

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

სპარტაკ ავალიანი

სამშენებლო ნაგებობათა მზიდი კონსტრუქციების ოპტიმიზაციის ამოცანები

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ა კ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი
2011 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
სამშენებლო ფაკულტეტზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ტმდ., სრ. პროფ. ზურაბ გედენიძე

რეცენზენტები: ტმდ. ვიტალი დვალიშვილი
ტმდ. სეით ბლიაძე

დაცვა შედგება 2011 წლის "12" ივლისს, ----- საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო
საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი I , აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 68.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება ტექნიკური უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა – უნივერსიტეტის ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს

სწავლული მდივანი

ტმდ., სრ. პროფ. მ. კუბლაშვილი

ნაშრომის საერთო დახასიათება

ჩვენს ქვეყანაში, ისევე როგორც მსოფლიოს თითქმის ყველა ქვეყანაში მშენებლობა, როგორც სახალხო მეურნეობის უმნიშვნელოვანესი დარგი, ღრმა კრიზისში აღმოჩნდა. დარგის შემდგომი განვითარებისათვის ძალზედ აქტუალურია სამშენებლო ნაგებობათა მზიდი კონსტრუქციების ოპტიმიზაციის გზით დანახარჯების შემცირების მიღწევა.

თხელკედლიანი კონსტრუქციები, გარსებისა და ფირფიტების სახით, ფართოდ გამოიყენება სამშენებლო საქმეში მზიდი ელემენტების სახით. ასეთი კონსტრუქციები მისი გეომეტრიული ფორმისა და კვეთის ოპტიმალურად შერჩევის პირობებში მაქსიმალურად იყენებენ მასალის მექანიკურ მახასიათებლებს, რაც პრინციპში უზრუნველყოფს მინიმალური წონის (მოცულობის) კონსტრუქციის დაპროექტებას. ასეთი კონსტრუქციების მახასიათებელია მინიმალური წონა და მაქსიმალური სიმტკიცე.

სადისერტაციო ნაშრომში კვლევის ობიექტად შერჩეულია თხელკედლიანი შემტორი ნაგებობა, რომელსაც მუშაობა უხდება ძალთა განსაკუთრებული რთული შეთანწყობისა და რთული სტატიკური, კინემატიკური და შერეული სასახლვრო პირობებში. ნაშრომში ძირითადი აქცენტი გადატანილია დაბალდაწნევიან კაშხლებზე. თუმცა გაანგარიშებით მიღებული კვლევის მეთოდები და კვლევის რიცხვითი რეალიზაციით მიღებული შედეგების ანალიზი სამართლიანი იქნება საშუალო და მაღალდაწნევიანი, აგრეთვე სხვა დანიშნულების შესაბამისი თხელკედლიანი კონსტრუქციებისათვის.

სადისერტაციო ნაშრომში აქცენტის გადატანა დაბალდაწნევიან კაშხლებზე იმითაცაა განპირობებული, რომ საქართველოსთვის ძალზედ მნიშვნელოვანია მისი ერთერთი უმდიდრესი რესურსის, მცირე მდინარეების, ენერგეტიკული პოტენციალის ათვისების დაჩქარება, (ჩვენი ქვეყნის მდინარეთა საერთო ქსელის უდიდესი ნაწილი (99,4%) “ძალიან მცირე” (25 კმ-ზე ნაკლები სიგრძის) მდინარეთა კატეგორიას მიეკუთვნება), ამ ამოცანის გადაწყვეტაც მნიშვნელოვნადაა დაკავშირებული მზიდი კონსტრუქციების ოპტიმიზაციის გზით გაიაფებასთან, თუმცადა ჰიდროტექნიკური ნაგებობის მშენებლობა ძალზედ საპასუხისმგებლოა და მისი ღირებულების შემცირება არ შეიძლება დაიგეგმოს ექსპლუატაციაში საიმედოობის შემცირების ხარჯზე. აღნიშნულის გამო ნაშრომში გაანგარიშებები ჩატარებულია თხელკედლიანი ელემენტებისაგან შედგენილ კაშხალზე. მიღებული შედეგები კი სამართლიანია სამოქალაქო და სამრეწველო დანიშნულების ანლოგიურ კონსტრუქციებისათვის.

ბეტონისა და რკინაბეტონის კაშხლებს შორის ერთ-ერთ ყველაზე გავრცელებულია გრავიტაციული კაშხლები, რომელთა უარყოფითი მხარეა დიდი მასა, გამომდინარე აქიდან ძვირადღირებული მასალების დიდი ხარჯი, მაშინ როდესაც განსაკუთრებით დაბალ და საშუალო სიმაღლის კაშხლებში მასალის (ბეტონის)

მექანიკური მახასიათებლების მხოლოდ 10 - 20% არის გამოყენებული. რაც დეფორმირებადი სხეულების მექანიკის თვალსაზრისით, აშკარად მეტყველებს მათი კონსტრუქციის არასრულყოფილებაზე.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, ინჟინერ-ჰიდროტექნიკოსთა განსაკუთრებული ყურადღების ქვეშ მოექცა საკვლევ-საძიებო სამუშაოები, რომლებიც მნიშვნელოვნად აჩქარებს და აიაფებს გრავიტაციული კაშხლების მშენებლობას. კვლევები ძირითადად ორი მიმართულებით, კაშხლის მშენებლობის ტექნოლოგიური და კონსტრუქციული სრულყოფის მიზნით, მიმდინარეობს.

მიუხედავად აღნიშნულისა, გრავიტაციული კაშხლების გაუმჯობესების, შემსუბუქების და გაიაფების, დღემდე პრაქტიკაში გამოყენებული მეთოდები 10÷15%-ით ამცირებს ტანში ბეტონის მოცულობას, ხოლო მშენებლობის კაპიტალდაბანდების შემცირება განისაზღვრება მხოლოდ 10÷12%-ით; რაც იმაზე მეტყველებს, რომ ამ მიმართულებით კვლევები ჯერ კიდევ დამთავრებული არ არის და აქტუალურია დღესაც.

დაცვის საგანს წარმოადგენს: ნაშრომში განხილული, ახალი თხელკედლიანი ყრუ და წყალსაშვიანი კაშხლის კონსტრუქცია, (რომელიც პირობითად შეგვიძლია მივაკუთვნოთ შემსუბუქებული გრავიტაციული კაშხლების კატეგორიას), რომელიც მიიღება სამი თხელკედლიანი ელემენტის ერთმანეთთან მდოვრე შეუღლებით. თხელკედლიანი ელემენტები, კაშხლის მუშაობის პირობებიდან გამომდინარე, წარმოდგენილია გარსებისა და ფილების სახით. აღნიშნული ელემენტებისათვის გადაწყვეტილია ოპტიმიზაციის ამოცანა და მიღებულია შედეგები რომელთა გამოყენებაც რეკომენდებულია როგორც ჰიდრო ასევე სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობაში.

ჩატარებულია აგრეთვე შემსუბუქებული კაშხლის გამტარუნარიანობასა და მდგრადობაზე (ფუძის სიბრტყეში ძვრასა და გადაყირაგებაზე) გაანგარიშება.

კაშხლის სამი თხელკედლიანი, მდოვრედ შეუღლებული ელემენტიდან ყველაზე საპასუხისმგებლო მზიდ კონსტრუქციას სადაწნეო წახნაგი წარმოადგენს, იგი კონსტრუქციული თვალსაზრისით ღია ცილინდრული თხელკედლიანი გარსია, რომლის სიმრუდის რადიუსი, სისქე და სიმრუდის ცენტრი შეირჩევა წინასწარ კონსტრუქციულად, ხოლო შემდგომ ზუსტდება ნაგებობის საერთო მდგრადობასა და სიმტკიცეზე გაანგარიშებით.

ნაშრომში კაშხლის სადაწნეო წახნაგის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის დასადგენად გამოყენებულია ნახევრად მომენტური გარსთა თეორია. გადამწყვეტი განტოლება მიღებულია ვ. ვლასოვისა და უ. ფინსტერგალდერის ნახევრად მომენტური გარსთა თეორიის საფუძველზე. წინასწარობის განტოლებათა სისტემა ჩაწერილია რადიალურ გადაადგილებებში, როგორც მე-8 რივის კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალური განტოლება. ცვლადთა განცალკევებით იგი

დაყვანილია მე-8 რიგის მუდმივკოეფიციენტებიან ჩვეულებრივ დიფერენციალურ არაერთგვაროვან განტოლებაზე. მახასიათებელი განტოლების ფესვთა თეორიული ანალიზის საფუძველზე მიღებულია ამ და შესაბამისად გადამწვევტ განტოლებათა ზოგადი ამონახსნი რადიალური ჩაღუნვების სახით. ინტეგრირების მუდმივები განსაზღვრულია სასაზღვრო პირობების შესაბამისი რვა განტოლებისგან შემდგარი იმ ალგებრულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნით, რომელიც მაქსიმალური მიახლოებით ახასიათებს საკვლევი წახნაგის მუშაობის რეალურ პირობებს.

მიღებულია ამოცანის ზოგადი ამონახსნის ნებისმიერი n რიგის წარმოებულის უშუალო განსაზღვრის მეთოდი, რაც მნიშვნელოვნად ამარტივებს რადიალური ჩაღუნვებით კაშხლის სადაწნეო წახნაგის ნებისმიერი შიგა ძაღვის განსაზღვრას.

ამოცანის რიცხვითი რეალიზაციისათვის შედგენილია კომპიუტერული პროგრამა MATLAB-ის ენაზე.

მოცემულია შემსუბუქებული კონსტრუქციის დაბალდაწვევიანი კაშხლის საძირკვლის ფილის სიმტკიცეზე გაანგარიშება. საძირკვლის ფილა, დაბალი ასაწყობი კაშხლისათვის, უმნიშვნელო უკუფილტრაციული დაწვევისა და რეაქტიული ძაღების გამო, წარმოდგენილია ბრტყელი ფირფიტის სახით. საშუალო და მაღალი კაშხლებისათვის კი სათანადო ფუძის გრუნტის პირობებში, საძირკვლის ფილა ჩანაცვლებულია ცილინდრული გარსით.

ნაშრომში, საძირკვლის ფილის გაანგარიშების მეთოდი ძირითადად ეფუძნება ვ. ვლასოვისა და ნ. ლეონტიევის მიერ დამუშავებულ მეთოდს.

პრაქტიკულად ყველა შესაძლო სასაზღვრო პირობებისათვის, რადიალური ჩაღუნვებით, ნაშრომში განსაზღვრულია საძირკვლის ფილის ყველა შინაგანი ძაღოვანი ფაქტორი, რომელთა მიხედვით მარტივად განისაზღვრება ძაღვის კომპონენტები და მთავარი ძაღვები. შედგენილია კომპიუტერული პროგრამა ამოცანის რიცხვითი რეალიზაციისთვის.

ჩატარებული რიცხვითი ექსპერიმენტების საფუძველზე გამოკვლეულია საძირკვლის ფილის სიმტკიცეზე თითოეული პარამეტრის გავლენა, ამონახსნთა კრებადობის საკითხი, მიღებული შედეგების შედარება და ანალიზი სხვა ავტორების მიერ შემოთავაზებულ მეთოდებთან დრეკად ფუძეში დამატებით მხები ძაღვების გავლენის ხარჯზე.

ნაშრომში ძირითადად განხილულია დრეკადი საძირკვლის ერთშრიანი ერთგვაროვანი მოდელი, თუმცა დამუშავებული მეთოდი მართებულია მრავალშრიანი მოდელისთვისაც.

კაშხალი როგორც ერთიანი ნაგებობა გაანგარიშებულია სასრულ ელემენტთა მეთოდით. გარსებისა და ფირფიტების თეორიით და სასრულ ელემენტთა მეთოდით მიღებული შედეგები პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით ერთმანეთს დაემთხვა.

ნაშრომის მეხუთე თავი ეძღვნება თხელკედლიანი ელემენტების ოპტიმალური დაპროექტების საკითხებს. ოპტიმიზაციის კრიტერიუმად მიღებულია გარსებისა და ფილების მინიმალური წონა სიმტკიცისა და სიხისტის ნორმატიული მარაგის შენარჩუნებით.

ნაგებობის სიმტკიცის პირობა ფასდება რთული დაძაბული მდგომარეობისა და მასალის გაჭიმვასა და კუმშვაზე სხვადასხვა წინაღობის გათვალისწინებით (მეფე პლასტიკური მასალები). ოპტიმიზაციის კრიტერიუმია გარსების იმ ოპტიმალური სისქეების შერჩევა, რომლებიც უზრუნველყოფს მთელი კონსტრუქციის ერთბაშად გადასვლას პლასტიკურ მდგომარეობაში. მიღებული შედეგები ხელს შეუწყობს როგორც ჰიდრო ასევე სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობით დაკავებულ საინჟინრო პერსონალს, სხვადასხვა დანიშნულების ნაგებობებში გარსებისა და ფილების ოპტიმალური სისქეების შერჩევაში და ამ გზით მასალის ეკონომიის მიღწევის საქმეში.

ნაშრომში დამუშავებული კაშხლის კონსტრუქციის გამოყენების შემთხვევაში მასალის ხარჯი 35-45% -ით შემცირდება, ხოლო ჩვენს მიერ შემოთავაზებული უნიფიცირებული კაშხლების გამოყენებისას შემტორი ნაგებობების მშენებლობის ეკონომია წინასწარი გაანგარიშებით 50%-ს აღარბებს.

ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარე ნაშრომში დამუშავებული საკითხები ჩვენი ქვეყნის პირობებში მეტად აქტუალურია.

ნაშრომის მიზანია: მნიშვნელოვანი ეკონომიური ეფექტის (25-40%) მისაღებად, შემტორი და სხვა ჰიდროტექნიკური ნაგებობების, ასევე სამოქალაქო და სამრეწველო შენობების დაპროექტებითა და მშენებლობით დაკავებულ ორგანიზაციებს მიაწოდოს ახალი ტიპის კონსტრუქციული და ტექნოლოგიური გადაწყვეტები, მასიური ნაგებობების თხელკედლიანი ოპტიმიზირებული ელემენტებით ჩანაცვლებისა და უნიფიცირების გამოყენებით.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

- დამუშავებულია მასიური გრავიტაციული (მათ შორის წყალსაშვიანი) კაშხლის ფუნქციის მქონე, თხელკედლიანი ელემენტებისაგან შედგენილი, უნიფიცირებული ასაწყობი კაშხლის კონსტრუქცია.
- თხელკედლიანი კაშხლის ელემენტებისათვის (გარსები და ფილები) შერჩეულია გაანგარიშების მეთოდი. ჩატარებულია რეალური სასაზღვრო პირობებისათვის ანალიზური გაანგარიშებები.
- დამუშავებულია და განზოგადებულია თხელკედლიანი ელემენტების (გარსები და ფილები) ანგარიშის რიცხვითი რეალიზაციისთვის კომპიუტერული საანგარიშო პროგრამები MATLAB-ის გარემოში.

- ჩატარებულია შედარებითი ანალიზი გარსებისა და ფილების ტექნიკური თეორიის გამოყენებით მიღებულ შედეგებსა და სასრულ ელემენტთა თეორიის გამოყენებით მიღებულ შედეგებს შორის.
- დამუშავებულია ოპტიმიზაციის ამოცანა ნახევრად მომენტური წონასწორობისა და მყიფე პლასტიკური მასალების სიმტკიცის, მ.მიქელადის მიერ მიღებულ, პირობათა გამოყენებით.

ნაშრომის აპრობაცია: ნაშრომის ცალკეული ნაწილები მოხსენებულია ორ საერთაშორისო კონფერენციაზე. ხოლო მთლიანი ნაშრომი სადოქტორო პროგრამით გათვალისწინებულ ორ სემინარზე.

პუბლიკაციები: ნაშრომის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 5 სამეცნიერო სტატიასა და ერთ მონოგრაფიაში.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა: ნაშრომის სრული მოცულობაა 161 გვერდი. იგი მოიცავს შესავლს, ხუთ თავს, დასკვნასა და ლიტერატურას, რომელიც 58 დასახელებისაგან შედგება.

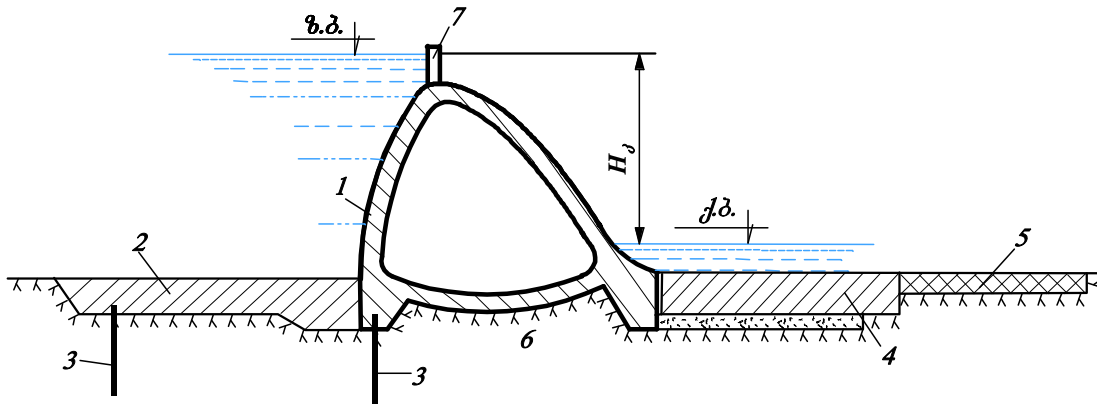
ნაშრომის შინაარსი

შესავალში განხილულია ნაშრომის საერთო შინაარსი: დასაბუთებულია დასმული საკითხის აქტუალობა, განხილულია კაშხალთმშენებლობის ტენდენციები და კვლევის თანამედროვე მიმართულება, მოყვანილია შემსუბუქებული ტიპის თხელკედლიანი, ასაწყოი კაშხლის კონსტრუქცია, მოცემულია მისი გაანგარიშების მეთოდების ანალიზი და ურთიერშედარება, განხილულია თხელკედლიანი ელემენტების ოპტიმიზაციის ამოცანის არსი და მიღებული შედეგების საიმედოობის დასაბუთება. მოცემულია ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა.

პირველ თავში: მოცემულია ახალი, შემსუბუქებული კაშხლის კონსტრუქცია, მისი თხელკედლიანი ელემენტებით კონსტრუირების საკითხები.

დაბალდაწნევიანი სათავო კვანძის კონსტრუირება არაკლდოვან ფუძეზე, კერძოდ, კაშხლის მიწისქვეშა (ფილტრაციული) კონტურისა და ფლუტბეტის შერჩევა წარმოებს ისე, როგორც კლასიკური დაბალწნევიანი კაშხლის სათავო კვანძის შემთხვევაში (ნახ.1).

პირველ თავში ასევე განხილულია შემოთავაზებული თხელკედლიანი კაშხლის უპირატესობები, ტრადიციულ ბეტონის გრავიტაციულ კაშხალთან შედარებით. მოცემულია თხელკედლიანი კაშხლის გაანგარიშებები მდგრადობაზე (ფუძის სიბრტყეში ძვრასა და გადაყირავებაზე).

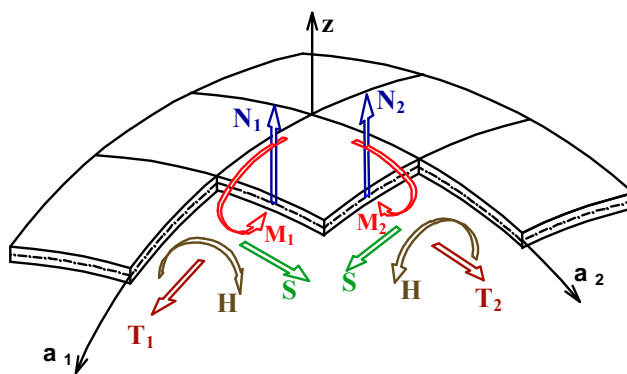


ნახ. 1. კაშხლის მიწისქვეშა კონტურის და ფლუტბეტის ელემენტები

- 1 – კაშხალი, 2 – ძირული, 3 – ნარანდი, 4 – წყალსაცემი, 5 – რისბერმა, 6 – დრენაჟი, 7 - ფარი

გამომდინარე იმ მოსაზრებიდან, რომ უნიფიკაცია და სტანდარტიზაცია 20-40%-ით აიაფებს მშენებლობას, ნაშრომის ამ თავში დამუშავებულია ოთხი სხვადასხვა სიმაღლის (1,5, 2, 3 და 5 მ) შემტბორი ნაგებობისათვის ასაწყობი უნიფიცირებული კაშხლის კონსტრუქცია. ჩატარებულია უნიფიცირებული კაშხლებისათვის სათანადო ჰიდრაულიკური გაანგარიშება და შემოწმება დატვირთვის სხვადასხვა შეთანწყობის შემთხვევაში მდგრადობაზე (ფუძის სიბრტყეში ძვრასა და გადაყირავებაზე).

მეორე თავში მოცემულია კაშხლის სადაწნეო წახნაგის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გამოკვლევა. განხილულია ცილინდრული გარსების გაანგარიშების თანამედროვე მეთოდები. შერჩეულია შემსუბუქებული კონსტრუქციის კაშხლების გაანგარიშების მეთოდი, კერძოდ პირველ ეტაზე შედეგების მაღალი სიზუსტის შესანარჩუნებლად ვიყენებთ ფილებისა და გარსების ტექნიკურ თეორიას.



ნახ. 2. ძალები გარსის ელემენტებში

ასევე მოცემულია მომენტური გარსთა თეორიით სასაზღვრო პირობა, რომელიც უნდა დაკმაყოფილდეს, თითოეულ კიდეზე.

დასაბუთებულია გაანგარიშების მეთოდი, კერძოდ ვარჩევთ ნახევრად მომენტურ თეორიას, რომელიც წარმოადგენს შუალედურს უმომენტო და მომენტურ თეორიებს

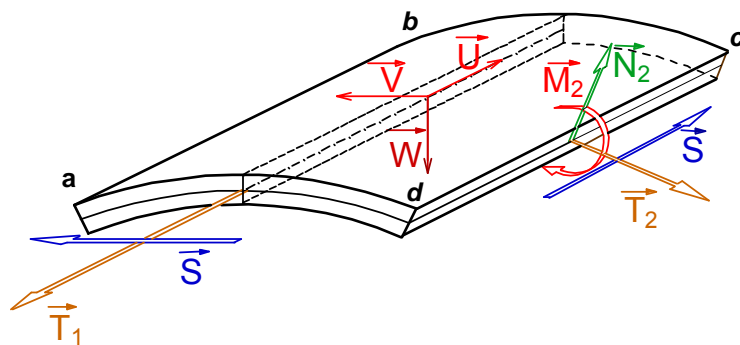
შორის. გარსის წონასწორობის განტოლებათა სისტემას ნახევრად მომენტური თეორიით შემდეგი სახე აქვს:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial S}{\partial \varphi} + q_1 &= 0, \\ \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} + \frac{N_2}{R} + q_2 &= 0, \\ \frac{1}{R} \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} - \frac{T_2}{R} + q_3 &= 0, \\ \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} - RN_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

სადაწნეო ერთმაგი სიმრუდის წახნაგის საანგარიშო სქემა შეგვიძლია წარმოვადგინოთ როგორც ცილინდრული გარსი, რომელიც ფუძეში და თხემზე ჩამაგრებულია ხისტად (დრეკადად), ხოლო გასწორის ფერდობებზე – უძრავსასსრულად. ასეთი შემთხვევისათვის, წონასწორობის განტოლებათა სისტემა, რადიალურ გადაადგილებებში ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$\frac{\partial^8 w}{\partial \varphi^8} + \left[\frac{\partial^6 w}{\partial \varphi^6} \right] + \frac{12R^6}{h^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \frac{12R^4}{Eh^3} \left(\frac{\partial^3 q_2}{\partial \varphi^3} + \frac{\partial^4 q_3}{\partial \varphi^4} - R \frac{\partial^3 q_1}{\partial x \partial \varphi^2} \right), \quad (2)$$

სადაც W რადიალური გადაადგილებაა; q_1, q_2, q_3 – ჰიდროსტატიკური წნევის ინტენსივობის გეგმილები ცილინდრულ კოორდინატთა ღერძებზე; h – გარსის სისქე (გაანგარიშების ამ ეტაპზე მუდმივად მიღებული); $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$ – გარსის შუა ზედაპირის სიმრუდის რადიუსი; E – იუნგის მოდული (ნახ. 3).



ნახ. 3. სადაწნეო გადახურვის საანგარიშო სქემა, ნახევრად მომენტური თეორიის გამოყენებით

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას

$$Q(x, \varphi) = \frac{\partial^3 q_2}{\partial \varphi^3} + \frac{\partial^4 q_3}{\partial \varphi^4} - R \frac{\partial^3 q_1}{\partial x \partial \varphi^2},$$

მაშინ (2) განტოლება შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$\frac{\partial^8 \mathbf{w}}{\partial \varphi^8} + \frac{\partial^6 \mathbf{w}}{\partial \varphi^6} + \frac{12R^6}{h^2} \frac{\partial^4 \mathbf{w}}{\partial x^4} = \frac{12\gamma R^4}{Eh^3} \mathbf{Q}(x, \varphi). \quad (3)$$

კაშხლის სადაწნეო გადახურვას ფერდობებზე აქვს თავის სიბრტყეში სახსროვნად უძრავი გადახურვა. თუ კოორდინატა სათავეს ავიღებთ წყალსაშვიანი კაშხლის სიგრძის შუაში, მაშინ სასაზღვრო პირობები როცა $\varphi=0$ ან $\varphi=\varphi_0$ და გვაქვს ხისტი ჩამაგრება ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\mathbf{u} = \mathbf{v} = \mathbf{w} = \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial \varphi} = \mathbf{0}, \quad (4)$$

სათანადო გარდაქმნებით გადამწვევტი დიფერენციალური განტოლება (3) ტოლფასია შემდეგი განტოლებათა სისტემის

$$\frac{d^8 W_m}{d\varphi^8} + \frac{d^6 W_m}{d\varphi^6} + \frac{12R^6}{h^2} \left(\frac{2m-1}{l} \pi \right)^4 W_m = \frac{12R^4}{Eh^3} Q_m(\varphi), \quad m=1,2,\dots \quad (5)$$

რომლის ამონახსნი უნდა ვეძებოთ როგორც მისი შესაბამისი ერთგვაროვანი განტოლების ზოგადი ამონახსნი პლიუს ამ განტოლების რაიმე კერძო ამონახსნი, სათანადო გაანგარიშებების შედეგად გადამწვევტი დიფერენციალური განტოლების ამონახსნი მივიღეთ შემდეგი სახით:

$$w_m = \tilde{K}_m \sin \varphi + \sum_{i=1,3,5,7} e^{\frac{a_{i+1}\varphi}{2}} \left(C_i \cos b_{\frac{i+1}{2}} \varphi + C_{i+1} \sin b_{\frac{i+1}{2}} \varphi \right), \quad (6)$$

$$\text{სადაც } \tilde{K}_m = (-1)^m \frac{4\gamma l^4}{EhR[(2m-1)\pi]^5}. \quad (7)$$

დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირების ნებისმიერი $\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_8$ მუდმივების განსაზღვრისათვის, აგრეთვე მდუნავი მომენტების და სხვა ძალოვანი ფაქტორების მოსაძებნად საჭირო $\mathbf{W}_m(\varphi)$ ფუნქციის (რადიალური გადაადგილებების) სხვადასხვა რიგის წარმოებულების ან რომელიმე \mathbf{n} რიგის წარმოებულის გამოთვლა. ამისათვის შევქმენით $\mathbf{W}_m(\varphi)$ ფუნქციის \mathbf{n} რიგის წარმოებულის გამოსათვლელი ფორმულა:

$$\begin{aligned} \frac{d^n W_m}{d\varphi^n} = & K_m \sin \left(\varphi + \frac{n\pi}{2} \right) + \sum_{i=1,3,5,7} \sqrt{(c_i^2 + c_{i+1}^2) \cdot \left(a_{\frac{i+1}{2}}^2 + b_{\frac{i+1}{2}}^2 \right)^n} \cdot e^{\frac{a_{i+1}\varphi}{2}} \cdot \\ & \cdot \cos \left(b_{\frac{i+1}{2}} - \psi_1 + n\psi_2 \right), \end{aligned} \quad (8)$$

სადაც

$$\psi_1 = \arccos \frac{c_i}{\sqrt{c_i^2 + c_{i+1}^2}} = \arcsin \frac{c_{i+1}}{\sqrt{c_i^2 + c_{i+1}^2}},$$

$$\psi_2 = \arccos \frac{\frac{a_{i+1}}{2}}{\sqrt{\frac{a_{i+1}^2}{2} + \frac{b_{i+1}^2}{2}}} = \arcsin \frac{\frac{b_{i+1}}{2}}{\sqrt{\frac{a_{i+1}^2}{2} + \frac{b_{i+1}^2}{2}}}.$$

ინტეგრების მუდმივები $C_1, C_2, C_3, \dots, C_8$ განისაზღვრება სასაზღვრო პირობებიდან. შემსუბუქებული ტიპის გრავიტაციული კაშხლის სადაწნეო გადახურვის სასაზღვრო პირობები გრძივი კიდის გასწვრივ (ფუძეში და თხემზე) როცა $\varphi = 0$ და $\varphi = \varphi_0$, იქნება:

$$\left. \begin{aligned} &\text{როცა } \varphi = 0 \\ &w_m = 0; \quad \frac{dw_m}{d\varphi} = 0; \quad \frac{d^6 w_m}{d\varphi^6} + \frac{d^4 w_m}{d\varphi^4} = 0; \\ &\frac{d^7 w_m}{d\varphi^7} + \frac{d^5 w_m}{d\varphi^5} = (-1)^{m+1} \frac{48\gamma R^5}{Eh^3(2m-1)\pi}. \\ &\text{როცა } \varphi = \varphi_0 \\ &w_m = 0; \quad \frac{dw_m}{d\varphi} = 0; \quad \frac{d^6 w_m}{d\varphi^6} + \frac{d^4 w_m}{d\varphi^4} = (-1)^{m+1} \frac{48\gamma R^5 \sin \varphi_0}{Eh^3(2m-1)\pi}; \\ &\frac{d^7 w_m}{d\varphi^7} + \frac{d^5 w_m}{d\varphi^5} = (-1)^{m+1} \frac{48\gamma R^5 \cos \varphi_0}{Eh^3(2m-1)\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(9) სისტემის ამოხსნით განვსაზღვრეთ ინტეგრირების მუდმივები $C_1; C_2; C_3; \dots, C_8$. ამ მუდმივების განსაზღვრის შემდეგ, განვსაზღვრეთ w რადიალური გადაადგილებები. ხოლო გადაადგილებების მეშვეობით განისაზღვრება ძალოვანი ფაქტორები:

$$M_2 = -\frac{Eh^3}{12R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2}, \quad (10) \quad N_2 = -\frac{Eh^3}{12R^3} \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3}, \quad (11)$$

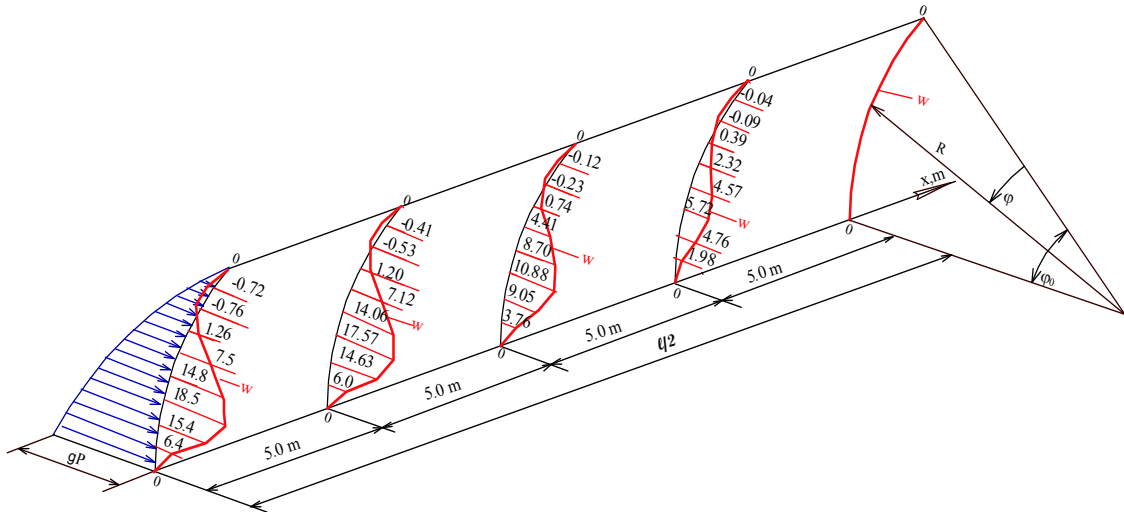
$$T_2 = -\frac{Eh^3}{12R^3} \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} - \gamma R^2 \sin \varphi, \quad (12) \quad S = \frac{Eh^3 l}{24R^4} \frac{\partial^5 w}{\partial \varphi^5} + \frac{\gamma R l}{2} \cos \varphi + \frac{Eh^3 l}{24R^4} \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{q_2 l}{2}, \quad (13)$$

$$T_1 = -\frac{Eh^3 l^2}{48R^5} \frac{\partial^6 w}{\partial \varphi^6} + \frac{\gamma l^2}{4} \sin \varphi - \frac{Eh^3 l^2}{48R^5} \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} - \frac{q_1 l}{2}. \quad (14)$$

თეორიული კვლევის შედეგების რეალიზაცია ჩატარებულია ოთხი ასაწყოში, სტანდარტიზებული და ერთი საშუალო დაწნევიანი კაშხლის ტესტურ მაგალითზე. შედეგები მიღებულია ჩვენს მიერ დამუშავებული კომპიუტერული პროგრამის (MATLAB) საშუალებით. ამასთან, თითოეული კაშხლისათვის რიცხვითი ექსპერიმენტები ჩატარდა მისი ძირითადი პარამეტრების სხვადასხვა რიცხვითი მნიშვნელობებისათვის.

მოგვეყვას ($H_j = 5.0$ მ) კაშხლის სადაწნეო წახნაგის რადიალური გადაადგილებები კაშხლის R, h, l პარამეტრების ერთერთი რიცხვითი

მნიშვნელობისათვის.



ნახ. 4. რადიალური ჩაღუნვის ეპიურები $w=w(x, \varphi)$, 10^{-4} მ, როცა $H_p = 5$ მ, $h=0.7\text{მ}$, $\ell=40.0$ მ, $R=8.75\text{მ}$.

მესამე თავში მოცემულია კაშხლის საძირკვლის კონსტრუქციის ანგარიში დრეკად ფუძეზე: გაანალიზებულია სხვადასხვა ავტორთა მიერ დრეკად ფუძეზე კოჭების, ფილებისა და გარსების გაანგარიშების მეთოდები, დაშვებები და ჰიპოთეზები.

კაშხლის ელემენტების სიმტკიცის პირობების შესაფასებლად, გარკვეული ანალიზის შემდეგ, შერჩეული იქნა ფირფიტების (ფილების) და საშუალო სისქის გარსების თეორია. რომელიც სათანადო დაშვებების საფუძველზე, პრაქტიკულად მისაღები სიზუსტით იძლევა საძიებელი პარამეტრების ანალიზურ გამოსახულებებს, რომლებიც მარტივად ემორჩილებიან ფუნქციონალურ ანალიზს.

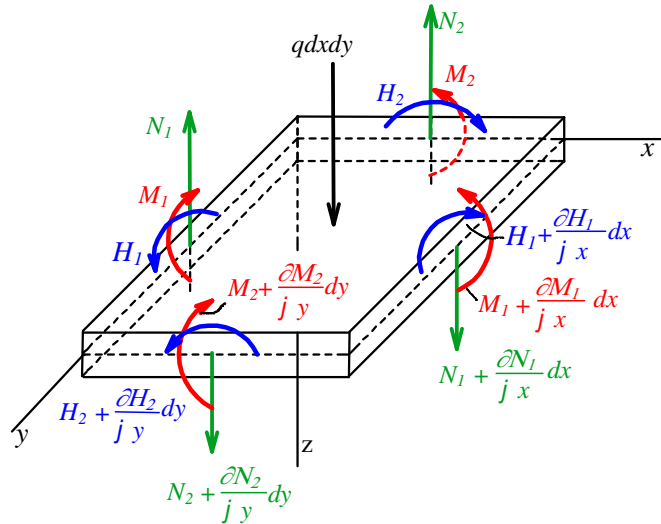
ფირფიტებისა და გარსების თეორიიდან მოყვანილია ზოგადი ცნებები და დებულებები, რომლებიც აუცილებელია ამოცანის რიცხვითი რეალიზაციისა და მიღებული შედეგების გაანალიზებისათვის. ნაშრომში ძირითადად განიხილება დრეკადი საძირკვლის ერთშრიანი მოდელი, თუმცა დამუშავებული მეთოდიკა თავისუფლად გამოიყენება სიმაღლეში განსხვავებული დრეკადი მახასიათებლიანი საძირკვლის მრავალშრიანი მოდელისათვის.

ერთშრიან დრეკად ფუძეზე თხელი ფილის ღუნვის ძირითადი (გადამწვევტი) დიფერენციალური განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\nabla^2 \nabla^2 w - 2r^2 \nabla^2 w + S^4 w = \frac{P}{D}, \quad (15)$$

(15)-ში $w=w(x,y)$ გაღუნული ფილის ზედაპირის განტოლებაა; D - ფილის ცილინდრული

სიხისტე $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ - ლაპლასის მეორე რიგის ოპერატორი;



ნახ. 5. ფილის უსასრულოდ მცირე ელემენტში ძალები და მომენტები

$\mathbf{P}=\mathbf{P}(x,y)$ - ფილაზე მოქმედი ზედაპირული ძალის ინტენსივობა, რომელსაც თუ გამოვაკლებთ დრეკადი ფუძის რეაქტიულ დაწნევას, მივიღებთ ფილაზე მოქმედ საერთო გარე დატვირთვას; r^2 და S^4 - ფილისა და საძირკვლის განზოგადებული დრეკადი მახასიათებლები

$$r^2 = \frac{E_0}{4(1 + \nu_0)D} \int_0^T \Psi^2(z) dz = \frac{t}{D} \quad S^4 = \frac{E_0}{(1 - \nu_0^2)D} \int_0^T \Psi^2(z) dz = \frac{k}{D} \quad (16)$$

ფუძის მახასიათებლები (E_0 და ν_0) განსახილველ შემთხვევაში განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებებით:

$$E_0 = \frac{E_{გრ}}{1 - \nu_{გრ}^2}, \quad \nu_0 = \frac{\nu_{გრ}}{1 - \nu_{გრ}^2}, \quad (17)$$

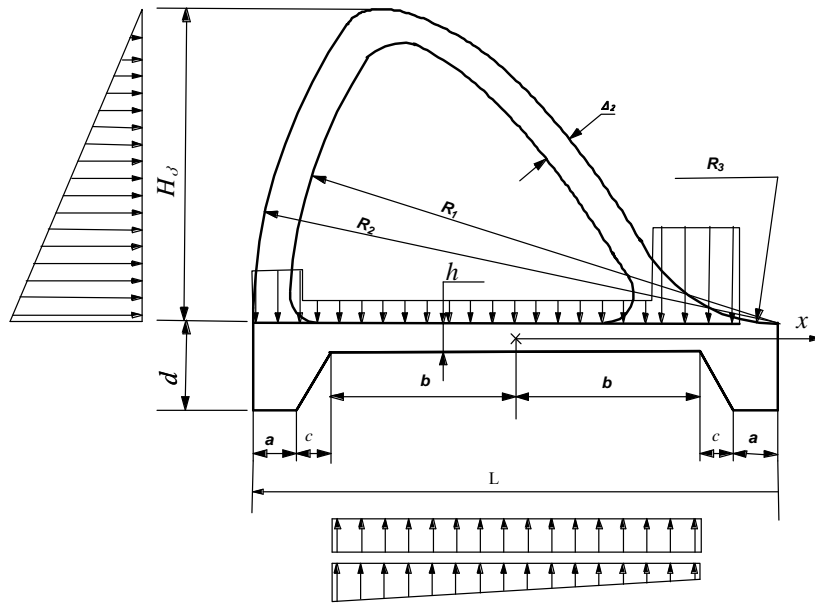
სადაც $E_{გრ}$ და $\nu_{გრ}$ შესაბამისად ფუძის გრუნტის დრეკადობის მოდული და პუასონის კოეფიციენტებია; $\Psi(z)$ - გადაადგილების განივი განაწილების ფუნქციაა. პრაქტიკაში საკმაოდ თხელი დრეკადი შრისათვის, რომლის ზღვრებში ნორმალური \mathbf{s}_y ძაბვა რჩება პირობითად მუდმივი, ხოლო მხები ძაბვები იცვლება წრფივი კანონით, ხშირად ღებულობენ

$$\Psi(z) = \frac{T - z}{T}. \quad (18)$$

თუ კუმშვადი ფენის T სისქე მნიშვნელოვანია, მაშინ (18) გამოსახულება ძალზე მიახლოებით ახასიათებს დრეკადი ფუძის მუშაობას. ასეთ პირობებში ფილის ჯდომისა და ფუძეში ძაბვების განაწილების ფუნქციისათვის ხშირად ღებულობენ

$$\psi(z) = \frac{sh\gamma_1(T - y)}{sh\gamma_1 T}, \quad (19)$$

სადაც γ_1 მუდმივი კოეფიციენტია, რომელიც ახასიათებს ფუძის სიღრმეში ჯდომის ჩაქრობის სიჩქარეს.



ნახ. 6. დრეკად ფუძეზე კაშხლის საძირკვლის ფილის საანგარიშო სქემა

განხილული დრეკადი ფუძის საანგარიშო მოდელი (15) ორი დრეკადი k, t მახასიათებლით, იმით განსხვავდება ვინკლერ-ციმერმანის განტოლებისგან, რომ აქ შენარჩუნებულია დამატებითი წევრი r^2 კოეფიციენტით, რომლითაც გათვალისწინებულია დრეკად ფუძეში აღძრული მხები ძაბვები. თუ კოორდინატა სათავეს ავიღებთ ფილის შუაში (ნახ.6), მაშინ, როცა $y = \pm \frac{l}{2}$, $W=M_2=0$, ე.ი.

$$W = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0. \quad (20)$$

ასეთი სასაზღვრო პირობების შემთხვევაში, (15) განტოლების ამონახსნი და ზედაპირული დატვირთვა შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი კრებადი მწკრივების სახით: $w(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} w_m(x) \cos \frac{2m-1}{l} \pi y$, $-b \leq x \leq b$; $-l/2 \leq y \leq l/2$, (21)

$$P(x,y) = P \sum_{m=1}^{\infty} P_m(x) \cos \frac{2m-1}{l} \pi y. \quad (22)$$

პრაქტიკულად, კაშხლის საძირკვლის ფილაზე დატვირთვები იცვლება მხოლოდ x ღერძის გასწვრივ, მაშინ

$$P_m(x,y) = \frac{2}{l} \sum_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} P_m \cos \frac{2m-1}{l} \pi y dy = \frac{2P}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \cos \frac{2m-1}{l} \pi y dy = (-1)^{m+1} \frac{4P}{(2m-1)\pi}. \quad \text{თუ}$$

(15) განტოლებაში ჩავსვათ (21) და (22) გამოსახულებათა მნიშვნელობებს, მივიღებთ:

$$\frac{d^4 w_m}{dx^4} - 2(\lambda_m^2 + r^2) \frac{d^2 w_m}{dx^2} + (\lambda_m^4 + 2r^2 \lambda_m^2 + S^4) w_m = \frac{P_m}{D}, \quad (23)$$

$$\text{სადაც } \lambda_m = \frac{2m-1}{l} \pi.$$

(23) არის დრეკად ფუძეზე ფილის ღუნვის გადამწვევებ განტოლებიდან ცვლადთა განცალკევებით მიღებული ჩვეულებრივი არაერთგვაროვანი დიფერენციალური განტოლება.

მეოთხე რიგის ჩვეულებრივი ერთგვაროვანი დიფერენციალური განტოლების ზოგადი ინტეგრალი ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$W_m = C_1 \Phi_1 + C_2 \Phi_2 + C_3 \Phi_3 + C_4 \Phi_4, \quad (24)$$

სადაც C_1, C_2, C_3, C_4 ინტეგრების მუდმივებია, ხოლო $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ - ფუნქციები, რომელთა მნიშვნელობას განსაზღვრავს (23) არაერთგვაროვანი განტოლების შესაბამისი ერთგვაროვანი მახასიათებელი

$$K^4 - 2a_1^2 K^2 + a_2^4 = 0 \quad (25)$$

განტოლების ფესვები, რომელიც, თავის მხრივ, დამოკიდებულია ყოველთვის დადებითი a_1 და a_2 კოეფიციენტების თანაფარდობაზე ($a_1^2 = \lambda_m^2 + r^2$; $a_2^4 = \lambda_m^4 + 2r^2 \lambda_m^2 + S^4$). ნაშრომში მოცემულია მახასიათებელი განტოლების ფესვების სამი შესაძლო ვარიანტი და შესაბამისი $\Phi_i (i=1,2,3,4)$ ფუნქციათა მნიშვნელობანი.

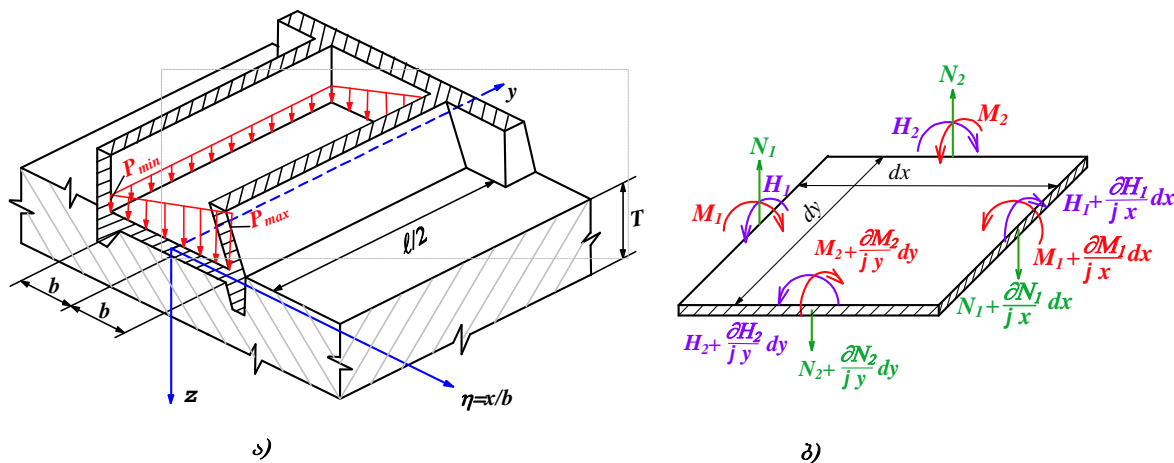
მეოთხე რიგის მუდმივკოეფიციენტიანი არაერთგვაროვანი ძირითადი განტოლების ზოგადი ამონახსნი, შეიძლება ჩაეწეროს შემდეგი სახით ;

$$w_m = C_1 \Phi_1 + C_2 \Phi_2 + C_3 \Phi_3 + C_4 \Phi_4 + (-1)^{m+1} 2 \frac{b^4 P_{\text{მკ}} + P_{\text{მთ}} + (P_{\text{მკ}} + P_{\text{მთ}}) \eta}{a_2^4 D(2m-1)\pi}, \quad (26)$$

სადაც $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ ფუნქციებია, რომელთა მნიშვნელობას განსაზღვრავს a_1 და a_2 კოეფიციენტებს შორის თანაფარდობა, ანუ შესაბამისი მახასიათებელი განტოლების ფესვები.

დავუშვათ, რომ შემსუბუქებული გრავიტაციული კაშხლის საძირკვლის ფილა ხისტადაა შეერთებული სადაწნეო და უდაწნეო წახნაგებთან. ამ გვერდების გასწვრივ, როგორც წესი, კაშხლის მიწისქვეშა კონტურს აქვს კბილები (ნახ. 6). შესაბამისად, საანგარიშო სქემაზე გამოსახული საძირკვლის ფილა გრძივი გვერდების გასწვრივ ($\eta = \pm 1$) შეგვიძლია ჩავთვალოთ ხისტად ჩამაგრებულად, ანუ როცა $\eta = \pm 1$, მაშინ

$$w = \frac{\partial w}{\partial \eta} = 0.$$



ნახ. 7. კაშხლის საძირკვლის ფილის საანგარიშო სქემა.

ამ სასაზღვრო პირობისა და Φ_i ფუნქციათა ლუწი და კენტი თვისებების გათვალისწინებით, ინტეგრირების მუდმივები (C_1, C_2, C_3, C_4) ადვილად გამოითვლება.

საძირკვლის ფილაში აღძრული მომენტები და განივი ძალები (ნახ. 7.ბ) ჩატარებულ გამოკვლევათა საფუძველზე, გამოითვლება შემდეგნაირად:

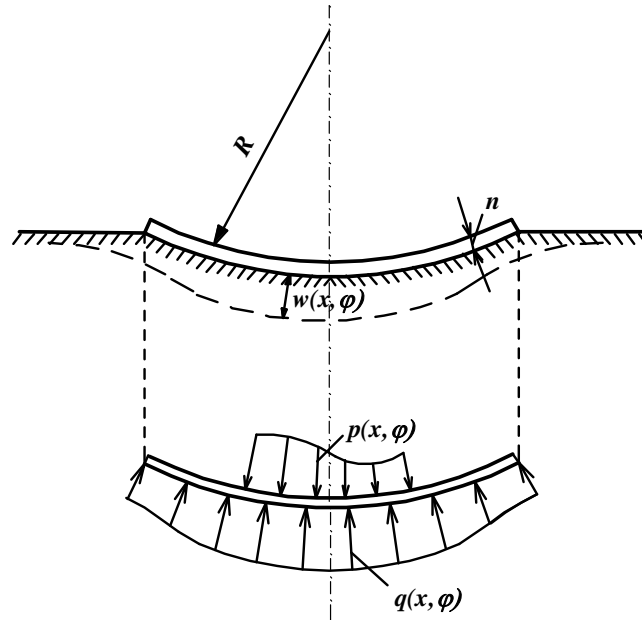
$$\begin{aligned}
 M_1 &= -D \sum_{m=1}^n \left(\frac{1}{b^2} w_m'' - \nu \lambda_m^2 w_m \right) \cos \lambda_m Y, \\
 M_2 &= D \sum_{m=1}^n \left(\lambda w_m - \nu \frac{1}{b^2} w_m'' \right) \cos \lambda_m Y, \\
 H = H_1 = -H_2 &= D(1 + \nu) \sum_{m=1}^n \left(\frac{\lambda_m}{b} w_m' \right) \sin \lambda_m Y, \\
 N_1 &= -D \sum_{m=1}^n \left(\frac{1}{b^3} w_m''' - \frac{\lambda_m^2}{b} w_m' \right) \cos \lambda_m Y, \\
 N_2 &= D \sum_{m=1}^n \left(\frac{\lambda_m^2}{b^2} w_m'' - \lambda_m^3 w_m \right) \sin \lambda_m Y. \quad (27)
 \end{aligned}$$

ძალებისა და მომენტების განსაზღვრის შემდეგ, გამოვთვალოთ სათანადო ძაბვები.

მექანიკური მახასიათებლების უფრო სრულყოფილად გამოყენების მიზნით, განსაკუთრებით მაშინ, როცა საძირკვლის კონსტრუქციაზე ქვევიდან ზევით მიმართული (უკუფილტრაციული) ძალები მნიშვნელოვანია, ფილის ნაცვლად შემსუბუქებულ კაშხლებში გამოყენებული იქნება გარსები, ხშირად ცილინდრული კონსტრუქციის. რადგან შემოთავაზებული ტიპის კაშხლები ძირითადად შენდება განიერ კალაპოტებში სადაც საძირკვლის გარსის სიგრძე ჩვეულებრივ 4-6-ჯერ აჭარბებს მის სიგანეს. შესაბამისად, საძირკვლის ცილინდრული გარსის ფარდობითი სიგრძე და მის კონტურზე სასაზღვრო პირობები, საშუალებას იძლევა მისი დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის აღსაწერად გამოყენებულ იქნეს ნახევარმომენტური ტექნიკური გარსების თეორია. ამ თეორიის საფუძველზე, ცილინდრულ კოორდინატთა სისტემაში წონასწორობის განტოლებათა სისტემა, სათანადო გარდაქმნისა და

კინემატიკური ხასიათის დაშვებების გათვალისწინებით და განივი ძალის შენარჩუნებით, ერთ შრიან დრეკად ფუძისათვის შემდეგ სახეს ღებულობს:

$$\frac{\partial^8 F}{\partial \varphi^8} + \left(2 - \frac{2tR^2}{D}\right) \frac{\partial^6 F}{\partial \varphi^6} + \frac{\partial^4 F}{\partial \varphi^4} \left(1 + \frac{kR^4}{D}\right) - \frac{2tR^4}{D} \frac{\partial^6 F}{\partial x^2 \partial \varphi^4} + \frac{12R^6}{h^2} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} = \frac{R^4}{D} P. \quad (28)$$



ნახ. 8. საძირკვლის ცილინდრული გარსის საკონტაქტო ზედაპირის ნორმალური w გადაადგილებები (დრეკადი ფუძის ჯდომა)

გადამწვევტი დიფერენციალური განტოლების (28) ამოხსნა გათვალისწინებულია ცვლადთა განცალკევებით, რომლისთვისაც გამოიყენება ერთმაგი ტრიგონომეტრიული მწკრივი. სათანადო გარდაქმნებით ნახევარუმომენტო საძირკვლის ცილინდრული გარსის განტოლება, შემდეგ სახეს ღებულობს:

$$\frac{d^8 F_m}{d\varphi^8} + \left(2 - \frac{2tR^2}{D}\right) \frac{d^6 F_m}{d\varphi^6} + \left(1 + \frac{kR^4}{D} + \frac{2tR^4 \lambda_m^2}{D}\right) \frac{d^4 F_m}{d\varphi^4} + \frac{12R^6 \lambda_m^4}{h^2} F_m = (-1)^{m+1} \frac{4R^4 P(\varphi)}{(2m-1)\pi}, \quad (29)$$

სადაც $\lambda_m = \frac{2m-1}{l}$. გადამწვევტი საბოლოო კერძოწარმოებულიანი არაერთგვაროვანი განტოლების ზოგადი ამონახსნი ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$F(x, \varphi) = \sum_{m=1}^{\infty} (F_m^*(\varphi) + \tilde{F}_m(\varphi) \cos \frac{2m-1}{l} \pi x, (m=1,2,3,\dots)). \quad (30)$$

ამ ამონახსნის საფუძველზე განისაზღვრება გადაადგილებები და შიგა ძალოვანი ფაქტორები. რომელთა მიახლოებითი მნიშვნელობა, როცა პუასონის კოეფიციენტს ვიღებთ 0-ის ტოლად, იქნება:

$$T_1 = Eh \frac{\partial u}{\partial x}, \quad T_2 = Eh \left(\frac{1}{h} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{w}{R} \right), \quad S = \frac{Eh}{2} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad M_1 = -D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2},$$

$$M_2 = -\frac{D}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2}, \quad H = -\frac{Eh^3}{12R} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \varphi}, \quad N_1 = \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial H}{\partial \varphi}, \quad N_2 = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_2}{\partial \varphi}. \quad (31)$$

შემსუბუქებული კონსტრუქციის გრავიტაციული კაშხლის საძირკვლის ფილის დრეკად ფუძეზე გაანგარიშება ჩავატარეთ როგორც პირობითი ასევე ასაწყო სტანდარტიზირებული კაშხლებისათვის, რომელთა საანგარიშო მონაცემები მოცემულია ცხრილში;

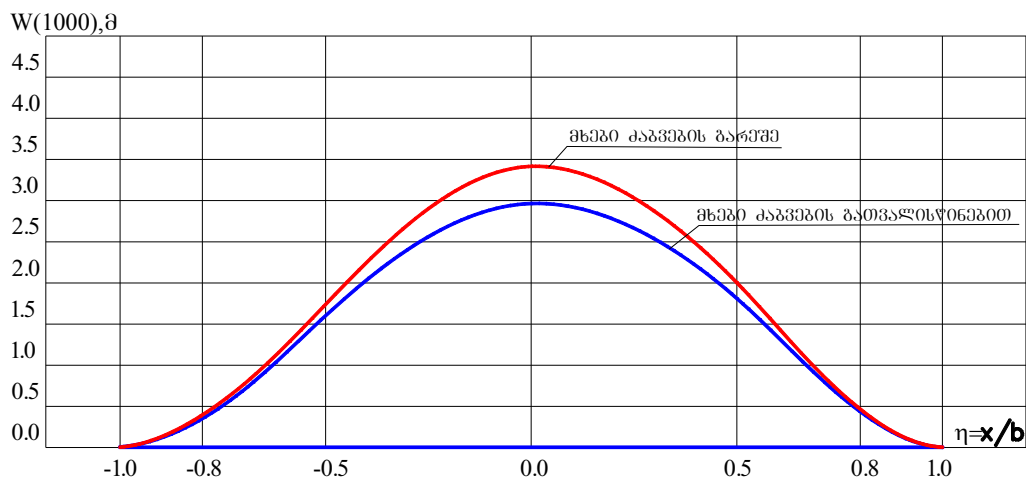
ცხრილი 1.

ასაწყო კაშხლების საძირკვლის საანგარიშო ძირითადი მონაცემები

კაშხლის სიმაღლე H_c , მ	b, მ	ℓ , მ	h, მ	T, მ	P, მპა		საერთო მონაცემები
					max	min	
5,0	3,15	30	0,50	20,0	0,544	0,060	$\gamma_1=0,5$ $E=2,4 \cdot 10^4$ მპა $\nu=0,2$ $\nu_{გრ}=0,3$ $E_{გრ}=20,0$ მპა
3,0	1,75	20	0,40	15,0	0,527	0,059	
2,0	1,48	20	0,35	12,0	0,508	0,057	
1,5	1,0	20	0,35	10,0	0,567	0,063	

გაანგარიშებები ჩავატარეთ დრეკად ფუძეში აღძრული მხები ძაბვების გათვალისწინებითა და აღნიშნული ძაბვების უგულებელყოფის შემთხვევაში.

ნახ. 9.-ზე მოცემულია საძირკვლის ფილის შუა წერტილის ($\eta=\nu=0$) რადიალური ჩაღუნვების გრაფიკები დრეკად ფუძეში აღძრული მხები ძაბვების გათვალისწინებით და მის გარეშე.



ნახ. 9. რადიალური ჩაღუნვების გრაფიკი დრეკად ფუძეში აღძრული მხები ძაბვების გათვალისწინებითა და მის გარეშე.

რიცხვითი ექსპერიმენტის საფუძველზე დადგენილია საძიებელ პარამეტრების მნიშვნელობათა კრებალობის საკითხი. პრაქტიკულად მისაღებ შედეგებს იძლევა მეორე, მესამე მიახლოება ($m=2,3$), ანუ, როცა საძიებელი პარამეტრის მწკრივში ვინარჩუნებთ ორ ან სამ შესაკრებს. ცდომილება ამ დროს შესაბამისად არ აჭარბებს $\sim 5,3\%$ -ს, რაც დამოკიდებულია საძიებელ პარამეტრებზე და ფილის მახასიათებელი

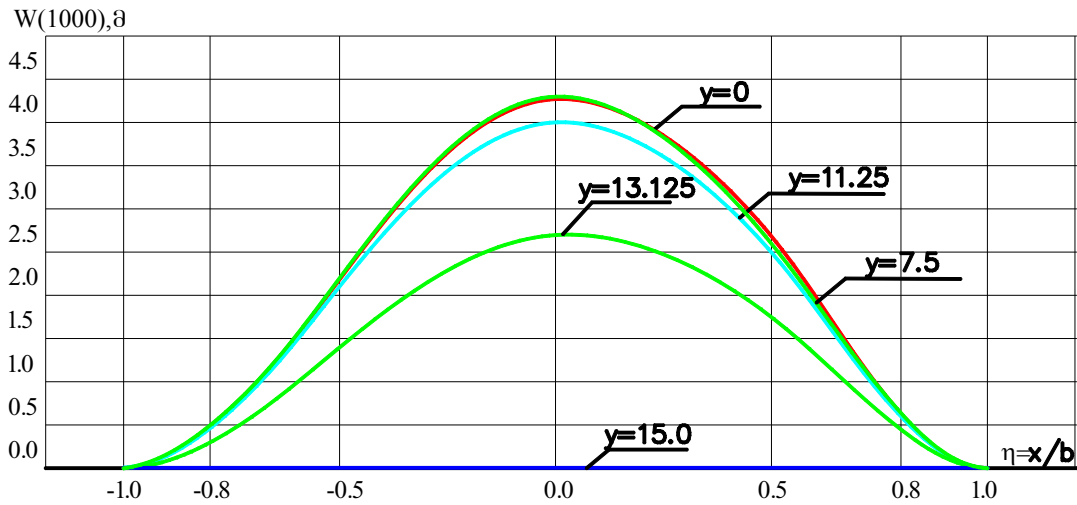
წერტილის მდებარეობაზე. ამოცანის რიცხვითი რეალიზაციისათვის შედგენილი კომპიუტერული პროგრამის საფუძველზე ადვილად დგინდება მიღებულ შედეგებზე სხვადასხვა პარამეტრების გავლენა, მათ შორის, ფუძის სიღრმეში გრუნტის ჯდომის სიჩქარის კოეფიციენტის გავლენა.

მოგვეყავს 5მ სიმაღლის კაშხლის გაანგარიშების შედეგები ცხრილური ფორმით:

ცხრილი 2. ($H_3=5\text{მ}$)

პარამეტრები	$\eta=x/b$	$Y, \text{ მ}$					
		0	3.75	7.5	11.25	13.125	15
$W, \text{ მ}$	-1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
	-0.8	0.000492	0.000484	0.000487	0.000468	0.000325	0.000000
	-0.5	0.002228	0.002197	0.002207	0.002089	0.001429	0.000000
	0	0.004292	0.004234	0.004250	0.004006	0.002732	0.000000
	0.5	0.002649	0.002600	0.002614	0.002517	0.001759	0.000000
	0.8	0.000649	0.000633	0.000638	0.000630	0.000454	0.000000
	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
$M_1, \text{ კვ. მ/მ}$	-1	777.353	761.302	766.896	750.039	530.940	0.000
	-0.8	397.886	394.251	395.234	366.014	244.121	0.000
	-0.5	-54.659	-52.701	-53.534	-55.555	-41.195	0.000
	0	-444.029	-439.227	-440.023	-403.476	-267.880	0.000
	0.5	-192.292	-184.572	-186.537	-195.067	-148.663	0.000
	0.8	419.733	417.275	417.702	386.045	254.855	0.000
	1	1100.062	1064.685	1075.473	1084.913	803.380	0.000
$M_2, \text{ კვ. მ/მ}$	-1	-155.471	-152.260	-153.379	-150.008	-106.188	0.000
	-0.8	-78.078	-78.175	-78.297	-72.379	-47.523	0.000
	-0.5	16.626	13.215	13.554	14.130	13.160	0.000
	0	99.473	92.990	93.338	86.218	62.783	0.000
	0.5	47.118	40.935	41.637	43.653	37.246	0.000
	0.8	-81.120	-82.144	-82.127	-75.694	-48.503	0.000
	1	-220.012	-212.937	-215.095	-216.983	-160.676	0.000
$H, \text{ კვ. მ/მ}$	-1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	-0.8	0.000	-3.996	5.909	26.943	116.590	172.887
	-0.5	0.000	-4.560	7.071	44.507	161.470	232.983
	0	0.000	-1.416	2.373	0.225	20.841	35.237
	0.5	0.000	4.728	-7.271	-46.110	-168.660	-243.591
	0.8	0.000	6.742	-10.621	-25.172	-150.508	-232.395
	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$N_1, \text{ კვ/მ}$	-1	650.862	620.090	631.474	686.081	540.123	0.000
	-0.8	557.226	539.058	545.922	566.414	423.821	0.000
	-0.5	404.389	394.375	398.032	397.936	287.572	0.000
	0	74.388	69.740	70.974	77.852	63.939	0.000
	0.5	-436.958	-428.202	-431.100	-428.450	-305.190	0.000
	0.8	-892.523	-853.603	-865.960	-916.576	-710.831	0.000
	1	-1289.49	-1203.04	-1232.05	-1364.28	-1129.90	0.000
$N_2, \text{ კვ/მ}$	-1	0.000	-9.072	13.413	36.329	210.315	323.249
	-0.8	0.000	-3.522	-1.846	29.781	103.164	145.504
	-0.5	0.000	-2.945	-24.294	-5.143	-12.956	-24.718

	0	0.000	-4.424	-48.371	-43.044	-107.896	-157.762
	0.5	0.000	-2.465	-36.757	-6.963	-50.797	-91.720
	0.8	0.000	-4.163	-5.898	32.425	109.394	151.401
	1	0.000	-18.678	30.378	22.467	304.210	497.261



ნახ. 10. საძირკვლის ფილის რადიალური ჩაღუნვების გრაფიკი

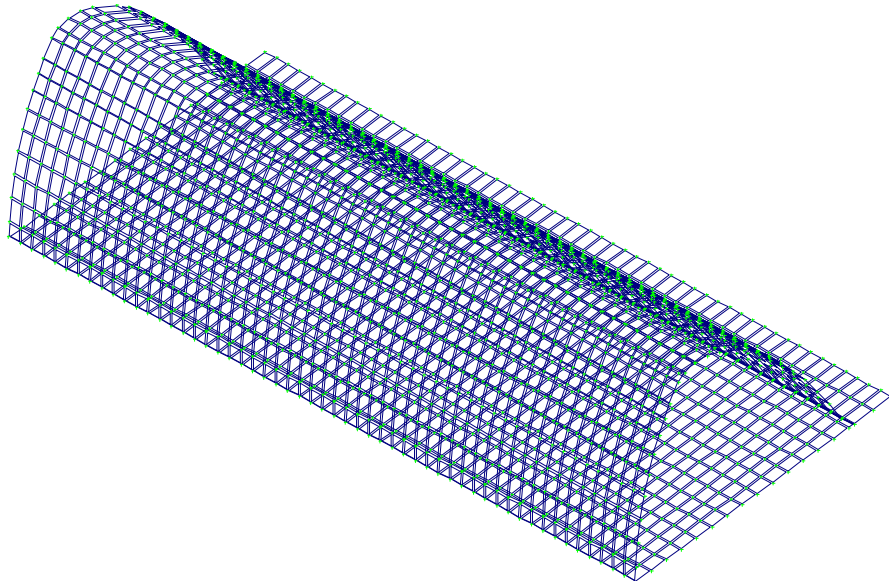
მეთოხე თავში მოცემულია კაშხლების გაანგარიშება სასრულ ელემენტთა მეთოდით. კერძოდ, სასრულ ელემენტებზე დაფუძნებული ტიპური პროგრამების გამოყენებით („LiRa-9.6“), კაშხლის კონსტრუქციები გაანგარიშებულ იქნა, როგორც ერთიანი სივრცითი სისტემა დრეკად ფუძეზე (კაშხალი ფუძე. იხ. ნახ. 11), ასევე არმატურის განივკვეთები შერჩეულია აღნიშნული პროგრამების მეშვეობით.

რკინაბეტონის კაშხლის დაპროექტებისას გამოყენებულია დღეისათვის საქართველოში მოქმედი სამშენებლო ნორმები და წესები. გაანგარიშებისას შეიქმნა კონსტრუქციის ისეთი იდეალიზებული მოდელი, რომელიც უახლოვდება კონსტრუქციის რეალურ მუშაობას.

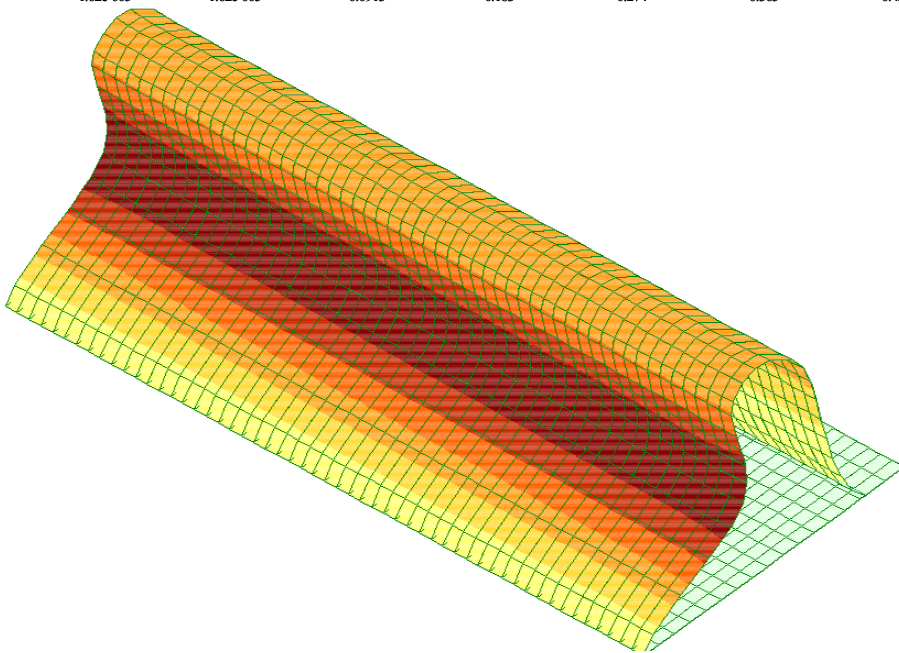
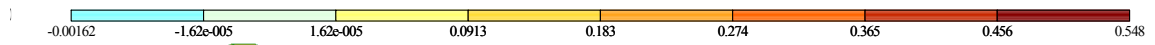
პირველ ეტაპზე განისაზღვრა კონსტრუქციის გეომეტრია, კერძოდ: კვანძების რაოდენობა, მათი კოორდინატები, შემდეგ ეტაპზე საორიენტაციო განივკვეთები და შესაბამისი მასალის დრეკადობის მოდული და სხვა საჭირო მექნიკური მახასიათებლები.

კონსტრუქციის გასაანგარიშებელი ტიპური პროგრამის გამოყენებისას, საორიენტაციო გაანგარიშების ნაცვლად, გამოყენებულია დაბალი კაშხლების დაპროექტების გამოცდილება და ნაშრომში მოცემული ანალიზური გაანგარიშებების შედეგები.

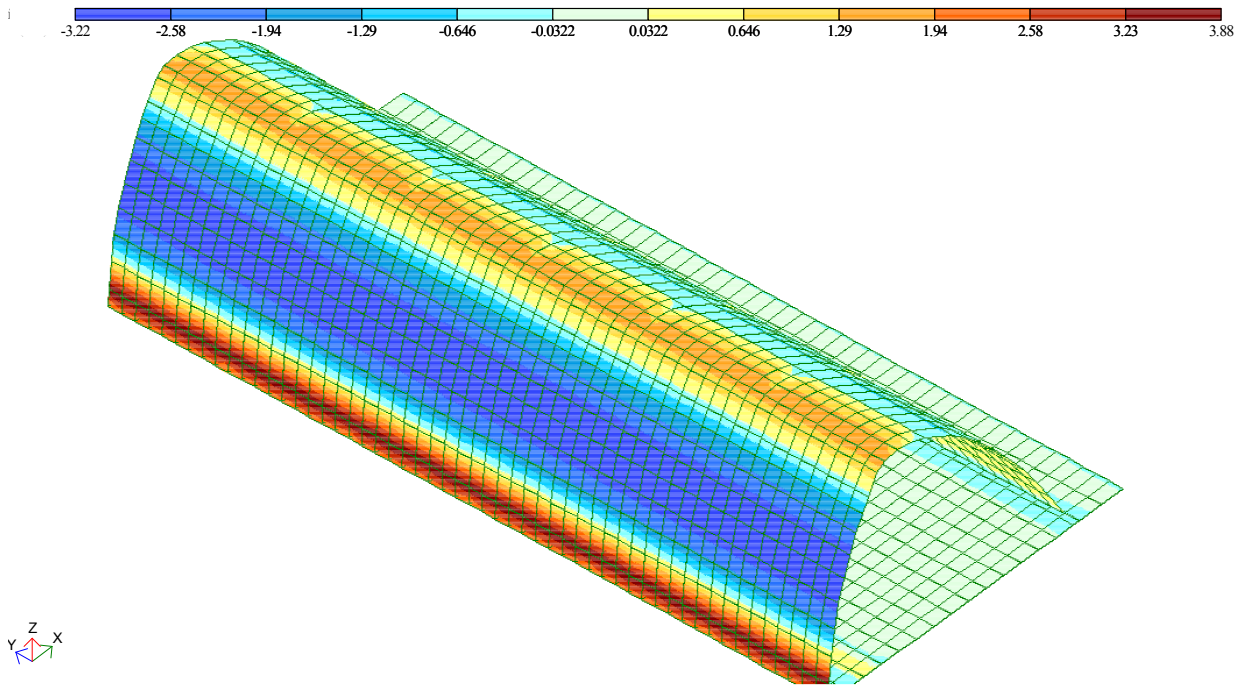
დეტალურადაა განხილული ერთი სტანდარტიზებული სიმაღლის ($H_p=5.0\text{მ}$) ასაწყოები კაშხლის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კომპონენტების მნიშვნელობანი და შედეგები შედარებულია ჩვენ მიერ შერჩეული გაანგარიშების მეთოდით (ფირფიტებისა და გარსების თეორია) მიღებულ მონაცემებთან.



ნახ. 11. კაშხლის საერთო ხედი



ნახ. 4.3. რადიალური გადაადგილებები სადაწნეო წახნაგში (W მმ)
(ვიზუალიზაციისათვის გადაადგილებები გაზრდილია 5000-ჯერ)



ნახ. 12. მღუნავი მომენტი (M_2 ტ*მ/მ)

კაშხლის სექციის სიმტკიცეზე სასრული ელემენტებით გაანგარიშების შედეგები პრაქტიკულად ახლოსაა ანალიზური გაანგარიშების შედეგებთან. სხვაობა გაანგარიშების შედეგებს შორის განპირობებულია, როგორც გაანგარიშების მეთოდების დაშვებით, აგრეთვე იმით, რომ სასრული ელემენტების მეთოდით გაანგარიშებისას დამატებით გათვალისწინებულია 9 ბალიანი მიწისძვრის შედეგად სეისმური ზემოქმედება.

სასრულ ელემენტთა მეთოდით გაანგარიშების შედეგად განსაზღვრული ძალებიდან ნაშრომში მოყვანილია მხოლოდ გრძივი ძალები (T_1, T_2), მღუნავი მომენტი (M_2) და განივი ძალა (N_2), ვინაიდან დანარჩენი ძალები და მომენტები, (M_1, H და N_1) განსაკუთრებით სადაწნეო წახნაგში მნიშვნელოვნად მცირეა და ამდენად, საინჟინრო გაანგარიშებებისათვის ჩვენს მიერ ნახევრად მომენტური ტექნიკური გარსების თეორიის გამოყენების სამართლიანობას ადასტურებს.

მეხუთე თავში გადაწყვეტილია გარსებისა და ფილებისათვის ოპტიმალური დაპროექტების ამოცანა. განხილულია ოპტიმალური დაპროექტებისათვის ზოგადი მითითებები, თხელკედლიანი ელემენტების ოპტიმიზაციის სფეროში არსებული ლიტერატურა და სხვადასხვა ავტორთა მიღებული შედეგები. ნაშრომში ოპტიმიზაციის შემზღუდავ პირობად მიღებულია მინიმალური მოცულობა, როგორც ეს ზოგადად მიღებულია დეფორმირებადი სხეულების მექანიკაში.

ნაშრომში მოცემულია თხელკედლიანი სადაწნეო წახნაგის ისეთი ოპტიმალური სისქეების შერჩევა, რომელიც უზრუნველყოფს მისი ყველა უბნის ერთდროულ და მყისიერ გადასვლას პლასტიკურ მდგომარეობაში. ამოცანა ამოხსნილია ნახევრად

მომენტური გარსების თეორიისა და გაჭიმვა-კუმშვაზე სხვადასხვა წინააღმდეგობის მასალის სიმტკიცის პირობის გამოყენებით. კერძოდ კაშხლის ოპტიმალური სისქეების განსაზღვრა ხორციელდება სტასის სიმტკიცის პირობის მოდიფიცირებული ფორმით, რომელიც პრაქტიკულად მისაღები სიზუსტით უზრუნველყოფს მინიმალური წონის კაშხლის სადაწნეო წახნაგის დაპროექტებას.

სადაწნეო გადახურვის ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტა განიხილება ორ ვარიანტად.

ნაშრომში მოცემულია რთული დაძაბული მდგომარეობისას მასალათა დენადობის პირობები მყიფე პლასტიკური მასალებისათვის, კერძოდ რადგან მასალის ზღვრული მდგომარეობა განისაზღვრება ოქტაედრული მხები და ოქტაედრული ნორმალური ძაბვების არასასურველი კომბინაციით, მყიფე-პლასტიკური მასალების სიმტკიცის პირობა ორგანოზომილებიან სისტემაში შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + (\rho - 1)\sigma_s(\sigma_1 + \sigma_2) = \rho\sigma_s^2,$$

სადაც σ_s და $\rho\sigma_s$ მასალის წინააღმდეგობაა შესაბამისად გაჭიმვასა და კუმშვაზე.

σ_1 და σ_2 მთავარი ნორმალური ძაბვების ძაბვის ტენზორით შეცვლით, მივიღებთ:

$$\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 3\sigma_{12}^2 + (\rho - 1)\sigma_s(\sigma_{11} + \sigma_{22}) - \rho\sigma_s^2 = 0. \quad (32)$$

ნახ. 13.-ზე მოცემულია ორგანოზომილებიან სისტემაში დენადობის ზღვრული ზედაპირი, სტასის ($\sigma_s = 1,5$ მპა; $\rho\sigma_s = 16$ მპა) და მიზესის ($\sigma_s = 16$ მპა) სიმტკიცის პირობების მიხედვით, რომლებიც გრაფიკულად წარმოადგენს ელიფსურ ჰიპერცილინდრებს.

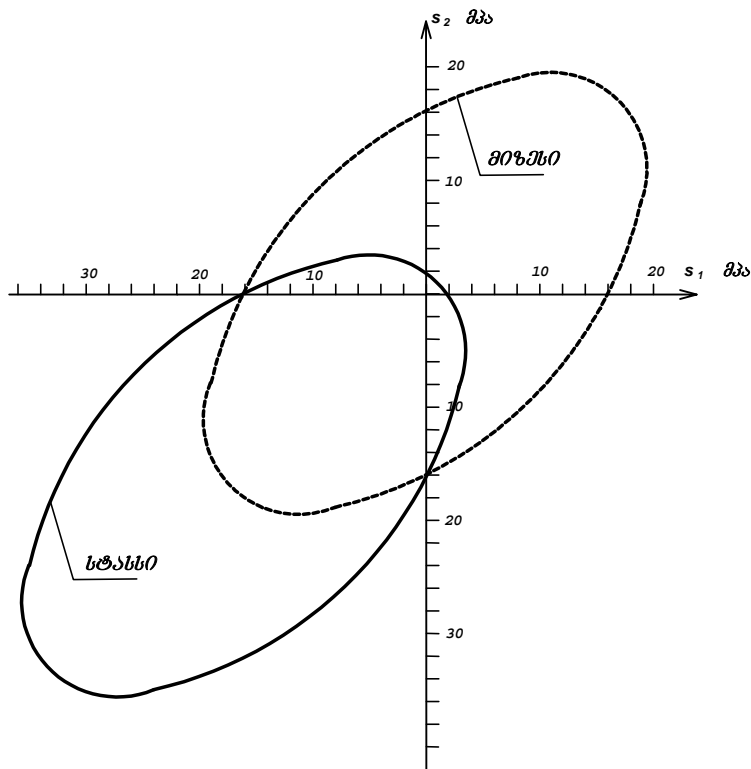
ნაშრომში გამოყენებულია მ. მიქელადის მიერ მიღებული მოდიფიცირებული სიმტკიცის პირობა ნახევრად მომენტური დაძაბული მდგომარეობისათვის:

$$T_1 = 2T_2 + (\rho - 1)\sigma_s h, \quad (33)$$

$$(1 + \rho)^2 \sigma_s^2 h^4 + 6(1 - \rho)T_1 \sigma_s h^3 - 3(T_1^2 + 4S^2)h^2 - 64M_2^2 = 0. \quad (34)$$

T_1 და T_2 გრძივ ძალებს შორის წრფივი დამოკიდებულების (33) განტოლება, ნახევარმომენტურ (1) წრფივ განტოლებათა სისტემასთან ერთად, რომელიც ჩაწერილია ცილინდრული გარსისათვის ცილინდრულ კოორდინატთა სისტემაში (x, φ) საშუალებას იძლევა, სათანადო სასაზღვრო პირობებთან ერთად, განისაზღვროს უცნობი ძალები და მომენტები (T_1, T_2, S, N_2, M_2). მაშასადამე სტატიკურად ურკვევი სისტემა (1) დამოკიდებულებით (33) დაყვანილ იქნა სტატიკურად რკვევად სისტემაზე.

გარსის უცნობი სისქეები, რომლებიც უზრუნველყოფს ნაგებობის ტანის თანაბარსაშიშროებას (ტოლწინააღმდეგობას) რღვევაზე, განისაზღვრება სიმტკიცის პირობით, რომელიც გამოსახულია h ცვლადის მიმართ მე-4 ხარისხის (34) ალგებრული განტოლებით.



ნახ. 13. სტანსისა და მიზანსის მიხედვით აგებული დენადობის
ზღვრული ზედაპირები

ნაშრომში მოცემულია მოდიფიცირებული სიმტკიცის პირობის ფუნქციონალური ანალიზი. კერძოდ მოცემულია ექსტრემუმი, ზრდადობისა და კლებადობის შუალედები, კრებადობის არეები და ა.შ.

ცილინდრული სადაწნეო წახნაგის ოპტიმალური სისქეების მიახლოებითი მნიშვნელობათა განსაზღვრა, რომლის გრძივი კიდები (მსახველის გასწვრივ) ჩამაგრებულია ხისტად, ხოლო წრიული კიდები (მიმართველის გასწვრივ) სახსრულად უძრავად, ეფუძნება ნახევრად მომენტურ გარსთა თეორიას, სტატიკური და კინემატიკური ხასიათის დაშვებებით. ამ დაშვებების საფუძველზე, მეორე თავში მიღებულია შედეგები, რომელთა საშუალებით დრეკადობის არეში განსაზღვრულია ყველა შიგა ძალური ფაქტორი, კერძოდ, მღუნავი მომენტი $M_2(10)$, განივი ძალა $N_2(11)$, გრძივი ძალები $T_1(14)$ და $T_2(12)$, და ძვრის ძალა $S(13)$. გადახურვის ოპტიმალური სისქეები განსაზღვრულია მ.მიქელაძის მიერ მიღებული სიმტკიცის (34) განტოლებით. ამ გამოთვლებში უგულებელყოფილია დენადობის ზოგადი პირობიდან (32) მიღებული გრძივ (T_1, T_2) ძალებს შორის დამოკიდებულება (33), რომელიც მართებულია მხოლოდ მასალის დენადობის დაწყების პირობებში. ამრიგად გადახურვის ოპტიმალური სისქეების მიახლოებითი მნიშვნელობათა დადგენისას, წინასწარ შერჩეული მუდმივი სისქეებით განისაზღვრება შიგა ძალოვანი ფაქტორები, ხოლო ამ ფაქტორებით - ოპტიმალური სისქეები პირველ მიახლოებაში. კაშხლის ცილინდრული გადახურვის ოპტიმალური სისქეების მიახლოებით რიცხვით მნიშვნელობათა დადგენის მიზნით შედგენილ იქნა კომპიუტერული პროგრამა. ცხრილი 3 - ში მოცემულია ერთერთი

სტანდარტიზებული პარამეტრის ასაწყობი წყალსაშვიანი კაშხლისათვის მხოლოდ ის შიგა ძალოვანი ფაქტორები, რომლებიც უშუალოდ მონაწილეობს სიმტკიცის (34) პირობებში და ამ პირობით განსაზღვრულია ოპტიმალური სისქეები გადახურვის მახასიათებელი წერტილისათვის. მიღებული სისქეებისა და ძალების საშუალებით ადვილად განისაზღვრება პირველ მიახლოებაში ძაბვის კომპონენტები და შესაბამისი მთავარი ძაბვები. მიღებული შედეგები შეიძლება დატანილ იქნეს სტასის პირობით აგებულ დენადობის ზღვრულ ზედაპირზე (ნახ.13). ასეთი მოქმედების შედეგად ადვილად ვრწმუნდებით, რომ წერტილები მთავარი ძაბვის კოორდინატებით მნიშვნელოვნად მიუახლოვდება (შიგნიდან) დენადობის ზღვრულ ზედაპირს, რაც განსაზღვრავს გაანგარიშების ამ მეთოდის პრაქტიკულ ღირებულებას.

შედგენილი კომპიუტერული პროგრამით, გარდა ასაწყობი დაბალდაწნევიანი და საშუალოდაწნევიანი კაშხლისა, გაანგარიშებულ იქნა სხვადასხვა ტესტური ამოცანა. დამუშავებული მეთოდი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს, აგრეთვე საძირკვლის ფილის გასაანგარიშებლად.

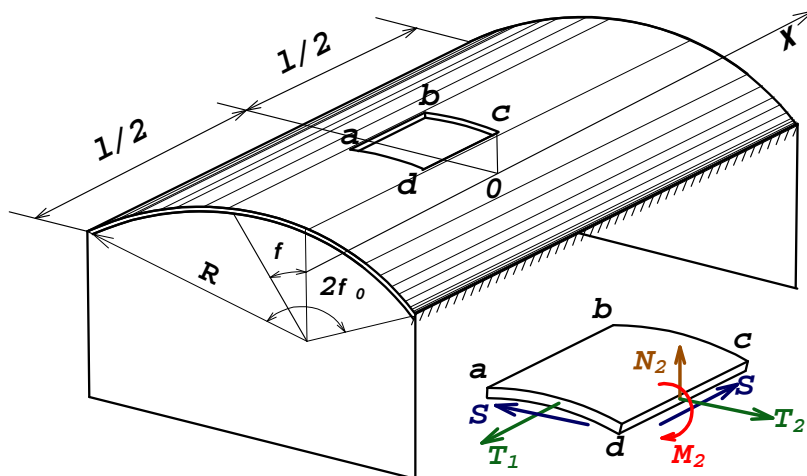
ცხრილი 3.

სტანდარტიზებული პარამეტრების ასაწყობი კაშხლების შიგა ძალური ფაქტორები და ოპტიმალური სისქეები ($H_j = 5.0$ მ)

შიგა ძალვა	ფ, გრად.	X, მ					მოცემული სიდიდეები
		0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	
1	2	3	4	5	6	7	8
$T_1, \text{ კნ/მ}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$R=8,75$ მ
	4,857	-43,150	15,989	2,878	-45,158	347,132	$l=40,0$ მ
	9,714	-64,018	31,562	5,880	-89,978	691,644	$h=0,50$ მ
	14,571	-84,890	46,790	8,890	-134,122	1030,940	$\gamma=10$ კნ/მ ³
	19,428	-105,657	62,080	11,630	-177,248	1362,455	$H_j=5,0$ მ
	24,285	-125,550	77,358	14,057	-219,031	1683,690	$E=2,4 \cdot 10^7$ კნ/მ ²
	29,142	-144,123	91,986	16,410	-259,161	1992,225	$\sigma_s=1500$ კნ/მ ²
	34,000	-21,830	105,605	18,795	-297,341	2285,710	$\rho\sigma_s=16000$ კნ/მ ²
$T_2, \text{ კნ/მ}$	0,000	-7,144	-6,418	-6,667	-7,599	0,000	$\phi_0=34^0$
	4,857	-70,112	-69,739	-69,867	-70,345	-66,443	
	9,714	-133,083	-133,012	-133,036	-133,128	-132,385	
	14,571	-196,111	-196,234	-196,192	-196,033	-197,328	
	19,428	-259,239	-259,396	-259,342	-259,141	-260,782	
	24,285	-322,500	-322,477	-322,485	-322,515	-322,268	
	29,142	-385,911	-385,444	-385,604	-386,203	-381,323	
	34,000	-449,466	-448,245	-448,666	-450,226	-417,500	
$10^2 \cdot M_2, \text{ კნ}\cdot\text{მ/მ}$	0,000	-15,436	-13,868	-14,406	-16,421	0,000	
	4,857	6,198	5,568	5,784	6,593	0,000	
	9,714	3,317	2,980	3,096	3,528	0,000	
	14,571	-4,757	-4,274	-4,440	-5,060	0,000	
	19,428	-5,664	-5,088	-5,282	-6,025	0,000	
	24,285	2,463	2,214	2,299	2,621	0,000	
	29,142	7,637	6,859	7,127	8,123	0,000	
	24,000	-19,165	-17,214	-17,885	-20,385	0,000	
$S, \text{ კნ/მ}$	0,000	1655,59	1665,19	1661,89	1649,57	1750,00	
	4,857	1656,00	1664,89	1661,83	1650,43	1743,40	
	9,714	1657,24	1663,98	1661,67	1653,00	1723,64	

	14,571	1659,28	1662,49	1661,39	1657,26	1690,88
	19,428	1661,11	1660,42	1661,00	1663,19	1645,36
	24,285	1665,73	1657,77	1660,51	1670,72	1687,42
	29,142	1670,13	1654,55	1659,93	1679,82	1517,51
	34,000	1675,26	1650,79	1659,26	1690,40	1436,14
h, მ	0,000	0,347	0,349	0,348	0,346	0,367
	4,857	0,344	0,351	0,349	0,340	0,423
	9,714	0,341	0,354	0,350	0,334	0,486
	14,571	0,339	0,356	0,350	0,329	0,555
	19,428	0,336	0,358	0,350	0,324	0,628
	24,285	0,334	0,360	0,351	0,320	0,703
	29,142	0,333	0,361	0,351	0,317	0,779
	34,000	0,331	0,362	0,351	0,315	0,854

კაშხლის სადაწნეო წახნაგის ოპტიმიზაციის დაზუსტებული ამოცანის გადაწყვეტამდე დავამუშავეთ, უფრო მარტივი და თვალსაჩინო ამოცანა, მიწისქვეშა ნაგებობის ცილინდრულ გადახურვაზე, ვინაიდან აღნიშნული ნაგებობა სიმეტრიულია და მასზე მოდებულია სიმეტრიული დატვირთვა.



ნახ. 14. მიწისქვეშა ნაგებობების ცილინდრული გადახურვის საანგარიშო სქემა

ზოგად შემთხვევაში, როცა გადახურვაზე მოქმედებს ვერტიკალური სამთო წნევა, გრუნტის წყლების ჰიდროსტატიკური დაწნევა და გუმბათის საკუთარი სიმძიმის ძალა შეგვიძლია მივიღოთ:

$$q_1 = 0, q_2 = 0, q_3 = -\gamma_j(R \cos \varphi_0 + h_H - R \cos \varphi) + \gamma(h_0 + R - R \cos \varphi) + \gamma_b h, \quad (35)$$

სადაც γ_j, γ და γ_b არის შესაბამისად, სამთო ქანის, წყლისა და ბეტონის მოცულობითი წონა.

(33) და (1) განტოლებათა ერთობლიობით სათანადო სასაზღვრო პირობებთან ერთად განესაზღვრეთ ყველა უცნობი ძალა და მომენტი ($T_1; T_2; S; N_2; M_2$), როგორც სტატიკურად რკვევადი სისტემისათვის. გადახურვის უცნობი სისქეები, რომლებიც

უზრუნველყოფს მისი ტანის სხვადასხვა წერტილების თანაბარსაშიშროებას რღვევის მიმართ, განვსაზღვრეთ სიმეტრიის (დენადობის) (34) განტოლებით. ასეთი მიდგომით განსაზღვრული გადახურვის განივკვეთის ზომები უზრუნველყოფს პრაქტიკულად მინიმალური მოცულობის კონსტრუქციის დაპროექტებას.

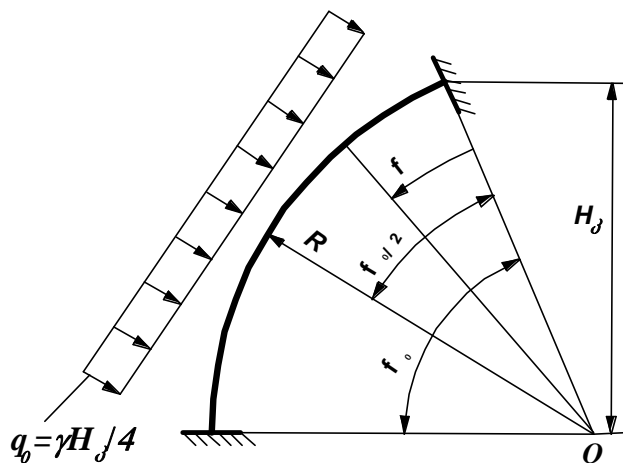
ამ ამოცანის გადაწყვეტის შემდეგ ნაშრომში განხილულია კაშხლის სადაწნეო ცილინდრული გადახურვის ოპტიმალური სისქეების განსაზღვრა

მიწისქვეშა ჰესის სამანქანო დარბაზის ცილინდრული გადახურვა გრძივი ღერძის მიმართ სიმეტრიული კონსტრუქციაა როგორც გეომეტრიულად, ისე გარე დატვირთვითა და სასაზღვრო პირობებით, რაც აადვილებს ამოცანის ამოხსნის დროს სასაზღვრო პირობების ჩაწერასა და ამ პირობების დაკმაყოფილებას. ზოგად ამონახსნებში, თხელკედლიანი კაშხლის სადაწნეო წახნაგი გრძივი ღერძის მიმართ

($\varphi = \frac{\varphi_0}{2}$) განივკედლის არასიმეტრიული ჰიდროსტატიკური წნევის მოქმედებას, რაც ართულებს ამოცანის ამოხსნას. ამოცანის რიცხვით რეალიზაციამდე მიყვანა პრაქტიკულად შესაძლებელია შემდეგ შემთხვევაში:

1. თუ ჩავთვლით, რომ ჰიდროსტატიკური წნევა კაშხლის სიმაღლეზე, ზოგჯერ მისი მცირე სიდიდის გამო, შეიძლება ჩაითვალოს თანაბარგანაწილებულად, ხოლო კონსტრუქცია $\varphi = \frac{\varphi_0}{2}$ მსახველის მიმართ სიმეტრიულად.

$$q_0(\varphi) = q_0 = \frac{\gamma H_K}{4} = const;$$



ნახ. 15. სადაწნეო წახნაგის საანგარიშო სქემა თანაბარგანაწილებული დატვირთვის პირობებში

წონასწორობის განტოლებათა სისტემიდან სათანადო გარდაქმნებით

$$\text{ვღებულობთ: } T_2(\varphi) = C \cos \omega \varphi + D \sin \omega \varphi + \frac{2q_0(\varphi)R \cos \varphi}{1 - \omega^2}$$

ამ საანგარიშო სქემის შემთხვევაში, სასაზღვრო პირობები იქნება:

როცა $\varphi = \frac{\varphi_0}{2}$, მაშინ $T_2 = \frac{dT_2}{d\varphi} = 0$ და მივიღებთ ინტეგრირების ნებისმიერი (C და D)

მუდმივების მიმართ შემდეგ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას:

$$-C\omega \sin \frac{\omega\varphi_0}{2} + D\omega \cos \frac{\omega\varphi_0}{2} = \frac{2q_0 R \sin \frac{\varphi_0}{2}}{1-\omega^2}.$$

$$C\omega \cos \frac{\omega\varphi_0}{2} + D\omega \sin \frac{\omega\varphi_0}{2} = -\frac{2q_0 R \cos \frac{\varphi_0}{2}}{1-\omega^2},$$

შესაბამისად, მივიღებთ:

$$D = \frac{2q_0 R \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \cos \frac{\omega\varphi_0}{2} - \omega \cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\omega\varphi_0}{2} \right)}{(1-\omega^2)\omega}. \quad (36)$$

$$C = \frac{2q_0 R \left(\sin \frac{\varphi_0}{2} \cos \frac{\omega\varphi_0}{2} + \omega \cos \frac{\varphi_0}{2} \sin \frac{\omega\varphi_0}{2} \right)}{(1-\omega^2)\omega} \quad (37)$$

კონკრეტულ შემთხვევაში, C და D მუდმივების რიცხვითი მნიშვნელობა მარტივად განისაზღვრება და საბოლოოდ გვექნება:

$$T_2(\varphi) = \left(C \cos \omega\varphi + D \sin \omega\varphi + \frac{2q_0(\varphi) \cos \varphi}{1-\omega^2} \right) \cos \frac{\pi}{l} x. \quad (38)$$

აგრეთვე წინასწორების განტოლებათა სისტემიდან სათანადო გარდაქმნებით მივიღებთ:

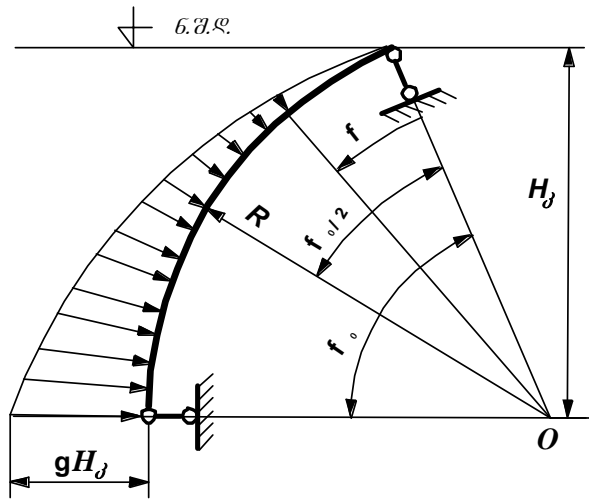
$$N_2(\varphi) = \frac{C}{\omega} \sin \omega\varphi - \frac{D}{\omega} \cos \omega\varphi + \frac{1+\omega^2}{1-\omega^2} q_0 R \sin \varphi + E(\varphi). \quad (39)$$

$$S = \frac{2\pi R}{l} \left(\frac{C}{\omega} \sin \omega\varphi - \frac{D}{\omega} \cos \omega\varphi + \frac{2q_0 \sin \varphi}{1-\omega^2} \right) \sin \frac{\pi}{l} x + F(x). \quad (40)$$

$$M_2(x, \varphi) = \left(\frac{1+\omega^2}{\omega^2-1} q_0 R^2 \cos \varphi + RE\varphi - \frac{D}{\omega^2} R \sin \omega\varphi - \frac{C}{\omega^2} R \cos \omega\varphi + K \right) \cos \frac{\pi}{l} x. \quad (41)$$

შიგა ძალების განსაზღვრის შემდეგ, ვსაზღვრავთ ოპტიმალურ სისქეებს (34) განტოლების გამოყენებით. ამოცანის რიცხვითი რეალიზაციას ვაწარმოებთ წინასწარ შედგენილი კომპიუტერული პროგრამით.

2. თუ ჩავთვლით, რომ კაშხლის სადაწნეო წახნაგის გრძივი კიდევბი ჩამაგრებულია სახსრულად უძრავად ისე, რომ, როცა $\varphi=0$ და $\varphi=\varphi_0$, მაშინ $T_2=0$. ე.ი. კიდის რადიალური ჩაღუნვა და გრძივი მიმართულებით გადაადგილება შეზღუდულია, ამ მიმართულებით ბმის უსასრულო სიხისტის გამო (იხ. ნახ. 16).



ნახ. 16. სადაწნეო წახნაგის საანგარიშო სქემა, როცა გრძივი კიდეები ჩამაგრებულია სახსრულად უძრავად.

გრძივი კიდეების სასაზღვრო პირობების მიხედვით განვსაზღვროთ ინტეგრირების $C(\varphi)$ და $D(\varphi)$ ფუნქციები. კერძოდ, როცა $\varphi=0$, მაშინ $T_2(0)=0$ ანუ

$$C(\varphi) = \frac{2q_0(\varphi)R}{\omega^2 - 1} \quad (42)$$

ხოლო, როცა $\varphi=\varphi_0$, მაშინ $T_2(\varphi_0)=0$, ე.ი.

$$C \cos \omega \varphi_0 = D \sin \omega \varphi_0 + \frac{2\gamma R^2 \sin \varphi_0 \cos \varphi_0}{1 - \omega^2} = 0,$$

საიდანაც
$$D(\varphi_0) = \frac{2\gamma R^2 (\cos \varphi_0 - \cos \omega \varphi_0) \sin \varphi_0}{(\omega^2 - 1) \sin \omega \varphi_0} \quad (43)$$

(1) სისტემის მე-3 განტოლებიდან

ცვლადთა განცალების შემდეგ, მივიღებთ:

$$N_2(\varphi) = \left(\frac{C}{\omega} \sin \omega \varphi - \frac{D}{\omega} \cos \omega \varphi + \frac{2q_0(\varphi)R \sin \varphi}{1 - \omega^2} \right) + \gamma R^2 \cos \varphi + E(\varphi) \quad (44)$$

დაეუშვათ პირობით, რომ როცა $\varphi = \frac{2}{3}\varphi_0$, მაშინ $N_2(\varphi)=0$, მივიღებთ:

$$E = \frac{2\gamma R^2 \sin \frac{2}{3}\varphi_0}{\omega^2 - 1} + \frac{D}{\omega} \cos \frac{2}{3}\varphi_0 \omega - \frac{C}{\omega} \sin \frac{2}{3}\varphi_0 \omega - \gamma R^2 \cos \frac{2}{3}\varphi_0 \quad (45)$$

$$N_2(x, \varphi) = N_2(\varphi) \cos \frac{\pi}{\ell} x. \quad (46)$$

$M_2(x, \varphi)$ განისაზღვრება (1) სისტემის მეოთხე განტოლებიდან ცვლადთა განცალებით

$$M_2(\varphi) = \gamma R^3 \sin \varphi + RE(\varphi) - \frac{RC}{\omega^2} \cos \omega \varphi - \frac{RD}{\omega^2} \sin \omega \varphi - \frac{2q_0(\varphi)R \cos \varphi}{1 - \omega^2} + K(\varphi). \quad (47)$$

ინტეგრირების $\mathbf{K}(\varphi)$ ფუნქცია განისაზღვრება პირობით, როცა $\varphi=0$, მაშინ $\mathbf{M}_2=0$

$$\text{ანუ} \quad \mathbf{K} = \frac{\mathbf{RC}}{\omega^2} \quad (48)$$

გარკვეულ პირობებში, როცა \mathbf{S} -ის გათვალისწინება აუცილებელია გაიანგარიშება ისე როგორც წინა შემთხვევაში (40).

მიღებული შედეგების შედარებამ იმ შედეგებთან, რომელიც მიღებულია ოპტიმალური სისქეების გამოთვლის მიახლოებითი მეთოდით, გვიჩვენა, რომ პრაქტიკული გამოყენებისათვის განსხვავება უმნიშვნელოა და აქიდან გამომდინარე აქ არ მოგვეყავს.

ძირითადი დასკვნები და რეკომენდაციები

1. დამუშავებულია ახალი შემსუბუქებული ტიპის კაშხლის კონსტრუქცია, რომელიც წარმოადგეს სამი ერთმანეთთან მდოვრედ შეუღლებული თხელი ელემენტის ერთობლიობას. ეს თხელი ელემენტები მათი მუშაობის პირობებიდან გამომდინარე გადაწყვეტილია გარსებისა და ფილების სახით;

2. დამუშავებულია შემსუბუქებული ტიპის კაშხლის ასაწყობი ვარიანტი, 1.5, 2.0, 3.0 და 5.0 მეტრი სიმაღლეებისათვის. ჩატარებულია შემოთავაზებული სიმაღლის ასაწყობი კაშხლების სტანდარტიზაცია და უნიფიკაცია. აგრეთვე მათი ჰიდრაულიკური და მდგრადობაზე (ფუძის სიბრტყეში ძვრასა და გადაყირაგებაზე) გაანგარიშებები. მიღებული შედეგები გაანალიზებულია და მოცემულია სათანადო რეკომენდაციები;

3. შემსუბუქებული ტიპის კაშხლის სადაწნეო წახნაგი მისი მუშაობის პირობების სირთულის შესაბამისად გადაწყვეტილია ცილინდრული გარსის სახით. დამუშავებულია რეალური სასაზღვრო პირობებისათვის კაშხლის სადაწნეო წახნაგის საანგარიშო პროგრამა **MATLAB**-ის გამოყენებით, გაანგარიშებას საფუძველად უდევს ნახევრად მომენტური გარსთა თეორია.

4. ჩატარებული რიცხვითი ექსპერიმენტების საფუძველზე გამოკვლეულია საძირკვლის ფილის სიმტკიცეზე თითოეული პარამეტრის გავლენა, ამონახსნთა კრებადობის საკითხი, მიღებული შედეგების შედარება და ანალიზი სხვა ავტორების მიერ შემოთავაზებულ მეთოდებთან.

5. კაშხალი როგორც ერთიანი ნაგებობა ფუძესთან ერთად გაანგარიშებულია სასრულ ელემენტთა მეთოდით, პრაქტიკაში აპრობირებული საანგარიშო პროგრამების გამოყენებით.

6. ჩატარებულია შედარება გარსებისა და ფირფიტების თეორიით და სასრულ ელემენტთა მეთოდით მიღებულ შედეგებს შორის. შედარებამ აჩვენა, რომ საინჟინრო, პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით მიღებული შედეგები ერთმანეთს ემთხვევა.

7. ამოხსნილია ოპტიმიზაციის ამოცანა, ოპტიმიზაციის კრიტერიუმად მიღებულია გარსის მინიმალური წონა სიმტკიცისა და სიხისტის ნორმატიული მარაგის შენარჩუნებით.

8. ოპტიმიზაციის ამოცანის რიცხვითი რეალიზაციისათვის შედგენილია სათანადო კომპიუტერული პროგრამა, რომელიც წარმატებით შეიძლება გამოვიყენოთ როგორც პილოტ ასევე სამოქალაქო და სამრეწველო ობიექტებზე ფილებისა და ცილინდრული გარსების კვლევისა და დაპროექტებისათვის.

დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოკვეყნებულია შემდეგ ნაშრომებში:

1. გედენიძე ზ., კვიციანი ტ., ავალიანი ს. ასაწყობი დაბალდაწნევიანი კაშხლის კონსტრუქცია და ძირითადი პარამეტრების სტანდარტიზაცია. ჰიდროინჟინერია №1(1). თბილისი, 2007, გვ. 58-63.
2. გედენიძე ზ., კვიციანი ტ., ავალიანი ს. ასაწყობი, დაბალდაწნევიანი კაშხლის სადაწნეო წახნაგის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა. ენერჯია, №2 (42). თბილისი, 2007, გვ. 44-50.
3. Gedenidze Z. , Kvitsiani T. , Avaliani S. –The intense and deformed condition with the structure of the water head spillway hollow dam.Torical problems of continuum mechanics. Ierevan-2007. pages 474-478.
4. Gedenidze Z., Kvitsiani T., Avaliani S. Optimization problem of the cylindrical covering of the underground constructions. TCU, Tbilisi, 2008,f. 43-47.
5. გედენიძე ზ., კვიციანი ტ., ავალიანი ს., კობრეიძე ნ. მონოგრაფია “თხელკედლიანი კაშხლების კონსტრუქცია და ოპტიმალური დაპროექტება”. გამომცემლობა “ინტელექტი” 2009. 303 გვ.
6. გედენიძე ზ., კვიციანი ტ., ავალიანი ს. რთული დაძაბული მდგომარეობის მოდიფიცირებული სიმტკიცის პირობის ფუნქციონალური ანალიზი. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი “მშენებლობა”, №3 (18). თბილისი, 2010, გვ. 6-12.

summari

The construction of river hydroelectric complexes is generally distinguished from that of other engineering facilities for a large scope of work and accordingly great capital investments. Despite the kind of water industry the hydroelectric complex serves, a dam is frequently the most valuable and crucial structure of the complex.

Therefore, reduction in the cost of a dam construction at the expense of the structural perfection of the dam and improved job practices will help significantly reduce the cost and duration of construction of a hydroelectric complex.

As a result, the research and development works to significantly accelerate and reduce the cost of a dam construction have been a subject of concern of the hydraulic engineers in recent years. The studies to solve this problem are mostly concerned with the solution of the following two problems - technological and structural perfection of a dam construction.

Chapter 1 deals with the design of a new-type, thin-walled blind dam and spillway. It is presented by a smooth mating of three thin-walled structures, one of them being an upstream face (cylindrical shell), another being a foundation slab (or a cylindrical shell) and the rest being a downstream face of the proper geometry.

The parameters of movable dams are unified and standardized, with their discharge capacity and stability (sliding resistance and overturning stability in the base plane) are calculated. The results of calculation are analyzed and proper conclusions are made.

Chapter 2 gives the calculation of the strength of the dam pressure face, influence of different parameters and working conditions (boundary conditions) of the pressure face on the deflected mode of a cylindrical cover. The methods of calculation with the numerical experiment allow choosing the cover parameters.

The work, aiming at determining the deflected mode of the dam pressure face, uses the theory of semi-flexible shells. The decision equation is gained based on the theory of semi-flexible shells of V. Vlasov

and U. Finsterwalder, which is based on proper statistical and kinematical assumptions. Based on these assumptions, the system of equilibrium equations is written in the radial displacements as a differential equation with the 8-th series private-derivative. By separating the variables (Maurice-Levy problem) it is reduced to a common differential heterogeneous equation with constant coefficients of series 8. Based on the theoretical analysis of the roots of the performance equation, a general solution to this and accordingly, to the decision equations is gained as radial deflections. The constants of integration are determined by the solution to the system of algebraic equations consisting of eight equations corresponding to the boundary conditions, which gives the most real picture of the real working conditions of the studied face.

A method of direct determination of any n-series derivative of the general solution to the problem is produced what significantly facilitates the determination of any internal force of the dam pressure face by radial deflections.

The computer software with mathematics 4.1 language has been developed for the purpose of numerical implementation of the problem. The mentioned software, by using the numerical experiment allows correct fixing the parameters of the pressure face of a hollow dam generally and of a movable low-sill dam particularly in every concrete case.

The deflective mode of a movable low-sill spillway section is dependent not only on the structure and sizes of its cross section, but the full length of the rollway, as after the joints are solidified, it works as a single structure.

Chapter 3 contains the calculation of strength of the foundation slab of a movable low-sill hollow dam, including that of a movable low-sill dam. The foundation slab transmitting the loads on the dam to the base of the structure, is one of the most crucial structural elements of a dam together with the upstream face. In accordance with the low height of a movable dam, due to insignificant inverse filtering pressure and reactive forces, replacement of the dam foundation slab with the cylindrical foundation shell is not necessary. Such a replacement is necessary for average and high dams what is also evidenced by the results of calculation.

By means of the numerical experiments the impact of each parameter on the strength of the foundation slab and problem of convergence of solutions are studied, and the gained results are analyzed at the expense of the influence of additional shear stresses in the elastic base and compared with the methods offered by other authors.

Chapter 4 deals with the scheme of the spillway solidification and its structural development. The strength conditions of the dams were re-examined by means of the finite element method.

Chapter 5 of the monograph is dedicated to the problems of optimal designing of a thin-walled dam. The minimum dam weight with the constant rated reserve of strength and rigidity has been taken as an optimization criterion.

The strength condition of the structure is assessed by considering the complex state of stress and different compression and tensile strengths (fragile-plastic materials). Selection of the optimal thicknesses of the dam ensuring an ultimate transformation of the whole structure into a plastic state is done by two methods. The first method, which is based on the kinematical and statistical assumptions of the theory of semi-flexible shells, is more rigid. Another method is more accurate, as it is based on statistical assumptions only and the problem solution, by considering the relationship between the longitudinal forces, is reduced to the solution to the statistically definable system.