

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ვაჟა სულაშვილი

მართკუთხა ჭრილის მქონე სეისმომედეგი
თხელკედლიანი სივრცითი სისტემების
დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის მათემატიკური
მოდელი და ალგორითმი

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

სადოქტორო პროგრამა „მშენებლობა“

შიფრი 0732

თბილისი
2022 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში სამშენებლო ფაკულტეტის საინჟინრო მექანიკისა და სამშენებლო ტექნიკური ექსპერტიზის დეპარტამენტში.



კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით [PhDF-21-2432].

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: პროფესორი გელა ყიფიანი
პროფესორი დემურ ტაბატაძე

რეცენზენტები: პროფესორი თამაზ ბაციკაძე
პროფესორი ნოდარ მარდალეიშვილი

დაცვა შესდგება 2022 წლის „—“ „————“ „—“ საათზე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის "მშენებლობის" საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე, სტუ-ს I კორპუსი, 5 სართული, აუდიტორია 508

მისამართი: 0175, თბილისი, მ.კოსტავას ქ. 68^ა.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატისა ფაკულტეტის ვებ გვერდზე.

საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს
მდივანი, პროფესორი დ. ტაბატაძე

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

თემის აქტუალობა. თემის აქტუალობას განაპირობებს დრეკად-პლასტიკურ მდგომარეობის პირობებში მყოფი წყვეტილპარამეტრებიანი თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშების პრობლემა, რომელიც მოითხოვს გაანგარიშების განსაკუთრებული მეთოდების შემუშავებას.

კვლევის მიზნები და ამოცანები: ნაშრომის კვლევის მიზანს წარმოადგენს

- ჭრილის მქონე ანიზოტროპული სხეულის დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის გამოკვლევა. თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშების ისეთი მეთოდიკის შექმნა, რომელიც უზრუნველყოფს დატვირთვის ნებისმიერ სტადიაზე დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის უტყუარ ასახვას გაანგარიშების მინიმალური ხარჯებით;
- მართკუთხა ჭრილების მქონე ფირფიტებისაგან შედგენილი თხელკედლიანი კონსტრუქციის ახალი დაზუსტებული საანგარიშო მოდელის შექმნა, კონტურული კუმშვადი დატვირთვის სხვადასხვა სახის სხვადასხვა სასაზღვრო პირობებისა, აგრეთვე ხვრეტების სხვადასხვა სიდიდისა და განლაგების გათვალისწინებით.

მიზნის მისაღწევად საჭირო გახდა შემდეგი ლოგიკურად ურთიერთდაკავშირებული ამოცანების გადაჭრა:

- დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის პირობებში მართკუთხა ჭრილის მქონე თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშების ისეთი მეთოდიკის დამუშავება, რომელიც უზრუნველყოფს დატვირთვის ნებისმიერ სტადიაზე დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის დადგენას და დატვირთვის ნებისმიერ სტადიაზე დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის უტყუარ ასახვას გაანგარიშების მინიმალური ხარჯებით;
- ჭრილების მქონე მართკუთხა ფილებისაგან შედგენილი თხელკედლიანი კონსტრუქციის დაზუსტებული საანგარიშო მოდელის შექმნა;

- ჭრილების მქონე გეგმაში მართკუთხა ფირფიტებისა და გარსების გაანგარიშების მეთოდის დამუშავება, კონტურული კუმშვადი დატვირთვის სხვადასხვა სახის, სხვადასხვა სასაზღვრო პირობების, აგრეთვე ჭრილების სხვადასხვა სიდიდისა და განლაგების გათვალისწინებით.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე: შექმნილია დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის პირობებში მართკუთხა ჭრილის მქონე თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდი, რომელიც უზრუნველყოფს დატვირთვის ნებისმიერ სტადიაზე დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის დადგენას.

მოცემული იქნა წყვეტილპარამეტრებიანი, ფირფიტებისა და გარსების გაანგარიშების გადამწყვეტი დიფერენციალური განტოლებების შედგენის ზოგადი მეთოდები კერძო შემთხვევებში.

დაკონკრეტებული იქნა ცვლადი და წყვეტილი კოეფიციენტების მქონე დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის მეთოდები.

შექმნილი იქნა მართკუთხა ჭრილის მქონე ფირფიტებისაგან შედგენილი თხელკედლიანი კონსტრუქციის დაზუსტებული საანგარიშო მოდელი.

კვლევის მეთოდოლოგია.

სამუშაოში დასახული კვლევის მიზანი მიღწეულია დიფერენციალურ და ინტეგრალურ განტოლებათა თეორიის გამოყენებით. არაწრფივი დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის გაწრფივებისათვის გამოყენებულია თანდათანობითი დატვირთვის ხერხი, ხოლო ჩვეულებრივ დიფერენციალურ განტოლებებზე მიყვანისათვის კანტოროვიჩ-ვლასოვის ვარიაციული მეთოდი და წრფეთა მეთოდი. დამუშავებულია მართკუთხა ჭრილის მქონე გარსების დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის გაანგარიშების ახალი მეთოდი არაწრფივი დეფორმაციის პირობებში. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა ერთიან მეთოდოლოგიურ საფუძველზე გამოკვლეული იქნას დისკრეტული და კონტინუალური სისტემები. ამასთან გაითვალისწინება არარეგულარობის სხვადასხვა სახეები გამჭოლი ჭრილით და მართკუთხა წიბო-

ბით. ჩატარებული მრავალმხრივი თეორიული კვლევების, გაანგარიშებებისა და ექსპერიმენტით მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია გავაკეთოთ მოსალოდნელი დასკვნები და გაიცეს რეკომენდაციები.

კვლევის თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა.

დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე შედგენილი პროგრამების პაკეტი განსხვავდება არსებული პროგრამული პაკეტებისაგან ეკონომიურობით და სწრაფი გარდაქმნის შესაძლებლობებით. შესრულებულმა გამოთვლებმა გამოავლინა ზოგიერთი ტიპის კონსტრუქციის მუშაობის თავისებურება, რომლის მხედველობაში მიღება აუცილებელია მათი სიმტკიცისა და სიხისტის უზრუნველსაყოფად. მიღებულია რაოდენობრივი შეფასებები დამრეცი გარსებისა და ფირფიტების საყრდენის ჯდენის გავლენისა მაქსიმალური მღუნავი მომენტის მნიშვნელობაზე და წრიულ ფირფიტაში სახსრების გავლენისა ჩალუნვების მნიშვნელობაზე. აგებული გრაფიკები საშუალებას იძლევიან შეირჩეს კონსტრუქციის სისქე წინასწარ მოცემული სიხისტის ან სიმტკიცის პირობის მიხედვით. ასევე ყოველი კონკრეტული ამოცანის მათემატიკური ალგორითმი და პროგრამა ადვილად შეიძლება გამოყენებულ იქნას საპროექტო-კვლევითი დაწესებულებების მიერ სივრცითი და ორგანოზომილებიანი ამოცანების გაანგარიშებისა და პროექტირებისას.

ნაშრომის შედეგების აპრობაცია: კვლევის შედეგად მიღებული შედეგები იქნა მოხსენებული სასწავლო პროცესში სამ კოლოკვიუმზე, მიღებული შედეგები გამოქვეყნდა 14 სამეცნიერო ჟურნალში, მათ შორის 11 კონფერენციაზე. 3 სამეცნიერო სტატია თანაავტორების გარეშე გამოქვეყნებული.

სადისერტაციო კვლევის სტრუქტურა. ნაშრომი წარმოდგენილია 126 ფურცელზე. მოიცავს შესავალს, ორ თავს, დასკვნას და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხას. ლიტერატურის ნუსხა შედგება 174 დასახელებისგან. ნაშრომში წარმოდგენილია 16 ცხრილი, 51 ნახაზი.

ნაშრომის შინაარსი

პირველ თავში გადმოცემულია თხელკედლიანი სივრცითი სისტემების დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის თანამედროვე პრობლემების ლიტერატურული მიმოხილვა. ლიტერატურის მიმოხილვის ანალიზიდან გამომდინარე ჩამოვყალიბეთ ნაშრომის მიზნები და ამოცანები.

თანამედროვე სამშენებლო მეცნიერება იკვლევს მრავალ ობიექტს, რომელთა გაანგარიშებები, მათი სირთულიდან გამომდინარე, დაკავშირებულია სამშენებლო მექანიკის მრავალი ანალიზური და რიცხვითი მეთოდების გამოყენებასთან. აქედან გამომდინარე ის უყენებს დიდ მოთხოვნებს კონსტრუქციების გაანგარიშების და პროექტირების ახალი მეთოდების დანერგვას.

წარმოდგენილია მოსაზრებები ზოგადი გარსების თეორიაში, მდგრადობის განტოლების აგების გზები, ტიმოშენკოს გარსის ტიპის თხელკედლიანი სისტემის დინამიკა და ანიზოტროპული გარსების გაანგარიშების მეთოდები; ასევე საკითხები, როგორც კომპოზიციური მასალის გარსების ოპტიმალური პროექტირების მეთოდიკა, პრობლემა და ექსპერიმენტალური გამოკვლევების შედეგები.

თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების გაანგარიშებების პრობლემებზე განსაკუთრებული წვლილი შეიტანეს უცხოელმა მეცნიერებმა: ს. ტიმოშენკო, ვ. ვლასოვმა, ა. ვოლმირმა, ა. ალექსანდროვმა, ა. გოლდენვეიზერმა, ა. გუზმა, ვ. ილინმა, ა. ფილინმა, ბ. მიხაილოვმა, ვ. კარპოვმა, ვ. ნოვოჟილოვმა, გ. სავინმა, ი. ობრაზცოვმა, ერიქსონმა, ჯერარდმა, რეისნერმა, ასევე ქართველმა მეცნიერებმა: ი. ვეკუამ, ო. ონიაშვილმა, ი. ლუდუშაურმა, ნ. ვალიშვილმა, რ. ცხვედაძემ, მ. მიქელაძემ, რ. ბანცურმა, ჯ. ბიჭიაშვილმა, ზ. გედენიძემ, თ. ბაციკაძემ, ტ. კვიციანმა, დ. გურგენიძემ, გ. ყიფიანმა, მ. კუბლაშვილმა, მ. ყალაბეგაშვილმა, მ. ყალაბეგიშვილმა, თ. ხმელიძემ, ნ. შავლაყაძემ, ნ. მარდალეიშვილმა, დ. გიორხელიძემ, ლ. ზამბახიძემ, ი. კაკუტაშვილმა, დ. ჯანყარაშვილმა, დ. ტაბატაძემ და სხვებმა.

წინამდებარე ნაშრომში მრავლად არის განხილული და გაანალიზებული როგორც უცხოელი, ასევე ქართველი ავტორების მოსაზრებები. თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშებების საკითხებთან დაკავშირებით შესწავლილმა წყაროებმა ხელი შეუწვევს ჩვენს მიერ გამოვლენილი პრობლემების შესწავლას და დასახული ამოცანების გადაწყვეტას.

ლიტერატურის მიმოხილვიდან შეიძლება შემდეგი დასკვნების გაკეთება:

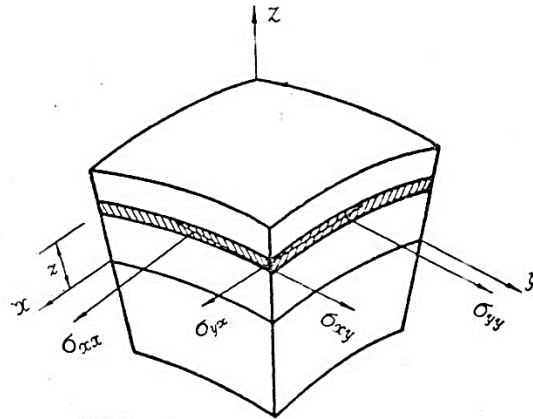
- მართკუთხა ჭრილის მქონე თხელკედლიანი კონსტრუქციების დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის პირობებში გაანგარიშების პრობლემა აქტუალურია და იმყოფება აქტიური დამუშავების სტადიაში.
- გაანგარიშების ტრადიციული ანალიზური და რიცხვითი მეთოდების გადატანა ამოცანათა განხილულ კლასზე ხვდება სიძნელეებს, რომლებიც დაკავშირებულია კონსტრუქციის გეომეტრიული რეგულარობის დარღვევებთან.
- არასაკმარისად არის გაშუქებული მართკუთხა ჭრილების მქონე კონსტრუქციების დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობა.

- სამეცნიერო ლიტერატურაში პრაქტიკულად არ გვხვდება მართკუთხა ჭრილის მქონე გარსებისა და ფირფიტების გაანგარიშების მეთოდები, რომლებიც პრაქტიკული რეალიზაციის საშუალებას იძლევიან.

მეორე თავში გადმოცემულია შედეგები და მათი განსჯა.

განხილულია ფენოვანი მოდელის გამოყენების შესაძლებლობა სისქის მიხედვით ერთგვაროვანი მთლიანი გარსების შესწავლის მიზნით. გადმოცემულია სისქის მიხედვით ერთგვაროვანი, მთლიანი ორთოტროპული გარსი, რომლის პლასტიკური მდგომარეობა წარმოდგენილია მიზესის განზოგადებული პირობით და მასთან ასოცირებული დინების კანონით.

გარსის შუა ზედაპირიდან რაიმე Z მანძილზე გვექნება მთლიანი ორთოტროპული გარსი (ნახ.1)



ნახ. 1. მთლიანი ორთოტროპული გარსი

დენადობის პირობას აქვს შემდეგი სახე:

$$f(\sigma_{xx}^3 \sigma_{yy}^3 \sigma_{xy}) = \frac{\sigma_{xx}^2}{\sigma_{sx}^2} - \frac{\sigma_{xx} \sigma_{yy}}{\sigma_{sx}^2 \sigma_{sy}^2} + \frac{\sigma_{yy}^2}{\sigma_{sy}^2} + \frac{\sigma_{xy}^2}{\tau_s^2} - 1 = 0 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} + 2\dot{y} &= \lambda \left(\frac{2\sigma_{xx}}{\sigma_{sy}^2} - \frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{sx} \sigma_{sy}} \right) \\ \dot{x} + 2\dot{y} &= \lambda \left(\frac{2\sigma_{yy}}{\sigma_{sy}^2} - \frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{sx} \sigma_{sy}} \right) \\ \dot{\omega} + Z\dot{X} &= 2\lambda \frac{\sigma_{xy}}{\tau_s^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

გარსის h სისქის მიხედვით მოქმედი თითოეული $(\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{xy})$ ძაბვა შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ როგორც z -ის ლუწი და კენტი ფუნქციების ჯამი. გეომეტრიული თვალსაზრისით ამგვარი წარმოდგენა მოასწავებს ძაბვითი ეპიურების დაშლას შუა ზედაპირის მიმართ სიმეტრიულ და ირიბად სიმეტრიულ ეპიურებად.

ამრიგად,

$$\sigma_{xx} = t_1 + m_1, \quad \sigma_{yy} = t_2 + m_2, \quad \sigma_{xy} = t_{12} + m_{12},$$

სადაც z -ის მიხედვით ლუწი შესაკრებები ე.ი t_1, t_2, t_{12} შეიძლება იყოს განმარტებული როგორც მემბრანული ძაბვები. რაც შეეხება კენტ შესაკრებებს m_1, m_2 და m_{12} -ს, ისინი ლუნვის და გრების გამომწვევი ძაბვები არიან.

ამგვარი წარმოდგენის შედეგად დენადობის პირობა (1) ლებულობს სახეს:

$$\frac{1}{\sigma_{sx}^2}(t_1^2 + m_1^2) - \frac{1}{\sigma_{sx}\sigma_{sy}}(t_1 t_2 + m_1 m_2) + \frac{1}{\sigma_{sy}^2}(t_2^2 + m_2^2) + \frac{1}{\tau_s^2}(t_{12}^2 + m_{12}^2) - 1 = -\frac{2}{\sigma_{sx}^2} t_1 m_1 + \frac{1}{\sigma_{sx}\sigma_{sy}}(t_1 m_2 + t_2 m_1) - \frac{2}{\sigma_{sy}^2} t_2 m_2 - \frac{2}{\tau_s^2} t_{12} m_{12} \quad (3)$$

(3) ტოლობის იგივეურად დაკმაყოფილება მოითხოვს რომ მისი თითოეული ნაწილი (ლუწი და კენტი) ცალცალკე უდრიდეს ნულს.

$$\frac{1}{\sigma_{sx}^2}(t_1^2 + m_1^2) - \frac{1}{\sigma_{sx}\sigma_{sy}}(t_1 t_2 + m_1 m_2) + \frac{1}{\sigma_{sy}^2}(t_2^2 + m_2^2) + \frac{1}{\tau_s^2}(t_{12}^2 + m_{12}^2) = 1 \quad (4)$$

$$\frac{t_1}{\sigma_{sx}} \left(2 \frac{m_1}{\sigma_{sx}} - \frac{m_2}{\sigma_{sy}} \right) + \frac{t_2}{\sigma_{sy}} \left(2 \frac{m_2}{\sigma_{sy}} - \frac{m_1}{\sigma_{sx}} \right) + \frac{2}{\tau_s^2} t_{12} m_{12} = 0 \quad (5)$$

დაწვრილებით განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც გარსის სისქის მიხედვით სრულდება სტატიკური ხასიათის პირობები:

$$a) \quad t_1 = t_{12} = 0$$

ერთ-ერთი იმ ოთხთაგანი, რითაც დავახასიათებთ ფენოვანი გარსის უმარტივესი დამაბული მდგომარეობა. შესაბამისად (4) და (5) ფორმულების საფუძველზე გვექნება პლასტიკურობის პირობა:

$$\frac{3}{4} \frac{m_1^2}{\sigma_{sx}^2} + \frac{t_2^2}{\sigma_{sy}^2} + \frac{m_{12}^2}{\tau_s^2} = 1 \quad (6)$$

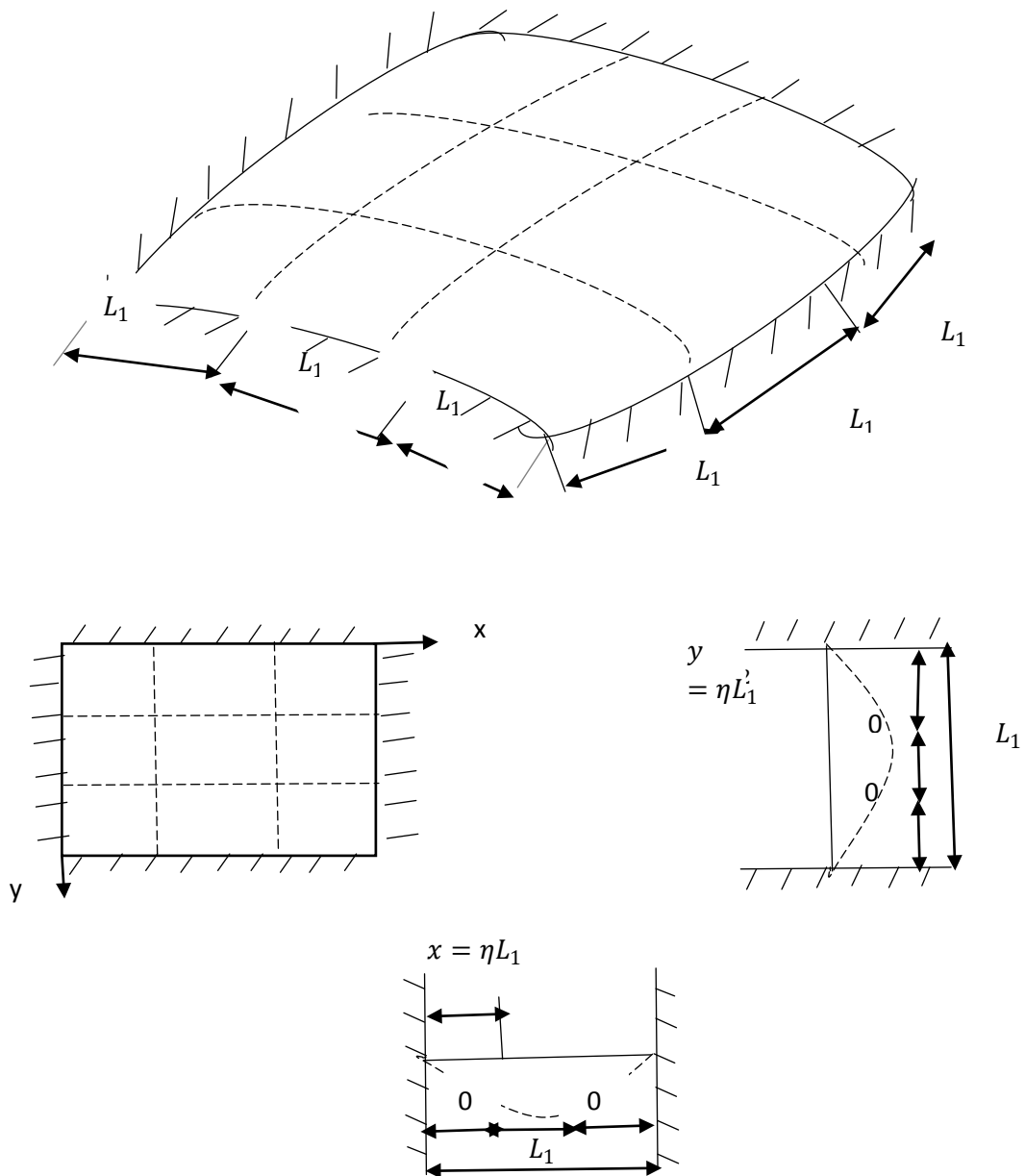
ამასთანავე (6) პირობის მიღების დროს თავიდანვე გამოვრიცხეთ $t_2=0$, რამდენადაც იგი არის წმინდა მომენტური დამაბული მდგომარეობის მაუწყებელი და ამდენად კიდევ ტრივიალური.

განხილულია დრეკად-პლასტიკური ფილებისა და გარსების ზიდვის უნარის დადგენა. საინჟინრო თვალსაზრისით კონსტრუქციის ზღვრული მდგომარეობა ხასიათდება მისი თავდაპირველი ზომების და ფორმის იმდენად მნიშვნელოვანი ცვლილებით, რომ კონსტრუქციის შემდგომი ექსპლოატაცია შეუძლებელი ხდება. ცხადია რომ ზღვრული მდგომარეობის მიღწევამდე საგრძობლად ადრე კონსტრუქციაში უკვე არსებობს ცალკეული დაქსაქსული პლასტიური არეები, რომელთა გავლენა ჯერ კიდევ უმნიშვნელოა და კონსტრუქცია კვლავაც შეგვიძლია ჩავთვალოთ ხისტად, მაგრამ დატვირთვის ზრდასთან ერთად იწყება პლასტიური არეების

გაფართოება და ბოლოს როცა გარე ძალები მიაღწევენ გარკვეულ „ზღვრულ მნიშვნელობას“, რომელსაც კონსტრუქციის ზიდვის უნარს უწოდებენ, კონსტრუქცია „მიედინება მთლიანად“, რაც აღინიშნება დეფორმაციათა სიჩქარეების განუსაზღვრელი ზრდით.

გამოთვლების შედეგად ზიდვის უნარის ზედა ზღვარი ფილისათვის იქნება: $P_{\eta} = 54.347 \frac{h^2 \sigma_{xy}}{3e^2} \text{ კმ/სმ}^2$. (7)

როცა გარსი განხორციელებულია შუალედური სახსრების გათვალისწინებით ანაკრები გარსის საანგარიშო სქემას აქვს სახე (ნახ. 2).



ნახ. 2. ანაკრები გარსის საანგარიშო სქემა

ზიდვის უნარი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$P = \frac{\frac{h\sigma_{xl}}{3e^3} \int_0^{1/2} \int_0^{1/2} [\theta^2(\xi) \cdot \psi^2(\eta) + \theta(\xi) \cdot \psi(\eta) \cdot \psi(\xi) \cdot \theta(\xi) + \psi^2(\xi) \cdot \theta^2(\eta) + \lambda(\xi) \cdot \lambda(\eta)]^{1/2} d\xi d\eta}{\int_0^{1/2} \int_0^{1/2} \psi(\xi) \cdot \psi(\eta) d\xi d\eta} \quad (8)$$

სადაც შემოღებულია შემდეგი აღნიშვნები:

$$\theta(\xi) = C(12\xi - 12\xi^2 - 2),$$

$$\Psi(\xi) = C(12\xi^3 - \xi^2 - \xi^4),$$

$$\Lambda(\xi) = C(4\xi^3 - 3\xi^2 - 2\xi^4),$$

$$\theta(\varphi) = C(12\eta - 12\eta^2 - 2),$$

$$\Psi(\varphi) = C(2\eta^2 - \eta^2 - \varphi^4),$$

$$\Lambda(\varphi) = C(4\eta^2 - 3\eta^2 - 2\eta^4).$$

ცხრილებში (1), (2), (3) და (4) მოცემულია (8) ფორმულის რიცხვით მნიშვნელობებში მდებარე ორჯერადი ინტეგრალის, რომელიც გამოთვლილია სიმპსონის ფორმულის მიხედვით:

| $\eta \backslash \xi$ | 0 | 1/8 | 1/4 |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| 0 | 0 | 41,182 | 134,53 |
| 1/8 | 41,182 | 65,93 | 106,61 |
| 1/4 | 134,53 | 106,61 | 118,37 |

ცხრილი 1. ორჯერადი ინტეგრალის რიცხვითი მნიშვნელობები-1

| $\eta \backslash \xi$ | 0 | 1/8 | 1/4 |
|-----------------------|---------|--------|--------|
| 0 | 134,53 | 106,61 | 118,70 |
| 3/8 | 210,96 | 106,28 | 31,859 |
| 1/4 | 216,725 | 107,57 | 29,32 |

ცხრილი 2. ორჯერადი ინტეგრალის რიცხვითი მნიშვნელობები-2

| | | | |
|-------|--------|--------|--------|
| η \ ξ | 1/4 | 3/8 | 1/2 |
| 0 | 134,53 | 219,96 | 216,72 |
| 1/8 | 106,61 | 106,28 | 107,57 |
| 1/4 | 118,70 | 31,859 | 29,32 |

ცხრილი 3. ორჯერადი ინტეგრალის რიცხვითი მნიშვნელობები-3

| | | | |
|-------|--------|--------|-------|
| η \ ξ | 1/4 | 3/8 | 1/2 |
| 1/4 | 118,70 | 31,859 | 29,32 |
| 3/8 | 31,859 | 20,05 | 33,9 |
| 1/2 | 29,32 | 33,9 | 46,92 |

ცხრილი 4. ორჯერადი ინტეგრალის რიცხვითი მნიშვნელობები-4

გამოთვლების შედეგად ვღებულობთ:

$$P = 36.03 \frac{h^3 \sigma_{xy}}{3e^2} \text{ კმ/ს}^2$$

როგორც მიღებული შედეგები გვჩვენებს ანაკრები ფილის ზიდვის უნარი დამოკიდებულია ანაკრები ელემენტების რაოდენობაზე. გარსის ზიდვის უნარის მისაღებად ფილის ზიდვის უნარს უნდა დაემატოს გარსის სიმრუდის რადიუსებზე დამოკიდებული შემდეგი მუდმივი სიდიდე:

$$\frac{2h\sigma_{xy}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_1 R_2} + \frac{1}{R_2^2} \right]^{1/2}$$

საინჟინრო ნაგებობათა ზიდვის უნარის განსაზღვრა წარმოადგენს სამშენებლო მექანიკის ერთ-ერთ ძირითად ამოცანას. იგი საკმაოდ რთული და ხშირად პრაქტიკულად განუხორციელებელი ამოცანაა. ამიტომაცაა, რომ ამ მიმართულებით დამუშავებულია მრავალი გონებამახვილური მეთოდი, რომლებიც მისაღებ ფარგლებში საკმაოდ ამარტივებენ დასმული ამოცანის გადაწყვეტას.

ამავე თავში განხილულია სამშენებლო მექანიკის ზოგიერთი ამოცანის გადაწყვეტის პრაქტიკული ხერხი. რეალური ნაგებობის წარმოდგენა ხდება

მისი საანგარიშო სქემით, რომელთა გამოყენებაც საშუალებას იძლევა ამოცანა გადაწყდეს პრაქტიკული მიზნებისათვის საჭირო სიზუსტით. საანგარიშო სქემის შედგენა გულისხმობს ნაგებობის გეომეტრიული აღნაგობის, მასალის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების, სხვა სხეულებთან დაკავშირების (სასაზღვრო პირობების) და გარეგანი (საექსპლოატაციო) დატვირთვის მოქმედების იდეალიზაციას. საანგარიშო სქემა შედგება შემდეგი ძირითადი მოდელისაგან:

გეომეტრიული მოდელი, რომელიც აღწერს ნაგებობის გეომეტრიულ სახეს. კერძოდ, იგი უწყვეტი სხეულია, თუ დისკრედიტული უწყვეტი სისტემების გაანგარიშებისათვის გამოიყენება კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალური განტოლებები საკონტაქტო წერტილებში გაერთიანებულ დისკრეტული სისტემებისათვის - ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებები.

ფიზიკურ მექანიკური მოდელი, რომელშიც იგულისხმება სხეულის ფიზიკურ მექანიკურ პარამეტრებს შორის დამოკიდებულება, კერძოდ ძაბვებსა და დეფორმაციებს შორის წრფივი ან არაწრფივი დამოკიდებულება, დრეკადობის მოდულის ან სხვა პარამეტრების ცვლილება დატვირთვის ან დროის ცვლილებასთან დაკავშირებით ან სხვა.

სასაზღვრო პირობების მოდელი, რომელიც განსაზღვრავს ნაგებობის დამაგრების ან მისი სხვა სხეულებთან მიერთების საკითხებს. მიერთება შეიძლება განხორციელებული იყოს ან ხისტი ან სახსროვანი კავშირებით. თითოეული კავშირის სახე განსაზღვრავს რეაქტიული ძაღვების სახეს და რაოდენობას. ეს ძაღვები სხეულისათვის ისეთივე გარეგანი ფაქტორებია, როგორც საექსპლოატაციო დატვირთვები და ჩამაგრების ზედაპირებზე ან წერტილებში ზოგიერთი მათგანი ცნობილია, რაც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს ის მუდმივები, რომლებიც ამოცანის გადაწყვეტისათვის საჭირო დიფერენციალური განტოლებების გაინტეგრაციის შედეგად მიიღება.

გარე დატვირთვის მოდელი, რომელშიც იგულისხმება გარე დატვირთვის სახე. უნდა აღინიშნოს, საექსპლოატაციო დატვირთვა წარმოდგენილია მარტივი დატვირთვების (შეყურსული ძალებისა და განაწილებული დატვირთვების) სახით, ესე იგი რეალური გარეგანი ზემოქმედება სხეულზე აისახება მარტივი დატვირთვების კონკრეტული კომბინაციით.

გაანგარიშების პროცესში მიმართავენ საანგარიშო სქემის წარმოდგენას ქვესქემების სახით. გადასაწყვეტი ამოცანის მიხედვით ქვესქემებად წარმოდგენა (დაშლა) ხდება ოთხივე მოდელის მიხედვით.

ფილების გაანგარიშების პრაქტიკაში ხშირია შემთხვევები, როდესაც გადასაწყვეტი კონკრეტული ამოცანა შედარებით მარტივია საანგარიშო სქემის ოთხივე მოდელის მიხედვით. ამ დროს შესაძლებელია საანგარიშო სქემის ქვესქემებად დაშლამ თვისობრივად გაამარტივოს ამოცანის გადაწყვეტა. მნიშვნელოვანია მართკუთხა ფილების გაანგარიშების საკითხი ერთ-ერთ სახის მარტივი დატვირთვის მოქმედების შემთხვევაში საანგარიშო სქემის ქვესქემებად დაშლის გზით.

ასევე განხილულია მართკუთხა ფილების გაანგარიშების პრაქტიკული მეთოდი საანგარიშო სქემის, სასაზღვრო პირობებისა და დატვირთვის კონკრეტული მოდელის გათვალისწინებით. განხილულია შემდეგი კონკრეტული ამოცანები:

ამოცანა 1. ოთხივე გვერდით სახსროვნად ჩამაგრებული ფირფიტის ცენტრში მოდებული შეყურსული ძალა $F = \text{const}$ (ნახ. 3)

ორ საყრდენზე სახსროვნად დაყრდნობილი კოჭებისათვის, რომლის ძალის შუაში მოქმედებს შეყურსული ძალა, ჩაღუნვის ფუნქციას აქვს სახე:

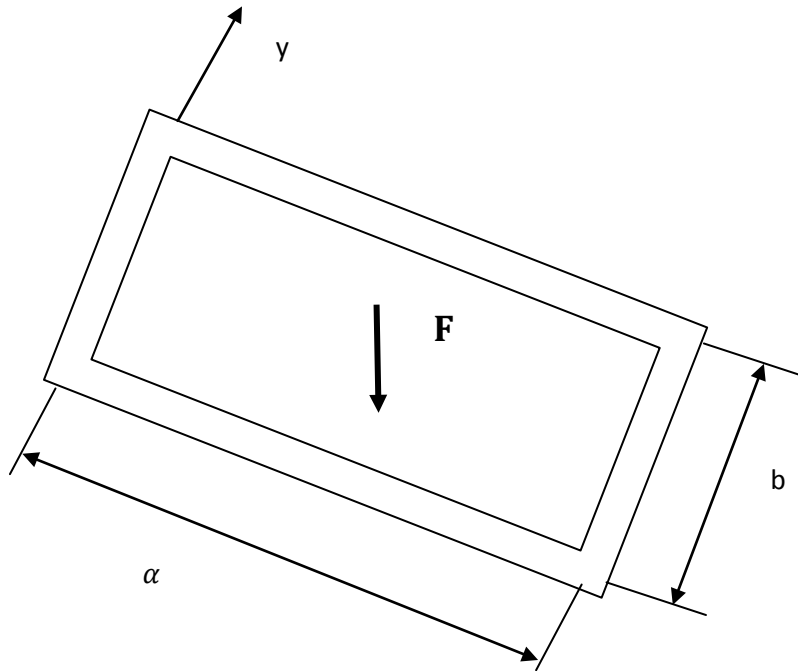
$$\Delta^\alpha(x) = F/12EI^\alpha \left(x^3 + \frac{\alpha^2}{4} x \right) \left[0 \leq x \leq \frac{\alpha}{2} \right] \quad (9)$$

მაქსიმალური ჩაღუნვა, რომელიც შუაშია, იქნება:

$$\Delta_{max}^\alpha = \frac{F\alpha^2}{48EI^2} = 0.028 \frac{F\alpha^3}{EI^\alpha} \quad (10)$$

(10)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\delta_{max}^\alpha = 0.0208 \frac{\alpha^3}{EI^\alpha}, \quad \delta_{max}^\beta = 0.0208 \frac{b^3}{EI^\alpha}, \quad (11)$$



ნახ. 3. ფირფიტის ცენტრში მოდებული შეყურსული ძალა

ცნობილია, რომ ფირფიტის ცილინდრული სიხისტე

$$D = E \frac{h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (12)$$

სადაც h ფირფიტის სისქეა, ხოლო

$$EI^\alpha = E \frac{bh^3}{12} \text{ და } EI^\beta = E \frac{\alpha h^3}{12} \quad (13)$$

ამიტომ

$$\frac{EI^\alpha}{D} = (1-\nu^2)b \text{ და } EI^\beta = (1-\nu^2)\alpha \quad (14)$$

$$\text{საიდანაც მიიღება } EI^\alpha = (1-\nu^2)bD \text{ და } EI^\beta = (1-\nu^2)\alpha D \quad (15)$$

(11)-ში (14)-ის შეტანით მივიღებთ:

$$\delta_{max}^\alpha = 0.0208 \frac{\alpha^3}{(1-\nu^2)bD},$$

$$\delta_{max}^\beta = 0.0208 \frac{b^3}{(1-\nu^2)\alpha D} \quad (16)$$

(16)-ის გათვალისწინებით $q^* = -\frac{q}{1 + \frac{\delta_{max}^\beta}{\delta_{max}^\alpha}}$ მიიღებს სახეს:

$$F^* = \frac{F}{I + \frac{b^4}{\alpha^4}} \quad (17)$$

ამგვარად, მაქსიმალური ჩალუნვა β ქვესქემის შესაბამის კოჭში, რომელიც მოცემული ფირფიტის (ნახ. 3) მაქსიმალური ჩალუნვის ექვივალენტურია.

ამოცანა 2. ფირფიტის ოთხივე გვერდი ხისტადაა ჩამაგრებული და მასზე მიღებულია თანაბრად განაწილებული დატირთვა $q = \text{const}$.

ამ შემთხვევაში გვექნება:

$$\Delta^\alpha(x) = \frac{qb}{24EI^\alpha}(x^4 - 2\alpha x^2 + \alpha^2 x^2) \quad (18)$$

მაქსიმალური ჩალუნვა, რომელიც მალის შუაში იქნება:

$$\Delta_{max}^\alpha = \frac{qb\alpha^4}{384EI^\alpha} = 0.0026 \frac{qb\alpha^4}{EI^\alpha} \quad (19)$$

(18)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\delta_{max}^\alpha = 0.0026 \frac{\alpha^4}{(1 - \nu^2) b D}$$

$$\delta_{max}^\beta = 0.0026 \frac{b^4}{(1 - \nu^2) \alpha D} \quad (20)$$

(20)-ის გათვალისწინებით მიიღება:

$$q^* = \frac{q}{I + \frac{b^4}{\alpha^4}} \quad (21)$$

ამგვარად, მაქსიმალური ჩალუნვა β ქვესქემის შესაბამის კოჭში მოცემული ფირფიტის მაქსიმალური ჩალუნვის ექვივალენტური იქნება.

განხილულია წყვეტილპარამეტრებიანი თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის გაანგარიშების მაგალითები. ალგორითმების ამოხსნისთვის განხორციელებული იყო გარსის გამოთვლა, რომელიც შედგენილი იყო 16 ბრტყელი ელემენტისაგან, რომლებიც ქმნიან ამობურცული მრავალკუთხედის ზედაპირს. შედგენილი პროგრამის შედეგად განსაზღვრულია კომპონენტები დაძაბულ დეფორმირებული მდგომარეობის. ეპიურებზე გამოსახულია გრაფიკები ნორმალური გადაადგილებისა W , F^1 ძალის ფუნქციისა, ჩამლუნავი მომენტების M_1, M_2 , მგრეხავი მომენტის H , ტანგენციალური ძალების T_1, T_2 , მხები ძალების S . გამოთვლებში გამოყენებულია სამ-სამი წევრი თითოეული ამ კომპონენტისა დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობიდან, გამოყენება

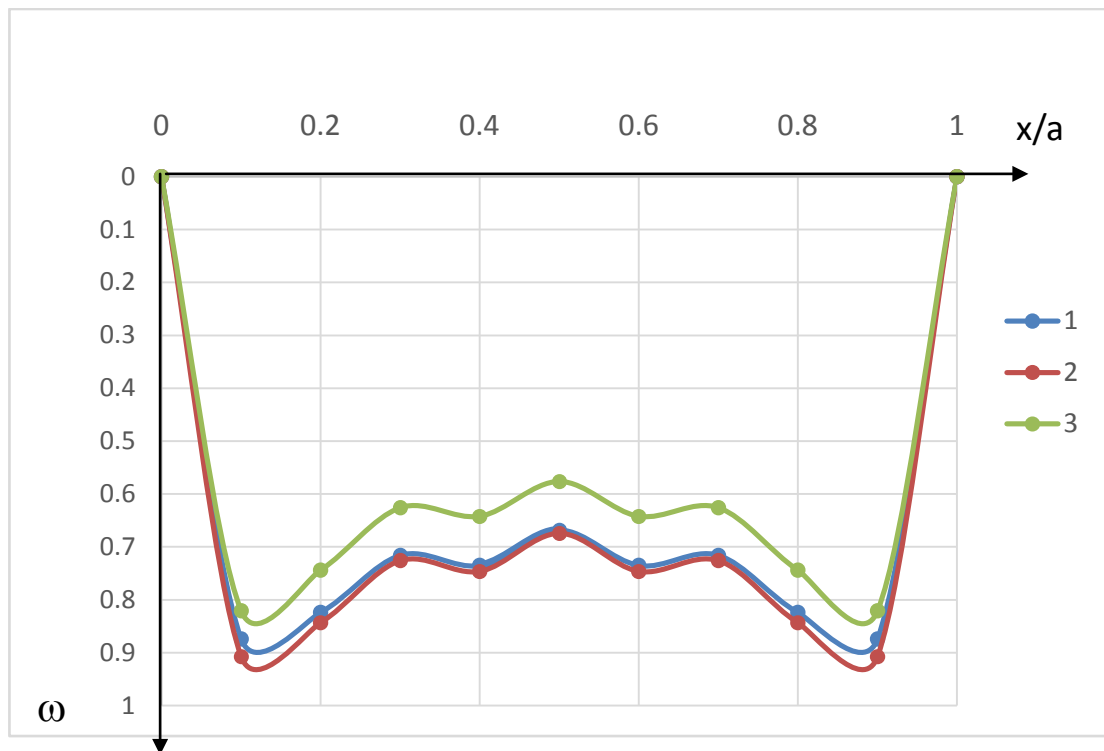
შემდეგი წევრებისა მათი რიგებიდან იძლევა უმნიშვნელო განსხვავებებს 5-3% ჯამურ მნიშვნელობებისას.

ცხრილი 5-ზე მოცემულია გარსის ანგარიში, რომელიც შედგება 16 ბრტყელი ელემენტისაგან გეომეტრიული არაწრფივობის გათვალისწინებით $a=600$ სმ; $b=900$ სმ; $h=3$ სმ; $f=120$ სმ; $\frac{b}{h}=300$; $\frac{a}{h}=200$; $y = \frac{b}{2}$

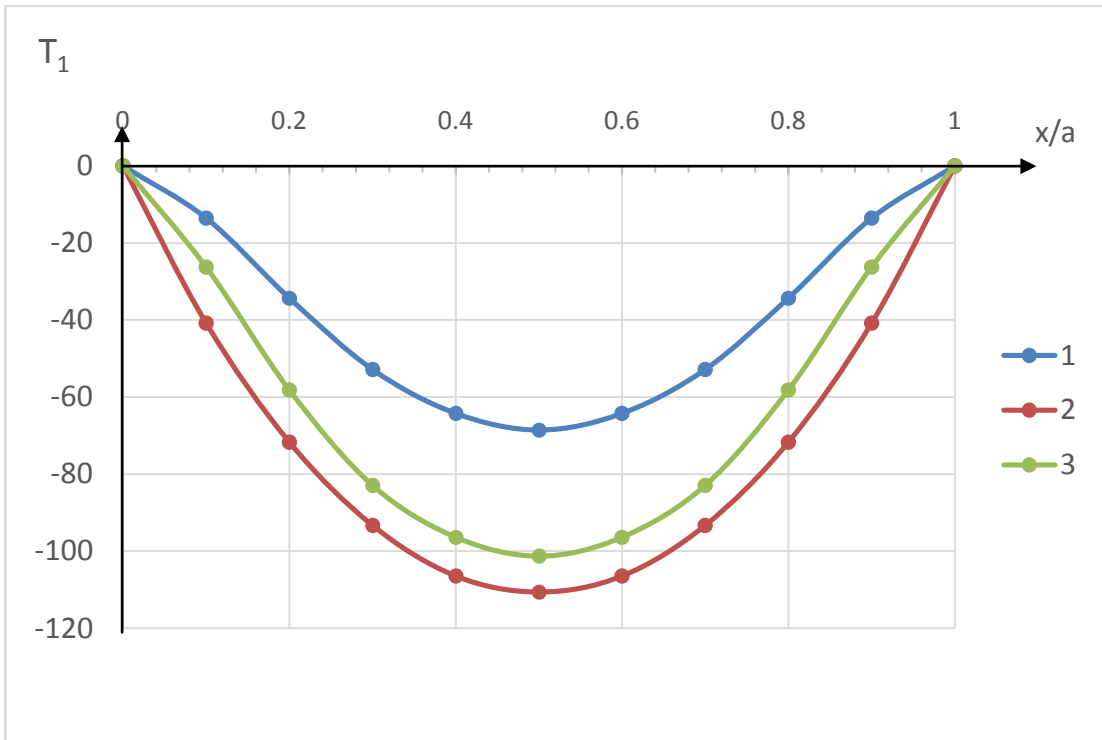
| $\frac{x}{a}$ | W | $F \cdot 10^{-6}$ | T_1 | T_2 | δ | M_1 | M_2 | H |
|---------------|-------|-------------------|---------|----------|----------|----------|--------|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.1 | 0.874 | 4.252 | -13.568 | -323.847 | 0 | -132.137 | -6.626 | 0 |
| 0.2 | 0.824 | 7.460 | -34.269 | -293.723 | 0 | 9.452 | 10.544 | 0 |
| 0.3 | 0.716 | 9.610 | -52.849 | -242.312 | 0 | 19.524 | 10.796 | 0 |
| 0.4 | 0.735 | 10.868 | -64.207 | -242.823 | 0 | -17.965 | 6.547 | 0 |
| 0.5 | 0.668 | 11.266 | -68.517 | -214.952 | 0 | 27.015 | 11.475 | 0 |

ცხრილი 5. გარსის ანგარიში გეომეტრიული არაწრფივობის გათვალისწინებით

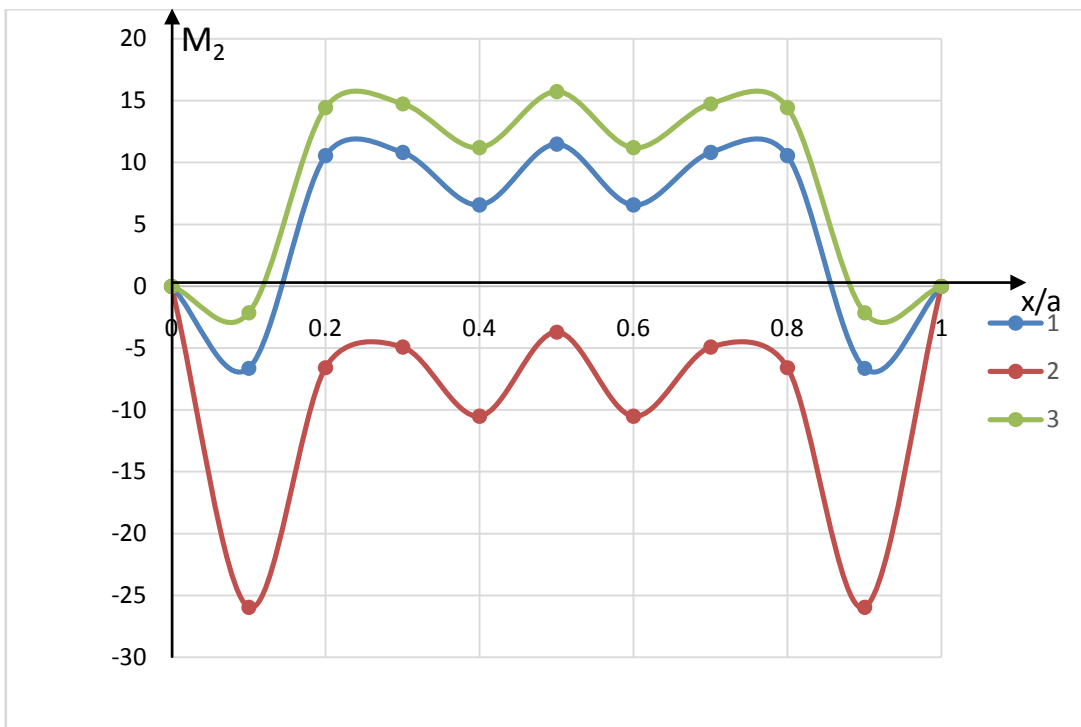
დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კომპონენტების განაწილების გრაფიკი სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის მოცემულია ნახაზ 4-7-ზე.



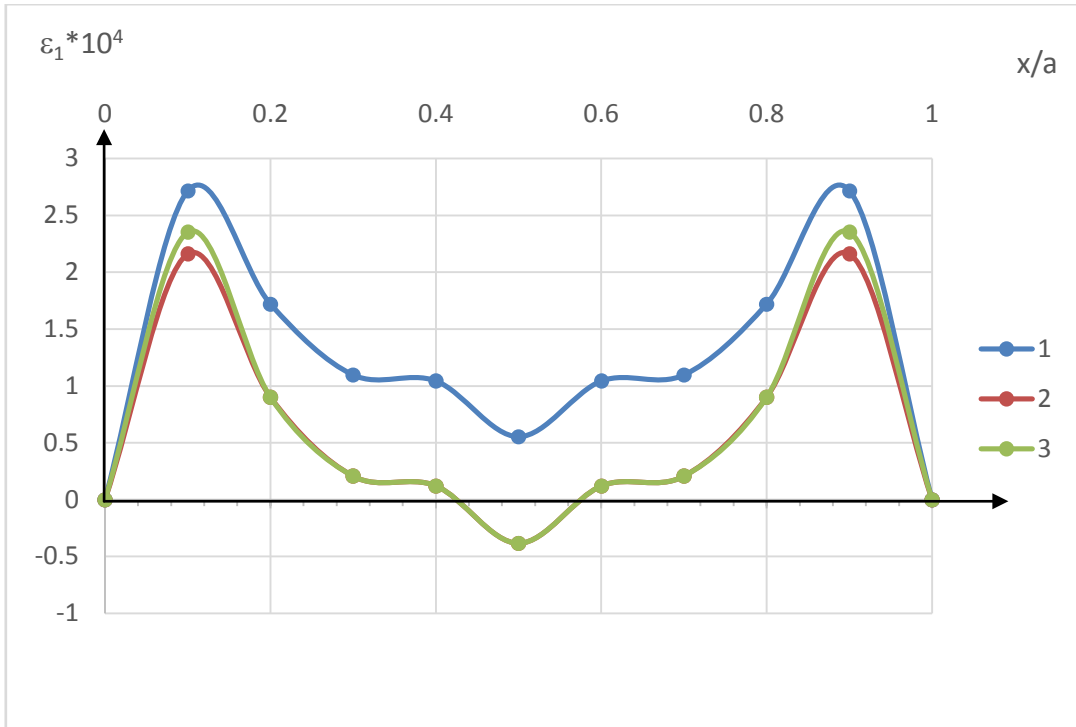
ნახ. 4. დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კომპონენტების განაწილება-1



ნახ. 5. დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კომპონენტების განაწილება-2

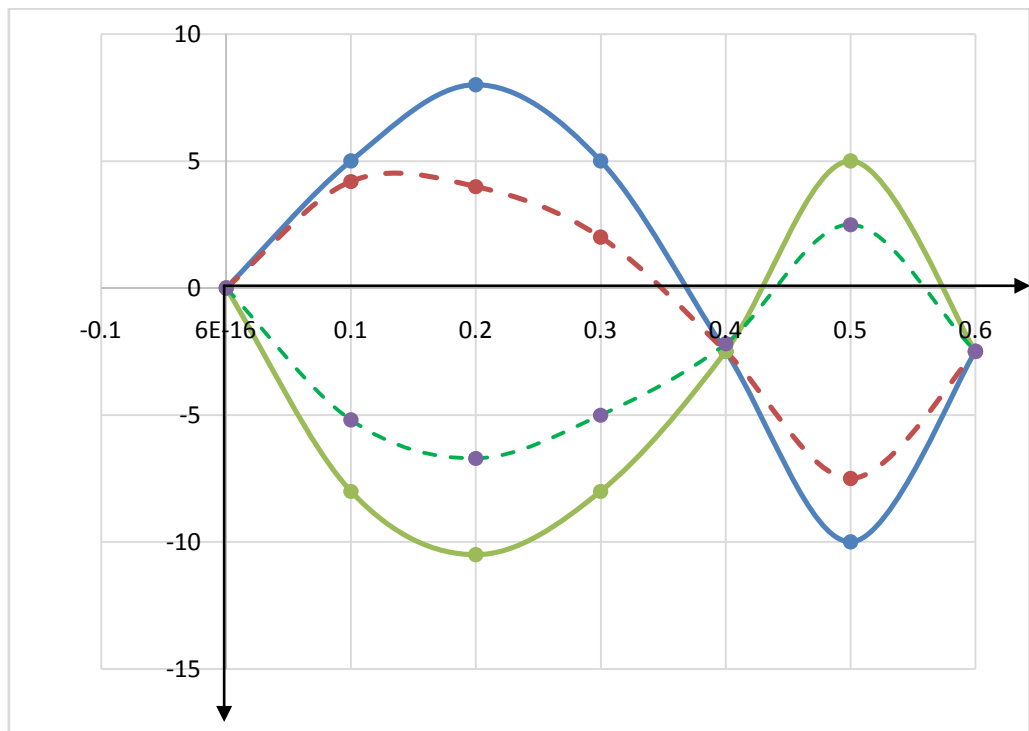


ნახ. 6. დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კომპონენტების განაწილება-6



ნახ. 7. დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კომპონენტების განაწილება-7

ნახაზ 8-ზე წარმოდგენილია ჩალუნვების, მომენტების და დამაბულობის გარსის გრაფიკი

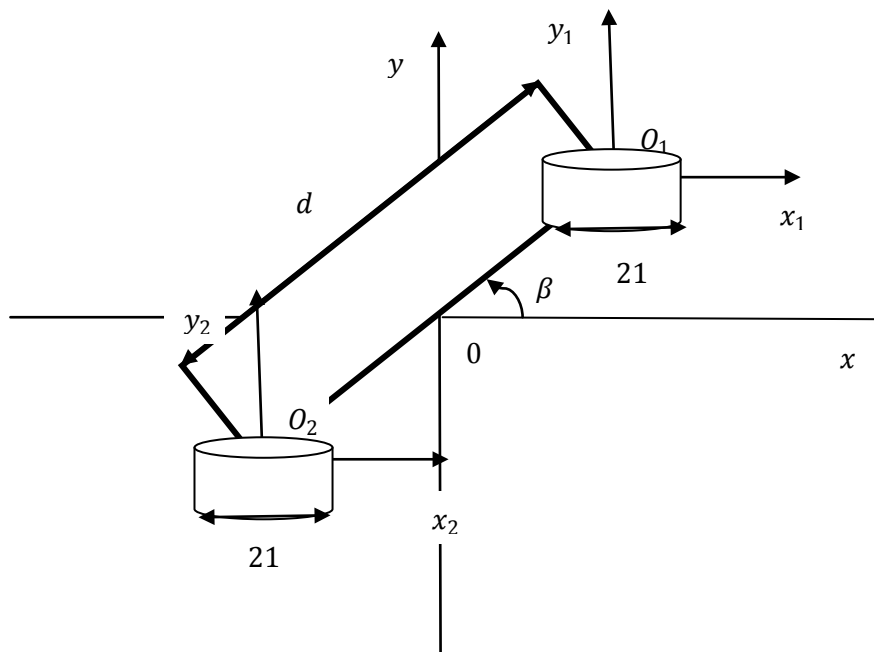


ნახ. 8. ჩალუნვების, მომენტების და დამაბულობის გარსი-3

განხილული გვაქვს ორი თანაბარი სიგრძის პარალელური ბზარის ამოცანის რიცხვითი ამოხსნა. უსასრულო ფირფიტაზე მოცემულია ორი თანაბარი სიგრძის ბზარი, ამასთან მათი განლაგება და მათზე დატვირთვა აკმაყოფილებენ სიმეტრიის პირობას (ნახაზი 9). როგორც ცნობილია ეს ამოცანა მიიყვანება შემდეგი სახის სინგულარულ ინტეგრალურ განტოლებაზე:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \frac{\varphi_0(t)}{t-t_0} dt + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} k(t_0, t) \varphi_0(t) dt = f(t_0), \quad (22)$$

$$\text{სადაც } k(t_0, t) = \frac{t+t_0+d\cos\beta}{(t+t_0+d\cos\beta)^2+d^2\sin^2\beta}, \quad (23)$$



ნახ.9. ორი თანაბარი სიგრძის ბზარი

სადაც β -არის კუთხე ბზარის სიბრტყესა და წრფეს შორის, რომელიც გადის ბზარის ცენტრებს შორის. (22) განტოლებიდან მუდმივი დატვირთვის დროს ადვილად მიიღება ცნობილი ინტეგრალური განტოლება უძრავი ან $2l(d \cos \beta = 2l)$ გადანაცვლებული პარალელური ბზარების შემთხვევაში.

(22) განტოლება არის პირველი გვარის სინგულარული ინტეგრალური განტოლება, ამ განტოლების ამოხსნა ჩვენ შეგვიძლია IV-V მიყვანილი ალგორითმებით.

ვეძებთ ამონახსნი შემდეგი სახით

$$\varphi_0(t) = \sqrt{\frac{t+l}{l-t}} \varphi(t),$$

სადაც $\varphi(t)$ ჰელდერის კლასის ფუნქციაა. სიმარტივისათვის ვიგულისხმობთ $L=1$.

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \sqrt{\frac{t+1}{1-t}} \varphi(t) d(t) + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \sqrt{\frac{t+1}{1-t}} k(t_0, t) \varphi(t) d(t) = f(t_0), \quad (24)$$

(24) განტოლება მოვიყვანოთ მის ექვივალენტურ განტოლებაზე

$$\varphi_0(t) + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \left[\frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \sqrt{\frac{1-t}{1+t}} \frac{k(t_1, t)}{t_1 - t_0} dt_1 \right] \varphi_0(t) d(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \sqrt{\frac{1-t}{1+t}} \frac{f(t) dt}{t - t_0}, \quad (25)$$

ამ განტოლებაში $\frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \sqrt{\frac{1-t}{1+t}} \frac{k(t_1, t)}{t_1 - t_0} dt_1$ გული შევცვალოთ ჩვენს მიერ აგებული კვადრატული ფორმულით

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \sqrt{\frac{1-t}{1+t}} \frac{k(t_1, t)}{t_1 - t_0} dt_1 \approx L_n \left[\left(S_n^{(-1/2; 1/2)} k \right) t_0, t \right], \quad t_0 \in ab,$$

სადაც

$$L_n \left[\left(S_n^{(-1/2; 1/2)} k \right) t_0, t \right] = L_{nj} \left[\left(S_n^{(-1/2; 1/2)} k \right) t_0, t \right], \quad t_0 \in \tau_j \tau_{j+1} \quad (j = \overline{1, n})$$

ხოლო

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \sqrt{\frac{1-t}{1+t}} \frac{f(t) dt}{t - t_0} \approx L_n \left[\left(S_n^{(-1/2; 1/2)} f \right) t_0, \right],$$

მივიღებთ შემდეგ წრფივ განტოლებათა სისტემას

$$\varphi_n(t_{vj}) + \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^m q_{ie} A_n(t_{ie} t_{vj}) \varphi_n(t_{ie}) \approx f_0(t_{vj}) \quad (26)$$

სადაც

$$A_n(t_{ie}, t_{vj}) =$$

$$\left[1 + \sum_{\sigma \neq v}^n \sum_{k=1}^m \frac{p_{\sigma k}^{*(\frac{1}{2}; -\frac{1}{2})}}{t_{\sigma k} - t_{vj}} + \sum_{k \neq j}^m \frac{p_{vk}^{*(1/2; \dots; -1/2)}}{t_{vk} - t_{vj}} - p_{vj}^{*(1/2; -1/2)} \sum_{k \neq j}^m d_{vk}(t_{vj}) \right] k(t_{vj} t_{ie}) -$$

$$\sum_{\sigma \neq v}^n \sum_{k=1}^m \frac{p_{\sigma k}^{*(\frac{1}{2}; -\frac{1}{2})}}{t_{\sigma k} - t_{vj}} k(t_{\sigma k}, t_{ie}) - \sum_{k \neq j}^m \frac{p_{vk}^{*(\frac{1}{2}; -\frac{1}{2})}}{t_{vk} - t_{vj}} k(t_{vk}, t_{ie}) + p_{vj}^{*(\frac{1}{2}; -\frac{1}{2})} \sum_{k \neq j}^m d_{vk}(t_{vj}) k(t_{vk} t_{ie}),$$

ხოლო $\varphi_n(t_{vj})$ -საძებნი სიდიდეებია.

$$f_0(t_{vj}) = \left[1 + \sum_{\sigma \neq v}^n \sum_{k=1}^m \frac{p_{\sigma k}^{*(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})}}{t_{vj} - t_{\sigma k}} + \sum_{k \neq j}^m \frac{p_{vk}^{*(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}}{t_{vj} - t_{vk}} - p_{vj}^{*(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})} \sum_{k \neq j}^m d_{vk}(t_{vj}) \right] f(t_{vj}) -$$

$$\sum_{\sigma \neq v}^n \sum_{k=1}^m \frac{p_{\sigma k}^{*(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})}}{t_{vj} - t_{\sigma k}} f(t_{\sigma k}) - \sum_{k \neq j}^m \frac{p_{vk}^{*(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}}{t_{vj} - t_{vk}} f(t_{vk}) + p_{vj}^{*(1/2-1/2)} \sum_{k \neq j}^m d_{vk}(t_{vk}) f(t_{vj})$$

($V=1,2,\dots,n$; $j = 1,2,\dots,m$;)

$$p_{\sigma k}^{*(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})} = \frac{1}{\pi i} \int_{\tau_0}^{\tau_{0+1}} \sqrt{\frac{t-b}{t-a}} \prod_{j \neq k}^m \frac{t-t_{\sigma j}}{\sigma_k - \sigma_j} dt \quad q_{it}^{*(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})} = \frac{1}{\pi i} \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} \sqrt{\frac{t-a}{t-b}} \prod_{j \neq e}^m \frac{t-t_{ij}}{t_{ie} - t_{ij}} dt$$

$$p_{\sigma k}^{*(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})} = \begin{cases} p_{\sigma k}^{*(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}, & k = \overline{2, m-1}; \\ p_{\sigma 1}^{*(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})} + p_{\sigma-1m}^{*(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}, & k = 1; \end{cases} \quad \sigma = \overline{1, n},$$

$$d_{vk} = \frac{\prod_{j=0=1}^m (t_{vj} - t_{vj_0})}{\prod_{j=1}^m (t_{vj} - t_{vj_0})} \quad j_0 \neq k, j$$

როგორც ვაჩვენეთ (26) სისტემას აქვს ერთადერთი ამონახსნი, როცა (24) აქვს ერთადერთი ამონახსნა, ამასთან მიახლოების სიზუსტე არის საკმაოდ მაღალი რიგის, ქვემოთ მოყვანილია ამ სისტემის ამონახსნა რამდენიმე კონკრეტულ შემთხვევაში. პროგრამა შედგენილია Matematika 4.1 სიმბოლურ ენაზე. როგორც მოყვანილი ცხრილებიდან ჩანს $n=10$ -სათვის მიიღწევა 10^{-3} სიზუსტის რიგი.

$K(t_0, t) = 1$, $f=2$; $n=10$.

ცხრილ 6-ში ნაჩვენებია ინტეგრალური განტოლების ზუსტი ამონახსნი $\varphi(t) = 1$

| | | | | | | | |
|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| φ_{00} | 0,98437 | φ_{21} | 0,9955 | φ_{42} | 0,99942 | φ_{63} | 0,99695 |
| φ_{01} | 0,98641 | φ_{22} | 0,99734 | φ_{43} | 0,99891 | φ_{70} | 0,99695 |
| φ_{02} | 0,98811 | φ_{23} | 0,99769 | φ_{50} | 0,99891 | φ_{71} | 0,99856 |
| φ_{03} | 0,98955 | φ_{30} | 0,99769 | φ_{51} | 0,99077 | φ_{72} | 0,99879 |
| φ_{10} | 0,98955 | φ_{31} | 0,99802 | φ_{52} | 0,99184 | φ_{73} | 0,99899 |
| φ_{11} | 0,99356 | φ_{32} | 0,99830 | φ_{53} | 0,99277 | φ_{80} | 0,99899 |
| φ_{12} | 0,99431 | φ_{33} | 0,99919 | φ_{60} | 0,99277 | φ_{81} | 0,99963 |
| φ_{13} | 0,99496 | φ_{40} | 0,99919 | φ_{61} | 0,99606 | φ_{82} | 0,99860 |
| φ_{20} | 0,99496 | φ_{41} | 0,99931 | φ_{62} | 0,99653 | φ_{83} | 1,10160 |

ცხრილი 6. ინტეგრალური განტოლების ზუსტი ამონახსნი-1

$$K(t_0, t) = (t+t_0 + 4 \cos \pi/3) / (t + t_0 + 4 \cos \pi/3)^2 + 16 \sin^2(\frac{\pi}{3}), f = 2, n = 10$$

$$n = 3$$

$$u[x, y] := (y^2 + 6y + 4xy + 2x - x^2 + 4) / (x + y + 2)^3$$

$$u1[x, y] := (x+y+4\cos[\pi/3]) / ((x+y+4\cos[\pi/3])^2 + 16(\sin[\pi/3])^2)$$

$$s1[y, j, n, m] := \sum_{k=1}^{y-1} (\sum_{k=1}^{m-1} pp[\sigma, k]) / (\lambda_{vj} - \lambda_{\sigma, k}) + \sum_{\sigma=y+1}^n (\sum_{k=1}^{m-1} pp[\sigma, k]) / (\lambda_{vj} - \lambda_{\sigma, k});$$

$$s2[y, j, m] := \sum_{k=1}^{j-1} pp[y, k] / (\lambda_{yj} - \lambda_{y, k}) + \sum_{k=j+1}^{m-1} pp[y, k] / (\lambda_{y, j} - \lambda_{\sigma k});$$

$$s3[y, j, m] := pp[y, j] (\sum_{k=1}^{j-1} dd[y, j, k, m] + \sum_{k=j+1}^m dd[y, j, k, m]);$$

$$s4[y, j,] := pp[y, j] u1[\lambda_{yj} \lambda_{yj}];$$

$$s5[y, j, m] := \sum_{k=1}^{j-1} pp[y, k] / (\lambda_{yj} - \lambda_{y, k}) - pp[y, k] u1[\lambda_{yj}, \lambda_{yk}] \varphi[\lambda_{yk}] + \sum_{k=j+1}^{m-1} pp[y, k] / (\lambda_{y, j} - \lambda_{yk}) - \sum_{k=j+1}^{m-1} pp[y, k] / (\lambda_{y, j} - \lambda_{yk});$$

$$s6$$

$$[y, j, m] := \sum_{k=1}^{j-1} pp[y, j] dd[y, j, k, m] \varphi[\lambda_{y, k}] + \sum_{k=j+1}^m pp[y, j] dd[y, j, k, m] \varphi[\lambda_{y, k}]$$

$$s7[y, j, n, m] = \sum_{\sigma=1}^{y-1} \sum_{k=1}^{m-1} (pp[\sigma, k] / (\lambda_{y, j} - \lambda_{y, k}) - pp[\sigma, k] u1[\lambda_{y, j}, \lambda_{\sigma, k}]) \varphi[\lambda_{\sigma, k}] + \sum_{\sigma=1+y}^n \sum_{k=1}^{m-1} (pp[\sigma, k] / (\lambda_{y, j} - \lambda_{\sigma, k}) - pp[\sigma, k] u1[\lambda_{y, j}, \lambda_{\sigma, k}]) \varphi[\lambda_{\sigma, k}];$$

$$D_0[\tau_\sigma = -1 + 2(\sigma - 1)/n (\sigma, 1, n)]$$

$$m=4$$

$$D_0 x_{k=k-1} \quad m-1, k, 1, m$$

$$\text{Table } x_k, k, 1, m$$

$$h=2/n$$

$$D_0[\lambda_{\sigma,k} = \tau_{\sigma} + hx_k, (\sigma, 1, n), (k, 1, m)]$$

$$\text{Table}[N\{\lambda_{\sigma,k}\}, \{\sigma, 1, n\}, \{k, 1, m\}]$$

$$\omega[\underline{t}, \underline{y}, \underline{m}] := \text{Prochict}[t - \lambda_{y.k}(k, 1, m)]$$

$$\tau_{n+1} = 1$$

$$D_0\{p(\underline{\sigma}, \underline{k}) := (1/\pi D\{\omega[t, \sigma, m], t\}) t \rightarrow \lambda_{y.k}\}$$

$$\text{Integrate}[\omega(t, \sigma, m) / (\sqrt{(1+t)/(1-t)}(t-\lambda_{\sigma k})), (t, \tau_{\sigma}, t_{\sigma+1})],$$

$$(\sigma, 1, n), (k, 1, m)$$

$$\text{pp}[1.1] = N[p(1.1)]$$

$$\text{pp}[n. m.] = N[p(n. m.)]$$

$$D_0 \text{pp}[\sigma. m - 1] = \text{pp}[(\sigma, 0), (\sigma, 1, n - 1)]$$

$$D_0 \text{pp}[\sigma. k] = \text{pp}[(\sigma, k), (\sigma, 1, n), (k, 1, m - 1)]$$

$$D_0 \text{pp}[\sigma. 1] = p[(\sigma - 1, mj) + p[\sigma, 1](\sigma, 2, n - 1)]$$

$$D_0 \text{pp}[\sigma. 1] = \text{pp}[(\sigma - 1, mj) + \text{pp}[\sigma, 1](\sigma, 2, n)]$$

$$D_0 \text{pp}[n. k] = N[p[(n, k)], (k, 1, m)]$$

$$\text{dd}[\underline{y}, \underline{j}, \underline{k}, \underline{m}] := \{Delete[\prod_{i=1}^m (\lambda_{yj} - h_{y1}), \{(j), (k)\}]/. h \rightarrow$$

$$\lambda\} / \{Delete[\prod_{i=1}^m (\lambda_{yk} - h_{y1}), \{(j), (k)\}]/. h \rightarrow \lambda\}$$

$$D_0 \left\{ \text{Print} \left[N \left[(1 + s1(v, j, n, m) + s2(v, j, m) - s3[v, j, m] + s4[v, j] \varphi[\lambda, y] -$$

$$s5[v, j, m] + s6[v, j, m] - s7[\underline{y}, v, j, m] \right] \right\} = 2j, (y, 1, n-1) (j, 1, m-1)$$

$$D_0 \left[\text{Print} \left[N \left[(1 + s1(n, j, n, m) + s2(n, j, m) - s3(n, j, m) + s4(n, j)) \right] \right] \varphi(\lambda_{n,j}) -$$

$$s5[v, j, m] - s6[v, j, m] - s7[v, j, n, m] = 2(j, 1, m).$$

დამუშავებული და გამოკვლეულია ამოხსნის მთელი რიგი გამარტივებული ვარიანტი, კერძოდ, მართკუთხა ჭრილის მქონე სეისმომედეგი თხელკედლიანი სივრცითი სისტემების მეთოდის, რასაც მიყვავართ გამოთვლების არსებით გამარტივებაზე სიზუსტის მნიშვნელოვანი დანაკარგის გარეშე.

ძირითადი დასკვნები

ჩატარებული მრავალმხრივი თეორიული კვლევების გაანგარიშებით მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის პირობებში მყოფი წყვეტილპარამეტრებიანი სეისმომედეგი თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშების პრობლემა საკმაოდ რთულია, აქტუალურია და მოითხოვს გაანგარიშების განსაკუთრებული მეთოდების შემუშავებას.

დამუშავებული დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის პირობებში მართკუთხა ჭრილის მქონე სეისმომედეგი თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდიკა უზრუნველყოფს დატვირთვის ნებისმიერ სტადიაზე დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის დადგენას.

დამუშავებულია დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის პირობებში მართკუთხა ჭრილის მქონე სეისმომედეგი თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშების ისეთი მეთოდიკა, რომელიც უზრუნველყოფს დატვირთვის ნებისმიერ სტადიაზე დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის უტყუარ ასახვას გაანგარიშების მინიმალური ხარჯებით;

შექმნილია ჭრილების მქონე მართკუთხა ფილებისაგან შედგენილი თხელკედლიანი კონსტრუქციის დაზუსტებული საანგარიშო მოდელი;

დამუშავებულია ჭრილების მქონე გეგმაში მართკუთხა ფირფიტებისა და გარსების გაანგარიშების მეთოდიკა. კონტურული კუმშვადი დატვირთვის სხვადასხვა სახის, სხვადასხვა სასაზღვრო პირობების, აგრეთვე ჭრილების სხვადასხვა სიდიდისა და განლაგების გათვალისწინებით;

დამუშავებული და გამოკვლეულია ამოხსნების გამარტივებული ვარიანტი. კერძოდ, ექვივალენტური ღუნვითი სიხისტის მქონე ფირფიტაზე დაყვანის მეთოდიკა, რასაც მივყავართ გამოთვლების არსებით გამარტივებაზე სიხუსტის მნიშვნელოვანი დანაკარგის გარეშე.

თეორიული კვლევების, გაანგარიშებით მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია საპროექტო ორგანიზაციებისათვის გაიცეს რეკომენდაციები.

ცვლადი დრეკადობის მოდულის მქონე მასალისაგან შედგენილი თხელკედლიანი კონსტრუქციების გაანგარიშებისათვის დამუშავებული ალგორითმი და პროგრამები საკმაო სწრაფად რეალიზდებიან კომპიუტერზე.

შემოთავაზებული მეთოდის საფუძველზე შეიძლება შემუშავებული იქნას პრაქტიკული რეკომენდაციები მშენებლობაში ფართოდ გამოყენებული წყვეტილპარამეტრებიანი სეისმომედეგი თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების გაანგარიშებისა და დაპროექტების საქმეში.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ ნაშრომებში:

1. G. Kipiani, G. Okropiridze, V. Sulashvili. Analysis of Plates, that are reinforced by thin curvilinear variable cross-section rods. International Scientific Journal "Air Transport", #1(12), 2017. pp. 17-23.
2. G. Kipiani, G. Okropiridze, V. Sulashvili. Shells of revolution and near to them. Collection of Abstracts of 9th international conference contemporary problems of Architecture and construction. Batumi, Georgia, september 13-18, 2017.p. 100.
3. ვაჟა სულაშვილი, ნინო თოდუა, ნოდარ ჩაჩხიანი. მიწისძვრის კატასტროფული მოვლენებისაგან დაცვის მექანიზმები. საქართველოს საავიაციო ინჟინერინგის სტუდენტთა მეტერთმეტე საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის თეზისების კრებული, თბილისი, 25-27 მაისი, 2017წ.გვ. 21-22.
4. ბედიამვილი მ., ყიფიანი გ., სულაშვილი ვ., კატასტროფული მიწისძვრების დამარცხება მსოფლიოს ტექნიკური უნივერსიტეტების, სამეცნიერო ექსპერიმენტალური კვლევების ერთობლივი ძალისხმევით. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „უმაღლესი განათლების

- ინტერნაციონალიზაცია, სტრატეგიები და გამოწვევები“, ოქტომბერი, თბილისი, 2017. გვ. 85-94;
5. Kipiani Gela, Todua Mikhail, Paresishvili Akaki, Chachkhiani Nodar, Sulashvili Vazha. Seismic Impact and Antiseismic Measures of Buildings. 15th International Conference Modelling in Mechanics 2017. January 19-20, 2017. pp. 17-19.
 6. Gela Kipiani, B. Abesadze, G. Okropiridze, Vazha Sulashvili. Analysis of lamellar structures with ribs due finite elements method. 16th International Conference, Strctural Reliability &Modelling in Mechanics, 24th and 25th May 2018. Ostrava, Poruba. Czech Republic.pp. 1-2.
 7. Bediashvili Malkhaz, Chokhnelidze Guga, Kipiani Gela, Sulashvili Vazha. Protective Measures from Transversal Wave at Excavation of pit Bore in Adjacent of Tower Buildings. II International Conference Seismic-2018. Problems of Earthquake Resistance in Cultural Heritage Monuments Protection and Civil Engineering. Tbilisi, Georgia, 29.06.2018-2.07.2018. p. 44;
 8. ბედიაშვილი მ., ყიფიანი გ., სულაშვილი ვ., სამშენებლო დარგის მეცნიერების განვითარების პროცესები საქართველოში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია - უწყვეტ გარემოთა მექანიკის მონათესავე პრობლემები. ქ. ქუთაისი, 12-13.10.2018. გვ. 346-351;
 9. ბედიაშვილი მ., ყიფიანი გ., სულაშვილი ვ., საქართველოში მაღლივი მშენებლობის შესახებ. VIII საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“. შრომების კრებული, ISSN 1512-2344. 1-5 ნომბერი, 2018. გვ. 13-19;
 10. სულაშვილი ვაჟა, ხვრეტების მქონე ანიზოტროპული ფირფიტოვანი კონსტრუქციების დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობა. II საერთაშორისო სიმპოზიუმი სეისმომედეგობა და საინჟინრო სეისმოლოგია. ქ. თბილისი, 2019წ. გვ. 97-98;
 11. ბედიაშვილი მ., ყიფიანი გ., სულაშვილი ვ., თხელკედლიანი კონსტრუქციების დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობა. საქართველოს

- მათემატიკოსთა კავშირის X საერთაშორისო კონფერენცია. ქ.ბათუმი, 2019წ. თეზისების კრებული. გვ. 62;
12. Sulashvili V. Interaction of two elongated circular circuits with rectangular cuts on an infinite plate. International Scientific Journal “Problems of Mechanics”, Tbilisi, #3(76)/2019, ISSN 1512-0740. p. 51-55;
 13. სულაშვილი ვაჟა, ნებისმიერი მოხაზულობის ხვრეტების მქონე ფირფიტების დრეკად-პლასტიკური ამოცანის გადაწყვეტის საკითხი. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა“, №1(57), 2021. ISSN 1512-3936. გვ. 98-101;
 14. Demur Tabatadze, Gela Kipiani, Vazha Sulashvili. Model of Elastic-Plastic State of Seismic Thin-Walled Spatial Systems with Rectangular Section. Eurasiaweb International Conference, Bordeaux, France ISBN: 978-93-90150-32-8. 2021. pp. 9-17.

Resume

The task of calculating discontinuous thin-walled structures in the elastoplastic regime is quite complex, relevant and requires the development of special calculation methods.

The relevance of calculating the elastic-plastic state of slabs with cuts is due to the design of shell-type buildings using modern building materials, as well as the development and implementation of effective methods of engineering calculations.

The purpose of the study is to study the elastic-plastic state of an anisotropic body with a wound. Creation of a technique for calculating thin-walled structures that provides an unambiguous reflection of the elastic-plastic state at any stage of loading with minimal estimated costs.

Creation of a new refined computational model of a thin-walled structure, consisting of plates with rectangular cutouts, taking into account various boundary conditions for various types of contour shrinkage, as well as various sizes and arrangements of holes. The experiment was carried out on the example of a monolithic reinforced concrete flat slab. The results obtained as a result of the experiment were compared with theoretically established real values. An analysis of the results of theoretical studies, calculations and experiments is presented.

Based on the processed methods, an algorithm and a software package are presented.

From an engineering point of view, the limit state of a structure is characterized by such a significant change in its original size and shape that further operation of the structure becomes impossible. It is clear that long before the threshold is reached, the structure already has some cracked plastic areas, the impact of which is still insignificant and the structure can still be considered rigid, but with increasing load, the plastic areas begin to expand and, finally, when external forces reach a certain ability to stretch, the structure is called "completely spreading", which is characterized by an indefinite increase in the strain rate.

Under conditions of imminent rupture, plastic deformation is much greater than elastic, so the latter can be completely neglected; as a result of this explanation, we obtain an ideal rigid-plastic model of a real deformable body. It is this model that is used to determine thrust.

The calculation of buildings according to Hooke's law provides for excessive rigidity of the building, leading to an overload of the material. In this regard, it is natural to assume the possibility of plastic deformations in individual elements of the building, which ensures the economy of the building in terms of the cost of materials. In construction, thin-walled spatial structures are widely used. They have found application in the rational solution of the roof of hydraulic, industrial, agricultural, commercial, cultural and sports facilities.

Thin-walled structures with cutouts, holes, slots and other structural elements are difficult to calculate, as they require not only consideration of structural elements, but also a comprehensive consideration of such issues as: Real properties of modern materials, electromagnetic elasticity, viscosity, interaction of the design structure with the liquid is taken into account and gas and many other factors.

This regularity is violated especially significantly by various rigid schemes of anchor-type rods.

The zones of stress concentration in the places of ruptures of irregularities (gill end, discrete bonds) significantly affect the ultimate strength and durability of thin-walled structures. The currently known traditional analytical and numerical methods are less effective in studying the stress-strain state of discontinuous thin-walled structures. Therefore, it is necessary to develop new effective methods for solving problems of this class.

The method of calculating thin-walled spatial structures with notches under conditions of linear and non-linear deformation makes it possible to determine stresses and moments with the same accuracy both in a continuous zone and near the edges of the notch and near the vertices. Knowledge of the nature of the distribution and displacement of stresses around the holes in the body and in the boundary elastic tape is one of the mandatory components of strength calculations.

Scientific novelty: Creation of a method for calculating thin-walled structures of rectangular cross section under the conditions of an elastic-plastic state, which ensures the determination of the elastic-plastic state at any stage of loading. General methods for constructing solving differential equations for calculating the parameters of intervals, slabs and membranes in particular cases are given. Methods for solving differential equations with variable and discontinuous coefficients are refined. An accurate calculation model of a thin-walled structure composed of plates with a rectangular cut was created.