



საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტი
1922 წლიდან

ვასილი ბერუაშვილი

ღუნვადი მართკუთხა წიბოების მქონე

სივრცითი კონსტრუქციების კვლევა ოპტიმიზაციის
მეთოდებით

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0732

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი, 0160, საქართველო

2023წ

საავტორო უფლება ©2023წელი, ვასილი ბერუაშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2023

ფაკულტეტი სამშენებლო

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ვასილი ბერუაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: **ღუნვადი მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცითი კონსტრუქციების კვლევა ოპტიმიზაციის მეთოდებით და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.**

13, ივლისი 2023 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

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

რეცენზენტი: პროფესორი ბადრი გვასალია

რეცენზენტი: ტმკ. ჯონი გიგინეიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2023 წ

ავტორი: ვასილი ბერუაშვილი

დასახელება: ღუნვადი მართკუთხა წიბოების მქონე

სივრცითი კონსტრუქციების კვლევა ოპტიმიზაციის მეთოდებით

სადოქტორო პროგრამა: მშენებლობა

ხარისხი: დოქტორის აკადემიური ხარისხი

მისანიჭებელი კვალიფიკაცია: მშენებლობის ინჟინერიის დოქტორი

სხდომა ჩატარდა _____

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა _____

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის დაარც მისიცალკეულიკომპონენტებისგადაბეჭდვა ან სხვარაიმე მეთოდითრეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

თხელკედლიანი სივრცული კონსტრუქციები, ფილებისა და გარსების სახით ფართოდ გამოიყენება მშენებლობაში. თხელკედლიანი წყვეტილ პარამეტრებიანი, მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცითი კონსტრუქციების ეფექტურობის ამაღლება დაკავშირებულია ახალი საანგარიშო სქემებისა და გამოთვლების მეთოდების დახვეწასთან. ცნობილია, რომ ყოველი კონსტრუქციის გამოკვლევა ემყარება გარკვეულ გამარტივებებს, ოპტიმიზაციას, რომელიც ეხება როგორც გადაადგილებების, ასევე დეფორმაციის, ჩაღუნვის სიდიდეებს. მათ შორის დამოკიდებულებას, ძაბვების განაწილების კანონს, სიხისტეს, დატვირთვის მოქმედებას და სხვა. კონსტრუქციის მუშაობის რეალური პირობების გათვალისწინება მოითხოვს აღნიშნული გამარტივებების კრიტიკულ შეფასებას და ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში თუ ეს აუცილებელია მათ სრულყოფას.

თხელკედლიანი მართკუთხა წიბოების მქონე კონსტრუქციები ხშირად განიცდიან ისეთი დატვირთვების ქმედებას, რომლის დროსაც გადაადგილებები აღმოჩნდებიან სისქის თანაზომადი და გაანგარიშების წრფივი თეორია ვეღარ აკმაყოფილებს ნაგებობებისადმი წაყენებულ მოთხოვნების უზრუნველყოფას. მრეწველობის და მშენებლობის შემდგომი განვითარება განაპირობებს და აქტუალურს ხდის ახალი კონსტრუქციების შექმნას, რომლებიც მიიღება ფილებისა და გარსების, ცალკეული პანელების ერთმანეთთან სახსრულად ან ხისტად გარკვეული კუთხით შეერთების გზით. ასეთ კონსტრუქციაში გვექნება შუა ზედაპირის გარდატეხა. ცალკეული პანელების მდორედ და სახსრულად შეერთების შემთხვევაში გარდატეხას მივიღებთ დეფორმაციის პროცესში, ხოლო კუთხით შეერთების შემთხვევაში გვექნება დეფორმაციამდეც. ასეთი კონსტრუქციები წარმოადგენენ რთული ზედაპირის მქონე სამშენებლო სტრუქტურებს, ვინაიდან მათი კვეთი ცვალებადია აქტუალური ხდება იზოპარამეტრული სასრული ელემენტების გამოყენება როგორც სიმტკიცეზე გაანგარიშებისათვის ასევე მათი ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციისათვის.

შემუშავებულია ალგორითმი, რომელიც საშუალებას იძლევა მარტივი ოპერაციებით მოვახდინოთ ძელების ოპტიმალური სქემის დაპროექტება, ალგორითმი დაფუძნებულია სასრულ ელემენტთა მეთოდზე, რაც თავის მხრივ ოპტიმიზაციის გარდა, იძლევა სიმტკიცეზე ანგარიშის საშუალებას.

შედეგების შესამოწმებლად მიღებული შედეგები შედარებულია კომერციულად ხელმისაწვდომ პროგრამულ პაკეტს და ასევე, ჩატარებულია რეალური ექსპერიმენტი.

Abstract

Thin-walled spatial constructions in the form of slabs and shells are widely used in civil construction. Increasing the efficiency of spatial constructions with thin-walled discrete parameters, rectangular ribs is connected with the refinement of new calculation schemes and calculation methods. It is known that the investigation of each construction is based on certain simplifications, optimizations, which refer to both displacements and deformation, bending values. including dependence, stress distribution law, stiffness, load action and others. Considering the real working conditions of the construction requires a critical assessment of the mentioned simplifications and in each specific case, if necessary, their improvement.

Constructions with thin-walled rectangular beams are often subjected to such loads that the displacements are proportional to the thickness and the linear calculation theory can no longer meet the requirements for the constructions. The use of low-modulus materials calls into question the theoretical requirement of infinite shear stiffness in mid-surface driving planes. The further development of industry and construction leads to and makes relevant the creation of new constructions, which are obtained by connecting individual panels of tiles and shells to each other manually or rigidly at a certain angle. In such a construction, we will have a mid-surface refraction. If separate panels are joined in a straight line, we will get a break in the deboring process, and if they are joined at an angle, we will have deformation. Such constructions introduce pair parameters and their calculation needs to be done using discontinuous functions.

An algorithm has been developed that allows us to make the optimal planning of the poles with simple operations, the algorithm is based on the finite element method, which in turn, in addition to optimization, allows to calculate the strength.

To verify the results, the desired results are compared with a commercially available software package, and a real experiment is also conducted.

შინაარსი

სურათების ნუსხა.....	8
ცხრილების ნუსხა	10
შესავალი.....	12
პროექტის ღირებულება და მნიშვნელობა, კვლევითი თემის/საკითხის აქტუალობა, კვლევის სიახლე	12
კვლევის მეთოდოლოგია	17
1. ლიტერატურის მიმოხილვა	17
1.1 სივრცითი კონსტრუქციები	17
1.2 დიდი გაქანის მქონე სივრცული კონსტრუქციები	21
1.3 გადასახური ფილები	22
1.4 კონსტრუქციები მკვეთრად გამოყოფილი ტეხილებით (ნაკვეციებით)	24
1.5 ცილინდრული გარსული კონსტრუქციები	28
1.6 თაღიანი კონსტრუქციები	32
2. ძირითადი ნაწილი	34
სამშენებლო კონსტრუქციებში გამოყენებული სივრცითი კონსტრუქციები	34
2.2 გარსები მაღალი სიხისტით	34
2.3 ჯვარედინი თაღები.....	35
2.4 დადებითი სიმრუდის გარსები	37
2.5 უარყოფითი სიმრუდის გარსები.....	39
2.6 ქოლგისებრი გარსები	42
2.7 გუმბათები	42
2.8 რეგულარული სისტემების სტრუქტურები	45
2.9 იზოპარამეტრული ელემენტები სასრულ ელემენტთა მეთოდში	54
2.10 მაღალი რიგის იზოპარამეტრული ელემენტები	62
2.11 სასრულ ელემენტთა გამოყენებით სხეულის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია	63
2.12 რეალური მოდელის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია.....	65
2.13 ძელის ოპტიმიზაცია.....	65
2.14 MatLab_ის პროგრამა ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციისათვის.....	66
2.15 ParetoCloudBeamDesign პროგრამის გამოყენება ძელის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციისათვის.....	82
3. ჩატარებული კვლევის შედეგები და მათი განსჯა	84

<i>3.1 ექსპერიმენტი.....</i>	<i>85</i>
<i>3.2 არაოპტიმიზირებული ძელის (ეტალონი) ნიმუშის გამოცდა</i>	<i>86</i>
<i>3.3 MATLAB პენალტიზაციით ოპტიმიზირებული ძელის გამოცდა.....</i>	<i>89</i>
<i>3.4 MATLAB არა-პენალტიზირებული ძელის გამოცდა.....</i>	<i>90</i>
<i>3.5 ParetoCloud ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელის გამოცდა.....</i>	<i>92</i>
ძირითადი დასკვნები	95
გამოყენებული ლიტერატურა	96

სურათების ნუსხა

სურათი 1. გადახურვის საყრდენი ფერმის ტიპები.....	12
სურათი 2. თხელკედლიანი სივრცითი სტრუქტურის მოდელი.....	12
სურათი 3. გუმბათი	20
სურათი 4. თაღოვანი სივრცითი კონსტრუქცია	20
სურათი 5. ბრტყელი სივრცითი კონსტრუქცია	20
სურათი 6. მართკუთხა წიბოების მქონე რთული ზედაპირის მქონე სივრცითი კონსტრუქცია.....	21
სურათი 7. რკინაბეტონის გადახურვის ფილა.	23
სურათი 8. რკინაბეტონის გადახურვის მონტაჟის სქემა საცხოვრებელ კორპუსში.	24
სურათი 9. ტეხილი სტრუქტურებისგან შედგენილი კონსტრუქციები.....	25
სურათი 10. იუნესკოს კომპლექსი ქ. პარიზი.....	27
სურათი 11. იუნესკოს კომპლექსის კონგრესის დარბაზი	27
სურათი 12. მოკლე ცილინდრული გარსების ტიპის პრიზმული კონსტრუქციები	30
სურათი 13. A — საბორტო ელემენტებით; B — საბორტო ელემენტების გარეშე; 1-ფერმა-დიაფრაგმა; 2 - ფირფიტა; 3 — დაფის ელემენტი;	31
სურათი 14. მრეწველობისა და ტექნოლოგიების ეროვნული ცენტრი ქ. პარიზი	36
სურათი 15. ტიპური დადებითი სიმრუდის მქონე გადახურვა	37
სურათი 16. შუალედური ძელების მქონე დადებითი სიმრუდის მქონე გარსული გადახურვები	38
სურათი 17. შუალედური ძელების მქონე დადებითი სიმრუდის მქონე გარსული გადახურვების სტრუქტურა 1. კონტურული რიგელი; 2. ფილები; 3. დროებით შემკვრელი 4. დროებითი საყრდენი; 5. სამონტაჟო ფერმა.....	39
სურათი 18. კომპოზიციური საფარის ზედაპირის ფორმა:(A, D, F, G, H) უარყოფითი გაუსის გამრუდება; B, C, E - ნულოვანი გაუსის გამრუდება	40
სურათი 19. კომპრესიული ძალების მიმართულება კონტურულ ელემენტებში დამოკიდებულია ჰი- ორთქლის დამხმარე სისტემაზე	41
სურათი 20. ლენტის უნაგირის გარსი (A) და მისი ფრაგმენტი (ბ):	41
სურათი 21. დიდი ზომის ცილინდრული ფილებისგან დამზადებული გუმბათები: 1 - ფილა; 2 - ზედა სარტყელი; 3 - ქვედა საყრდენი სარტყელი.....	45
სურათი 22. სტრუქტურული ფილების დაყრდნობის სქემები	52
სურათი 23. წრფივი	55
სურათი 24. კვადრატული ელემენტი	55
სურათი 25. ფორმის ფუნქციის შერული ფორმა.....	56
სურათი 26. კუბური ელემენტი	56
სურათი 27. O - კვანძები გეომეტრიის ფორმის ფუნქციისთვის; X - კვანძები გეომეტრიის გადაადგილების ფუნქციისთვის.....	57
სურათი 28. ოთხ კვანძიანი იზოპარამეტრული ელემენტი.....	57

სურათი 29. კვადრატული ელემენტი.....	62
სურათი 30. დატვირთული ძელის ოპტიმიზირებული მოდელი პენალტიზაციის მეთოდის გამოყენებით.....	64
სურათი 31. მარტივად ჩამაგრებული ძელი ცენტრში მოდებული ძალით.....	66
სურათი 32. MATLAB ში ოპტიმიზირებული ძელის შედეგები სხვადასხვა პენალტიზაციის ფაქტორებით A) P=2, B) P=3, C) P=4.....	78
სურათი 33. შედეგად მიღებული ოპტიმიზებული სხივი MATLAB-დან პენალიზაციის კოეფიციენტით 3.0, ზომით 100x35 ელემენტი და რადიუსი 1.5 [მმ]	78
სურათი 34. ოპტიმიზირებული ნახევარძელის კვეთები ვერტიკალურ სიბრტყეში	79
სურათი 35. სისქის სამგანზომილებიანი პროექცია	79
სურათი 36. კონვერტირების შედეგად მიღებული STL ფაილი გახსნილია SOLIDWORKS პროგრამულ პაკეტში	80
სურათი 37. ოპტიმიზირებული დეტალის 3დ მოდელი და 3დ პრინტერზე დაბეჭდილი დეტალი ექსპერიმენტისათვის.....	81
სურათი 38. PARETOCLOUD ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელი	83
სურათი 39. STRATASYS UPRINT SE 3D	85
სურათი 40. ძელის გამოცდის პროცედურა	86
სურათი 41. ძელის რღვევა.....	87
სურათი 42. დატვირთვა გადაადგილების ფარდობის გრაფიკი ძელისთვის	88
სურათი 43. MATLAB პენალტიზაციით ოპტიმიზირებული ძელი	89
სურათი 44. MATLAB პენალტიზაციით ოპტიმიზირებული ძელის რღვევა	89
სურათი 45. დატვირთვა გადაადგილების ფარდობის გრაფიკი პენალტიზირებული ძელისათვის ..	90
სურათი 46. MATLAB არა-პენალტიზირებული ძელის გამოცდა	91
სურათი 47. MATLAB არა-პენალტიზირებული ძელის რღვევა	91
სურათი 48. დატვირთვა გადაადგილების ფარდობის გრაფიკი არა-პენალტიზირებული ძელისათვის	92
სურათი 49. PARETOCLOUD ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელის გამოცდა.....	92
სურათი 50. PARETOCLOUD ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელის რღვევა	93
სურათი 51. დატვირთვა გადაადგილების ფარდობის გრაფიკი PARETOCLOUD ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელისთვის	94

ცხრილების წუსხა

ცხრილი 1. რეგულარული სისტემების სტრუქტურების სახეები (ნაწილი 1)	48
ცხრილი 2. რეგულარული სისტემების სტრუქტურების სახეები (ნაწილი 2)	49
ცხრილი 3. რეგულარული სისტემების სტრუქტურების სახეები (ნაწილი 3)	50
ცხრილი 4. რეგულარული სისტემების სტრუქტურების სახეები (ნაწილი 4)	51
ცხრილი 5. ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები და სასაზღვრო პირობები	84

დაფინანსება



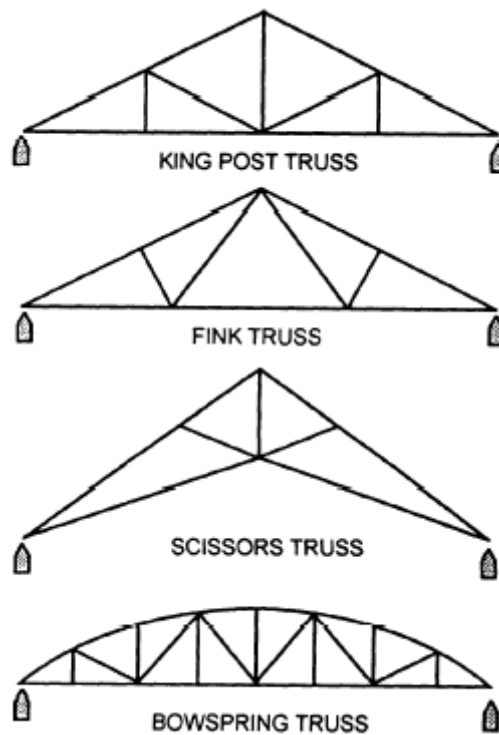
კვლევა PHDF-21-3812 განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით.

შესავალი

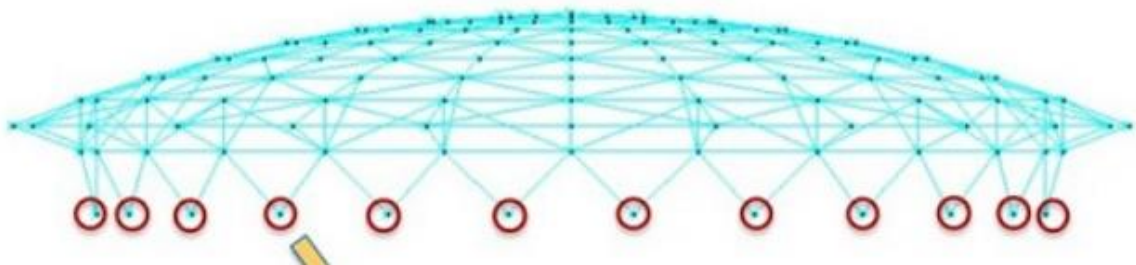
პროექტის ღირებულება და მნიშვნელობა, კვლევითი თემის/საკითხის

აქტუალობა, კვლევის სიახლე

თხელკედლიანი სივრცული კონსტრუქციები, ფილებისა და გარსების სახით ფართოდ გამოიყენება მშენებლობაში.



სურათი 1. გადახურვის საყრდენი ფერმის ტიპები.



სურათი 2. თხელკედლიანი სივრცითი სტრუქტურის მოდელი.

სივრცული გადახურვები არის სისტემები, რომლებიც შედგება თხელკედლიანი გარსებისაგან ან თხელკედლიანი ფირფიტებისგან. ეს ელემენტები ურთიერთდაკავშირებულია და მუშაობს როგორც ერთი მთლიანი სტრუქტურა.

აღნიშნული თვისება, ამ ტიპის საფარის გამოყენებისა, რომელიც თხელკედლიანი სივრცით კონსტრუქციებისგან შედგება, რიგ უპირატესობას ანიჭებს მას სხვა კონსტრუქციებთან შედარებით. ტექნიკური ლიტერატურის შესწავლის საფუძველზე ნათელია, რომ აღნიშნული ტიპის კონსტრუქციების გამოყენება ეკონომიკურად უფრო ხელსაყრელია, ვიდრე სხვა ტიპის კონსტრუქციები.¹

თხელკედლიანი სივრცითი საფარი გამოიყენება ძირითადად ანგარებისთვის, სპორტული დარბაზებისთვის, გადახურული ფართო მასშტაბიანი სივრცეებისთვის, საგამოფენო პავილიონებისთვის, სადგურებისთვის, საწარმოებისათვის, სამრეწველო შენობების და სხვა მსგავსი ნაგებობებისათვის, რომლებშიც შუალედური სვეტები არასასურველი ან მიუღებელია.

სამშენებლო პრაქტიკაში, ასევე გამოიყენება სხვა სახის თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციები, რომელთა ტიპის არჩევანი დამოკიდებულია სტრუქტურის დანიშნულებაზე, მის არქიტექტურულ განლაგებაზე, ზომებზე, მშენებლობის მეთოდებზე.

სივრცითი გადახურვა შედგება შემდეგი კომპონენტებისგან:

- ოთხმხრივი სივრცითი საყრდენი კონტურის სწორხაზოვანი ელემენტებით;
- მოქნილი ვანტები, რომლებიც ორიენტირებულია საყრდენი კონტურის ერთ-ერთი დიაგონალის პარალელურად და მასზე დამაგრებული ბოლოებით;
- მართკუთხა სარტყლები, რომლებიც ორიენტირებულია ორი მოპირდაპირე კონტურის ელემენტის პარალელურად და დამაგრებული მათ ბოლოებზე ორ ძირითად ელემენტზე;
- თხელი ფურცლოვანი .

სივრცითი გადახურვის სახეები: გუმბათები, ცილინდრული გარსები, ნაკეცი კონსტრუქციები, ორმაგი სიმრუდის სახურავები კომპოზიტური გარსებით და შეკიდული კონსტრუქციები. თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციებით გადახურვის ტიპის არჩევა დამოკიდებულია შენობის დანიშნულებაზე, მის ზომაზე, მშენებლობის მეთოდებზე და სხვა რიგ ფაქტორებზე.

თხელკედლიანი წყვეტილ პარამეტრებიანი, მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცითი კონსტრუქციების ეფექტურობის ამაღლება დაკავშირებულია ახალი საანგარიშო

¹ (ბერუაშვილი, 2021)

სქემებისა და გამოთვლის მეთოდების დახვეწასთან. ცნობილია, რომ ყოველი კონსტრუქციის გამოკვლევა ემყარება გარკვეულ გამარტივებებს, ოპტიმიზაციას, რომლებიც ეხება, როგორც გადაადგილებების, ასევე დეფორმაციის და ჩაღუნვის სიდიდეებს, მათ შორის დამოკიდებულებას, ძაბვების განაწილების კანონს, სიხისტეს, დატვირთვის მოქმედებას და სხვა. კონსტრუქციის მუშაობის რეალური პირობების გათვალისწინება მოითხოვს აღნიშნული გამარტივებების კრიტიკულ შეფასებას და ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში, თუ ეს აუცილებელია მათ სრულყოფას.

თემის აქტუალობა: თხელკედლიანი მართკუთხა წიბოების მქონე კონსტრუქციები სამშენებლო კონსტრუქციებში გამოიყენება ფილებისა და გარსების სახით, ალგორითმის შემუშავება რომელიც საშუალებას მოგვცემს მოვახდინოთ აღნიშნული სამშენებლო კონსტრუქციების ოპტიმიზაცია როგორც მასის ასევე ფრომის მიხედვით, ისე რომ საჭირო არ იყოს ისეთი პროგრამული პაკეტების გამოყენება რომელიც მომხმარებლის მაღალ კვალიფიკაციას მოითხოვს შეიძლება ჩაითვალოს აქტუალურად.

კონსტრუქციისადმი წაყენებული საექსპლუატაციო მოთხოვნები ხშირად ჩამოყალიბებულია სიხისტისა და სიმტკიცის გარკვეული პირობების სახით, რაც ნიშნავს, რომ კონსტრუქციის ზომები, (როგორც წესი სისქე) უნდა უზრუნველყოფდნენ მაქსიმალური ძაბვის ჩაღუნვის დასაშვებ მნიშვნელობას. გაანგარიშებას ჩვეულებრივ აქვს შემოწმებითი ხასიათი, ალგორითმის დამუშავება, რომელიც უზრუნველყოფს აღნიშნული მოთხოვნების დაკმაყოფილებას, შეიძლება ჩაითვალოს **აქტუალურად**. ზემოთაღნიშნულის საფუძველზე სამშენებლო მექანიკის **აქტუალურ** პრობლემას წარმოადგენს გარსული კონსტრუქციების გაანგარიშება ოპტიმიზაციის მეთოდით.²

ბოლო ათწლეულში კომერციული სტრუქტურული ოპტიმიზაციის პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენება მკვეთრად გაიზარდა. განსაკუთრებით მოთხოვნადია ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია, სადაც ოპტიმალური დაგეგმარების მეთოდები გამოიყენება, როგორც დიზაინის კონცეფციის შესაქმნელად, ასევე საწყისი დაპროექტებისას.

² (Altenbach & Eremeyev, 2017)

ოპტიმიზაციის ყველაზე გავრცელებული ამოცანა არის მასის შემცირება სიხისტის შენარჩუნებით.

სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის მიზანია შეიქმნას პროგრამა რომლის გამოყენებითაც შესაძლებელია სამშენებლო მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცული კონსტრუქციის ოპტიმიზაცია. ამავდროულად პროგრამული კოდი არ უნდა მოითხოვდეს დიდი გამოთვლით სიმძლავრეებს და მომხმარებლის მაღალ კვალიფიკაციას.

მეცნიერული სიახლე: შექმნილია ალგორითმი რომელიც საშუალებას იძლევა მივიღოთ გადახურვის ფილის ან ფირფიტის ოპტიმალური დაპროექტების სქემა რომელიც კლასიკურ კონსტრუქციებთან შედარებით გამოირჩევა მასალის ხარჯის შემცირებით, შესაბამისად ოპტიმალური მასის მქონე კონსტრუქციის დაპროექტებით რაც პირდაპირ კავშირშია ეკონომიკურ ფაქტორებთან და სეისმომდეგობის გაზრდასთან. მართკუთხა წიბოების მქონე თხელკედლიანი სივრცითი სამშენებლო კონსტრუქციების ოპტიმიზაცია თანამედროვე სამყაროში განვითარებადი და მოთხოვნადი პროცესია, კომერციულად არსებული პროგრამული პაკეტები, კომპლექსურ მიდგომას და მომხმარებლის მაღალ კვალიფიკაციას მოითხოვს, გარდა ამისა თანამედროვე სამეცნიერო ლიტერატურაში არ გვხვდება რეალური ექსპერიმენტები სადაც ერთმანეთს შედარებული იქნება ოპტიმიზაციით მიღებული მოდელის რეალური გამოცდის შედეგების შედარება მის თეორიულ მაქსიმუმთან. ასევე არ არსებობს ალგორითმი რომელიც მარტივად მოგვცემს ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის საშუალებას.

პრაქტიკულ მნიშვნელობას წარმოადგენს დროის მაქსიმალურად შემცირებას რომელიც საჭიროა სასრულ ელემენტთა ანალიზის დროს მოდელის ყოველი მოდიფიკაციისათვის. ვინაიდან სამშენებლო კონსტრუქციის უპირატესობა³ განსაზღვრავს მის სიიფეს და აქედან გამომდინარე მინიმალურ წონას, ხშირად ხდება მოდელის ცვლილება რათა ეს კრიტერიუმები დაკმაყოფილდეს. თითოეული მოდიფიკაცია იწვევს კონსტრუქციის ანალიზის დროის საკმაოდ ზრდას. საჭირო გახდა ალგორითმის შექმნა რომლის ინტეგრაციით საშუალებას მოგვცემს

³ (Beruashvili V., 2022)

პირველადი შედეგებისათვის ოპტიმალური ვარიანტის დადგენის შესაძლებლობას. რისი საშუალებითაც სამშენებლო ნაგებობის დიზაინი მიიღებს ოპტიმალურ სახეს.

ნაშრომის აპრობაცია

- სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა სასწავლო პროცესში 3 კოლოქვიუმზე.
- 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 "პრობლემები საინჟინრო მეცნიერებებში" (ერევანი, 2022)
- საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე „Materials and Energy Saving Technologies Construction of Optimized Energy Potential” (ჩესტობოვა, 2022)
- მე-7 სამეცნიერო კონფერენციაზე "განვითარებადი ტენდენციები ინტერდისციპლინარულ კვლევებსა და პრაქტიკაში" (ნიუ იორკი, 2022)
- II საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული სემინარზე „ევროპული ინოვაციური ტექნოლოგიები სამშენებლო და გარემოს ინჟინერიაში (თბილისი – ბიალისტოკი, 2022)
- საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „გამოყენებითი მექანიკის პრობლემები მიძღვნილი აკადემიის წევრ-კორესპონდენტის ირაკლი ღუდუშაურის 95 წლის იუბილესადმი“. (თბილისი, 2023)

პუბლიკაციები

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 10 სტატია აქედან 6-ში დამოუკიდებლად და 4 მოხსენებათა თეზისი.

კვლევის მეთოდოლოგია

კვლევის მიზანი მიღწეულია სასრულ ელემენტთა მეთოდის საშუალებით, გამოყენებული იქნება იზოპარამეტრული სასრული ელემენტები, მათ ფუნქციებზე დაყრდნობით შედგენილია პროგრამული კოდი რომელიც საშუალებას იძლევა გავიანგარიშოთ მარტივი ძეგლის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია, ასევე შედგენილია კოდი ამ მონაცემებზე დაყრდნობით 3D მოდელირების პროგრამული პაკეტებისთვის მისაღებ ფორმატში გადაყვანის კოდი.

გადმოცემულია: ალტერნატიული ვარიანტები ანუ „ოპტიმიზაციის“ პროცესი; თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების ოპტიმალური დაგეგმარების ვარიანტები; დამრეცი გარსის ტიპის ანაკრები მატრიცები და ცვლადპარამეტრებიანი სივრცითი კონსტრუქციების რიცხვითი რეალიზაციის პრობლემების გამოკვლევა; დამუშავებული ალგორითმი საფუძველზე შედგენილია პროგრამული პაკეტი, რომლის რეალიზაციის შედეგი მოცემულია ნაშრომში; შედარებულია კომერციულად ხელმისაწვდომი ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის პროგრამული პაკეტების და ჩემს მიერ შემუშავებული ალგორითმის შედეგები, როგორც თეორიული ანგარიშის საფუძველზე, ასევე სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენებით. ჩატარებულია რეალური ექსპერიმენტი 3D პრინტერზე დაბეჭდილი მოდელების საშუალებით.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

1.1 სივრცითი კონსტრუქციები

ბუნებამ შექმნა სივრცითი სტრუქტურების მსგავსი სხვადასხვა კონსტრუქციები. ცხოველის ძვლების შიდა სტრუქტურა საოცრად წააგავს გისოსებიან სივრცულ სისტემებს. შემთხვევითი არ არის, რომ მშენებლობის პრობლემებისადმი მეცნიერული მიდგომა ახლა მჭიდროდ არის დაკავშირებული ბუნებრივი კონსტრუქციების შესწავლასთან. როგორც ბუნებას, ასევე მშენებლობას აქვს მრავალი საერთო კრიტერიუმი, რომელიც განსაზღვრავს მათი კონსტრუქციების სიხისტეს, მდგრადობას და საერთო სრულყოფილებას; პროპორციულობა,

მოწესრიგება, ძალთა ოპტიმალური გადანაწილება, ფუნქციონალის მორგება, გარემოს მავნე ზემოქმედებისგან იზოლაცია და ა.შ. მიზანშეწონილობის პრინციპი და ენერჯის ყველაზე დაბალი მოხმარება განსაზღვრავს ველური ბუნების ყველა ზემოთ ჩამოთვლილ თვისებას. ამიტომ, მშენებლობაში ოპტიმალური კონსტრუქციების გამოყენება, ამოდრავებს სამეცნიერო და ტექნოლოგიურ პროგრესს იწვევს ახალი იდეების ძიებას და რაც მნიშვნელოვანია ფუნდამენტურად ახალ მიდგომებს აღმოჩენას. ინჟინერია რთული პრობლემების გადასაჭრელად, ხშირად მიმართავს ბუნებრივ კონსტრუქციებს იქნება ეს ხის ფესვების სტრუქტურა თუ ძვლის აგებულება, რომელმაც მილიონი წლის განმავლობაში ევოლუცია განიცადა. ბუნებაში არსებული პრინციპების შემუშავებისა და დაპროექტების ენაზე თარგმნის პროცესი ყოველწლიურად ღრმავდება. ბიონიკა მყარად იძენს საფუძველს სამშენებლო მეცნიერებაში. სამშენებლო პრაქტიკაში მრავალი კონსტრუქცია დაიბადა ფლორისა და ფაუნის შესწავლის საფუძველზე. პიერ ლუიჯი ნერვი-თანამედროვე მშენებლობაში ბიონიკური კონსტრუქციების დანერგვის პიონერია. ნებისმიერი სამშენებლო სტრუქტურა, პირველ რიგში, რაციონალური აზროვნების შედეგია და ადამიანის მიერ ბუნების კანონების ბრწყინვალე გააზრებაა.⁴

თანამედროვე ტექნოლოგიებმა შესაძლებელი გახადა რთული მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცითო კონსტრუქციების შექმნა, რომლებიც ადრე რთულად წარმოებად ითვლებოდა.

XX საუკუნის ბოლო მეოთხედში, მშენებლობაში გრძელდებოდა პროცესი, რომელიც შეიძლება შეფასდეს, როგორც "ფორმის ოპტიმიზაციის აფეთქება". ამ პროცესში ფუნდამენტური მნიშვნელობა აქვს სივრცითი კონსტრუქციების სტრუქტურული და არქიტექტურული ფორმების განვითარებას ოპტიმიზაციის განხრით, ვინაიდან აქ "კონსტრუქციული ჭეშმარიტების" კონცეფციის მნიშვნელობა განუყოფლად არის დაკავშირებული არქიტექტურული მთლიანობისა და სისრულის კონცეფციასთან. ამ კონცეფციების მიღმა, დიზაინი მოკლებულია ესთეტიკურ შინაარსს და მიეკუთვნება ტექნოლოგიის სფეროს, მაგრამ არა არქიტექტურას, რაც აქტუალურია სამშენებლო კონსტრუქციებისათვის.

⁴ (Gay, 2014)

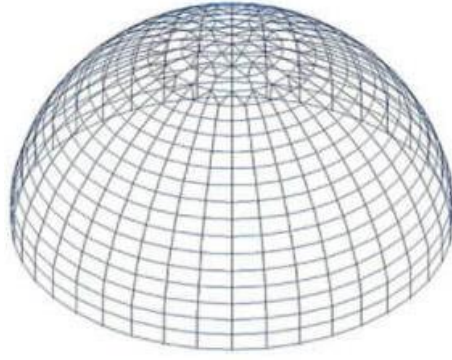
სამშენებლო კონსტრუქციების განვითარების ათასწლეულების გამოცდილებამ, ფორმა და კონსტრუქცია ერთმანეთთან დააკავშირა. უმეტესწილად, გარკვეული ტიპის კონსტრუქციები განისაზღვრება მათი სტრუქტურული მახასიათებლებით, ანუ ძირითადი თვისებებით, რაც განაპირობებს სტრუქტურის სამუშაო პირობების განსაზღვრას და მათ კლასიფიცირებას. სივრცითი კონსტრუქციების გამოყენება და ექსპლუატაცია, მათი ფორმისა და სტრუქტურის მიხედვით, საშუალებას გვაძლევს გავაერთიანოთ ყველა არსებული ტიპი დიდ ჯგუფებად და ასევე კლასებად, რისთვისაც დამახასიათებელია ერთი მთავარი მახასიათებელი - კონსტრუქციაში არსებული მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცითი ელემენტები, შემდეგ კი ამ ჯგუფში ხდება დაყოფა ცალკეულ სისტემებად. კლასიფიკაციებისგან განსხვავებით, რომელშიც დაყოფა შეიძლება მოხდეს მხოლოდ გამოყენებული მასალების, სტატიკური მახასიათებლების ან წარმოების მეთოდების საფუძველზე და ა.შ. მრავალწლიანი გამოცდილების საფუძველზე კლასიფიკაციის შემოთავაზებული პრინციპი შესაძლებელს ხდის დაფაროს ახალი სტრუქტურებისა და სტრუქტურული მასალების მთელი მრავალფეროვნება და, რაც მთავარია, თითოეული ინდივიდუალური სტრუქტურული სისტემის კორელაცია სტრუქტურულ ფორმასთან, რომელიც ქმნის სამშენებლო სივრცითი კონსტრუქციის კლასიფიკაციის გადაწყვეტის საფუძველს.⁵

კლასიფიკაცია ემყარება სტატიკური ფორმირების ნიშნების ოთხ ჯგუფს:

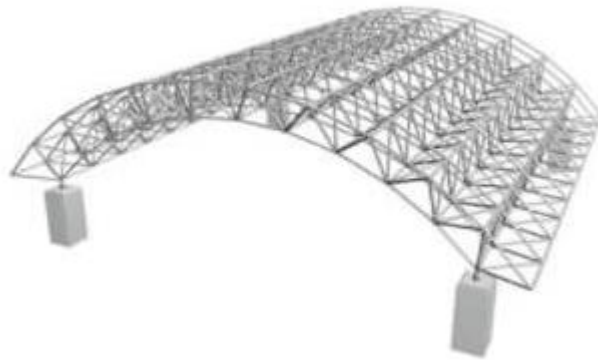
- 1) სტრუქტურები ღუნვის გამომწვევი უპირატესი ძალებით;
- 2) სტრუქტურები, რომლებიც მუშაობენ ძირითადად კუმშვაზე;
- 3) სტრუქტურები, რომლებიც მუშაობენ უპირატეს გამჭიმავ ძაბვაზე;
- 4) სტრუქტურები კუმშვა-გამჭიმვაზე მომუშავე სისტემები.

ცალკე ჯგუფად შეგვიძლია გამოვყოთ ტრანსფორმირებადი კონსტრუქციები.

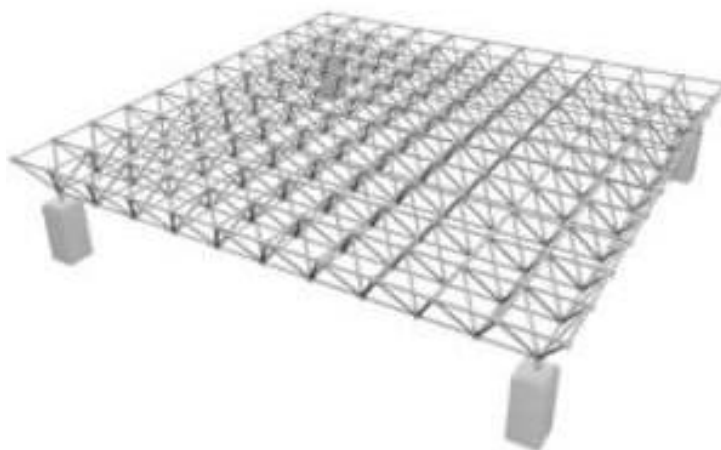
⁵ (ბერუაშვილი, 2021)



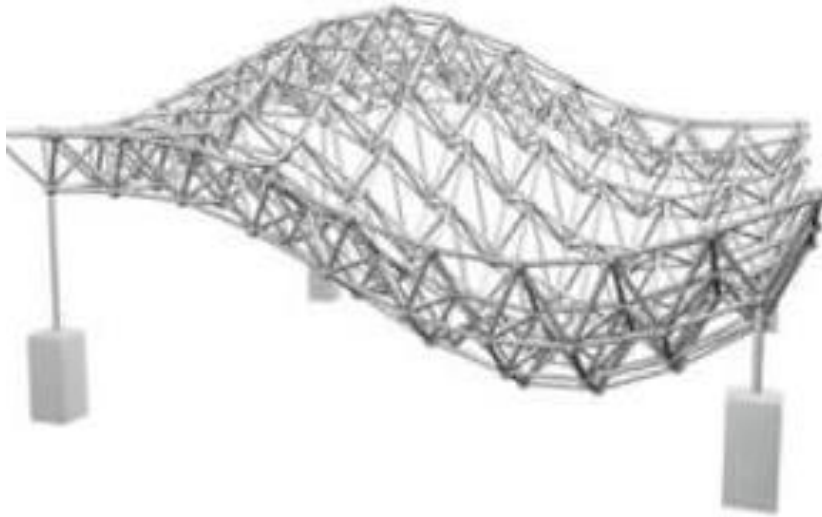
სურათი 3. გუმბათი



სურათი 4. თაღოვანი სივრცითი კონსტრუქცია



სურათი 5. ბრტყელი სივრცითი კონსტრუქცია



სურათი 6. მართკუთხა წიბოების მქონე რთული ზედაპირის მქონე სივრცითი კონსტრუქცია

1.2 დიდი გაქანის მქონე სივრცული კონსტრუქციები

სივრცითი სტრუქტურების ქვეშ, რომლებიც კლასიფიცირდებიან როგორც დიდი გაქანის მქონე კონსტრუქციები შეგვიძლია განვიხილოთ ელემენტები, რომლებიც მუშაობენ ძირითადად მღუნავ ძალებზე. გადახურული განივი მიმართულებით წარმოქმნილი მღუნავი ძალების გარდა, ასევე სხვა ძალები შეიძლება წარმოიქმნას ტანგენციალური, გადამჭრელი, გრძივი მღუნავი და ა.შ.). თავად ელემენტი კომპლექსურ დაძაბულ მდგომარეობაშია. თუმცა, იმის გათვალისწინებით, რომ გაქანის გასწვრივ ძალები დომინანტურია, ამ სტრუქტურებს ხშირად უწოდებენ სივრცულ სტრუქტურებს, რომლებიც მუშაობენ "გაქანის გასწვრივ".

უმეტესწილად ისინი მზადდება რკინაბეტონისგან და არმობეტონისგან, იშვიათად — ფოლადის, ალუმინის, პლასტმასისგან. აგების მეთოდების მიხედვით, ეს სტრუქტურები ჩვეულებრივ იყოფა ასაწყობი, მონოლითური და ასაწყობი-მონოლითური.

სტრუქტურები, რომლებიც ახასიათებთ დიდი მალი, შეიძლება გამოყენებულ იქნას სხვადასხვა ფორმით: მართკუთხა, კვადრატული, მრგვალი, ტრაპეციული და როგორც კონსტრუქციული ელემენტები - ჭერი, კედლის ღობეები.

მოცემული სტრუქტურები განკუთვნილია შედარებით მცირე მალეებისათვის 12-36 მ. ისინი გამოიყენება სპორტული და გასართობი, კულტურული და კომერციული, საგანმანათლებლო და ა.შ. მასობრივი საზოგადოებრივი შენობებისა და ნაგებობების მშენებლობაში.⁶

ყველაზე მრავალფეროვანი კონსტრუქციული სქემებით გამოირჩევა საზოგადოებრივი თავშეყრისთვის განკუთვნილი შენობები, მათი დანიშნულებისამებრ შეიძლება გადახურული იყოს სივრცითი სტრუქტურებით "სიგრძეზე". როგორც უკვე აღვნიშნეთ შესავალში, ეს სტრუქტურები ქმნიან მოცულობების განმტვირთავ ფრონტალურ კომპოზიციებს და ამ სტრუქტურების არქიტექტურული შესაძლებლობების ოსტატურად გამოყენებით შეგვიძლია მივიღოთ საინტერესო ოპტიმალური გადაწყვეტილებები, როგორც შენობის ინტერიერში, ასევე ექსტერიერში.

კონსტრუქციული სქემების შესაბამისად, დიდი მალის მქონე სივრცითი სტრუქტურები შეიძლება დაიყოს შემდეგ ქვე ჯგუფებად გადახურვის ფილები, ნაკეციები, ცილინდრული გარსები და თაღები.

1.3 გადასახური ფილები

გადახურვის ფილები მოიცავს ელემენტებს, რომლებიც მუშაობენ უპირატესად ღუნვაზე (ანუ მალის თანაფარდობა 1:2-ზე მეტი). ამ ელემენტების საყრდენების ზონაში არ არის ტანგენციალური ძალები და განივი ღუნვის მომენტები. იატაკის ფილები აერთიანებს მზიდ და შემოფარვის ფუნქციებს, ასევე ჰიდრო-თერმული იზოლაციას.

ასეთი სტრუქტურების საყრდენი ფართობი, როგორც წესი იანგარიშება ბრტყელი ფილის სახით. გეომეტრიული ფორმის მიხედვით სახურავის ფილები იყოფა ორ ჯგუფად: ფილები ბრტყელი ან ნულოვანი გამრუდების ზედაპირით და ფილები დადებითი ან უარყოფითი გამრუდების ზედაპირით.

პირველი ტიპის ფილების დამზადება უფრო ადვილია. მათი გამოყენებისას თბოიზოლაციის მოწყობას ნაკლები შრომა სჭირდება. ორმაგი სიმრუდის

⁶ (Прядко Н.В., 2019)

ზედაპირის გარსები უფრო ეფექტურია სტატიკური დატვირთვის მიმართ მედეგობის თვალსაზრისით. რკინაბეტონის ფილები ყველაზე ხშირად გამოიყენება შენობების გადასახურად 9-დან 18მ-მდე.⁷

ფილის საყრდენი ზედაპირები პირდაპირ ეყრდნობა შენობების კედლებს ან კოჭებს როდესაც გამოიყენება მრავალსართულიან ან ჩარჩო-პანელურ შენობებში. სახურავის პანელები შეიძლება დამონტაჟდეს ერთმანეთთან ახლოს ან პანელის მეშვეობით.

მიზანშეწონილია გამოიყენოთ გადახურვის ფილები დარბაზული ტიპის ფართობებზე სხვადასხვა მიზნებისთვის, მაგალითად, საგანმანათლებლო დაწესებულებების და სხვადასხვა საწარმოების, შეკრებებისა და სპორტულ დარბაზებში, სავაჭრო ცენტრებში, საზოგადოებრივი კვების ობიექტებში და სხვა. ბრტყელი ზედაპირის ან ნულოვანი სიმრუდის ზედაპირის მქონე რკინაბეტონის ფილები, როგორც წესი, მზადდება მზიდი გრძივი წიბოებით, რომლებიც გამაგრებულია წინასწარ დაძაბული არმატურით. ასეთი ტიპის კონსტრუქციებს აქვთ U-, T- ან 2T ტიპის კვეთი. გრძივი წიბოები მზადდება ცვლადი სიმაღლეზე, რაც უზრუნველყოფს სადრენაჟო არხს და ამცირებს მასალის ხარჯს.



სურათი 7. რკინაბეტონის გადახურვის ფილა.

⁷ (Gay, 2014)

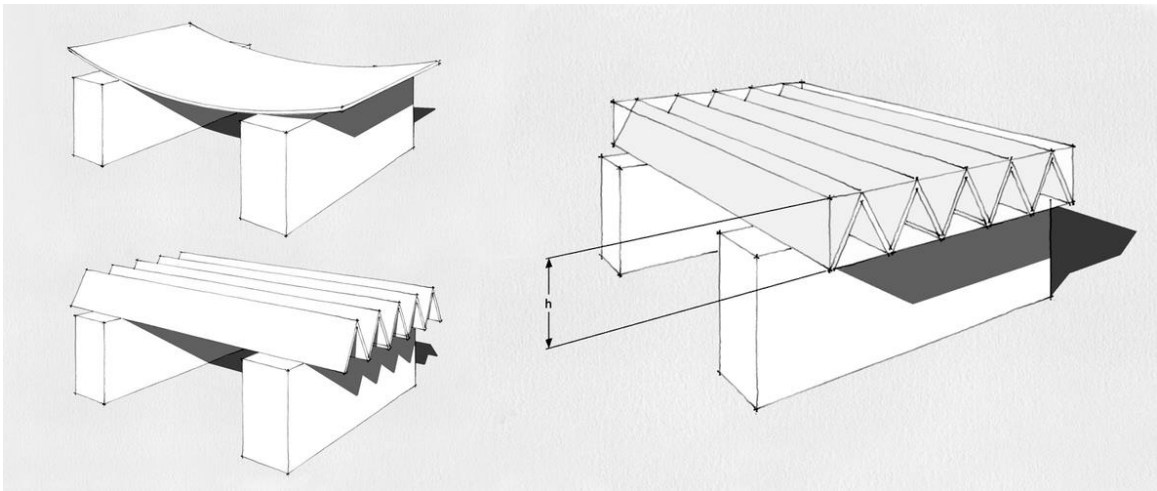


სურათი 8. რკინაბეტონის გადახურვის მონტაჟის სქემა საცხოვრებელ კორპუსში.

1.4 კონსტრუქციები მკვეთრად გამოყოფილი ტეხილებით (ნაკეცებით)

ტეხილი სტრუქტურების ქვეშ, ჩვეულებრივ მოიაზრება ფირფიტებისგან (როგორც ბრტყელი, ასევე მრუდი) წარმოქმნილი კონსტრუქციული სისტემები, რომლებიც მუშაობენ გარე დატვირთვის ისეთ მდგენელებზე, რომლებიც მიმართულია ფირფიტის შუა ზედაპირებზე წარმოქმნილ მღუნავ და ტანგენციალურ ძალების გასწვრივ.

ტეხილი ფორმა ფართოდ გამოიყენება არქიტექტორების მიერ სხვადასხვა სახის დარბაზების გადასახურად, ასევე კედლის განივი კვეთის ფორმაში.



სურათი 9. ტეხილი სტრუქტურებისგან შედგენილი კონსტრუქციები

ტეხილი ზედაპირის მქონე მიეკუთვნებიან სტრუქტურები, რომლებიც უნიფიცირდება სხვადასხვა კონსტრუქციული სნეცარებისთვის. მათი დახმარებით შესაძლებელია გადახურვების დაპროექტება, როგორც კონსოლური, ისე არაკონსოლური კონსტრუქციული სქემით, არა მხოლოდ მართკუთხა, არამედ მრგვალ, ტრაპეციულ და ზოგადად ნებისმიერ გეგმაზე. გარდა ამისა, შეუძლებელია არ აღინიშნოს ნაკეციანი სახურავების კარგი აკუსტიკური შესაძლებლობა. ეს ყველაფერი იძლევა ნაკეცი კონსტრუქციების მასობრივი გამოყენების შესაძლებლობებს სამოქალაქო ინჟინერიაში.

გრძივი მიმართულებით დაკეცილი კონსტრუქციები მუდმივი და ცვალებადი ფორმისაა. განივი კვეთის მიხედვით იყოფა ღია და დახურული პროფილის ნაკეცებად, პრიზმული ფორმის ნაკეცებად და ა.შ.

აგების მეთოდის მიხედვით განასხვავებენ მონოლითურ, ასაწყობ-მონოლითურ და ასაწყობ ნაკეცებს. ასაწყობ-მონოლითური ნაკეცების დამზადება შესაძლებელია, როგორც ცალკეული ფილა-ფირფიტისაგან, ასევე გარკვეული სიგრძის მთლიანი დაკეცილი ელემენტებისაგან. ასაწყობი ნაკეცები გამოიყენება, როგორც წესი, მთლიანი დაკეცილი ელემენტებიდან. დაკეცილი კონსტრუქციები მზადდება არა მხოლოდ რკინაბეტონისა და არმოცემენტისგან, ზოგიერთ შემთხვევაში ისინი⁸ აღმართულია პროფილირებული ფოლადისგან, ალუმინის შენადნობებისგან და პლასტმასისგან.

⁸ (Koloor, და სხვ., 2019)

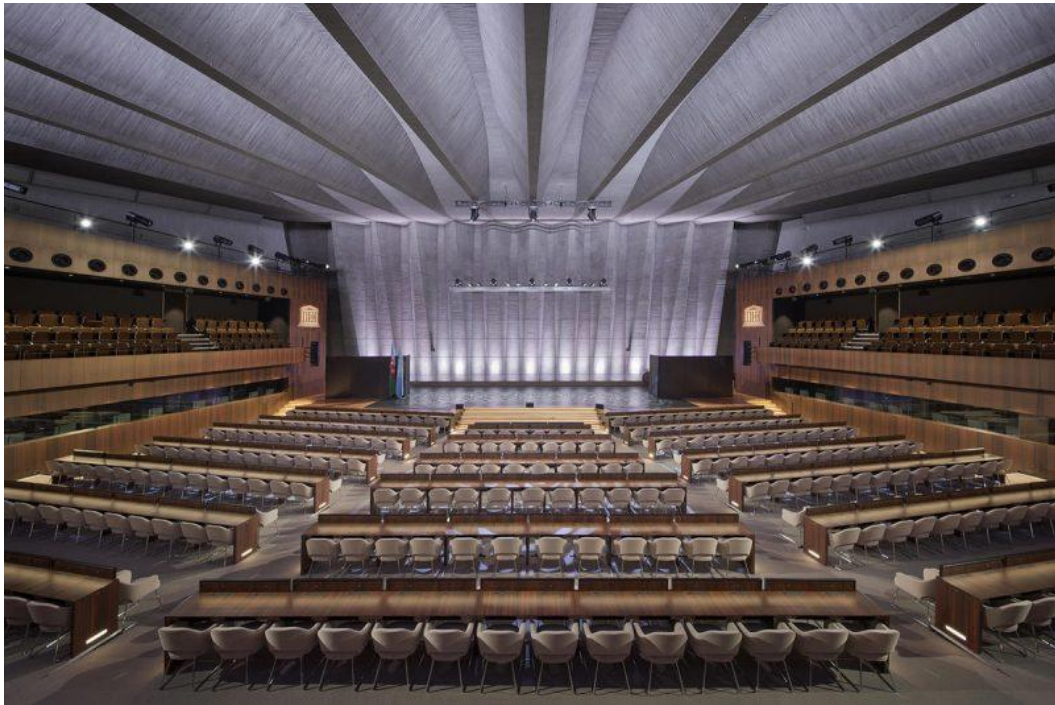
უმარტივეს ასაწყობ დაკეცილ კონსტრუქციებს, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება მასობრივ მშენებლობაში, შეიძლება ეწოდოს НИИЖБ-ში შემუშავებული სარკინიგზო პლატფორმების საფარის ელემენტები. ეს კონსტრუქციები დამზადებულია გამაგრებული ცემენტისგან, ფორმირების ერთეულის გამოყენებით და დამონტაჟებულია საფარში ეგრეთ წოდებული "მშრალი" სახსრის - გადახურვის გამოყენებით. ამ ნაკეცებით გადახურული მცირე ზომის ფართობები, შესაბამისად, მონაკვეთის დაბალი კონსტრუქციული სიმაღლე, ასეთ სახსრებს არა მხოლოდ შესაძლებელს, არამედ მიზანშეწონილსაც ხდის.

დაკეცილი კონსტრუქციების ასაწყობი-მონოლითური გადაწყვეტილების მაგალითებია დონეცკის ბიტრადიოტექნიკის შენობის საფარი. საწყობის ელემენტებს შორის სახსრები მონოლითურია. მას შემდეგ, რაც ბეტონმა მიაღწია საჭირო სიმტკიცეს, ასაწყობი სამარჯვი გადავიდა შემდეგ პოზიციაზე.

მონოლითური ტეხილი ზედაპირების მქონე კონსტრუქციები გამოიყენება მშენებლობაში, როდესაც ნაკეცები, რომლებიც განსხვავდება მონაკვეთის სიგრძის გასწვრივ ძაბვის მდგენელი, შეესაბამება მუდმივი დატვირთვისგან გადახურვაში წარმოქმნილი ღუნვის მომენტების დიაგრამას. ასეთი სახურავი, ძალიან ეფექტურია, როგორც არქიტექტურული, ასევე სამშენებლო მექანიკის თვალსაზრისით. აღნიშნული ტიპის კონსტრუქცია გამოყენებული იქნა პარიზში იუნესკოს კომპლექსის კონგრესის დარბაზის მშენებლობის დროს.



სურათი 10. იუნესკოს კომპლექსი ქ. პარიზი.



სურათი 11. იუნესკოს კომპლექსის კონგრესის დარბაზი

20-იან წლებში პრიზმული ტეხილი ზედაპირების მქონე სახურავების დიდი რაოდენობა აშენდა მონოლითურად და გამოიყენებოდა ძირითადად საწარმოებისთვის. დღეისათვის ისინი იშვიათად გამოიყენება.

საზოგადოებრივ შენობებში ტეხილი ზედაპირების მქონე საფარი გამოიყენება დარბაზებისთვის სხვადასხვა დანიშნულებით. მათი სიგრძე მერყეობს 6-დან 72 მ-მდე, თუმცა რაციონალური გამოყენების საზღვრები 12-36 მ-ის ფარგლებშია. ტეხილი ფორმის კონსტრუქციები წარმატებით გამოიყენება დიდი ზომის შენობების დასაფარად.

1.5 ცილინდრული გარსული კონსტრუქციები

ცილინდრულ გარსულ კონსტრუქციებში შუა ზედაპირი წარმოიქმნება, წრიული მრუდის გასწვრივ წრფის გადაადგილებით. ამ სტრუქტურებში უნდა განვასხვაოთ თავად გარსი - თხელი ფირფიტა, გლუვი ან წიბოებიანი, მრუდი ცილინდრული ზედაპირის გასწვრივ, გვერდითი ელემენტები, რომლებიც ესაზღვრება გარსს მთელ სიგრძეზე და განივი დიაფრაგმები. არსებობს სამი სახის ცილინდრული გარსი: მოკლე, გრძელი და კონუსური. მოკლე ცილინდრული გარსი წააგავს პლანტური სტრუქტურების ფორმას. ამ ტიპის გარსები უფრო ხშირად გამოიყენება სამრეწველო მშენებლობაში. ფართოდ ცნობილია, მოკლე ცილინდრული გარსები შენობებისთვის 24x12 და 18x12 მ სვეტების ბადით, შემუშავებული გლავკიევსტროის მიერ. ისინი შედგება დიაფრაგმის ფერმებისგან, წიბოებისგან, პანელებისგან 3x12 მ და გვერდითი ელემენტებისაგან. სტრუქტურული ელემენტების ერთობლივი მუშაობა უზრუნველყოფილია ფერმების ზედა სარტყელზე დუელებით, ჩაშენებული ნაწილების შედუღებით, ამგვარად, კიევში ავტობუსების პარკის ერთ-ერთი ღერო დაფარულია მოკლე ასაწყობ-მონოლითური ცილინდრული გარსით, ზომით 3x x 12 მ, გარსის შუაში განლაგებულია მსუბუქი აერაციის ფარანი.

ასაწყობი-მონოლითური მოკლე ცილინდრული გარსების დაყენება არ განსხვავდება ბრტყელი სტრუქტურებისთვის მიღებული მიდგომისგან. ზოგიერთ შემთხვევაში ფერმების ნაცვლად თაღები გამოიყენება. თაღებში ნაპრალები შეიძლება შეიცვალოს გრძივი სხივებით, რომლებიც იღებენ ბიძგს გარსიდან საფარის სიგრძის გასწვრივ.

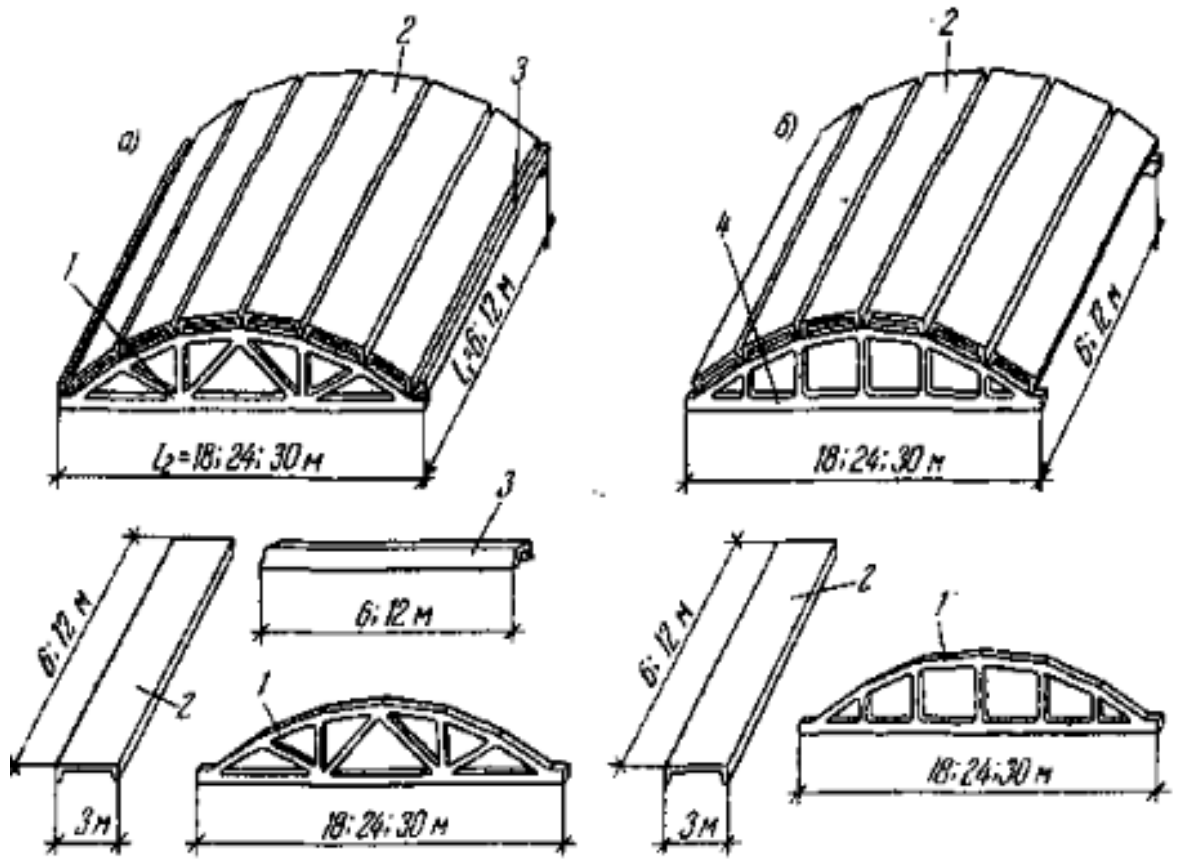
მოკლე ცილინდრული გარსებს გაჩნია ანალოგიური უარყოფით მხარეები, როგორც ბრტყელ სტრუქტურებს: მათი გამოყენება საზოგადოებრივ შენობებში თითქმის ყოველთვის მოითხოვს მაღალ ჭერს.

გრძელ ცილინდრულ გარსებში, მოკლე გარსისგან განსხვავებით, სიმრუდე მიმართულია მთელ სიგრძეზე. უფრო მეტიც, გარსის სიგრძის თანაფარდობა მის სიგანეზე არის არანაკლებ ორმაგი მნიშვნელობისა. დატვირთვის ქვეშ მუშაობისას, გრძელი ცილინდრული გარსი წააგავს სხივს, მრუდს განივი კვეთით.

გრძელი გარსების ფორმა იძლევა სხვადასხვა ჭრის საშუალებას ასაწყობ ელემენტებში. ჭრის სქემების არჩევანი დამოკიდებულია მათი აგების მიღებულ მეთოდზე, ტრანსპორტირებისა და მონტაჟის მეთოდებზე. გვერდით ელემენტებში კონცენტრირებულია მთავარი ჩამაგრება, რომელიც აღიქვამს გამჭიმავ ძალებს. დიაფრაგმები უზრუნველყოფენ გარსის გადაკვეთის მონაკვეთის გეომეტრიულ უცვლელობას. დიაფრაგმის ქვედა ბოლოები, ისევე როგორც გვერდითი ელემენტები, ჩვეულებრივ წინასწარდაძაბულია. ასეთი გარსები ხშირად გამოიყენება როგორც სამრეწველო, ასევე სამოქალაქო შენობებში.

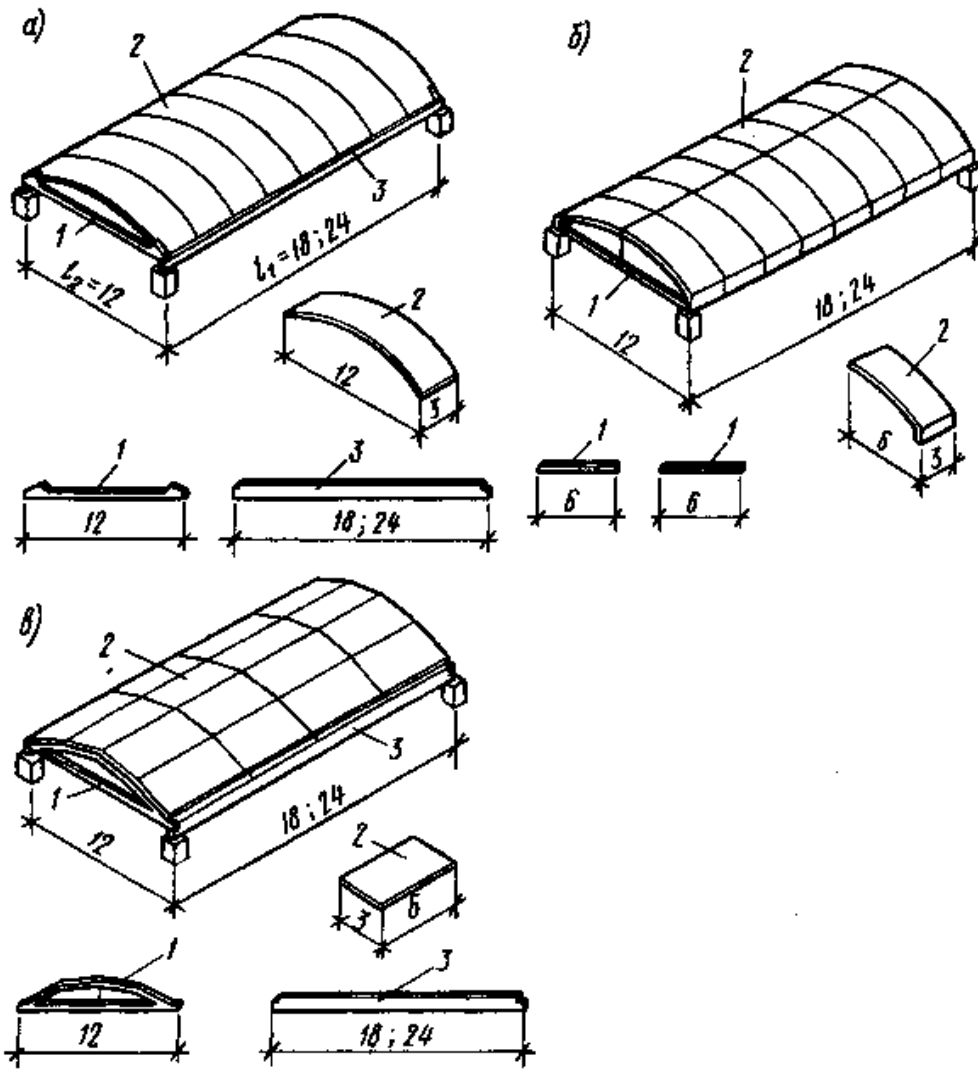
გრძელი ცილინდრული გარსები შეიძლება დამზადდეს არა მხოლოდ რკინაბეტონისა და არმოცემენტისგან, არამედ ფოლადის ან ალუმინის შენადნობებისგან. ასე რომ, პეტერბურგში მოსკოვის რკინიგზის სადგურის პლატფორმების გადასახურად, ცილინდრული გარსი დამზადებულია ალუმინის ფურცლისაგან. ტემპერატურული ბლოკის სიგრძე 48 მ, სიგანე 9 მ. ელემენტები დამზადდა ქარხანაში მოღუნვისა და შტამპის გზით და ნაწილებად გადაიტანეს სამშენებლო ობიექტზე ანუ მოსკოვის რკინიგზის სადგურის სახურავზე.

კონუსური გარსები, როგორც წესი, გამოიყენება შენობების გადასახურად, რომლებიც გვეგმით ტრაპეციულია. ამ გარსების დიზაინი და ტექნოლოგიური მახასიათებლები იგივეა, რაც გრძელი ცილინდრული გარსების.



სურათი 12. მოკლე ცილინდრული გარსების ტიპის პრიზმული კონსტრუქციები

⁹ (Calister & Rethwisch, 2013)



სურათი 13. a — საბორტო ელემენტებით; ბ — საბორტო ელემენტების გარეშე; 1-ფორმა-დიაფრაგმა; 2 - ფირფიტა; 3 — დაფის ელემენტი;

გრძელი ცილინდრული გარსების სტრუქტურული ფორმები: a - ჭურვები გვერდითი ელემენტებით ასაწყობი სხივების სახით (ჯვარედინი განყოფილება); ბ - ჭურვები გვერდითი ელემენტებით, რომლებიც წარმოადგენს ფირფიტების ნაწილს (ჯვარედინი განყოფილება); რ-ჭურვები გრძივი ჭრით ფილებად; / - დიაფრაგმის ელემენტები; 2 - ფირფიტები; 3 - დაფის ელემენტები

1.6 თაღიანი კონსტრუქციები

თხელკედლიანი თაღოვანი საფარი შედგება იმავე ტიპის თხელკედლიანი ელემენტებისაგან, რომლებიც აერთიანებენ ტვირთშიდ, შემომფარველ და ზოგჯერ ჰიდროსაიზოლაციო ფუნქციებს. შეკრების შემდეგ, ელემენტები ქმნიან ერთ დისტანციურ ცილინდრულ ან პრიზმულ თაღს, რომელიც შეესაბამება ცალკეული ელემენტების მონაკვეთებს. ასეთ სტრუქტურებით შეგვიძლია დაიფაროს თვითნებური სიგრძის შენობები. ყველაზე ხშირად ისინი მზადდება რკინაბეტონის ან რკინა ცემენტისგან. ასაწყობ ელემენტებში ყველაზე გავრცელებული თაღები, თუმცა არის ასაწყობი-მონოლითური და მონოლითური. გრძივი მიმართულებით თაღები შეიძლება იყოს მრუდი ან პრიზმული, განივი მიმართულებით - ტალღოვანი, დაკეცილი, კუპერული ან დახურული პროფილით. გრძივი და განივი კონტურების ფორმა დამოკიდებულია სტრუქტურის არქიტექტურულ, სტრუქტურულ და ტექნოლოგიურ თავისებურებებზე. სტრუქტურის დამაბვა აღიქმება ჩიხებით, სხივებით, რომელიც გადის სარდაფის გასწვრივ მის საყრდენ ადგილას შენობის სვეტებზე ან კედლებზე, ან საყრდენებზე. თაღის ელემენტები მათი ერთგვაროვნების გამო ყველაზე ხშირად იწარმოება ქარხანაში, მაგალითად, ვიბროფორმირებით. მონტაჟისათვის კი ხარაჩოების გარეშე შესაძლებელია აღნიშნული ელემენტებისგან კონსტრუქციის აშენება მხოლოდ ამწის გამოყენების საშუალებით.

მთლიანი შენობები შეიძლება დამზადდეს ტალღოვანი ან ტეხილი ზედაპირების მქონე ელემენტებისგან, რომლებიც ქმნიან სარდაფს შეკრების შემდეგ. ამავდროულად, საფარის დიზაინი ერთდროულად ასრულებს კედლის ღობის ფუნქციას. ბიძგი ამ შემთხვევაში აღიქმება სტრუქტურის იატაკის ქვეშ დაყენებული საძირკვლის ან პუფების საშუალებით. თაღოვანი შენობები აგებულია ძირითადად რკინაბეტონის ან რკინაცემენტის ელემენტებისაგან. რკინა ცემენტის გამოყენება ამცირებს კონსტრუქციის საკუთარ წონას და ზოგიერთ შემთხვევაში შესაძლებელს ხდის წყალგაუმტარი ხალიჩის მიტოვებას; იზოლაცია მიმაგრებულია სტრუქტურის შიგნით.

სარდაფების გრძივი და განივი მონახაზების არჩევანი ექვემდებარება არქიტექტურულ, კონსტრუქციულ და ტექნოლოგიურ მოთხოვნებს. ელემენტების¹⁰ერთგვაროვნება და მათი წარმოება ქარხანაში (ვიბროფორმირება, ვიბროკასტინგი ან სხვა) არის თაღოვანი სტრუქტურების მნიშვნელოვანი უპირატესობა.

დარბაზის ინტერიერში კედლის ჩამკეტი კონსტრუქციების და პუფების არარსებობა, ისევე როგორც ნებისმიერი სიგრძის კონსტრუქციების აღმართვის შესაძლებლობა, თაღოვანი შენობები ეკონომიკური თვალსაზრისით ერთ-ერთ ყველაზე ეფექტურს ხდის.

ასეთი დიზაინის გადაწყვეტილებების ნაკლოვანებები მოიცავს შენობის გაზრდილ მოცულობას, შენობის შუაში დიდ სიმაღლეს და მინიმუმს ბოლოებში. გარდა ამისა, თაღოვანი შენობების ასაშენებლად აუცილებელია საძირკვლის აშენება, რომელსაც შეუძლია შთანთქას ბიძგი მთელი სტრუქტურიდან.

სტრუქტურებს, რომლებიც წარმოიქმნება სივრცითი თაღების რიგებით, მრგვალი კვეთით, რომელიც აღწერილია წრიული ან პარაბოლური მრუდით, ეწოდება ლულისებრი გადახურვები. თაღების გრძივი ღერძის მონახაზი ყველაზე ხშირად პარაბოლურია. ლულისებრი გადახურვებს აქვს დიდი სიმყარე და სტაბილურობა. გადახურვები უპირატესად ასაწყობ-მონოლითურია. ცნობილია მონოლითური გადახურვები, რომლებიც დაბეტონებულია უშუალოდ სამშენებლო მოედანზე.

¹⁰ (Calister & Rethwisch, 2013) (Altenbach & Eremeyev, 2017) (Bednarczyk, Aboudi, & Arnold, 2017)

2. ძირითადი ნაწილი

სამშენებლო კონსტრუქციებში გამოყენებული სივრცითი

კონსტრუქციები

2.2 გარსები მაღალი სიხისტით

ხისტი გარსები არის სტრუქტურები, რომლებშიც დატვირთვის ქვეშ მყოფი მასალა განიცდის ერთგვაროვან ბიაქსიალურ დაზიანებას, უპირატესად შემკუმშავს. ხისტი გარსები შეიძლება დაიდგას ნებისმიერი კონფიგურაციის გეგმის შენობებზე (მართკუთხა, კვადრატული, მრგვალი, ოვალური და ა.შ.). ისინი მზადდება რკინაბეტონისგან, რკინაცემენტისგან, ლითონისგან, ხისგან, პლასტმასისგან და სხვა მასალებისგან, რომლებიც კარგად იღებენ შემკუმშავ ძალებს.

საქართველოში ქვეყანაში ძირითადად გამოიყენება ასაწყობი-მონოლითური რკინაბეტონის ჭურვები.

როგორც გამოცდილება გვიჩვენებს, ძალიან რთული კონფიგურაციის სტრუქტურებიც კი შეიძლება დაიყოს იმავე ტიპის რამდენიმე ელემენტად, ხოლო ელემენტებად ჭრა შეიძლება დაექვემდებაროს სამშენებლო კონსტრუქციისათვის ოპტიმალურ ფორმას.

სტრუქტურული სქემების მიხედვით, ხისტი გარსები იყოფა ჯვარედინისებრი გადახურვებად, დადებითი გამრუდების გარსებად, უარყოფითი გამრუდების გარსებად, ქოლგისებრგარსებად, გუმბათებად.

თითოეული ეს ტიპი შემდგომში იყოფა რამდენიმე ქვეტიპად. მაგალითად, გუმბათები განსხვავდება მასალის, დიზაინის მახასიათებლებისა და დამუშავების და სხვა პარამეტრების მიხედვით.

2.3 ჯვარედინი თაღები

ურთიერთგადამკვეთი თაღები არის გარსები, რომლებიც წარმოიქმნება ცილინდრული გარსების კონიუგაციის შედეგად, პერპენდიკულარული ან ერთმანეთის მიმართ კუთხით. სამშენებლო თვალსაზრისით ეს კონსტრუქცია, შეიძლება შესრულდეს როგორც კვადრატულ ან მართკუთხა გეგმილზე, ასევე სამკუთხა მრგვალ, ოვალურ და ა.შ.

ძველ დროში ჯვრისებრი თაღები საკმაოდ გავრცელებული იყო და შენდებოდა ძირითადად ქვისგან ან აგურისგან. დღესდღეობით ამ ტიპის კონსტრუქცია გამოიყენება, ძირითადად დიდი მალის ნაგებობებისთვის.

ურთიერთ გადამკვეთი თაღები არის სპაზერის სტრუქტურა. აქედან გამომდინარე, მშენებლების წინაშე დგას ამოცანა, რომლის არქიტექტურულმა და სტრუქტურულმა დეტალებმა უნდა აღიქვან სპაისერის ძალები. ეს შეიძლება იყოს კედლის ღიობის სიბრტყეში ან იატაკის ქვეშ გაშვებული ძაბვები, ასევე საყრდენები, რომლებიც დატვირთვას გადასცემს შენობის საძირკველს.

ჯვარედინი თაღები ყველაზე ხშირად აიგება მონოლითური ან ასაწყობი-მონოლითური რკინაბეტონისგან. ასაწყობ-მონოლითური ვერსიით, მიზანშეწონილია ჯერ ორი დიაგონალური თაღის დადგმა, შემდეგ კი თავად გარსის დამონტაჟება იმავე ტიპის ასაწყობი ელემენტებიდან. ცილინდრულ ზედაპირებზე ჯვარედინი სარდაფებში სახურავი ადვილად იდება და დრენაჟი კარგად იხსნება. მრავალსართულიან შენობაში გარსების გამოყენებისას, სვეტების ბაღე ხშირად იხსნება რამდენიმე მეტრით ან ეწყობა კონსოლებიანი კაპიტელები, რათა ერთმანეთისგან დაშორდეს და გამოიყენოს მათი ბოლო ზედაპირები ბუნებრივი განათებისთვის.

ამ თვალსაზრისით დიდი ინტერესს იწვევს პარიზში მრეწველობისა და ტექნოლოგიების ეროვნული ცენტრის სახურავი. ფაქტობრივად, შენობის კონსტრუქციული სქემა პირობითად შეიძლება მივაკუთვნოთ ჯვარედინ თაღებს. ის შედგება ჯვარედინი დიდი ზომის თაღოვანი სახურავისა და ჯვრის ფორმის თაღებისგან. ტალღოვანი ცილინდრული პროფილი ეყრდნობა სამ წერტილს, მიმდებარე წერტილებს შორის 218 მ მანძილით, თითოეული ელემენტი შედგება ნაწილებისგან, რომლებიც შეკრების შემდეგ წარმოქმნიან ორფენიან გარსს. ორივე რკინაბეტონის ფენა გამოყოფილია ერთმანეთისგან 1,8-დან 3 მ სიმაღლეზე გრძივი

და განივი დიაფრაგმებით. გარსის თითოეული ფენის სისქე 6,5 სმ-ია. სახურავის საყრდენები ერთმანეთთან დაკავშირებულია იატაკის ქვეშ განლაგებული წინასწარ დაჭიმული ძელებით. ორფენიანი გარსის სახით გადაწყდა გრენობლის ოლიმპიური ყინულის სასახლის გადახურვაც. ორი ცილინდრული გარსი იკვეთება სწორი კუთხით, ქმნიან ჯვარედინ თაღს, თუმცა, ცილინდრული გარსები განლაგებულია ერთმანეთის მიმართ სხვადასხვა სიმაღლეზე.



სურათი 14. მრეწველობისა და ტექნოლოგიების ეროვნული ცენტრი ქ. პარიზი

¹¹ (Altenbach & Eremeyev, 2017)

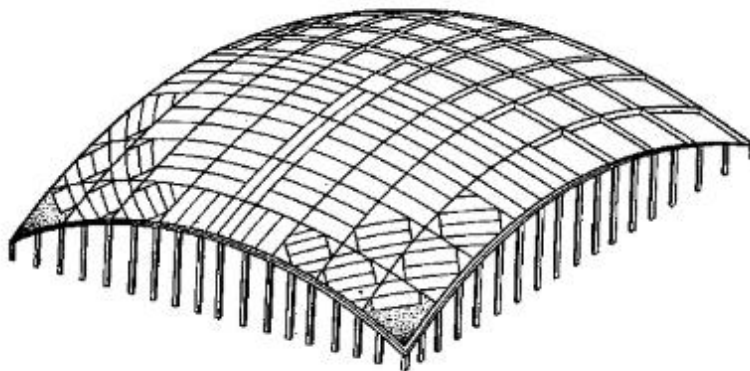
2.4 დადებითი სიმრუდის გარსები

ამ სახელწოდების გარსების ქვეშ, მოიაზრება გარსები, რომელთა შუა ზედაპირი აღწერილია წრის რკალის ღერძის გარშემო ბრუნვით (პარაბოლა, ელიფსი) ან გენერატრიქსის მრუდის პარალელური გადაადგილებით მრუდი მდგენელის გასწვრივ. ეს გარსები გამოიყენება სხვადასხვა გეგმის მქონე შენობებზე; კვადრატული, მართკუთხა, სამკუთხა და ა.შ. მრგვალ ან ოვალურ გეგმაზე ორმაგი სიმრუდის გარსების ნაირსახეობას წამოადგენს გუმბათები.

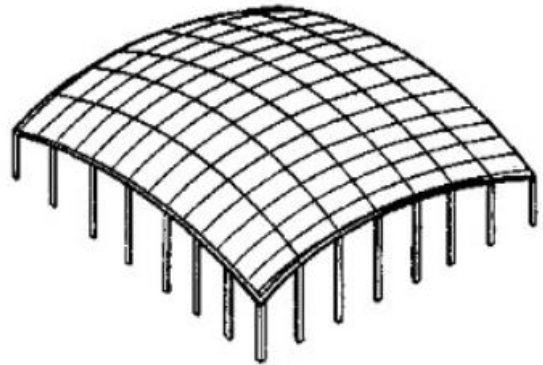
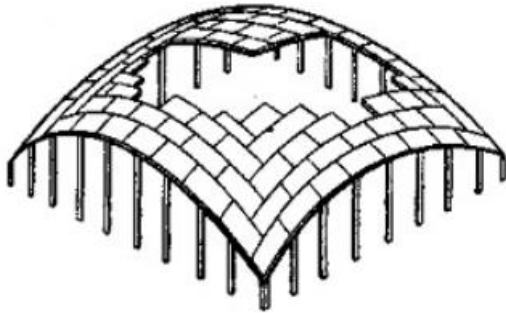
ორმაგი სიმრუდის გარსები შეიძლება დამზადდეს როგორც ბრტყელი, ასევე მრუდხაზოვანი კონტურით. ამ შემთხვევაში იცვლება არა მხოლოდ სტრუქტურის გეომეტრიული მახასიათებლები, არამედ მასში ძალების განაწილების სქემა. დადებითი სიმრუდის გარსები არქიტექტურულად ყველაზე გამომსახველია (სურ.3-8).

მათ ნაკლოვანებებს შორისაა შენობის გადაჭარბებული მოცულობა, სახურავის დიდი ზედაპირი და ყოველთვის არახელსაყრელი აკუსტიკური მახასიათებლების მქონე მასალები. სახურავის მოხსნისას სასურველია თავიდან იქნას აცილებული გადახურვის მასალის გამოყენება.

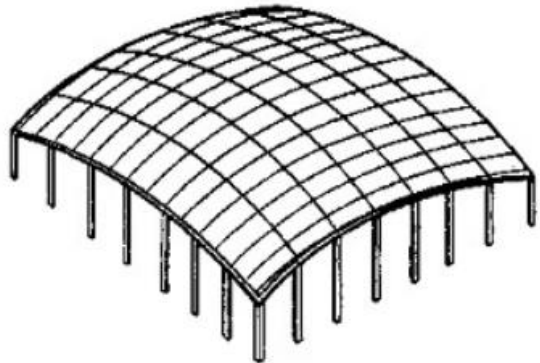
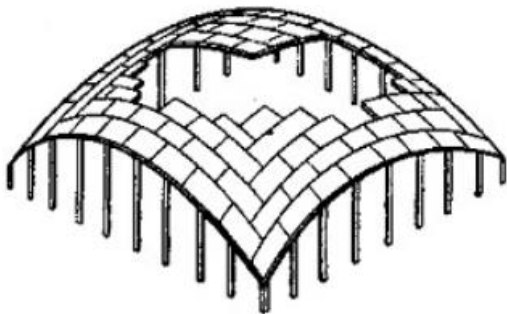
საფარში შესაძლებელია მსუბუქი ღიობების მოწყობა, ძირითადად, გარსების ცენტრალურ ზონაში. კონსტრუქციების დამზადება შესაძლებელია, როგორც მონოლითური, ასევე ასაწყობი-მონოლითური მეთოდით. მათი დამზადება მონოლითურ რკინაბეტონში ასოცირდება ხარაჩოების და ყალიბის მოწყობასთან, რაც შრომატევადია, ასევე მნიშვნელოვანი ბეტონისა და არმატურის სამუშაოები.

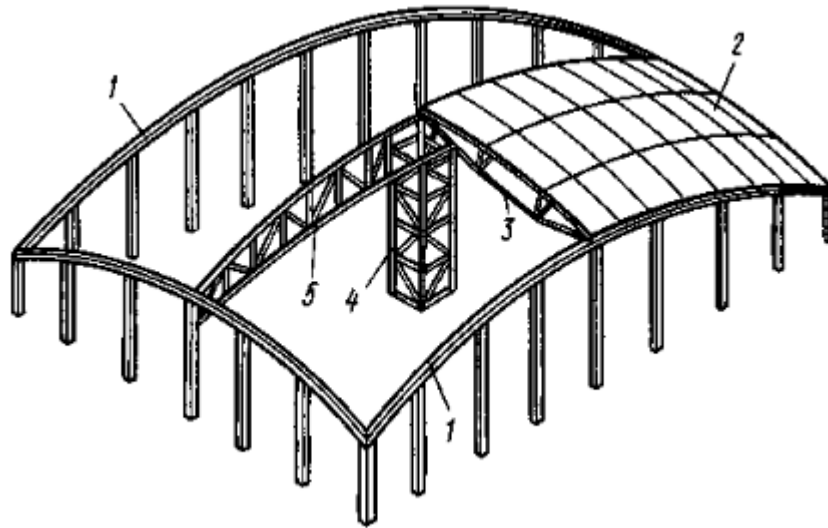


სურათი 15. ტიპური დადებითი სიმრუდის მქონე გადახურვა



სურათი 16. შუალედური ძელების მქონე დადებითი სიმრუდის მქონე გარსული გადახურვები





სურათი 17. შუალედური ძელების მქონე დადებითი სიმრუდის მქონე გარსული გადახურვების სტრუქტურა 1. კონტურული რიგელი; 2. ფილები; 3. დროებით შემკვრელი 4. დროებითი საყრდენი; 5. სამონტაჟო ფერმა

12

2.5 უარყოფითი სიმრუდის გარსები

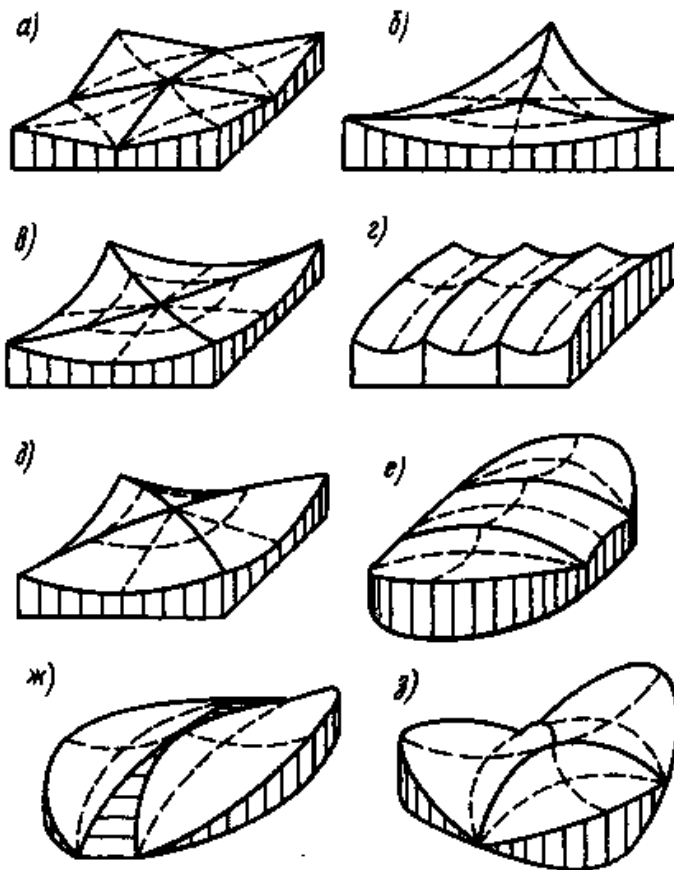
ორმაგი უარყოფითი სიმრუდის გარსების ფორმას შეიძლება ჰქონდეს ბრუნვითი ზედაპირი. ბრუნვითი ზედაპირის მაგალითია ბრუნვითი ჰიპერბოლოიდი, რომელიც წარმოიქმნება მისი წარმოსახვითი ღერძის გარშემო ჰიპერბოლის წრიული გადაცემით. გადაცემის ყველაზე გავრცელებული ზედაპირია ჰიპერბოლური პარაბოლოიდი (ჰიპარი). რაც შეეხება მართკუთხა გეგმას, ჰიპარის ზედაპირი შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც შედგება მართკუთხა გენერატორის ორი სისტემისგან და ორი სახელმძღვანელო პარაბოლების სახით, რომლებიც განლაგებულია მართკუთხედის დიაგონალების გასწვრივ, რომელთაგან ერთი ორიენტირებულია ამოზნექილობით ზემოთ და სხვა ქვევით. ზედაპირის წრფივობა, სტრუქტურის ერთ-ერთი უპირატესობა, შესაძლებელს ხდის სწორხაზოვანი ელემენტების ფორმირებას და მრუდის ზედაპირის დადებითი (სტატიკურად) თვისებების შენარჩუნებას, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ასეთი სტრუქტურების წარმოების გამარტივებისთვის. (სურ. 9 - 12).

¹² (Altenbach & Eremeyev, 2017)

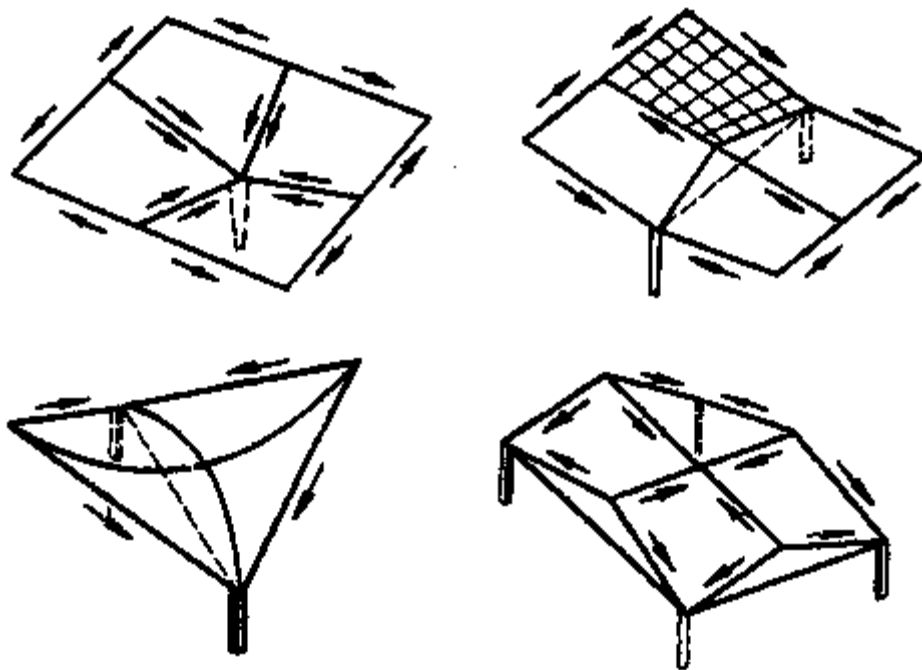
მოსკოვისა და ლენინგრადის ინსტიტუტებმა Promstroyproekt-მა და სამრეწველო შენობების ცენტრალურმა კვლევითმა ინსტიტუტმა შეიმუშავეს ასაწყობი მონოლითური გარსები სამრეწველო შენობებისთვის. ფილების გარდა, გარსების აგებისას გამოიყენება კონტურის ელემენტი სამკუთხა რკინაბეტონის ფერმის სახით.

უარყოფითი სიმრუდის გარსების სახით გადაჭრილი საზოგადოებრივი შენობების გადახურვები ყველაზე ხშირად იგება მონოლითურ რკინაბეტონში.

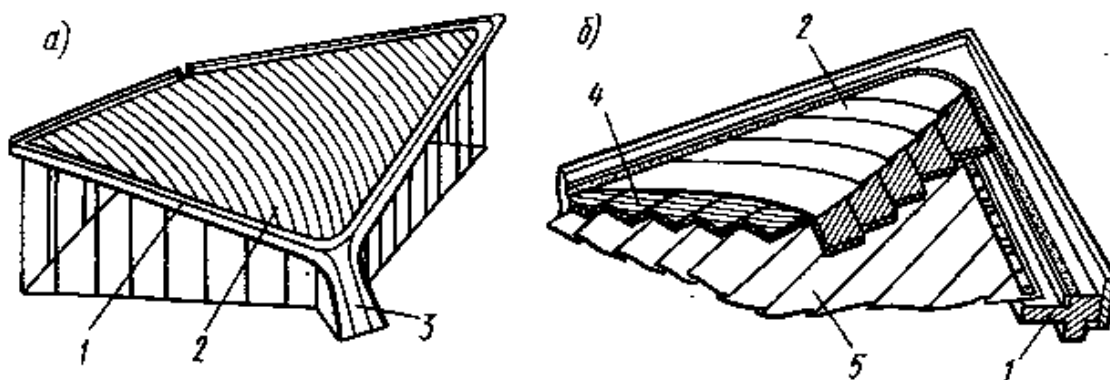
ესტონეთში აგებული ორმაგი უარყოფითი სიმრუდის გარსები, ასევე დამზადებულია მონოლითური რკინაბეტონისგან, მაგრამ ყოველგვარი წიბოებისა და დიაფრაგმის გარეშე. მათში არსებული დისპერსიის ძალები აღიქმება გარსების



სურათი 18. კომპოზიციური საფარის ზედაპირის ფორმა:(a, d, f, g, h) უარყოფითი გაუსის გამრუდება;b, c, e - ნულოვანი გაუსის გამრუდება



სურათი 19. კომპრესიული ძალების მიმართულება კონტურულ ელემენტებში დამოკიდებულია ჰიორთელის დამხმარე სისტემაზე



სურათი 20. ლენტის უნაგირის გარსი (ა) და მისი ფრაგმენტი (ბ):

1 - საცნობარო კონტური; 2 - სტაბილიზაციის ფირები; 3 - პილონი; 4 - იზოლაცია; 5 - გადამზიდავი ლენტები¹³

¹³ (Прядко Н.В., 2019)

2.6 ქოლგისებრი გარსები

თხელკედლიანი ქოლგისებრი გარსები მიეკუთვნება ციკლურ სიმეტრიულ სივრცით სტრუქტურებს, რომლებიც წარმოიქმნება მრავალი მსგავსი ელემენტისგან. ელემენტების შუა ზედაპირების კვეთა ქმნის მრუდებს, რომლებიც ქმნიან ბრუნვით ზედაპირებს. ქოლგისებრი გარსები იყოფა ქოლგისებრ გუმბათებად და ქოლგისებრ გარსებად. მათ აქვთ მაღალი სიმტკიცე, მდგრადობა, არქიტექტურული ექსპრესიულობა.

მათი გამოყენება მშენებლობაში ცნობილი იყო უძველესი დროიდან (ვილა ტივოლში, 134 წ.). თანამედროვე პრაქტიკაში ქოლგისებრი გარსები მზადდება რკინაბეტონისგან და მათი ფარგლები მნიშვნელოვნად გაფართოვდა. ბუქარესტის ცირკი დაფარული იყო ასაწყობი მონოლითური ქოლგისებრი გარსით. 71,5 მ დიამეტრის და 20,3 მ სიმაღლის გუმბათი აწყობილია 16 ელემენტისგან, რომლებიც ეყრდნობიან რკინაბეტონის რადიალურ ჩარჩოებს. ასაწყობი მონოლითური ქოლგისებრი გარსიდან უნდა აღინიშნოს თბილისში, მეტროსადგურ ისნის მიწისქვეშა პავილიონის ოთხ საყრდენზე დაყრდნობილი გარსი. მისი ზომები გეგმაში არის 30 - 40 მ, სიმაღლე 5 მ, მონოლითურად დამზადებულ გარსს აქვს ცვლადი სისქე 60-დან 100 მმ-მდე.

2.7 გუმბათები

გუმბათი ერთ-ერთი ყველაზე შესწავლილი სივრცითი ნაგებობაა, რომელიც უძველესი დროიდან გამოიყენებოდა სამოქალაქო შენობებში.

გუმბათი წარმოიშვა აღმოსავლეთის ქვეყნებში და უპირველესად უტილიტარული მნიშვნელობის იყო. ხის არარსებობის შემთხვევაში, თიხისა და აგურის გუმბათები საცხოვრებელი ფართის სახურავად გამოიყენებოდა. თანდათან, განსაკუთრებული ესთეტიკური და ტექტონიკური თვისებების გამო, გუმბათმა, როგორც სამშენებლო კონსტრუქციამ, დამოუკიდებელი სემანტიკური მნიშვნელობა შეიძინა.

ეგვიპტესა და საბერძნეთისგან განსხვავებით, ძველ რომსა და შუა აზიაში გუმბათის სახურავი ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული იყო.

პანთეონის გუმბათი (ძვ. წ. 115-125 წწ.) ანტიკური ხანის სამშენებლო ხელოვნების უდიდესი მონაპოვარია. გუმბათის აგურის კონსტრუქცია დიამეტრით 43,2 მ იყო.

ბიზანტიის (აღმოსავლეთ რომის იმპერიის) ეპოქა გამოირჩევა კიდევ უფრო თამამი გუმბათოვანი სახურავების აგებით.

მასალა, რისგანაც მზადდება გუმბათის სახურავი, გავლენას ახდენს როგორც დიზაინის სქემაზე, ასევე სტრუქტურის აგების მეთოდზე. აქედან გამომდინარე, ჩვენ განვიხილავთ გუმბათის სახურავებს, გამოყენებული მასალისა და გუმბათის კონსტრუქციული სქემის მიხედვით.

გუმბათოვანი კონსტრუქციები, რომლებიც წარმოადგენს ორმაგი სიმრუდის გარსებს განსაკუთრებული შემთხვევაა, ისინი საპროექტო სქემების მიხედვით იყოფა გლუვ (მონოლითურ), წიბოიან, წიბოიან-რგოლოვან და ბადისებრ ღეროებად.

ასეთი გუმბათების მთავარი კონსტრუქციული უპირატესობა ისაა, რომ გარე დატვირთვა დაბალანსებულია მათი ზედაპირზე სხვადასხვა მიმართულებით, ამავდროულად კონსტრუქციაში იქმნება გარსული ზედაპირის მიმართ შედგენილი, ნორმალური ძაბვები, ხოლო ღუნვა მოქმედებს მხოლოდ გუმბათის ზედაპირის შედარებით მცირე უბნებზე. ჩვეულებრივ, მოხრის ძაბვები უგულვებელყოფილია და მთელი გუმბათი გამოითვლება ეგრეთ წოდებული დაძაბულობის მდგომარეობის მიხედვით. გუმბათის სისქე იანგარიშება მდგრადობის პირობიდან და ყველაზე ხშირად არის გამრუდების რადიუსის $1/600$, მაგრამ არანაკლებ 50 მმ. იმ ადგილას, სადაც გუმბათი ესაზღვრება საყრდენ რგოლს, შეხების ზედაპირის მართობული მონაკვეთი სქელდება.

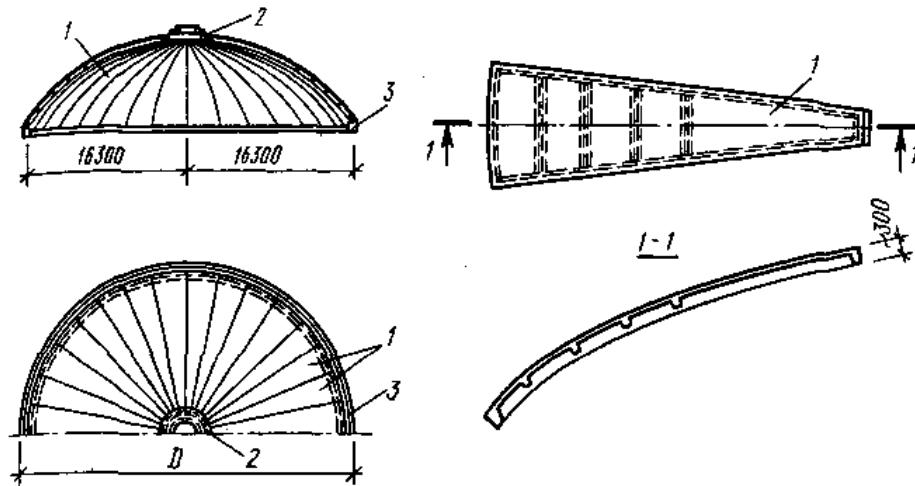
გლუვი მონოლითური გუმბათის საილუსტრაციო მაგალითია ნოვოსიბირსკში ოპერის თეატრის სახურავი. 60 მ დიამეტრის და 8 სმ სისქის გუმბათი, რომელიც აშენდა 1930-იან წლებში, დიდი ხნის განმავლობაში შეუდარებლობის მაგალითად რჩებოდა.

საზღვარგარეთ აშენებული მონოლითური გუმბათებიდან საინტერესოა ურბანის (აშშ) უნივერსიტეტის დარბაზის დაკეცილი გუმბათი წინასწარ დაძაბული საყრდენი რგოლით. მისი სიგრძეა 121,4 მ, ხოლო კონსტრუქციის სიმაღლე 20,8 მ.

რკინაბეტონის წიბოებიანი გუმბათები, როგორც წესი, მზადდება პანელ-სექტორებისგან, რომლებიც ჩამაგრებულია ზედა და ქვედა საყრდენ უბნებზე. ასეთი გუმბათების დიამეტრი შემოიფარგლება აგების, ტრანსპორტირებისა და

წიბოებიანი პანელების დამონტაჟების შესაძლებლობით. პანელები დამონტაჟებულია ცენტრალური საყრდენის გამოყენებით, რომელიც ეყრდნობა ზედა დამხმარე სარტყელს. ამ შემთხვევაში, ქვედა (გაჭიმული) სარტყელი უკვე აწყობილია ასაწყობი ელემენტებისაგან ან დამზადებულია მონოლითური რკინაბეტონით. ყველა პანელ-სექტორის დამონტაჟების შემდეგ, მათ შორის ნაკერები ივსება მონოლითური ბეტონით. ამ ტიპის გუმბათების უპირატესობებში შედის ელემენტების ერთგვაროვნება (მხოლოდ ერთი სტანდარტული ზომა) და ინსტალაციის შესაძლებლობა დამხმარე ხარაჩოების გარეშე, მაგრამ მათი დიამეტრი შეზღუდულია. ასეთი სტრუქტურების მაგალითებია კიევის მეტროსადგურის გუმბათი. სხვადასხვა სახის წიბოებიანი გუმბათები არის ტეხილი ზედაპირების მქონე გუმბათები, რომლებსაც აქვთ გაზრდილი სიმტკიცე ტეხილი ფორმის გამო. უცხო ქვეყნების შენობებიდან ყურადღებას იმსახურებს რომის სპორტის სასახლის გუმბათი, დიამეტრით 122 მ და სიმაღლე 21 მ, რომელიც აწყობილია რამდენიმე ზომის ტალღოვანი პროფილის 1620 ცალი, 25მმ სისქის არმოცემენტის ელემენტისგან და დაყოფილია 36 სექტორად. 1960 წლის ოლიმპიური თამაშების შენობის სახურავი 40 დღეში დამონტაჟდა. რკინაბეტონის წიბოვანი გუმბათები შესაფერისია შენობებისთვის და სტრუქტურებისთვის, რომელთა დიამეტრი 36 მ-ზე მეტია. ამ კონსტრუქციებში წიბოები თავის თავზე იღებენ მერიდიალურ და ტანგენციალურ ძალებს. მათი აწყობა შესაძლებელია რამდენიმე სტანდარტული ზომის ბრტყელი პანელებისგან, დამხმარე ხარაჩოების გარეშე. დონეცკის ბაზრის გუმბათი, რომლის დიამეტრი 37,1 მ და მისი ამწევი თალი 13,2 მ-ია, აწყობილი იყო ტრაპეციული პანელებისგან, მცირე ზომის მობილური თაროების გამოყენებით. კიევის ცირკის გუმბათი 42,3 მ დიამეტრით (ამწევი თალი 7,7 მ), დაყოფილია ხუთ იარუსად, დამზადებულია ხუთი ზომის პანელებისგან დაკიდების გზით - საყრდენის პერიმეტრის გარშემო დამონტაჟებული ხის თაროების დახმარებით. რგოლი და ლითონის თარგი, რომელიც ემსახურებოდა დამონტაჟებული პანელის დროებით დაჭერას და მისი პოზიციის გასწორებას. პანელის გადახურული ბოლო მიმაგრებული იყო თაროზე დახრილი საკიდებით, ბორბლებით, ხოლო ფერმა გადადიოდა შემდეგ პოზიციაზე.¹⁴

¹⁴ (Прядко Н.В., 2019)



სურათი 21. დიდი ზომის ცილინდრული ფილებისგან დამზადებული გუმბათები: 1 - ფილა; 2 - ზედა სარტყელი; 3 - ქვედა საყრდენი სარტყელი.

2.8 რეგულარული სისტემების სტრუქტურები

რეგულარული სისტემების სივრცითი სტრუქტურები მოიცავს სტრუქტურის ტიპებს, რომლებიც მუშაობენ მკუმშავ ან დამჭიმავ ძალებზე, ამის გარდა აღნიშნული სტრუქტურები აერთიანებენ რეგულარული გისოსებისგან შემდგარ კონსტრუქციებს, რომლებიც მუშაობენ მლუნავ ძალებზე.

რეგულარული სტრუქტურების სისტემების გამოიყენება არა მხოლოდ საიზოლაციო, არამედ ჭერის, და საძირკვლის კონსტრუქციების შესაქმნელად.

სამშენებლო კონსტრუქციებად გამოყენებულ რეგულარულ სტრუქტურულ სისტემებს აქვთ მრავალი დადებითი თვისება, რაც განასხვავებს მათ სხვა სამშენებლო კონსტრუქციული გადაწყვეტილებებისგან.

რეგულარულ სისტემებს შეუძლიათ გადაფარონ თითქმის ნებისმიერი სტრუქტურის გეგმა, შეითავსონ სტრუქტურაში საჭირო ხვრელები, თავისუფლად განალაგონ საყრდენები, შექმნან კონსოლური გადახურვები და ა.შ.

სამშენებლო გეგმის უპირატესობებში შედის კონსტრუქციების შენობის შედარებით დაბალი სიმაღლე, რომელიც აღწევს გადახურული სიგრძის $1/25 - 1/35$, აგრეთვე საფარის მეშვეობით ბუნებრივი განათების მოწყობის შესაძლებლობას (საზენიტო

სინათლის გამოყენება- აერაციის ნათურები), სტრუქტურული ბრტყელი სახურავი, მინიმალური მოცულობა და გადახურვის სიმარტივე.

კონსტრუქციული თვალსაზრისით, საკმაოდ მიზანშეწონილია რეგულარული სტრუქტურის სისტემების გამოყენება მშენებლობაში. წნელები ან ფირფიტები, რომლებიც ქმნიან სტრუქტურას, განიცდიან, როგორც წესი, ცალღერძულ მკუმშავ-დამჭიმავ ძალებს. სამშენებლო კონსტრუქციის სიმტკიცე უზრუნველყოფილია კონსტრუქციული გისოსებით. შედარებით მცირე გისოსიანი მოედანი იძლევა მსუბუქი იატაკის გამოყენების საშუალებას, ზოგიერთ შემთხვევაში კი შემოფარგლული სტრუქტურა შეიძლება ჩართული იყოს ფილის ზედა სარტყლის მუშაობაში.

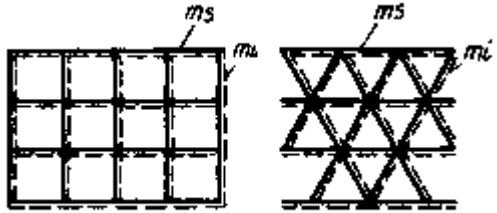
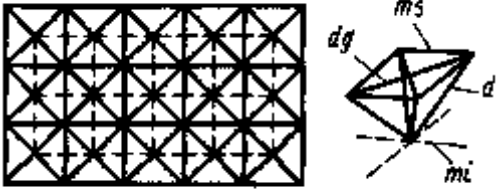
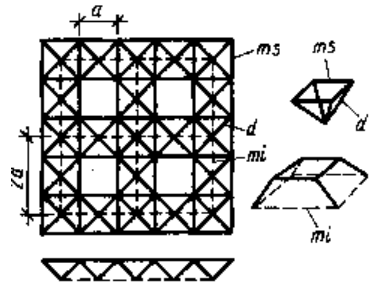
რეგულარული სისტემების სტრუქტურები კარგად მუშაობენ კონცენტრირებულ დატვირთვებზე და ეს შესაძლებელს ხდის სტაციონარული ამწე აღჭურვილობის გამოყენებას. უპირატესობებში ასევე შედის ძირითადი ელემენტების მარტივი წარმოება, მათი ქარხნული მზაობის ხარისხის მნიშვნელოვანი მატება, პროდუქციის ერთგვაროვნება და მათი ფართო გაერთიანების შესაძლებლობა არა მხოლოდ ცალკეული სტრუქტურებისთვის, არამედ შენობებისთვისაც სხვადასხვა სიგრძით, დატვირთვით და ჩამაგრების სქემების მიხედვით.

რეგულარული სტრუქტურები ადვილად ტრანსპორტირებადია და საშუალებას იძლევა კონტეინერებში ყველა საფარის ელემენტის ტრანსპორტირება. მათი მარტივად და სწრაფად აწყობა შესაძლებელია როგორც უშუალოდ დიზაინის დონეზე, ასევე მშენებარე სტრუქტურის მახლობლად.

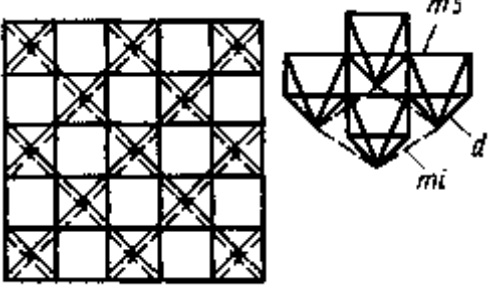
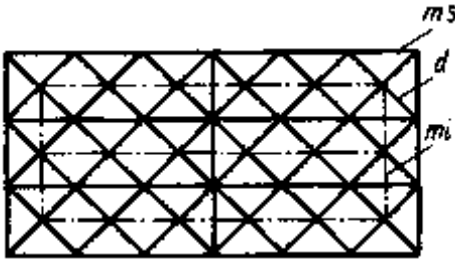
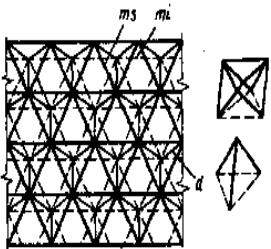
აღსანიშნავია სტრუქტურების შესაძლო დემონტაჟი მისი შემდგომი აწყობით ახალ ადგილას. ასეთი გადაწყვეტილებები განსაკუთრებით სასარგებლოა ძნელად მისადგომ ადგილებში, სადაც ელემენტების მიწოდება შესაძლებელია მცირე ზომის კონტეინერებში, აწყობა სტრუქტურებში და შემდეგ დაშლა და გადატანა ახალ ადგილას.

რეგულარული სტრუქტურებისთვის იგივე ტიპის ელემენტების კარგად დამკვიდრებული წარმოება შესაძლებელს ხდის არა მხოლოდ ერთი კონკრეტული ტიპის საფარის წარმოებას, მაგალითად, ფილების, არამედ აღჭურვილობის მხოლოდ მცირე რეორგანიზაციის გამოყენებით, ელემენტების წარმოებას

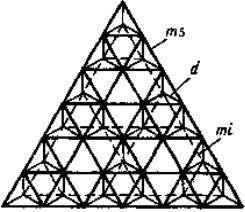
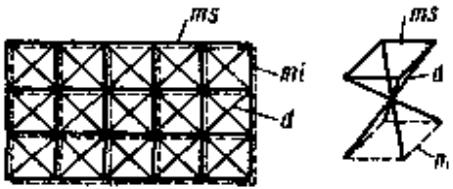
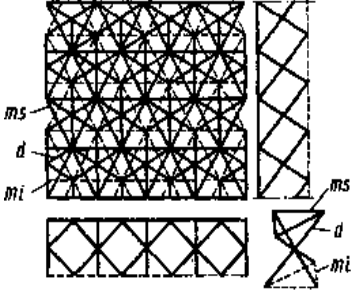
სარდაფებისთვის, გუმბათებისთვის, ორმაგი გამრუდების ჭურვები და ა.შ. ლოგიკურად გამართლებული და ეკონომიკურად გამართლებული კონსტრუქციების გამოყენება იწვევს მასალის მოხმარების შემცირებას 10-20%-ით, სამშენებლო ობიექტზე შრომის ხარჯების შემცირებას 15-25%-ით და ტერმინების შემცირებას.

აღნიშვნა	კონსტრუქციული თავისებურებები	დეროვანი სქემა
1	<p>ჯვარედინი ფერმები ორი ან სამი მიმართულებით, ვერტიკალური მონტაჟის შესაძლებლობით</p>	
2	<p>სარტყელების ორთოგონალური ბადეები გადაადგილებულია უჯრედის ნახევრით. ქამრის უჯრედები შეიძლება იყოს ან არ იყოს სავსე დიაგონალურებით</p>	
3	<p>მე-2 სისტემის მსგავსი, იშვიათი ქვედა სარტყლის ბადით და ნაწილობრივ შემცირებული დიაგონალური ბადით</p>	

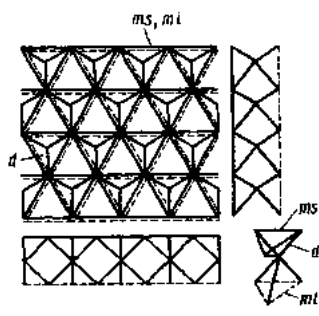
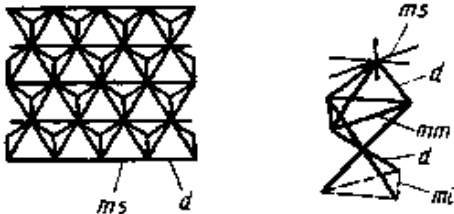
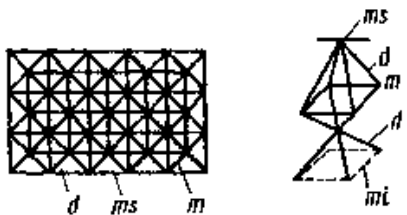
ცხრილი 1. რეგულარული სისტემების სტრუქტურების სახეები (ნაწილი 1)

აღნიშვნა	კონსტრუქციული თავისებურებები	ღეროვანი სქემა
1	სარტყელების ორთოგონალური ბადეები განთავსებულია ერთმანეთის მიმართ 45°-ით. განტვირთული დიაგონალური გისოსის	
2	დაკეცილი სისტემა, სარტყელები განლაგებულია ძირითადად ერთი მიმართულებით და გადაადგილებულია უჯრედის ნახევარით	
3	სარტყეის ბადეები სამი მიმართულებით გადაადგილებულია უჯრედის ნახევარით	

ცხრილი 2. რეგულარული სისტემების სტრუქტურების სახეები (ნაწილი 2)

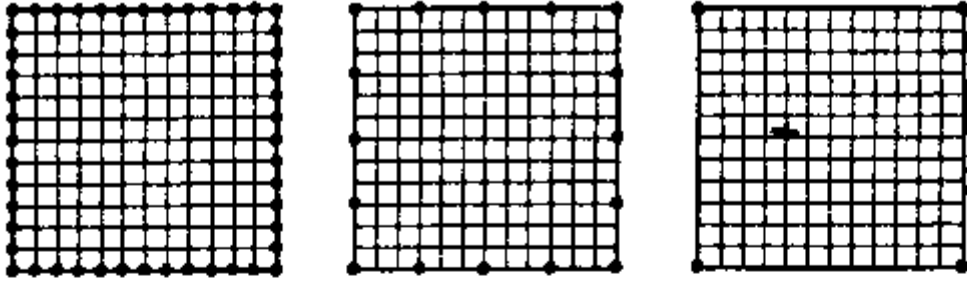
აღნიშვნა	კონსტრუქციული თავისებურებები	დეროვანი სქემა
1	სამი მიმართულების ქამრების ბადეები გადაინაცვლა. ქვედა ბადე მწირია და ქმნის ექვსკუთხა უჯრედებს. გისოსები ასევე მწირია	
2	ორსაფეხურიანი კონსტრუქციული ფილები ერთმანეთის საპირისპიროდ დაწოლილი ქამრების ორთოგონალური ბადეებით, ერთი და იგივე უჯრედის კუთვნილი ბრეკეტები იკვეთება	
3	ორსართულიანი კონსტრუქციული ფილა სარტყელი ბადეებით სამი მიმართულებით ერთმანეთის საპირისპიროდ.	

ცხრილი 3. რეგულარული სისტემების სტრუქტურების სახეები (ნაწილი 3)

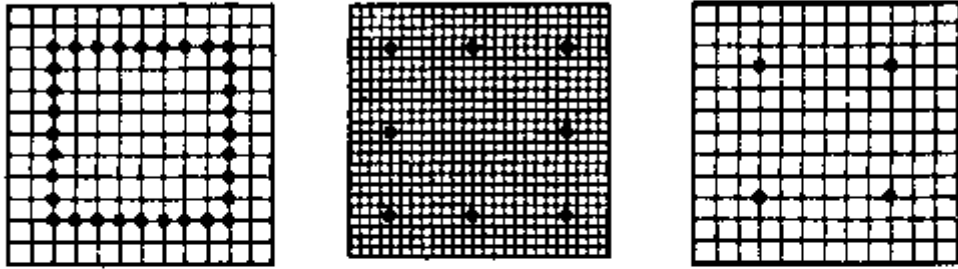
აღნიშვნა	კონსტრუქციული თავისებურებები	ღეროვანი სქემა
1	<p>ორსაფეხურიანი სტრუქტურული ფილა აკორდების ბადეებით სამი მიმართულებით, გადაადგილებულია უჯრედის ნახევარით. ერთი და იგივე უჯრედის კუთვნილი ბრეკეტები იკვეთება</p>	
2	<p>სამსაფეხურიანი კონსტრუქციული ფილა ორთოგონალური აკორდის ბადეებით. ზედა და ქვედა ქამრების ბადეებს შორის არის შუა (მესამე) ქამრის ბადე. ბრეკეტები იკვეთება შუა და ქვედა სარტყლის ბადეებს შორის</p>	
3	<p>სამსაფეხურიანი კონსტრუქციული ფილა ქამრების ბადეებით სამი მიმართულებით შუა (მესამე) ქამრის ბადის არსებობით</p>	

ცხრილი 4. რეგულარული სისტემების სტრუქტურების სახეები (ნაწილი 4)

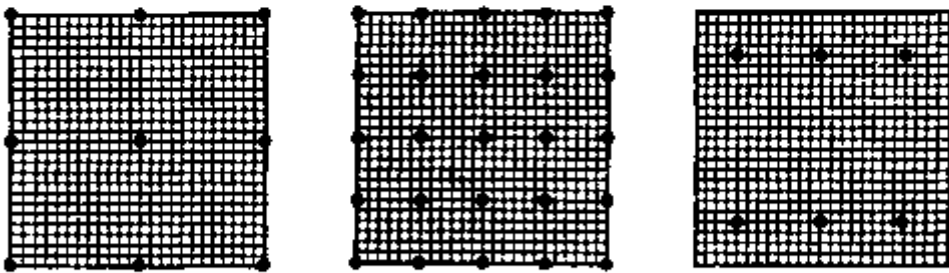
a)



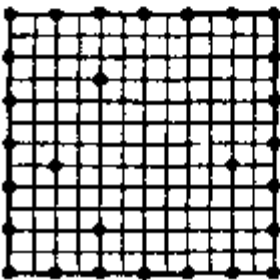
ბ)



გ)



დ)



სურათი 22. სტრუქტურული ფილების დაყრდნობის სქემები

რეგულარული სისტემების სტრუქტურების გამოყენებით შესაძლებელია ღირებულების შემცირება 10-20%-ით. რეგულარული სტრუქტურების სისტემები უკიდურესად მრავალფეროვანია და განსხვავდება ერთმანეთისგან მრავალი ფაქტორით. დიზაინის მიხედვით, ეს შეიძლება იყოს ფილები, გარსები, გუმბათები, და ა.შ.

ეს სისტემები კლასიფიცირდება როგორც მასობრივი ან ინდივიდუალური გამოყენების სტრუქტურები, რომლებიც განკუთვნილია სამრეწველო, საზოგადოებრივი, სასოფლო-სამეურნეო ან სხვა ტიპის შენობებისთვის. სტატიკური სამუშაოების მიხედვით, ისინი იყოფა ღეროებად (შედგება რეგულარულად განლაგებული ღერძულად დაკავშირებული ღეროებისგან) და ლამელარებად, რომლებიც დამზადებულია ცალკეული თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციებისგან.

აღნიშნული სამშენებლო კონსტრუქციების დამზადება შესაძლებელია ფოლადის და ალუმინის, რკინაბეტონის და რკინა ცემენტის, ხის და პლასტმასისგან. მშენებლობისთვის. წნელებისა და ფირფიტების სახსრების მიხედვით, რეგულარული სტრუქტურები იყოფა : შედუღებულ, ჭანჭიკებიან და შერეული სახსრებიან სტრუქტურებად.

რეგულარული სტრუქტურის სისტემები განსხვავდება ზედა და ქვედა აკორდების ღეროების განლაგებით კვადრატულ, სამკუთხა, ექვსკუთხა, ალმასის ფორმის და სხვა უჯრედებად; ზედა და ქვედა აკორდების ღეროების ორთოგონალური, დიაგონალური ან სხვაგვარი განლაგებით გეგმაში, ერთი აკორდის სხვადასხვა გადაადგილებით მეორესთან შედარებით და ა.შ.

აწყობისა და მონტაჟის თვალსაზრისით, სტრუქტურები იყოფა ხაზოვანი და კვანძოვანი ელემენტებისგან აწყობილ სტრუქტურებად და ასაწყობი სივრცული ბლოკებიდან და დამაკავშირებელი ელემენტებიდან აწყობილ სტრუქტურებად.

რეგულარული სტრუქტურის სისტემები შეიძლება გამოყენებულ იქნას შენობების საფარებში, როგორც იატაკი ასევე საძირკვლის კედლების შემოსაღობად.

ამ სტრუქტურების გამოყენების რაციონალური არეალი ძალიან ვრცელია. მათი გამოყენება შესაძლებელია სხვადასხვა ტიპის დარბაზებისთვის კომერციული და

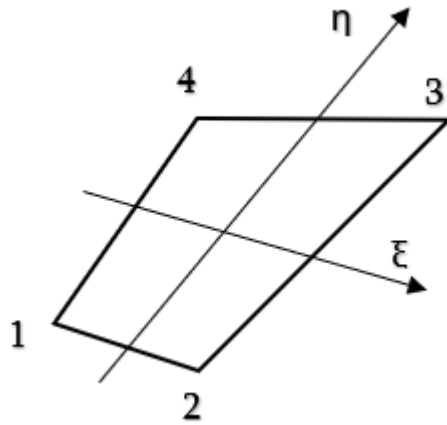
საყოფაცხოვრებო და სპორტული და გასართობი დიდი ფართობის მქონე შენობებისათვის. რეგულარული სტრუქტურის მქონე სისტემების სამშენებლო მახასიათებლები მჭიდროდ არის დაკავშირებული სხვა ფაქტორებთან, რომლებიც მნიშვნელოვნად მოქმედებს კონკრეტული გადაწყვეტის არჩევანზე. ეს ფაქტორები მოიცავს დაგეგმვის მოსაზრებებს, მშენებარე შენობის ფუნქციურ მახასიათებლებს (საკომუნიკაციო საფარში განთავსება, ყალბი ჭერის საჭიროება და ა.შ.), არქიტექტურულ მოთხოვნებს შენობის ინტერიერისა და ექსტერიერის მიმართ, გადაწყვეტის განმეორებადობის საკითხებს, სტრუქტურული ელემენტების წარმოებისთვის აღჭურვილი საწარმოო ბაზის არსებობა, სტრუქტურის აწყობის დრო და ადგილი და ბოლოს ტექნიკური და ეკონომიკური მოსაზრებები.

რეგულარული სისტემების, სტრუქტურების გამოყენებით კონკრეტული ობიექტების დაპროექტებისას მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორი, რომელზედაც დამოკიდებულია სტრუქტურის ტიპის არჩევანი.

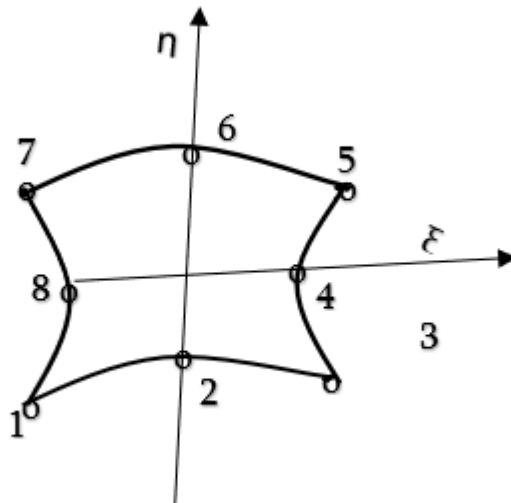
2.9 იზოპარამეტრული ელემენტები სასრულ ელემენტთა მეთოდში

იზოპარამეტრული ელემენტების კლასიფიცირება სასრულ ელემენტთა მეთოდისთვის, სასრულ ელემენტთა მეთოდში შედეგების სიზუსტის გაუმჯობესების მიზნით FEM-ში დაინერგა ე.წ. IZOPARAMETRIC ELEMENTS. სახელწოდება მომდინარეობს იქიდან, რომ ფორმისთვის (გეომეტრია) გამოიყენება იგივე ფორმის ფუნქცია, როგორც გადაადგილების ფუნქცია. კიდევ ერთი ტიპური მახასიათებელია ტრანსფორმაცია ერთეულის ფორმაში.

იზოპარამეტრული სასრული ელემენტები იყოფა ძირითად ქვე ჯგუფებად.

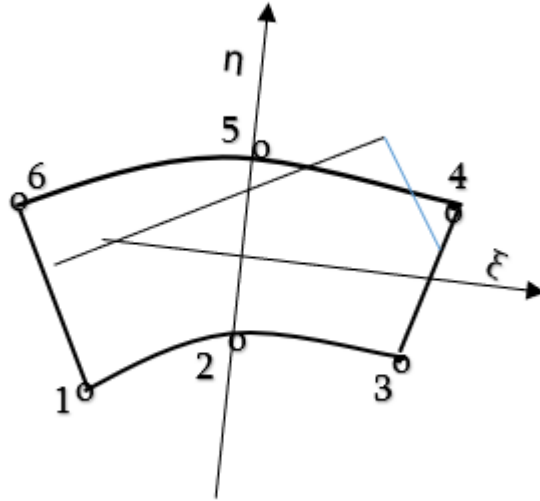


¹⁶სურათი 23. წრფივი

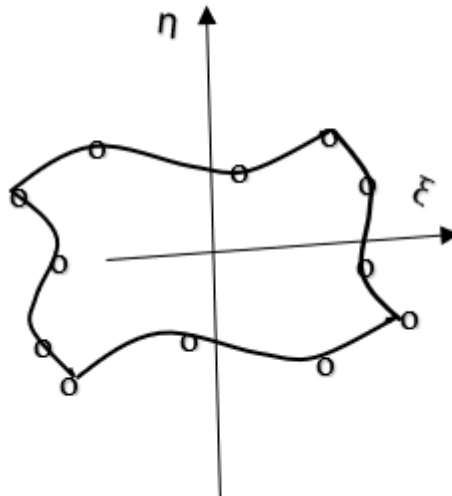


სურათი 24. კვადრატული ელემენტი

¹⁶ (Calister & Rethwisch, 2013) (Cook, 1995)



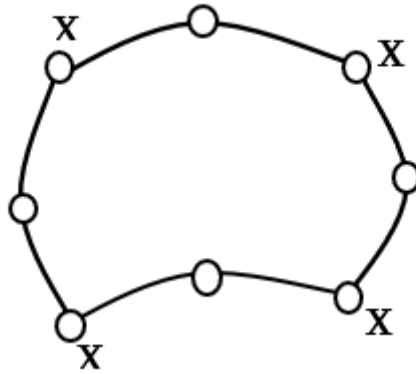
სურათი 25. ფორმის ფუნქციის შერული ფორმა



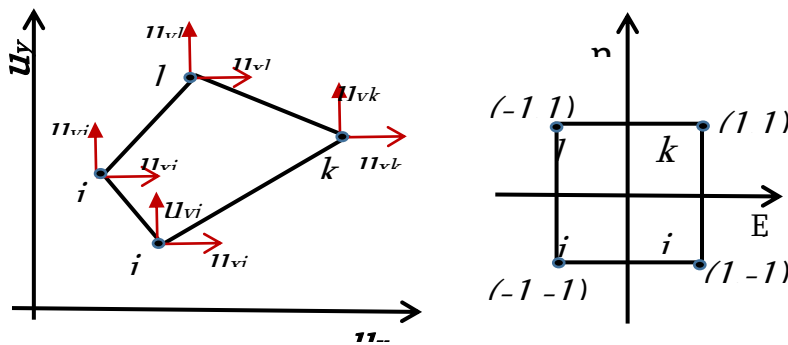
სურათი 26. კუბური ელემენტი

იზოპარამეტრული ელემენტის ფორმის ფუნქციის კვანძების რაოდენობა შეიძლება განსხვავებული იყოს გეომეტრიისა და გადაადგილების განსაზღვრისათვის.

შემდეგ არსებობს შემდეგი სახის კომბინაციები.



სურათი 27. O - კვანძები გეომეტრიის ფორმის ფუნქციისთვის; X - კვანძები გეომეტრიის გადაადგილების ფუნქციისთვის



სურათი 28. ოთხ კვანძიანი იზოპარამეტრული ელემენტი

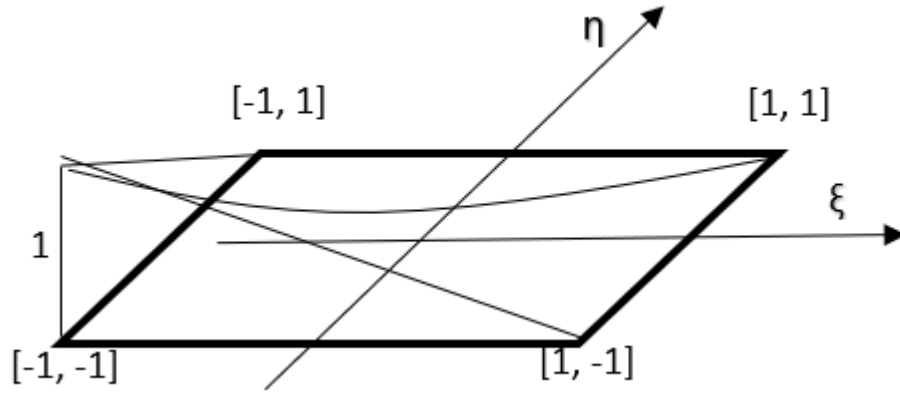
ფორმის ფუნქციას გადაადგილებისათვის ექნება შემდეგი სახე

$$\psi_r(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi_r \xi)(1 + \eta_r \eta) \quad r = i, j, k, l$$

i კვანძისთვის $\xi_r = -1$ $\eta_r = -1$

მაშინ

$$\psi_i = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)$$



ნებისმიერი ფუნქციისათვის .

$$P(\xi, \eta)$$

მაშინ

$$P(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) P_i + \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) P_j + \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) P_k + \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) P_l = \sum_{r=i,j,k,l} \psi_r P_r$$

$$y(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) y_i + \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) y_j + \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) y_k + \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) y_l = \sum_{r=i,j,k,l} \psi_r y_r$$

ანალოგიური სახე ექნება u_x , u_y გადაადგილების ფუნქციებისთვის

$$u_x(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) u_{xi} + \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) u_{xj} + \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) u_{xk} + \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) u_{xl} = \sum_{r=i,j,k,l} \psi_r u_{xr}$$

$$u_y(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) u_{yi} + \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) u_{yj} + \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) u_{yk} + \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) u_{yl} = \sum_{r=i,j,k,l} \psi_r u_{yr}$$

გადაადგილება არის კოორდინატების წრფივი ფუნქცია, დეფორმაცია და ძაბვა მუდმივია ელემენტზე.

გადაადგილების ვექტორი მატრიცის სახით იქნება

$$\{\mathbf{u}\} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_i & \mathbf{0} & \Psi_j & 0 & \Psi_k & \mathbf{0} & \Psi_l & 0 \\ \mathbf{0} & \Psi_i & 0 & \Psi_j & \mathbf{0} & \Psi_k & 0 & \Psi_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \\ u_{xj} \\ u_{yj} \\ u_{xk} \\ u_{yk} \\ u_{xl} \\ u_{yl} \end{Bmatrix}$$

სიბრტყის დამაბულობის პირობების შესაბამისი დამაბულობის ვექტორი არის:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_i & \mathbf{0} & \Psi_j & 0 & \Psi_k & \mathbf{0} & \Psi_l & 0 \\ \mathbf{0} & \Psi_i & 0 & \Psi_j & \mathbf{0} & \Psi_k & 0 & \Psi_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \\ u_{xj} \\ u_{yj} \\ u_{xk} \\ u_{yk} \\ u_{xl} \\ u_{yl} \end{Bmatrix}$$

17

გაწარმოების შედეგად მივიღებთ

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [\mathbf{B}]\{\mathbf{u}\} =$$

¹⁷ (Cook, 1995) (Giorgobiani G. K., 2022) (Ghosh & Chakravorty, 2017)

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} & 0 & \frac{\partial \psi_j}{\partial x} & 0 & \frac{\partial \psi_k}{\partial x} & 0 & \frac{\partial \psi_l}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \psi_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial \psi_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial \psi_k}{\partial y} & 0 & \frac{\partial \psi_l}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_i}{\partial y} & \frac{\partial \psi_i}{\partial x} & \frac{\partial \psi_j}{\partial y} & \frac{\partial \psi_j}{\partial x} & \frac{\partial \psi_k}{\partial y} & \frac{\partial \psi_k}{\partial x} & \frac{\partial \psi_l}{\partial y} & \frac{\partial \psi_l}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \\ u_{xj} \\ u_{yj} \\ u_{xk} \\ u_{yk} \\ u_{xi} \\ u_{yl} \end{Bmatrix}$$

პრობლემა ის არის, რომ ყველა კვანძისთვის r (i, j, k, l) წარმოებულები $\frac{\partial \psi_r}{\partial x}$ და $\frac{\partial \psi_r}{\partial y}$ არ შეიძლება მოიძებნოს პირდაპირი დიფერენციალის გზით, რადგან ψ_r პირდაპირ არაა დამოკიდებული x, y .

ნაერთის ფუნქციის დიფერენციალისთვის

$$\frac{\partial \psi_r}{\partial x} = \frac{\partial \psi_r}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \psi_r}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \psi_r}{\partial y} = \frac{\partial \psi_r}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial \psi_r}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$$\frac{\partial \psi_r}{\partial \xi} = \frac{\partial \psi_r}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial \psi_r}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial \psi_r}{\partial \eta} = \frac{\partial \psi_r}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial \psi_r}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta}$$

მატრიცული სახე

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_r}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = [J(\xi, \eta)] \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_r}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial y} \end{Bmatrix} \text{ სადაც ჯაკობის მატრიცა იქნება}$$

$$[J(\xi, \eta)] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{Bmatrix}$$

და

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_r}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \psi_r}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \psi_r}{\partial \eta} \end{Bmatrix}$$

მაგალითისათვის

$$\frac{\partial \psi_r}{\partial \xi} = \frac{\xi_r}{4} (1 + \eta_r \eta) \frac{\partial \psi_r}{\partial \eta} = \frac{\eta_r}{4} (1 + \xi_r \xi)$$

ჯაკობი მატრიცაში შეყვანილია შემდეგი მნიშვნელობები

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{1}{4} [-(1 - \eta) x_i + (1 - \eta) x_j + (1 + \eta) x_k - (1 + \eta) x_l]$$

$$\frac{\partial x}{\partial \eta} = \frac{1}{4} [-(1 - \xi) x_i - (1 + \xi) x_j + (1 + \xi) x_k + (1 - \xi) x_l]$$

$$\frac{\partial y}{\partial \xi} = \frac{1}{4} [-(1 - \eta) y_i + (1 - \eta) y_j + (1 + \eta) y_k - (1 + \eta) y_l]$$

$$\frac{\partial y}{\partial \eta} = \frac{1}{4} [-(1 - \xi) y_i - (1 + \xi) y_j + (1 + \xi) y_k + (1 - \xi) y_l]$$

სიმტკიცის მატრიცა ფორმალურად ბუნებრივ კოორდინატთა სისტემაში

$$[K_{rs}] = \int_V [B_r]^T [D] [B_r] dV$$

V ელემენტის მოცულობა

$$dV = t \cdot dx \cdot dy = |J(\xi, \eta)| \partial \xi \partial \eta \text{ ელემენტარული მოცულობა}$$

შემდეგ გამოიყენება ლაგრანჟის ვარიაციული პრინციპი

$$[K] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] t |J(\xi, \eta)| \partial \xi \partial \eta$$

ინტეგრაციისთვის გამოიყენება გაუსის ინტეგრაციის მიახლოებითი ფორმულა და შემდეგ

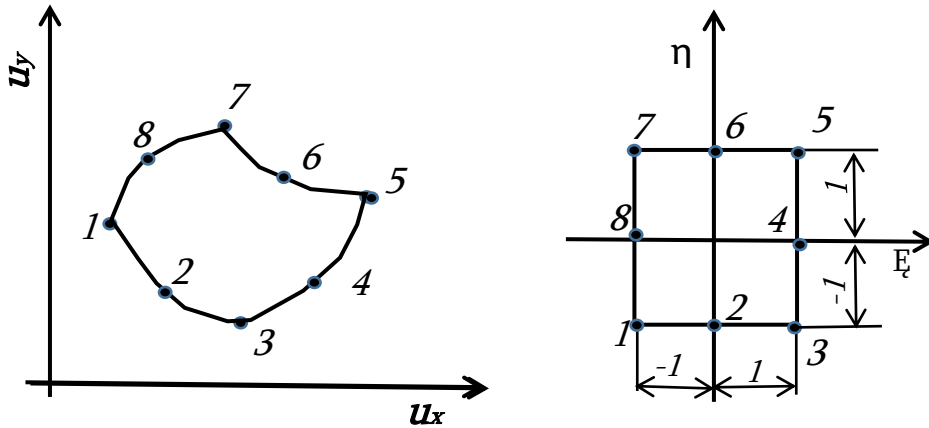
$$[K] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [B]^T [D] [B] t w_{i,j} |J(\xi, \eta)| \partial \xi \partial \eta$$

სადაც K არის გარე ძალების სიდიდე ელემენტის კვანძებში.¹⁸

¹⁸ (Beruashvili, 2022)

2.10 მაღალი რიგის იზოპარამეტრული ელემენტები

მაღალი რიგის იზოპარამეტრულ ელემენტებს მიეკუთვნებიან ისეთი სასრული ელემენტები, რომლის კონტური არ წარმოადგენს წრფეს მათზე ძალების საანგარიშოდ საჭიროა ფორმის ფუნქციის ცვლილება.

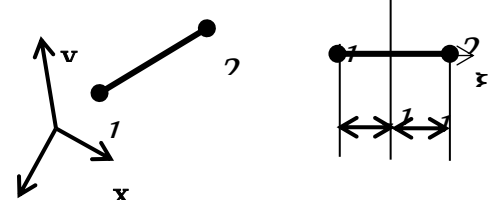


სურათი 29. კვადრატული ელემენტი

გადაადგილება არის კოორდინატების კვადრატული ფუნქცია, ძაბვები და დეფორმაციები კოორდინატების წრფივი ფუნქციაა.

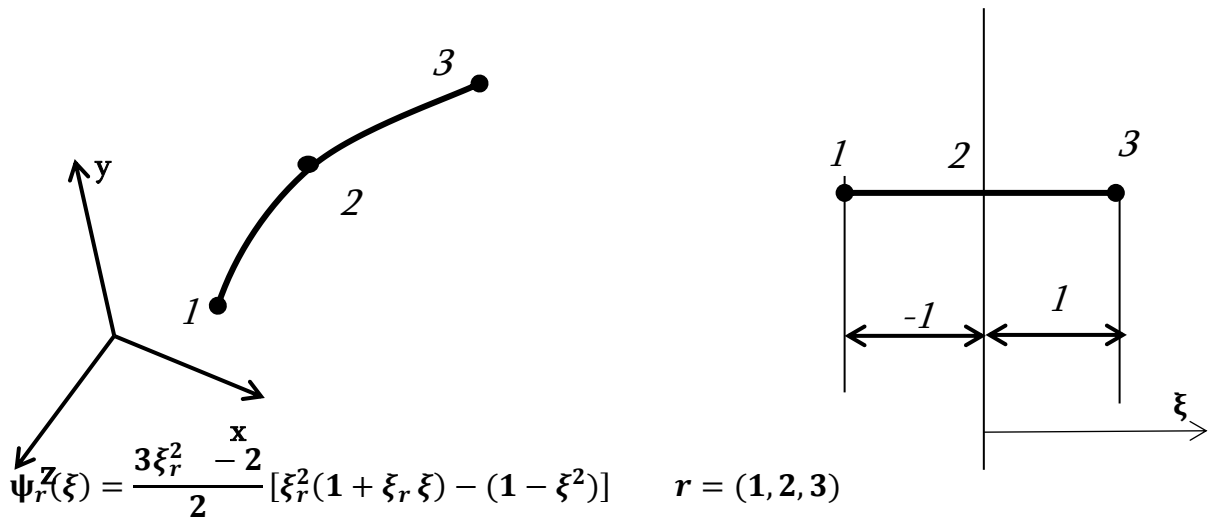
$$\psi_r(\xi, \eta) = \frac{3\xi^2\xi^2 - 2}{4} [\xi_r^2\eta_r^2 (1 + \xi_r\xi)(1 + \eta_r\eta) - \eta_r^2 (1 - \xi^2)(1 + \eta_r\eta) - \xi_r^2 (1 - \eta^2)(1 + \xi_r\xi)]$$

წრფივი ღეროვანი ელემენტი

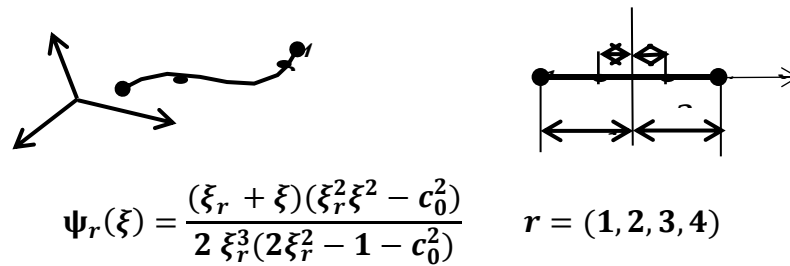


$$\psi_r(\xi) = \frac{1}{2}(1 + \xi_r\xi)r = (1, 2)$$

კვადრატული ღეროვანი ელემენტი



კუბური დეროვანი ელემენტი¹⁹



2.11 სასრულ ელემენტთა გამოყენებით სხეულის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია
 ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია არის კონსტრუქციის დიზაინის, სტრუქტურისა და პარამეტრების შეცვლის პროცესი მოცემული ოპტიმალური კრიტერიუმისთვის მისი ფუნქციონირების შენარჩუნების ან გაუმჯობესების დროს.

ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია არის ფორმის ოპტიმიზაციის ერთ-ერთი სახე, რომელიც პოულობს ოპტიმალურ მასალის განაწილების სქემას, საანგარიშო მოდელის მოცულობის, დატვირთვისა და სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით. ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის ყველაზე გავრცელებული და ეფექტური ფორმაა solid isotropic material with penalization (SIMP).

პროცესი შემდეგ ნაირად წარიმართება. ხდება სასრულ ელემენტებით მოდელის შექმნა მისი სასაზღვრო პირობების და კრიტერიუმების განსაზღვრა.

¹⁹ (Mardaleishvili & Arkania, 2019)

სასაზღვრო პირობები გულისხმობს ელემენტების თავისუფლების ხარისხს, მათ ჩამაგრების ტიპს და გადაადგილებების განსაზღვრას.

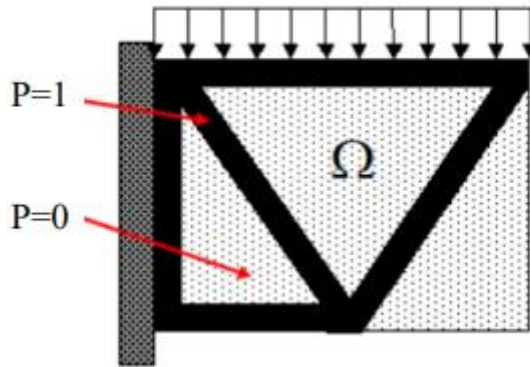
კრიტერიუმით კი განვსაზღვრავთ ოპტიმიზაციის კოეფიციენტს, რომელიც საბოლოო მასის, საწყის მასასთან თანაფარდობას გვიჩვენებს.

პენალტიზაცია გულისხმობს, ნულთან მიახლოებული ფარდობითი სიმკვრივის სასრული ელემენტების უგულვებელყოფას და მათ ამოგდებას ბადიდან.

მიღებული შედეგის ჰომოგონურობისათვის საჭიროა, ისეთი ელემენტების შენარჩუნება რომელთა ფარდობითი სიმკვრივე მიახლოებულია ერთთან.

20

21



სურათი 30. დატვირთული ძელის ოპტიმიზირებული მოდელი პენალტიზაციის მეთოდის გამოყენებით.

- $\rho(e) = 1$ სადაც ფარდობითი სიმკვრივე მაქსიმალურია(შავი)
 - $\rho(e) = 0$ სადაც ფარდობითი სიმკვრივე ნულთან მიახლოებულია (თეთრი)
- მაგალითად, სურათზე ნაჩვენებია დატვირთულ ძელში მასალის ოპტიმიზებული განლაგება. მყარი ელემენტების სიმკვრივის $\rho(e) = 1$ არის შავი, ხოლო ბათილი ელემენტები $\rho(e) = 0$.

²⁰ (Cook, 1995) (Calister & Rethwisch, 2013) (Jiang, Ren, Liu, Zhang, & Wang, 2018)
²¹ (Giorgobiani G. K., 2022) (Gerofi, Ishikawa, Reisen, & Wisniewski, 2019) (Gurgenidze, Kipiani, Badzgaradze, & Suramelashvili, on analysis of thin-walled spatial systems of complex structure with discontinuous paramters by method of large blocks, 2020)

2.12 რეალური მოდელის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია

სამშენებლო კონსტრუქციები იქნება ეს სივრცული კონსტრუქციები, გარსული კონსტრუქციები თუ თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციები, თავის აგებულებაში შეიცავენ ძელებს. ძელების განლაგების ოპტიმალური დაგეგმარება მნიშვნელოვანია როგორც მასის ოპტიმალური განაწილებისათვის ასევე ეკონომიკური თვალსაზრისით, კლასიკურ სამშენებლო სქემებში აღებულია ძელების დაგეგმარების სტანდარტული სქემები რაც ყოველთვის ხელსაყრელი არაა. ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია გვაძლევს საშუალებას რომ შევიმუშაოთ ძელების ოპტიმალური განლაგების სქემა ფერმებში და კონსოლურ გადახურვებში ისე რომ აღნიშნული ოპტიმიზაციის შედეგად კონსტრუქციის მექანიკური მახასიათებლები არ ჩამოუვარდება კლასიკური სამშენებლო სქემით მიდგომისას დაპროექტებულ კონსტრუქციებს.

ტოპოლოგიის ოპტიმიზაცია ემყარება შემდეგ ფუნქციას

$$F = F(\mathbf{u}(\rho), \rho) = \int_{\Omega} f(\mathbf{u}(\rho), \rho) dV$$
$$G_0(\rho) = \int_{\Omega} \rho dV - V_0 \leq 0$$
$$G_j(\mathbf{u}(\rho), \rho) \leq 0 \text{ with } j = 1, \dots, m$$

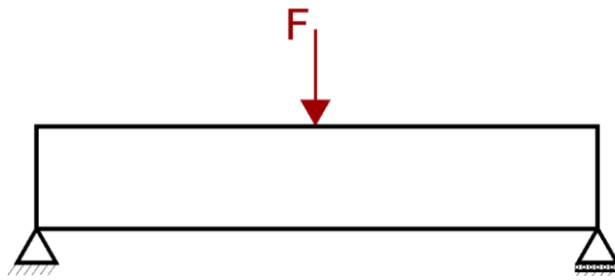
ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის პროცესი ემყარება მიზნობრივი $F(\mathbf{u}(\rho), \rho)$ ფუნქციას. ის წარმოადგენს ელემენტების რაოდენობას, რომელიც მინიმუმამდეა დაყვანილი მაქსიმალური სიმტკიცისათვის, არსებული ფუნქციის შესაბამისობის მინიმიზაცია იწვევს სტრუქტურის სიხისტის მაქსიმალურ გაზრდას.

22

2.13 ძელების ოპტიმიზაცია

ოპტიმიზაციის პროცესის ეფექტურობის საჩვენებლად აღებულ იქნა მარტივი ძელი რომელიც ჩამაგრებულია კიდებში ხოლო დატვირთვა მოდის ცენტრში

²² (Calister & Rethwisch, 2013) (Baraldi & Cecchi, 2017) (Gerofi, Ishikawa, Reisen, & Wisniewski, 2019)



სურათი 31. მარტივად ჩამაგრებული ძელი ცენტრში მოდებული ძალით

ძელი თავის მხრივ წარმოადგენს მოცულობით ბაზას (BUILD DOMAIN), რომელშიც აიგება სტრუქტურა. მიღებული შედეგებით შესაძლებელია მოცულობით ბაზაში ძელების ოპტიმალური განლაგების დადგენა. კვლევისათვის ერთმანეთს შედარებული იქნება:

- კლასიკური ძელი ამოჭრების და სიღრუეების გარეშე
- ჩემს მიერ შემუშავებული ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის პროგრამა(MatLab)
- კომერციულად ხელმისაწვდომი ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის პროგრამა ParetoCloud (SCIART, LLC)

შედარება მოხდება რეალური ექსპერიმენტის საფუძველზე.

3D პრინტერზე დაბეჭდილი იქნება ძელი გაბარიტული ზომით 100x20x7[mm]ცენტრში მოდებული ძალა 450 [ნ].²³

2.14 MatLab_ის პროგრამა ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციისათვის

აღნიშნული კოდის გამოყენება შესაძლებელია მარტივი ძელის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციისათვის, მიღებული შედეგების ვალიდაცია ხდება ასევე შედგენილი კოდით და ოპტიმიზირებული დეტალის 3D პროგრამებისთვის მისაღებ ფორმატში (STL) გადაყვანა.

სასრული ელემენტების პენალტიზაცია, ხდება მათზე მოდებული ძაბვის ფარდობით სიმკვრივესთან, ფილტრის საფუძველად აღებულია იზოპარამეტრული სასრული ელემენტების გაანგარიშების მეთოდი. დისკრეტიზაციის შემდეგ ხდება

²³ (ბერუაშვილი, 2021)

ჰომოგენიზაცია რაც ალგორითმს აძლევს ჰომოგენური სტრუქტურის სურათს სადაც ელემენტების ფარდობითი სიმკვრივე მიახლოებულია მაქსიმალურ მნიშვნელობასთან - ერთთან.

მიღებული შედეგის ვალიდაცია ხდება ამავე ალგორითმის მეორე ნაწილში, სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენებით.

ვალიდაციის შემდეგ, ხდება პარამეტრული მოდელის გენერირება STL ფორმატში.

```
function top(nelx,nely,volfrac,penal,rmin);
%INITIALIZE
x(1:nely,1:nelx)
=volfrac;loop=
0;

change=1.;
%STARTITERATION
while
    chang
    e >
    0.011
    oop=1
    oop+1
    ;xold
    = x;

%FE-ANALYSIS
[U]=FE(nelx,nely,x,penal);
%OBJECTIVEFUNCTIONANDSENSITIVITYAN
ALYSIS[KE]= lk;

c=0.;
forely=1:nely
    forelx=1:nelx
        n1 =
        (nely+1)*(elx-
        1)+ely;n2=(nely
        +1)*elx +ely;
        Ue = U([2*n1-1;2*n1; 2*n2-1;2*n2;
        2*n2+1;2*n2+2;2*n1+1;2*n1+2],1);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PenalizedMATLABBeam%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(4)
set (figure(4), 'Position', [200                250                1000
500]) plot (P1Stroke,P1Force,P2Stroke,P2Force,P3Stroke,P3Force,P4St
roke,P4Force) grid on

xlabel('Deflection(in)', 'Font
tSize',12) ylabel('Load(lbs)'
, 'FontSize',12)

title('PenalizedMATLABBeamLoadvs.Deflection', 'FontSize',18) legend('P1','P2'
,'P3','P4','Location','northeastoutside')

%           Flexural           Resilience
Calculation[strain,num]=min(abs(Pf-
65)); Penalized_Resilience=trapz(Pd(1:nu
m), Pf(1:num));

%FlexuralModulusCal
culation[val,loc]=m
in(abs(Pd-.04));

k=polyfit(Pd(1:loc),Pf(1:loc),1);PFM
=(k(1)*L^3)/(4*b*d^3);r=refline(k(
1),k(2));

set(r,'Color','r')
xlim([0,0.25])
ylim([0,200])

%FlexuralToughnessCal
culationPf2=Pf;

Pf2(isna
n(Pf2))=
[];

Pd2=Pd;

Pd2(isnan(Pd2))=[]; Penaliz
ed_Toughness=trapz(Pd2,Pf2
);

```

```

%                               Energy
CalculationPenalizedPW=Penalized_Resilience*PV;PenalizedFW=Penalized_Toughness*PV;

%                               Present
Datad1=[num2str
(PV), 'in^3'];

d2=[num2str (PFM), '
psi'];d3=[num2str (Penalized_Resilience), 'in*lb/in^3'];d4=[num2str (PenalizedPW), 'in*lb'];d5=[num2str (Penalized_Toughness), 'in*lb/in^3'];d6=[num2str (PenalizedFW), 'in*lb'];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Non-PenalizedMATLABBEAM%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure (5)
set (figure (5), 'Position', [200 250 1000 500])plot (NP1Stroke,NP1Force,NP2Stroke,NP2Force,NP3Stroke,NP3Force,NP4Stroke,NP4Force)

gridon
xlabel ('Deflection (in) ', 'FontSize', 12)ylabel ('Load (lbs) ', 'FontSize', 12)

title ('Non-PenalizedMATLABBEAMLoadvs.Deflection', 'FontSize', 18) legend ('NP1', 'NP2', 'NP3', 'NP4', 'Location', 'northeastoutside')

%                               Flexural           Resilience
Calculation[strain,num]=min(abs(NPf-110));nonpen_Resilience=trapz(NPd(1:num),NPf(1:num));

%FlexuralModulusCalculation[val,loc]=min(abs(NPd-.1));

```

```

NPFM=(l(1)*L^3)/(4*b*d^3);

r=refline(l(1),l(2));

set(r,'Color','r')
xlim([0,0.25])
ylim([0,200])
%FlexuralToughnessCalculation
NPf2=NPf;

NPf2(isnan(NPf2))=[];

NPd2=NPd;

NPd2(isnan(NPd2))=[];nonpen_Toughness=trapz(NPd2,NPf2);

%          Energy
CalculationnonpenPW=nonpen_Resilience*NPV;nonpenFW=nonpen_Toughness*NPV;

%          Present
Datae1=[num2str(NPV),'in^3'];

e2=[num2str(NPFM),'psi'];e3=[num2str(nonpen_Resilience),'in*lb/in^3'];e4=[num2str(nonpenPW),'in*lb'];e5=[num2str(nonpen_Toughness),'in*lb/in^3'];e6=[num2str(nonpenFW),'in*lb'];

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ParetoBeam%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(6)

set (figure(6), 'Position', [200                250                1000
500])plot (PW1Stroke, PW1Force, PW2Stroke, PW2Force, PW3Stroke, PW3Force, P
W4Stroke, PW4Force)

gridon
xlabel('Deflection(in)', 'Fon
tSize', 12) ylabel('Load(lbs)'
, 'FontSize', 12)

title('ParetoCloud          Beam          Load          vs.
Deflection', 'FontSize', 18) legend('PW1', 'PW2', 'PW3', 'PW4', 'Location', 'northeas
toutside')

%          Flexural          Resilience
Calculation[strain,num]=min(abs(PWf-
100));Pareto_Resilience=trapz(PWd(1:nu
m),PWf(1:num));

%FlexuralModulusCal
culation[val,loc]=m
in(abs(PWd-.06));

m=polyfit(PWd(1:loc),PWf(1:loc),1);P
WFM=(m(1)*L^3)/(4*b*d^3);r=refline
(m(1),m(2));

set(r,'Color','r')

xlim([0,0.25])
ylim([0,200])

%FlexuralToughnessCal
culationPWf2=PWf;

PWf2(isnan
(PWf2))=[]
;

PWd2=PWd;

```

```

end

%Getfaces,vertices,anduser-
definedoptionsforwriting[faces,          vertices,
options]                                =
parseInputs(varargin{:});asciiMode=strcmp(options
.mode,'ascii');

%Createthefacets
facets=single(vertices');
facets=reshape(facets(:,faces'),3,3,[]);

%Computetheirnormals

V1=squeeze(facets(:,2,:)-facets(:,1,:));
V2=squeeze(facets(:,3,:)-facets(:,1,:));
normals=V1([231],:).*V2([312],:)-V2([231],:).*V1([312],:);
clearV1V2
normals=bsxfun(@times,normals,1./sqrt(sum(normals.*normals,1)));f
acets=cat(2,reshape(normals,3, 1,[]),facets);

clearnormals

%Openthefileforw
ritingpermission
s={'w','wb+'};

fid=fopen(filename,permissions{asciiMo
de+1});if(fid == -1)

    error('stlwrite:cannotWriteFile','Unabletowriteto%s',filename);

end

%Writethefilec
ontentsifascii
Mode

    %WriteHEADER

    fprintf(fid,'solid%s\r\n',options.title);

```



```

%           Write
DATAfprintf(fid,
[...

    'facetnormal%.7E%.7E%.7E\r\n'...

    'outerloop\r\n'...
    'vertex  %.7E  %.7E
%.7E\r\n' ...'vertex
%.7E  %.7E  %.7E\r\n'
... 'vertex %.7E %.7E
%.7E\r\n'
... 'endloop\r\n'
... 'endfacet\r\n'], f
    facets);

%WriteFOOTER

fprintf(fid, 'endsolid%s\r\n', options.title);

else%BINARY

    %WriteHEADER
    fprintf(fid, '%-80s', options.title);           %
    Titlefwrite(fid, size(facets, 3), 'uint32');    %Number

    offacets

    %WriteDATA
    %Addoneuint16(0)totheendofeachfacetusingatypecastingtrickface
    ts=reshape(typecast(facets(:), 'uint16'), 12*2, []);

    %Setthelastbitto0(default)orsuppliedRG
    Bfacets(end+1, :)=options.facecolor;

    fwrite(fid, facets, 'uint16');

end

fprintf('Wrote%dfacets\n', size(facets, 2));

```

```

%%Inputhandlingsubfunctions
function[faces,vertices,options]=parseInputs(varargin)
%Determineinputtype

ifisstruct(varargin{1})%stlwrite('file',FVstruct
,...)if~all(isfield(varargin{1},{'vertices',
'faces'}))
    error('Variablemustbeafaces/verticestructure');
end

faces          =
varargin{1}.faces;ver
tices=varargin{1}.ver
tices;

options=parseOptions(varargin{2:end});

elseifisnumeric(varargin{1})

    firstNumInput          =
    cellfun(@isnumeric,varargin);firstNumInput(find(~firstNumInput,1):end)=
    0;%Onlyconsidernumerical

input PRIOR to the first non-
numericnumericInputCnt=nnz
(firstNumInput);

options=parseOptions(varargin{numericInputCnt+1:en
d});switch numericInputCnt

    case3%stlwrite('file',X,Y,Z,...)
        %Extractthe
        matrixZZ=va
        rargin{3};

        %ConvertscalarXYtoV
        ectorsZsizeXY=fliplr
        (size(Z));

        fori=1:2
            ifisscalar(varargin{i})
                varargin{i}=(0:ZsizeXY(i)-1)*varargin{i};
            end
        end
    end
end

```

```

        elseif numel(varargin{1}) ==
ZsizeXY(1) && numel(varargin{2}) == ZsizeX
Y(2)

        %Convert vectorXY to meshgrid
        [X,Y]=meshgrid(varargin{1},va
rargin{2}); else
        error('stlwrite:badinput','Unable to resolve X and Y
variables');
        c0=bitshift(ones(size(faces,1),1,'uint16'),15);
        end

        %Convert to faces/vertices
        if strcmp(options.triangulatio
n,'delaunay') faces=delaun
ay(X,Y);

        vertices=[X(:)
Y(:)Z(:)]; else
        if ~exist('mesh2tri','file')
            error('stlwrite:missing','"mesh2tri" is
required to convert X,Y,Z matrices to STL. It can be downloaded from:
\n%s\n',...

'http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexch
ange/28327') end

        [faces,vertices]=mesh2tri(X,Y,Z,options.triangulation);

        end

        case 2 %stlwrite('file',FACES,VERTI
CES,...) faces= varargin{1};

        vertices=varargin{2};
        %Red color (10:15), Blue color (5:9), Green color (0:4)

```

```

        c0=bitor(bitshift(bitand(2^6-
1,facecolor(:,1)),10),c0);c0=bitor(bitshift(bitand(2^11-1,facecolor(:,2)),5),c0);c0
        =
        bitor(bitand(2^6-1,
        facecolor(:,3)),c0);options.facecolor= c0;

else
    options.facecolor=0;
end

function options=parseOptions(v
 varargin) IP= inputParser;

IP.addParamValue('mode','binary',@ischar)
IP.addParamValue('title',sprintf('Created by stlwrite.m%s',datestr(
now)),@ischar);

IP.addParamValue('triangulation','delaunay',@ischar);I
P.addParamValue('facecolor',[],
@isnumeric) IP.addParamValue('facecolour',[],
@isnumeric) IP.parse(varargin{:});

options=IP.Results;

if
    ~isempty(options.facecolour)
        options.facecolor=options.fa
        ccolour;

end

function [F,V]=mesh2tri(X,Y,Z,tri_type)

-----%-----

[J,I]=meshgrid(1:1:size(X,2)-1,1:1:size(X,1)-1);

switch tri_type
    case 'f'%Forwards slash
        TRI_I=[I(:),I(:)+1,I(:)+1;I(:),I(:),I(:)+1];

```

```

F=sub2ind(size(X), TRI_I, TRI
_J); case 'b'%Back slash

    TRI_I=[I(:), I(:)+1, I(:); I(:)+1, I(:)+1, I(:)];
    TRI_J=[J(:)+1, J(:), J(:); J(:)+1, J(:), J(:)+1];
    F=sub2ind(size(X), TRI_
I, TRI_J); case 'x'%Cross

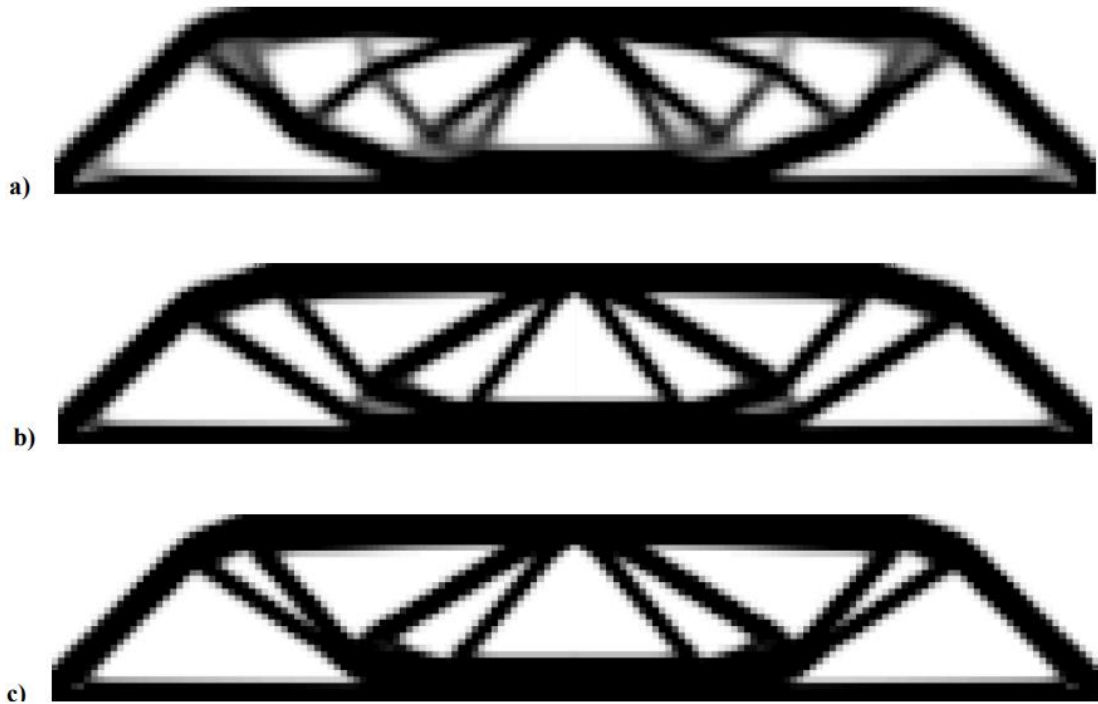
    TRI_I=[I(:)+1, I(:); I(:)+1, I(:)+1; I(:), I(:)+1; I(:), I(:)];
    TRI_J=[J(:), J(:); J(:)+1, J(:); J(:)+1, J(:)+1; J(:), J(:)+1];
    IND=( ( numel(X)+1 ): numel(X) + prod( si
ze(X)-1) ); F =
    sub2ind(size(X), TRI_I, TRI_J); F(:,
3)=repmat(IND, [4, 1]);

    Fe_I=[I(:), I(:)+1, I(:)+1, I(:)]; Fe_J=[J(:), J(:), J(:)+1, J(:)+1];
    Fe=sub2ind(size(X), Fe_I, Fe_J);
    Xe=mean(X(Fe), 2); Ye=mean(Y(Fe), 2); Ze=mean(Z(Fe), 2); X=[X(:
); Xe(:)]; Y=[Y(:); Ye(:)]; Z=[Z(:); Ze(:)];

endV=[X(:
), Y(:), Z(
:)];

```

აღნიშნული პროგრამით ძელის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციის შედეგებს სხვადასხვა პენალტიზაციის ფაქტორით შემდეგი სახე აქვს



სურათი 32. MatLab ში ოპტიმიზირებული ძელის შედეგები სხვადასხვა პენალტიზაციის ფაქტორებით a) $p=2$, b) $p=3$, c) $p=4$

ზემოთ აღნიშნულ შედეგებში არ არის გათვალისწინებული მომრგვალების რადიუსი ელემენტების კიდებში, რაც აუცილებელია ძაბვათა კონცენტრაციის თავიდან ასაცილებლად. ანგარიშში შემოგვაქვს მომრგვალების რადიუსი 1,5 [მმ] შედეგს შემდეგი სახე ექნება:

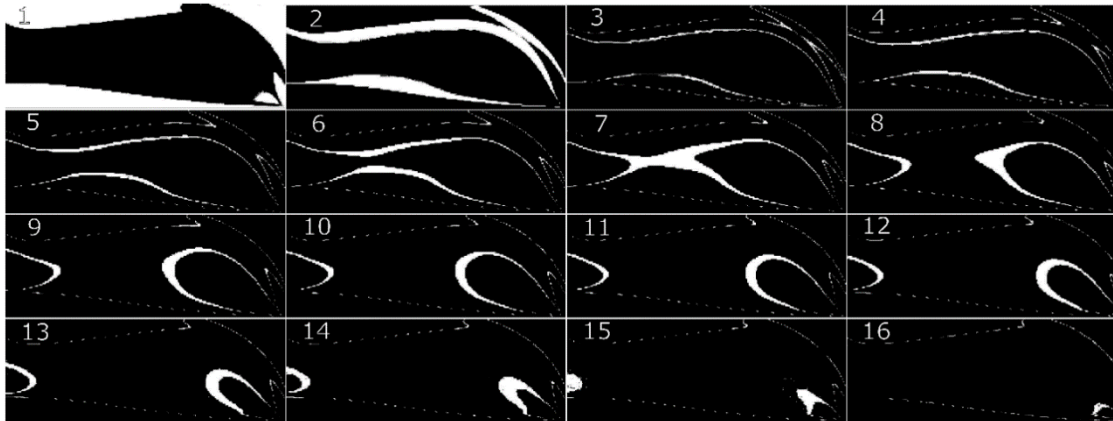


სურათი 33. შედეგად მიღებული ოპტიმიზებული სხივი MATLAB-დან პენალიზაციის კოეფიციენტით 3.0, ზომით 100x35 ელემენტი და რადიუსი 1.5 [მმ]

3 განზომილებიანი მოცულობითი კონსტრუქციის მისაღებად საჭიროა პროგრამაში შემოვიტანოთ სისქის ცნება, რაც გულისხმობს ელემენტების დამატებითი ფენების შემოტანას.

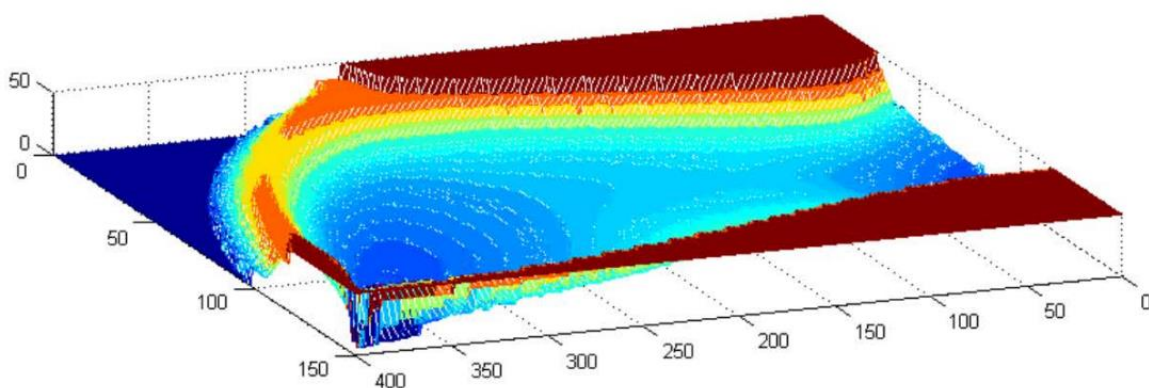
გამოთვლითი სიმულაციის შესამცირებლად ოპტიმიზაცია გაკეთდება ნახევარი პელისთვის

ფენებს შემდეგი სახე აქვს:



სურათი 34. ოპტიმიზირებული ნახევარპელის კვეთები ვერტიკალურ სიბრტყეში

ამ ფენების ერთმანეთზე დადებით, ელემენტის სისქის გათვალისწინებით, მივიღებთ, 3 განზომილებიან დიაგრამას, რომლის კონვერტაცია შესაძლებელია 3D ფორმატში შემდგომი წარმოებისთვის.

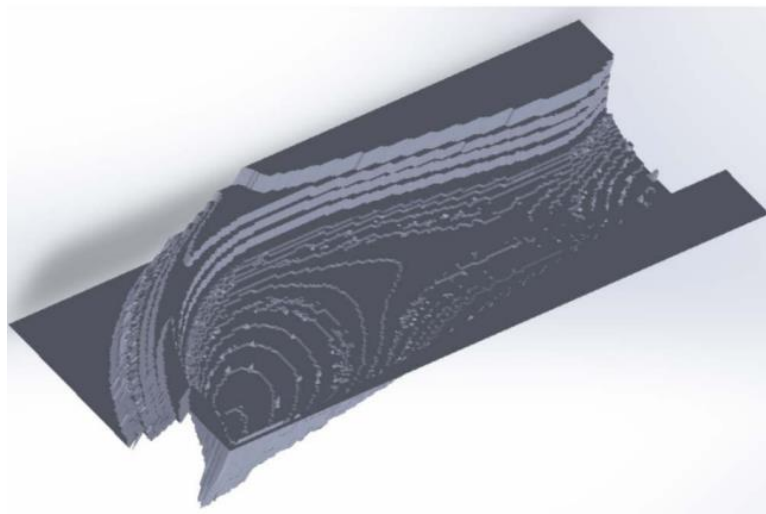


სურათი 35. სისქის სამგანზომილებიანი პროექცია

ლურჯი ფერი წარმოადგენს ელემენტებს 0 თან მიახლოებული ფარდობითი სიმკვრივით. წითელი კი მაქსიმალურ ფარდობით სიმკვრივეს.

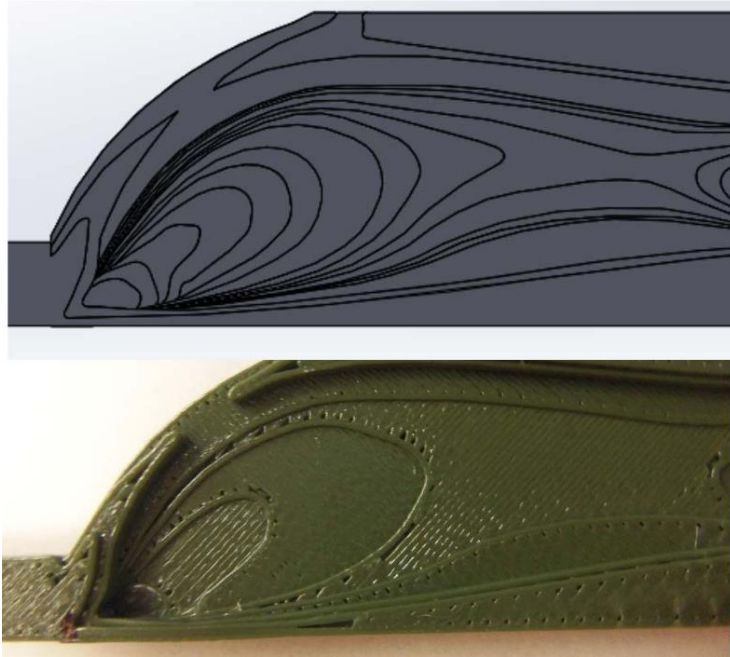
აღნიშნული პროექციის კოორდინატების საშუალებით შესაძლებელია პროგრამულ პაკეტში SolidWorks-ში გახსნა და მისი დამუშავება. მაგრამ აღნიშნული პროცედურა შრომატევადია და დიდ დროს მოითხოვს, საჭიროა თითოეული წერტილის შეტანა თავისი სამ განზომილებიანი კოორდინატით, ამ წერტილებს შორის სიბრტყეების აგება და ამ სიბრტყეების მიერ შექმნილი მოდელის მყარ სხეულიან მოდელში გადაყვანა. ამიტომ კოდში გათვალისწინებულია STL კონვერტორი.

კონვერტირების შედეგად შემდეგ სახეს მივიღებთ.



სურათი 36. კონვერტირების შედეგად მიღებული STL ფაილი გახსნილია Solidworks პროგრამულ პაკეტში

აღნიშნული ფრაგმენტის სარკისებრი გადამრავლებით 2 სიბრტყეში მივიღებთ ოპტიმიზაციის შედეგს



სურათი 37. ოპტიმიზირებული დეტალის 3დ მოდელი და 3დ პრინტერზე დაბეჭილი დეტალი ექსპერიმენტისათვის.

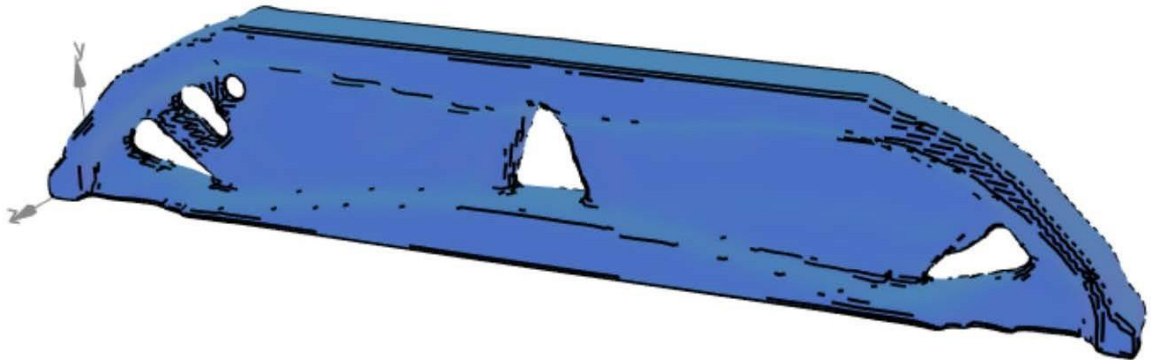
2.15 ParetoCloudBeamDesign პროგრამის გამოყენება ძელის ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციისათვის

ParetoCloud პროგრამული უზრუნველყოფა, ისევე როგორც MATLAB პროგრამა, იყენებს წინასწარ განსაზღვრულ დიზაინის დომენს ოპტიმიზაციისთვის. ორგანოზომილებიანი დიზაინის დომენის ნაცვლად, ParetoCloud იყენებს სრულ სამგანზომილებიან დიზაინის სივრცეს. სამგანზომილებიანი მოდელის მისაღებად, SolidWorks-ში იქმნება სრული ძელი და ინახება როგორც STL ფაილი ParetoCloud-ისთვის იმპორტისთვის. მცირე უბნები, რომლებიც განსაზღვრავს ძალისა და საყრდენების მდებარეობას, ასევე უნდა განთავსდეს ძელზე. იმის გამო, რომ დატვირთვა და საყრდენები ახლოსაა წერტილოვან დატვირთვასთან, ფართობი მცირე ზომისაა. ადგილი, სადაც დატვირთვა მოედება, მდებარეობს ძელის ზედა ნაწილში, რომელიც ორიენტირებულია ძელის შუა წერტილში, ხოლო საყრდენების არე მდებარეობს ძელის ქვედა მხარეს ორივე ბოლოზე. დასრულების შემდეგ, STL იმპორტირებულია ParetoCloud-ში სასაზღვრო პირობების გამოსაყენებლად. ფიქსირებული xyz სასაზღვრო პირობა გამოყენებული იყო ერთ-ერთ საყრდენ უბანზე, yz სასაზღვრო პირობა გამოყენებული იყო მეორე საყრდენზე. ეს სასაზღვრო პირობები აფიქსირებს xyz სიბრტყეებში რომელიმე მიმართულებით გადაადგილებისგან.

yz ფიქსირებული საყრდენი იზღუდება ქვევით და გვერდით გადაადგილებისგან. ამ საყრდენისთვის, ძელს კვლავ ეძლევა შეზღუდული გადაადგილება, რადგან ძელი იღუნება. ნორმალური ძალა გამოიყენება სხივის თავზე დანიშნულ ადგილას. ასევე უნდა განისაზღვროს ძელის მასალის მექანიკური თვისებები.

ალგორითმი აწარმოებს სასრულ ელემენტების ანალიზს და მათ ოპტიმიზაციას, მას აქვს ზუსტი მასალის თვისებები გამოთვლებისთვის. სხვა სასაზღვრო პირობები არ არის საჭირო ამ პრობლემის დასადგენად, ამიტომ შემდეგი ნაბიჯი არის სასრული ელემენტების ანგარიშის დასრულება (კონვეგენცია). საშუალო ბადე არჩეული იყო შედეგების სიზუსტის გასაუმჯობესებლად უხეში ბადესთან შედარებით, მაგრამ დაზოგავს გამოთვლის დროს წვრილ ან ძალიან წვრილ ბადესთან შედარებით. სასრული ელემენტების ანალიზის დაწყებამდე შეიძლება განისაზღვროს კომპონენტის სიმეტრია. საყრდენი ძელისთვის, z ღერძის მიმართ სიმეტრია

შეიძლება გამოვიყენოთ ძელის წინა სიბრტყის პერპენდიკულარულად. თუ არ არის გამოყენებული სიმეტრია, სხივის ერთ მხარეს შეიძლება განიცადოს მეტი ცვლილება, ვიდრე მეორე, რაც შექმნის ექსცენტრულობის მქონე ძელს. ბოლო ნაბიჯი სხივის ოპტიმიზაციამდე არის მოცულობითი ფრაქციის შერჩევა. ამ ოპტიმიზებული სხივის დანარჩენთან შესადარებლად, მას უნდა ჰქონდეს იგივე მოცულობითი წილი, რაც სხვებს, ამიტომ არჩეულია მოცულობითი ფრაქცია 0.5, რათა შემცირდეს მოცულობა 50%-ით. ყველა სასაზღვრო პირობებისა და შეზღუდვის პირობებში, ოპტიმიზატორის გვაძლევს შემდეგ შედეგს.



სურათი 38. ParetoCloud ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელი

ოპტიმიზირებული შედეგი საწყისი მოცულობის 50% ია როგორც დანარჩენი ორი შედეგი.

3. ჩატარებული კვლევის შედეგები და მათი განსჯა

კომპიუტერული პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით მოდელირებული სამი სხვისთვის:

- MATLAB პენალტიზებული ძელი
- MATLAB არაპენალტიზირებული ძელი
- ParetoCloud-ით ოპტიმიზირებული ძელი

ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები და სასაზღვრო პირობები მოცემულია ცხრილში.

ოპტიმატორი	პენალტიზაციის ფაქტორი	მოცულობა	ელემენტები	რადიუსი
MATLAB პენალტიზაციით	3	0.5	100x37	1.5
MATLAB არა-პენალტიზირებული	1	0.5	200x75	1.5
ParetoCloud	N/A	0.5	საშუალო	N/A

ცხრილი 5. ოპტიმიზაციის კრიტერიუმები და სასაზღვრო პირობები

ParetoCloud მიერ ჩატარებულ ოპტიმიზაციის პროცესს ჰქონდა რამდენიმე დამატებითი პარამეტრი, რაც MATLAB-ს არ ჰქონდა. სასაზღვრო პირობები და კრიტერიუმები საერთო იყო ოპტიმიზაციის ორივე პროცესისათვის.

3.1 ექსპერიმენტი

წარმოდგენილი სამი ოპტიმიზირებული ვარიანტის ერთმანეთთან შედარებისთვის, და კვლევის შედეგებზე დასკვნის გაკეთებისთვის, საჭიროა ექსპერიმენტის ჩატარება.

ექსპერიმენტისთვის გვექნება 4 ნიმუში, თითოეული ექსპერიმენტისთვის შედეგების უტყუარობისათვის გვექნება 4 ერთნაირი ნიმუში ჯამში გამოიცადა 16 ნიმუში

- არაოპტიმიზირებული ძელი როგორც ეტალონი
- MATLAB პენალტიზაციით მიღებული ოპტიმიზაციის შედეგი
- MATLAB არა-პენალტიზირებული ოპტიმიზაციის შედეგი
- ParetoCloud-ით მიღებული ოპტიმიზაციის შედეგი

ნიმუშები დაბეჭდილია 3D Stratasys uPrint SE 3D პრინტერზე იზოტროპული მასალით ABS P430



სურათი 39. Stratasys uPrint SE 3D

3.2 არაოპტიმიზირებული ძელის (ეტალონი) ნიმუშის გამოცდა

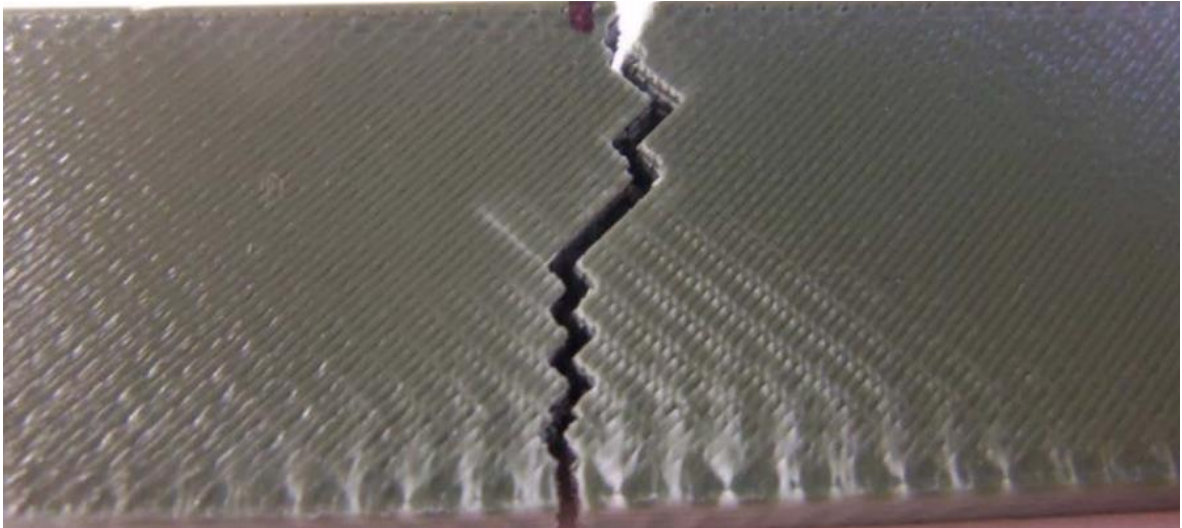
იმისათვის რომ ოპტიმიზაციის შედეგების ეფექტურობა დავადგინოთ საჭიროა გამოვცადოთ არაოპტიმიზირებული ძელის ნიმუში. შედეგების საიმედოობისათვის თითოეული ნიმუში მზადდება 4 ეგზემპლარად და იცდება პრიმიტიულად ღუნვაზე სამ წერტილში.

მნიშვნელოვანი პარამეტრებია ძელის ჩაღუნვის მაქსიმალური მნიშვნელობა და მაქსიმალური ძალა. ამ ორ პარამეტრს შორის დამოკიდებულების გრაფიკს სატესტო დანადგარი ავტომატურად ადგენს.



სურათი 40. ძელის გამოცდის პროცედურა

ძელის ქვედა მონაკვეთში თეთრი ზოლები მიუთითებს ძელის პლასტიკურ დეფორმაციაზე. პლასტიკური დეფორმაცია ხდება იქ, სადაც მოსალოდნელია, რადგან ძელი განიცდის ყველაზე დიდ მღუნავ მომენტი ცენტრში. ქვედა მონაკვეთმა ასევე განიცადა დეფორმაცია, რადგან ამ ადგილას არის დამჭიმავი. ძელის რღვევა დაიწყო ცენტრალურ უბანში, რაც მოსალოდნელი იყო.



სურათი 41. ძელის რღვევა

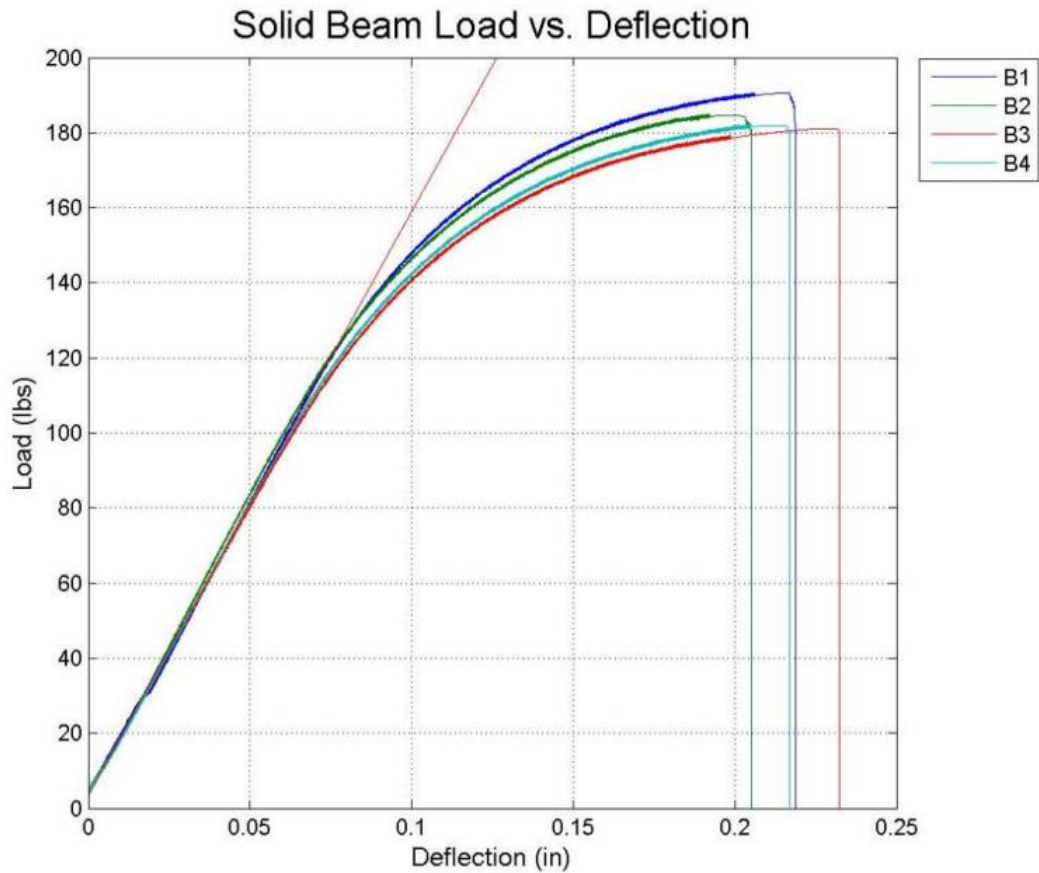
სახეზეა დამზადების ტექნოლოგიის სპეციფიკურობიდან გამომდინარე დეფექტები, რღვევა დაიწყო ფენებს შორის.

აღნიშნული თავისებურებები ვლინდება მხოლოდ პლასტიკური დეფორმაციების ზღვრის გადალახვისას რაც ექსპერიმენტების შედეგების საიმედოობაზე გავლენას არ ახდენს.

ყოველი ძელის გატეხის შემდეგ, მონაცემები შეგროვდა და მოხდა მათ ექსპორტირება.

წრფივი რეგიონის ხაზი გამოიყენებოდა საშუალოს გამოსათვლელად.

ძელის ჩაღუნვის მაქსიმალური მნიშვნელობასა და მაქსიმალური ძალას შორის დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს.



სურათი 42. დატვირთვა გადაადგილების ფარდობის გრაფიკი ძელისთვის

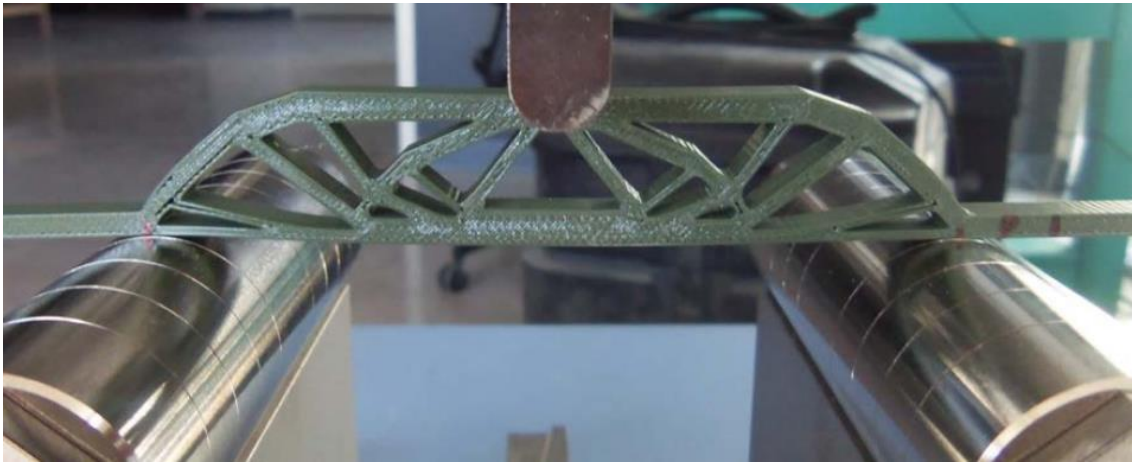
დატვირთვის მრუდის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ არ არის დიდი ცდომილება სხვადასხვა ექსპერიმენტულ ნიმუშებს შორის.

B1 ძელს ჰქონდა მაქსიმალური ძალა 190,6 lbs გატეხამდე, ხოლო B3 ძელს (ძელი ყველაზე დაბალი წინააღმდეგობით) ჰქონდა მაქსიმალური ძალა 181,1 ფუტი გატეხამდე. 9.5 ფუტის განსხვავება აჩვენებს, რომ შედეგები მისაღებ დიაპაზონშია. თითოეული სხივი თითქმის იდენტურია 115 lbs ძალის დატვირთვამდე, გადახრა გვიჩვენებს პლასტიკური დეფორმაციის დაწყებას. ეს დეფორმაცია ხდება 115 lbs დატვირთვის დროს.

ოთხი ძელის საშუალო დატვირთვა რომელზეც მათ რღვევა განიცადეს დაახლოებით 185 ფუტია.

3.3 MATLAB პენალტიზაციით ოპტიმიზირებული ძელის გამოცდა

წინა გამოცდის შესაბამისად 3D პრინტერზე დავბეჭდეთ 4 ნიმუში, იგივე მასალით და ფენების განლაგებით, დატვირთვის და ჩამაგრების სქემა იდენტურია ყველა საექსპერიმენტო ნიმუშისათვის. ოთხივე ნიმუში უმნიშვნელო ბეჭდვითი ხარვეზებით დამზადდა.



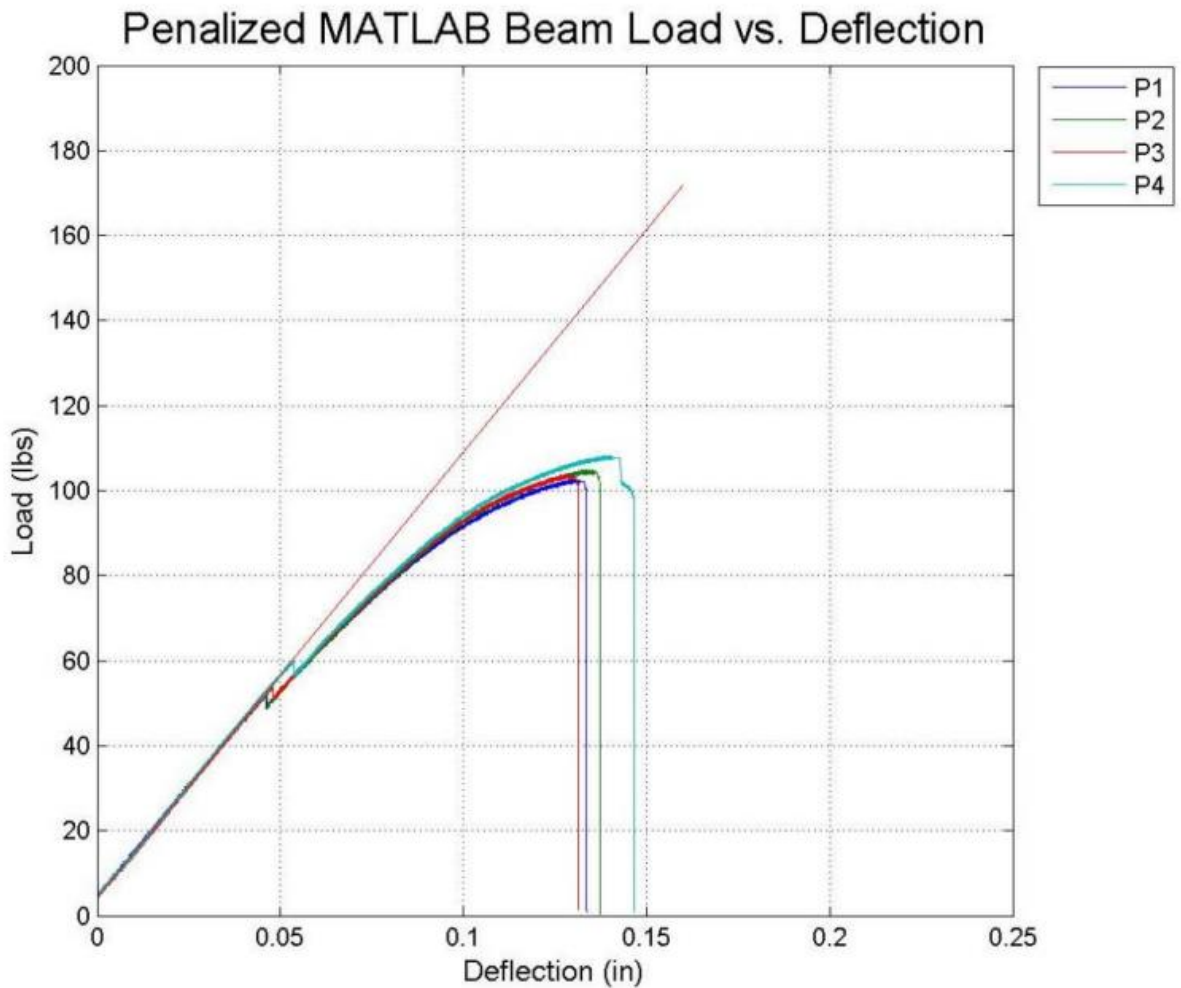
სურათი 43. MATLAB პენალტიზაციით ოპტიმიზირებული ძელი



სურათი 44. MATLAB პენალტიზაციით ოპტიმიზირებული ძელის რღვევა

თავდაპირველად, რღვევა დაიწყო ძელის ქვემოდან, ოფსეტური ცენტრიდან, სადაც იყო ყველაზე მაღალი შეყურსული ძაბვა. რღვევა გავრცელდა ექსტრემუზის ხაზის გასწვრივ ცარიელი სივრცეების კვეთების მიღწევამდე. შექმნილ ცარიელ სივრცეებს

შორის სასაზღვრო ფენა გატყდა რის გამოც მხოლოდ ძელის ზედა ნაწილი დარჩა დატვირთვის მხარდასაჭერად. ამ ყველაფერმა ძელის რღვევა გამოიწვია.



სურათი 45. დატვირთვა გადაადგილების ფარდობის გრაფიკი პენალტიზირებული ძელისათვის

3.4 MATLAB არა-პენალტიზირებული ძელის გამოცდა

შემდეგი ოპტიმიზებული ძელი, რომელიც გამოიცადა, არის MATLAB არაპენალტიზირებული ძელი. ძელები ,NP1, NP2, NP3 და NP4 დაიბეჭდა იმავე ორიენტირებით, როგორც ადრე დაბეჭდილი ძელები. იმის გამო, რომ ცვლადი სისქის მასალა ორიენტირებული იყო ძელში , დაემატა დამხმარე მასალა ბეჭდვის პროცესში, რათა თავიდან იქნას აცილებული ნაბეჭდი მასალის შუაში ჩავარდნა.

დამხმარე მასალამ წარმოქმნა ზედაპირის ცვალებადობა ძელის ორ სახეს შორის რამაც შეიძლება გამოიწვიოს შედეგების ცვალებადობაც.



სურათი 46. MATLAB არა-პენალტიზირებული ძელის გამოცდა

სადაც ძელის სისქე ყველაზე მცირე იყო. დატვირთვის გახანგრძლივების შემდეგ, დაიწყო დეფორმაცია

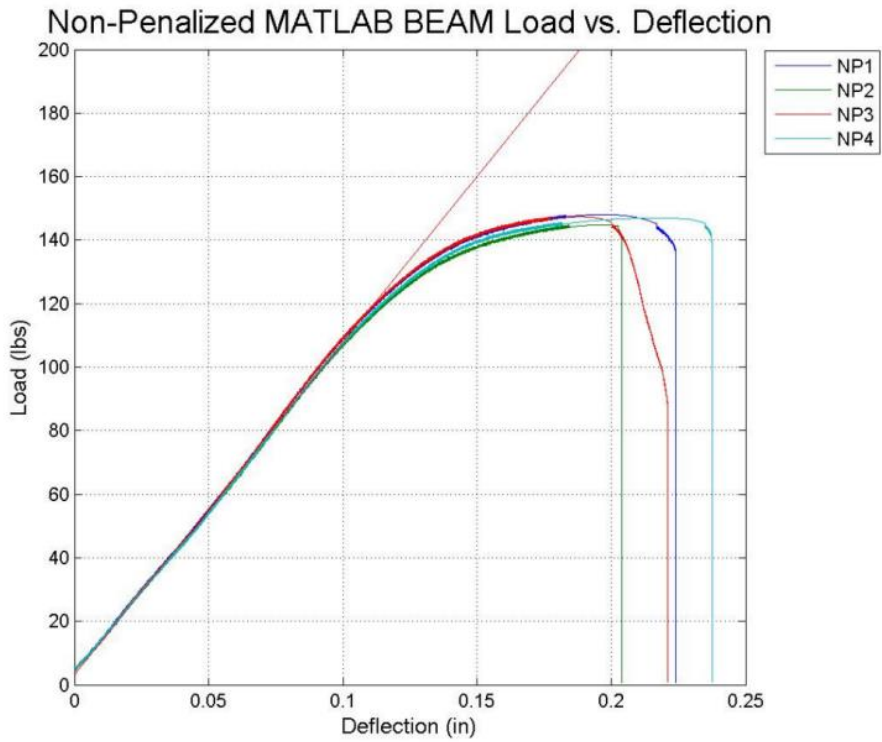
ის ვითარდება სხივის ცენტრში ყველაზე ვიწრო, ცენტრის მონაკვეთში.

ძელის, რღვევა მოსალოდნელი იყო ცენტრში დატვირთვის ადგილზე.

არაპენალტიზირებული MATLAB ძელებისათვის NP1, NP2 და NP4, ძელის რღვევა განვითარდა იგივე მონაკვეთში.



სურათი 47. MATLAB არა-პენალტიზირებული ძელის რღვევა



სურათი 48. დატვირთვა გადაადგილების ფარდობის გრაფიკი არა-პენალტიზირებული ძელისათვის

3.5 ParetoCloud ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელის გამოცდა

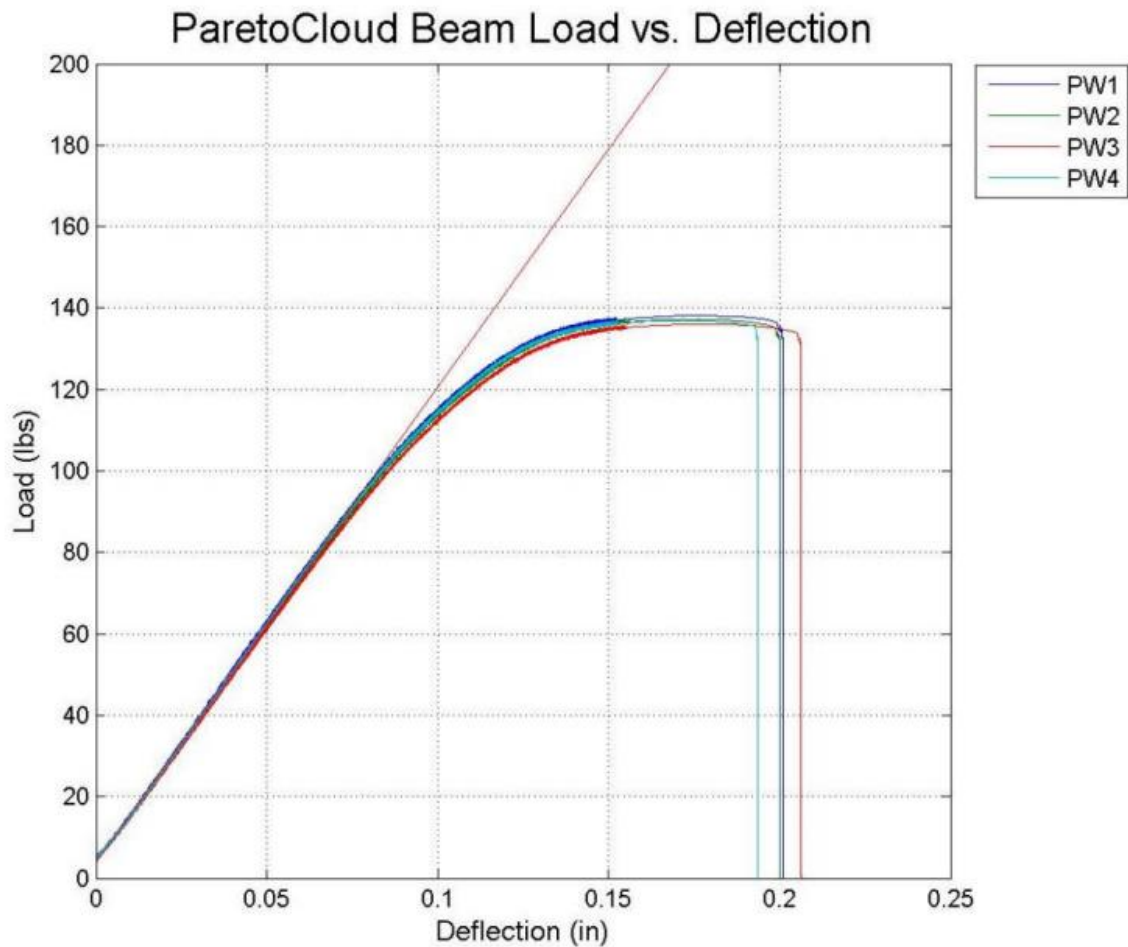
ParetoCloud-ის ოპტიმიზებული ძელები PW1, PW2, PW3 და PW4 წარმოადგენს გამოცდის ბოლო ეტაპს, ოპტიმიზებული ოთხი ძელი დაბეჭდილი იყო იმავე ორიენტირებით.



სურათი 49. ParetoCloud ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელის გამოცდა



სურათი 50. ParetoCloud ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელოსრდვევა



სურათი 51. დატვირთვა გადაადგილების ფარდობის გრაფიკი ParetoCloud ის მიერ ოპტიმიზირებული ძელისთვის

აღნიშნული გრაფიკი გვაჩვენებს რომ დეტალმა დეფორმაციის მაქსიმალურ მნიშვნელობას მიაღწია 138 ფუტ ძალაზე, რაც ნაკლებია მატლახის არაპენალტიზირებული ძელის მაჩვენებელზე (155 ფუტი).

აღნიშნული ექსპერიმენტიდან ნათლად ჩანს რომ პარეტო ქლაუდის მიერ ოპტიმიზირებული ძელი 11% ნაკლებ დატვირთვას უძლებს ვიდრე მატლახის მიერ ოპტიმიზირებული ძელი, გარდა ამისა პარეტო ქლაუდის მიერ ოპტიმიზირებულ სტრუქტურაში მკვეთრადაა გამოხატული ასიმეტრულობა რაც ართულებს მის ფორმას და წარმოების ხარჯებს.

ძირითადი დასკვნები

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

- განხილულია მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცითი კონსტრუქციების გამოყენება სამშენებლო კონსტრუქციებში
- ჩამოყალიბებულია ალგორითმის მუშაობის პრინციპი სამშენებლო კონსტრუქციებში გამოყენებული გარსებისათვის გაანგარიშებისათვის და ტოპოლოგიის ოპტიმიზაციისათვის.
- მიღებულია თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციებისათვის სასრულ ელემენტთა მეთოდის სიხისტის მატრიცები.
- დაზუსტებულია მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცითი კონსტრუქციების სასრულ ელემენტებად დისკრეტიზაციის რაოდენობა.
- შესწავლილია ოპტიმიზაციის საწყისი ალგორითმი რის შედეგადაც შემუშავებულია ალგორითმის პრაქტიკული ვერსია რომლის შედეგებიც განხილულია და შედარებულია ნაშრომში
- დამუშავებულია შედეგების ვალიდაციის პროცედურა რომელიც განხილულია ნაშრომში.
- ჩატარებულია ექსპერიმენტი ოპტიმიზირებული და არა ოპტიმიზირებული ძელის ჩაღუნვაზე გადმოცემული იქნა თეორიული კვლევების, გაანგარიშებების და ექსპერიმენტით მიღებული შედეგები.
- დამუშავებული მეთოდის საფუძველზე შედგენილი გამოყენებით პროგრამების პაკეტი შეიძლება გამოყენებული იქნას, საპროექტო ორგანიზაციებში და სამშენებლო კომპანიებში.

გამოყენებული ლიტერატურა

- Altenbach, H., & Eremeyev, V. (2017). *Shell-like Structures*. Cham: Springer International Publishing.
- Ashouri Vajari, D. (2015). micromechanical study of porous composite under longitudinal shear and transverse normal loading. *Composite Structures*, 266-276.
- Baraldi, D., & Cecchi, A. (2017). Discrete and continuous models for static and modal analysis of out of plane loaded masonry. *Cumputers and structures*.
- Bednarczyk, A., Aboudi, J., & Arnold, M. (2017). Micromechanics of composite materials governed by vector constitutive laws. *Solid Structures*, 137-151.
- Beruashvili V., G. I. (2022). The problem of calculating shell structures with cut-outs made of various composite materials. *Problems of Engineering Sciences*, (p. 22). Yerevan.
- Beruashvili, V. (2022). *STRESS ANALYSIS OF THIN WALLED SPATIAL LAYRED STRUCTURES BY THE FINITE ELEMENT METHOD*. Tbilisi: Georgian Technical University.
- Calister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Materials Science and Engineering*. Sao Paulo: John Wiley and Sons.
- Chakartnarodom, P., Prakaypan, W., Chuankrerkkul, N., & Laitila, E. (2020). Properties and Performance of the basalt-fiber reinforced texture roof tiles. *Case Studies in Construction Materials*.
- Cook, R. (1995). *Finite element modeling for stress analysis*. Hoboken: John Wiley and Sons.
- Feito, N., Diaz Alvarez, J., Lopez Puente, J., & Miguelez, M. (2018). Experimental and numerical analysis of step drill bit performace when drilling woven CFRPs. *Composite Structures*, 1147-1155.
- Gay, D. (2014). *Design and Applications*. Boca Raton: CRC.

- Gerofi, B., Ishikawa, Y., Reisen, R., & Wisniewski, R. (2019). *High-Performance Computing Series*. Singapore: Springer.
- Ghosh, A., & Chakravorty, D. (2017). Failure Analysis of Civil Engineering Composite Shell Roofs. *Procedia Engineering*, 1642-1649.
- Giorgobiani, G. K. (2022). *STABILITY CALCULATION OF DISCONTINUOUS PARAMETRIC LAYERED PLATE STRUCTURES*. Manhattan, New York, USA: 7TH INTERNATIONAL NEW YORK CONFERENCE ON ENVOLVING TRENDS IN INTERDISCIPLINARY RESEARCH & PRACTICES.
- Gurgenidze, D., & Kipiani, G. (2018). Bending of geometrically nonlinear shell with cutout. *10 th International Conference on contemporary problems of architecture and construction* (pp. 340-343). Wuhan: Beijing University of China.
- Gurgenidze, D., Kipiani, G., & Badzgaradze, G. (2020). Analysis on stability of having holes thin-walled spatial structures. *Problems of Mechanics*, 94-96.
- Gurgenidze, D., Kipiani, G., Badzgaradze, G., & Suramelashvili, E. (2020). on analysis of thin-walled spatial systems of complex structure with discontinuous parameters by method of large blocks. *Architecture and engineering*, 232-237.
- Guz, I., Menshykova, M., & Paik, J. (2017). Thick-walled composite tubes for offshore applications: an example of stress and failure analysis for filament-wound multi-layered pipes. *Ships offshore structures*, 304-322.
- Heidari-Rarani, M., & Sayedain, M. (2019). Finite element modeling strategies for 2D and 3D delamination propagation in composite DCB specimens using VCCT, CZM and XFEM approaches. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.
- Jia, Z., Bai, Y., Wang, F., Ma, J., Cheng, D., & Zhang, Z. (2019). Effect of drill flute direction on delamination at the exit in drilling carbon fiber reinforced plastic. *Polymers*, 1434-1440.

- Jiang, H., Ren, Y., Liu, Z., Zhang, S., & Wang, X. (2018). Evaluations of failure initiation criteria for predicting damages of composite structures under crushing loading. *Plastic Composites*, 1279-1303.
- Katili, I., Maknun, I. J., Batoz, J.-L., & Ibrahimbegovic, A. (2018). Shear Deformable shell element DKMQ24 for composite structures. *Composite Structures*, 182-200.
- Kipiani G., B. V. (2022). *STABILITY OF THIN-WALL SPATIAL FEATURES SYSTEMS WITH DISCONTINUOUS PARAMETERS*. TBILISI: EUROPEAN INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN INVOREMENTAL ENGINEERING.
- Kipiani, G. (2016). Deformability and stability of rectangular sandwich panels with cuts under in-plane loading. *Architecture and Engineering*, 26-30.
- Kipiani, G. (2017). The new system of modelling. *International conference on differential and difference equations and applications* (p. 68). Lisbon: Military Academy.
- Kipiani, G. (2019). Stability of rectangular sandwich ribbed plate with discrete filler. *Modeling in Mechancis* (p. 11). Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava,.
- Kipiani, G., & Botchorishvili, N. (2016). Analysis of laminar structures with application of generalized functions. *VSB Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering*, 27-28.
- Kipiani, G., Aptsiauri, G., Zambakhidze, L., Churchelauri, Z., Paresishvili, A., & Okropiridze, G. (2016). Stability of thin-walled spatial systems with discontinuous parameters. *Contemporary problems of architecture and costruction*, 171-173.
- Kipiani, G., Giorgobiani, I., & Beruashvili, V. (2021). Stability of thin-walled structures spatial features systems with discontinuty parameters. *European Innovative Technologies in the Construction and Environment Egnineering*. 2021.
- 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.

- 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.
- Kipiani, G., Rajczyk, M., & Lausova, L. (2015). Influence of rectangular holes on stability of three-layer plates. *Applied Mechanics and Materials*, 397-401.
- Kolloor, S., Rahimian-Kolloor, S., Karimzadeh, A., Hamdi, M., Petru, M., & Tamin, M. (2019). Nano-level damage characterization of graphene/polymer cohesive interface under tensile separation. *Polymers*, 1435.
- Kumar, A., Chakrabarti, A., & Bhargava, P. (2018). Finite element analysis of laminated composite and sandwich shells using higher order zigzag theory. *Composite Structures*, 270-282.
- Li, D., Wang, Z., & Zhang, C. (2019). A multi-level and multi-site mesh refinement method for the 2D problems. *Mechanics and Advanced Materials and Structures*, 1462-1479.
- Li, S., & Sitnikova, E. (2020). *Representative volume elements and unit cells*. Amsterdam: Elsevier.
- Liu, C. (2019). Reliability analysis of composite laminates based on generating function approach. *Mechanical Engineering*, 55-67.
- Liu, L., Zhang, X., Wang, Z., Wang, Y., & Gou, J. (2022). Micromechanics modeling of transverse tensile strength for unidirectional CFRP composite. *Materials*, 1-14.
- Ma, J., Gao, W., Wriggers, P., & Xue, X. (2018). Multiscale finite element analysis of uncertain-but-bounded heterogeneous materials at finite deformation. *Finite Elements in Analysis and Design*, 15-31.
- Mardaleishvili, N., & Arkania, Z. (2019). Numerical Study of Absolutely Flexible Rods Loaded by Concentrated Forces in an Air or Liquid Flow. *Moscow University Mechanics Bulletin*, 97-100.

- Milkowycz, W. J., & Sparrow, E. M. (2017). *The Finite Element Method*. Boca Raton: Taylor and Francis Group.
- Muzel, S. D., Bonhin, E. P., Guimaraes, N. M., & Guidi, E. S. (2020). Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. *Polymers*, 1-59.
- Nikabadze, M., Moseshvili, T., Ulukhanian, A., Tskhakaia, K., & Mardaleishvili, N. (2017). Formulation of the initial boundary value problems in the theory of multilayered thermoelastic thin bodies in moment II. *Vibration, Control and stability of Dynamical Systems*, 357-368.
- Patel, D., & Buch, V. (2018). Drilling of glass fiber reinforced polymer composite. *Recent Science*, 25059-25062.
- Plappert, D., Ganzenmueller, G., & May, M. (2020). Mechanical Properties of a Unidirectional Basalt- Fiber composite. *Journal of Composites Science*, 1-12.
- Prasad, M., Ram, S., Steve, V., Nawaz, S., & Prasanthi, P. (2018). Analysis of twisted composite plates using finite element method. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 153-159.
- Singiresu, R. (2018). *The Finite Element Method in Engineering*. Oxford: Elsevier.
- Tan, W., Fernando, N., Yang, L., Chang, T., Falzon, B. G., Zhan, L., . . . Liorca, J. (2018). The role of interfacial properties on the intralaminar and interlaminar damage behaviour of unidirectional composite laminates: Experimental characterization and multiscale modelling. *Composites Part B: Engineering*, 206-221.
- Tian, W., Qi, L., Zhou, J., Liang, J., & Ma, Y. (2015). Representative volume element for composites reinforced by spatially randomly distributed discontinuous fibers and its applications. *Composite structures*, 366-373.
- Ton-That, H., & Nguyen-Van, H. (2021). A Combined Strain Element in Static, Frequency and Buckling Analyses of Laminated Composite Plates and Shells. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 56-71.

- Wong, K. (2020, January 15). *Many Composite Layers to Address*. Retrieved from Digital Engineering 24/7: <https://www.digitalengineering247.com/article/many-composite-layers-to-address/ansys-fl-front-wing-failure-plot/>
- Wu, Y., Xing, Y., & Liu, B. (2015). Analysis of isotropic and composite laminated plates and shells using a differential quadrature hierarchical finite element method. *Composite Structures*, 11-25.
- Xie, J., Waas, A. M., & Rassaian, M. (2016). Closed -form solutions for cohesive zone modeling of delamination toughness tests. *Solids Structures*, 379-400.
- Xing, J., Du, C., He, X., Zhao, Z., Zhang, C., & Li, Y. (2019). Finite element study on the impact resistance of laminated and textile composites. *Polymers*, 1798.
- Xu, J., Mkaddem, A., & Mansori, M. (2016). Recent advances in drilling hybrid FRP/ti composite. *Composite structures*, 316-338.
- Zhu, B. (2018). *The Finite Element Method Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering*. Beijing: Wiley.
- Прядко Н.В. (2019). *СОВРЕМЕННЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ В АРХИТЕКТУРЕ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ*. Киев: национальная академия строительства и архитектуры.
- ბერუაშვილი, ვ. (2021). *გარსული კონსტრუქციების გაანგარიშება ოპტიმიზაციის მეთოდით*. თბილისი: ჟურნალი "მშენებლობა".
- გიორგობიანი, ი. (2021). მრავალფენიანი გარსებისა და ფირფიტების მდგრადობა. *მშენებლობა*, 123-126.
- გიორგობიანი, ი. (2021). მრავალფენიანი ფირფიტის გაანგარიშება მდგრადობაზე. *საქართველოს მექანიკოსთა კავშირის XII ყოველწლიური საერთაშორისო კონფერენცია* (pp. 21-22). ქუთაისი: საქართველოს მექანიკოსთა კავშირი.
- გიორგობიანი, ი. (2021). ფენოვანი თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების გაანგარიშება. *მოამბე*, 70-72.

- გიორგობიანი, ი. (2022). თხელკედლიანი სივრცითი კონსტრუქციების გაანგარიშება სიმტკიცეზე სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენებით. *მეცნიერება და ტექნოლოგიები*, 72-79.
- ვ. ბერუაშვილი. (2021). *წიბოების მქონე სივრცითი კონსტრუქციების გაანგარიშება ღუნვაზე*. თბილისი: ჟურნალი „მოამბე“.
- ვ. ბერუაშვილი. (2022). *მართკუთხა წიბოების მქონე სივრცითი კონსტრუქციების გაანგარიშება ოპტიმიზაციის მეთოდებით*. თბილისი: მეცნიერება და ტექნოლოგიები.
- ყიფიანი, გ., & კვარაცხელია, ა. (2017). ფენოვანი ფირფიტები და დინამიკური მდგრადობა. *მშენებლობა*.
- ყიფიანი, გ., აბესაძე, ბ., & ჩაჩხიანი, ნ. (2016). ორგანოზომილებიანი ჭრილიანი ფირფიტის დეფორმაცია განზოგადებული ფუნქციების გამოყენებით. *მექანიკის პრობლემები*.
- ხმელიძე, თ., & ყიფიანი, გ. (2022). *კომპოზიტური კონსტრუქციები*. თბილისი: ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი.