

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ოსებ, გიორგობიანი

ხვრეტების მქონე ფენოვანი თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების
სიმტკიცეზე კვლევა, სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენებით

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0732

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორ ეფერატი

თბილისი

2023 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში

სამშენებლო ფაკულტეტი

ა. სოხაძის სახელობის სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობის 102
დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი, საქართველოს
მეცნიერებისა და ტექნიკის დარგის სახელმწიფო პრემიის ლაურეატი,
საქართველოს დამსახურებული მშენებელი გელა ყიფიანი

რეცენზენტები: პროფესორი თამაზ ხმელიძე

პროფესორი ნოდარი მარდალეიშვილი

დაცვა შედგება 2023 წლის 10 ივლისს 12:00 საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე,

კორპუსი I, აუდიტორია 508

მისამართი: 0160, თბილისი, მ. კოსტავას ქუჩა № 68

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი -----დ. ტაბატაძე

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

გასული საუკუნის დასაწყისიდან განსაკუთრებით გაიზარდა კომპოზიტური მასალების და მისგან დამზადებული კონსტრუქციების კვლევა, რადგან ეს მასალები გამოირჩევიან მაღალი კუთრი მახასიათებლებით, როგორცაა კუთრი სიმტკიცე და კუთრი სიხისტე.

თემის აქტუალობა: კომპოზიტურ მასალებს, რომლებიც გამოიყენებიან მშენებლობაში, გარდა დადებითი მახასიათებლებისა, გააჩნიათ მრავალი უარყოფითი თვისებებიც, რომელთაგან ერთ-ერთს მათი ანიზოტროპულობა წარმოადგენს. ამა თუ იმ ნაგებობის ანალიზის დროს სადაც მასალად იზოტროპული მასალაა გამოყენებული, განსაკუთრებული ყურადღება კონსტრუქციის გეომეტრიას ექცევა, კერძოდ კი ისეთ კრიტიკულ ადგილებს სადაც ძაბვათა კონცენტრაცია ხდება სხვადასხვა მიზეზების გამო. ანიზოტროპული მასალის შემთხვევაში კი გეომეტრიულთან ერთად მასალის მახასიათებლებიც არანაკლებად გასათვალისწინებელია. ეს გამოწვეულია ამ მასალის განსხვავებული დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობით, ზოგიერთ შემთხვევაში ყველა მიმართულებით. ამ პრობლემების გამო კომპოზიტური მასალისგან დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციები ხშირად უფრო მეტ გამოცდებს გადიან, რადგან მაქსიმალურად ზუსტად მოხდეს მათი კონკრეტული დატვირთვების დროს სივრცეში დეფორმაციის დადგენა და იმ ლიმიტის დადგენა რომლის დროსაც ნაგებობა ირღვევა. აღნიშნულის საფუძველზე თემა უდავოდ აქტუალურია.

სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის მიზანს წარმოადგენს პროგრამისა და ანალიტიკური ფორმულის შექმნას, რომლის გამოყენებითაც შესაძლებელია სამშენებლო კომპოზიტური კონსტრუქციის ხვრეტების გარშემო ყველა ფენაში კონცენტრირებული ძაბვების პირველადი ანალიზით დადგენა.

მეცნიერული სიახლე: ხვრეტების მქონე თხელკედლიანი სივრცითი სამშენებლო კონსტრუქციების სიმტკიცეზე დამუშავებულია ახალი მეთოდი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ერთიან მეთოდოლოგიურ საფუძველზე გამოკვლეულ იქნას ორთოტროპული ხვრეტების მქონე მრავალფენიანი მასალისათვის თითოეულ ფენაში კონცენტრირებული ძაბვები, რომელიც

შედარებულია სასრულ ელემენტთა ანალიზის პროგრამული პაკეტის რეზულტატებთან.

პრაქტიკულ მნიშვნელობას წარმოადგენს დროის მაქსიმალურად შემცირებას რომელიც საჭიროა სასრულ ელემენტთა ანალიზის დროს მოდელის ყოველი მოდიფიკაციისათვის. ვინაიდან სამშენებლო კონსტრუქციის უპირატესობა განსაზღვრავს მის სიიარაღს და აქედან გამომდინარე მინიმალურ წონას, ხშირად ხდება მოდელის ცვლილება რათა ეს კრიტერიუმები დაკმაყოფილდეს. თითოეული მოდიფიკაცია იწვევს კონსტრუქციის ანალიზის დროის საკმაოდ ზრდას. საჭირო გახდა ანალიტიკური ფორმულის შექმნა, რომლის სპეციალურ პროგრამაში ინტეგრაციით საშუალებას მოგვცემს პირველადი შედეგებისათვის კონცენტრირებულ ძაბვების დადგენას. რისი საშუალებითაც სამშენებლო ნაგებობის დიზაინი მიიღებს ოპტიმალურ სახეს.

კვლევის ძირითადი შედეგები და შედეგების გამოყენების სფერო: კვლევით დადგინდა კონცენტრირებული ძაბვის ანალიტიკური ფორმულა რომელიც ინტეგრირებულია კოდში. მიღებული პროგრამა შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას საპროექტო კომპანიებში რათა პირველადი მიახლოებით დადგინდეს ძაბვები ყველა ფენაში, მიუხედავად ფენის ორიენტაციისა და მექანიკური მახასიათებლებისა.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები: კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ხვრეტების მქონე მრავალფენიანი, ორთოტროპული თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების კონცენტრირებული ძაბვები. ამ ძაბვების დასადგენად გამოყენებულია სასრულ ელემენტთა მეთოდის პროგრამული პაკეტი, მიღებულ რეზულტატების საფუძველზე შედგენილია ანალიტიკური ფორმულა და პროგრამა, რომლის საშუალებითაც ხდება კონცენტრირებული ძაბვების დადგენა.

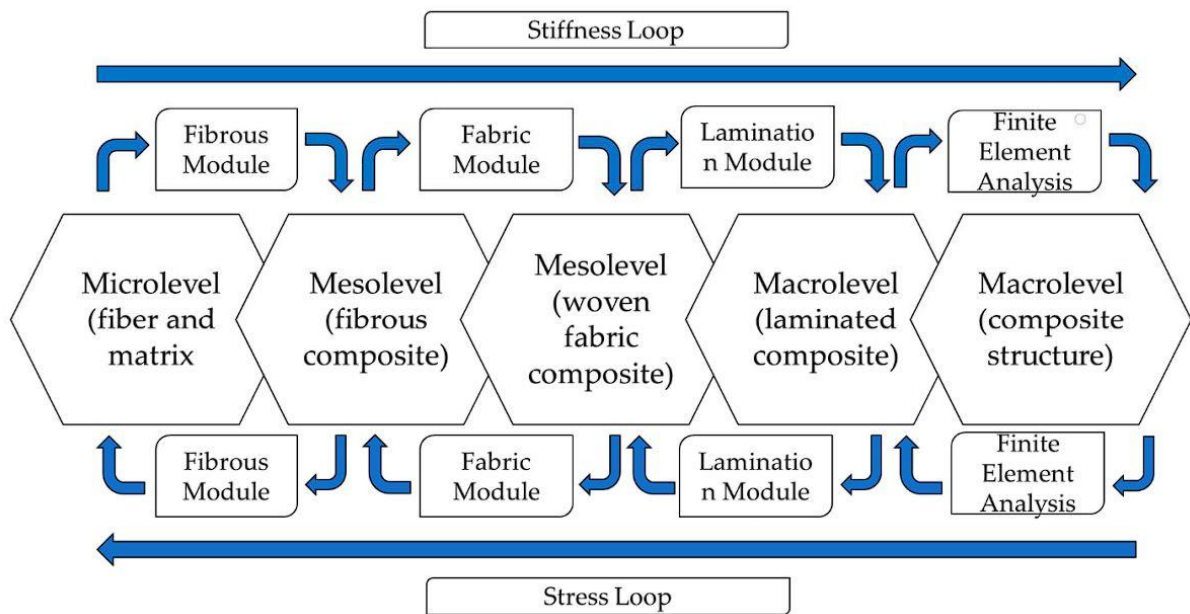
ნაშრომის მოცულობა

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, მიმოხილვითი თავის, ძირითადი ნაწილის დასკვნების და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. რომელიც მოიცავს 132 გვს. ლიტერატურა არის 67 დასახელების.

ნაშრომის შინაარსი

ნაშრომის შესავალში გადმოცემულია საკვლევი თემის აქტუალობა, მეცნიერული სიახლე და ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება.

ლიტერატურის მიმოხილვაში გადმოცემულია კომპოზიტური კონსტრუქციის ანალიზის ეტაპები და მასშტაბები, რომელიც მოიცავს მასალის მიკრო მექანიკურ მახასიათებლებს, კერძოდ მატრიცა არმატურის ურთიერთქმედებას, მეზო მექანიკურ მახასიათებლებს - ლამინატის მახასიათებლებს და მაკრო მექანიკურ მახასიათებლებს რომელიც კონსტრუქციის მახასიათებლებს მოიაზრებს (სურათი 1).



სურათი 1. კონსტრუქციის ანალიზის ეტაპები და მასშტაბები

თანამედროვე სამშენებლო მეცნიერება და არა მარტო, იკვლევს კონსტრუქციების ანალიზის ოპტიმალურ ხერხებს, ასევე განსხვავებულ მასალებს რათა კონსტრუქციამ დააკმაყოფილოს მისთვის წაყენებული მოთხოვნები. ერთ-ერთი

მნიშვნელოვან მოთხოვნას წარმოადგენს მინიმალური მასა, რომელიც სხვადასხვა მასალების და თხელკედლიანი კონსტრუქციების გამოყენებით მიიღწევა. სწორედ ამიტომ შემუშავდა რიცხვითი და ანალიზური მეთოდები, რომლებიც ყოველდღიურად იხვეწება.

პირველ თავში წარმოდგენილია სასრულ-ელემენტთა მეთოდში გამოყენებული ელემენტების ფორმულირების თეორიები და მათი გამოყენების უპირატესობები. ასევე ორთოტროპული მასალების მახასიათებლები და მათი გამოყენება მშენებლობაში.

ლიტერატურის მიმოხილვაში გადმოცემული მეთოდოლოგიებიდან ყველაზე ოპტიმალურია მასშტაბების ჰომოგენიზაცია რომელიც იწყება განსხვავებული ფენების მიკრო ზონით, კერძოდ არმატურა-მატრიცის ურთიერთქმედებით და ჰომოგენიზაციის მეთოდით ინაცვლებს მაკრო მასშტაბისკენ ანუ ერთიან კონსტრუქციისაკენ. განსაკუთრებით დიდი ყურადღება ეთმობა მეზო დონეს ანუ ფენების მექანიკას, რადგან კონსტრუქციის ანალიზის დროს ყველაზე ხშირად სწორედ ამ ეტაპის ცვლილება ხდება. ვინაიდან სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში საკმაოდ დიდი დრო იხარჯება თითოეულ იტერაციაზე აუცილებელია ანალიტიკური მეთოდის შექმნა რომელიც კონცენტრირებულ ძაბვებს დაიანგარიშებს პირველადი მიახლოებით. ეს მეთოდი გადმოცემულია დისერტაციის მეორე თავში.

პირველ თავში ასევე მიმოხილულია სასრულ ელემენტთა მეთოდი და ფირფიტებისა და გარსებისათვის განკუთვნილი ელემენტის შედგენის თეორიები, რომლებიც გამოიყენება თანამედროვე პროგრამულ პაკეტებში.

განხილულია კომპოზიტური მასალების რღვევის კრიტერიუმები. კომპოზიტური მასალისგან დამზადებული კონსტრუქციების უპირატესობა მათი ეფექტურობა და უსაფრთხოებაა. სწორედ ამიტომ, შემოტანილია შესაბამისი რღვევის კრიტერიუმები, რომლებიც ცალკეულ კომპონენტებს შეესაბამება. იზოტროპული მასალის რღვევის შემდეგი კრიტერიუმებია ცნობილი: მაქსიმალური ნორმალური ძაბვა (რანკინი), მაქსიმალური მხები ძაბვა (ტრესკა), მაქსიმალური ნორმალური დეფორმაცია (ვენანტი) და მაქსიმალური დეფორმაციის

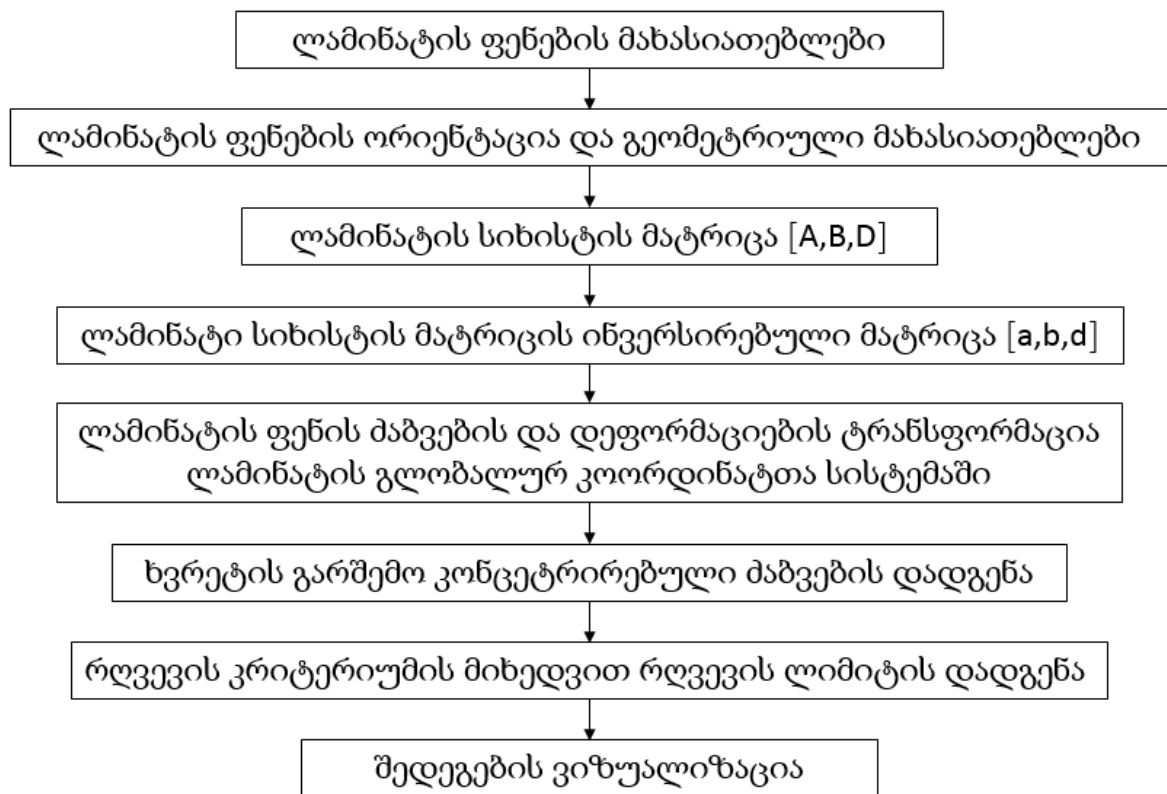
თეორია (ვონ-მისე). ზემოთ ჩამოთვლილი კრიტერიუმები არ არის მორგებული ანიზოტროპული მასალებისთვის, რომელიც დამოკიდებულია ბოჭკოს მიმართულეობაზე.

თხელკედლიანი კონსტრუქციების ანგარიშის პრობლემებზე განსაკუთრებული წვლილი შეიტანს მეცნიერებმა: ვ. ვლასოვმა, ს. ტიმოშენკომ, ა. გუზმა, ჰ. ალტენბახმა, დ. ვაჯარმა, ა. ბედნიარციკმა, ნ. ფეიტომ, დ. გეიმ, ა. გოშმა, დ. ჩაკვაროვტიმ, ი. გუზმა, ჰ. ჯიანგმა, ი. რენმა, ზ. ლიუმ, შ. ჟენგმა, ი. ვენგმა, ი. კატილიმ, ი. მაკნუმმა, ბ. მიხაილოვმა, რეისნერმა, ჯ. ბიჭიაშვილმა, ზ. გედენიძემ, დ. გიორხელიძემ, ი. კაკუტაშვილმა, გ. ყიფიანმა, თ. ხმელიძემ, დ. გურგენიძემ, ნ. მარდალეიშვილმა, ბ. გეროფმა, დ. რეზვიჩმა, მ. ჰეიდარ-რანარმა და სხვებმა.

პირველ თავში გადმოცემული ლიტერატურის მიმოხილვიდან შესაძლებელია შემდეგი დასკვნების გაკეთება:

- კონსტრუქციაში შემავალი დეტალების და მათი მიკრო-მაკრო ანალიზი საკმაოდ დიდ დროსთან და მატერიალურ ხარჯებთანაა დაკავშირებული;
- ტრადიციული ანგარიშის მეთოდები კონსტრუქციის თუ მასში შემავალი ელემენტების სივრცეში დეფორმაციას არ ითვალისწინებს;
- საჭიროა სხვადასხვა ორთოტროპული მასალებისგან შემდგარი მასალის მექანიკური მახასიათებლების დადგენა ძვირადღირებული პროგრამის გარეშე;
- საჭიროა დამატებით ანალიზური ხელსაწყოს შექმნა, რომელიც უზრუნველყოფს რიცხვითი მოდელების (ამ შემთხვევაში სასრულ ელემენტთა მეთოდის) ანალიზის შემცირებას.

მეორე თავში შედგენილია სხვადასხვა ორთოტროპული მასალისგან დამზადებული ლამინატის სიხისტის მატრიცის მაგენირებელი კოდი, რომელიც ასევე ითვლის ფენებს შორის ძაბვების გადანაწილებას როგორც არა კონცენტრირებულ სექციებში, ასევე ხვრეტების მიმდებარედ ძაბვათა კონცენტრირებულ სექციებში. კოდი დაწერილია PYTHON-ში (სურათი 2). კვლევის შედეგად დადგინდა ორთოტროპული, ხვრეტის ფირფიტის კონცენტრირებული ძაბვების პარამეტრული ფორმულა, რომელიც ინტეგრირებულია კოდში. კოდის რეზულტატები წარმოდგენილია სურათი 7-ში.



სურათი 2. ლამინატის ანალიზის კოდის ბლოკ დიაგრამა

კოდში გამოყენებულია ჰუკის კანონი, ორთოტროპული მასალებისათვის:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & 0 & 0 & 0 \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & 0 & 0 & 0 \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix}$$

სადაც σ -ძაბვა ε -დეფორმაცია, E-იუნგის მოდული, G-ძვრის მოდული

უნდა აღინიშნოს, რომ სიხისტის მატრიცის კოორდინატთა სისტემა ემთხვევა მასალის კოორდინატთა სისტემას. თუმცა პრაქტიკული გამოცდილებიდან ჰუკის კანონი გამოიყენება მხოლოდ 2 განზომილებიანი სიხისტის მატრიცისთვის:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

ხოლო შებრუნებული მატრიცა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{pmatrix}$$

სადაც Q და S, სიხისტის და შებრუნებული სიხისტის მატრიცებია.

დამოკიდებულება სიხისტის მატრიცის კომპონენტებსა და შებრუნებული მატრიცის კომპონენტებს შორის წარმოდგენილია შემდეგი ფორმულების სახით:

$$Q_{11} = \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}, Q_{22} = \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}, Q_{12} = \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}, Q_{66} = \frac{1}{S_{66}}$$

შედეგად მიღებული ორთოტროპული ფენის სიხისტე გამოისახება შემდეგი ფორმულებით:

$$E_L = \frac{Q_{11}Q_{22} - Q_{12}^2}{Q_{22}}, \mu_{LT} = \mu_{TL} = \frac{Q_{12}}{Q_{22}}, E_T = \frac{Q_{11}Q_{22} - Q_{12}^2}{Q_{11}}, G_{LT} = Q_{66}$$

μ -პუასონის კოეფიციენტი შესაბამისი მიმართულებით. სიხისტის მატრიცის 4 კომპონენტი იღებს შემდეგ სახეს:

$$Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \mu_{LT}\mu_{TL}}, Q_{22} = \frac{E_T}{1 - \mu_{LT}\mu_{TL}}, Q_{12} = \frac{\mu_{LT}E_T}{1 - \mu_{LT}\mu_{TL}}, Q_{66} = G_{LT}$$

აქედან გამომდინარე ფენის სიხისტის მატრიცა იღებს შემდეგ სახეს:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})} & \frac{\mu_{21}E_1}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})} & 0 \\ \frac{\mu_{12}E_2}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})} & \frac{E_2}{(1 - \mu_{12}\mu_{21})} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}, \quad \mu_{12} = \frac{E_2}{E_1}$$

სამ განზომილებიანი პრობლემისთვის აღნიშნული სიხისტის მატრიცა იღებს შემდეგ სახეს:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1 - \mu_{23}\mu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\mu_{21} - \mu_{31}\mu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\mu_{31} - \mu_{21}\mu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_{12} - \mu_{32}\mu_{12}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{1 - \mu_{13}\mu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{\mu_{32} - \mu_{12}\mu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu_{21} - \mu_{31}\mu_{23}}{E_1 E_2 \Delta} & \frac{\mu_{23} - \mu_{21}\mu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{1 - \mu_{12}\mu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}$$

$$\text{სადაც } \Delta = \frac{1 - \mu_{12}\mu_{21} - \mu_{23}\mu_{32} - \mu_{13}\mu_{31} - 2\mu_{21}\mu_{32}\mu_{31}}{E_1 E_2 E_3}$$

ხოლო შესაბამისობის მატრიცა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$S = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\mu_{21}/E_2 & -\mu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\mu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu_{13}/E_1 & -\mu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

ჰუკის კანონს რომ დავუბრუნდეთ, განტოლება შეიძლება გადაიწეროს:

$$E = \sigma \varepsilon$$

$$T \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = Q \cdot T^{T^{-1}} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = T^{-1} \cdot Q \cdot T^{T^{-1}} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \bar{Q} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix}$$

შემდეგი ცხრილი 1 განსაზღვრავს ტრანსფორმაციის განტოლებებს, რომლებიც გამოიყენება ლამინატის კოორდინატთა სისტემაში ლამინატის სიხისტის მატრიცის გამოსათვლელად მასალის სიხისტის მატრიციდან.

ლამინატი/მასალა	Q_{11}	Q_{22}	Q_{12}	Q_{66}
Q_{xx}	m^4	n^4	$2m^2n^2$	$4m^2n^2$
Q_{yy}	n^4	m^4	$2m^2n^2$	$4m^2n^2$
Q_{xy}	m^2n^2	m^2n^2	$m^4 + n^4$	$-4m^2n^2$
Q_{ss}	m^2n^2	m^2n^2	$-2m^2n^2$	$(m^2 - n^2)^2$
Q_{xs}	m^3n	$-mn^3$	mn^3 $-m^3n$	$2(mn^3 - m^3n)$
Q_{ys}	mn^3	$-m^3n$	m^3n $-mn^3$	$2(m^3n - mn^3)$
$m = \cos\alpha, n = \sin\alpha$	α კუთხე წარმოადგენს საათის მოძრაობის საპირისპირო მიმართულებას			

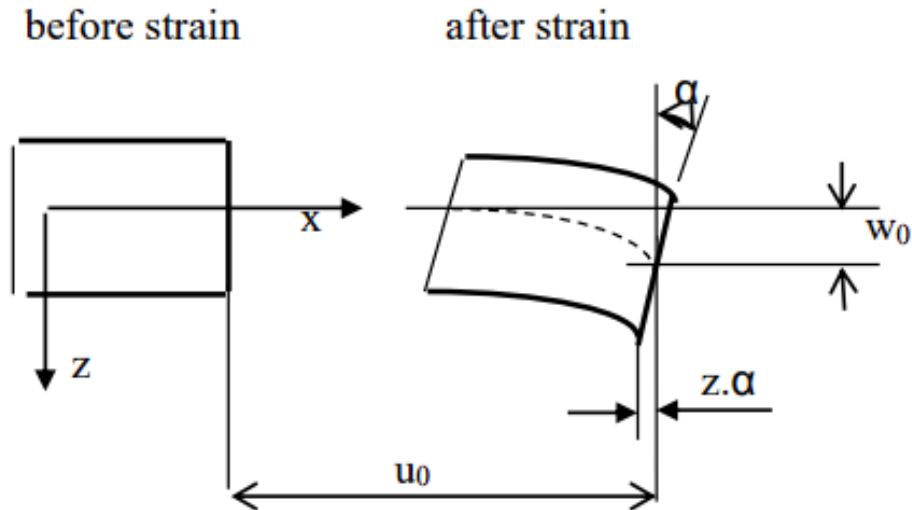
ცხრილი 1. სიხისტის მატრიცის ტრანსფორმაციის განტოლებები.

ლამინატი/მასალა	S_{11}	S_{22}	S_{12}	S_{66}
S_{xx}	m^4	n^4	$2m^2n^2$	m^2n^2
S_{yy}	n^4	m^4	$2m^2n^2$	m^2n^2
S_{xy}	m^2n^2	m^2n^2	$m^4 + n^4$	$-m^2n^2$
S_{ss}	$4m^2n^2$	m^2n^2	$-8m^2n^2$	$(m^2 - n^2)^2$
S_{xs}	$2m^3n$	$-2mn^3$	$2(mn^3 - m^3n)$	$(mn^3 - m^3n)$
S_{ys}	$2mn^3$	$-2m^3n$	$2(m^3n - mn^3)$	$(m^3n - mn^3)$
$m = \cos\alpha, n = \sin\alpha$	α კუთხე წარმოადგენს საათის მოძრაობის საპირისპირო მიმართულებას			

ცხრილი 2. სიხისტის ინვერსირებული მატრიცის ტრანსფორმაციის განტოლებები.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = T^T \cdot S \cdot T \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \bar{S} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

ლამინატის სიხისტისა და შესაბამისობის მატრიცები გამოიყენება ლამინატის ქცევის დასახასიათებლად სივრცეში. ამისათვის ლამინატი მიიჩნევა ერთ სრულ კომპონენტად, რომლის ცალკეულ ფენებს არ შეუძლიათ ერთი მეორის მიმართ გასრიალება ასევე თითოეული ფენის გრძივი და განივი ფენების დეფორმაცია ერთი და იგივეა.



სურათი 3. ლამინატის ღუნვა

ვთქვათ ლამინატი დეფორმირდება x-z სიბრტყეში, სადაც x ღერძი არის შუა ფენის მიმართულება ხოლო z ამ ფენის მართობული ღერძი (სურათი 3), შესაბამისად გადაადგილებები იქნება:

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

$$v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y}$$

თუ z მიმართულებით დაძაბულობას გამოვრიცხავთ მივიღებთ:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}$$

რომელიც შეიძლება ჩაიწეროს მატრიცის სახით, როგორც შუა ფენის დაძაბვისა და გამრუდების ჯამი:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}$$

ეს განტოლებები აჩვენებს, რომ დაძაბულობა ნაწილდება წრფივად სისქეში. ძაბვა მოცემულ ფენაში გამოითვლება ჰუკის კანონის გამოყენებით, სადაც:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{pmatrix}_k \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{pmatrix}_k \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}$$

შესაძლებელია დაძაბულობის განაწილების დადგენა სისქეში ლამინატის თითოეულ ფენაში ძაბვის გაანგარიშებით. დაძაბულობის განაწილება სისქეში, როგორც წესი, არ არის წრფივი, როგორც დაძაბვის შემთხვევაში (სურათი 4). დაძაბულობის შეწყვეტა ხდება ცალკეულ ფენებს შორის, დაძაბულობის გრადიენტი მიმდებარე ფენებში ასევე შეიძლება განსხვავდებოდეს. ამიტომ სასურველია ვიმუშაოთ გამარტივებულ ცვლადებთან, ანუ ლაინერის ძალებთან (ნაკადებთან) და მომენტებთან (სურათი 5), რომლებიც მოქმედებს განივი მონაკვეთზე და (1) განსაზღვრებით.



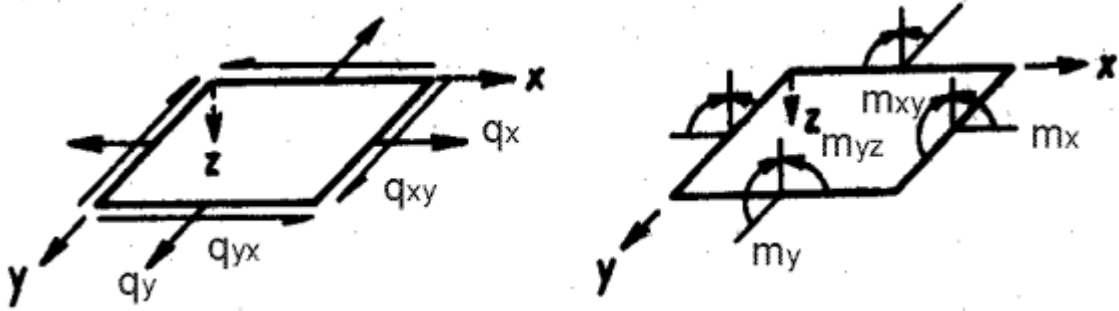
სურათი 4. ჰიპოთეზური ძაბვის და დაძაბულობის განაწილება სისქეში

$$q_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \quad m_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz$$

$$q_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \quad m_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz$$

(1)

$$q_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz \quad m_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz$$



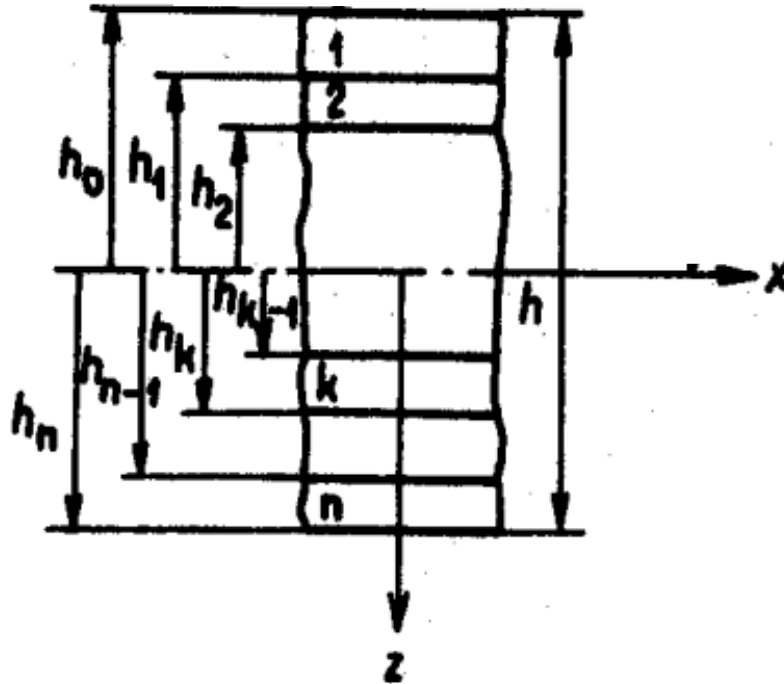
სურათი 5. ძალების და მომენტების დადებითი მიმართულებები

ვივარაუდოთ, რომ ლამინატი აგებულია n რაოდენობის ორთოტროპული ფენებისგან, გამოიყენება შემდეგი დამოკიდებულება:

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix}_k \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix}_k \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} z dz \right\}$$

$$\begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix}_k \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} z dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{pmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{pmatrix}_k \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} z^2 dz \right\}$$

ეს განტოლებები გამარტივებულია ახალი მატრიცების განსაზღვრით, რომელთა კომპონენტებისთვის გამოიყენება შემდეგი:



სურათი 6. ლამინატის გეომეტრიული სტრუქტურა

განტოლებები შეიძლება გამოისახოს შემდეგი სახით, სადაც საწყისი ლამინატის სიხისტის მატრიცის A, B, D ქვემატრიცების კომპონენტები გამოისახება:

$$\begin{pmatrix} q \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ B & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{pmatrix}$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1})$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2)$$

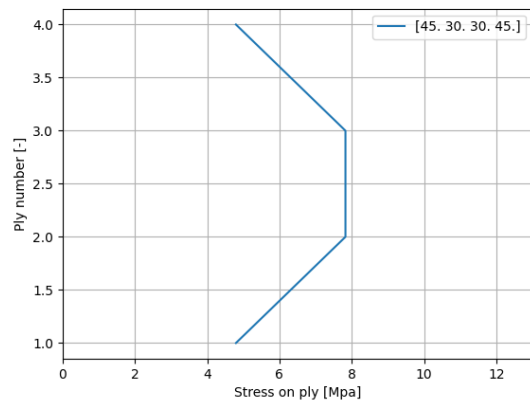
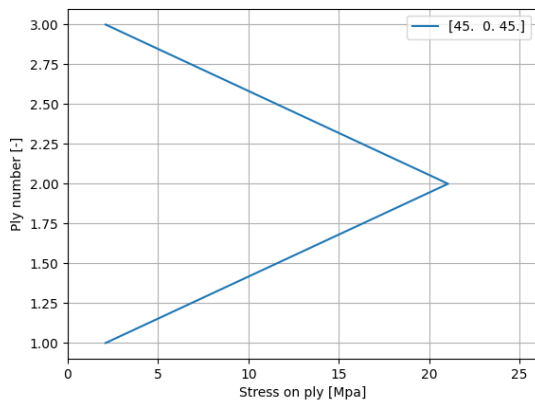
$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3)$$

კვლევებმა აჩვენა რომ ზემოთ მოცემული კოდის მოდიფიკაციით შესაძლებელია კონცენტრირებული დაბევის პირველადი მიახლოებით ანგარიში ორთოტროპული ფენოვანი ფირფიტებისათვის. კოდს ემატება შემდეგი განტოლება:

$$k_t = 3 + \frac{E_1}{E_2} \text{mod}(3) - 3.14 \left(\frac{d}{W}\right) + 3.667 \left(\frac{d}{W}\right)^2 - 1.527 \left(\frac{d}{W}\right)^3$$

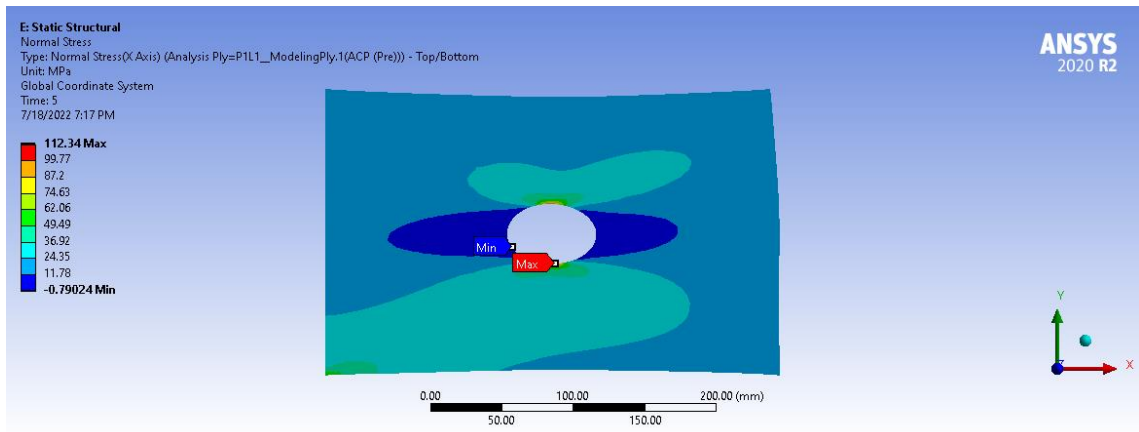
მეორე თავში წარმოდგენილი შედეგების საფუძველზე შეიძლება შემდეგი დასკვნების გაკეთება:

- PYTHON-ში დაწერილი კოდი შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას, პირველადი ანგარიშისათვის.
- ჩატარებული გამოცდის პროცედურა აუცილებელია ლამინატის მასალის მახასიათებლების დასადგენად რათა, მისგან მიღებული შედეგები გამოყენებულ იქნას როგორც კომპლექსური რიცხვითი მოდელის ანალიზისათვის ასევე ანალიზური მეთოდის ვერიფიკაციისათვის.



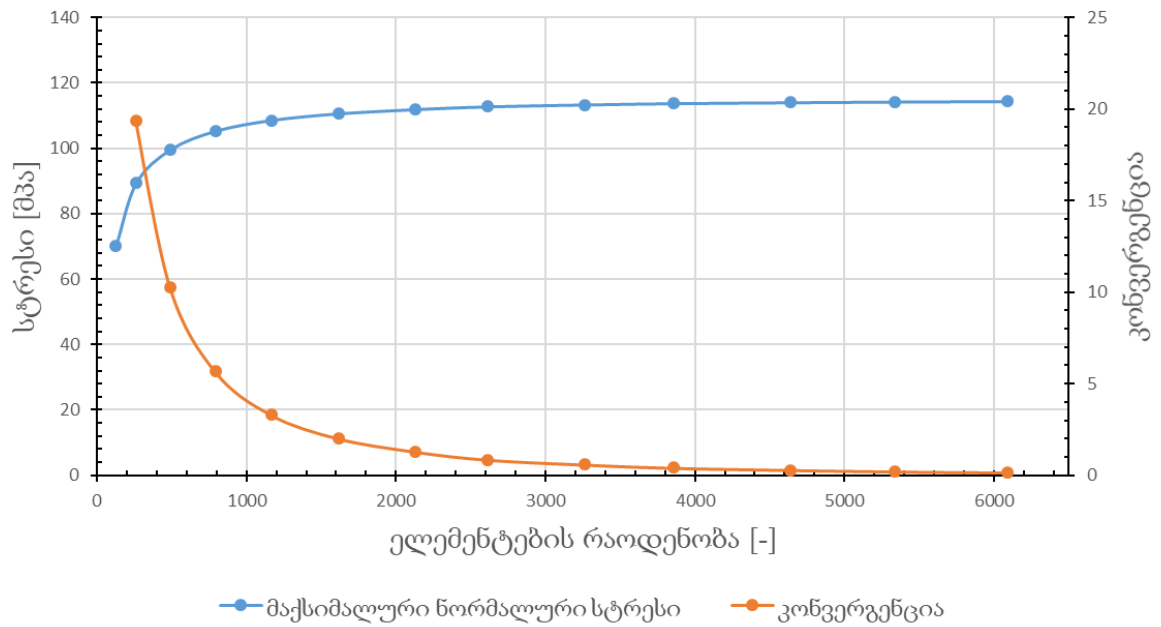
სურათი 7. კოდით მიღებული შედეგები

ნაშრომის მესამე თავში დადგენილია სასრულ ელემენტთა მეთოდის პროგრამულ პაკეტში ხვრეტის ირგვლივ მინიმალური ელემენტების რაოდენობა და ელემენტის ტიპი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მინიმალური ელემენტების ხარჯზე, მაქსიმალური სიზუსტით ანგარიშს (სურათი 8, სურათი 9, სურათი 10).

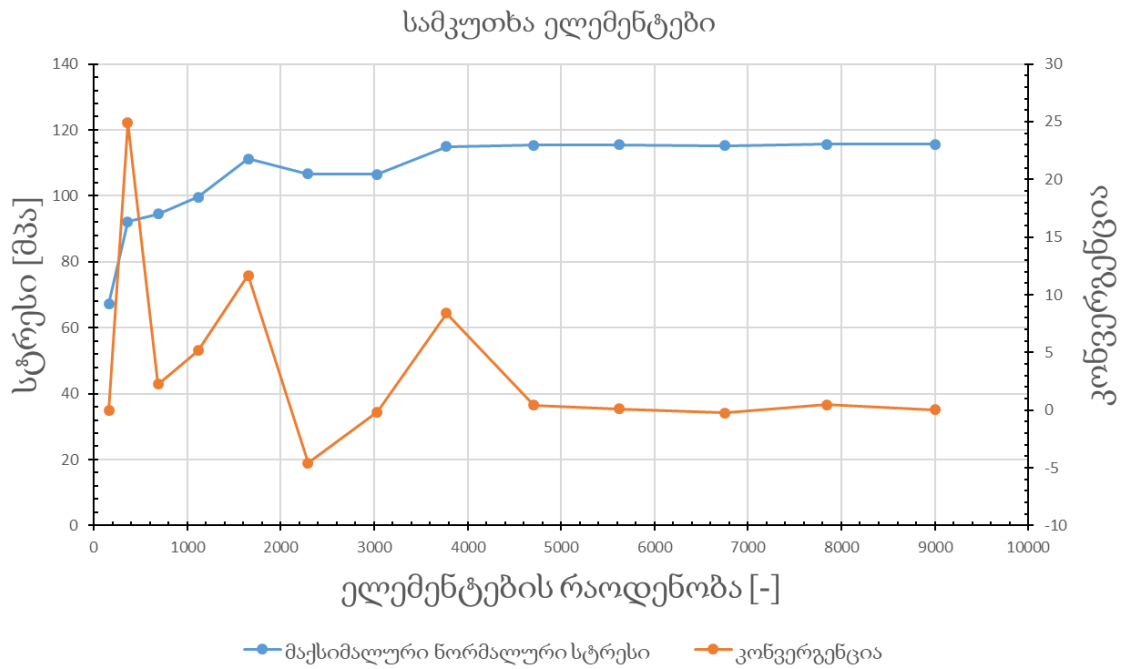


სურათი 8. პროგრამულ პაკეტ ანსისში მოდელირებული ხვრეტის ფორფიტა

ოთხკუთხა ელემენტები



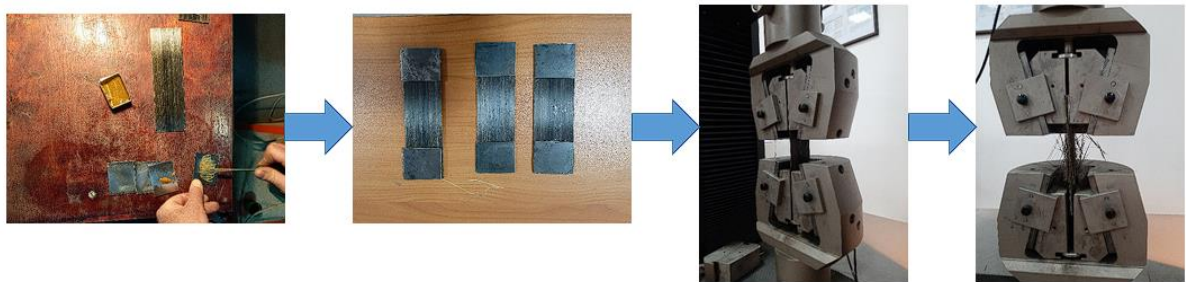
სურათი 9. ხვრეტის გარშემო გამოყენებული ოთხკუთხა ელემენტების საჭირო რაოდენობის დადგენა



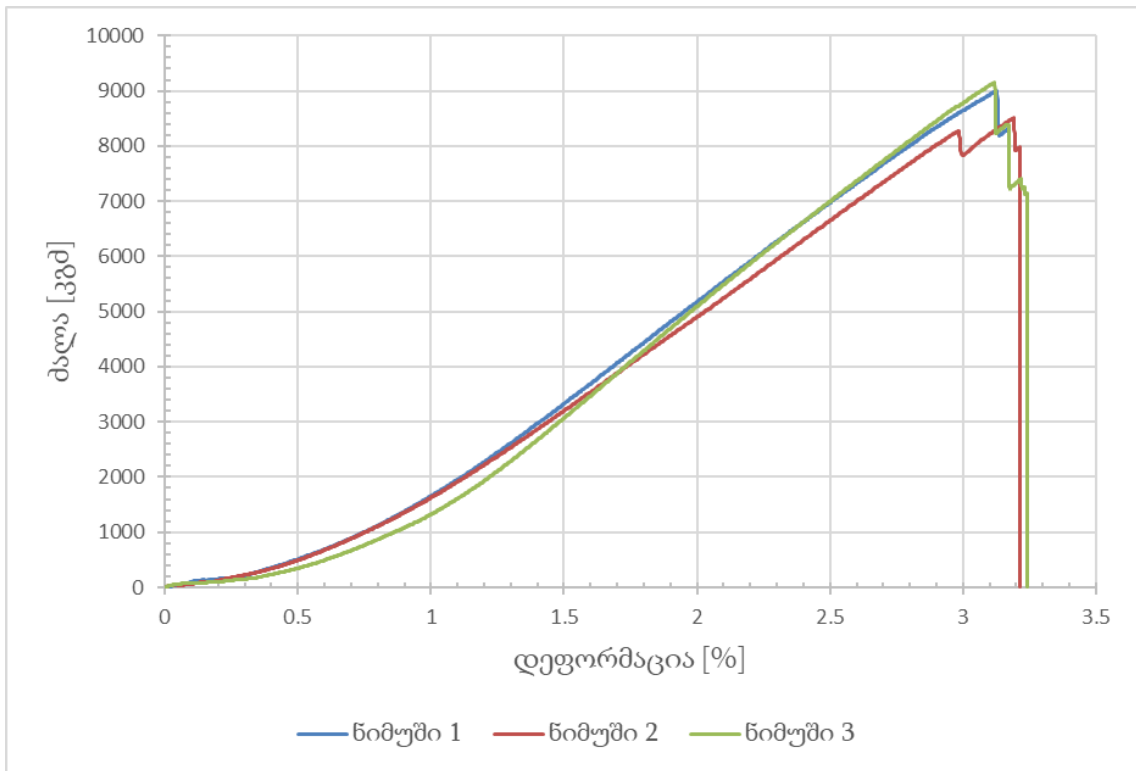
სურათი 10. ხვრეტის გარშემო გამოყენებული სამკუთხა ელემენტების საჭირო რაოდენობის დადგენა

ჩატარებულია სტატიკური გამოცდა გაჭიმვაზე სადაც ნიმუშები დამზადებული იყო ბაზალტ ბოჭკოსგან. გამოცდის პროცედურა და შედეგები წარმოდგენილია სურათი 11-სურათი 12.

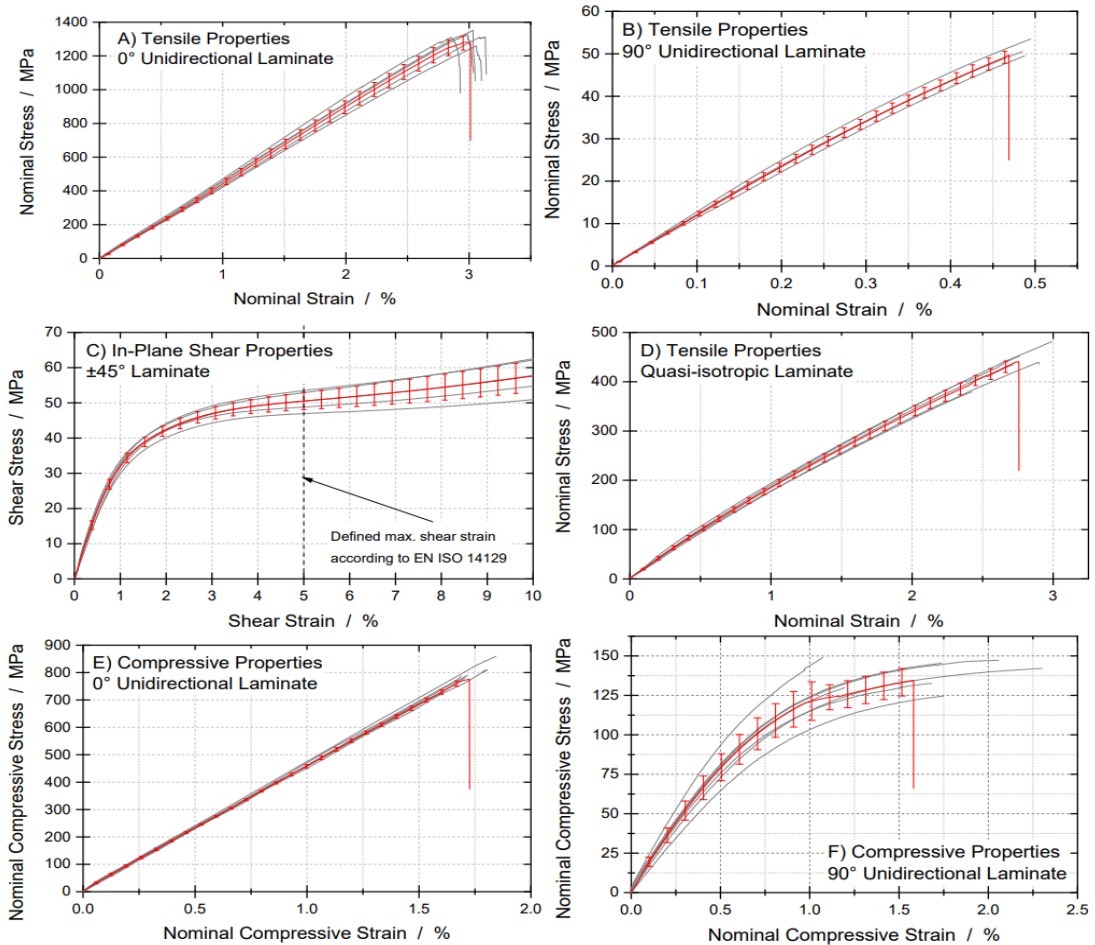
აღნიშნული გამოცდის რეზულტატები ასევე შედარებულია ერთ-ერთი ნაშრომის რეზულტატებთან, სადაც ანალოგიურ მასალაზე იყო გამოცდა ჩატარებული.



სურათი 11. ბაზალტ ლენტის სტატიკური გამოცდის პროცედურა

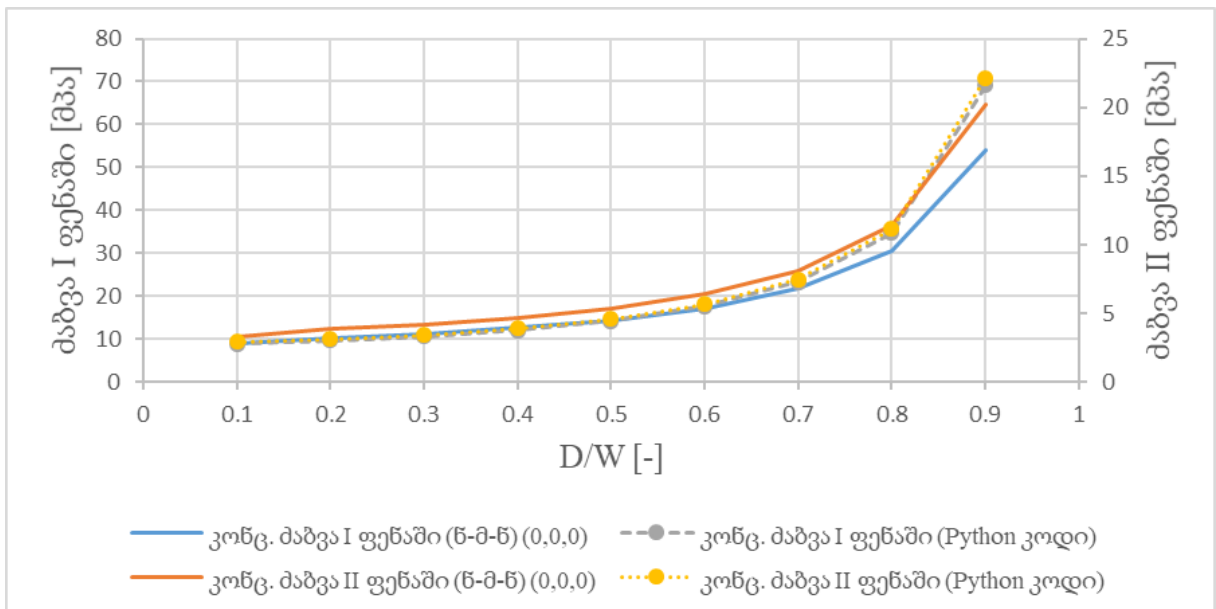


სურათი 12. სტატიკური გამოცდის შედეგები.

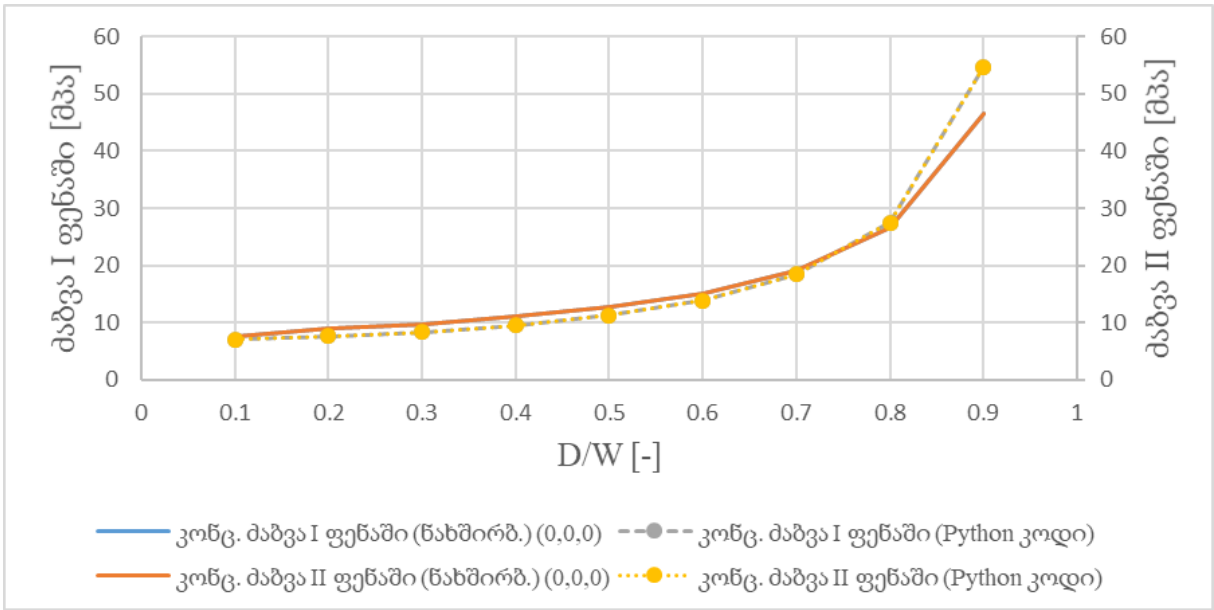


სურათი 13. Plappert, Ganzenmueller, & May-ის მიერ მიღებული შედეგები

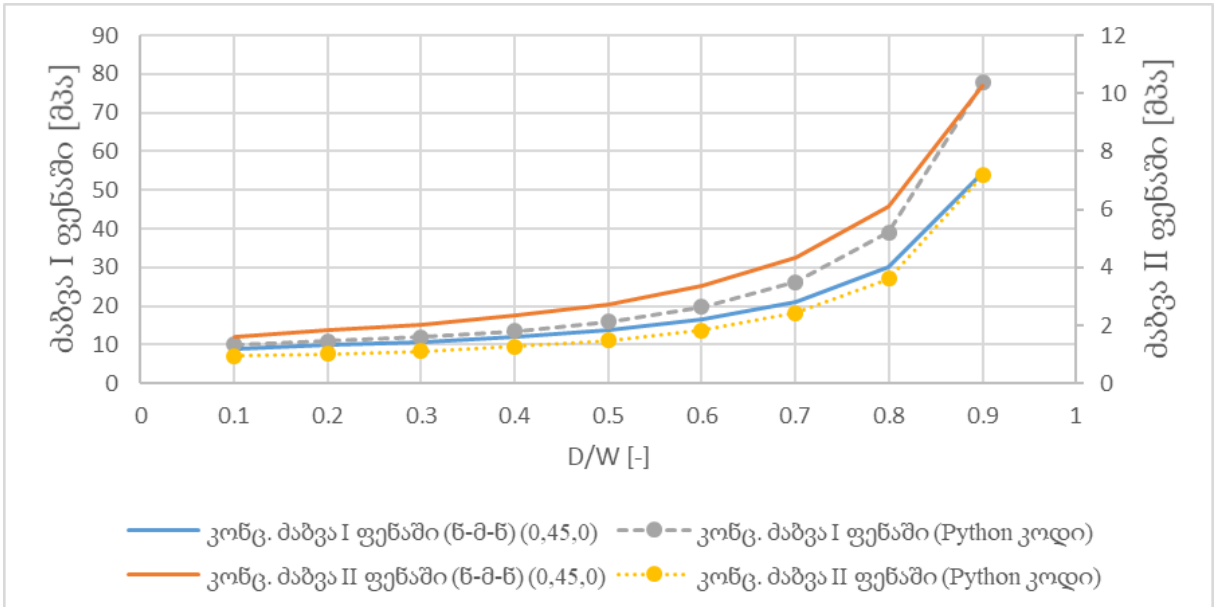
გამოცდების შედეგებით ანსის-ში შეიქმნა სპეციალური მასალის ბიბლიოთეკა და შეიქმნა ხვრეტისანი მოდელი, სადაც ცვლად პარამეტრს წარმოადგენს ნახვრეტის დიამეტრისა და წიბოს ფარდობა (სურათი 18). კოდის რეზულტატები შედარებულია პროგრამულ პაკეტ ანსის-ის რეზულტატებთან, რომლებიც წარმოდგენილია სურათი 14-სურათი 17-ებში. დადგენილია ორთოტროპული მასალებისთვის კონცენტრაციის ფაქტორის პირველადი მიახლოების ანალიზური ფორმულა, რომელიც საშუალებას იძლევა ძვირადღირებული პროგრამის გამოყენებამდე მიახლოებით განვსაზღვროთ დაბრუნება კონცენტრაციები.



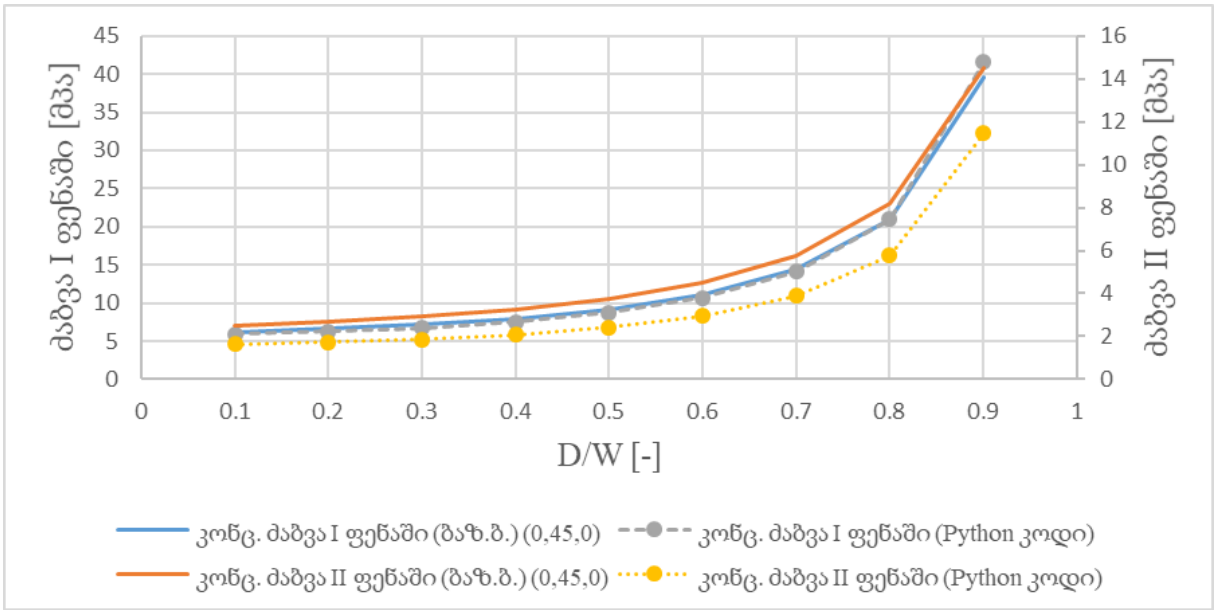
სურათი 14. კოდის რეზულტატების შედარება პროგრამულ პაკეტ ANSYS-ის რეზულტატებთან [ნ-მ-ნ] (0,0,0)



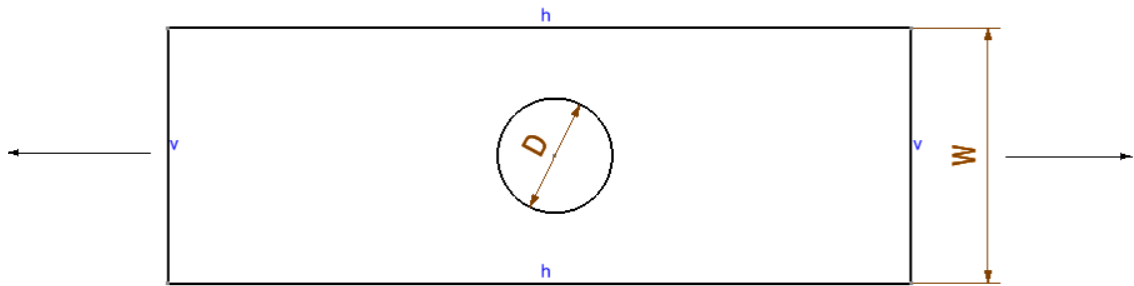
სურათი 15. კოდის რეზულტატების შედარება პროგრამულ პაკეტ ANSYS-ის რეზულტატებთან [წ-წ] (0,0,0)



სურათი 16. კოდის რეზულტატების შედარება პროგრამულ პაკეტ ANSYS-ის რეზულტატებთან [წ-მ-წ] (0,45,0)



სურათი 17. კოდის რეზულტატების შედარება პროგრამულ პაკეტ ANSYS-ის რეზულტატებთან [ბ-ბ-ბ] (0,45,0)



სურათი 18. ხვრეტიანი ფირფიტის პარამეტრული მოდელი

ძირითადი დასკვნები

ჩატარებული თეორიული, ექსპერიმენტალური და რიცხვითი კვლევების საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი დასკვნები:

- შედგენილია ხვრეტების მქონე ფენოვანი თხელკედლიანი სამშენებლო კონსტრუქციების (ფირფიტები, გარსები) გაანგარიშების ზოგადი მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია ლამინატის სიხისტის მატრიცის შედგენაზე და ითვალისწინებს ფენების რაოდენობასა და ორიენტაციას.
- მიღებულია გარსებისა და ფირფიტების სასრულ ელემენტთა მეთოდით გასაანგარიშებლად საჭირო სიხისტის მატრიცები.
- გამოკვლეულია ხვრეტებიანი ფენოვანი გარსებისა და ფირფიტების ხვრეტების პერიმეტრზე, რომელი სასრულო ელემენტის გამოყენებაა შესაძლებელი.
- წარმოდგენილია ბაზალპლასტიკური ლამინატისგან დამზადებული ფირფიტის სიმტკიცის მახასიათებლების დადგენის ექსპერიმენტალური კვლევის შედეგების ანალიზი თეორიული მონაცემების მიმართ.
- ორთოტროპული მასალებისათვის მიღებულია თხელკედლიან კონსტრუქციაში არსებული ხვრეტის გარშემო კონცენტრირებული ძაბვების გამოსათვლელი ანალიზური ფორმულა.
- ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დამუშავებულია გამოყენებითი კომპიუტერული პროგრამების პაკეტი, რომელთა რეალიზება შესაძლებელია ნებისმიერ საპროექტო და სამშენებლო კომპანიაში.

ნაშრომის აპრობაცია

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა სასწავლო პროცესში 3 კოლოკვიუმზე. ასევე:

- საქართველოს მექანიკოსთა კავშირის XII ყოველწლიური საერთაშორისო კონფერენციაზე (ქუთაისი, 2021წ);
- საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის 100 წლის იუბილესადმი მიძღვნილ, მრავალდისციპლინარული სამეცნიერო სწავლების გლობალური პრაქტიკის კონფერენციაზე (თბილისი, 2022);
- საერთაშორისო სამეცნიერო ტექნიკური კონფერენციაზე „საინჟინრო მეცნიერებების პრობლემები“ (ერევანი, 2022);
- საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე „Materials and Energy Saving Technologies Construction of Optimized Energy Potential“ (კატოვიცე, 2022);
- მე-7 სამეცნიერო საერთაშორისო კონფერენციაზე "განვითარებადი ტენდენციები ინტერდისციპლინარულ კვლევებსა და პრაქტიკაში" (ნიუ იურკი, 2022);
- II საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული სემინარზე „ევროპული ინოვაციური ტექნოლოგიები სამშენებლო და გარემოს ინჟინერიაში (თბილისი – ბელოსტოკი, 2022);
- საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ასი წლის იუბილესადმი მიძღვნილი სტუდენტთა საერთაშორისო კონფერენციაზე „ინოვაციური ტექნოლოგიები ინჟინერიაში.“ (თბილისი 2022).

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ ნაშრომებში:

1. გიორგობიანი ი. ფენოვანი თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების გაანგარიშება// სამეცნიერო-პრაქტიკული ჟურნალი „მოამბე: თბილისი 2021. 70-72 გვ.
2. გიორგობიანი ი. მრავალფენიანი გარსებისა და ფირფიტების მდგრადობა// სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა“ თბილისი 2021. 123-126 გვ.
3. Kipiani G., Beruashvili V., Giorgobiani I., STABILITY OF THIN-WALLED STRUCTURES SPATIAL FEATURES SYSTEMS WITH DISCONTINUITIES PARAMETERS, // II international scientific-practical seminar "EUROPEAN INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING“, Kutaisi, 2021.
4. გიორგობიანი ი. მრავალფენიანი ფირფიტის გაანგარიშება მდგრადობაზე.// საქართველოს მექანიკოსთა კავშირის XII ყოველწლიური საერთაშორისო კონფერენცია, ქუთაისი, 2021, 21-22 გვ.
5. გიორგობიანი ი. თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების გაანგარიშება სიმტკიცეზე სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენებით. // სამეცნიერო რეფერირებადი ჟურნალი „მეცნიერება და ტექნოლოგიები“, თბილისი, 2022, 72-79გვ.
6. Giorgobiani I. The problem of calculating shell structure with cut-outs made of various composite materials. // International scientific and technical conference “Problems of Engineering Sciences”, Yerevan, 2022. 22 p.
7. Kipiani, G., Giorgobiani, I., & Beruashvili, V. (2022). Analysis of thin-walled discrete-parameter spatial structures. International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies Dedicated to the 100th Anniversary of Georgian Technical University (pp. 225-231). Tbilisi: Science Georgia.
8. Kipiani, G., Giorgobiani, I., & Beruashvili, V. (2022). Stability Calculation of Discontinuous Parametric Layered Plate Structures. 7th International Conference on Evolving Trends in Interdisciplinary Research and Practices (pp. 301-310). New York: Institute of Economic Development and Social Research Publications.

Abstract

Multi-layered thin-walled constructions of plate and shell type are increasingly widely used in various fields of engineering. In construction, all this is caused by the necessity of high strength of constructions and significant reduction of weight. This is due to the provision of heat, sound and vibration insulation requirements.

The combination of these necessary features is ensured by the use of different types of fillers for individual layers of multi-layer constructions. Not only metals and their alloys, but also composite materials are used for bearing layers.

As a rule, fillers and composite materials are characterized by low shear stiffness, which is their negative feature. This circumstance should be taken into account in the calculation theory of multilayer shells and plates. Characteristic factors such as the influence of normal shear stresses and shear strains are neglected in many theories. But the latter is known to increase with the relative thickness of the shell and may be important when using fillers that are resistant to shear and shear stress.

In this regard, the creation of a theory of multilayer shells and plates, which fully takes into account higher-order factors and at the same time will be relatively simple, is a very urgent problem.

In our research, a stiffness matrix for multi-layered plates was studied and constructed, which is the best means of analysis for both the mentioned and different classes of problems. In our research, we limited ourselves to thin-walled spatial systems, flat rectangular and triangular elements.

The project mainly uses a mixed-type finite element model, the use of which was determined by the simplicity of the model and its high accuracy.

The methodology for calculating the strength of layered flat elements with holes is still insufficiently developed. In this regard, using layered thin-walled spatial constructions with holes is quite difficult, relevant and requires the development of a special method of calculation.

The method of compiling the matrix of laminate stiffness in the case of different material layers and orientations, the method of its simplification in special cases, in the conditions of non-linear deformation, for the calculation of layered thin-walled constructions with holes were discussed.

The problem of determining the critical working load for three-layer plates made with holes was solved using the theory of thin plates and the theory of generalized functions.

The stiffness matrices of the finite element method for shells and plates were obtained, taking into account transverse displacement.

A special methodology for the numerical investigation of problems of the strength of thin-walled spatial constructions with holes was developed in the case of normal and lateral forces acting on the contour, as well as local impact of bending forces.

A package of application programs compiled on the basis of the developed method can be used in design organizations and construction companies.

An experiment was conducted on the strength of the plate where the fibers are ribbons of basaltoplastic laminate. Analysis of theoretical studies, calculations and experimental results was presented.