ჰიდროტექნიკური ნაგებობების პროექტირების პრაქტიკაში, ძირითადად იფარგლებიან ენერჯის ჩამქრობი ჭის გეომეტრიული ზომების დადგენით, ხოლო წყალსაცემი ფილის საპროექტო ზომები ინიშნება ძირითადად ანალოგების მიხედვით, სადაც ჰიდროდინამიკური დატვირთვები არაა გათვალისწინებული. ჩატარებულმა გაანგარიშებებმა ცხადყვეს ჰიდროდინამიკური დატვირთვების გათვალისწინების აუცილებლობა.

„კაშხლი-ფუძე“ სისტემის სტატიკური გაანგარიშების დროს მნიშვნელოვანი აღმოჩნდა ფილის თანდათანობითი ნგრევის სქემის გათვალისწინება, რომლის დროს, მყისიერი ნგრევის სქემასთან შედარებით, ფუძეში მკუმშავი ძაბვები 25%-მდე გაიზარდა. აღნიშნული კანონზომიერება შენარჩუნებულია გრუნტის როგორც წრფივი, ისე არაწრფივი დეფორმადობის გათვალისწინების დროს.

„კაშხლი-ფუძე“ სისტემის არაწრფივი გაანგარიშებით, ძაბვა-დეფორმაციის ჰიპერბოლური მრუდის გამოყენებით, მიღებულ იქნა, რომ კაშხლის ფუძეში, განსაკუთრებით უდაწნეო წახნაგის ქვეშ, ადგილი აქვს ძაბვების მნიშვნელოვან გადაწეობას. კერძოდ, მკუმშავი ძაბვების

მაღალი კონცენტრაციის ზონაში ძაბვები მცირდება, ხოლო კაშხლის ცენტრალური კვეთის მიმართულებით ძაბვები უფრო იზრდება.

„კაშხლი-ფუძე“ სისტემის არაწრფივი მუშაობა აისახება ასევე ფუძის მდგრადობაზე. კერძოდ, ძაბვების გადანაწილების შესაბამისად, ადგილი აქვს ძვრის პოტენციური ზედაპირის გადაადგილებას კაშხლის ცენტრალური კვეთის მიმართულებით. ამასთან დაკავშირებით, მთლიანობაში იზრდება არამდგრადი მასივის არე, რაც კიდევ უფრო აუარესებს კაშხლის მდგომარეობას.

არაწრფივი გაანგარიშების შედეგები აისახა ასევე მორგენსტერნ-პრაისის, ბიშოპის, ორდინარისა და ჯანბუს მდგრადობის მარაგებზე.

ჩატარებული კვლევები მიუთითებს არაწრფივობის მაღალ მნიშვნელობაზე - განსაკუთრებით არაკლდოვანი ფუძეების შემთხვევაში. სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი გაანგარიშებები საფუძვლად დაედო ცაგერის ჰიდროკვანძის სარეაბილიტაციო პროექტს.

RESUME

The Tsageri concrete dam (h=11 m) is located on a gravel foundation. Batimetric surveys, as well as underwater inspections, revealed that the stilling basin slab had been demolished and a 5 m leached pit had developed at the foundation, which had penetrated even to the foot of the structure with high compressive stress. All posed a real danger in terms of loss of stability.

The seepage length was shortened as a result of the demolition of the basin slab, which in turn increased the pressure gradients in the dam foundation wash zone. As a result, the reserves of seepage strength have decreased.

Static calculations of the “dam- foundation” system were performed taking into account the operating loads (including seepage pressures) and the nonlinear 3-axial deformation of the foundation material.

An analytical approach based on the results of experimental studies of macrofragment soils is used to approximate the "stress-deformation". The load deviation area is used for soil deformation analysis based on experimental studies by Marcella and Gupta.

Nonlinear calculations of the “dam-foundation” system were performed using the two-dimensional finite element model. The formation of the nonlinear stiffness matrix of the system was carried out by iterative calculations.

It was obtained, that the plastic deformations were increased under the influence of the concentration of compressive stresses in the contact zone of the dam and the foundation (near the leaching area in the foundation). As a result, there is a redistribution of stress. In particular, in the zone of high concentration there is unloading of the stress state and in the deeper sections of the contact zone there is loading.

By using the hyperbolic stress-strain curve, it was obtained that a significant redistribution of stresses occurred at the foundation of the dam, especially under downstream side. In particular, in the zone of high concentration of compressive stresses, the stresses decrease, while the stresses increase in the direction of the central section of the dam.

The mentioned state of stresses at the foundation affects the stability of the foundation. In particular, according to the stress distribution, there is a displacement of the potential shear surface in the direction of the central section of the dam. As a whole, the unstable area grows, which further worsens the stability condition of the dam.

During the operation of the spillways, in many cases there is a conjunction of the streams accompanied by the hydraulic jump, which reaches its maximum

value at a certain value of the gates opening. Under the influence of this, energy shortage and the pulsating load accompanying the existing turbulent regime develops on the stilling basin slab. The value of the energy shortage increases mainly with the increase of the hydraulic jump. These loads in some cases reach a fairly high value. Thus, when assessing slab strength and stability (in some cases slab anchoring) in a row of the operating loads, it is necessary to consider the hydrodynamic impact of the flow.

Thus, calculations on slab strength and stability need to be performed taking into account the total range of operating loads, according to the limiting state, in accordance with the requirements of the construction norms.

Hydrodynamic impact on tile involves two main tasks. In particular, the loads are determined:

- On the surface of the slab, under the influence of the flow stream;
- the seepage pressure developed at the bottom of the slab.

The pulsating components of the hydrodynamic load are determined according to the results of existing experimental hydraulic studies. In particular, the maximum value of the specific pulsation component on a slab is determined using analytical dependencies based on pulsed pressure data at “points”. This takes into account the ratio of the point pulse pressure standard (standard deviation) and the specific pulse load standard on the slab area.

The Tsageri medium-pressure hydropower plant stilling basin slab (5 m thick) was completely destroyed during operation. A 5 m leached pit emerged under concrete gravity dam from the downstream, created a real threat to the structure’s stability loss.

Based on the analysis of the hydraulic regimes of the Tsageri Dam, the accompanying hydrodynamic and pulsating loads of the hydraulic regime created in the stilling basin were obtained at different values of the gates opening and, in this connection, the slab stability reserves.

The hydraulic regime, developed during the conjunction of the streams, determines not only the geometric dimensions of the stilling basin slab, but also the hydrodynamic loads, developed on the slab and consequently, the strength and stability of the slab. In this regard, the design parameters of the slab (including its thickness, its reinforcement) are determined, and in the case of a rock base, also their anchoring parameters.

The paper presents separate results of numerical analysis of nonlinear work of dam and foundation.