

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თენგიზ ნინიძე

ურიგელო რკინაბეტონის მონოლითური გადახურვის  
პროექტირების საკითხი

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

თებერვალი, 2018 წელი

საავტორო უფლება © 2018 წელი, თენგიზ ნინიძე

თბილისი  
2018 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში  
სამშენებლო ფაკულტეტი  
საინჟინრო მექანიკისა და სამშენებლო ტექნიკური ექსპერტიზის  
დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ლერი ზამბახიძე

რეცენზენტები: ს. ბლიაძე  
ა. ლებანიძე

დაცვა შედგება 2018 წლის „27“ თებერვალს, 14<sup>00</sup> საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო  
ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 68<sup>ბ</sup>. კორპუსი I  
დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით თენგიზ ნინიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ურიგელო რკინაბეტონის მონოლითური გადახურვის პროექტირების საკითხი“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი 27.02.2018 წ

ხელმძღვანელები: ლ. ზამზახიძე

რეცენზენტი: ს. ბლიაძე

რეცენზენტი: ა. ლებანიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2018 წელი

ავტორი: თენგიზ ნინიძე

## დასახელება: ურიგელო რკინაბეტონის მონოლითური გადახურვის პროექტირების საკითხი

ფაკულტეტი : სამშენებლო ფაკულტეტი

აკადემიური ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი 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 და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია 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

რკინაბეტონის გადახურვები, ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კონსტრუქციული ელემენტებია სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობაში. სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიცარილეებიანი გადახურვის ფილის დაზუსტებული საანგარიშო მოდელის შედგენა, რომელიც შედარებით ზუსტად ასახავს ასეთი ფილების მუშაობის ასპექტებს როგორც სტატიკურ ისე დიმამიკურ ზემოქმედებაზე და მაქსიმალურად მიაახლოვებს საანგარიშო სქემის მუშაობას რეალურ პირობებთან.

სამეცნიერო სიახლეს წარმოადგენს ნატურული ექსპერიმენტალური კვლევა.

კვლევის შედეგად მიღებული საანგარიშო სქემის მიხედვით განისაზღვრა წარმოდგენილი გადახურვის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა და შედარებული იქნა ტრადიციულ გადახურვის ფილებთან.

ჩატარებული ექსპერიმენტალური და თეორიული კვლევების ანალიზი აჩვენებს, რომ წარმოდგენილი საანგარიშო სქემა საკმარისად ზუსტად ასახავს კონსტრუქციის მუშაობას ექსპლოატაციის პირობებში, ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიღრუეებიანი მონოლითური რკინაბეტონის ფილები, ტრადიციულ გადახურვებთან შედარებით, იძლევა ბეტონის – 30 % და არმატურის 15%-დან 25%-მდე ეკონომიას.

შენობა ნაგებობებში, ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიღრუეებიანი მონოლითური რკინაბეტონის ფილების გამოყენებისას ბეტონის მოცულობის შემცირების ხარჯზე მცირდება შენობის მასა და შესაბამისად მცირდება ძაღვები საძირკვლებში, სვეტებში, რიგელებსა და გადახურვებში, რაც იწვევს ამ ელემენტებში არმირების შემცირებას.

ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიღრუეებიანი მონოლითური რკინაბეტონის ფილების გამოყენება უფრო ეკონომიურს ხდის შენობა ნაგებობებს.

## **Abstract**

Reinforced concrete coverings are one of the most important structural elements in civil and industrial engineering. The purpose of the work is to create an exact design model of floor slab with orthogonal ribs and bilateral hollows, which relatively accurately reflects the aspects of the behavior of such slabs on static as well as on dynamical impacts and maximally approximate the design layout with real conditions.

The scientific novelty represents in a natural experimental research.

According to the design diagram received by the research is determined the mode of deformation of the presented covering and is compared with the traditional floor slabs.

Analysis of experimental and theoretical research shows that the presented design diagram sufficiently precisely reflected the behavior of structure in operation. The monolithic reinforced concrete slabs with the orthogonal ribs and bilateral hollows compared to the traditional coverings, gives savings in concrete up to 30% and in reinforcement bar from 15% up to 25%.

In buildings, at application of monolithic reinforced concrete slabs with orthogonal ribs and bilateral hollows due the decrease in the concrete volume reduces the building mass and therefore decreases the stresses in the foundations, columns, girders and slabs, causing the reduction of reinforcement bar in these elements.

The application of monolithic reinforced concrete slabs with orthogonal ribs and bilateral hollows makes the building structures more economical.

## შინაარსი

შესავალი-----	13
თავი I. საკითხის დასმა. ლიტერატურის მიმოხივა-----	17
1.1 საერთო ცნობები სართულშუა ურიგელო გადახურვების შესახებ----	17
1.2 ასაწყობი კოჭურ პანელური გადახურვები-----	20
1.3 ღრუტანიანი პანელები-----	22
1.4 მონოლითური სართულშორისი გადახურვა კოჭური ფილებით-----	26
1.5 სართულშორისი მონოლითური წიბოვანი გადახურვა კონტურით დაყრდნობილი ფილებით-----	30
1.6 კესონური გადახურვა-----	31
1.7 უკოჭო ასაწყობი გადახურვები-----	33
1.8 უკოჭო მონოლითური გადახურვა-----	37
1.9 სართულშორისი მონოლითური გადახურვის თანამედროვე კონსტრუირების ხერხები-----	38
1.10 კვლევებით არჩეული მიმართულების დასაბუთება-----	44
თავი II. ორთოგონალურ წიბოებიანი პერფორირებული გადახურვის ფილების დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ექსპერიმენტალური კვლევა-----	45
2.1 გამოსაკვლევი ობიექტის ზოგადი დახასიათება-----	45
2.2.2 სტენდის მოწყობის თანმიმდევრობა-----	50
2.2.3 არმატურის და ბეტონის მახასიათებლების შემოწმება-----	51
2.2.2 ბეტონირების პროცესის აღწერა-----	54
2.3 ექსპერიმენტის ჩატარების თანმიმდევრობა და მიღებული შედეგების ანალიზი-----	56
2.4 ექსპერიმენტალური მონაცემების მიხედვით ოპტიმალური საანგარიშო სქემის შერჩევა-----	80
თავი III. სასრულო ელემენტთა მეთოდი ურიგელო გადახურვის ფილების დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გაანგარიშებაში -----	84

3.1. სასრულ ელემენტთა მეთოდის არსი-----	84
3.2 დრეკადობის თეორიის ძირითადი თანაფარდობები-----	85
3.3. სიბრტყეზე ნებისმიერად განლაგებული ღეროვანი ელემენტი-----	87
3.4. წრფივი სამკუთხა ბრტყელი ელემენტი-----	90
3.5 სასრულ ელემენტების პრაქტიკული რეალიზების ძირითადი ეტაპები-----	96
3.6 სეისმიურ ზემოქმედებაზე გაანგარიშების საკითხები-----	97
3.7 თავისუფალი რხევის განტოლებები-----	98
3.8 იძულებითი რხევის დიფერენციალური განტოლებები სეისმური ზემოქმედებისას-----	104
3.9 სეისმური ინერციული ძალების განსაზღვრა სპექტრალური მეთოდით-----	109
თავი IV. რიცხვითი გაანგარიშების შედეგები-----	112
4.1 კარკასული შენობების გაანგარიშების ანალიზი-----	112
თავი V. ძირითადი დასკვნები და რეკომენდაციები-----	124
თავი VI. ლიტერატურა-----	125



## ცხრილების ნუსხა

1. ცხრილი №1 არმატურის ნიმუშების გამოცდის შედეგები;
2. ცხრილი №2 ბეტონის ნიმუშების გამოცდის შედეგები;
3. ცხრილი №3 ფილის დატვირთვა;
4. ცხრილი №4 მასალის ხარჯი ათსართულიანი შენობისათვის ურიგელო გადახურვით;
5. ცხრილი №5 მასალის ხარჯი ათსართულიანი შენობისათვის რიგელებზე ხისტად ჩამაგრებული ფილით;
6. ცხრილი №6 სამი სხვადასხვა ტიპის გადახურვის ფილის მასალის ხარჯის შედარება;

## ნახაზების ნუსხა

1. ნახ. № 1.1 გადახურვის ფილის სქემები;
2. ნახ. № 1.2 კოჭური პანელური გადახურვა;
3. ნახ. № 1.3 წრიული სიღრუეების მქონე პანელი;
4. ნახ. № 1.4 ღრუები გეომეტრიული მახასიათებლების მიხედვით;
5. ნახ. №1.5 ღრუტანიანი პანელების დაარმატურების სქემა;
6. ნახ. №1.6 წიბოვანი პანელის კონსტრუირება;
7. ნახ. №1.7 მონოლითური წიბოვანი გადახურვა კოჭური ფილებით;
8. ნახ. №1.8 მონოლითური კოჭური ფილების კონსტრუირება;
9. ნახ. №1.9 მონოლითური კოჭური ფილების კონსტრუირება, ბ-შედულებული ბრტყელი ბადეებით, გ-ცალკეული ღეროებით;

10. ნახ. №1.10 მონოლითური წიბოვანი გადახურვა კონტურით დაყრდნობილი ფილებით. ა-გეგმა, ბ-ფილის რღვევის სქემა, გ-ფილაში პლასტიკური სახსრების გაჩენა;
11. ნახ. №1.11 მონოლითური კონტურით დაყრდნობილი ფილების კონსტრუირება;
12. ნახ. №1.12 კესონური გადახურვის სქემა;
13. ნახ. №1.13 კესონური გადახურვის ფილის კონსტრუირება;
14. ნახ. № 1.14 ასაწყობი უკოჭო გადახურვა;
15. ნახ. № 1.15 უკოჭო გადახურვის საანგარიშო სქემა;
16. ნახ. № 1.16 კაპიტელის ტიპები;
17. ნახ. № 1.17 უკოჭო გადახურვის ასაწყობი ფილები;
18. ნახ. №1.18 შემსუბუქებული მონოლითური სართულშორისი გადახურვის ფილის კონსტრუირების ვარიანტები;
19. ნახ. №2.1 ინდიკატორების განლაგების სქემა
20. ნახ. №2.2 დატვირთვა, ცდა-1
21. ნახ. №2.3 დატვირთვა, ცდა-2
22. ნახ. №2.4 დატვირთვა, ცდა-3
23. ნახ. №2.5 დატვირთვა, ცდა-4
24. ნახ. №2.6 დატვირთვა, ცდა-5
25. ნახ. №2.7 დატვირთვა, ცდა-6
26. ნახ. №2.8 დატვირთვა, ცდა-7
27. ნახ. №2.9 დატვირთვა, ცდა-8
28. ნახ. №2.10 ბზარების წარმოქმნა №1 დატვირთვის სქემის დროს
29. ნახ. №2.11 ბზარების წარმოქმნა №2 დატვირთვის სქემის დროს
30. ნახ. №2.12 ბზარების წარმოქმნა №3 დატვირთვის სქემის დროს
31. ნახ. №2.13 ბზარების წარმოქმნა №4 დატვირთვის სქემის დროს
32. ნახ. №2.14 ბზარების წარმოქმნა №5 დატვირთვის სქემის დროს
33. ნახ. №2.15 ბზარების წარმოქმნა №6 დატვირთვის სქემის დროს

34. ნახ. №2.16 ბზარების წარმოქმნა №7 დატვირთვის სქემის დროს
35. ნახ. №2.17 ბზარების წარმოქმნა №8 დატვირთვის სქემის დროს
36. ნახ. №2.18 საანგარიშო სქემის მოდელი
37. ნახ. №2.19 საანგარიშო სქემის მოდელი, ხედი-ა
38. ნახ. №2.20 საანგარიშო სქემის მოდელი, ხედი-ბ
39. ნახ. №2.21 საანგარიშო სქემის მოდელი, ჩაღუნვა მალის შუაში
40. ნახ. №3.1 მყარი ტანი
41. ნახ. №3.2 სასრულ ელემენტების ერთობლიობა
42. ნახ. №3.3 წრფივი სამკუთხა ბრტყელი ელემენტი
43. ნახ. №3.4 სამკუთხა ელემენტი
44. ნახ. №3.5 N<sub>1</sub> ფორმის ფუნქციის ცვლილება
45. ნახ. №4.1 კონტურზე რიგელებიანი მონოლითური გადახურვის ფილა, ვერტიკალური ჩაღუნვა მუდმივი დატვირთვისაგან
46. ნახ. № 4.2 კონტურზე რიგელებიანი მონოლითური გადახურვის ფილა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „X“ ღერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან
47. ნახ. №4.3 კონტურზე რიგელებიანი მონოლითური გადახურვის ფილა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „Y“ ღერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან
48. ნახ. №4.4 ფილა ხისტად ჩამაგრებული რიგელებში, სვეტების არმირება პროცენტებში
49. ნახ. №4.5 ფილა ხისტად ჩამაგრებული რიგელებში, ფილის არმირების ქვედა შრე
50. ნახ. № 4.6 ფილა ხისტად ჩამაგრებული რიგელები, ფილის არმირება ზედა შრეში
51. ნახ. №4.7 ურიგელო გადახურვა, ვერტიკალური ჩაღუნვა მუდმივი დატვირთვისგან

52. ნახ. № 4.8 ურიგელო გადახურვა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „X” ღერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან
53. ნახ. № 4.9 ურიგელო გადახურვა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „Y” ღერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან
54. ნახ. № 4.10 ურიგელო გადახურვა, სვეტების არმირება პროცენტებში
55. ნახ. № 4.11 ურიგელო გადახურვა, რიგელების არმირება ქვედა შრეში
56. ნახ. №4.12 ურიგელო გადახურვა, ფილის არმირება ქვედა შრეში
57. ნახ. № 4.13 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა, ვერტიკალური ჩაღუნვა მუდმივი დატვირთვისგან
58. ნახ. № 4.14 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „X” ღერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან
59. ნახ. № 4.15 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „Y” ღერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან
60. ნახ. № 4.16 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა სვეტების არმირება პროცენტებში
61. ნახ. № 4.17 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა ზედა და ქვედა ფილის არმირების სქემა
62. ნახ. № 4.18 სიღრუეებიანი გადახურვა კოჭების არმირების სქემა

## შესავალი

**თემის აქტუალურობა.** რკინაბეტონის გადახურვები, ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კონსტრუქციული ელემენტებია სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობაში.

აღსანიშნავია, რომ კარკასულ ნაგებობებში ბეტონის საერთო ხარჯის 65 % გადახურვებზე მოდის, აქედან გამომდინარე მნიშვნელოვანია რკინაბეტონის გადახურვების რაციონალური ვარიანტის შერჩევა, მისი დამზადების ტექნოლოგიის, სიმტკიცის მახასიათებლებისა და მასალების ეკონომიურობის თვალსაზრისით.

წლების განმავლობაში ჩვენს ქვეყანაში გამოიყენებოდა ანაკრები რკინაბეტონის კონსტრუქციები, კერძოდ სხვადასხვა ტიპის და მზიდუნარიანობის მქონე ანაკრები რკინაბეტონის ღრუტანიანი ფილები.

დროთა განმავლობაში ის ჩაანაცვლა ე.წ კლასიკური (რიგელებიანი) ტიპის, რკინაბეტონის გადახურვის ფილებმა, ხოლო ბოლო ხანებში ხშირი გამოყენება ჰპოვა ურიგელო და ფარულ რიგელებიანი გადახურვის ფილებმა.

საქართველოს ფარგლებს გარეთ უკვე დანერგილია სიღრუებიანი ურიგელო მონოლითური გადახურვები მაგ: Cobiax, Nautilus, U-BOOT BETON და ა. შ.

სიღრუებიანი ურიგელო მონოლითური გადახურვის ფილების გამოყენება მნიშვნელოვნად ამცირებს ბეტონისა და არმატურის ხარჯს, შესაბამისად მიღებული შედეგების პრაქტიკაში დანერგვა საშუალებას მოგვცემს მიღწეული იქნას მნიშვნელოვანი ეკონომიური ეფექტი.

ეკონომიური ეფექტი იზრდება თუკი ფილებში სიცარიელები ჩაიდება ორივე მიმართულებით.

ჩატარებული კვლევების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მიუხედავად დიდი დაინტერესებისა ასეთი ტიპის გადახურვები ნაკლებად

შესწავლილი, ხოლო არასაკმარისი ექსპერიმენტალური და თეორიული გამოკვლევები აფერხებენ ასეთი ტიპის გადახურვების გამოყენებას მშენებლობაში. ამიტომ ურიგელო ორმხრივ სიღრუეებიანი გადახურვის ფილების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის კვლევის საკითხები აქტუალურია თანამედროვე მშენებლობაში.

სამეცნიერო სიახლეს წარმოადგენილ სამუშაოში შეადგენს ნატურული ექსპერიმენტალური კვლევების საფუძველზე ურიგელო ორმხრივ სიღრუეებიანი (ორთოგონალურ წიბოებიანი პერფორირებული) გადახურვის ფილის საანგარიშო სქემის დაზუსტება.

მიღებული საანგარიშო სქემის მიხედვით განისაზღვრა წარმოადგენილი გადახურვის დაძაბულ დეფორმირებული მდგომარეობა, როგორც სტატიკურ ისე სეისმურ ზემოქმედებაზე. მიღებული შედეგები შედარებული იქნა ტრადიციულ გადახურვის ფილებთან.

სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ურიგელო ორმხრივ სიღრუეებიანი გადახურვის ფილებისათვის დაზუსტებული საანგარიშო მოდელის შედგენა, რომელიც შედარებით ზუსტად ასახავს ასეთი ფილების მუშაობის ასპექტებს, როგორც სტატიკურ ისე დინამიკურ ზემოქმედებაზე და მაქსიმალურად მიახლოვებს საანგარიშო სქემის მუშაობას რეალურ პირობებთან.

საანგარიშო მოდელის ფიზიკურ მოდელთან მაქსიმალურად მიახლოვებისა და საანგარიშო იდეალიზაციის დასაშვები ზღვრების დასასაბუთებულად დანიშნის მიზნით ჩატარდა საკვლევო გადახურვის ექსპერიმენტალური კვლევები.

საანგარიშო მოდელის თეორიული კვლევები ჩატარდა სასრულ ელემენტების მეთოდის გამოყენებით, რომელიც კარგადაა მორგებული ელექტრო გამომთვლელი მანქანებით განგარიშებებზე. როგორც ცნობილია სასრულ ელემენტებს წარმოადგენს ღეროვანი, სამკუთხა, ოთხკუთხა და ასე შემდეგ ელემენტები. ამ ელემენტების სხვადასხვა

კომბინაციების გამოყენების გზით შეირჩა რაციონალური საანგარიშო სქემა, რომელიც მაქსიმალურად იქნა მიახლოებული ექსპერიმენტალურ მონაცემებთან.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება მდგომარეობს იმაში, რომ წარმოდგენილი საანგარიშო სქემა იძლევა საშუალებას მაქსიმალურად ზუსტად განისაზღვროს ურიგელო ორმხრივ სიღრუეებიანი (ორთოგონალურ წიბოებიანი პერფორირებული) ფილის დამაბუღ-დეფორმირებული მდგომარეობა, როგორც სტატიკურ ისე დინამიკურ ზემოქმედებაზე, ხოლო ურიგელო გადახურვის ორმხრივ სიღრუეებიანი გადახურვების თანამედროვე მშენებლობაში გამოყენება უფრო ეკონომიურს გახდის მშენებლობას.

სამუშაოს მოცულობა: სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლისაგან, ოთხი თავისაგან, დასკვნა რეკომენდაციებისა და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. იგი წარმოდგენილია 129 გვერდზე, შეიცავს 62 ნახაზს, 23 სურათს, 6 ცხრილსა და გამოყენებულ ლიტერატურას.

პირველ თავში მოცემულია ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვის ფილების პრაქტიკაში გამოყენების ლიტერატურული მიმოხილვა. განხილულია სხვადასხვა ქვეყნებში ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვების ფილების გამოყენების მაგალითები.

მეორე თავი ეძღვნება სიღრუეებიანი ურიგელო გადახურვის ფილის ნატურულ გამოცდებს. კვლევები ჩატარდა 3X6 მ მონოლითურ ურიგელო სიღრუეებიან გადახურვის ფილაზე, რომელიც დაყრდნობილია ოთხ წერტილში მონოლითური რკინაბეტონის 1.8 მ სიმაღლის სვეტებზე.

ექსპერიმენტალური კვლევების მიზანს წარმოადგენდა ურიგელო სიღრუეებიან გადახურვის ფილის საანგარიშო სქემის დაზუსტება

რომელიც შედარებით ზუსტად ასახავდა კონსტრუქციის მუშაობას საექსპლოატაციო პირობებში.

კვლევების შედეგად მიღებული იქნა ჩალუნვების მნიშვნელობები სხვადასხვა ტიპის დატვირთვებისათვის.

მესამე თავში მოცემულია, ურიგელო სიცარიელებიან გადახურვის ფილის სტატიკური და დინამიკური გაანგარიშების მეთოდის, სასრულ ელემენტთა მეთოდის გამოყენებით. მოცემულია სასრულ ელემენტთა მეთოდით გაანგარიშების ძირითადი თანაფარდობები. საანგარიშო სქემის შედგენა ხდება კონტინუალური სისტემის დისკრეტიზაციის გზით, ცალკეული ტიპის სასრულ ელემენტების გამოყენებით.

მეოთხე თავში განხილულია რიცხვითი გაანგარიშებების შედეგები. დეროვანი და სამკუთხა სასრულ ელემენტების სხვადასხვა კომბინაციებით შედგენილია საანგარიშო სქემების ვარიანტები და ისინი შედარებულია ექსპერიმენტის მონაცემებთან. შედარების გზით დადგენილია რეალურთან მიახლოებული საანგარიშო სქემა.

მიღებული სქემით გაანგარიშებულია მაღლივი შენობები ურიგელო სიღრუეებიან გადახურვის ფილების გამოყენებით, რომელიც შედარებულია ტრადიციულთან.

სადისერტაციო ნაშრომის ბოლოში მოცემულია საერთო დასკვნები და რეკომენდაციები, მიღებული შედეგების პრაქტიკაში გამოყენების მიზნით. მოყვანილია ასევე გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალი.

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული კვლევები ასახულია შემდეგ სამეცნიერო შრომებში:

1. ზ. გუბელიძე, ვ. დვალიშვილი, ო. გიორგიშვილი, თ. ნინიძე. ექსპერიმენტის დაგეგმვის საფუძვლები. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „ენერჯია“ ISSN 1512-0120 №4(72), თბილისი 2014.

2. 3. ГУБЕЛИДЗЕ, Б. ХАЧИДЗЕ, Т. НИНИДЗЕ. Вчисление перемещений оболочечного конечного элемента через перемещения его узлов.



3. მ. ლორთქიფანიძე, ო. გიორგიშვილი, ი. სალუქვაძე, ნ. ბოჭორიშვილი, ა. თათანაშვილი, თ. ნინიძე. ადგილობრივ საშენ მასალებზე დამზადებული დანამატისანი სამშენებლო მასალების თვისებების კვლევა და დანერგვა სამშენებლო წარმოებასა და საავტომობილო გზების ინფრასტრუქტურაში სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „ენერჯია“ №4(80), თბილისი 2016.

4. თ. ნინიძე. ურიგელო ღრუტანიანი მონოლითური გადახურვა. სტუდენტთა 84-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. საინჟინრო მექანიკის და მშენებლობის ტექნიური ექსპერტიზის სექცია.

5. ლ. ზამბახიძე, თ. ნინიძე. ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიცარიელებიანი, მონოლითური გადახურვის ფილების დამაბუღ-დეფორმირებული მდგომარეობის ექსპერიმენტალური კვლევა. „საქართველოს საინჟინრო სიახლენი“ №4, 2017 წ.

6. ლ. ზამბახიძე, თ. ნინიძე. ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიცარიელებიანი, მონოლითური გადახურვის ფილების საანგარიშო სქემის დაზუსტება. „საქართველოს საინჟინრო სიახლენი“ №1, 2018 წ.

## თავი 1

### საკითხის დასმა. ლიტერატურის მიმოხივა

#### 1.1. საერთო ცნობები სართულშუა ურიგელო გადახურვების შესახებ

რკინაბეტონის გადახურვების მაღალმა საექსპლოატაციო მახასითებლებმა, ჟამგამძლეობამ, სიხისტემ, ჰიგიენურობამ, ეკონომიურობამ და ინდუსტიული აგების შესაძლებლობამ ხელი შეუწყო მის ფართო გამოყენებას მშებლობაში.

რკინაბეტონის სართულშუა გადახურვები, ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კონსტრუქციული ელემენტებია სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობაში. აღსანიშნავია, რომ კარკასულ ნაგებობებში ბეტონის საერთო ხარჯის 65% გადახურვებზე მოდის, აქედან გამომდინარე მნიშვნელოვანია რკინაბეტონის გადახურვების რაციონალური ვარიანტის შერჩევა, მისი დამზადების ტექნოლოგიის, სიმტკიცის მახასიათებლებისა და მასალების ეკონომიურობის თვალსაზრისით.

რკინაბეტონის გადახურვები სამოქალაქო მშენებლობაში უნდა აკმაყოფილებდეს თბო და ბგერაიზოლაციის პირობებს, რაც საჭიროს ხდის დამატებით ღონისძიებების განხორციელებას. არსებობს სხვადასხვა ტიპის რკინაბეტონის გადახურვები, მაგრამ ისინი ყველა კონსტრუქციული სქემის მიხედვით იყოფიან ორ ძირითად ჯგუფად: კოჭური და უკოჭო გადახურვები.

კოჭური გადახურვა შედგება კოჭებისგან, რომელიც განლაგებულია გრძივი და განივი მიმართულებებით, რომელთაც ეყრდნობა ფილა ან პანელი.

უკოჭო გადახურვა არ შეიცავს კოჭებს, გადახურვის ფილა და პანელები უშუალოდ ეყრდნობიან სვეტებს.

ორივე ტიპის გადახურვები-კოჭურიც და უკოჭოც, აგების შესაძლებლობების მიხედვით, შეიძლება იყოს ასაწყობი, მონოლითური ან ასაწყობ-მონოლითური.

ა) კოჭური გადახურვები გვხვდება:

1. ასაწყობი კოჭური პანელური გადახურვა;

2. წიბოვანი მონოლითური გადახურვა კოჭური ფილებით;

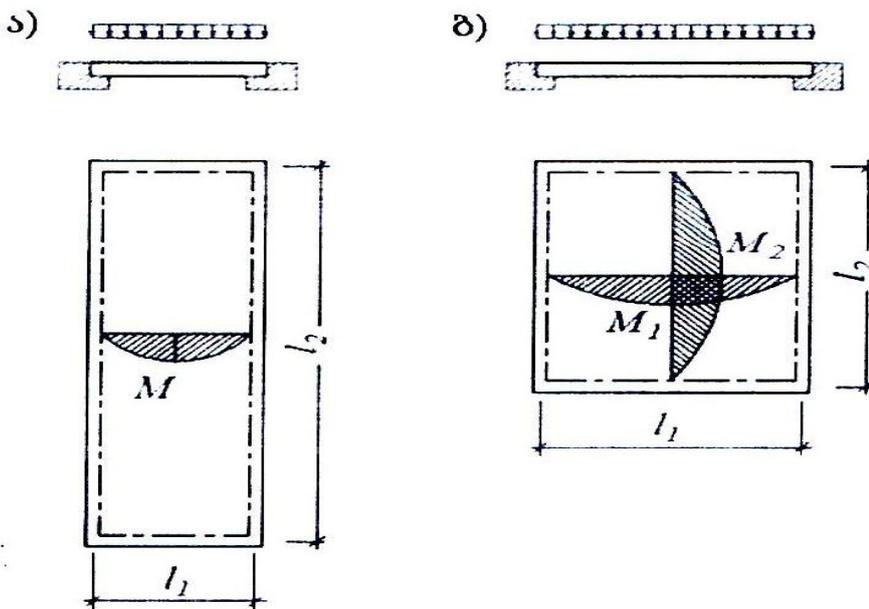
3. წიბოვანი მონოლითური გადახურვა კონტურით დაყრდნობილი ფილებით;

4. კოჭური ასაწყობი-მონოლითური გადახურვა.

ბ) უკოჭო გადახურვის სახეებია;

1. უკოჭო ასაწყობი გადახურვა;
2. უკოჭო მონოლითური გადახურვა;
3. უკოჭო ასაწყობ-მონოლითური გადახურვა.

გადახურვებში გამოყენებული ფილების გვერდების ფართობის მიხედვით შეიძლება იყოს: კოჭური, თუ  $l_2/l_1 < 2$ -ზე (ნახაზი 1.1-ა), რომელიც მუშაობს ღუნვაზე მოკლე გვერდის მიმართულებით, ამასთან მომენტი გრძელი მიმართულებით უგულვებელყოფილია მისი სიმცირის გამო. თუ ფილის გვერდების ფარდობა  $l_2/l_1 < 2$ -ზე, გვაქვს კონტურით დაყრდნობილი ფილა (ნახაზი 1.1-ბ) რომელიც მუშაობს ღუნვაზე ორივე მიმართულებით, ურთიერთ გადამკვეთი მუშა არმატურით.



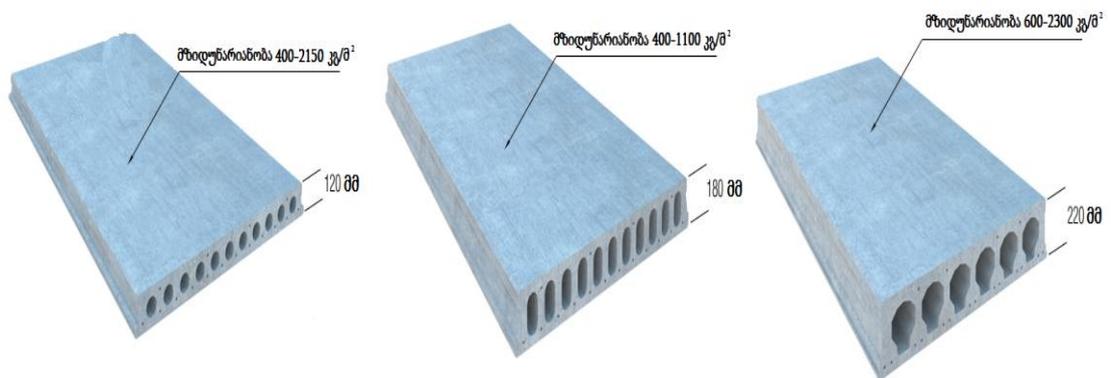
ნახ. № 1.1 გადახურვის ფილის სქემები.

ა- კოჭური ფილა; ბ-კონტურით დაყრდნობილი ფილა

წლების განმავლობაში ჩვენს ქვეყანაში, სართულშუა გადახურვებში, გამოიყენებოდა ქარხნული (ანაკრები) რკინაბეტონის კონსტრუქციები, კერძოდ სხვადასხვა ტიპის და მზიდუნარიანობის მქონე ანაკრები რკინაბეტონის ღრუტანიანი ფილები (სურ. № 1.1).

დღეისათვის მშენებლობის 100% ხორციელდება რკინაბეტონის მონოლითური ელემენტებით, რომლებიც ხისტი კვანძების არსებობით არის უფრო საიმედო, მდგრადი და გამოიყენება ყველა ტიპის ნაგებობისათვის.

გადახურვის კონსტრუქციის ტიპის არჩევა ხდება ცალკეულ შემთხვევაში ნაგებობის დანიშნულების მიხედვით, დამოკიდებულია შენობის სიდიდეზე, მოქმედი დატვირთვების ზემოქმედებაზე, ადგილობრივ პირობებზე, საწარმოო ბაზის არსებობაზე და სხვა.



სურ. № 1.1  
ანაკრები რკინაბეტონის ღრუტანიანი ფილები.

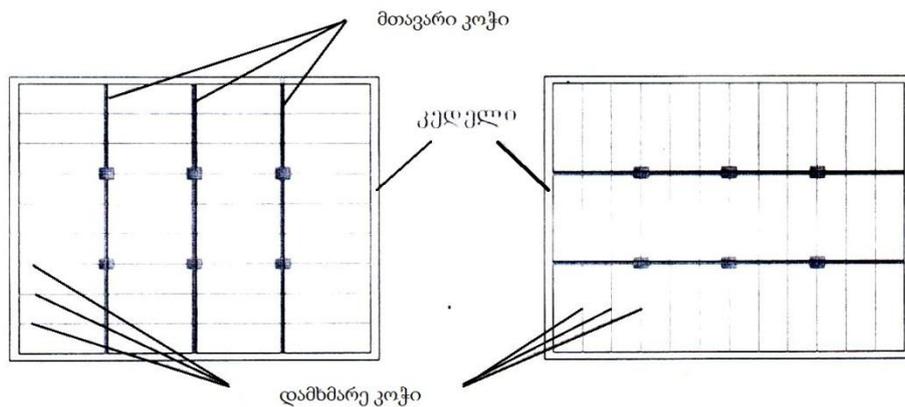
## 1.2 ასაწყობი კოჭური პანელური გადახურვები

კოჭური პანელური გადახურვა შედგება ასაწყობი პანელებისაგან და მისი დამჭერი რიგელებისაგან, კოჭების მიმართულება შეიძლება იყოს როგორც გრძივი ისე განივი (ნახ.№ 1.2) რიგელები ეყრდნობა კედელს ან შუალედურ საყრდენებს-სვეტებს. ნაგებობაში სრული კარკასით რიგელები ეყრდნობიან მხოლოდ სვეტებს, რომელიც შეიძლება შეერთებული იყოს ხისტად, სვეტთან ერთად [42].

გადახურვის მალეობის რაოდენობა დამოკიდებულია შენობის დანიშნულებაზე, გრძივი მიმართულებით ბიჯების რაოდენობა დამოკიდებულია შენობის საერთო სიგრძეზე. სამოქალაქო შენობებში გადახურვისათვის სვეტების ბადე გრძივი და განივი მიმართულებით აიღება 2,8-დან 6,8 მ\_მდე და 0,4 ჯერადი.

დაპროექტების დროს გადახურვის კონსტრუქციული სქემა დამოკიდებულია შემდეგ ფაქტორებზე:

1. შენობის დანიშნულება;
2. მთელი შენობის საერთო გადაწყვეტა;
3. გადახურვის ტექნიკურ ეკონომიური მაჩვენებელი.



ნახ. № 1.2 კოჭური პანელური გადახურვა

შენობის დანიშნულების მიხედვით ნაგებობის დაპროექტება უნდა მოხდეს არქიტექტურული ნორმების დაცვით.

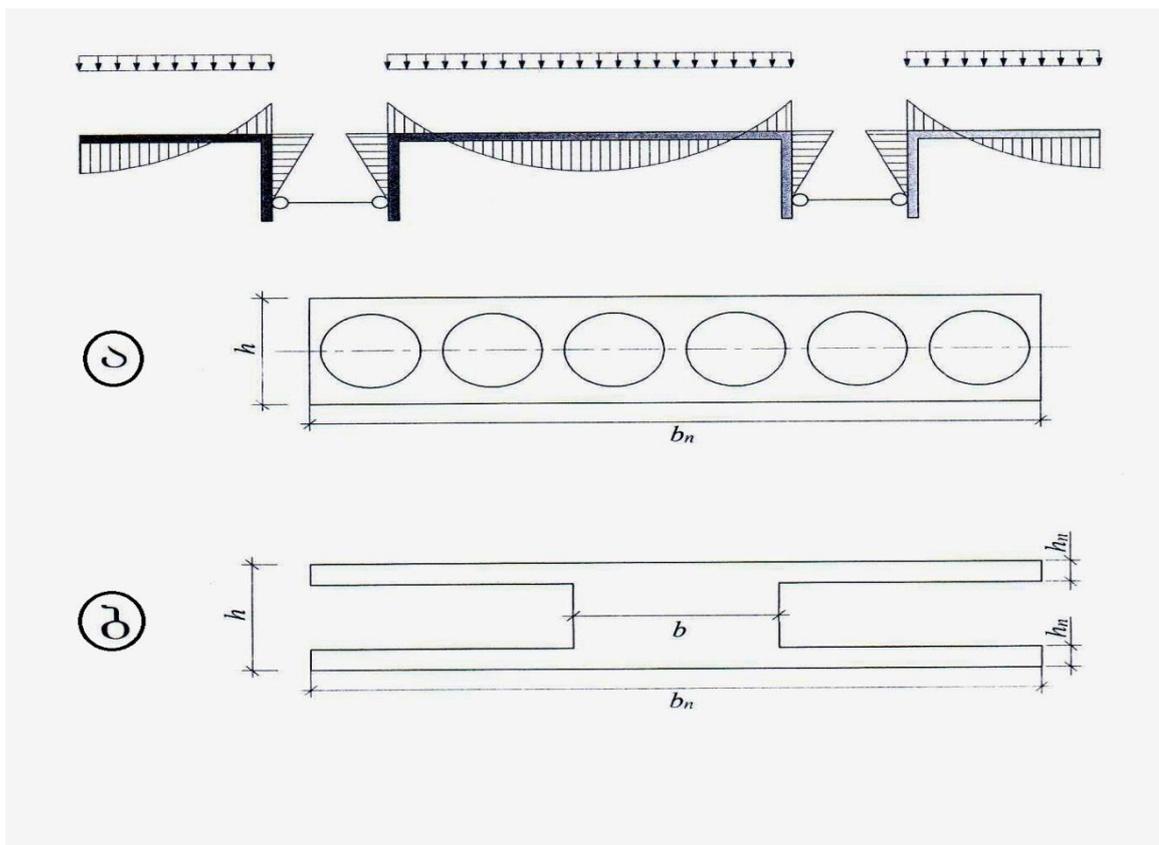
მთლიანი შენობის კონსტრუქციული გადაწყვეტა ემსახურება სივრცითი სიხისტის უზრუნველყოფას ხისტი კვანძებით, ხოლო ტექნიკურ-ეკონომიური მაჩვენებლები გულისხმობს გადახურვის, რიგელებისა და ფილების ისეთ განლაგებას, რომ მივიღოთ რაც შეიძლება ეკონომიური გადაწყვეტა, რომლის დროსაც ბეტონისა და არმატურის მოცულობა იქნება უმცირესი.

ასაწყობი პანელები მისი სიმსუბუქის მიღწევის მიზნით პროექტირდება შემსუბუქებული კონსტრუქციით, სიცარიელებით ან გამოშვებული წიბოებით განივ კვეთში.

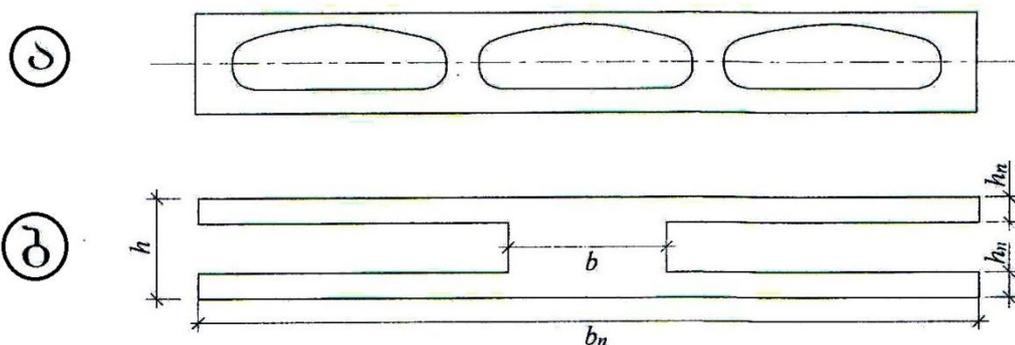
### 1.3 ღრუტანიანი პანელები

ღრუტანიანი (სიღრუეების მქონე) პანელები გამოყენებულია სამოქალაქო მშენებლობაში, ხოლო წიბოვანი პანელები გამოიყენება სამრეწველო შენობების გადახურვებში .

ყველა სახის პანელების გაანგარიშება ხდება მათი განივი კვეთის მიხედვით. ღრუტანიანი ფილების გაანგარიშებისას საგულისხმოა მათი საანგარიშო სქემა, რომელიც ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე, თანაბრად განაწილებული  $q = q + v$  დატვირთვით. მისი საანგარიშო კვეთის მოხაზულობა ორტესებრი კვეთისაა (ნახ. 1.3). სამოქალაქო შენობებში გამოყენებულ პანელებზე თანაბრად განაწილებული დროებითი დატვირთვა  $V = 500$ კგ/მ<sup>2</sup>-ზე.

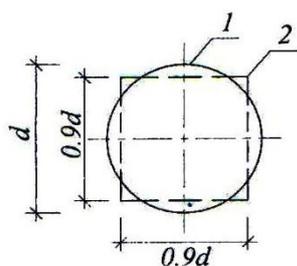


ნახ. № 1.3 წრიული სიღრუეების მქონე პანელი

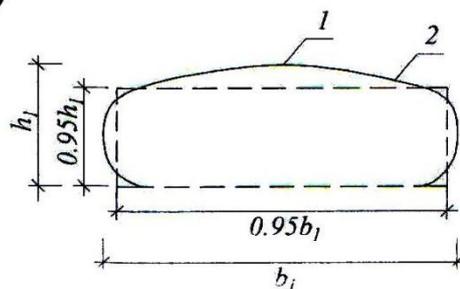


პანელი ოვალური ღრუებით  
 ა - არსებული კვეთი; ბ - საანგარიშო კვეთი

1



2



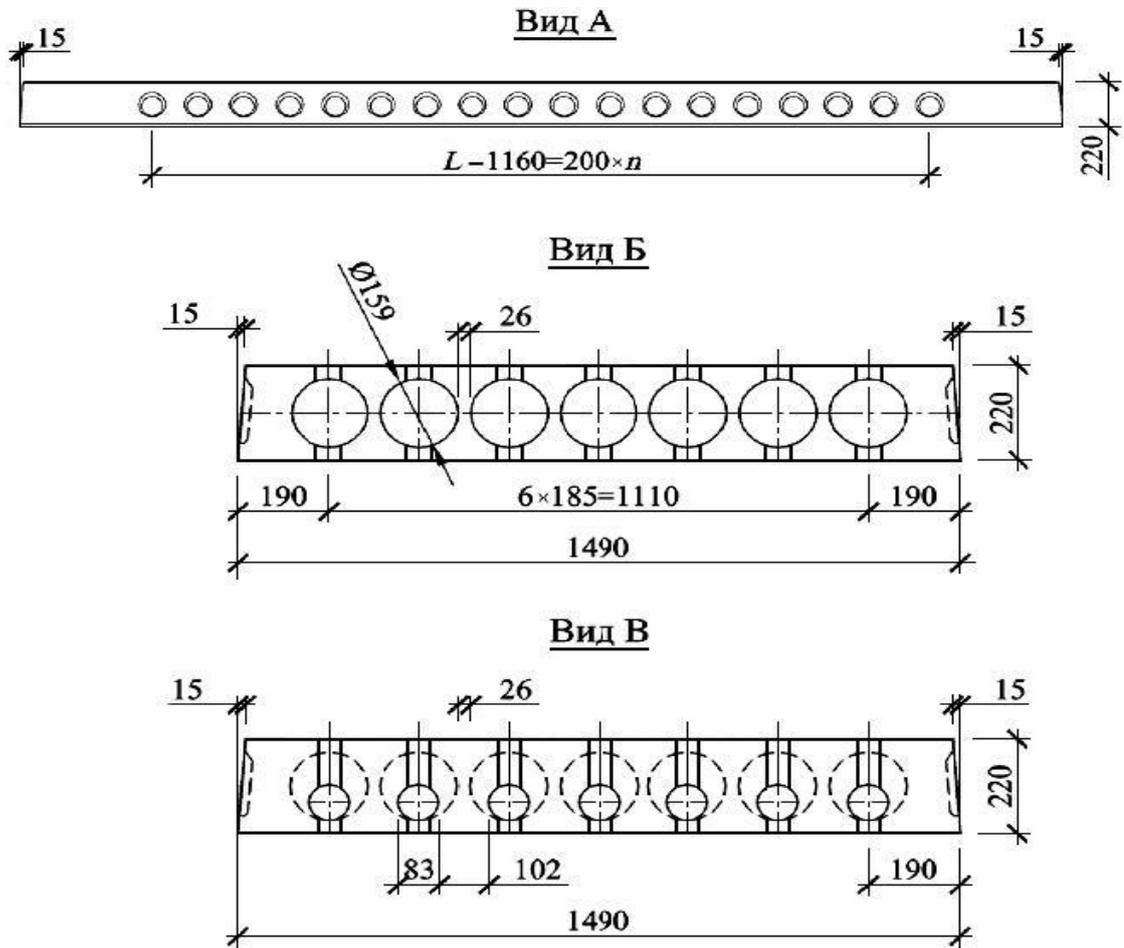
ღრუები გეომეტრიული მახასიათებლების მიხედვით  
 1 - არსებული კვეთი; 2 - საანგარიშო კვეთი

ნახ. №1.4

ღრუტანიანი პანელების გაანგარიშება ხდება საანგარიშო სქემის მიხედვით მიღებული მღუნავი მომენტებისა და განივი ძალების მიხედვით. გაჭიმული არმატურა ეწყობა სიცარიელებს შორის კარკასების სახით, ხოლო პანელების თხელკედლიან ნაწილში, თაროში ეწყობა არმატურის ბადე (ნახ.№ 1.4).

ღრუტანიანი პანელების გეომეტრიული ზომები დამოკიდებულია სვეტების ბადეზე. შეიძლება სვეტების ბადე იყოს 6, 9, 12 მ-ის ტოლი, თუ სვეტების ბადე მეტია ვიდრე 6 მ, მაშინ პანელი კეთდება წინასწარდაძაბული. გაანგარიშებით მიღებული დაძაბული არმატურა

განლაგებულია პანელის წიბოში. წინასწარდაძაბულ არმატურად გამოყენებულია მაღალი სიმტკიცის ღეროვანი, მავთულოვანი არმატურები



და ბადეები.

ნახ. №1.5 ღრუტანიანი პანელების დაარმატურების სქემა

პანელების გამონოლითება გადახურვებში ხდება ჩასატანებელი დეტალების შედუღებით და გრძივი წიბოების დამონოლითებით.

პანელების სიმაღლის დადგენა ხდება სიმტკიცის და სიხისტის უზრუნველყოფის მიხედვით, ასევე ზღვრული ჩალუნვის მიხედვით. წინასწარ შეგვიძლია დავადგინოთ პანელის სიმაღლე შემდეგი ფორმულით

$$h = \frac{c \cdot l_0 \cdot R_s \cdot g^{\sigma} \cdot \theta + \rho^{\sigma}}{E_s \cdot q^{\sigma}}$$

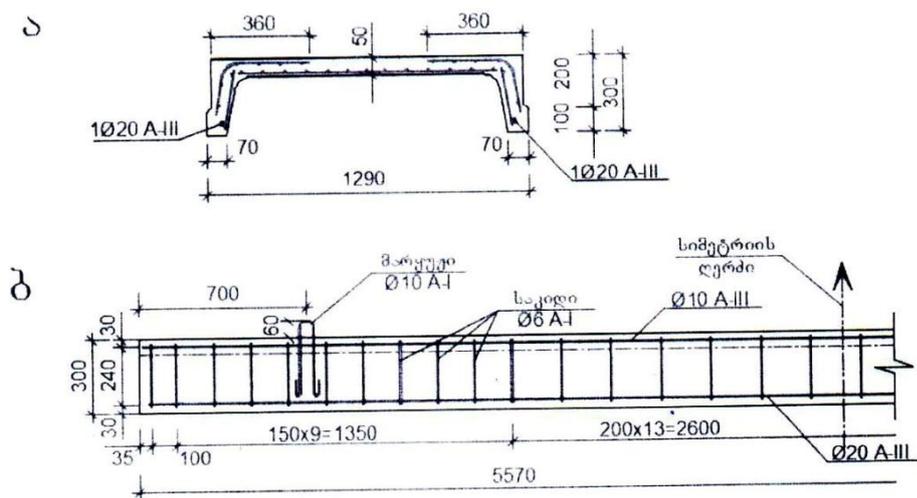


სადაც:  $q^{\sigma}$  — ხანგრძლივი ნორმატიული დატვირთვაა გადახურვის 1 მ<sup>2</sup>-ზე;

$q^{\sigma}$  — ჯამური ხანგრძლივი ნორმატიული დატვირთვაა გადახურვის 1 მ<sup>2</sup>-ზე;

$\theta$  — სიხისტის შემამცირებელი კოეფიციენტი დატვირთვის ხანგრძლივი მოქმედებისას. ღრუტანიანი პანელებისათვის  $\theta = 2$ , წიბოვანი პანელებისათვის, როდესაც თარო შეკუმშულ ზონაშია  $\theta = 1.5$ ;

c — კოეფიციენტი, რომელიც ღრუტანიანი პანელებისათვის აიღება c=18÷20-მდე, ხოლო წიბოვანი პანელებისათვის, თაროთი შეკუმშულ ზონაში c=30÷34-მდე.



ნახ. №1.6 წიბოვანი პანელის კონსტრუქცია.

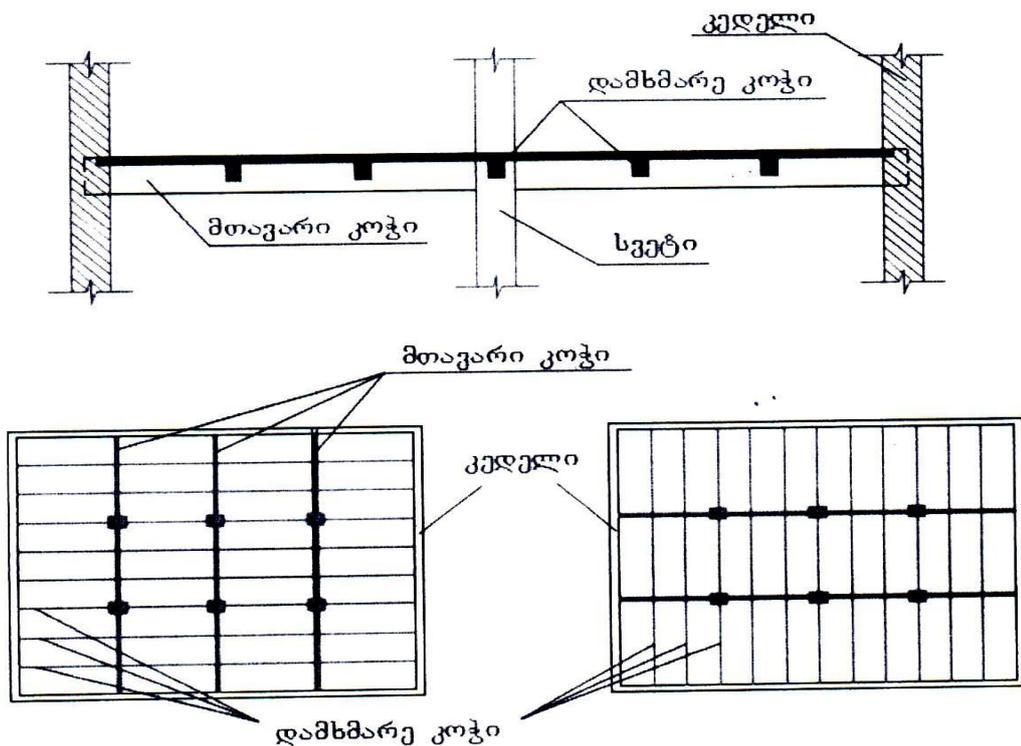
ა-პანელის განივი ჭრილი; ბ-პანელის გრძივი ჭრილი

წიბოვანი პანელი შედგება გრძივი და განივი წიბოსაგან და თაროსაგან. გრძივი წიბო გაიანგარიშება როგორც ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე ელემენტი, თანაბრად განაწილებული დატვირთვით, ხოლო განივი წიბო და თარო (პანელის თხელკედლიანი) გაიანგარიშება საანგარიშო სქემით, როგორც ხისტად ჩამაგრებული ორივე ბოლოთი და თანაბრად განაწილებულ დატვირთვაზე. მის საანგარიშო კვეთს წარმოადგენს ტესტური კვეთი, რომლის წიბოს სიგანე არის გრძივი წიბოების ჯამი, ხოლო თაროს

სიმაღლე  $h_f$ . წიბოვანი პანელების დაარმატურება ხდება შედუღებული კარკასით და ბადეებით. დიდი მალეების შემთხვევაში წიბოვანი პანელები კეთდება წინასწარდამაბული არმატურით. დამაბული არმატურა მოთავსებულია გრძივ წიბოში, გაჭიმულ ზონაში.

### 1.4 მონოლითური სართულშორისი გადახურვა კოჭური ფილებით

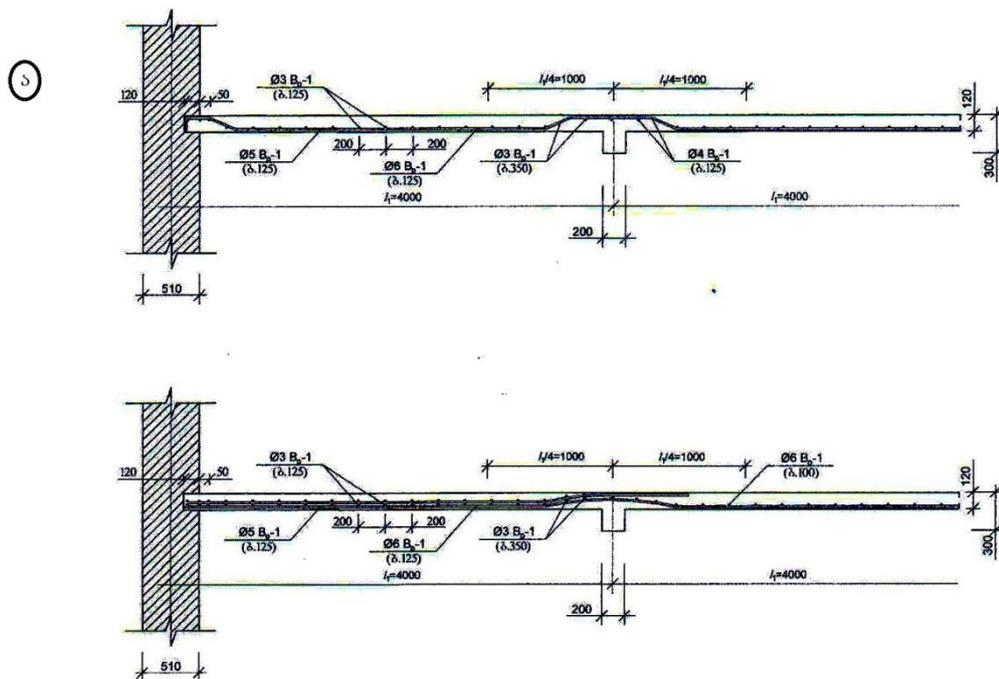
მონოლითური გადახურვა კოჭური ფილებით, მას აგრეთვე უწოდებენ წიბოვან გადახურვას კოჭური ფილებით. გადახურვა შედგება მთავარი და დამხმარე კოჭებისა და ფილის თხელკედლიანი ნაწილისაგან, რომელიც ერთმანეთთან შეერთებულია მონოლითურად. საანგარიშო სქემას, როგორც ფილისთვის ასევე კოჭებისთვის წარმოადგენს მრავალ მალიან უჭრ სისწემას, თანაბრად განაწილებული დატვირთვით [42].



ნახ. №1.7 მონოლითური წიბოვანი გადახურვა კოჭური ფილებით

გადახურვის ყველა ელემენტი მონოლითურად არის ერთმანეთთან შეერთებული. მონოლითური გადახურვის არსს წარმოადგენს ის, რომ

ბეტონი გაჭიმული ზონიდან გამოთავისუფლებულია და გამჭიმავ ძალებს იტანს როგორც დამხმარე, ასევე მთავარი კოჭის წიბოები, ხოლო შეკუმშული დატვირთვა გადაეცემა ფილას, ამით მიღწეულია ბეტონის მოცულობის დიდი ეკონომია. მონოლითურ კოჭურ წიბოვან გადახურვებში, ფილაში მუშა არმატურა ჩალაგებულია მოკლე გვერდის მიმართულებით. ფილის სისქე დამოკიდებულია შენობის დანიშნულებასთან და ნორმების თანახმად სართულშორისი გადახურვებისათვის ფილის სისქის შეზღუდვასთან, სამრეწველო ნაგებობებში აიღება არაუმცირეს 7 სმ-ისა, ხოლო სამოქალაქო დანიშნულების შენობებში არაუმცირეს 6 სმ-ისა [42].



ნახ. №1.8 მონოლითური კოჭური ფილების კონსტრუქცია

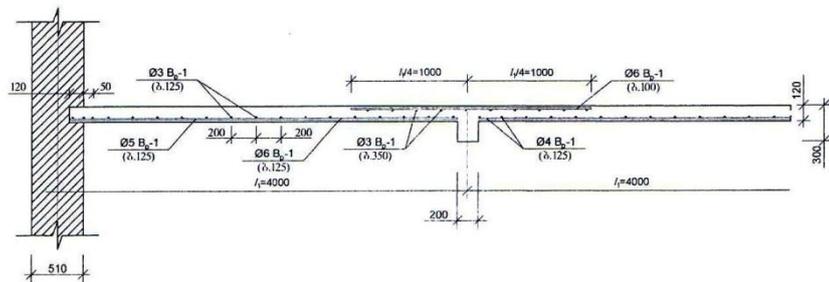
ა-უტყვეტი რულონური ბადეებით

მონოლითური წიბოვანი გადახურვები კოჭური ფილებით (ნახ.№ 1.6) შედგება მთავარი კოჭებისაგან, რომლის მაღი იცვლება 5÷7 მ-მდე. ფილის მაღი არის დამხმარე კოჭებს შორის მანძილი და აიღება 1,7÷2,7 მ-მდე. კოჭების კვეთის სიმაღლე აიღება ნორმების მიხედვით [42].

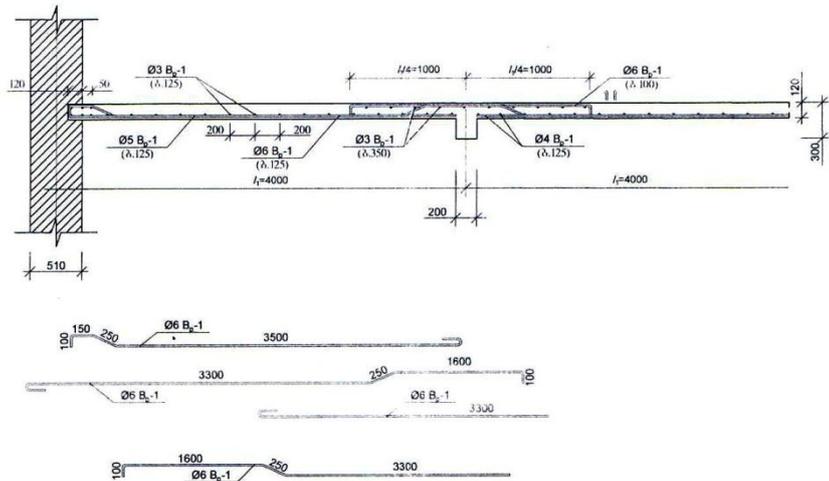
ა) ფილის გაანგარიშება ხდება  $1 \text{ მ}^2$ -ზე მოსული მუდმივი და დროებითი დატვირთვების მიხედვით  $q=g+v$ . საანგარიშო სქემად მიღებულია მრავალმალიანი უჭრი ფილა თანაბრად განაწილებული დატვირთვით.

ფილის გაანგარიშებისათვის გადახურვის სიბრტყიდან გამოიყოფა 1 გრძივი მეტრის სიგანის ზოლი დამხმარე კოჭების მართობულად და გამოითვლება ზოლზე მოქმედი ( $1 \text{ მ}^2$ -ზე) დატვირთვა და მღუნავი მომენტი.

ბ



ბ



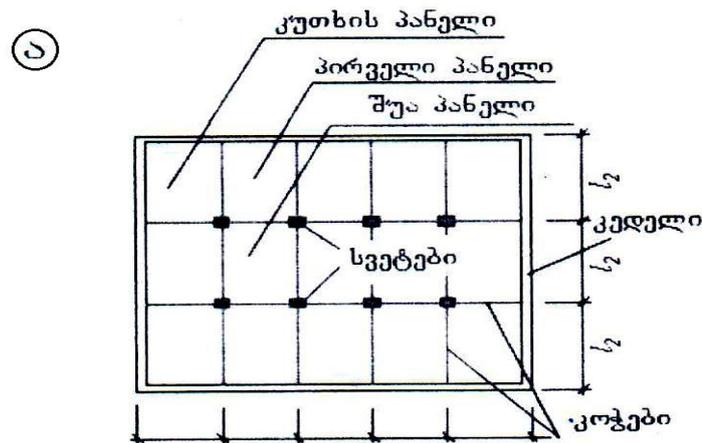
ნახ. №1.9 მონოლითური კოჭური ფილების კონსტრუირება

ბ-შედულებული ბრტყელი ბადეებით, გ-ცალკეული ღეროებით

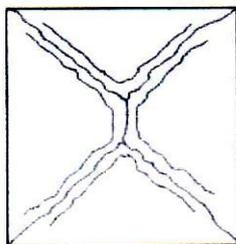
მღუნავი მომენტები გამოითვლება პლასტიური დეფორმაციების გათვალისწინებით გამარტივებული ხერხით, გათვალისწინებულია მომენტების გადანაწილება კვეთში.

თუ კონსტრუირება ხდება შედუღებული უწყვეტი ბადეებით, მაშინ უმჯობესია მალეში და საყრდენებზე იყოს ერთნაირი მომენტები. უჭრ ფილებში მღუნავი მომენტი იწვევს გაჭიმვას, მალის ფილის ქვედა ნაწილში და საყრდენებზე ფილის ზედა ნაწილში, ამიტომ თუ კონსტრუირება ხდება უწყვეტი რულონური ბადით, მაშინ საყრდენზე ხდება მისი აღუნვა. პირველ მალში, რადგან მომენტი მეტია, ამიტომ ხდება დამატებითი ბადის მოწყობა, რომელიც გადადის მეორე მალში 0,25l-ის სიგრძეზე.

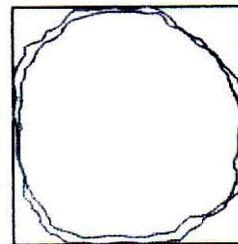
რკინაბეტონის გადახურვის კონსტრუირება კოჭური ფილებით ასევე შეიძლება განხორციელდეს ცალკეული ღეროებით. ცალკეული ღეროები ფილის საყრდენებზე გადაიღუნება 30°-იანი კუთხით და გადადის მალის 1/4-ზე. გადაღუნული ღეროები ბადეში კეთდება თითო ღეროს გამოტოვებით.



ბ



გ

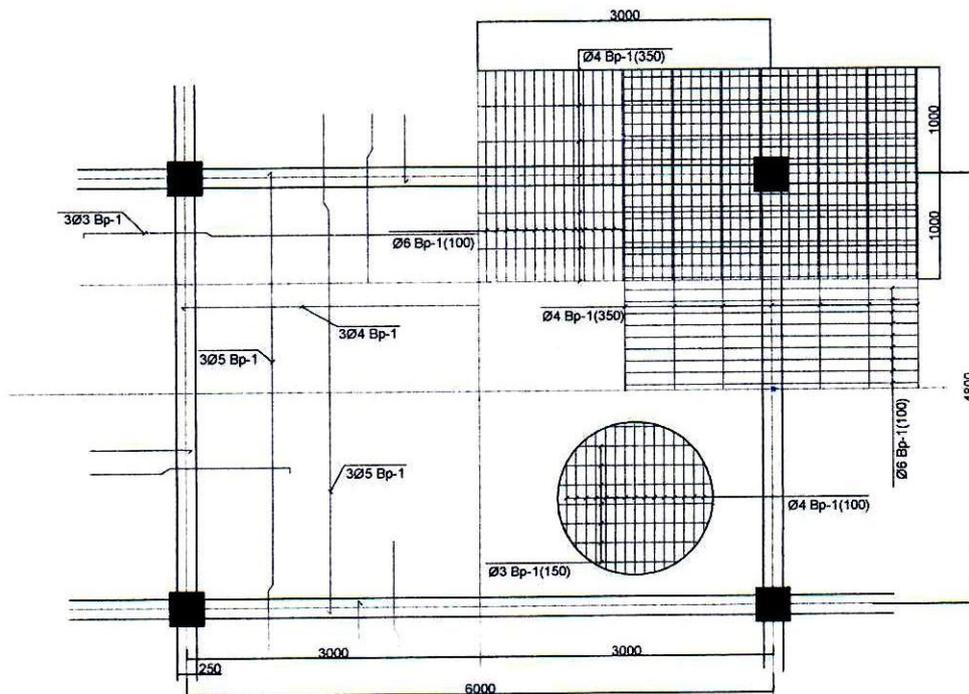


ნახ. №1.10 მონოლითური წიბოვანი გადახურვა კონტურით დაყრდნობილი ფილებით. ა-გეგმა, ბ-ფილის რღვევის სქემა, გ-ფილაში პლასტიკური სახსრების გაჩენა

ქვედა არმატურა გრძელდება საყრდენიდან საყრდენამდე, ან ღერძამდე. ცალკეული ღეროებით დაარმატურება მიღებულია შედარებით სქელი ფილებისათვის, სადაც  $h_f \geq 5$  სმ.

### 1.5 სართულშორისი მონოლითური წიბოვანი გადახურვა კონტურით დაყრდნობილი ფილებით.

ასეთი ტიპის გადახურვებში შედის ფილები, რომელთა გვერდების ფარდობა  $l/l_1 < 2$ , რომელიც მუშაობს ორივე მიმართულებით ღუნვაზე. გადახურვის ყველა ელემენტი დაკავშირებულია ერთმანეთთან მონოლითურად. ფილების ზომები შეიძლება იცვლებოდეს 4÷6 მ-მდე. ამასთან კოჭები განლაგებულია სვეტების ღერძების გასწვრივ ორივე მიმართულებით [42].

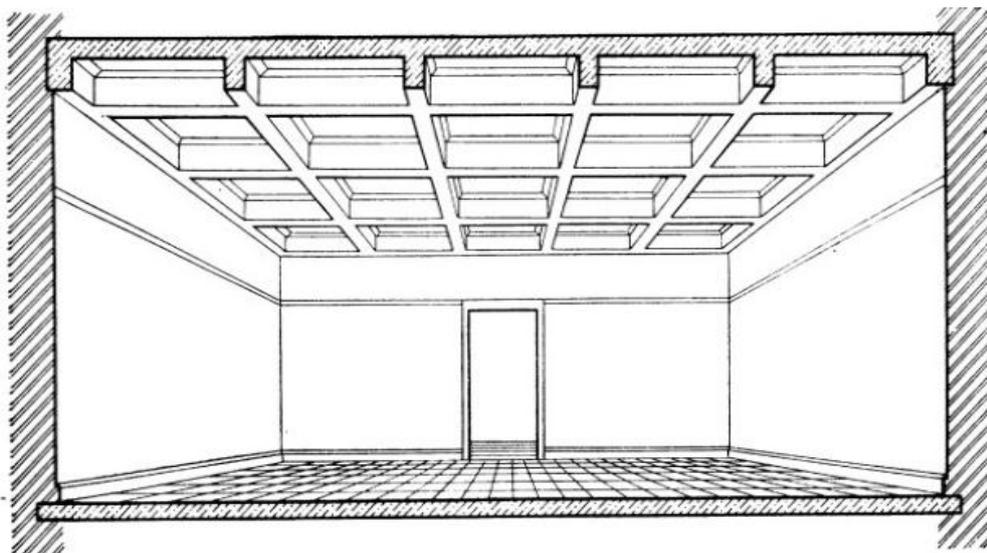


ნახ. №1.11 მონოლითური კონტურით დაყრდნობილი ფილების კონსტრუირება

ფილის სისქე დამოკიდებულია გეომეტრიულ ზომებზე (ღერძებს შორის მანძილი) და დატვირთვის სიდიდეზე, აიღება  $8 \div 16$  სმ-მდე. ასეთი ფილები გამოყენებულია ინტერიერის უკეთ მოწყობის მიზნით საცხოვრებელ და საზოგადოებრივ დანიშნულების შენობებში. კონტურით დაყრდნობილი ფილების კონსტრუირება ხდება შედუღებული ბადეებით და ცალკეული ღეროების გამოყენებით. ფილის მალში ეწყობა შედუღებული ბადე, სადაც ორივე მიმართულებით მუშა ღეროებია, ასევე საყრდენი ჭების ზედა სიბრტყეში ეწყობა შედუღებული ბადე, გადადის კოჭის ორივე მხარეს  $h/4$  მანძილზე და ეს ღერო არის მუშა ღერო.

## 1.6 კესონური გადახურვა

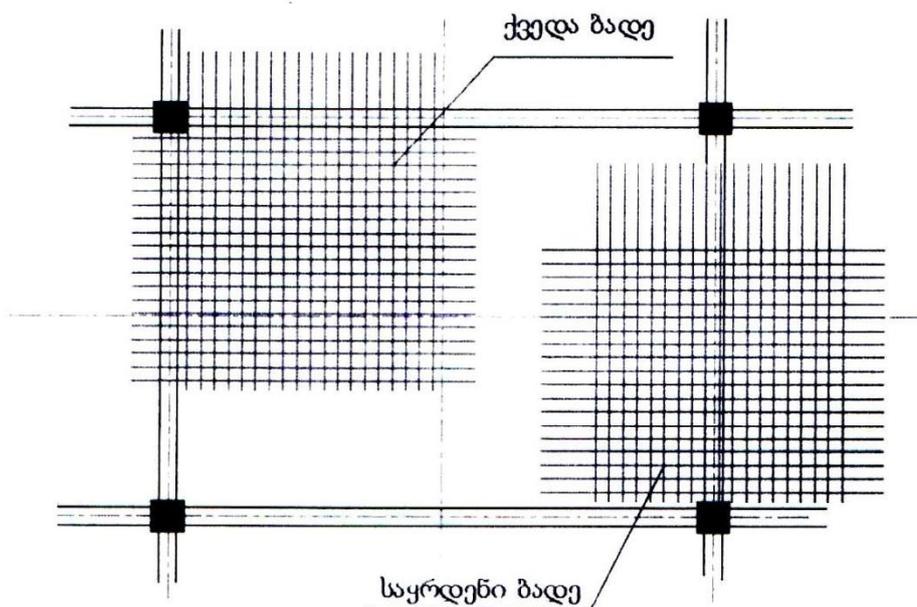
კესონური გადახურვა გამოიყენება არქიტექტურული მოსაზრების მიხედვით სამოქალაქო შენობებში, როდესაც გვხვდება დიდი მალეები და ბიჯები (ვესტიბიული, თეატრის დარბაზები, მაღაზიები, სავაჭრო ცენტრები და სხვა), ასევე არ აქვთ შიდა სვეტები. კოჭები კესონურ გადახურვაში განლაგებულია ორივე მიმართულებით ბიჯით 2 მ-მდე, იქმნება კესონური ჭერი (კვადრატული, მართკუთხა, გამოშვებული წიბოებით), კოჭების ზომები ორივე მიმართულებით ერთნაირია.



ნახ. №1.12 კესონური გადახურვის სქემა

კესონური გადახურვის მოწყობისათვის შენობის გეგმა უნდა იყოს სწორკუთხა, გვერდების ფარდობა  $\frac{L_2}{L_1} \leq 1,5$  (ნახ.№ 1.10). კოჭები შეიძლება იყოს განლაგებული მართობულად და დიაგონალურად 45<sup>0</sup>-ით დახრილი შენობის კიდეებთან.

კესონური გადახურვის ფილები იანგარიშება როგორც ჩვეულებრივი კონტურით დაყრდნობილი ფილები. ფილის სისქე როდესაც გვერდების ზომა 2 მ-ია შეიძლება ავიღოთ 6÷7 სმ-ს ტოლი. კესონური გადახურვის კონსტრუირება ხდება შედუღებული ბადეებით და ცალკეული ღეროებით. ორივე მიმართულებით ეწყობა მუშა ღეროები. აუცილებელია კესონური გადახურვისას ფილის და კოჭების ჩალუნვის განსაზღვრა.



ნახ. №1.13 კესონური გადახურვის ფილის კონსტრუირება

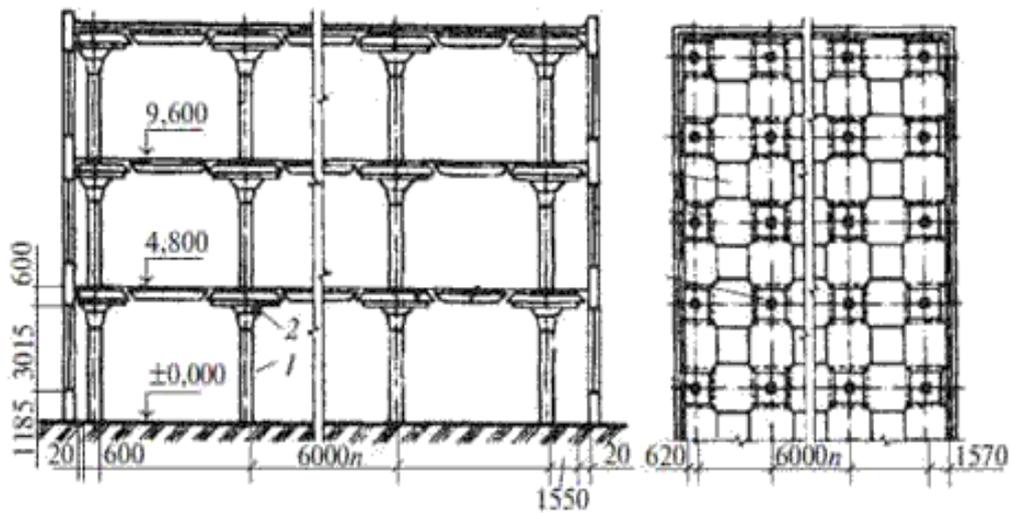
კესონური გადახურვა შეიძლება იყოს ასაწყობ-მონოლითური, სადაც კესონური ფილა არის ასაწყობი. ფილის გასაანგარიშებლად სიბრტყიდან ორივე მიმართულებით გამოყოფილია 1 მ-ის სიგანის ზოლი, რომელზედაც მოქმედებს თანაბრად განაწილებული დატვირთვა  $q=g+v$ . გამოითვლება მომენტები და არმატურის საჭირო ფართობები.



## 1.7 უკოჭო ასაწყობი გადახურვები

ასაწყობი უკოჭო გადახურვა წარმოადგენს ასაწყობი პანელების სისტემას, რომელიც უშუალოდ ეყრდნობა სვეტის თავზე კაპიტელს, ე.ი. სვეტის თავი არის განივ კოჭზე.

კაპიტელის დანიშნულებაა შექმნას ხისტი შეერთება სვეტსა და გადახურვის ფილებს შორის და საყრდენი ასაწყობი ფილებისათვის, გადასცეს დატვირთვა სვეტს, შეამციროს დატვირთვა პანელის საანგარიშო მალში.



ნახ. № 1.14 ასაწყობი უკოჭო გადახურვა

უკოჭო გადახურვის დაპროექტება ხდება, როგორც წესი, სვეტების კვადრატულად განლაგების ბადის შემთხვევაში. ზომები შეიძლება იყოს 6×6 მ, 7×7 მ, 8×8 მ ახალი ტექნოლოგიებისა და ახალი სამშენებლო მასალის გამოყენებით.

უკოჭო გადახურვის უპირატესობა კოჭურ გადახურვასთან შედარებით მდგომარეობს შენობის მოცულობის უკეთ გამოყენებაში წიბოების გარეშე, ჭერის განათების გაუმჯობესებაში, შენობის უკეთ განიავებაში, კომუნიკაციის მოწყობის სიმარტივეში, მცირდება საერთო სიმაღლე მრავალსართულიანი შენობისა და საკედლე მასალის ხარჯი.

სამრეწველო შენობების გადახურვისას, როდესაც დატვირთვა გადახურვაზე 1000 კგ/მ<sup>2</sup>-ზეა და მეტი, უკოჭო გადახურვა უფრო ეკონომიურია, ვიდრე კოჭური გადახურვა. ასაწყობი უკოჭო გადახურვა შედგება სამი ძირითადი ელემენტისაგან: კაპიტელი, სვეტის ზედა პანელი და მალის პანელისაგან. მალის პანელი ისეთივეა როგორც კონტურით დაყრდნობილი ფილა, რადგან ეყრდნობა ოთხივე მხარეს.

ასაწყობი უკოჭო გადახურვის დადებითი მხარეების გარდა აქვს უარყოფითი, ისე რომ სვეტთან შეერთების ადგილი არის ძალიან რთული, ამის გამოსასწორებლად დამუშავებულ იქნა შეერთების კვანძი.

ასაწყობი უკოჭო გადახურვის ფილა იანგარიშება, როგორც კონტურით დაყრდნობილი ფილა. მლუნავი მომენტი მასში გამოითვლება

$$M = \frac{ql^2}{27}$$

სადაც:  $q$  – დატვირთვა ფილის 1 მ<sup>2</sup>-ზე;

$l$  - ფილის საანგარიშო მალი.

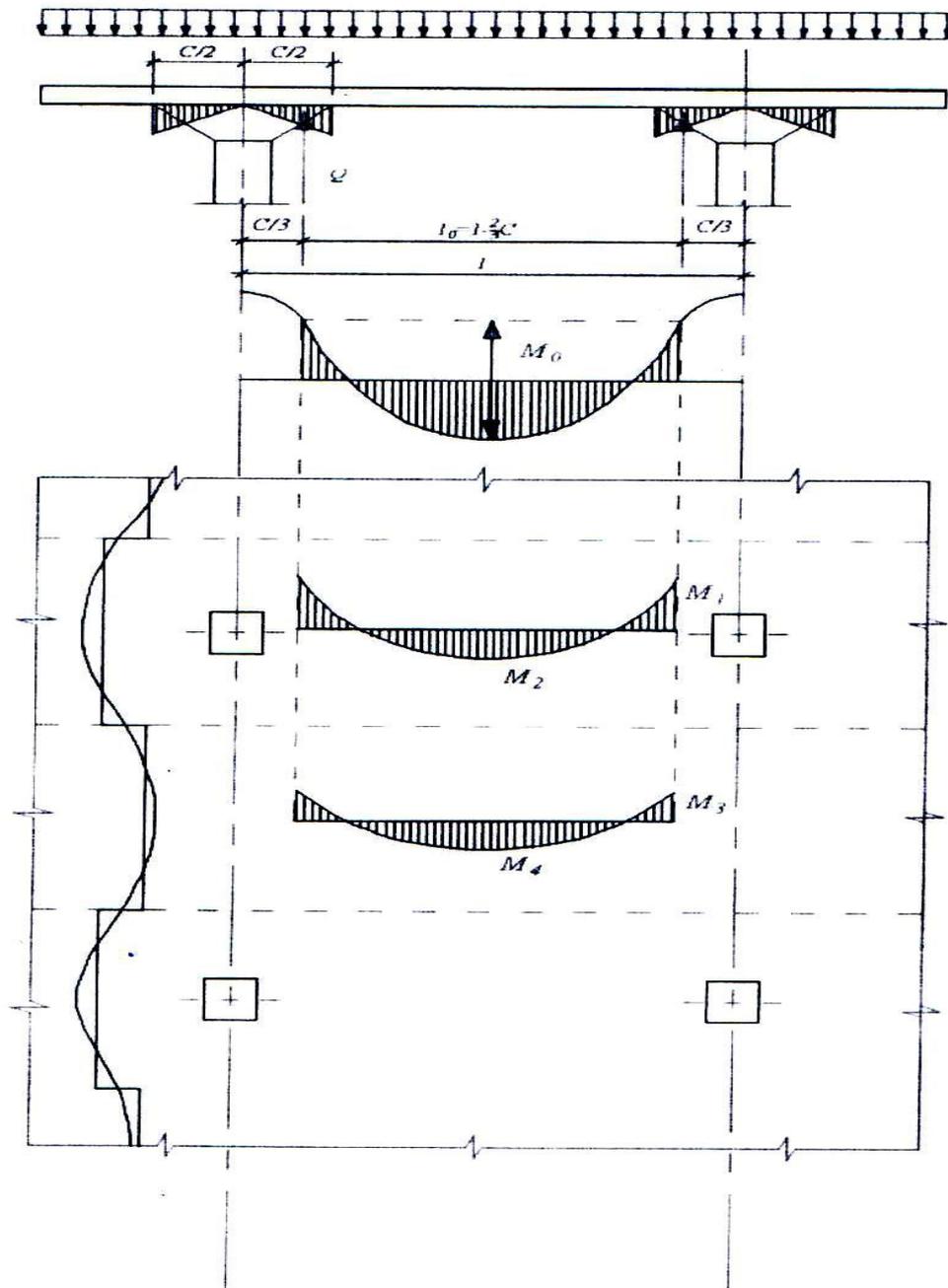
სვეტის თავზე მდებარე ფილა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც მრავალ მალიანი, უჭრი ფილა, პლასტიკური დეფორმაციების გათვალისწინებით. საყრდენი კვეთი გაიანგარიშება მლუნავ მომენტზე ფორმულით:

$$M = \frac{ql^2}{12}$$

სადაც:  $q=g+v$  - არის საანგარიშო დატვირთვა ფილის, სრულ სიგრძეზე ერთნაირი მომენტების სქემის მიხედვით.

საანგარიშო სიგრძე სვეტის თავზე მდებარე ფილისათვის იღება ტოლი კაპიტელის კიდეებს შორის მანძილისა (შუქში) გამრავლებული

კოეფიციენტზე 1,05. პანელის კონსტრუქცია ხდება ჩვეულებრივი მეთოდით შედუღებული ბადეებით და კარკასებით.



ნახ. № 1.15 უკოჭო გადახურვის საანგარიშო სქემა

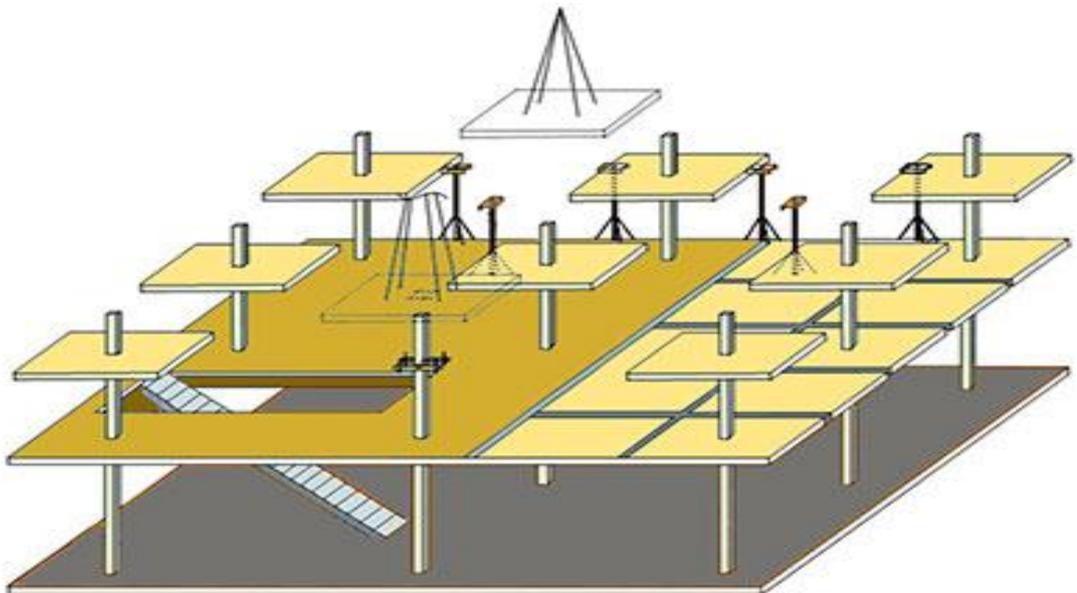
კაპიტელი იანგარიშება ორივე მიმართულებით საყრდენი რეაქციის წნევაზე და სვეტის ზოლის საყრდენ მომენტზე. მუშა ღეროები ეწყობა

კაპიტელის ზედა კიდესთან. კაპიტელის კედლების დაარმატურება ხდება კონსტრუქციული მოსაზრებით, ასევე კაპიტელი იანგარიშება სამონტაჟო დატვირთვაზე როგორც კონსოლი.

ფილის გრძივი სიხისტე გამოითვლება ფორმულით:

$$i_{\text{ფ}} = \frac{i_{\text{ფ}}}{l}$$

სიხისტე განისაზღვრება დამონოლითებული გადახურვის მიხედვით რომლის სიგანე ტოლია სვეტებს შორის მანძილის.



სურ.№ 1.2 უკოჭო გადახურვა „ასაწევი ფილების“ მეთოდით

ასაწყობ უკოჭო გადახურვებს შეიძლება მივაკუთვნოთ უკაპიტელო უკოჭო გადახურვა, რომელიც 1938 წელს ამერიკაში, კანადაში და პეტროგრადში დაინერგა. ასეთი ფილების აგების მეთოდი გულისხმობს, ფილის დამზადებას მიწის დონეზე, რამდენი გადახურვაც არის და შემდეგ ხდება აწევა სასურველ ნიშნულამდე, ეს მეთოდი ცნობილია „ასაწევი ფილები“-ს დასახელებით. ასეთი ფილა შეიძლება იყოს 400 მ<sup>2</sup> და წონით 200

ტონა, მზადდება სამშენებლო მოედანზე და მისი აწევა საექსპლოატაციო დონემდე ხდება გიდრავლიკური დონკრატების გამოყენებით.

ასეთი გადახურვების უპირატესობას წარმოადგენს მოკლე დროში დამზადება და ყალიბების მოწყობაზე ეკონომია, ასევე ყალიბების დამჭერი ხის მასალის და მისი მოწყობის ღირებულების ეკონომია.

## 1.8 უკოჭო მონოლითური გადახურვა

უკოჭო მონოლითური გადახურვა წარმოადგენს მთლიან ფილას, რომელიც ეყრდნობა უშუალოდ სვეტს.

პირველად უკოჭო გადახურვები შემოთავაზებული იყო 1906 წელს, ამერიკელი მეცნიერის რუნერის მიერ, შემდეგ ლოლეიტმა მოახდინა ამ გადახურვის დანერგვა პეტერბურგში 1908 წელს.

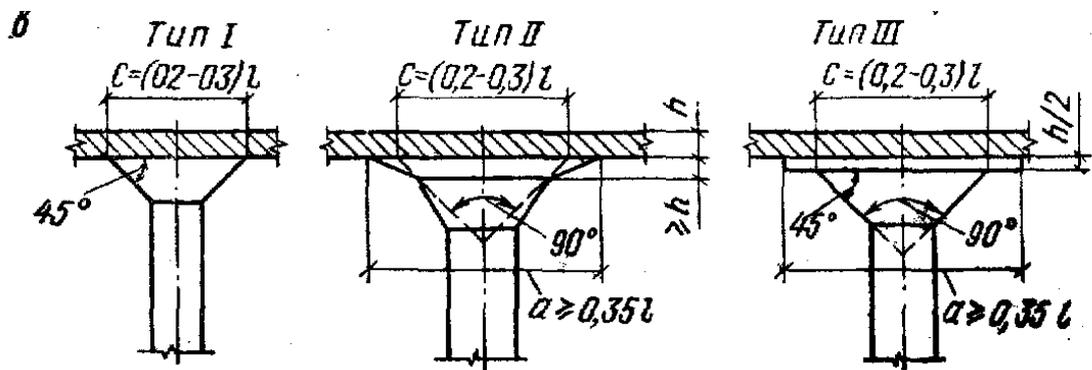
იმისათვის რომ შექმნილიყო საჭირო სიხისტე სვეტის თავთან, კონსტრუქციული მოსაზრებით შემოიღეს კაპიტელი, ასეთი კონსტრუქცია უნდა აკმაყოფილებდეს პირობებს:

1. უნდა დაკმაყოფილდეს უკოჭო გადახურვის ფილის სიმტკიცე სვეტთან შეერთებისას;
2. უნდა დაკმაყოფილდეს უკოჭო გადახურვის ფილის ჩაჭყლეთის სიმტკიცე კაპიტელის პერიმეტრზე;
3. შემცირდეს ფილის საანგარიშო სიგრძე და თანაბრად განაწილდეს მომენტები მთელ სიგანეზე.

უკოჭო გადახურვა შეიძლება შენობის კონტურზე ეყრდნობოდეს კედელს, ან კონტურზე განთავსებულ შემკვრელს, ან კონსოლურად იყოს დაყრდნობილი განაპირა სვეტის კაპიტელზე.

უკოჭო გადახურვა შეიძლება იყოს კვადრატული ან მართკუთხა სვეტების განლაგებით. მართკუთხა სვეტების განლაგების დროს  $l_2/l_1 \leq 1,5$ . ყველაზე გავრცელებული სვეტების ზადე არის 6x6 მ მაგრამ თანამედროვე ახალი მასალებისა და ტექნოლოგიების დანერგვის შემდეგ გვხვდება 7x7 მ და 8x8 მ-ზე.

უკოჭო მონოლითური გადახურვისას გავრცელებულია კაპიტელის სამი სახეობა [42].



ნახ. № 1.16 კაპიტელის ტიპები

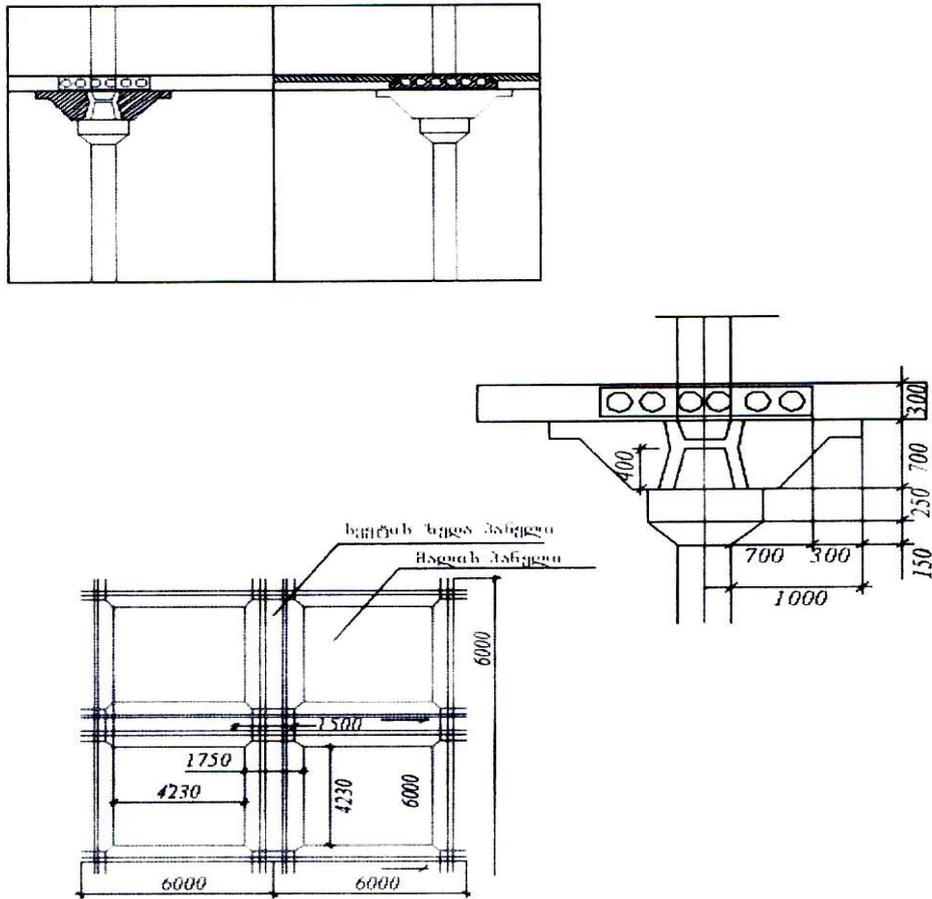
შემოთავაზებული კაპიტელის კონსტრუქცია დამოკიდებულია დატვირთვის სიდიდეზე. კაპიტელის კიდეების დახრა დამოკიდებულია საყრდენი წნევის 45<sup>0</sup>-იანი დახრის კუთხით გადანაწილება ბეტონზე.

კაპიტელის ზომები უნდა შეირჩეს ისე, რომ გამოირიცხოს უკოჭო გადახურვის ფილის ჩაჭყლეთა კაპიტელის პერიმეტრზე. კაპიტელის ზომა  $C=(0,2\pm 0,3)$ .

## 1.9 სართულშორისი მონოლითური გადახურვის თანამედროვე კონსტრუქციების ხერხები

როგორც ცნობილია სართულშორისი გადახურვა შენობა-ნაგებობებში მზიდი კონსტრუქციების მოცულობის დაახლოებით 60%-ს შეადგენს. იგი შენობის სიმტკიცისა და სეისმომდეგობის უზრუნველყოფისათვის

ძირითადი ელემენტია. სართულშორისი გადახურვის სიმკვიცეზე, სიხისტეზე არის დამოკიდებული შენობის მდგრადობა და უსაფრთხო ექსპლოატაცია.



ნახ. № 1.17 უკოჭო გადახურვის ასაწყობი ფილები

შენობა-ნაგებობების სართულშორისი გადახურვაში გამოყენებული კონსტრუქციები დამზადების მიხედვით სხვადასხვაა: 1) ასაწყობი; 2) ასაწყობ-მონოლითური; 3) მონოლითური [42].

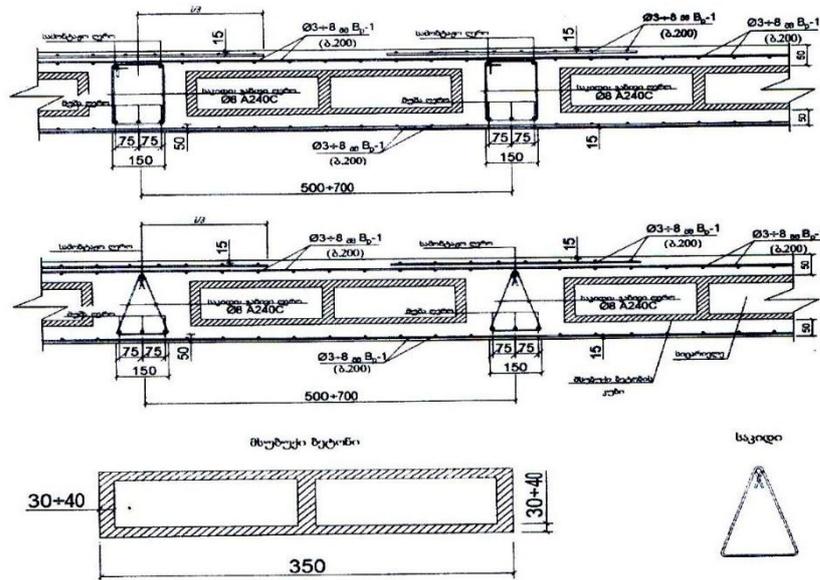
გარდა ზემოთ განხილული გადახურვებისა, მშენებლობაში ბოლო დროს ფართოდ გამოიყენება უკოჭო გადახურვები.

შემსუბუქებული გადახურვა წარმოადგენს კესონური გადახურვის ისეთ ტიპს, სადაც რკინაბეტონის მუშაობის პრინციპი დაცულია. წიბო დაარმატურებულია მუშა ღეროებით, ხოლო ფილის ტანში მოთავსებულია

მსუბუქი ბეტონისაგან დამზადებული კუბები ან ხელოვნური მასალისაგან დამზადებული ბურთების მსგავსი ელემენტები სიცარიელით.

ასეთი ფილები იანგარიშება რკინაბეტონის ნორმატიულ მასალებში მოცემული მოთხოვნების მიხედვით. მათზე მოქმედებს მუდმივი და დროებითი დატვირთვა, საანგარიშო სქემა არის ორი ბოლოთი თავისუფლად დაყრდნობილი ან მრავალმალიანი უჭრი ფილა.

გაჭიმული მუშა ღეროები, რომელიც მოთავსებულია წიბოში იანგარიშება შესაბამისი M მლუნავი მომენტისა და Q განივი ძალის მიხედვით.



ნახ. №1.18 შემსუბუქებული მონოლითური სართულშორისი გადახურვის ფილის კონსტრუირების ვარიანტები

მავთულოვანი ბადე, რომელიც მოთავსებულია ფილის ზედა და ქვედა ფენებში, აიღება კონსტრუქციული მოსაზრებით, დამოკიდებულია ფილის სიგანეზე და მანძილზე ფილის კიდიდან სიცარიელების კიდემდე. შედუღებული მავთულოვანი ბადე აიღება  $B_p - I$  კლასის  $\emptyset 3+8$  მმ დიამეტრის, ორივე სიბრტყეში ლაგდება ერთნაირი ბადე. ღეროებს შორის მანძილი აიღება არაუმეტეს 200 მმ-ისა.





სურ.№ 1.3

ბოლო დროს უფრო მეტად გამოიყენება შემსუბუქებული გადახურვის უახლესი თანამედროვე მეთოდი. მას უცხოეთში Sboot-ის სახელით იცნობენ.

იგი შედგება ნარჩენებისაგან დამუშავებული პლასტმასით, იგი თავისი დიზაინის გამო საკმაოდ მყარი, არადეფორმირებადია და მათი ერთმანეთთან შეერთებისა და რეგულირებად ფეხების საშუალებით შესაძლებელია ნებისმიერი ზომის გადახურვის ფილაში მისი გამოყენება, თუნდაც საძირკვლის ფილაში.

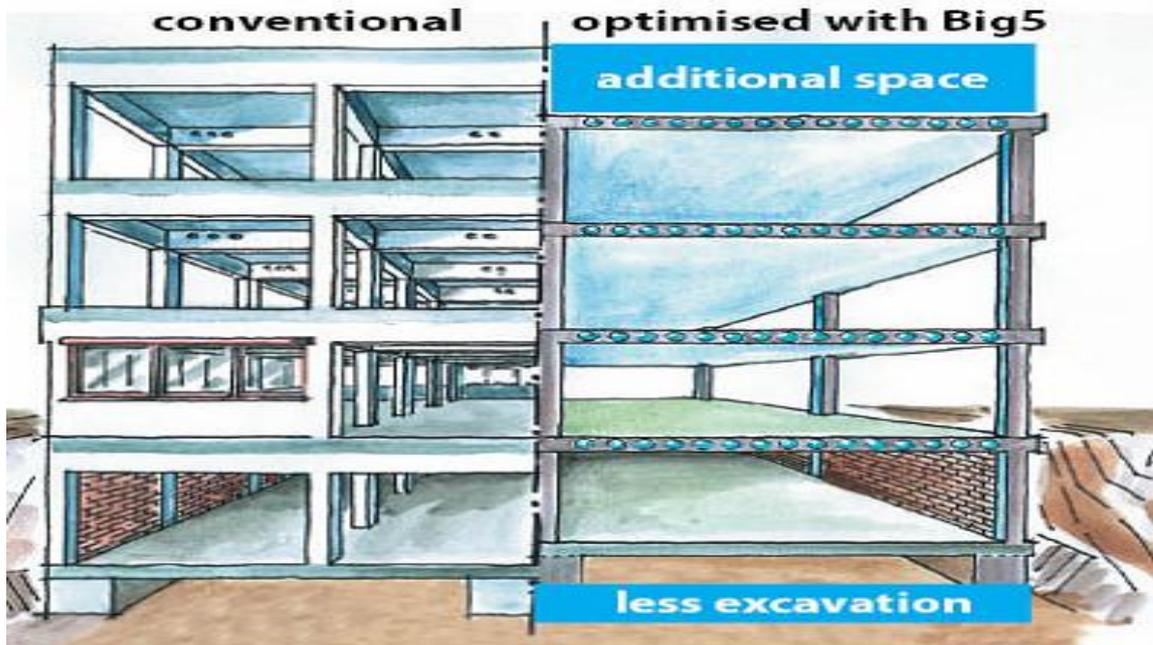
Sboot-ის ტიპის გადახურვის დროსაც გამოიყენება წამწეების მსგავსი რიგელები, რომლებიც ეწყობა პლასტმასის ელემენტებს შორის.

თვით პლასტმასის ელემენტებს შორის მანძილი შეიძლება დარეგულირდეს სპეციალური ფიქსატორების საშუალებით. გარდა წამწეების მსგავსი რიგელებისა ფილის ზედა და ქვედა შრეში მოთავსებულია ღეროვანი არმატურისაგან დამზადებული ბადეები. მისი საანგარიშო სქემა წარმოდგენილია როგორც ორტესებრი განივკვეთს ფორმის ელემენტი, რომელიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია ხისტად.

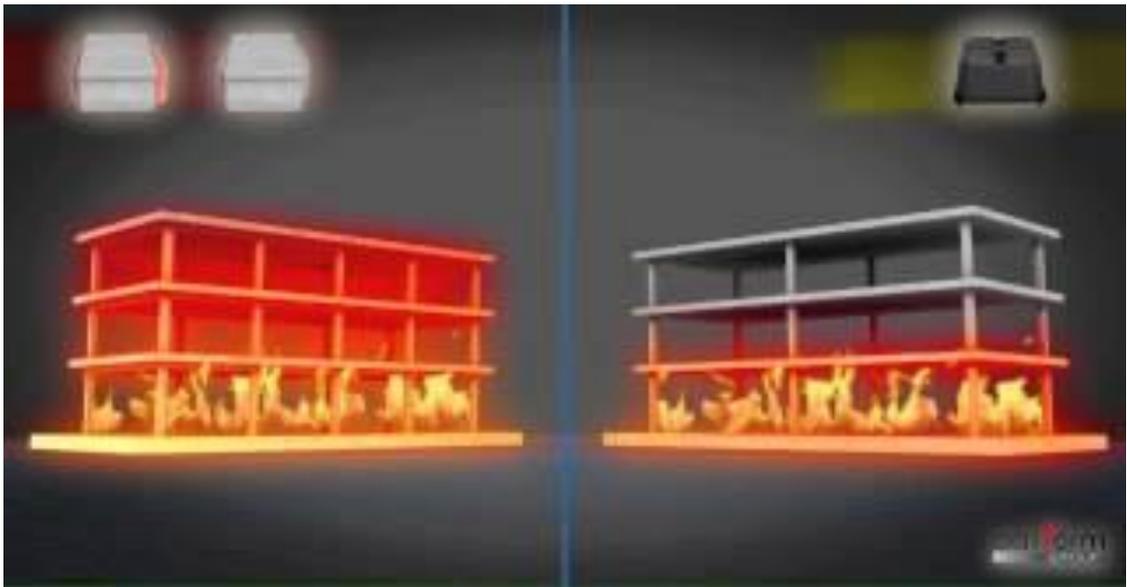


სურ.№ 1.4

ასეთი გადახურვა მიეკუთვნება ურიგელო გადახურვებს, მისი ადგილზე დამზადება სხვა ტიპის გადახურვის ფილიებთან შედარებით მარტივი, ნაკლებად დროტევადი და შრომატევადია.

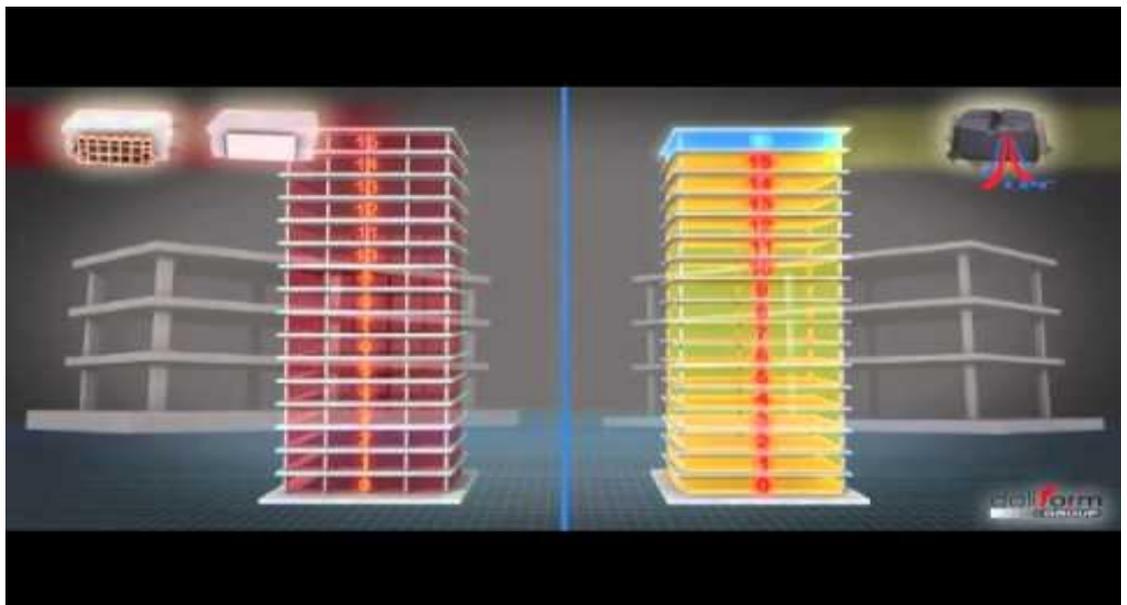


სურ.№ 1.5



სურ.№ 1.6

ასევე ურიგელო გადახურვის გამო ვიგებთ შენობის სართულის სიმაღლეში, რაც კარგად ჩანს 15 და მეტი სართულის შემთხვევაში. თბოიზოლაციის და ბგერაიზოლაციის მხრივ Sboot-ის ტიპის გადახურვის ფილა სხვა სახის გადახურვის ფილებთან შედარებით გაცილებით უკეთესია.



სურ.№ 1.7

## 1.10 კვლევების არჩეული მიმართულების დასაბუთება

ძირითადად ლიტერატურის დიდი ნაწილი ეთმობა თეორიულ გაანგარიშებებს, ექსპერიმენტალურ კვლევებს კი ნაკლები ყურადღება ეთმობა. არასაკმარისადაა შესწავლილი ურიგელო სიღრუებიანი გადახურვის ფილების დაძაბულ-დეფორმირებული მგდომარეობა როგორც სტატიკურ ისე დინამიკურ ზემოქმედებაზე.

იმის გათვალისწინებით, რომ სიღრუებიანი ურიგელო მონოლითური გადახურვის ფილების გამოყენება მნიშვნელოვნად შეამცირებს ბეტონისა და არმატურის ხარჯს, შესაბამისად მიღებული შედეგების პრაქტიკაში დანერგვა საშუალებას მოგვცემს მიღწეული იქნას მნიშვნელოვანი ეკონომიური ეფექტი, სადისერტაციო ნაშრომში მიზნად დავისახეთ:

1. ურიგელო სიღრუებიანი გადახურვის ფილის მოდელის შემუშავება.
2. ურიგელო სიღრუებიანი გადახურვის ფილის მოდელის ექსპერიმენტალური კვლევა.
3. ჩატარებული ექსპერიმენტალური კვლევების მონაცემების ანალიზის საფუძველზე დაზუსტებული საანგარიშო სქემის შედგენა.
4. დაზუსტებული საანგარიშო სქემის მიხედვით რიცხვითი გაანგარიშებების ჩატარება
5. მიღებული შედეგების შედარება კლასიკური ტიპის გადახურვებთან.

## თავი II

### ურიგელო რკინაბეტონის გადახურვის ფილის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ექსპერიმენტალური კვლევა

შენობა ნაგებობების გაანგარიშების დროს მნიშვნელოვანია გაანგარიშების და პროექტირების ისეთი მეთოდების შემუშავება რომლებიც შედარებით ზუსტად ასახავენ მათ მუშაობას რეალურ პირობებში

ამ ამოცანის გადასაწყვეტად, გაანგარიშების ოპტიმალურ მეთოდების გამოყენებასთან ერთად, საჭიროა ნაგებობის საანგარიშო სქემის დაზუსტებაც. საანგარიშო სქემის დაზუსტების, ანუ საანგარიშო მოდელის ფიზიკურთან მაქსიმალურად მიახლოების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან გზას კი წარმოადგენს ექსპერიმენტალური მონაცემების ანალიზი. ექსპერიმენტალური მონაცემები იძლევა წარმოდგენას საანგარიშო ნაგებობის რეალურ მუშაობაზე.

მოცემულ თავში განხილულია ორთოგონალურ წიბოებიანი ორმხრივ სიცარიელებიანი გადახურვის ფილების დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ექსპერიმენტალური კვლების საკითხები, რომლის მიზანიც არის მიღებული შედეგების გავალისწინებით ისეთი საანგარიშო სქემის შედგენა, რომელიც შედარებით ზუსტად ასახავს კონსტრუქციის მუშაობას საექსპლოატაციო პირობებთან მიმართებაში

#### 2.1 გამოსაკვლევი ობიექტის ზოგადი დახასიათება.

ნატურული გამოკვლევებისათვის შერჩეული იქნა ორთოგონალურ წიბოებიანი ორმხრივ სიცარიელებიანი მონოლითური რკინაბეტონის გადახურვის ფილა, რომელიც ოთხ წერტილში ეყრდნობა მონოლითური რკინაბეტონის სვეტებს. საკვლევი ობიექტის საერთო ხედი ნაჩვენებია სურ.№2.7-ზე

გეომეტრიული პარამეტრების შერჩევის დროს გათვალისწინებული იქნა ნატურული ექსპერიმენტის შესრულებისათვის ტექნიკური სირთულეების მინიმუმამდე დაყვანა. შემუშავებული და გადაწყვეტილი იქნა, როგორც სტენდის ზომები და კონსტრუქციის რეალიზაციის თავისებურებები, ასევე საექსპერიმენტო სტენდისათვის საგამოცდო დატვირთვების მოდება და საჭირო ანათვლების აღება.



სურ.№ 2.1. სვეტის არმირების სქემა

საკვლევ სქემაში მონოლითური რკინაბეტონის სვეტების სიმაღლე 1.8 მ-ია, მისი განივი კვეთი კი 30,0 X30,0 სმ. არმირებით 4Φ12 A-500c.

ორთოგონალურ წიბოებიანი პერფორირებული მონოლითური რკინაბეტონის გადახურვის ფილის ზომებია 300,0 X600,0 სმ., სიმაღლე 20,0 სმ (იხ. სურ 2.3)



სურ.№2.2. ყალიბის მოწყობა გადახურვის ფილისათვის



სურ.№2.3. არმატურის ღეროების მოწყობის სქემა ფილის ქვედა შრეში



სურ.№ 2.4. ფილის ქვედა შრის ბეტონირება



სურ.№ 2.5. ფილაში პენოპლასტის ფილების დალაგება სივარცილების მისაღებად



სიცარიელების წარმოსაქმნელად გამოყენებული იქნა ოთხკუთხა ფორმის პენოპლასტის 14 სმ-იანი ფილები (იხ. სურ.№2.5). ფილის მზიდ ელემენტებად მიღებული იქნა 5 სმ-იანი წიბოები, რომელთა ბიჯი 100 სმ-ია. წიბოები დაარმატურებულია  $\Phi 12$  AIII კლასის არმატურის ღეროებით, როგორც გრძივი ასევე განივი მიმართულებით.



სურ.№ 2.6. სტენდის საერთო ხედი

კონსტრუქციული თვალსაზრისით ფილის ზედა და ქვედა შრეებში განთავსებული იქნა  $6\Phi A I$  კლასის არმატურა, ბიჯით 20 სმ. (იხ. სურ.2.3)



სურ.№ 2.7. სტენდის საერთო ხედი დაბეტონებიდან 10 დღის შემდეგ

ექსპერიმენტი ჩატარდა სტენდის ბეტონირებიდან მე-14 დღეს. ბეტონის კუბების კუმშვაზე გამოცდისას, ბეტონის ფაქტიურმა სიმტკიცემ ამ დროისთვის, შეადგინა B 20, ამიტომ ბეტონის სიმტკიცე საექსპერიმენტო ანგარიშისთვის მიღებული გვაქვს B 20 კლასი.

### 2.2.2. სტენდის მოწყობის თანმიმდევრობა

სტენდი მოწყობილი იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიის შიდა ეზოს მიმდებარე ტერიტორიაზე. ფილა მოწყობილი იქნა 180 სმ-ის სიმაღლის რკინაბეტონის სვეტებზე. სვეტებს საყრდენ ზონაში ასევე მოწყობილი აქვთ არმირებული ქუსლები.

შემდეგ ეტაპზე მოწყობილი იქნა სვეტების და ფილის ყალიბი. ყალიბებად გამოყენებული იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიის ბაზაზე არსებული ავსტრიული ფირმა „Doka“-ს წარმოების საყალიბე კონსტრუქციები.

ფილის დაარმატურების პირველ ეტაპზე დამზადებული იქნა ფილის ზედა შრის არმირება. ასევე წინასწარ იქნა დამზადებული და დანომრილი სიცარიელების წარმომქმნელი პენოპლასტის ბლოკები ზომებით 95X95X14 სმ.

ფილის ქვედა შრის არმირების მომზადების შემდეგ წიბოების მუშა არმატურები საკიდების მეშვეობით დაკავშირებული იქნა საყრდენი სვეტების არმატურებზე.

მუშა არმატურები დალაგებული იქნა 1,5 სმ-ის სიმაღლის ფიქსატორებზე, ბეტონის დამცავი შრის უზრუნველსაყოფად.

### 2.2.3 არმატურის და ბეტონის მახასიათებლების შემოწმება

სტენდის მოწყობამდე ჩატარდა არმატურის მახასიათებლების დადგენა, ხოლო სტენდის ბეტონირების შემდეგ, სხვადასხვა ინტერვალით გამოიცადა ბეტონის კუბები სიმტკიცის განსაზღვრისათვის.

ნიმუშები გამოცდილი იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიაში წნეხზე WA-1000, მონაცემები მოყვანილია ცხრილში.

ცხრილი №1

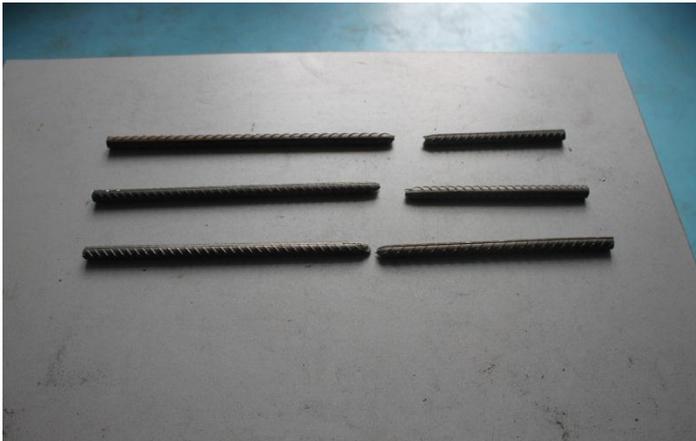
№	დიაგნოზი, ძმმ	სიგრძე, L მმ	მასა, M გრ	1 გრძ/მ. პროფილის წონა, Q კგ		განივკვეთის ფართობი, F <sub>0</sub> მმ <sup>2</sup>		დენადობის ძალა, P დ კნ	მრღვევი ძალა, Pმრ კნ	დენადობის ზღვარი, იდ=Pდ/F <sub>0</sub> მზა	დროებითი წინააღობა, იდ=Pდრ/F <sub>0</sub> მზა	ფარდობითი წაგრძელება, მზ%	1 გრძ/მ. არმატურის პროფილის გადახრა ნორმატიულისაგან, %		გამოცდა ღუნვაზე		არმატურის კლასი (ფაქტიური)
				თეორიული	ფაქტიური	თეორიული	ფაქტიური						თეორიული	ფაქტიური	მოსაღწევი კუთხე		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	12	400	342,6	0,888	0,857	113,0	109,1	64,68	74,79	593	685	21,9	±5.0%	-3,5	90°	+	A500
2	12	399	345,1	0,888	0,865	113,0	110,2	65,21	75,00	592	681	23,1	±5.0%	-2,6	90°	+	
3	12	401	344,6	0,888	0,859	113,0	109,5	63,91	73,05	584	667	23,3	±5.0%	-3,2	90°	+	



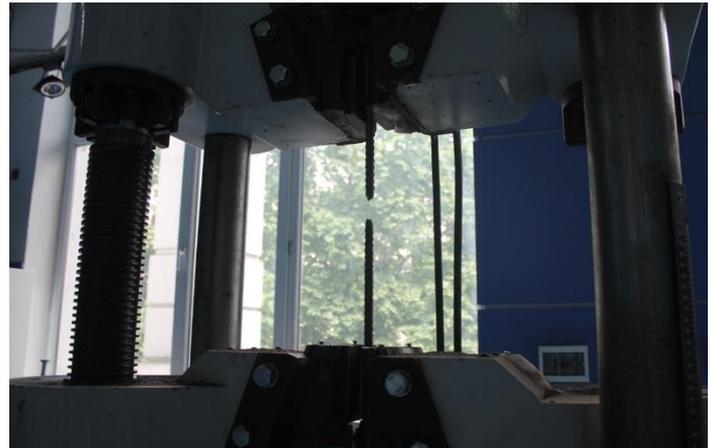
სურ.№2.8 გამოსაცდელი  
არმატურის ნიმუშები



სურ.№2.9 გამოცდა ღუნვაზე



სურ.№2.10 გამოცდა გაჭიმვაზე



სურ.№2.11 გამოცდილი ნიმუშები

როგორც ცხრილი №1-დან ჩანს საექსპერიმენტო სტენდში გამოყენებული ღეროები მიეკუთვნება A500 კლასის ფოლადის ცხლად ნაგლინ არმატურას.

## 2.2.4. ბეტონირების პროცესის აღწერა

ბეტონირება განხორციელდა ტუმბო მიქსერით. ბეტონირებისათვის შერჩეული იქნა B25-S4 კლასის ბეტონი, რათა საექსპერიმენტო სტენდზე 28 დღეზე ადრე მიგველო ანგარიშით გათვალისწინებული ბეტონის სიმტკიცე. ბეტონირების დროს გამოყენებული იქნა 45 მმ-იანი თავაკის მქონე ვიბრო მოწყობილობა.

ბეტონირება განხორციელდა შემდეგი თანმიმდევრობებით; პირველად დაბეტონებული და დავიბრირებული იქნა სვეტები, მეორე ეტაპზე განხორციელდა ფილის ქვედა შრის არმატურის ბეტონირება, მესამე ეტაპზე დალაგებული იქნა სიცარიელების წარმომქმნელი ბლოკები, ხოლო ბოლო ეტაპზე მოხდა უკვე გამზადებული არმირების ზედა შრის მოწყობა და დაბეტონება. სურათებზე ნაჩვენებია ბეტონირების სხვადასხვა ეტაპები.

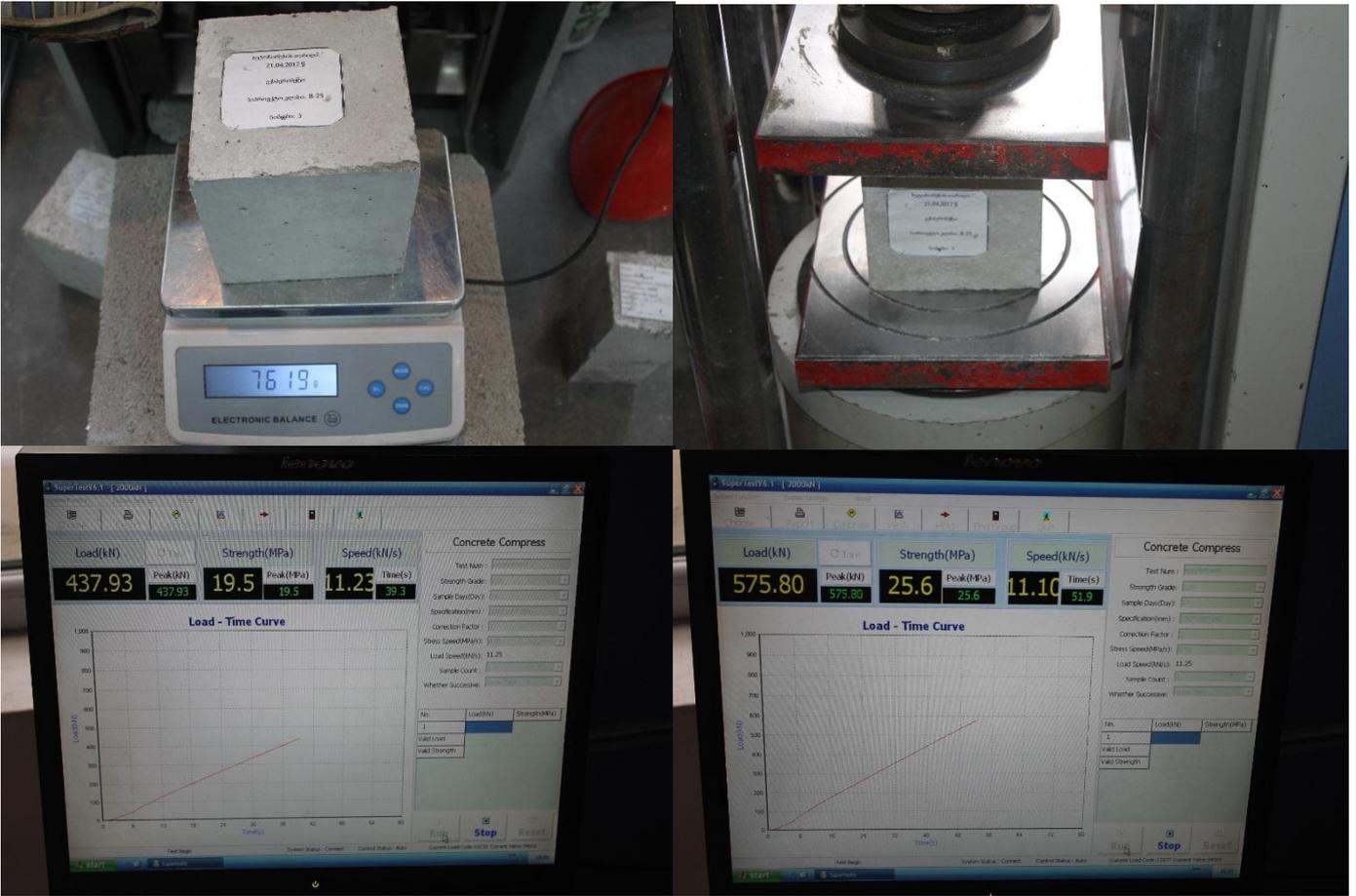
ბეტონირების ეტაპზე ნარევიდან აღებული იქნა 15x15x15 სმ ბეტონის საკონტროლო ნიმუშები. 24 საათის შემდეგ მოხდა ნიმუშების ყალიბებიდან განყალიბება და საექსპერიმენტო სტენდზე განთავსება.

საექსპერიმენტო სტენდის და საკონტროლო ნიმუშების რეჟიმის დაცვა მიმდინარეობდა მაქსიმალურად მიახლოებული ლაბორატორიულ სარეჟიმო პირობებთან. კონსტრუქცია ყოველდღიურად ირწყვებოდა. პერიოდულად მიმდინარეობდა ბეტონის საკონტროლო ნიმუშების გამოცდა. ნიმუშები გამოცდილი იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიაში ჰიდრავლიკურ წნეხზე STYE-2000c. გამოცდის შედეგად მიღებული ბეტონის სიმტკიცის მახასიათებელი პარამეტრები მოყვანილია ცხრილში №2.

ბეტონის კუბების სიმტკიცე კუმშვაზე:								
ბეტონის საპროექტო კლასი: B 25								
	ფართობი სმ <sup>2</sup>	მოცულობა სმ <sup>3</sup>	წონა, გრ	სიმკვრივე ტ/მ <sup>3</sup>	ასაკი დღე-ღამე	მრღვევი ძალა კნ	სიმტკიცე მპა	სიმტკიცე კგ/სმ <sup>2</sup>
1	225	3375	7644	2,26	7	439,12	19,5	198,9
2	225	3375	7619	2,26	14	557,35	24,8	252,4
3	225	3375	7702	2,28	14	560,19	24,9	253,7
4	225	3375	7697	2,28	14	575,56	25,6	260,7

მე-14 დღეს გამოცდილი ნიმუშების საშუალო სიმტკიცემ კუმშვაზე შეადგინა 25,1 მპა (255,8 კგ/სმ<sup>2</sup>), რაც შეესაბამება თეორიული ანგარიშით მიღებულ ბეტონის სიმტკიცეს B20 (26,2 მპა) კლასს. სურათებზე ნაჩვენებია ბეტონის საკონტროლო ნიმუშების გამოცდა.

აქედან გამომდინარე მიზანშეწონილად ჩავთვალეთ დაწყებულიყო საექსპერიმენტო სტენდზე დატვირთვების მოდება.



სურ. № 2.12 ბეტონის კუმშვაზე გამოცდის ეტაპები.

### 2.3. ექსპერიმენტის ჩატარების თანმიმდევრობა და მიღებული შედეგების ანალიზი.

ექსპერიმენტალური კვლევების ჩატარების წინ, ჩატარდა მოსამზადებელი სამუშაოები: პირველ ეტაპზე განხორციელდა ფილის ქვედა ზედაპირზე, ვიზუალიზაციის მიზნით წიბოების ადგილმდებარეობის დატანა. შემდეგ ეტაპზე უშუალოდ წიბოებზე დაყენებული იქნა ინდიკატორები წინასწარ შერჩეული სქემის მიხედვით.





სურ. № 2.13 ინდიკატორის ხედი-ა



სურ. № 2.14 ინდიკატორის ხედი-ბ

ნახაზზე N1 ნაჩვენებია ინდიკატორების დაყენების კოორდინატები ნუმერაციით. ინდიკატორები დაყენებული იქნა სამ სხვადასხვა განივკვეთში გრძივ E-G, განივ H-F, და დიაგონალურ A-H განივკვეთებში. ინდიკატორების დაყენების სქემა შერჩეული იქნა ისე, რომ დეფორმაციების გაზომვა მომხდარიყო ფილის ქვედა ზედაპირის მაქსიმალურად ბევრ

უბანში. სულ დაყენებული იქნა 9 ინდიკატორი. ინდიკატორები დაყენებული იქნა უძრავად მოწყობილ დგარებზე სურათი №2.

სტენდზე დატვირთვების მოსადებად სიმარტივის მიზნით გამოყენებული იქნა ბეტონის 15x15x15 სმ-იანი კუბები. საექსპერიმენტო სტენდზე დატვირთვები მოდებული იქნა წინასწარ დაზუსტებული სხვადასხვა კომბინაციების მიხედვით;

1. სქემა №1

საკუთარი წონა, დგარებით გრძივ წიბოებზე;

- ა) დატვირთვის მოდების მომენტში
- ბ) დატვირთვის მოდებიდან 24 სთ-ის შემდეგ

2. სქემა №2

საკუთარი წონა 4 წერტილში დაყრდნობილი ფილისათვის

- ა) დატვირთვის მოდების მომენტში
- ბ) დატვირთვის მოდებიდან 24 სთ-ის შემდეგ

3. სქემა №3

საკუთარი წონა +მაღში  $L= 0.9$  მ სიგანეზე განაწილებული დატვირთვა  $q=0.335$  ტ/მ<sup>2</sup>;

- ა) დატვირთვის მოდების მომენტში
- ბ) დატვირთვის მოდებიდან 24 სთ-ის შემდეგ

4. სქემა №4

საკუთარი წონა +მაღში  $L= 2,1$  მ სიგანეზე განაწილებული დატვირთვა  $q=0.335$  ტ/მ<sup>2</sup>;

- ა) დატვირთვის მოდების მომენტში
- ბ) დატვირთვის მოდებიდან 24 სთ-ის შემდეგ

5. სქემა №5

საკუთარი წონა +მაღში  $L= 2,1$  მ განივად და  $L= 0,9$  მ სიგანეზე განაწილებული დატვირთვა  $q =0.335$  ტ/მ<sup>2</sup>;

- ა) დატვირთვის მოდების მომენტში

ბ) დატვირთვის მოდებიდან 24 სთ-ის შემდეგ

6. სქემა № 6

თანაბრად განაწილებული დატვირთვა  $q = 0.335$  ტ/მ<sup>2</sup> მთელ ფილაზე;

ა) დატვირთვის მოდების მომენტში

ბ) დატვირთვის მოდებიდან 24 სთ-ის შემდეგ

7. სქემა № 5

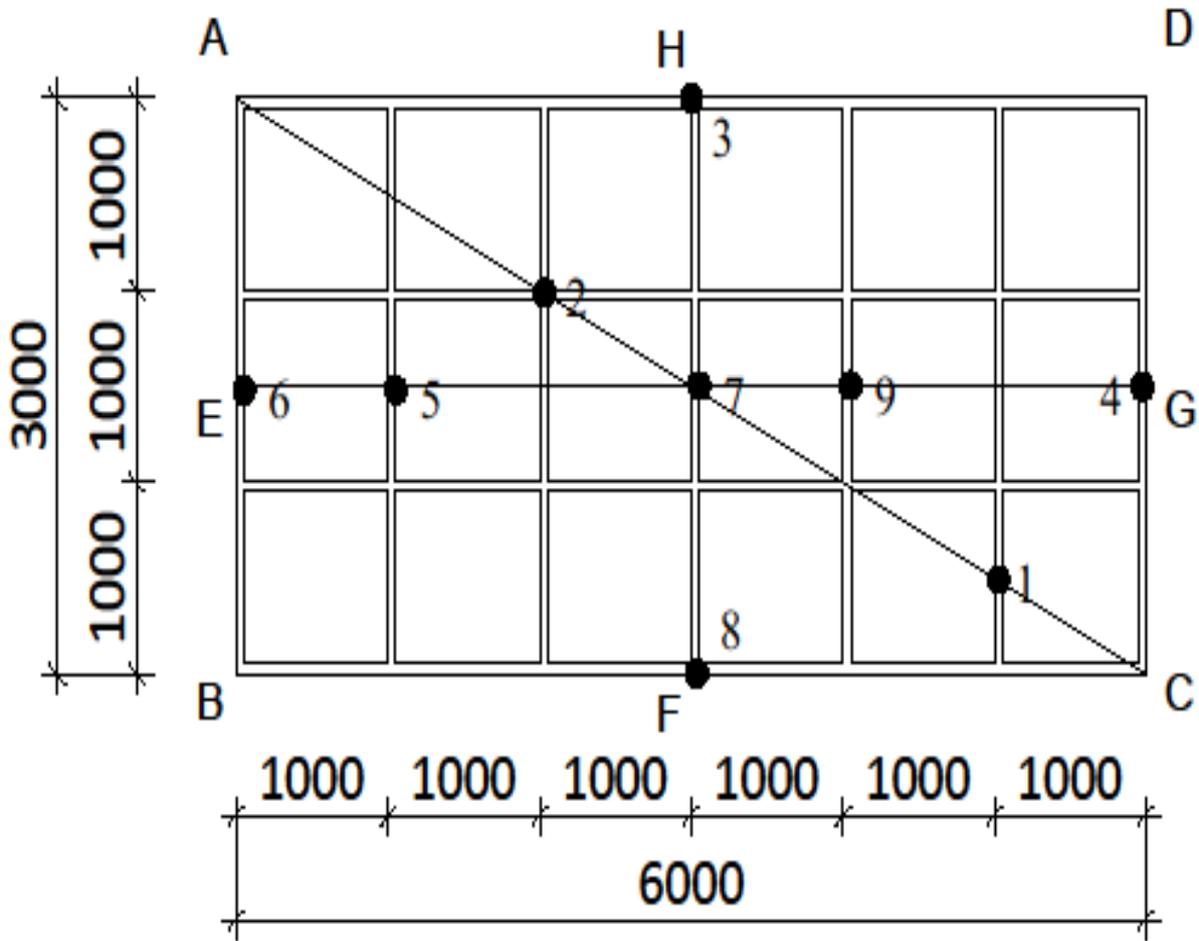
თანაბრად განაწილებული დატვირთვა  $q = 0.335$  ტ/მ<sup>2</sup> მთელ ფილაზე +  $q = 0.335$  ტ/მ<sup>2</sup> მალში  $L = 0,6$  მ განივად

ა) დატვირთვის მოდების მომენტში

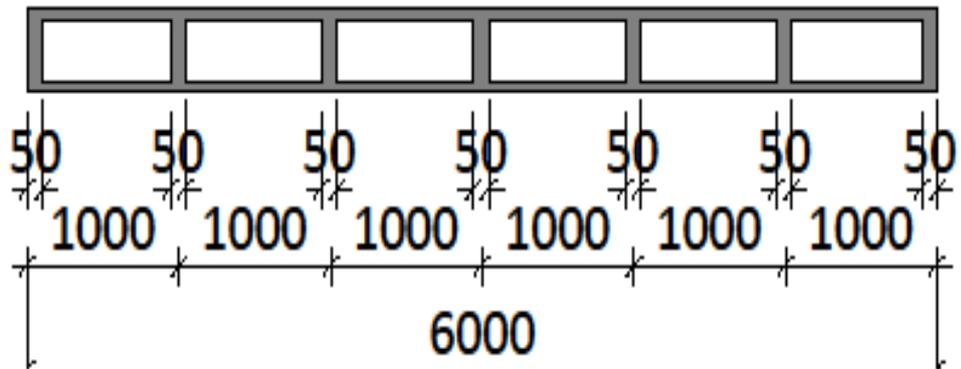
ბ) დატვირთვის მოდებიდან 24 სთ-ის შემდეგ

8. სქემა -11 დატვირთვის მოხსნის შემდეგ.

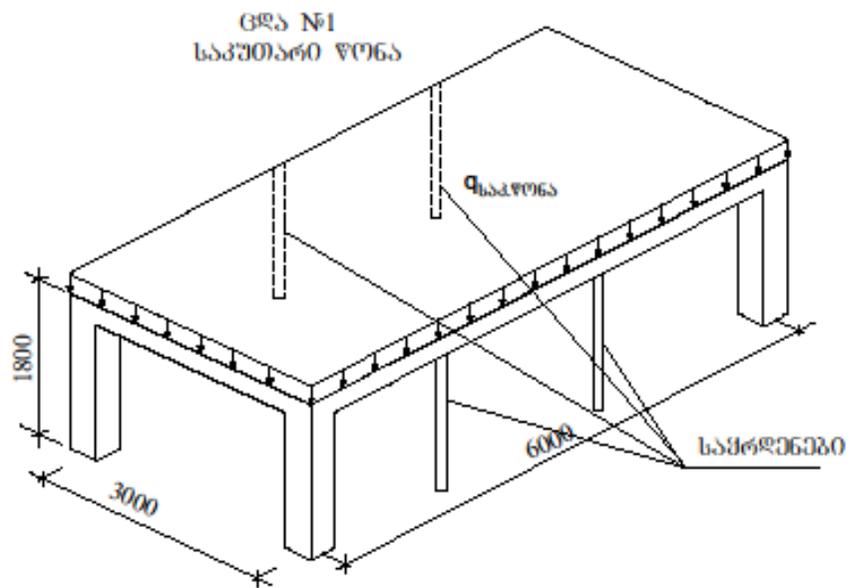
საზომი ხელსაწყოების განთავსების სქემა



ჭრილი E-G



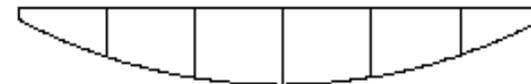
ნახ. №2.1 ინდიკატორების განლაგების სქემა



ჩაღებვის პროფილი H-F



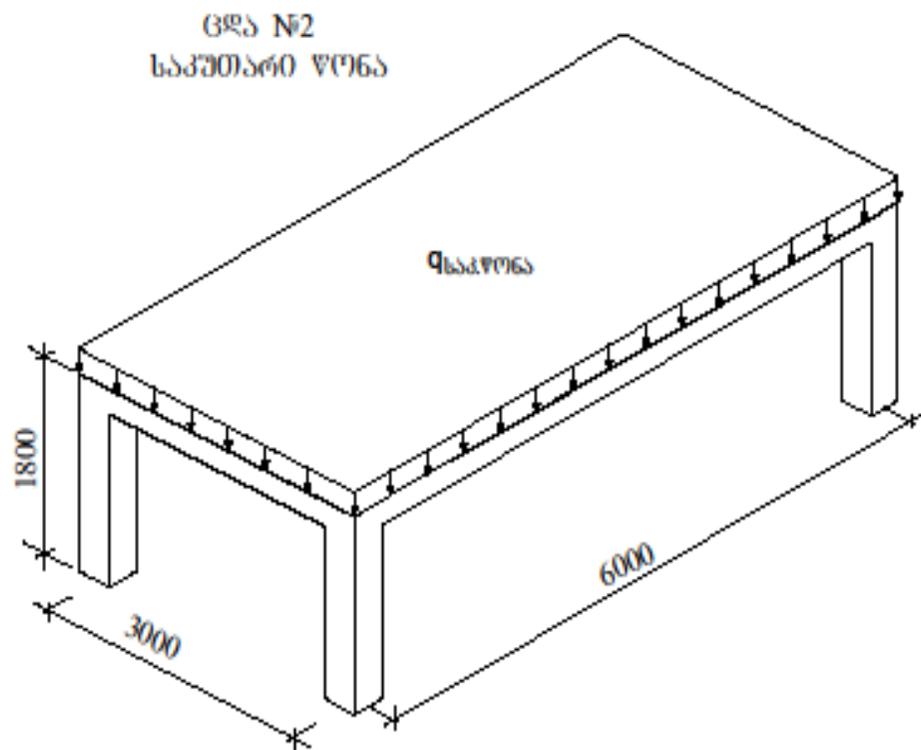
ჩაღებვის პროფილი E-G



ჩაღებვის პროფილი A-C



ნახ. №2.2 დატვირთვა, ცდა-1



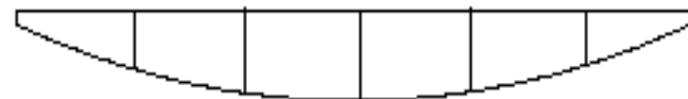
ნაღუნვევები. პიოლი H-F



ნაღუნვევები. პიოლი E-G

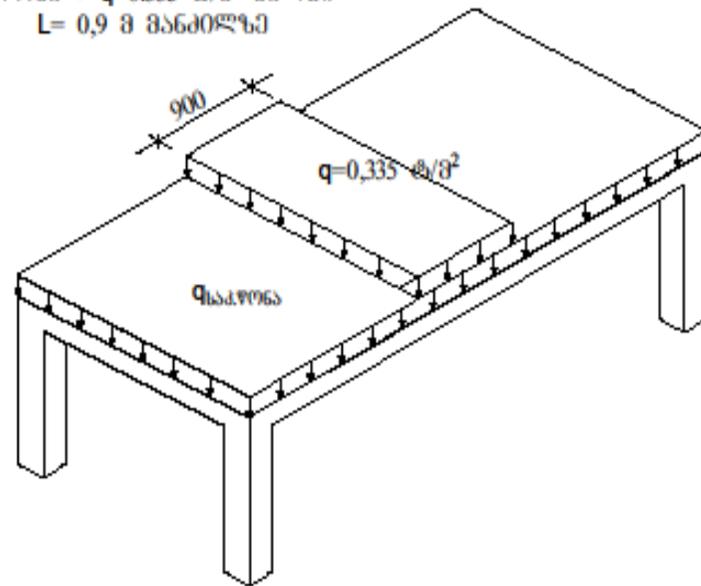


ნაღუნვევები. პიოლი A-C



ნახ. №2.3 დატვირთვა, ცდა-2

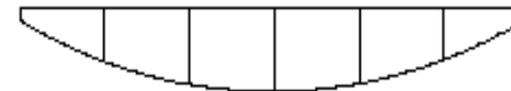
ცდა №3  
 საკუთარი წონა +  $q=0.335$  ტ/მ<sup>2</sup> მალში  
 $L= 0,9$  მ მანძილზე



ნაღმნების პროფილი H-F



ნაღმნების პროფილი E-G

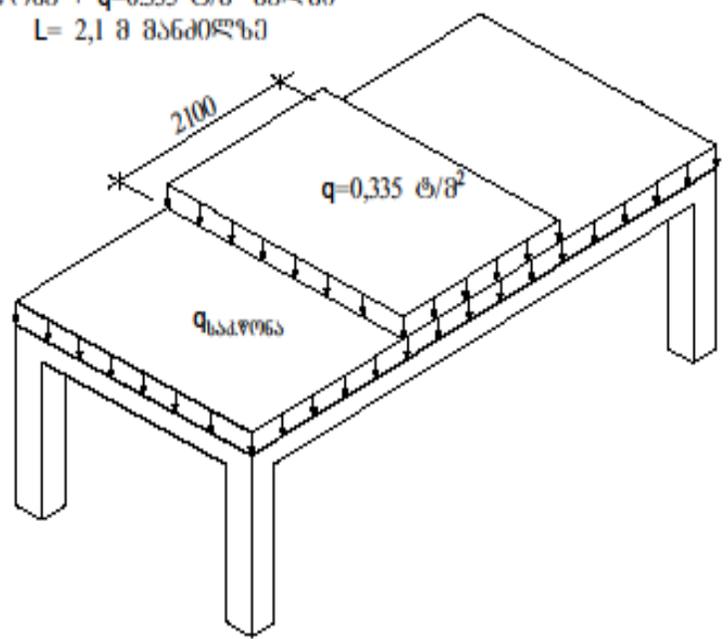


ნაღმნების პროფილი A-C

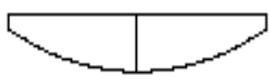


ნახ. №2.4 დატვირთვა, ცდა-3

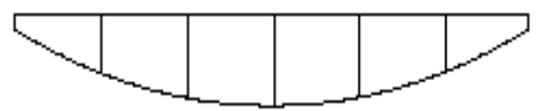
ცდა №4  
 საკუთარი წონისა +  $q=0.335$  ტ/მ<sup>2</sup> მალეში  
 $L= 2,1$  მ მანძილზე



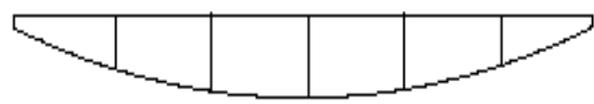
ნაღუმენები. პროლი H-F



ნაღუმენები. პროლი E-G



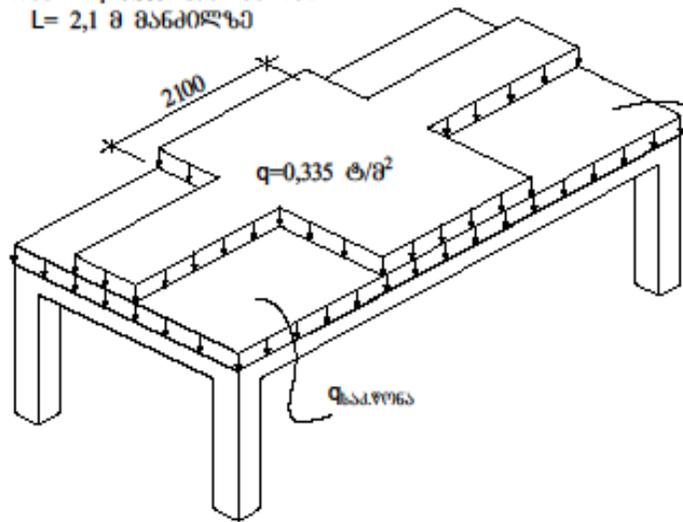
ნაღუმენები. პროლი A-C



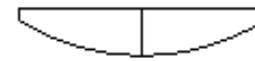
ნახ. №2.5 დატვირთვა, ცდა-4



ცდა №5  
 სკეშური წონა +  $q=0.335$  ტ/მ<sup>2</sup> მაღუბო  
 $L= 2,1$  მ მანძილზე



ჩაღუნვები. ზრილი H-F



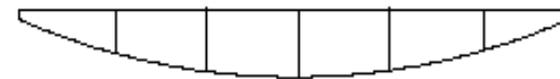
სკეშური წონა

ჩაღუნვები. ზრილი E-G



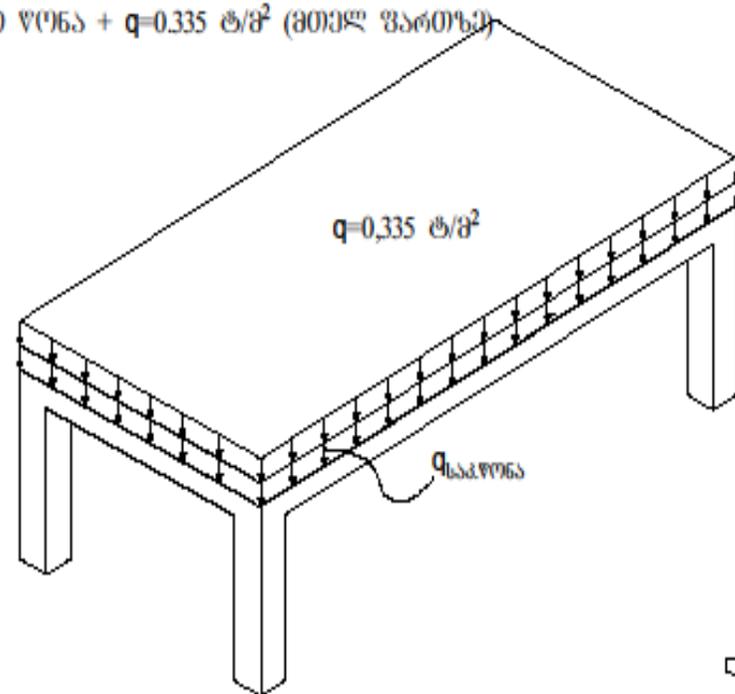
სკეშური წონა

ჩაღუნვები. ზრილი A-C



ნახ. №2.6 დატვირთვა, ცდა-5

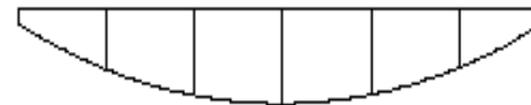
ცდა №6  
საკუთარი წონა +  $q=0.335$  ტ/მ<sup>2</sup> (მთელი ფართობი)



ნაღუნვეპი. ჰრილი H-F



ნაღუნვეპი. ჰრილი E-G

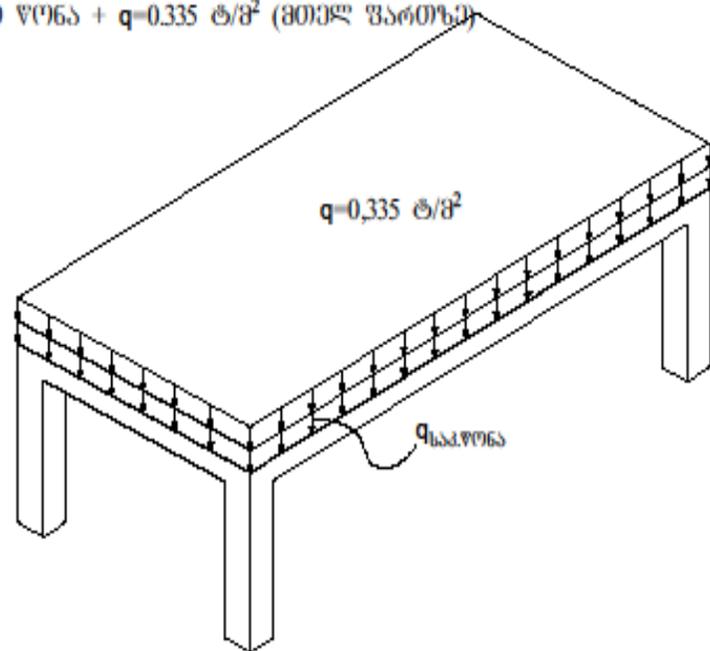


ნაღუნვეპი. ჰრილი A-C



ნახ. №2.7 დატვირთვა, ცდა-6

ცხა №7  
საკუთარი წონა +  $q=0.335$  ტ/მ<sup>2</sup> (მთელ ფართობზე)



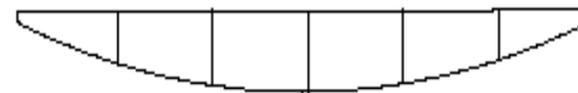
ჩაღუნვები. პროლი H-F



ჩაღუნვები. პროლი E-G

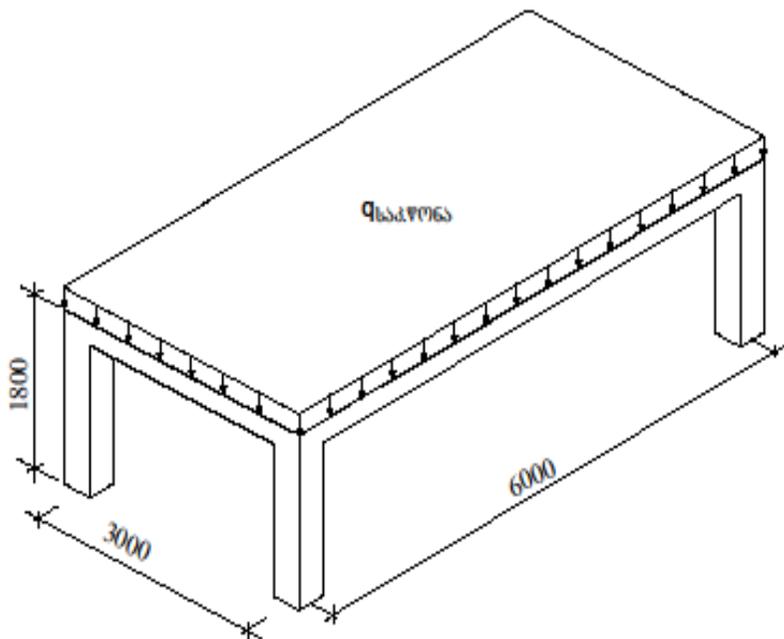


ჩაღუნვები. პროლი A-C



ნახ. №2.8 დატვირთვა, ცდა-7

ცდა №8  
 ბანტვირთული ზოლა



ნაშენებები. პილო H-F



ნაშენებები. პილო E-G



ნაშენებები. პილო A-C



ნახ. №2.9 დატვირთვა, ცდა-8



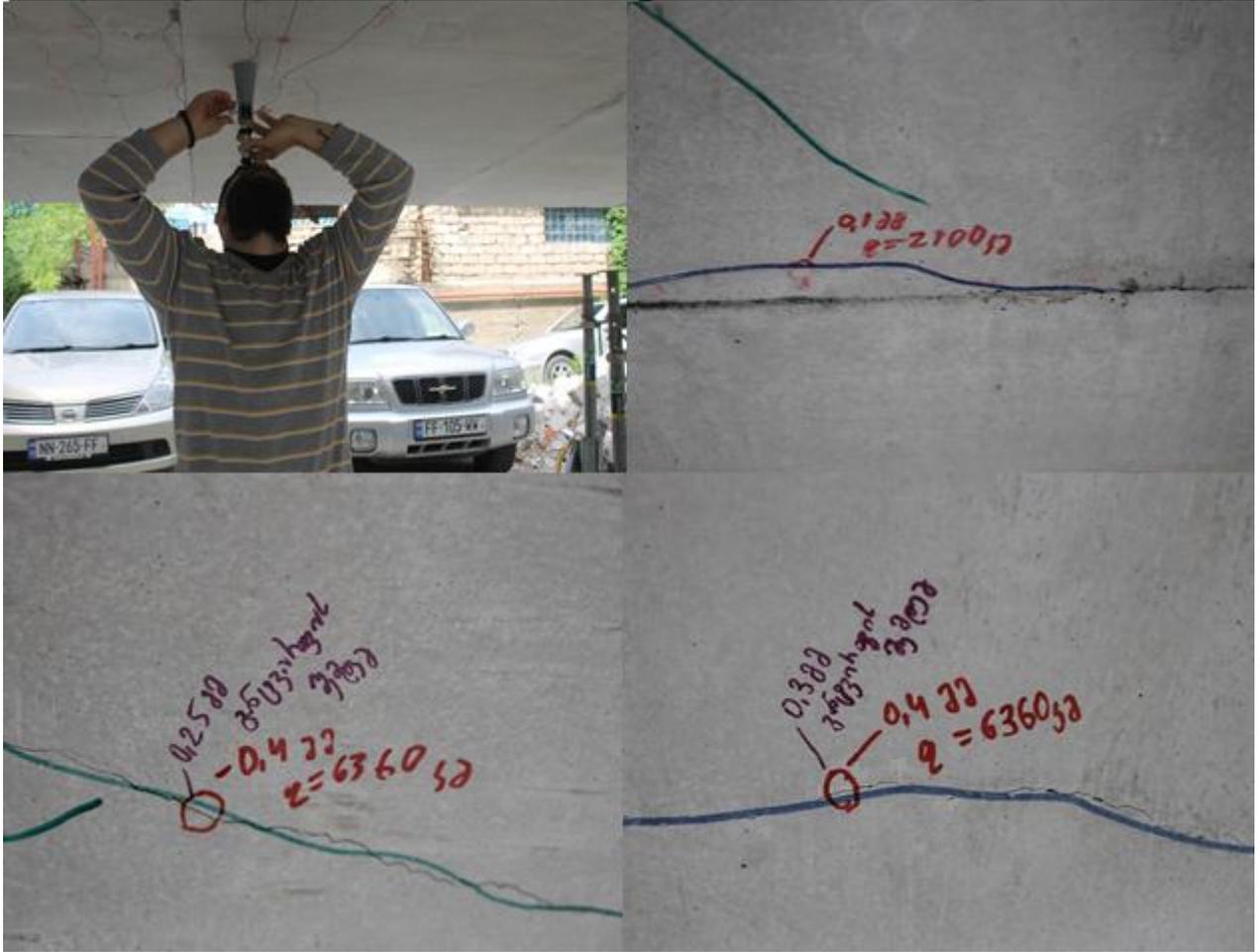
### სურ. № 2.15 ფილის დატვირთვა

სურათებზე ნაჩვენებია ფილის დატვირთვის პროცესი სხვადასხვა სტადიებში.

ბზარების წარმოქმნა დაიწყო №4 დატვირთვის სქემის დროს, ნახ. №2.5 ბზარის მაქსიმალური გახსნის სიდიდე დაფიქსირდა 0,5 მმ. რის შემდეგაც მოხდა ფილის განტვირთვა.

განტვირთვის შემდეგ დაფიქსირებული იქნა ნარჩენი დეფორმაციები.

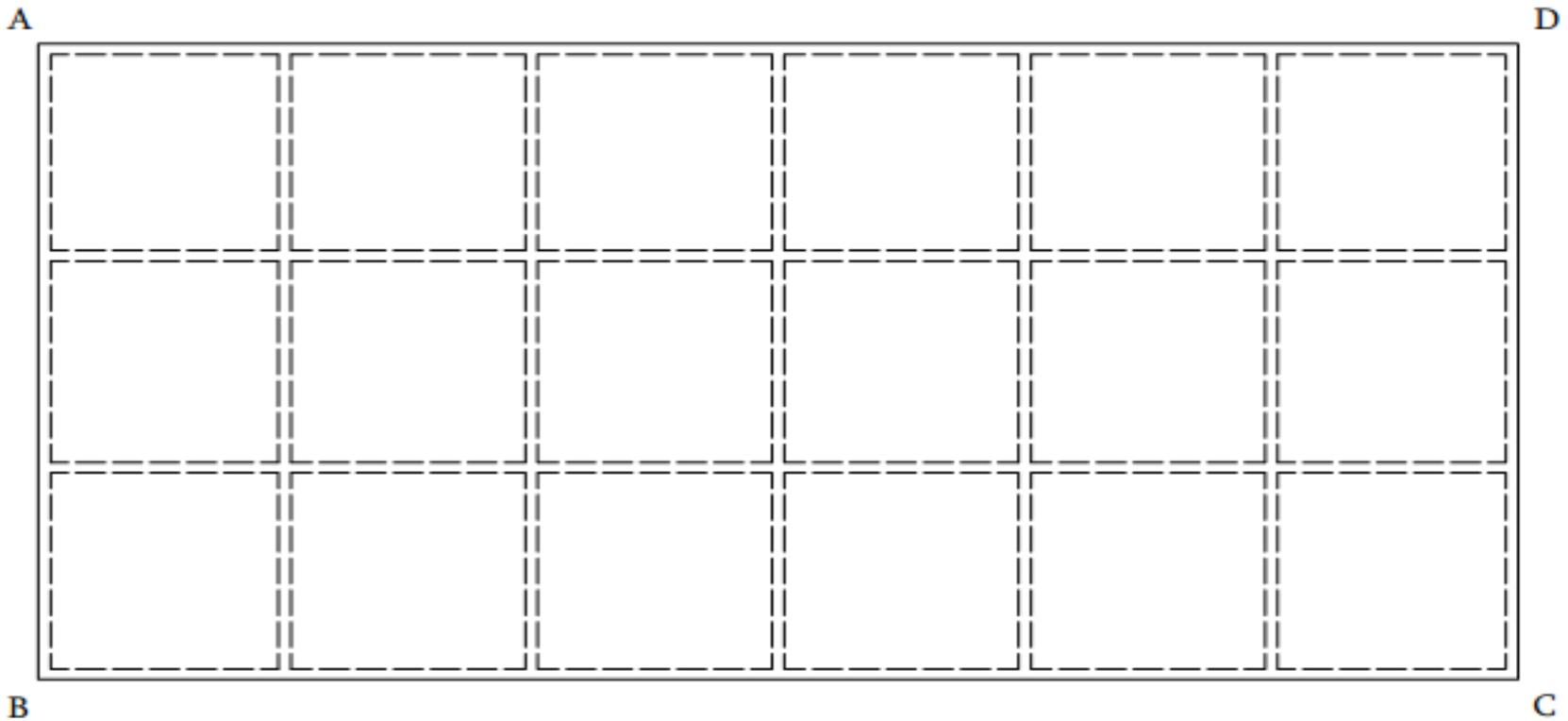
გადაადგილება	ინდიკატორი №	დატვირთვა											
		საკუთარი წონა, ნაწილობრივი დგარებით	საკუთარი წონა, სრულად მოხსნილი დგარებით	საკუთარი წონა, სტაბილიზაციის შემდეგ	დატვირთვა 900 კგ	დატვირთვა 2100 კგ	დატვირთვა 2100 კგ სტაბილიზაციის შემდეგ	დატვირთვა 3540 კგ	თანაბრად განაწილებული დატვირთვა, 316,6 კგ/მ²	თანაბრად განაწილებული დატვირთვა 316,6 კგ/მ²+660 კგ	თანაბრად განაწილებული დატვირთვა 316,6 კგ/მ²+660 კგ სტაბილიზაციის შემდეგ	დატვირთვის მოხსნის შემდეგ	შენიშვნა
		სქემა 1	სქემა 2		სქემა 3	სქემა 4		სქემა 5	სქემა 6	სქემა 7		სქემა 8	
1	0,55	2,27	2,49	2,80	3,93	4,36	4,40	6,44	6,79	7,31	-4,81		
2	0,61	3,32	3,72	4,37	6,93	7,73	7,90	12,50	17,43	18,57	-10,45		
3	0,31	3,71	4,30	4,89	8,42	9,42	11,23	15,02	20,15	21,62	-12,20		
4	0,51	0,87	0,76	0,81	0,89	0,94	1,01	1,19	1,04	1,17	-0,87		
5	0,57	2,10	2,27	2,65	3,87	4,32	4,95	6,84	9,90	10,56	-6,23		
6	0,49	0,62	0,58	0,63	0,59	0,59	0,68	0,76	0,75	0,87	-0,64		
7	0,82	4,20	4,91	5,73	9,33	10,43	14,29	16,11	22,62	24,14	-14,16		
8	0,56	4,48	5,10	5,89	9,39	10,42	14,21	16,03	22,72	24,18	-14,78		
9	0,76	3,61	4,23	4,88	7,33	8,12	8,30	12,43	18,34	19,43	-12,23		



სურ. № 2.16 ბზარების მონიტორინგი

დატვირთვის სქემა №1

ბზარების წარმოქმნის სქემა ფილის ქვედა ზედაპირზე  
ბზარების გახსნა არ დაფიქსირებულა

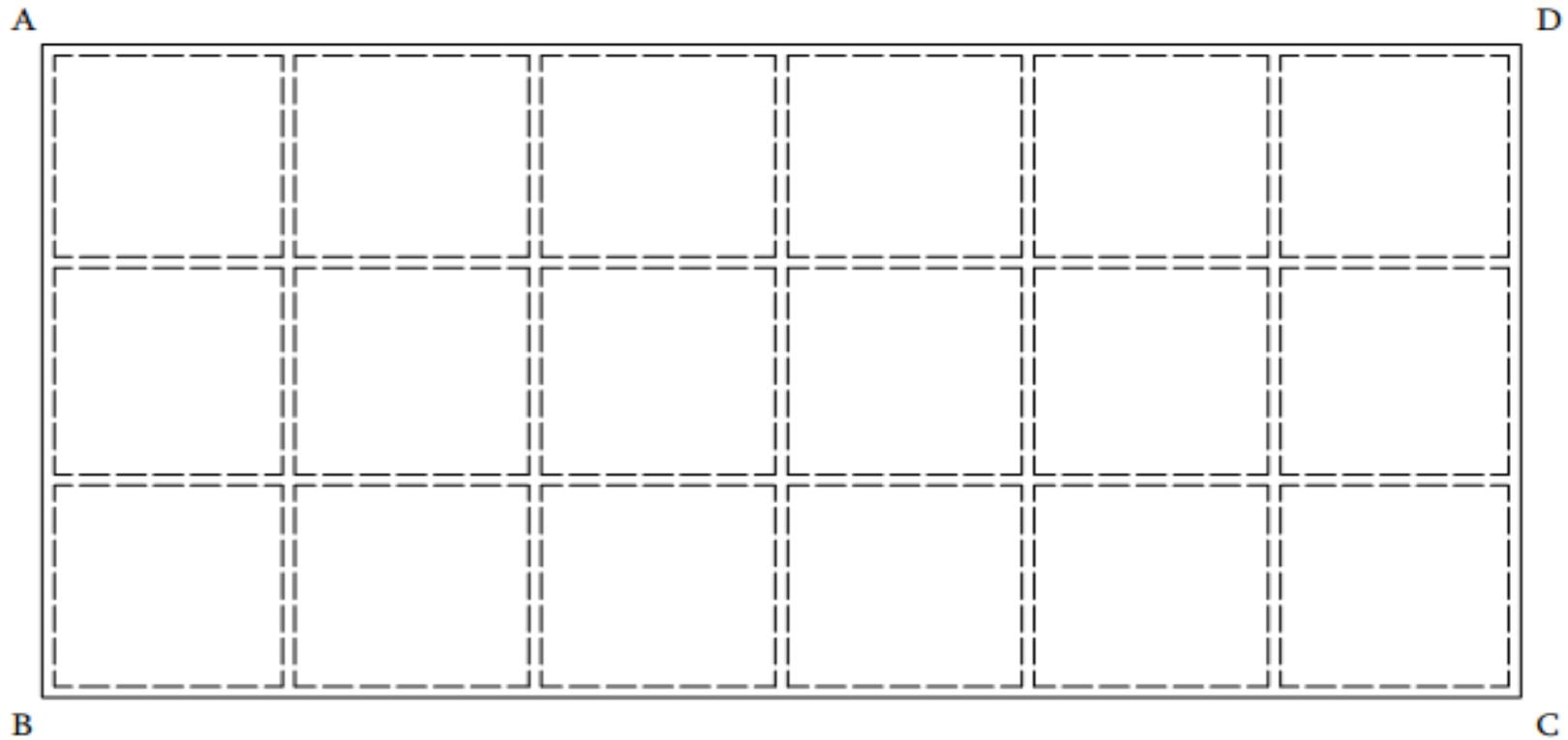


ნახ. №2.10 ბზარების წარმოქმნა №1 დატვირთვის სქემის დროს



დატვირთვის სქემა №2

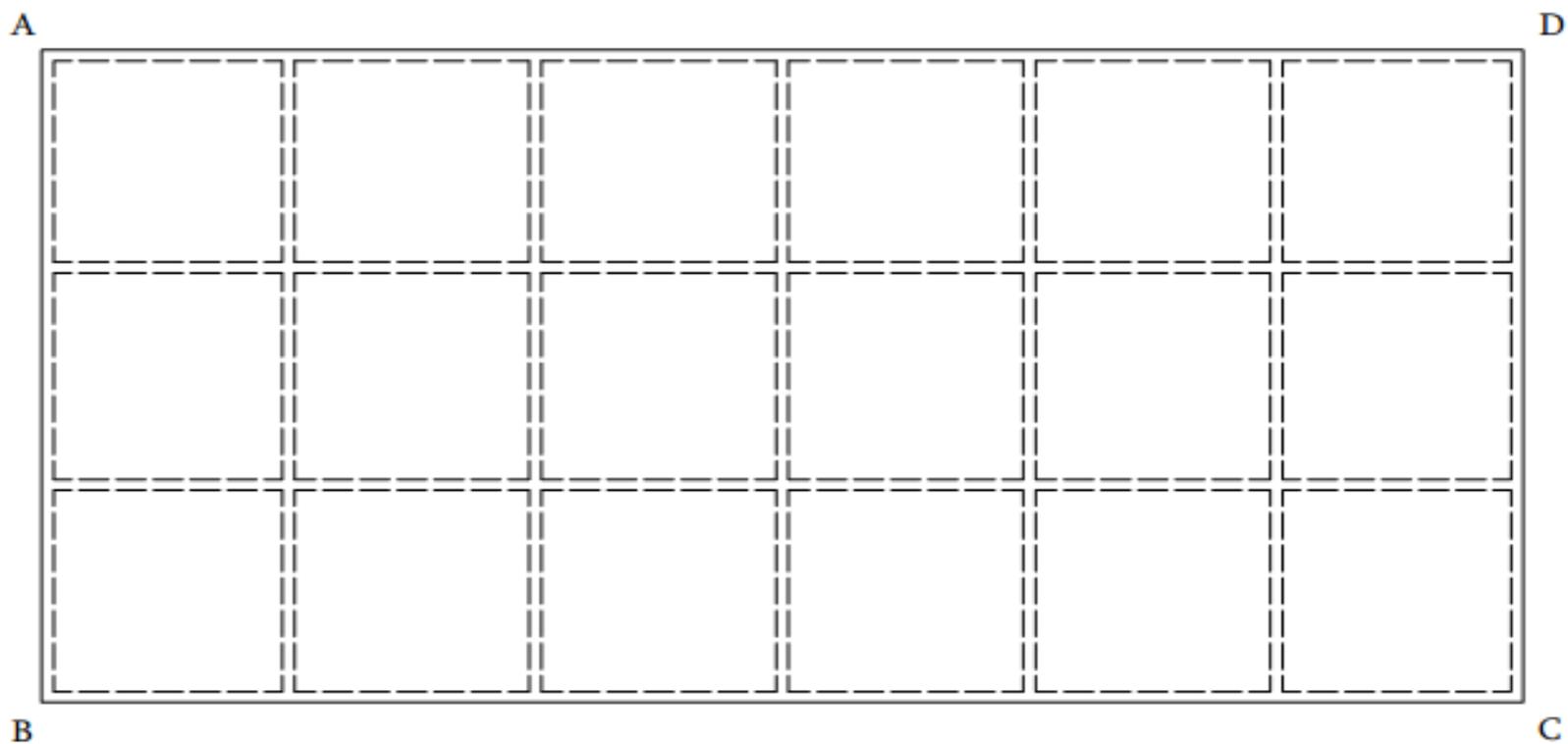
ბზარების წარმოქმნის სქემა ფილის ქვედა ზედაპირზე  
ბზარების გახსნა არ დაფიქსირებულა



ნახ. №2.11 ბზარების წარმოქმნა №2 დატვირთვის სქემის დროს

დატვირთვის სქემა №3

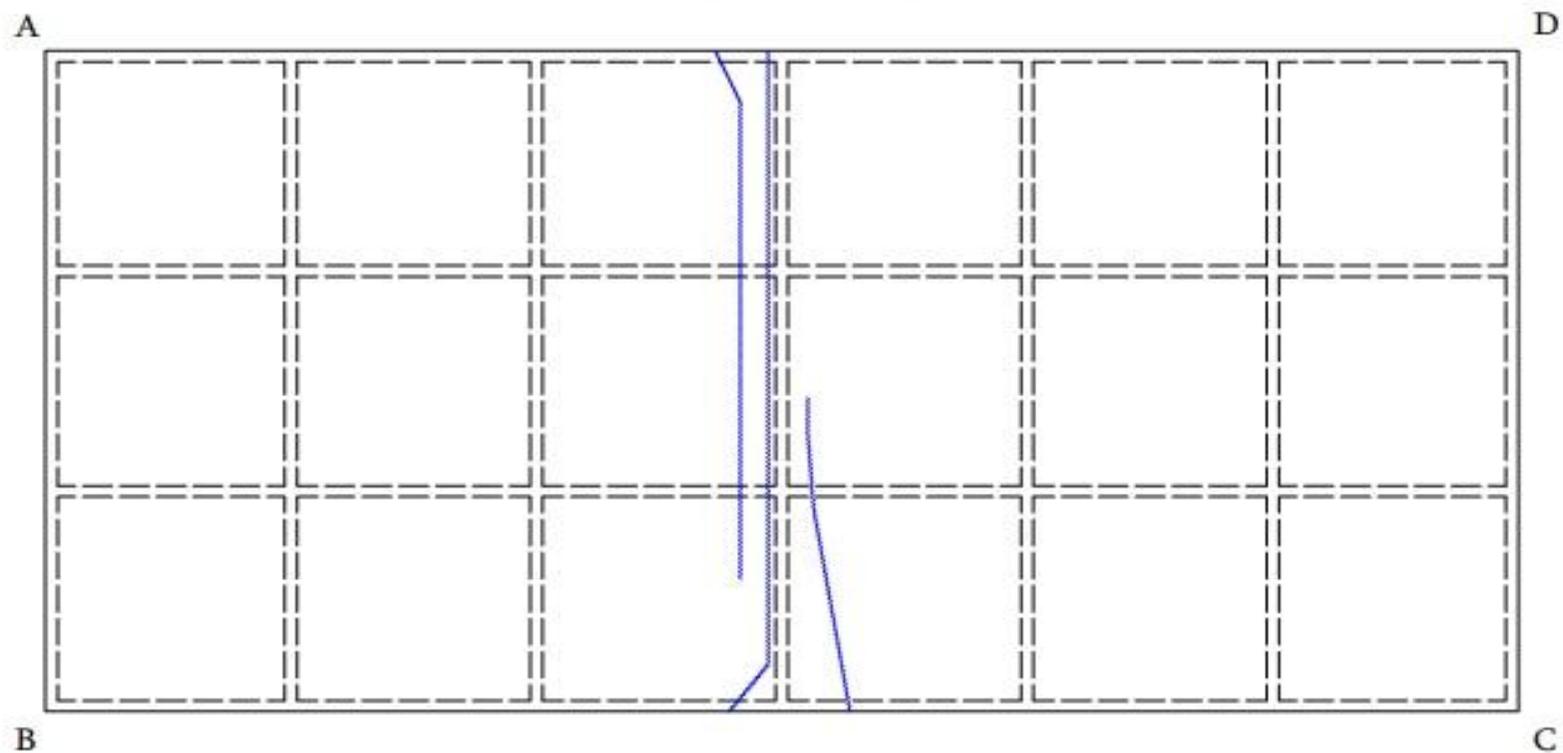
ბზარების წარმოქმნის სქემა ფილის ქვედა ზედაპირზე  
ბზარების გახსნა არ დაფიქსირებულია



ნახ. №2.12 ბზარების წარმოქმნა №3 დატვირთვის სქემის დროს

დატვირთვის სქემა № 4

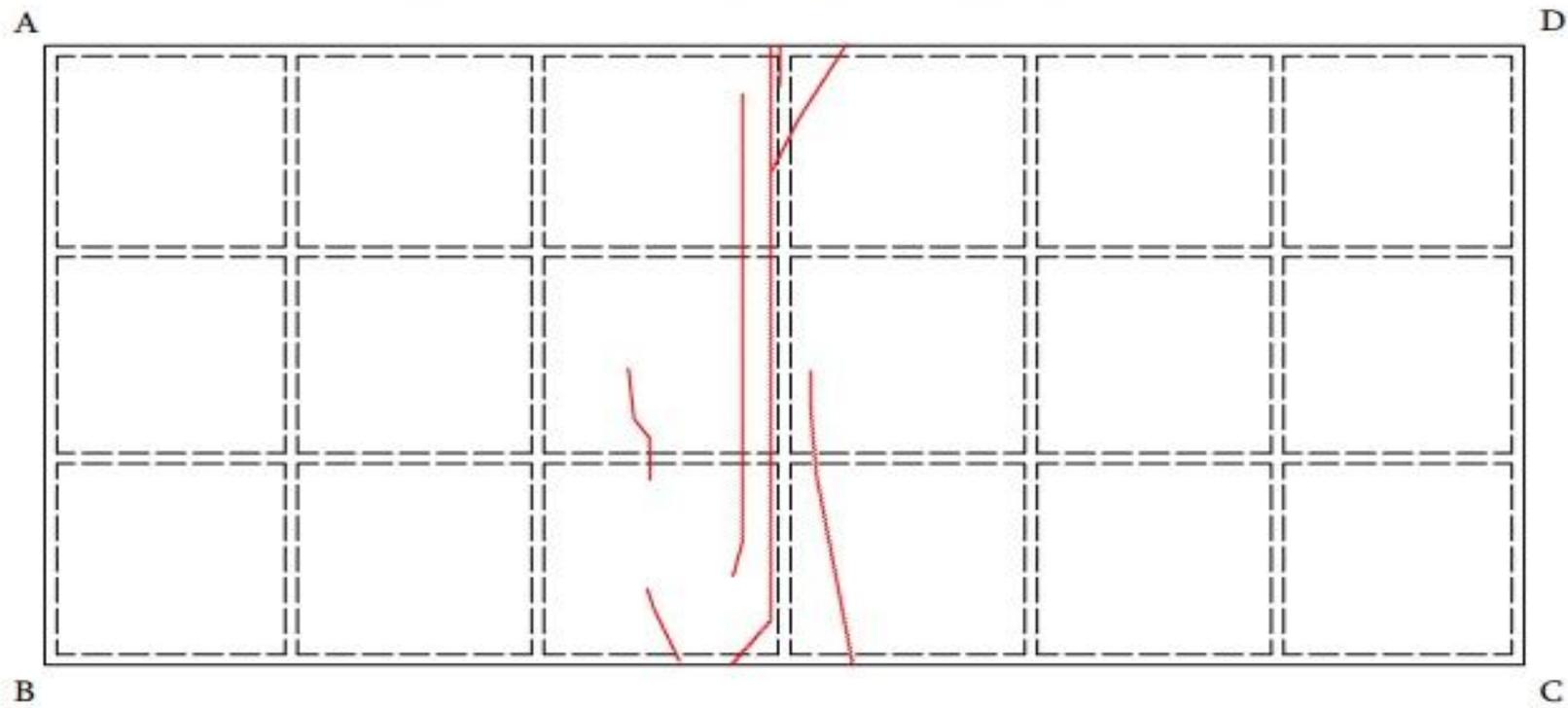
ზხარების წარმოქმნის სქემა ფილის ქვედა ზედაპირზე



ნახ. №2.13 ზხარების წარმოქმნა №4 დატვირთვის სქემის დროს

დატვირთვის სქემა № 5

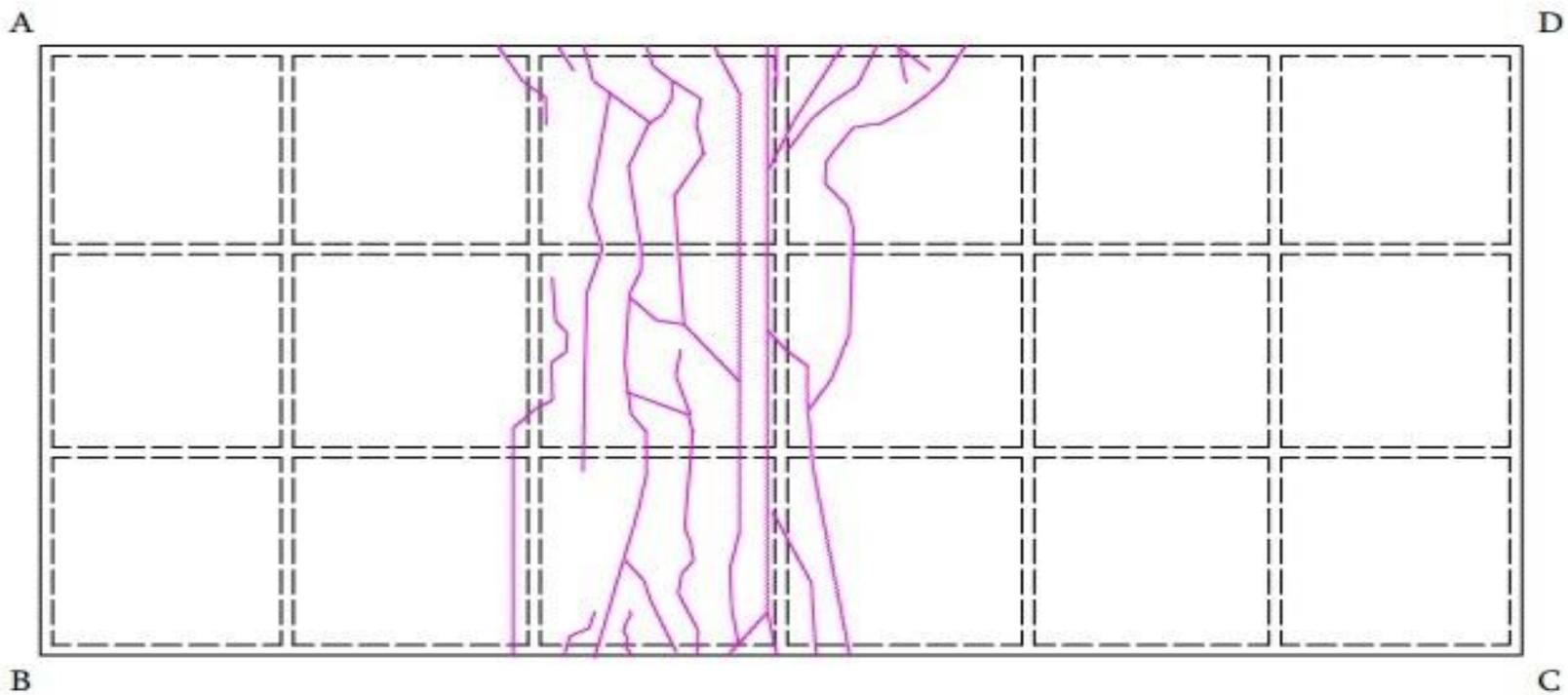
ბზარების წარმოქმნის სქემა ფილის ქვედა ზედაპირზე



ნახ. №2.14 ბზარების წარმოქმნა №5 დატვირთვის სქემის დროს

დატვირთვის სქემა № 6

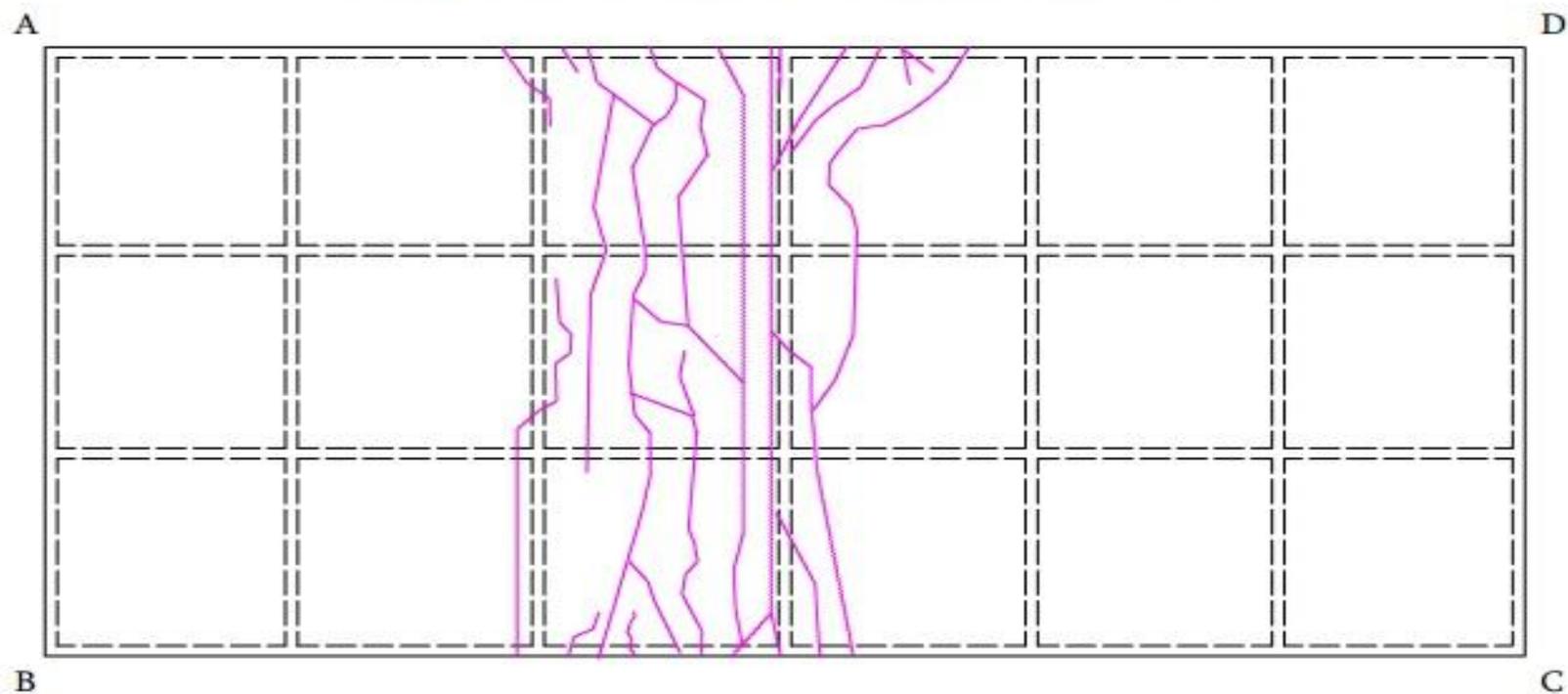
ბზარების წარმოქმნის სქემა ფილის ქვედა ზედაპირზე



ნახ. №2.15 ბზარების წარმოქმნა №6 დატვირთვის სქემის დროს

დატვირთვის სქემა № 7

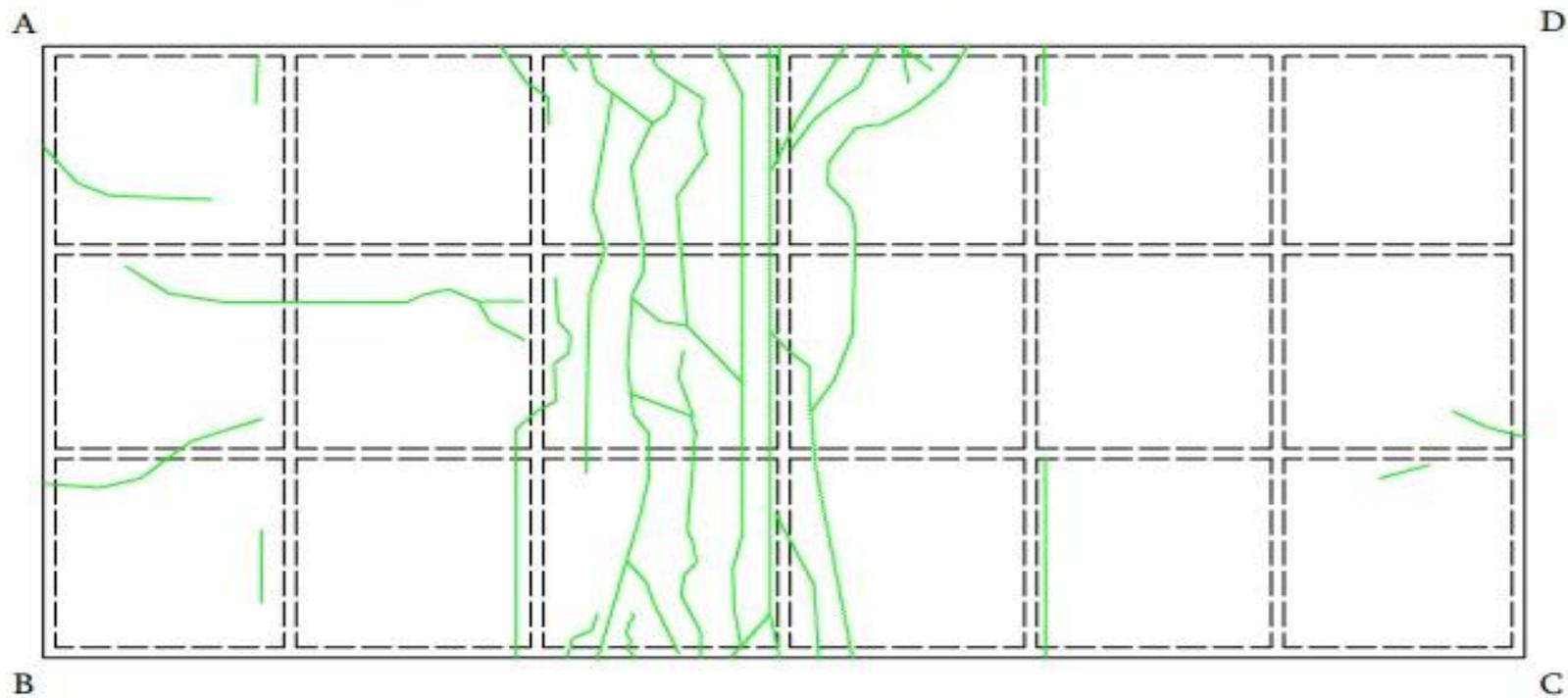
ბზარების წარმოქმნის სქემა ფილის ქვედა ზედაპირზე



ნახ. №2.16 ბზარების წარმოქმნა №7 დატვირთვის სქემის დროს

დატვირთვის სქემა № 8

ბზარების წარმოქმნის სქემა ფილის ქვედა ზედაპირზე



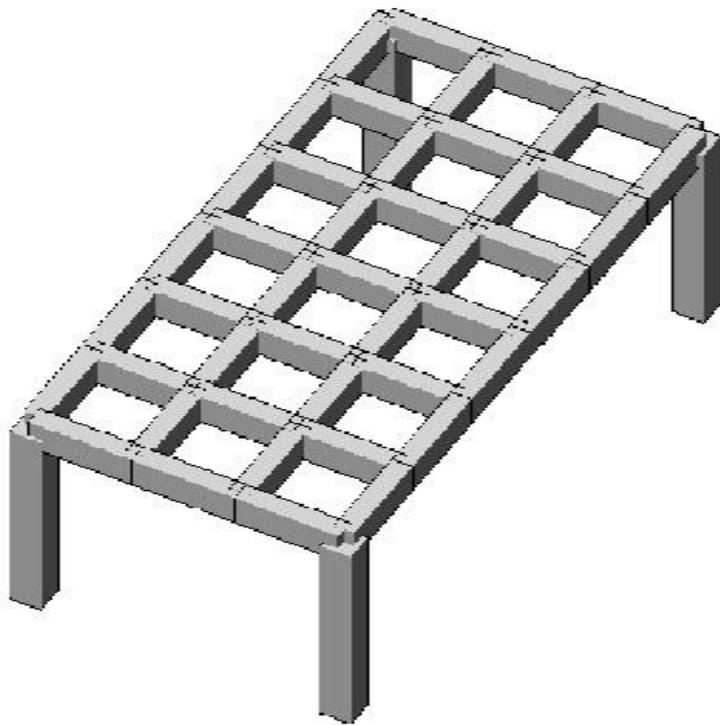
ნახ. №2.17 ბზარების წარმოქმნა №8 დატვირთვის სქემის დროს

## 2.4. ექსპერიმენტალური მონაცემების მიხედვით ოპტიმალური საანგარიშო სქემის შერჩევა

თეორიული გაანგარიშებისათვის შედგა საანგარიშო სქემები სასრულ ელემენტთა სხვადასხვა კომბინაციებისათვის.

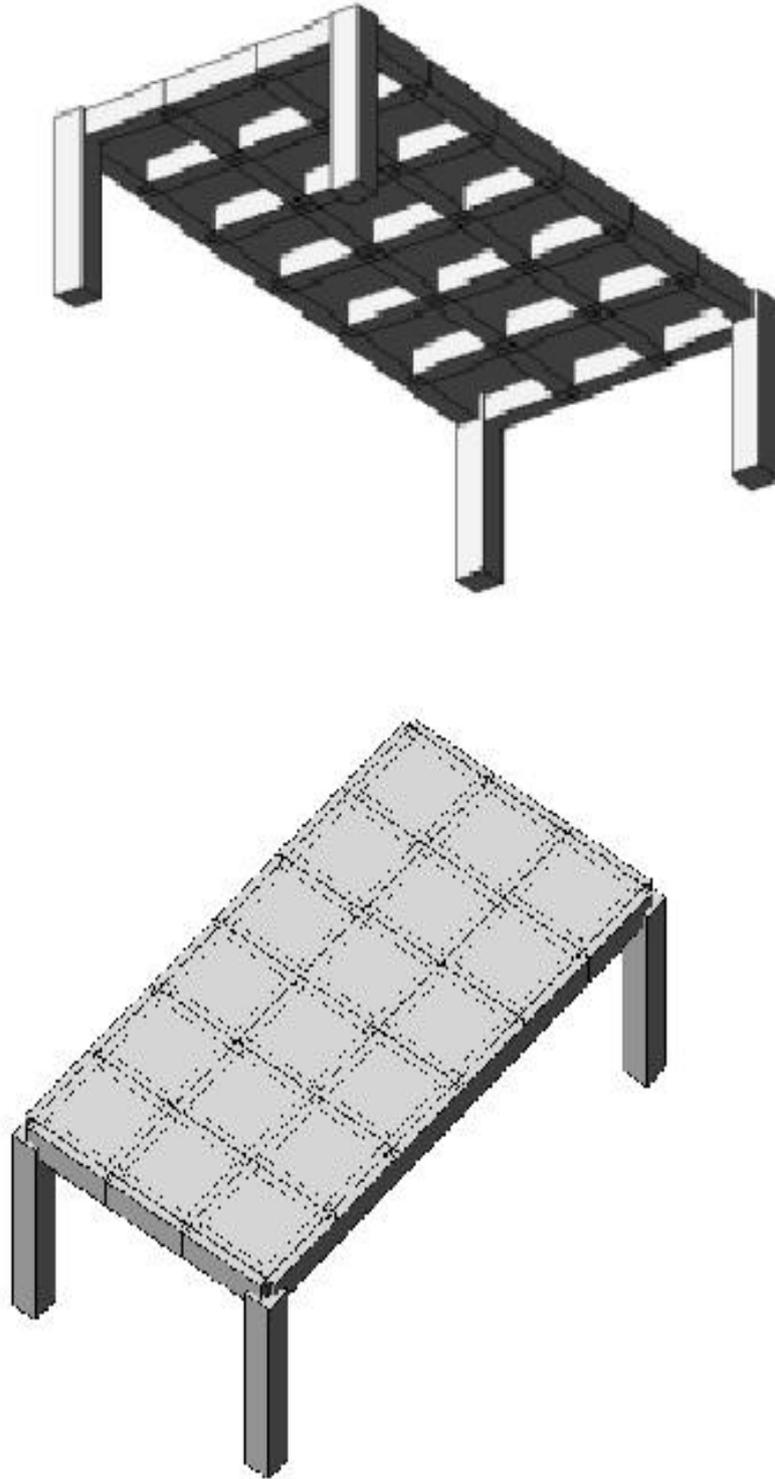
ექსპერიმენტალური მონაცემების ანალიზის საფუძველზე კი ამ საანგარიშო სქემებიდან შეირჩა ოპტიმალური. ქვემოთ მოყვანილია საანგარიშო სქემის მოდელი და თეორიული გაანგარიშების შედეგების ძირითადი მნიშვნელობები;

- ა) ფილოვანი სასრული ელემენტები;
- ბ) ფილოვანი და ღეროვანი სასრული ელემენტები.

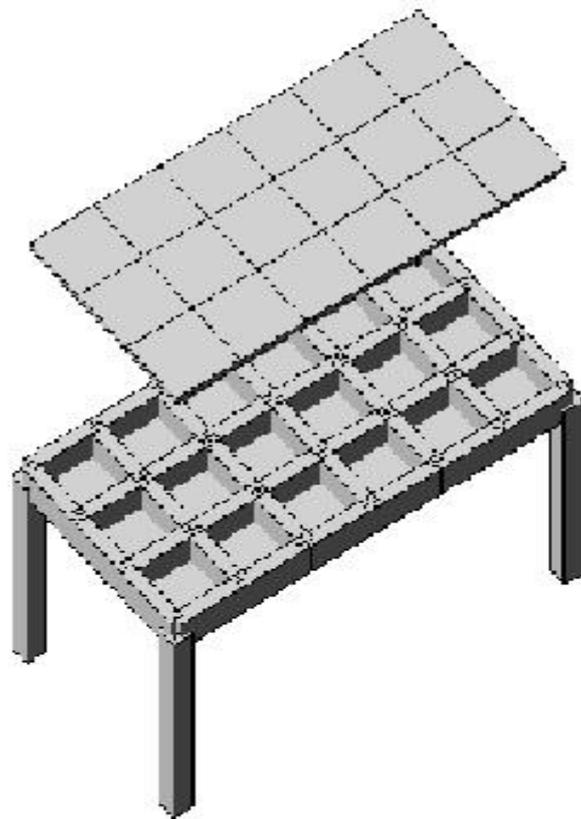
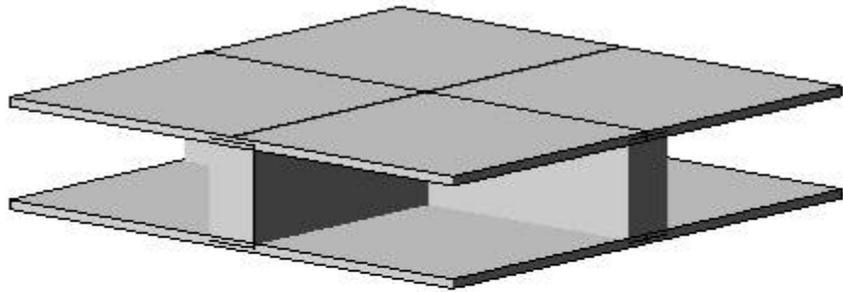


ნახ. №2.18 საანგარიშო სქემის მოდელი

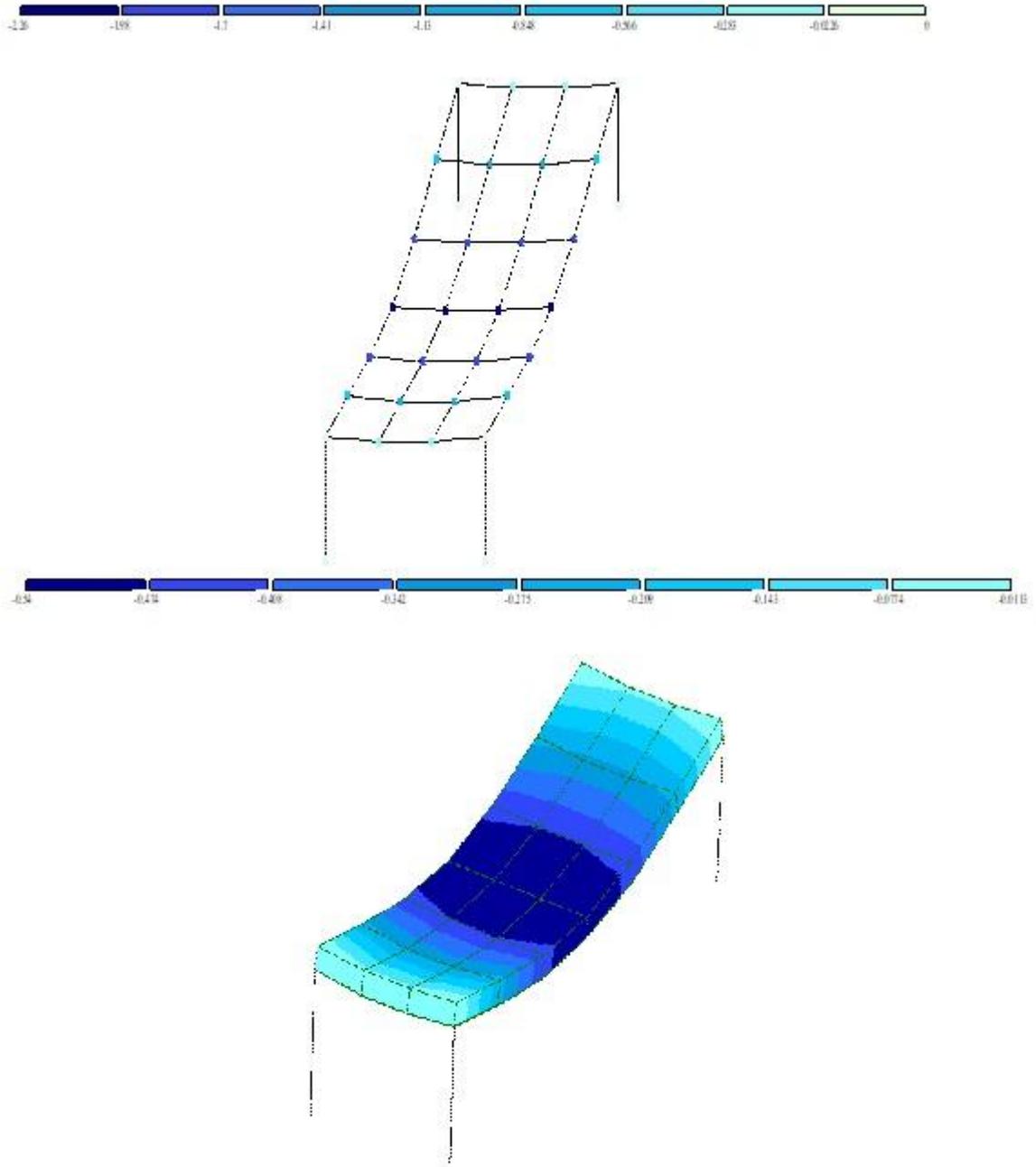




ნახ. №2.19 საანგარიშო სქემის მოდელი-ხედი ა



ნახ. №2.20 საანგარიშო სქემის მოდელი-ხედი ბ



ნახ. №2.21 საანგარიშო სქემის მოდელი, ჩალუნვა მალის შუაში

საანგარიშო სქემის ელემენტები	ჩალუნვა მალის შუაში
ფილოვანი სასრული ელემენტები	10,13 მმ
ფილოვანი და ლეროვანი სასრული ელემენტები	26,15 მმ

### თავი III. სასრული ელემენტთა მეთოდი ურიგელო გადახურვის ფილების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გაანგარიშებაში

#### 3.1. სასრულ ელემენტთა მეთოდის არსი

ბოლო წლებში კომპიუტერული ტექნოლოგიების განვითარებამ დასაბამი მისცა რიცხვითი მეთოდების სრულყოფასა და მათ პრაქტიკულ რეალიზაციას, კერძოდ სასრულ ელემენტთა მეთოდის განვითარებას, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელი გახდა რთული ნაგებობების გაანგარიშება, რომელთა გადაწყვეტა სხვა არსებული მეთოდებით პრაქტიკულად შეუძლებელი იყო.

სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობაში ფართოდ გამოიყენება რკინაბეტონის თხელკედლიანი გადახურვები, რომლებიც შერწყმულია სხვადასხვა ღეროვან (რიგელები, სვეტები) სისტემებთან. ჩვენ შემთხვევაში საინტერესოა თხელკედლიანი გადახურვის ფილების მუშაობის ხასიათის დადგენა, მაგრამ ფილების გაანგარიშება დაიყვანება შესაბამისი სასაზღვრო პირობებიანი დიფერენციალური განტოლებების ინტეგრებასთან, რაც დიდ მათემატიკურ სიძნელებთანაა დაკავშირებული. ამიტომ დიდი მნიშვნელობა შეიძინა მიახლოებითი რიცხვითი მეთოდების გამოყენებამ.

პრობლემის გადაწყვეტის ერთ-ერთი გავრცელებული მიდგომაა გამოსაკვლევი რთული კონტინუალური სისტემისათვის დისკრეტული საანგარიშო მოდელის შედგენა.

რთული კონტინუალური სისტემების დისკრეტული საანგარიშო მოდელით შეცვლა განპირობებულია გამოთვლითი ტექნიკის სწრაფი განვითარებით, რამდენადაც ასეთ შემთხვევაში შესაძლებელი ხდება ეფექტურად იქნას გამოყენებული თანამედროვე ელექტრო გამომთვლელი მანქანები, ამასთან ამოცანის დისკრეტიზაცია საშუალებას გვაძლევს

ნაგებობის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა, ნაცვლად დიფერენციალური განტოლებებისა, აღვწერთ წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემების საშუალებით.

რთული კონტინუალური სისტემების დისკრეტიზაციის ერთ-ერთ მეთოდს წარმოადგენს სასრულ ელემენტთა მეთოდი. სასრულ ელემენტების გამოყენებით გაანგარიშებების დროს, ხდება გასაანგარიშებელი მოდელის დისკრეტიზაცია (დაყოფა) ცალკეული სასრულო ელემენტების, დეროების და სამკუთხა (ოთხკუთხა) ელემენტების საშუალებით. აღნიშნული სასრულ ელემენტების შეერთების კვანძებში იწერება უწყვეტობის განტოლებები, რომელთა ამოხსნაც გვამღევს საშუალებას განისაზღვროს საკვლევი ნაგებობის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა.

### 3.2 დრეკადობის თეორიის ძირითადი თანაფარდობები.

ზოგადად მყარ ტანში (ნახ. 3.1), სივრცეში აღიძვრება 15 უცნობი ფუნქცია[43]

ექვსი ძაბვის ფუნქცია

$$\sigma_x(x, y, z), \sigma_y(x, y, z), \sigma_z(x, y, z),$$

$$\tau_{xy}(x, y, z), \tau_{yz}(x, y, z), \tau_{zx}(x, y, z),$$

დეფორმაციის 6 მდგენელი

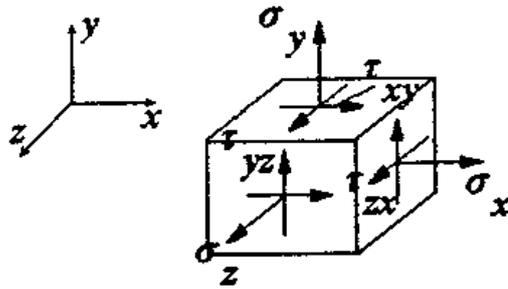
$$\varepsilon_x(x, y, z), \varepsilon_y(x, y, z), \varepsilon_z(x, y, z),$$

$$\gamma_{xy}(x, y, z), \gamma_{yz}(x, y, z), \gamma_{zx}(x, y, z)$$

სამი გადაადგილება

$$u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$$

ზემოთაღნიშნული ფუნქციების საპოვნელად გვაქვს წნასწორობის 15 განტოლება:



ნახ.№ 3.1.

სამი წონასწორობის დიფერენციალური განტოლება (წავიეს სტატიკური განტოლებები)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{ექვსი გეომეტრიული თანაფარდობა (კოშის} \\ \text{თანაფარდობა)} \\ \left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, & \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}, & \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \end{aligned} \right\}$$

ექვსი ფიზიკური განტოლება (ჰუკის კანონი)

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y - \sigma_z)], & \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z - \sigma_x)], & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G}, \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x - \sigma_y)], & \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G}, \end{aligned} \right\}$$

აქ -  $E$  დრეკადობის მოდულია,  $G$  - ძვრის მოდული

აღნიშნული განტოლებების ამოხსნა შესაძლებელია ვაწარმოთ სხვადასხვა მეთოდით, იმისდა მიხედვით თუ რა სიდიდეები იქნება მიღებული უცნობებად.

1. ამოხსნა გადაადგილებებში, როდესაც უცნობებად მიღებულია სამი გადაადგილება

$$u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$$

2. ამოხსნა ძაბვებში, როდესაც უცნობებად მიღებულია ძაბვის ექვსი მდგენელი

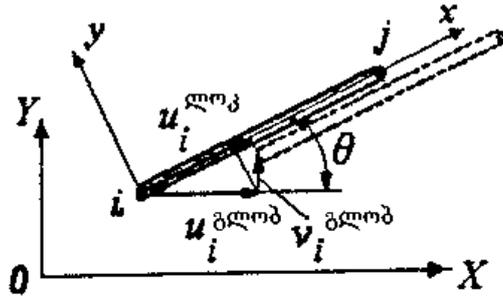
$$\sigma_x(x, y, z), \sigma_y(x, y, z), \sigma_z(x, y, z),$$

$$\tau_{xy}(x, y, z), \tau_{yz}(x, y, z), \tau_{zx}(x, y, z),$$

3. შერეული მეთოდი, როდესაც უცნობებად მიღებულია გადაადგილებათა და ძაბვათა მდგენელების ნაწილი

### 3.3. სიბრტყეზე ნებისმიერად განლაგებული ღეროვანი ელემენტი.

განვიხილოთ ზოგადი შემთხვევა, როდესაც ღერო დახრილია მართკუთხა კოორდინატთა სისტემის მიმართ ნებისმიერი  $\theta$  კუთხით (იხ. ნახ.3.2). განვიხილოთ ორი მართკუთხა კოორდინატთა სისტემა. კერძოდ, ლოკალური  $X_{iy}$ , (რომელიც მიბმულია ღეროსთან) და გლობალური  $X_{oY}$  (მართკუთხა კოორდინატთა სისტემა), რომელშიც აღიწერება მთლიანი საანგარიშო მოდელი (სასრულ ელემენტთა ერთობლიობა). რადგანაც ელემენტი მდებარეობს ლოკალურ კოორდინატთა სისტემის  $x$  ღერძის გასწვრივ. ამ დროს მისი ბოლოების გადაადგილება  $u_i^{lok}$  და  $u_j^{lok}$  წარმოებს ისევე იგივე ღერძის ( $x$ -ის) მიმართ ( $v_i^{lok}$  და  $v_j^{lok}$  გადაადგილებები  $y$  ღერძის მიმართულებით ნულის ტოლია). გლობალურ კოორდინატთა სისტემაში მათ შეესაბამება  $u_i^{glob}$   $u_j^{glob}$ ,  $v_i^{glob}$  და  $v_j^{glob}$ . განვსაზღვროთ კავშირი  $i$  და  $j$  კვანძების გადაადგილებებს შორის ლოკალურ და გლობალურ კოორდინატთა სისტემაში. ე.ი. მოვნახოთ, ერთი მხრივ,  $u_i^{lok}$  და  $u_j^{lok}$  და მეორე მხრივ,  $u_i^{glob}$   $u_j^{glob}$ ,  $v_i^{glob}$  და  $v_j^{glob}$  –ს შორის კავშირი (იხ. ნახ. 3.2) [45], [1].



ნახ. №3.2.

გეომეტრიული მოსაზრებებიდან გამომდინარე შეიძლება დაიწეროს ) [45], [1]:

$$u_i^{ლობ} = u_i^{ლობ} \cos \theta + v_i^{ლობ} \sin \theta = [1 \quad m] \cdot \begin{Bmatrix} u_i^{ლობ} \\ v_i^{ლობ} \end{Bmatrix};$$

$$v_i^{ლობ} = -u_i^{ლობ} \sin \theta + v_i^{ლობ} \cos \theta = [-m \quad 1] \cdot \begin{Bmatrix} u_i^{ლობ} \\ v_i^{ლობ} \end{Bmatrix}.$$

სადაც,  $l = \cos \theta$ ,  $m = \sin \theta$ , რაც მატრიცული სახით ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$\begin{Bmatrix} u_i^{ლობ} \\ v_i^{ლობ} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l & m \\ -m & l \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_i^{ლობ} \\ v_i^{ლობ} \end{Bmatrix} \text{ ანუ } \{u_i^{ლობ}\} = \tilde{T} \{u_i^{ლობ}\} \quad (2.12)$$

$$\text{სადაც } \tilde{T} = \begin{bmatrix} l & m \\ -m & l \end{bmatrix} \quad (2.13).$$

ელემენტის ორივე კვანძისათვის გვექნება:

$$\begin{Bmatrix} u_i^{ლობ} \\ v_i^{ლობ} \\ u_j^{ლობ} \\ v_j^{ლობ} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l & m & 0 & 0 \\ -m & l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l & m \\ 0 & 0 & -m & l \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_i^{ლობ} \\ v_i^{ლობ} \\ u_j^{ლობ} \\ v_j^{ლობ} \end{Bmatrix} \quad \text{ანუ}$$

$$u^{ლობ} = T u^{ლობ}, \quad \text{სადაც } T = \begin{bmatrix} \tilde{T} & 0 \\ 0 & \tilde{T} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

ანალოგიურად გარდაიქმნება კვანძებში მოდებული ძალებიც:

$$f^{ლობ} = T \cdot f^{ლობ} \quad (2.15)$$

განხილული ელემენტისათვის (2.11) წონასწორობის განტოლებათა სისტემა სამართლიანია ლოკალურ კოორდინატთა სისტემისათვის. შემოდებული აღნიშვნების თანახმად (2.11) ჩაიწერება შემდეგი სახით:



$$\frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i^{llok} \\ u_j^{llok} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i^{llok} \\ f_j^{llok} \end{Bmatrix}.$$

იმისათვის, რომ დავამატოთ გადაადგილების ორი ახალი მდგენელი დავამატოთ სისტემას კიდევ ორი განტოლება, მივიღებთ:

$$\frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i^{llok} \\ v_i^{llok} \\ u_j^{llok} \\ v_j^{llok} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i^{llok} \\ 0 \\ f_j^{llok} \\ 0 \end{Bmatrix},$$

ანუ

$$k^{llok} \cdot u^{llok} = f^{llok}$$

(2.14) და (2.15) გათვალისწინებით ეს განტოლება შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგი სახით:

$$k^{llok} T u = T \cdot f$$

ამ ტოლობის ორივე მხარე გავამრავლოთ  $T^T$  და გავითვალისწინოთ, რომ  $T^T T = I$ , მივიღებთ:

$$T^T k^{llok} T u = f \quad (2.16)$$

ამგვარად ელემენტის სიხისტის  $k$  მატრიცა გლობალურ კოორდინატთა სისტემაში შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$k = T^T k^{llok} T \quad (2.17)$$

იგი არის  $4 \times 4$  განზომილების სიმეტრიული მატრიცა. გაშლილი სახით სიხისტის  $k$  მატრიცა წარმოდგება შემდეგი სახით:

$$k = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} u_i & v_i & u_j & v_j \\ \ell^2 & \ell m & -\ell^2 & -\ell m \\ \ell m & m^2 & -\ell m & -m^2 \\ -\ell^2 & -\ell m & \ell^2 & \ell m \\ -\ell m & -m^2 & \ell m & m^2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

სადაც

$$l = \cos \theta = \frac{x_j - x_i}{L}; \quad m = \sin \theta = \frac{y_j - y_i}{L} \quad (2.19)$$

ზოგადი ორიენტაციის ღეროვანი ელემენტისათვის ძაბვა გამოითვლება ფორმულით [1]:

$$\sigma = E\varepsilon = E \cdot B \cdot \begin{Bmatrix} u_i^{ლობ} \\ u_j^{ლობ} \end{Bmatrix} = E \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \times$$

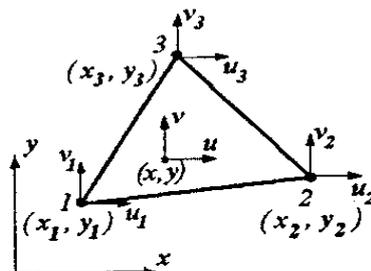
$$\times \begin{Bmatrix} 1 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & m \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i^{გლობ} \\ v_i^{გლობ} \\ u_j^{გლობ} \\ v_j^{გლობ} \end{Bmatrix}$$

ახ

$$\sigma = \frac{E}{L} \begin{bmatrix} -\ell & -m & \ell & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

### 3.4. წრფივი სამკუთხა ბრტყელი ელემენტი

ელემენტის სქემა მოცემულია ნახაზ 3.3-ზე. მას გააჩნია სამი კვანძი, რომელიც დანომრილია საათის ისრის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ. თითოეულ კვანძს გააჩნია ორი თავისუფლების ხარისხი ე.ი. შეიძლება გვექონდეს გადაადგილება  $x$  და  $y$  ღერძების გასწვრივ. ჩავთვალოთ, რომ ელემენტის ნებისმიერ შიგა წერტილში  $u, v$  გადაადგილება წარმოადგენს წრფივ ფუნქციას  $x$  და  $y$  კოორდინატების მიმართ [1]:



ნახ. №3.3

$$\begin{aligned} u &= b_1 + b_2x + b_3y; \\ v &= b_4 + b_5x + b_6y \end{aligned} \quad (3.16)$$

სადაც  $b_i, i=1,2,3,4,5,6$  მუდმივებია (3.16)-დან და

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix} \quad \text{ანუ} \quad \{\varepsilon\} = [D]\{U\}$$

გათვალისწინებით შეიძლება მივიღოთ დეფორმაციისათვის შემდეგი გამოსახულება:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = b_2, & \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_6 \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = b_3 + b_5 \end{cases} \quad (3.17)$$

(3.17)-დან გამომდინარეობს, რომ აქ დეფორმაცია არაა დამოკიდებული წერტილის კოორდინატზე, ე.ი. ის ელემენტის ფარგლებში მუდმივია. აქედან გამომდინარე ასეთ წრფივ სამკუთხა ელემენტს ეძახიან „ელემენტი მუდმივი დეფორმაციით“.

აღსანიშნავია, რომ თვითონ კვანძების გადაადგილებაც ასევე უნდა აღიწეროს (3.16) განტოლებით. ამასთან  $x$  და  $y$ -ის ნაცვლად უნდა ჩაისვას კვანძის შესაბამისი  $(x_i, y_j)$  კოორდინატი. მივიღებთ ექვსუცნობიან, ექვს წრფივ განტოლებათა სისტემას, საიდანაც განისაზღვრება უცნობი ექვსი  $b$  კოეფიციენტები [1].

$$\begin{cases} u_1 = b_1 + b_2x_1 + b_3y_1; \\ u_2 = b_1 + b_2x_2 + b_3y_2; \\ u_3 = b_1 + b_2x_3 + b_3y_3; \\ v_1 = b_4 + b_5x_1 + b_6y_1; \\ v_2 = b_4 + b_5x_2 + b_6y_2; \\ v_3 = b_4 + b_5x_3 + b_6y_3 \end{cases}$$

მოცემულ განტოლებათა სისტემის ამოხსნით მივიღებთ  $b_1, b_2, \dots, b_6$  გამოსახულებებს. საბოლოოდ ელემენტის შიგნით წერტილის გადაადგილებისათვის გვექნება:

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{u}_3 \\ \mathbf{v}_3 \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

სადაც  $N_i$  ფორმის ფუნქციებია, რომლებიც წრფივებია  $x$  და  $y$ -ის მიმართ:

$$\begin{cases} N_1 = \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y]; \\ N_2 = \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y]; \\ N_3 = \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \end{cases} \quad (3.19)$$

$$A = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

სადაც  $A$  სამკუთხა ელემენტის ფართობია გამოვიყენოთ (3.18), (3.19) და

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y \end{bmatrix} \text{ მივიღებთ:}$$

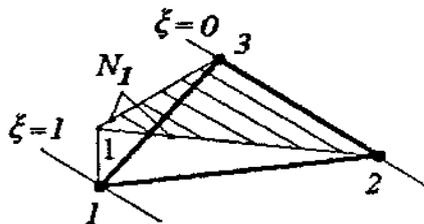
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \{d\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{u}_3 \\ \mathbf{v}_3 \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\text{სადაც } x_{ij} = x_i - x_j, \quad y_{ij} = y_i - y_j \quad (i,j=1,2,3).$$

(3.21)-დან გამომდინარეობს რომ ელემენტის ნებისმიერი შიგა წერტილისათვის, დეფორმაცია მუდმივია, რაზედაც ზევით ავლნიშნეთ. აქედან გამომდინარე ელემენტის შიგა წერტილებში მუდმივი იქნება ძაბვაც. თუ გავითვალისწინებთ სამკუთხა ელემენტის ამ თვისებას, სასურველია შეიზღუდოს ასეთი ელემენტის გამოყენება იმ არეზე სადაც არაა ძაბვის დიდი გრადიენტი, ე.ი ძაბვის კონცენტრატორებიდან შორს. ასეთი ელემენტი შეიძლება გამოვიყენოთ, როგორც წინასწარი შეფასებითი ანგარიშის დროს [1].

(3.15) საფუძველზე მივიღებთ სამკუთხა ელემენტისათვის, სიხისტის მატრიცას რომლის გვერდებიც წრფის მონაკვეთებია.

$$[k] = \int_V [B]^T [E] [B] dv = tA ([B]^T [E] [B]) \quad (3.22)$$



ნახ. №3.4

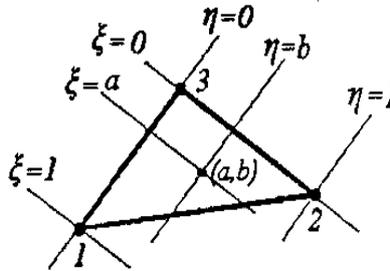
სადაც  $t$  ელემენტის სისქეა,  $[k]$  სიმეტრიული მატრიცა განზომილებით  $(6 \times 6)$ . (3.19)-დან ჩანს, რომ ბრტყელი სამკუთხა ელემენტისათვის გლობალურ კოორდინატთა სისტემაში ფორმის ფუნქციები  $N_i$  წარმოადგენს საკმაოდ რთულ გამოსახულებებს. ეს გამოსახულებები საგრძნობლად შეიძლება გამარტივდეს თუ შემოვიტანთ ლოკალურ კოორდინატთა  $\xi, \eta$  სისტემას, რომელიც მოცემულია ნახაზ 3.4-ზე [1].

მაშინ ფორმის ფუნქციები შეიძლება ჩაწერილი იყოს საგრძნობლად გამარტივებული სახით:

$$N_1 = \xi, N_2 = \eta, N_3 = 1 - \xi - \eta \quad (3.23)$$

ამასთან

$$N_1 + N_2 + N_3 = 1 \quad (3.24)$$



ნახ. №3.5

აღვნიშნოთ, რომ ფორმის ფუნქციები (3.23) სამკუთხა ელემენტის გვერდების გასწვრივ ისეთივეა, როგორც ერთგანზომილებიანი დრეკადი ელემენტის შემთხვევაში:  $N_i=1$ ,  $i$  კვანძში,  $N_i=0$  ნებისმიერი სხვა კვანძისათვის და იცლება წრფივად

ელემენტის გვერდების გასწვრივ.  $N_1$  ფორმის ფუნქციის ცვლილება მოცემულია ნახაზ 3.5-ზე.  $N_2$  და  $N_3$  ფორმის ფუნქციების ყოფაქცევაც ანალოგიურია.

ბრტყელი სამკუთხა ელემენტის შემთხვევაში კავშირი  $(x,y)$  გლობალურ და  $(\xi,\eta)$  ლოკალურ კოორდინატთა სისტემებს შორის მოიცემა შემდეგი განტოლებებით [1]:

$$\begin{aligned} x &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 \\ y &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 \end{aligned} \quad (3.25)$$

ან

$$\begin{aligned} x &= x_{13} \xi + x_{23} \eta + x_3 \\ y &= y_{13} \xi + y_{23} \eta + y_3 \end{aligned} \quad (3.26)$$

სადაც:  $x_{ij} = x_i - x_j$ ;  $y_{ij} = y_i - y_j$  ( $i,j=1,2,3$ )

$U$  და  $v$  გადაადგილება შეიძლება აღიწეროს როგორც  $(x, y)$  გლობალური კოორდინატების ფუნქცია, ან ლოკალური  $(\xi,\eta)$  კოორდინატების ფუნქცია. ცნობილია, რომ გლობალურ და ლოკალურ

კოორდინატებში წარმოებულების გარდაქმნა შეიძლება შესრულდეს იაკობიანის საშუალებით.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

სადაც  $[J]$  იაკობის მატრიცაა.

(3.26)-დან უშუალო დიფერენციალებით გვექნება:

$$[J] = \begin{bmatrix} x_{13} & y_{13} \\ x_{23} & y_{23} \end{bmatrix}; \quad [J]^{-1} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & -y_{13} \\ -x_{23} & x_{13} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

სადაც  $2A = \det [J] = x_{13}y_{23} - x_{23}y_{13}$  ( $A$  სამკუთხა ელემენტების ფართობია).

(3.27), (3.28), (3.18) და (3.23) – ით მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} &= \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & -y_{13} \\ -x_{23} & x_{13} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \\ &= \frac{1}{2A} \begin{Bmatrix} y_{23} & -y_{13} \\ -x_{23} & x_{13} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 & -u_3 \\ u_2 & -u_3 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.29)$$

ანალოგიურად

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & -y_{13} \\ -x_{23} & x_{13} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 & -v_3 \\ v_2 & -v_3 \end{Bmatrix} \quad (3.30)$$

(3.29), (3.30) და (3.14)-ის გამოყენებით მივიღებთ  $[B]$  მატრიცას:

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_3 & y_{31} & x_1 & y_{12} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

როგორც ჩანს, იგი სავსებით ემთხვევა (3.21) გამოსახულებაში მოცემულ  $[B]$  მატრიცას.

### 3.5 სასრულ ელემენტთა პრაქტიკული რეალიზების ძირითადი ეტაპები.

სასრულ ელემენტთა მეთოდით ნაგებობის გაანგარიშება სრულდება შემდეგი თანმიმდევრობით.

1. ნაგებობის იდეალიზაცია ანუ დისკრეტიზაცია. ამ დროს ხდება ნაგებობის საანგარიშო მოდელის შედგენა, ანუ კონტინუალური სისტემის დაყოფა მარტივ სასრულ ელემენტებად (ღეროები, სამკუთხედები, ოთხკუთხედები). აღნიშნული მარტივი (სასრული) ელემენტებით სივრცეში ხდება ნაგებობის გეომეტრიული სქემის აღწერა. ცალკეული სასრული ელემენტები აღიწერება ლოკალურ კოორდინატთა (უშუალოდ ცალკეულ ელემენტზე მიბმული) სისტემაში, ხოლო მთლიანი ნაგებობის საანგარიშო სქემა აღიწერება გლობალურ კოორდინატთა სისტემაში.
2. სასაზღვრო პირობების დადგენა. საანგარიშო სქემაზე ხდება ჩამაგრების ადგილების მონიშვნა და ჩამაგრების ტიპების (სამი წრფივი გადაადგილება და სამი მობრუნება) შეზღუდვა. სასრულ ელემენტთა შეერთების კვანძები, ზოგადად ერთმანეთთან დაკავშირებულია ხისტად, თუმცა სივრცეში მას შეუძლია როგორც წრფივი ისე მობრუნებითი მოძრაობა ნებისმიერი მიმართულებით. საჭიროების შემთხვევაში ამ გადაადგილებებიდან და მობრუნებებიდან შესაძლებელია ნებისმიერის შეზღუდვა.
3. ამოცანის ფიზიკური მხარის დადგენა. ფიზიკური მოდელის აგება გულისხმობს კონსტრუქციის თვისებების იდეალიზაციას (აპრომაქსიმაციას). ესა თუ ის კონსტრუქცია შესაძლებელია შესრულებული იყოს სხვადასხვა მასალისაგან (რკინაბეტონი, ლითონი, ხე, მასალის ანიზოტროპიულობა და ა.შ.). ამ მასალებს სხვადასხვა თვისება ახასიათებთ, ამიტომ საჭიროა ამ თვისებების



იდეალიზაცია, რაც სრულდება დრეკადობის მოდულის საშუალებით.

4. საანგარიშო მოდელზე დატვირთვების მოდება. ნაგებობაზე მოქმედებს ძირითადად გარე დატვირთვები, რომლებიც შესაძლებელია იყოს სხვადასხვა (კონსტრუქციის საკუთარი წონა, წერტილში შეყურსული და ელემენტზე განაწილებლი სტატიკური დატვირთვა, დინამიური დატვირთვა, სეისმიური დატვირთვა, ტემპერატურა და ა.შ.)
5. მიღებული საანგარიშო მოდელის გაანგარიშება. გაანგარიშების შედეგად ვღებულობთ საკვლევ ნაგებობის დამატებით დეფორმირებულ მდგომარეობას.

### 3.6. სეისმიურ ზემოქმედებაზე გაანგარიშების საკითხები

შენობა-ნაგებობების სეისმომდეგობის უზრუნველყოფას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ადამიანთა სიცოცხლისა და მატერიალურ-კულტურული მემკვიდრეობის შესანარჩუნებლად. ამის მაგალითი უკანასკნელ პერიოდში ინდონეზიაში, იაპონიაში, სომხეთში და თურქეთში მომხდარი მიწისძვრებია, რომელთა ზემოქმედებით მიღებული დამანგრეველი შედეგები განუზომელია.

სეისმომდეგი მშენებლობის უზრუნველყოფა მნიშვნელოვანია ჩვენი რეგიონისთვის, რომელიც სეისმურად აქტიურ ზონაში მდებარეობს. საქართველოს ტერიტორიის უმეტესი ნაწილი 8 ბალიან ზონაშია, დანარჩენი კი 7 და 9 ბალიანი ზონებია.

ამდენად მნიშვნელოვანია ნაშრომში წარმოდგენილი საანგარიშო მოდელის სეისმიურ ზემოქმედებაზე გაანგარიშების საკითხების შესწავლა მისი შემდგომი უსაფრთხო ექსპლოატაციის მიზნით.

### 3.7. თავისუფალი რხევის განტოლებები

კარკასული ნაგებობების თავისუფალი რხევა შესაძლებელია დავახასიათოთ მასების დამოუკიდებელი გადაადგილებით  $Z_i$  :

( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) . ეს გადაადგილებები შეადგენს ვექტორს [44], [46];, [47], [50]:

$$\vec{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ \dots \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n \end{bmatrix}$$

(3.1)

თუ მას დავშლით ელემენტებად  $X, Y$  და  $Z$  მიმართულებით, გვექნება

$$\vec{Z}^X = \begin{bmatrix} Z_1^X \\ \dots \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n^X \end{bmatrix} \quad \vec{Z}^Y = \begin{bmatrix} Z_1^Y \\ \dots \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n^Y \end{bmatrix} \quad \vec{Z}^Z = \begin{bmatrix} Z_1^Z \\ \dots \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n^Z \end{bmatrix}$$

(3.2)

ეს გადაადგილება შესაძლებელია წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით

$$\left. \begin{aligned} \vec{Z}^X &= L^{XX} \vec{I}^X + L^{XY} \vec{I}^Y + L^{XZ} \vec{I}^Z \\ \vec{Z}^Y &= L^{YX} \vec{I}^X + L^{YY} \vec{I}^Y + L^{YZ} \vec{I}^Z \\ \vec{Z}^Z &= L^{ZX} \vec{I}^X + L^{ZY} \vec{I}^Y + L^{ZZ} \vec{I}^Z \end{aligned} \right\}$$

(3.3)

სადაც  $L^{XX}, L^{YY}, \dots, L^{ZZ}$  სისტემის დამყოლობის მატრიცაა, რომელსაც ზოგადად აქვს სახე

$$L = \begin{vmatrix} \delta_{11}, \dots, \delta_{1n} \\ \dots \\ \dots \\ \delta_n \dots \delta_{nn} \end{vmatrix}$$

(3.4)

სადაც,  $\delta_{11}, \dots, \delta_{nn}$  - ერთეულოვანი გადაადგილებების გავლენის კოეფიციენტია;

$\bar{I}^x, \bar{I}^y, \bar{I}^z$  - ინერციის ძალებია შეყურსული ძალების სახით თავისუფალი რხევის დროს. ინერციის ძალები შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}^x &= \begin{bmatrix} I_1^x \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n^x \end{bmatrix} = -M\ddot{Z}^x \\ \bar{I}^y &= \begin{bmatrix} I_1^y \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n^y \end{bmatrix} = -M\ddot{Z}^y \\ \bar{I}^z &= \begin{bmatrix} I_1^z \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n^z \end{bmatrix} = -M\ddot{Z}^z \end{aligned} \right\}$$

(3.5)

(3.5) გამოსახულებაში M მასათა დიაგონალური მატრიცაა

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & \\ & \cdot & & \\ & & \cdot & \\ & & & \cdot \\ & & & & m_n \end{bmatrix}$$

(3.6)

(3.6) გამოსახულების (3.3) გამოსახულებაში ჩასმის შემდეგ მივიღებთ

$$\left. \begin{aligned} L^{xx} M \ddot{Z}^x + L^{xy} M \ddot{Z}^y + L^{xz} M \ddot{Z}^z + Z^x &= 0 \\ L^{yx} M \cdot \ddot{Z}^x + L^{yy} M \cdot \ddot{Z}^y + L^{yz} M \cdot \ddot{Z}^z + \bar{Z}^y &= 0 \\ L^{zx} M \cdot \ddot{Z}^x + L^{zy} M \cdot \ddot{Z}^y + L^{zz} M \cdot \ddot{Z}^z + \bar{Z}^z &= 0 \end{aligned} \right\}$$

(3.7)

(3.7) განტოლება წარმოადგენს მეორე რიგის დიფერენციალურ ერთგვაროვან განტოლებათა სისტემას, რომელიც იძლევა საშუალებას შევადგინოთ განტოლებები საანგარიშო ნაგებობის დისკრეტიზაციის შედეგად მიღებული ელემენტების (როგორც ღეროვანი, ისე ფილოვანი ელემენტების) შეერთების კვანძებში. სულ ასეთი განტოლებათა სისტემა გვექნება  $3 \cdot n$ , სადაც  $n$  საკვანძო წერტილთა რაოდენობაა.

(3.7)-ის კერძო ამონახსნები შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$\left. \begin{aligned} \bar{Z}^x &= \begin{bmatrix} Z_1^x \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n^x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1k}^x \\ \cdot \\ \cdot \\ A_{nk}^x \end{bmatrix} \times \sin(\omega_k t + \lambda_k) = \bar{A}_k^x \cdot \sin(\omega_k t + \lambda_k) \\ \bar{Z}^y &= \begin{bmatrix} Z_1^y \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_n^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1k}^y \\ \cdot \\ \cdot \\ A_{nk}^y \end{bmatrix} \times \sin(\omega_k t + \lambda_k) = \bar{A}_k^y \cdot \sin(\omega_k t + \lambda_k) \\ \bar{Z}^z &= \begin{bmatrix} I_1^z \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1k}^z \\ \cdot \\ \cdot \\ A_{nk}^z \end{bmatrix} \times \sin(\omega_k t + \lambda_k) = \bar{A}_k^z \cdot \sin(\omega_k t + \lambda_k) \end{aligned} \right\}$$

(3.8)

(3.7) გამოსახულება (3.8) გამოსახულებაში ჩასმით მივიღებთ შემდეგ ერთგვაროვან ალგებრულ განტოლებებს

$$\left. \begin{aligned} L^{XX} M \cdot \bar{A}_k^X + L^{XY} M \cdot \bar{A}_k^Y + L^{XZ} M \cdot \bar{A}_k^Z &= \left(\frac{1}{\omega_k^2}\right) \cdot A_k^X \\ L^{YX} M \cdot \bar{A}_k^X + L^{YY} M \cdot \bar{A}_k^Y + L^{YZ} M \cdot \bar{A}_k^Z &= \left(\frac{1}{\omega_k^2}\right) \cdot A_k^Y \\ L^{ZX} M \cdot \bar{A}_k^X + L^{ZY} M \cdot \bar{A}_k^Y + L^{ZZ} M \cdot \bar{A}_k^Z &= \left(\frac{1}{\omega_k^2}\right) \cdot A_k^Z \end{aligned} \right\}$$

(3.9)

(3.9) გამოსახულებით შეიძლება შევადგინოთ ყველა საკვანძო

წერტილების დინამიკური სქემის საანგარიშო განტოლება

$$\left. \begin{aligned} (m_1 \delta_{11}^{XX} - \frac{1}{\omega_k^2}) A_1^X + \dots + m_n \delta_{1n}^{XX} A_n^X + m_1 \delta_{11}^{Xy} A_1^{Xy} + \dots + m_n \delta_{1n}^{Xy} A_n^y + \\ + m_1 \delta_{11}^{Xy} A_1^y + \dots + m_n \delta_{1n}^{Xy} A_n^y = 0 \\ \dots \\ \dots \\ m_1 \delta_{n1}^{XX} A_1^X + \dots + (m_n \delta_{nn}^{XX} - \frac{1}{\omega_k^2}) A_n^X + m_1 \delta_{n1}^{XY} A_1^y + \dots + m_n \delta_{kn}^{XY} A_n^y + \\ + m_1 \delta_{n1}^{Xy} A_1^z + \dots + m_n \delta_{kn}^{Xy} A_n^y = 0 \\ m_1 \delta_{11}^{yX} A_1^X + \dots + m_n \delta_{1n}^{yX} A_n^X + (m_1 \delta_{11}^{yy} - \frac{1}{\omega_k^2}) A_1^y + \dots + m_n \delta_{1n}^{yy} A_n^y + m_1 \delta_{11}^{yZ} A_1^Z + \\ + \dots + m_n \delta_{1n}^{yZ} A_n^Z = 0 \\ \dots \\ \dots \\ m_1 \delta_{n1}^{yX} A_1^X + \dots + m_n \delta_{kn}^y A_n^X + m_1 \delta_{n1}^{yy} A_1^y + \dots + (m_n \delta_{nn}^{yy} - \frac{1}{\omega_k^2}) A_n^y + m_1 \delta_{n1}^{yZ} A_1^Z + \\ + \dots + m_n \delta_{nn}^{yZ} A_n^Z = 0 \\ m_1 \delta_{11}^{ZX} A_1^X + \dots + m_n \delta_{1n}^{ZX} A_n^X + m_1 \delta_{11}^{Zy} A_1^y + \dots + m_n \delta_{1n}^Z A_n^y + (m_1 \delta_{11}^{ZZ} - \frac{1}{\omega_k^2}) A_1^Z + \\ + \dots + m_n \delta_{1n}^Z A_n^Z = 0 \\ \dots \\ \dots \\ m_1 \delta_{n1}^{ZX} A_1^X + \dots + m_n \delta_{nn}^{ZX} A_n^X + \dots + m_n \delta_{nn}^{ZX} A_n^X + m_1 \delta_{n1}^{Zy} A_1^y + \dots + m_n \delta_{nn}^{Zy} A_n^y + \\ + m_1 \delta_{n1}^{ZZ} A_1^Z + \dots + (m_n \delta_{nn}^{ZZ} - \frac{1}{\omega_k^2}) A_n^Z = 0 \end{aligned} \right\}$$

(3.10)

მოკლე ჩანაწერი იქნება

$$\left. \begin{aligned} (C^{XX} - \lambda_k E) \cdot A_k^X + C^{Xy} A_k^y \lambda_k + C^{XZ} A_k^z \lambda_k &= 0 \\ C^{yX} A_k^X \lambda_k + (C^{yy} - \lambda_k E) A_k^z + C^{yz} A_k^Z \lambda_k &= 0 \\ C^{zX} A_k^X \lambda_k + C^{Zy} A_k^y \lambda_k + (C^{ZZ} - \lambda_k E) A_k^Z &= 0 \end{aligned} \right\}$$

(3.11)

სადაც ბლოკი

$$C^{XX} = L^{XX} \cdot M, \quad C^{XZ} = L^{Xy} \cdot M, \dots, \quad C^{ZZ} = L^{ZZ} \cdot M,$$

საერთო სახით გვექნება

$$C = L \cdot M = \begin{bmatrix} \delta_{11} m_1 \dots \delta_{1n} m_n \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \delta_{1n} m_1 \dots \delta_{nn} m_n \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

E - ერთეულოვანი დიაგონალური მატრიცაა.

მიღებული (3.10) განტოლებათა სისტემით ამოიხსნება ამპლიტუდა

$$A_1^X = \dots = A_n^X = A_1^y = \dots = A_n^y = A_1^Z = \dots = A_n^Z = 0,$$

რომელიც შეესაბამება მშვიდ მდგომარეობას.

იმისათვის, რომ სისტემას (3.11) ნულისაგან განსხვავებული ამონახსნი ჰქონდეს, მისი დეტერმინანტი ნულის ტოლი უნდა იყოს

$$\left. \begin{aligned} Det[(C^{XX} - \lambda_k E) \cdot C^{Xy} \cdot \lambda_k \cdot C^{XZ} \lambda_k] &= 0 \\ Det[C^{yX} \lambda_k \cdot (C^{yy} - \lambda_k \cdot E) \cdot C^{yz} \cdot \lambda_k] &= 0 \\ Det[C^{zX} \cdot \lambda_k \cdot C^{Zy} \cdot \lambda_k \cdot (C^{ZZ} - \lambda_k E)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

ან შებრუნებული სახით

$$\begin{array}{l}
m_1 \delta_{11}^{XX} - \lambda_k \dots m_n \delta_{1n}^{XX} \quad m_1 \delta_{11}^{Xy} \dots m_n \delta_{1n}^{Xy} \quad m_1 \delta_{11}^{XZ} \dots m_n \delta_{1n}^{XZ} \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
m_1 \delta_{n1}^{XX} \dots m_n \delta_{nn}^{XX} - \lambda_k \quad m_1 \delta_{n1}^{Xy} \dots m_n \delta_{nn}^{Xy} \quad m_1 \delta_{n1}^{XZ} \dots m_n \delta_{nn}^{XZ} \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
m_1 \delta_{11}^{yX} \dots m_n \delta_{1n}^{yX} \quad m_1 \delta_{11}^{yy} - \lambda_k \dots m_n \delta_{1n}^{yy} \quad m_1 \delta_{11}^{yZ} \dots m_n \delta_{1n}^{yZ} \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
m_1 \delta_{n1}^{yX} \dots m_n \delta_{nn}^{yX} \quad m_1 \delta_{n1}^{yy} \dots m_n \delta_{nn}^{yy} - \lambda_k \quad m_1 \delta_{n1}^{yZ} \dots m_n \delta_{nn}^{yZ} \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
m_1 \delta_{11}^{yX} \dots m_n \delta_{1n}^{yX} \quad m_1 \delta_{11}^{Zy} \dots m_n \delta_{1n}^{Zy} \quad m_1 \delta_{11}^{ZZ} - \lambda_k \dots m_n \delta_{1n}^{ZZ} \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
\dots\dots\dots \\
m_1 \delta_{n1}^{ZX} \dots m_n \delta_{nn}^{ZX} \quad m_1 \delta_{n1}^{Zy} \dots m_n \delta_{nn}^{Zy} \quad m_1 \delta_{n1}^{ZZ} \dots m_n \delta_{nn}^{ZZ} - \lambda_k
\end{array} = 0 \tag{3.14}$$

(3.7) განტოლება წარმოადგენს საუკუნის განტოლებას. (3.5) და (3.7) განტოლებები გვაძლევს სიხშირის საკუთარი რხევის მნიშვნელობებს და მათ შესაბამის ამპლიტუდებს  $A_i^X$ ,  $A_i^y$  და  $A_i^Z$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ).

ნებისმიერი k-თვის სრული ამპლიტუდის საკუთარი რხევის მნიშვნელობას ექნება შემდეგი სახე

$$A_{mk} = \sqrt{(A_{mk}^X)^2 + (A_{mk}^y)^2 + (A_{mk}^Z)^2}$$

სიმეტრიული ამოცანების ამოხსნისათვის დინამიკური მახასიათებელი მნიშვნელოვნად მარტივდება. ამ შემთხვევაში შეიძლება განვიხილოთ მხოლოდ სიმეტრიული საანგარიშო სქემის მხოლოდ ერთი მხარე, სადაც განლაგებულია დინამიკური საანგარიშო სქემის კვანძის წერტილების ნახევარი.

ინერციის ძალები შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ჯგუფური ძალების ერთობლიობა - სიმეტრიული და უკუსიმეტრიული ძალები. თუ ვისარგებლებთ ჯგუფური გადაადგილების განმარტებით, საუკუნის

განტოლება შეიძლება შევადგინოთ ორი სხვადასხვა მატრიცის სახით. პირველი განტოლება, სადაც ფიგურირებს სიმეტრიული ჯგუფური გადაადგილება - შესაძლებელია განვსაზღვროთ დინამიკური მახასიათებელი სიმეტრიული რხევის ფორმებისათვის. მეორე განტოლებისათვის, სადაც ჩართულია უკუსიმეტრიული კოეფიციენტები, შეიძლება განვსაზღვროთ დინამიკური მახასიათებელი, უკუსიმეტრიული რხევის ფორმებისათვის.

### 3.8. იძულებითი რხევის დიფერენციალური განტოლებები სეისმური ზემოქმედებისას

სამშენებლო კონსტრუქციის რხევა სეისმური ზემოქმედებისას განიხილება როგორც ერთდროული იძულებითი და საკუთარი რხევის ზემოქმედება. [47], [48]:

დავუშვათ, რომ სეისმური რხევითი გადაადგილება ნაგებობის ფუძის ყველა წერტილში, რომელიც მიიღება ნებისმიერი კანონით  $U(t)$ , წარმოდგენილია ერთ ფაზაში. ეს დაშვება ნიშნავს, რომ სეისმური ზემოქმედება ნაგებობას აიძულებს შეასრულოს ნებისმიერი გადატანითი რხევითი მოძრაობა სივრცეში, რომელიც მიმდინარეობს რთული თავისუფალი რხევის სახით წონასწორობის მდგომარეობის მიმართ.

დავაგეგმილოთ საანგარიშო სქემის კვანძური წერტილების გადაადგილება  $U=U(t)$  (სეისმური ზემოქმედებისას) საკოორდინატო სისტემის XYZ ღერძების გასწვრივ. გადაადგილების მდგენელებს ექნება შემდეგი სახე

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U \sin \psi \sin \gamma; \\ U_y &= U \sin \psi \cos \gamma; \\ U_z &= U \cos \psi \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

$\psi, \gamma$  - დახრის კუთხეებია;



ვინაიდან სეისმური ზემოქმედება ხდება დროის ძალიან მოკლე მონაკვეთში, გადაადგილება განიხილება როგორც თავისუფალი და იძულებითი რხევის ჯამური მოქმედება. სრული გადაადგილებისას განტოლებას ნებისმიერი საკვანძო  $i$  წერტილში ექნება შემდეგი სახე:

$$\left. \begin{aligned} V_i^X &= Z_i^X + U_x \cos(R_i, X) + U_y \cos(R_i, y) + U_z \cos(R_i, Z); \\ V_i^y &= Z_i^y + U_x \cos(T_i^x, X) + U_y \cos(T_i^x, y) + U_z \cos(T_i^x, Z); \\ V_i^Z &= Z_i^Z + U_x \cos(T_i^y, X) + U_y \cos(T_i^y, y) + U_z \cos(T_i^y, Z). \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

სადაც  $Z_i^X, Z_i^y, Z_i^Z$  - საანგარიშო სქემის  $i$  წერტილში გადაადგილებათა დრეკადი მდგენელებია.

შეყურსული ინერციის ძალების მდგენელები  $i$  წერტილში, საკოორდინატო სისტემის ღერძების მიმართ იქნება:

$$\left. \begin{aligned} I_i^X &= -M_i \frac{d^2 V_i^X}{dt^2} = -M_i \frac{d^2}{dt^2} [Z_i^X + U_x \cos(R_i, X) + U_y \cos(R_i, y) + U_z \cos(R_i, Z)]; \\ I_i^y &= -M_i \frac{d^2 V_i^y}{dt^2} = -M_i \frac{d^2}{dt^2} [Z_i^y + U_x \cos(T_i^x, X) + U_y \cos(T_i^x, y) + U_z \cos(T_i^x, Z)]; \\ I_i^Z &= -M_j \frac{d^2 V_i^Z}{dt^2} = -M_i \frac{d^2}{dt^2} [Z_i^Z + U_x \cos(T_i^y, X) + U_y \cos(T_i^y, y) + U_z \cos(T_i^y, Z)] \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

(3.14) ჩავსვათ (3.16)-ში, მივიღებთ

$$\left. \begin{aligned} I_i^X &= -M_i \frac{d^2 V_i^X}{dt^2} = -M_i \frac{d^2}{dt^2} [Z_i^X + U \sin \psi \sin \gamma \cos(R, X) + U \sin \psi \cos \gamma \cos(R, y) + \\ &+ U \cos \psi \cos(R, Z)]; \\ I_i^y &= -M_i \frac{d^2 V_i^y}{dt^2} = -M_i \frac{d^2}{dt^2} [Z_i^y + U \sin \psi \sin \gamma \cos(T^x, X) + U \sin \psi \cos \gamma \cos(T^x, y) + \\ &+ U \cos \psi \cos(T^x, Z)]; \\ I_i^Z &= -M_j \frac{d^2 V_i^Z}{dt^2} = -M_i \frac{d^2}{dt^2} [Z_i^Z + U \sin \psi \sin \gamma \cos(T^y, X) + U \sin \psi \cos \gamma \cos(T^y, y) + \\ &+ U \cos \psi \cos(T^y, Z)] \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

მაშინ იძულებითი რხევის განტოლებას ექნება შემდეგი სახე:

$$\left. \begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{XX} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^X + UG_1(R_i)) + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{Xy} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^y + UG_1(T)) + \\
& + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{XZ} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^Z + UG_1(T^y)) + Z_m^X = 0; \\
& \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{yX} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^X + UG_1(R_i)) + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{zy} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^y + UG_1(T^x)) + \\
& + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{ZZ} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^Z + UG_1(T^y)) + Z_m^y = 0 \\
& \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{ZX} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^X + UG_1(R_i)) + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{Zy} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^y + UG_1(T^x)) + \\
& + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{ZZ} M_i \frac{d^2}{dt^2} (Z_i^Z + UG_1(T^y)) + Z_m^Z = 0
\end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

სადაც მიღებულია მნიშვნელობები:

$$G_1(R_i) = U \sin \psi \sin \gamma \cos(R_i, X) + U \sin \psi \cos \gamma \cos(R_i, y) + U \sin \psi \cos(R_i, Z);$$

$$G_1(T_i^x) = U \sin \psi \sin \gamma \cos(T_i^x, X) + U \sin \psi \cos \gamma \cos(T_i^x, y) + U \sin \psi \cos(T_i^x, Z);$$

$$G_1(T_i^y) = U \sin \psi \sin \gamma \cos(T_i^y, X) + U \sin \psi \cos \gamma \cos(T_i^y, y) + U \sin \psi \cos(T_i^y, Z);$$

(3.18) განტოლებას ექნება საბოლოო სახე:

$$\left. \begin{aligned}
& \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{XX} M_i \frac{d^2 Z_i^X}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{Xy} M_i \frac{d^2 Z_i^y}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{XZ} M_i \frac{d^2 Z_i^Z}{dt^2} + Z_m^X =; \\
& = - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{XX} M_i \ddot{U}G_1(R_i) - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{XZ} M_i \ddot{U}G_1(T_i^x) - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{XZ} M_i \ddot{U}G_1(T_i^x); \\
& \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{yX} M_i \frac{d^2 Z_i^X}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{zy} M_i \frac{d^2 Z_i^y}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{zZ} M_i \frac{d^2 Z_i^Z}{dt^2} + Z_m^y = \\
& = - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{yX} M_i \ddot{U}G_1(R_i) - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{yy} M_i \ddot{U}G_1(T_i^x) - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{yz} M_i \ddot{U}G_1(T_i^y); \\
& \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{ZX} M_i \frac{d^2 Z_i^X}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{Zy} M_i \frac{d^2 Z_i^y}{dt^2} + \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{ZZ} M_i \frac{d^2 Z_i^Z}{dt^2} + Z_m^Z =
\end{aligned} \right\}$$

$$= - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{yX} M_i \ddot{U}G_1(R_i) - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{zy} M_i \ddot{U}G_1(T_i^x) - \sum_{i=1}^n \delta_{mi}^{zz} M_i \ddot{U}G_1(T_i^y);$$

(3.19)

მიღებული განტოლება წარმოადგენს მეორე რიგის არაერთგვაროვან დიფერენციალურ განტოლებას. ამ გამოსახულებას თუ გამოვიყენებთ, შეიძლება შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა საანგარიშო სქემის ყველა საკვანძო წერტილებში. აქედან ჩანს, რომ ამ სისტემის განტოლებათა რაოდენობა იქნება  $3n$ , სადაც  $n$  - საანგარიშო ბადის საკვანძო წერტილების რიცხვია.

თუ გვექნება ამპლიტუდების მნიშვნელობები საკუთარი რხევის ფორმების მიხედვით  $A_{ik}^X$ ,  $A_{ik}^y$ ,  $A_{ik}^Z$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ), მაშინ კერძო ამონახსნი, რომელის შეესაბამება ნულოვან საწყის პირობებს, შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$\left. \begin{aligned} Z_i^X &= -\sum_{k=1}^{3n} Z_{ik}^X = -\sum_{k=1}^{3n} \eta_k^0 \beta_k^0 A_{ik}^X; \\ Z_i^y &= -\sum_{k=1}^{3n} Z_{ik}^y = -\sum_{k=1}^{3n} \eta_k^0 \beta_k^0 A_{ik}^y; \\ Z_i^Z &= -\sum_{k=1}^{3n} Z_{ik}^Z = -\sum_{k=1}^{3n} \eta_k^0 \beta_k^0 A_{ik}^Z; \end{aligned} \right\}$$

(3.20)

ამ გამოსახულებაში  $\eta_k^0$  - რხევის კოეფიციენტი, რომელსაც შემდეგი სახე აქვს

$$\eta_k^0 = \frac{\sum_{m=1}^n M_m \{A_{mk}^X G_1(R_m) + A_{mk}^y G_1(T_m^X) + A_{mk}^Z G_1(T_m^y)\}}{\sum_{m=1}^n M_m \{(A_{mk}^X)^2 + (A_{mk}^y)^2 + (A_{mk}^Z)^2\}}$$

(3.21)

$\beta_k^0$  - დინამიკურობის კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\beta_k^0 = \frac{1}{\omega_k} \int_0^t \ddot{U}(\tau) \sin \omega_k(t - \tau) d\tau$$

(3.22)

სადაც,  $\ddot{U}(t)$  - მიწისძვრით გამოწვეული გრუნტის აჩქარებაა;

$\tau$  დრო, აღინიშნება ცვლადი ინტეგრირება;

$t$  - ფიქსირებული დროის მომენტი გრუნტის გადაადგილებით ამპლიტუდების განსაზღვრისას.

(3.21) კერძო ამონახსნი მიღებულია საკუთარი რხევების ჩაქრობის გათვალისწინების გარეშე.

ჩაქრობის გათვალისწინებით (3.20) განტოლების ამოხსნისას შეიცვლება მხოლოდ  $\beta_k^0$  დინამიკურობის კოეფიციენტი. არსებობს რიგი ჰიპოტეზებისა ჩაქრობის რხევასთან დაკავშირებით. განვსაზღვროთ  $\beta_k^0$

გამოსახულების კოეფიციენტი ვისარგებლოთ ორი გავრცელებული კელვინ-ფოგტისა და სოროკინის ჰიპოტეზებით.

თუ კელვინ-ფოგტის ჰიპოტეზით ვისარგებლებთ, რომელიც გვთავაზობს, რომ საკუთარი რხევის ჩაქრობა პროპორციულია რხევის პირველი ხარისხის სიჩქარისა, მაშინ  $\beta_k^0$ -თვის გვექნება

$$\beta_k^0 = \frac{1}{\omega_k'} \int_0^t \ddot{U}(\tau) e^{-\varepsilon_k(t-\tau)} \sin \omega_k'(t-\tau) d\tau,$$

(3.23)

სადაც

$$\varepsilon_k = \frac{1}{2\pi} \omega_k' \delta_k;$$

$$\omega_k' = \frac{\omega_k}{\sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{2\pi}\right)^2}};$$

$\beta_k^0$  - თავისუფალი რხევის ჩაქრობის ლოგარითმული დეკრემენტი.

ვისარგებლოთ სოროკინის ჰიპოტეზით, რომლის მიხედვითაც ჩაქრობის ძალები დეფორმაციების პროპორციონალურია, მივიღებთ:

$$\beta_k^0 = \frac{1}{\omega_k'} \int_0^t \ddot{U}(\tau) e^{-\frac{\alpha}{2} \omega_k'(t-\tau)} \sin \omega_k'(t-\tau) d\tau,$$

(3.24)

სადაც,  $\alpha$  - ენერჯის გაბნევის პარამეტრია

$$\omega_k' = \frac{\omega_k}{\sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}};$$

### 3.9. სეისმური ინერციული ძალების განსაზღვრა სპექტრალური მეთოდით

თუ გავითვალისწინებთ, რომ საკუთარი რხევის ფორმები გარდაიქმნება ინერციულ ძალებად, თითოეული k-ს ფორმებისათვის ეს ინერჯის ძალები შეიძლება განვსაზღვროთ გამოსახულებით [47]. [49]

$$I_{ik} = A_{ik} M_i \omega_k^2$$

ესე იგი ინერციის ძალა მასის სიდიდისა და მათი გადახრის პროპორციულია. თუ ინერციის ძალებმა  $I_{ik}$  გამოიწვია თავისუფალი რხევის  $k$ -ს ფორმის გადაადგილებები  $A_{ik}$ , მაშინ გადაადგილება  $y_{ik}$  გამოიწვევს სხვა  $S_{ik}$  ძალებს, რომელიც  $I_{ik}$  ძალების მსგავსია

შესაბამისად

$$\frac{A_{ik}}{y_{ik}} = \frac{I_{ik}}{S_{ik}}$$

აქედან

$$S_{ik} = \frac{I_{ik}}{A_{ik}} \cdot y_{ik} = y_{ik} M_i \omega_k^2$$

ჩავსვათ  $y_{ik} = \eta_k^0 \beta_k^0 A_{ik}$ , მივიღებთ

$$S_{ik} = \eta_k^0 \beta_k^0 A_{ik} M_i \omega_k^2$$

(3.25)

(3.25) სეისმური ძალები  $S_{ik}$  წარმოადგენენ შესაკრებთა ჯამს. ჯამური მამრავლი  $\beta_k^0$  წარმოადგენს სიდიდეს, რომელიც იცვლება დროში და ამიტომ  $S_k$  განსაზღვრა, როგორც შესაკრებთა ჯამის, რთულია.

ამ ამოცანის ამოხსნისათვის ვისარგებლოთ სპექტრალური ანალიზის მეთოდით, რის თანახმადაც რხევები განლაგდება მთავარი ფორმის მიხედვით და განიხილება როგორც ურთიერთდამოუკიდებელი თითოეული ცალკეული ფორმებისათვის, ხოლო სეისმური ძალები განისაზღვრება არა როგორც დროის ფუნქცია, არამედ განისაზღვრება მათი მაქსიმალური მნიშვნელობა თითოეული  $i$ -ი რხევის ფორმისათვის. (3.25) თუ დავაგეგმილებთ საკოორდინატო სისტემის  $X, Y, Z$  ღერძების მიმართ და მივიღებთ სპექტრალური მეთოდის დაშვებებს, მივიღებთ

$$\left. \begin{aligned} S_{ik}^x &= \eta_k^x \beta_k^x A_{ik}^x M_i \omega_k^2 \\ S_{ik}^y &= \eta_k^y \beta_k^y A_{ik}^y M_i \omega_k^2 \\ S_{ik}^z &= \eta_k^z \beta_k^z A_{ik}^z M_i \omega_k^2 \end{aligned} \right\}$$

(3.26)

ამ გამოსახულებაში  $\beta_k^x, \beta_k^y, \beta_k^z$  - დინამიკურობის კოეფიციენტებია ვერტიკალური, განივი და გრძივი რხევებისათვის. ისინი აიღება მაქსიმალური მნიშვნელობით, რომელიც შეიძლება განვსაზღვროთ (3.23) და (3.24) განტოლებებიდან.

## თავი IV რიცხვითი გაანგარიშების შედეგები

### 4.1. კარკასული შენობების გაანგარიშების ანალიზი

არსებული გადახურვების კვლევების შედეგად, მოცემულ სამუშაოში მიზნად დავისახეთ ჩაგვეტარებინა შემდეგი სამი ტიპის გადახურვის გაანგარიშება

1. რიგელებში ხისტად ჩამაგრებული მონოლითური რკინაბეტონის გადახურვის ფილები,

2. ურიგელო (კონტურზე რიგელებით) მონოლითური რკინაბეტონის გადახურვის ფილები,

3. ურიგელო სიღრუეებიანი მონოლითური რკინაბეტონის გადახურვის ფილები

გაანგარიშებებისათვის პირობითად მიღებულია:

სამშენებლო მოედანის სეისმიურობა - 8 ბალი

ქარის ნორმატიულ დატვიტვა - 85 კგ/მ<sup>2</sup>,

თოვლის ნორმარტიული დატვიტვა - 50 კგ/მ<sup>2</sup>

გაანგარიშება შესრულებულია საანგარიშო კომპლექსით LIRASAPR-2011-ის, მიხედვით, რომელიც ეფუძნება სასრულ ელემენტთა მეთოდს გადაადგილებებში, და მათში გათვალისწინებულია შემდეგი ნორმატიული დოკუმენტები

СНиП 2,01,07-85\* - დატვიტვები და ზემოქმედებები

СНиП 2,03,01-84\* - ბეტონის და რკინაბეტონის კონსტრუქციები

СНиП II-7-81\* - მშენებლობა სეისმიურ რაიონებში და სამშენებლო ნორმები და წესები „სეისმომედეგი მშენებლობა“( პნ 01.01-09).;

СНиП II-23-81\* - ლითონის კონსტრუქციები

СНиП 2.02.01-83. შენობებისა და ნაგებობების ფუძეები

გადახურვის ფილები გაანგარიშებულია დატვიტვების შემდეგ თანწყობაზე;

მუდმივი დატვიტვა



1.1) - საკუთარი წონა: რკინაბეტონის კონსტრუქცია, გენერირდება ავტომატურად, მოცულობითი წონა 2,5 ტ/მ<sup>3</sup>, გადატვირთვის კოეფიციენტი  $\gamma_{\text{ფ}}=1.1$  (თანახმად СНиП 2.01.07-85\* პუნქტი 2,2).

ფენა	სისქე	მოცულობითი წონა	დატვირთვა ტ/მ <sup>2</sup>	გადატვირთვის კოეფიციენტი	საანგარიშ დატვირთვა
ბეტონის იატაკი	0.08	1,8 ტ/მ <sup>3</sup>	0,144	1,2	0.1728
იზოლაციის ფენა	-	-	0,01	1,2	0.012
იატაკი	0,02	0,8 ტ/მ <sup>3</sup>	0,016	1,2	0.0192
<b>ჯამი</b>					<b>0.204</b>

2) დროებითი ხანგრძლივი დატვირთვა:

2.1) ტიხრები, განაწილებული დატვირთვა - 0,1 ტ/მ<sup>2</sup>, გადატვირთვის კოეფიციენტით 1.2.

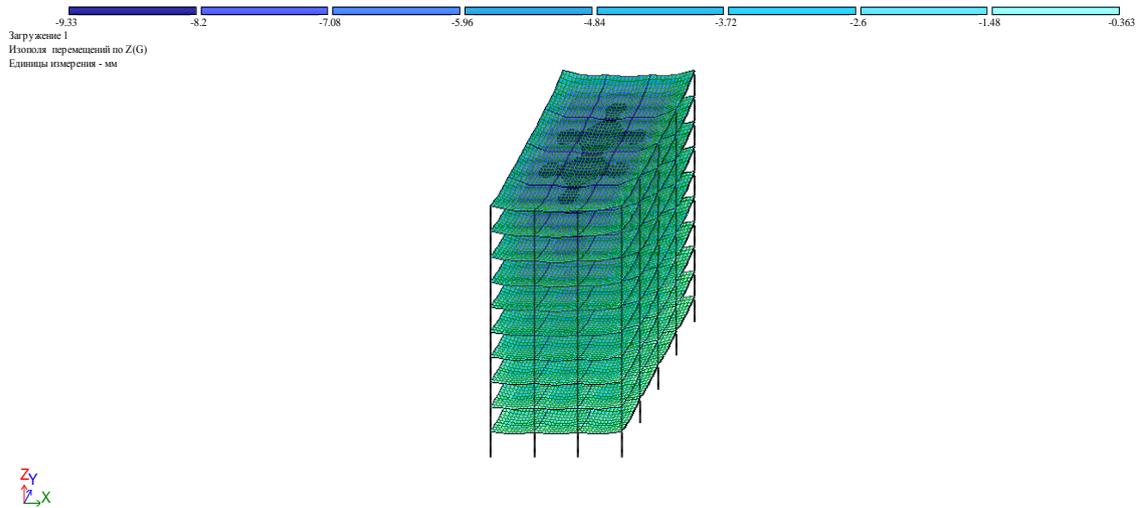
3) დროებითი ხანმოკლე დატვირთვა:

4) განაწილებული დატვირთვა - 0,2 ტ/მ<sup>2</sup>, გადატვირთვის კოეფიციენტით 1.2.

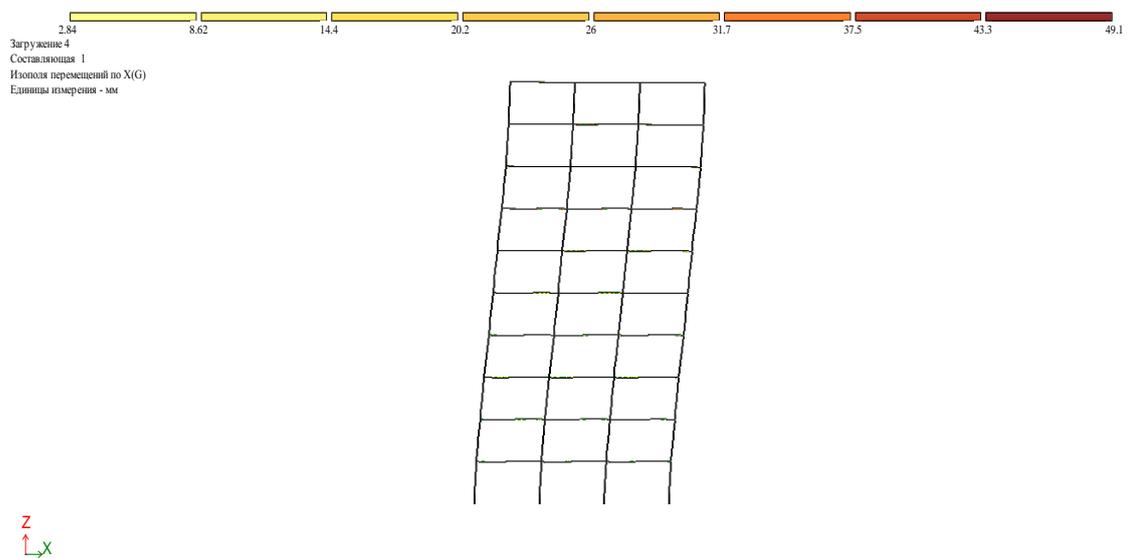
გაანგარიშების შედეგად მიღებულია შინაგანი ძალების მნიშვნელობები და ჩალუნვები ზემოთაღნიშნული ძალების თანწყობისაგან, შენობის ძირითად მზიდ ელემენტებში

მიღებულია რხევის პერიოდები და მაქსიმალური ჰორიზონტალური გადაადგილებები 8 ბალიანი სეისმიური ზემოქმედებისაგან.

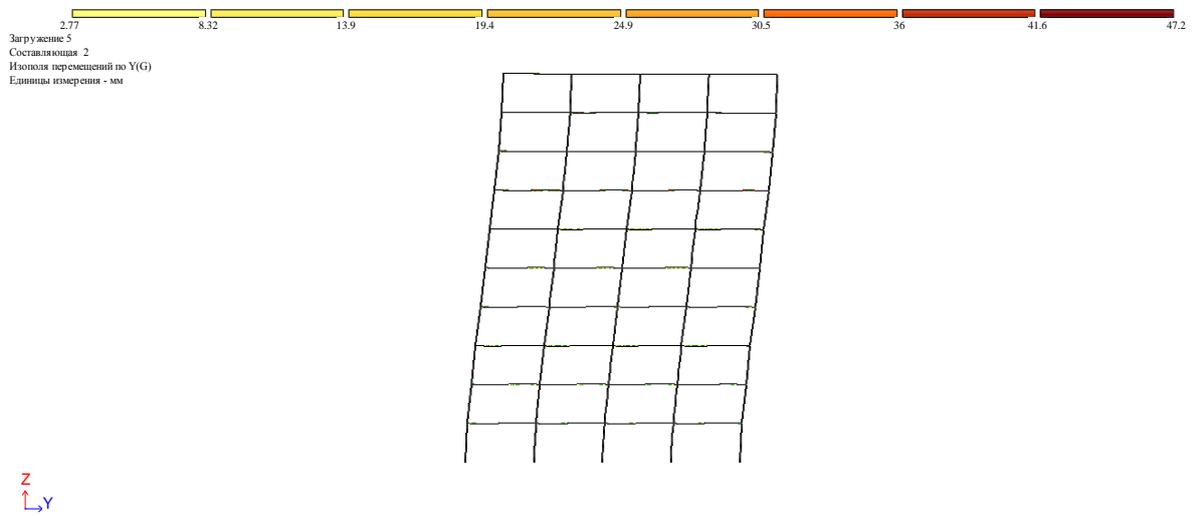
ქვემოთ მოყვანილია გაანგარიშების შედეგების ძირითადი მნიშვნელობები



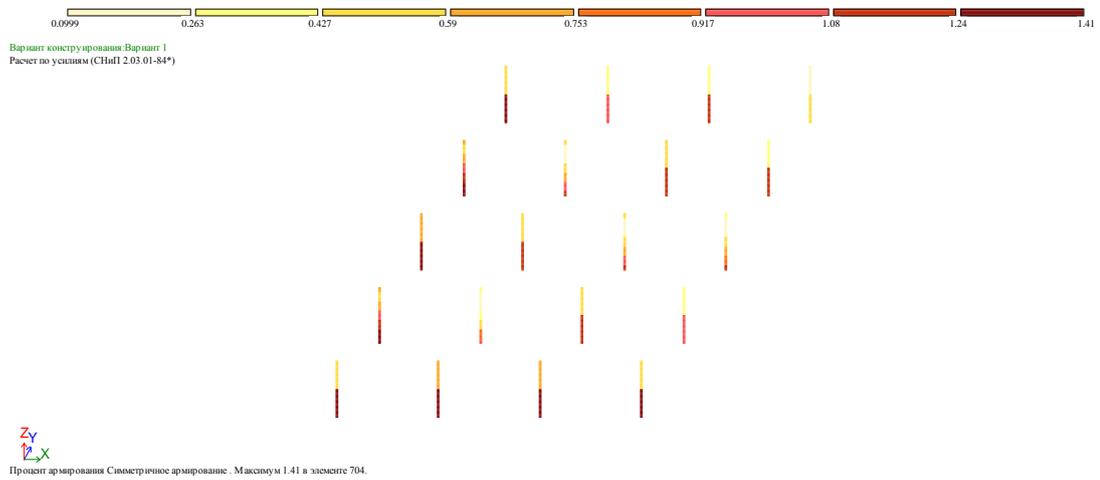
ნახ. №4.1 კონტურზე რიგელებიანი მონოლითური გადახურვის ფილა, ვერტიკალური ჩალუნვა მუდმივი დატვირთვისაგან



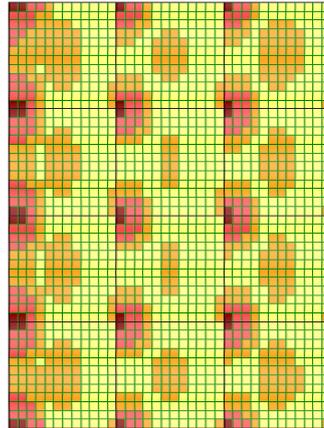
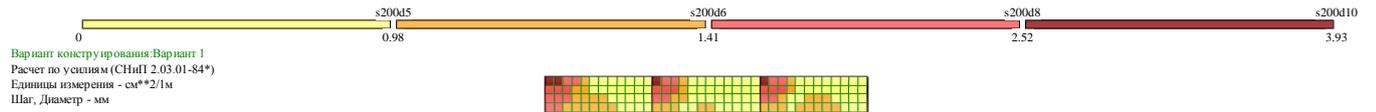
ნახ. № 4.2 კონტურზე რიგელებიანი მონოლითური გადახურვის ფილა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „X” ღერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან



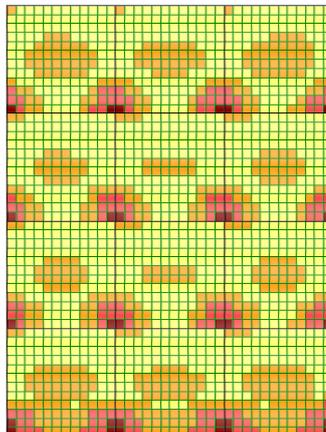
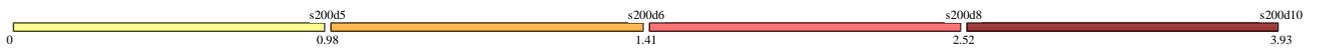
ნახ. №4.3 კონტურზე რიგელებიანი მონოლითური გადახურვის ფილა,  
ჰორიზონტალური გადაადგილება „Y” ღერძის მიმართულებით  
8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან



ნახ. №4.4 ფილა ხისტად ჩამაგრებული რიგელებში, სვეტების არმირება პროცენტებში

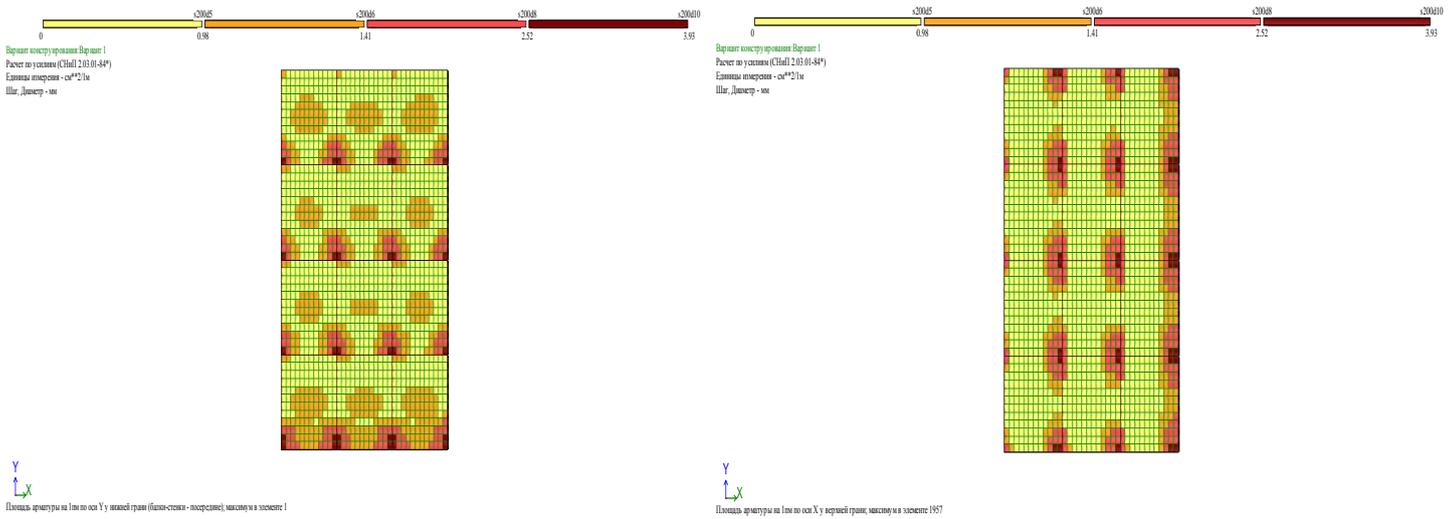


Площадь арматуры на 1м по оси X у нижней грани (балки-стенки - посередине); максимум в элементе 1617



Площадь арматуры на 1м по оси Y у нижней грани (балки-стенки - посередине); максимум в элементе 1

ნახ. №4.5 ფილა ხისტად ჩამაგრებული რიგელებში, ფილის არმირების ქვედა შრე

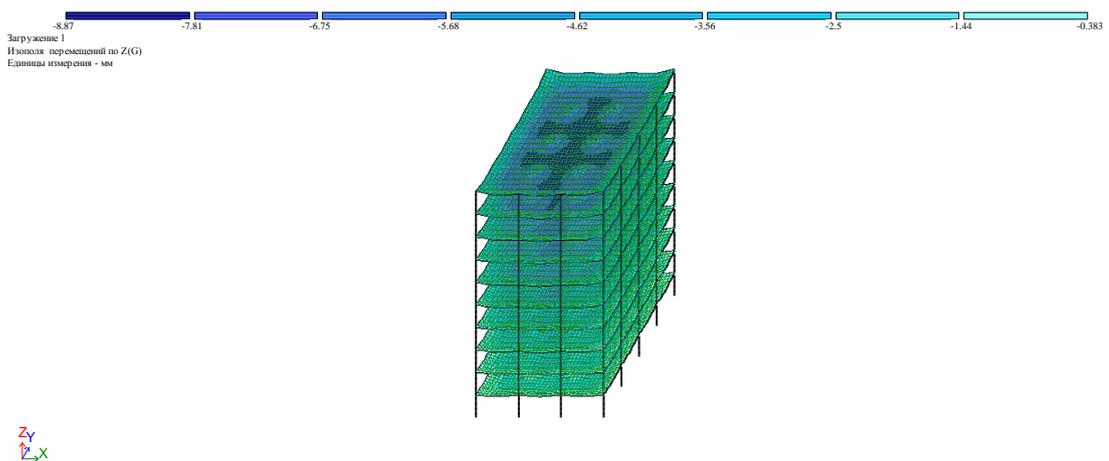


ნახ. № 4.6 ფილა ხისტად ჩამაგრებული რიგელებში, ფილის არმირება ზედა შრეში

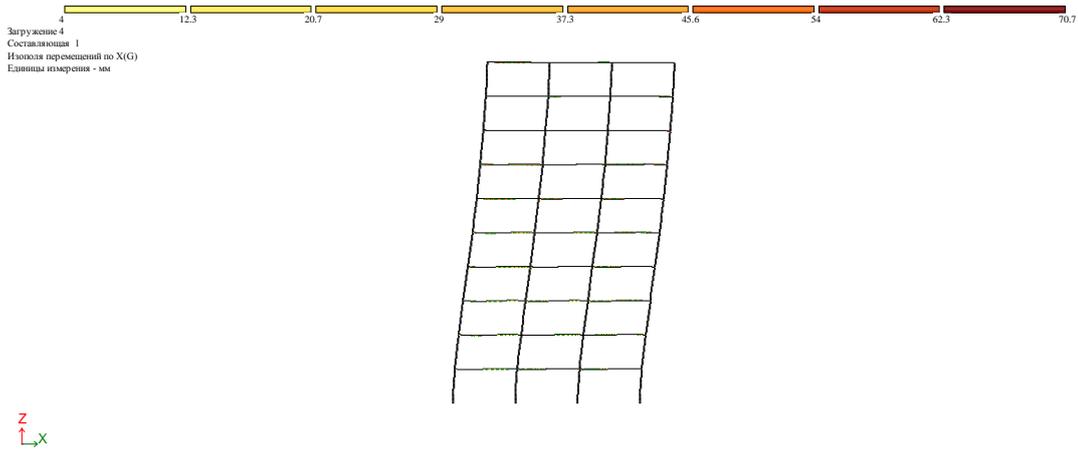
10 სართულიანი შენობა ურიგელო (რიგელები მხოლოდ კონტურზე)

ცხრილი №4

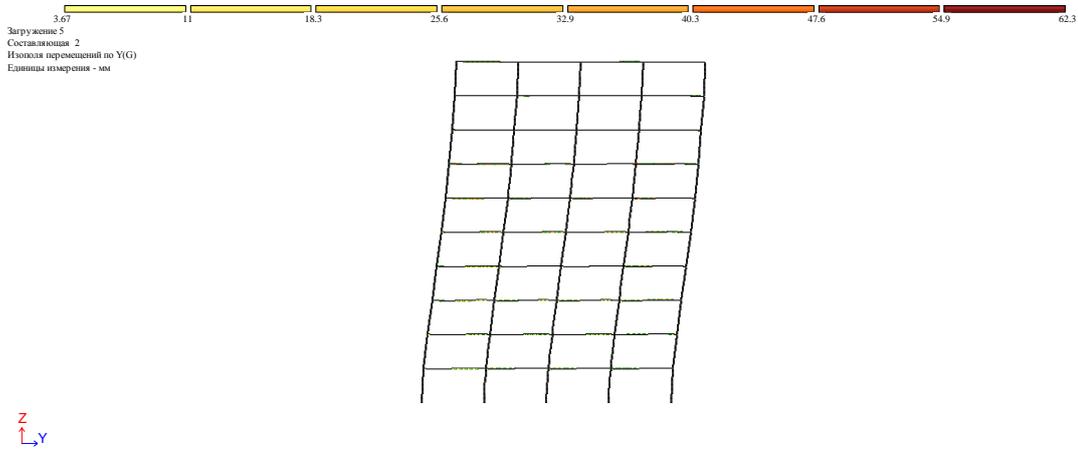
	პერიოდი	ჰორიზონტალური გადაადგილება		ჩალუნვა	მასალის ხარჯი ერთ სართულზე	
		X	Y		ბეტონი	არმატურა
1	T	X	Y	Z	ბეტონი	არმატურა
2	1,88	70,7	50,2	10,2	95 მ <sup>3</sup>	10,0 ტ



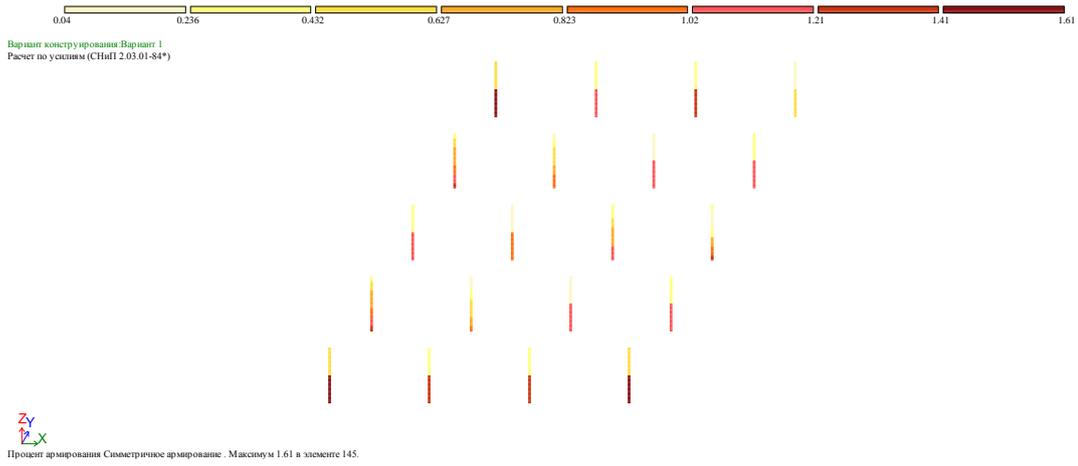
ნახ. №4.7 ურიგელო გადახურვა, ვერტიკალური ჩალუნვა მუდმივი დატვირთვისგან



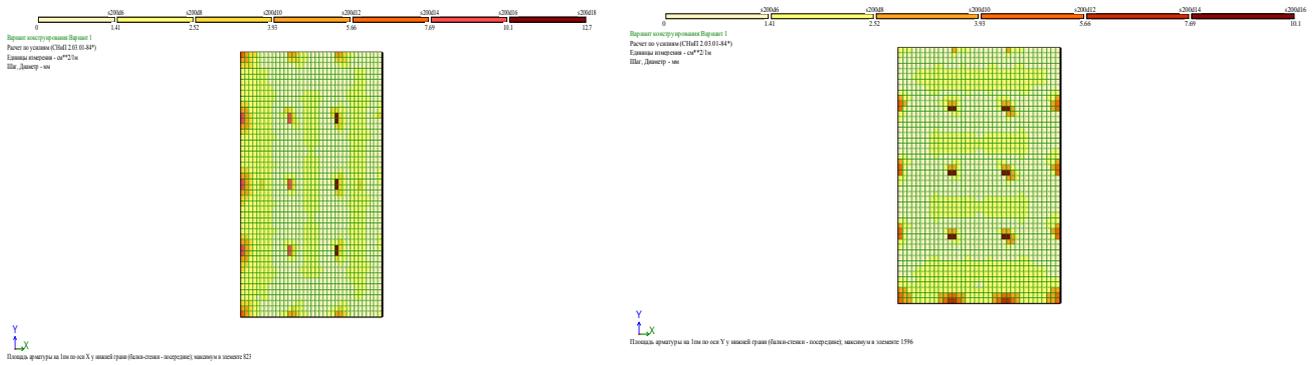
ნახ. № 4.8 ურიგელო გადახურვა, კორიზონტალური გადაადგილება „X” დერძის მიმართულებით  
8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან



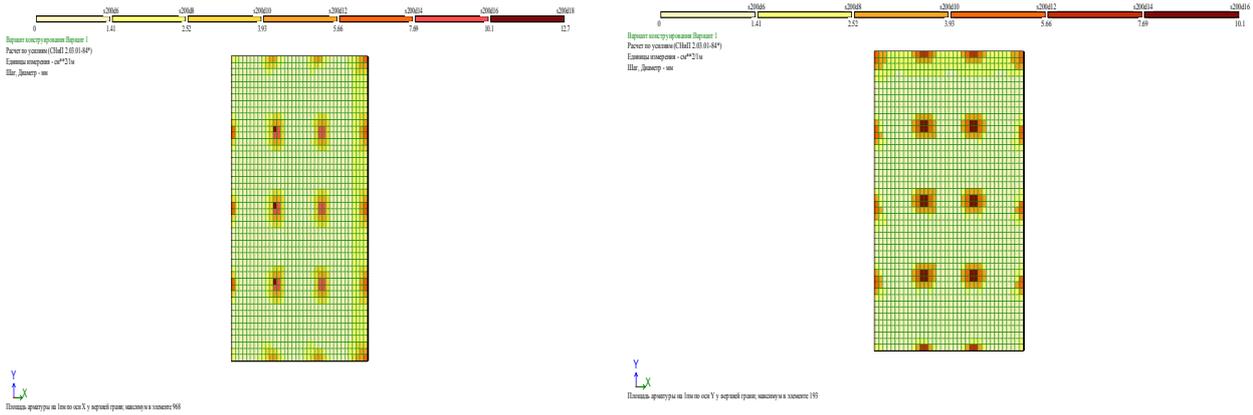
ნახ. № 4.9 ურიგელო გადახურვა, კორიზონტალური გადაადგილება „Y” დერძის მიმართულებით  
8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან



ნახ. № 4.10 ურიგელო გადახურვა, სვეტების არმირება პროცენტებში



ნახ. № 4.11 ურიგელო გადახურვა, რიგელების არმირება ქვედა შრეში

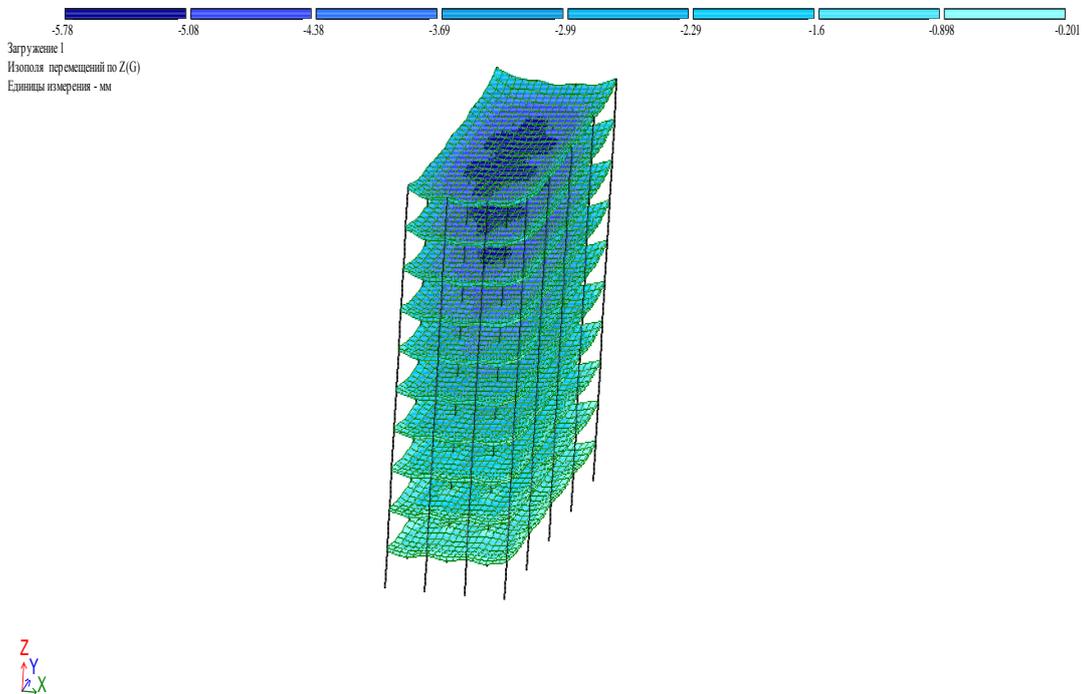


ნახ. №4.12 ურიგელო გადახურვა, ფილის არმირება ქვედა შრეში

10 სართულიანი შენობა რიგელებზე ხისტად ჩამაგრებული ფილით

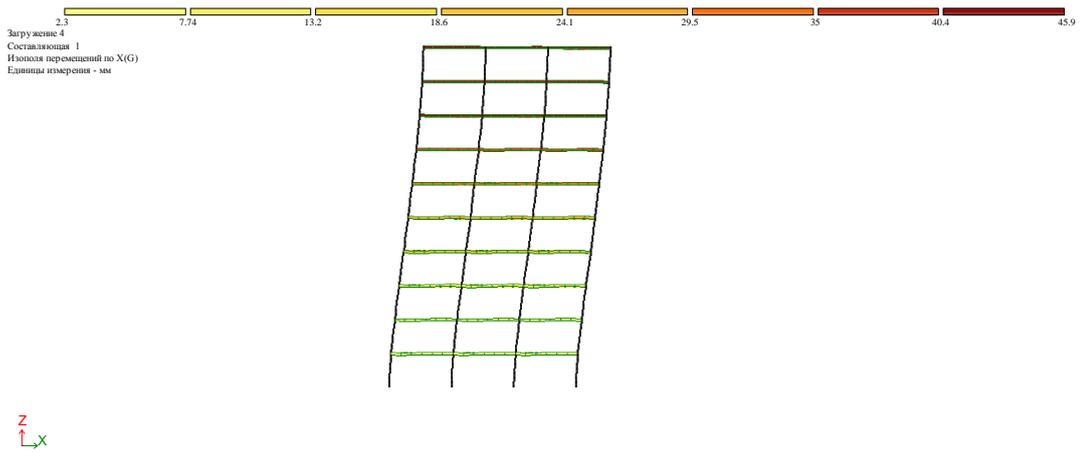
ცხრილი №5

პერიოდი	ჰორიზონტალური გადაადგილება		ჩაღუნვა	მასალის ხარჯი ერთ სართულზე	
	X	Y		ბეტონი	არმატურა
1	T		Z		
2	1,64	59,1	43,2	9,3	100 მ <sup>3</sup> 12,5 ტ

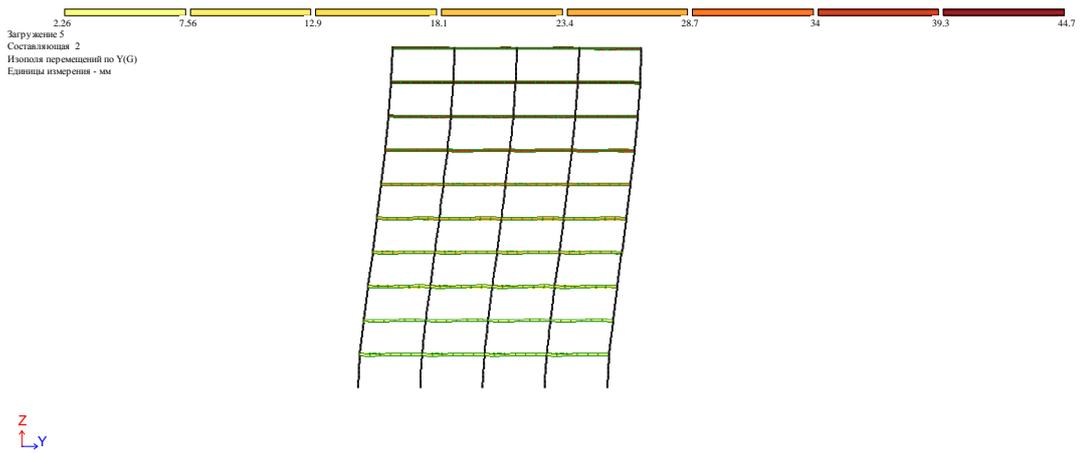


ნახ. № 4.13 ურიგელო სიდრუეებიანი გადახურვა, ვერტიკალური ჩაღუნვა მუდმივი დატვირთვისაგან

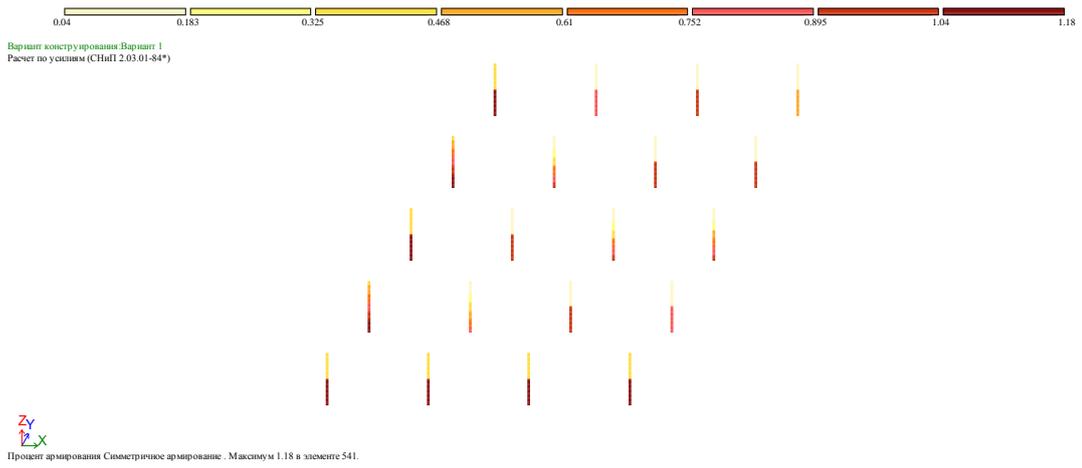




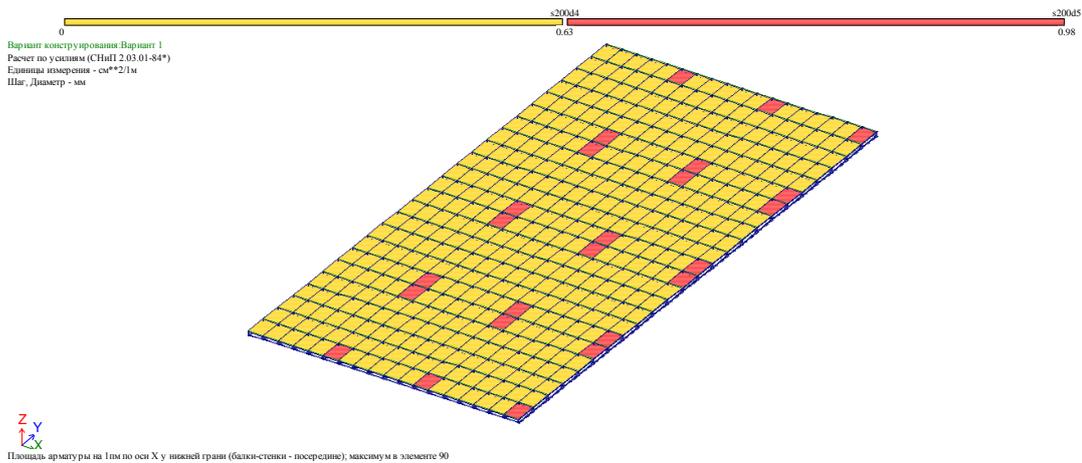
ნახ. № 4.14 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „X” დერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან



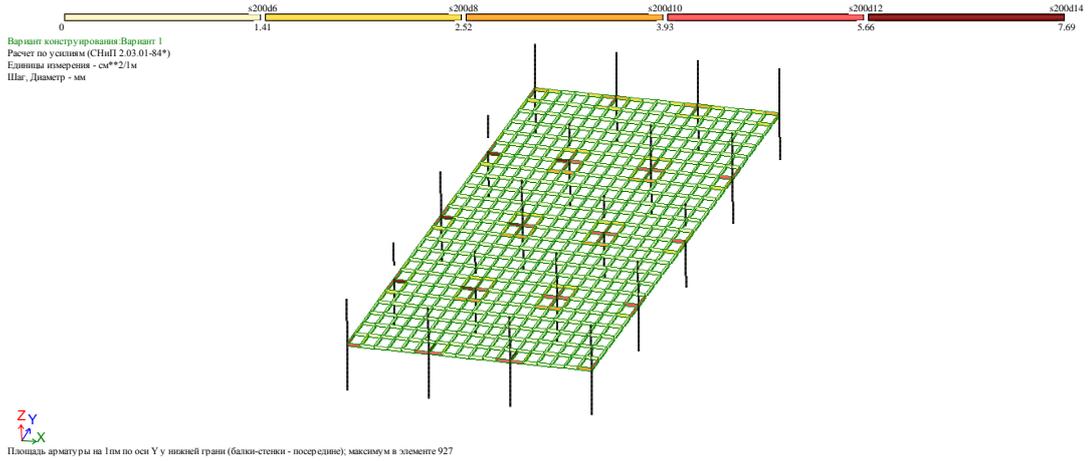
ნახ. № 4.15 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა, ჰორიზონტალური გადაადგილება „Y” დერძის მიმართულებით 8 ბალიანი სეისმიური დატვირთვისაგან



ნახ. № 4.16 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა სვეტების არმირება პროცენტებში



ნახ. № 4.17 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა ზედა და ქვედა ფილის არმირების სქემა



ნახ. № 4.18 ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვა კოჭების არმირების სქემა

ცხრილში მოცემულია სამი სხვადასხვა გადახურვის ფილის მასალის ხარჯები და მათი შედარება.

ცხრილი №6

№	გადახურვის ფილა	პერიოდი T	ჰორიზონტალური გადაადგილება		ჩალუნვა Z	მასალის ხარჯი ერთ სართულზე	
			X	Y		ბეტონი	არმატურა
1	ფილა სიღრუეებით	1,52	48,9	44,7	7,8	70 მ <sup>3</sup>	8,7 ტ
2	რიგელებზე ხისტად ჩამაგრებული ფილა	1,64	59,1	43,2	9,3	100 მ <sup>3</sup>	12,5 ტ
3	ფილა პერიმეტრზე ხისტად ჩამაგრებული	1,88	70,7	50,2	10,2	95 მ <sup>3</sup>	10,0 ტ

## თავი V. ძირითადი დასკვნები და რეკომენდაციები

1. თანამედროვე პირობებში, ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვების კრიტიკული ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მიუხედავად დიდი დაინტერესებისა ასეთი ტიპის გადახურვები ნაკლებადაა შესწავლილი, ხოლო არასაკმარისი ექსპერიმენტალური და თეორიული გამოკვლევები აფერხებენ ასეთი ტიპის გადახურვების გამოყენებას მშენებლობაში.

2. მოცემულ სამუშაოში ჩატარებული ექსპერიმენტალური და თეორიული კვლევების ანალიზი აჩვენებს, რომ წარმოდგენილი საანგარიშო სქემა საკმარისად ზუსტად ასახავს კონსტრუქციის მუშაობას ექსპლოატაციის პირობებში.

3. გაანგარიშებების ანალიზის საფუძველზე დადგინდა, რომ ურიგელო სიღრუეებიანი გადახურვები, რომელთაც პირობითად შეიძლება ვუწოდოთ ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიცარიელებიანი მონოლითური რკინაბეტონის ფილები, ტრადიციულ გადახურვებთან შედარებით, იძლევა ბეტონის – 30 % და არმატურის 15%-დან 25%-მდე ეკონომიას.

4. შენობა ნაგებობებში, ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიღრუეებიანი მონოლითური რკინაბეტონის ფილების გამოყენებისას ბეტონის მოცულობის შემცირების ხარჯზე მცირდება შენობის მასა.

5. ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიღრუეებიანი მონოლითური რკინაბეტონის ფილების გამოყენება ამცირებს ძალებს საძირკვლებში, სვეტებში, რიგელებსა და გადახურვებში, რაც იწვევს ამ ელემენტებში არმირების შემცირებას

6. ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიღრუეებიანი მონოლითური რკინაბეტონის ფილების მქონე შენობების სეისმიურ ზემოქმედებაზე გაანგარიშებისას, მასის შემცირება იწვევს რხევის პერიოდის, ჰორიზონტალური გადაადგილებების, სვეტებში მლუნავი მომენტის შემცირებას.

7. ჩატარებული კვლევების საფუძველზე შესაძლებელია დავადგინოთ, რომ ორთოგონალურ წიბოებიანი, ორმხრივ სიღრუეებიანი მონოლითური რკინაბეტონის ფილების გამოყენება უფრო ეკონომიურს ხდის შენობა ნაგებობებს.

## თავი VI. ლიტერატურა

1. სასრულ ელემენტთა მეთოდი-გ. ლალუნდარიძე, ს. ბლიაძე, ზ. სესკურია
2. О. Зенкевич. И. Чанг, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕОРИИ СООРУЖЕНИЙ И В МЕХАНИКЕ СПЛОШНЫХ СРЕД
3. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции.- М.,1989.-80 с.
4. СП 52-103-2007 Железобетонные монолитные конструкции зданий Москва 2007
5. Иванов, А. Развитие теории и прикладных методов оценки силового сопротивления монолитных гражданских зданий с учетом нелинейности деформирования. Автореф. на соиск. степени докт. тех. наук: 05.23.01, М., 2008 – 45с.
6. Клецов, В.А. Действительная работа узлов плоской безбалочной бескапитальной плиты покрытия с колоннами при продавливании / В.А. Клецов, А.Н. Болгов // Бетон и железобетон. – №32. 2005. – с.17-19.
7. Мурашкин, В.Г. Испытание моделей стыка колонн и перекрытия в монолитных зданиях / В.Г. Мурашкин // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование, наука, практика: материалы регионал. 59-й науч.-техн. конф. – Самара, 2002. – с.56-58.
8. Дорфман, А.Э. Проектирование безбалочных бескапитальных перекрытий /А.Э. Дорфман, Л.П. Левонтин. - М.: Стройиздат, 1975. – 124с.
9. Руководство по расчёту статически неопределимых железобетонных конструкций с безбалочными перекрытиями, – М., Стройиздат 1975, – 32с.
10. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с безбалочными перекрытиями, – М.: Стройиздат 1979. – 54с.
11. Карпенко Н.И. О современных построениях критериев прочности бетонных и железобетонных элементов // Бетон и железобетон. –

1997, №3 – с. 4-7

12. Карпенко Н.И. Общие методы механики железобетона. – М., Стройиздат, 1996. – 416 с.
13. Залесов А.С. Расчёт прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил и кручении // Бетон и железобетон. – 1976, №6 – с. 22-24
14. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. Киев., Будевельник, 1989. – 104 с.
15. Рочняк О.А. Сопротивление поперечному изгибу железобетонных элементов с продольной и отогнутой арматурой (при наличии и отсутствии сцепления с бетоном): Автореф. на соиск. степени канд. тех. наук: 05.23.01 / НИИЖБ Госстроя СССР, М., 1994. – 46 с.
16. Васильев П.И., Рочняк О.А. Сопротивление железобетонных элементов поперечным силам. Минск., Наука и техника. – 1978. – 88 с.
17. Розин Л.А. Задачи теории упругости и численные методы их решения. СПб.: изд-во СПбГТУ, 1998. – 532 с.: ил.
18. Talbot A.N. Reinforced concrete wall footing and column footing / Bulletin JVb67, University of Illinois Engineering Experiment Station, 1913.
19. Richart F. and Klyge R. test of reinforced Concrete Slabs Subjected to Concentrated Loads / Bulletin N314, University of Illinois Engineering Experiment Station, 1939.
20. Hognestad E. Shearing Strength of Reinforced Column Footings / Journal ACI, v.50, N3, 1953.
21. Карпенко, Н.И. Развития методов проектирования строительных конструкций, зданий и сооружений / Н.И. Карпенко, В.И. Травуш // Сб. ст.Международ. науч.-техн. конф. «Эффективные строительные конструкции: теория и практика». – Пенза, 2002. – С.5-8.
22. Staller M. Analytische und numerische Untersuchungen des Durchstanztageverhalten spunktgestutzter Stahlbetonplatten Diss., TU Munchen 2001.
23. Leseth S., Slatto A., Syvertsen T. Finite Elements Analyses of

- punching shear failure of reinforced concrete slabs / Nordic concrete research №1 Oslo 1982.
24. Marzouk H. and Hussein. A. Experimental Investigation on the Behavior of High- Strength Concrete Slabs / ACI Structural Journal. V. 88, N 6, Nov. – Dec. 1991.pp. 701-713.
  25. Bianchini A.C., Woods R.E., Kesler C.E. Effect of Floor Concrete Strength on Column Strength / Journal of the American Concrete Institute, V. 31, No. 11, 1960, pp. 1149-1169
  26. Болгов А. Расчет узлов сопряжения колонн с плоскими безбалочными перекрытиями // НИИЖБ. Научные изыскания – №5/2005 "Строительная инженерия" 2005г.
  27. Козак Ю. Конструкции высотных зданий. М., Стройиздат – 1986. – 240 с.
  28. Мурашев В.И. Железобетонные конструкции: Общий курс: учеб. для вузов по спец. «Промышленное и гражданское строительство» / Мурашев В.И., Сигалов Э.Е., Байков В.Н.; под ред. П.Л. Пастернака – М.: Госстройиздат, 1962. – 659 с.
  29. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой, М.: Стройиздат 1978 – 55 с.
  30. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М.: ГУП «НИИЖБ» ФГУП ЦПП – 2004 – 53 с.
  31. Карпенко Н.И. Общие методы механики железобетона. – М., Стройиздат, 1996. – 416 с.
  32. Ватин Н.И., Иванов А.Д. Сопряжение колонны и безребристой бескапитальной плиты перекрытия монолитного железобетонного каркасного здания. Дис. на соиск. квалиф. магистра: 05.23.01., СПб., 2006 – 81с.
  33. Саргсян А.Е., Демченко А.Т., Дворянчиков Н.В., Джинчвелашвили Г.А. Строительная механика. Основы теории с примерами расчётов: Учебник / Под. Ред. А.Е. Саргсяна. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. Шк., 2000. – 416 с.

34. Н.А.Крылов, А.А.Воеводин, К.А.Глуховской, Д.П.Хлутков. Оптимизация расчетных параметров строительных конструкций. Стройиздат. Ленинград. 1989. - 112 с.
35. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101- 2003). ЦНИИПромзданий, НИИЖБ. – М.: ОАО "ЦНИИПромзданий, 2005. – 214с.
36. Плясунов Е.Г. Бескапитальный стык колонны и перекрытия с комбинированным армированием в монолитном железобетонном безбалочном каркасе. Автореф. На соиск. Степени канд. Тех. Наук: 05.23.01, Красноярск, 2006.
37. А.с. 307169 СССР, МПК Е 04 С 2/00. Стыковое соединение безреберной плиты/ В.В. Бургман, М.Ф. Фишера, А.Б. Шумилин (СССР). – 1356314/29-14; заявл. 07.08.1969; опубл. 21.06.1971, Бюл. №20.
38. А.с. 1756493 СССР, МКП Е 04В 5/02. Каркас здания/В.Г. Корнилов (СССР). – 4734268/33; заявл. 01.09.1989; опубл. 23.08.1992, Бюл. №31.
39. А.с. 43892 RU, МПК Е 04 В 5/43. Стыковое соединение безбалочного железобетонного перекрытия с колонной/ Н.А. Сивчук (RU). – 2004129115/22; заявл. 04.10.2004; опубл. 10.02.2005, Бюл. 7.
40. <http://www.cobiax.com/products>
41. <http://en.daliform.com/products/construction-division/systems-for-lightening-slabs/u-boot-beton.php>
42. ბ. ნიბუა-რკინაბეტონის კონსტრუქციები
43. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности
44. Лосаберидзе Ан.А. Динамика континуальных арочных систем при сейсмических воздействиях. Тбилиси мецниеребაბ 1979. 123с.
45. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. Перевод с английского. М.: Мир, 1975. — 543 с.
46. Смирнов А .Ф ., Александров А .В ., Лащеников Б .Я ., Шапошников



Н.Н. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. -  
М.: Стройиздат, 1984

47. Смирнов А .Ф. РАСЧЕТ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ НА  
СОБСТВЕННЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ  
Методические указания к домашнему заданию. М.;1984

48. Р.Клаф, Дж.Пензиен Динамика сооружений, М.:Стройиздат, изд-во  
Высшая школа 1979

49.Корчинский И.Л. - Сейсмостойкое строительство зданий изд-во  
Высшая школа 1971 318 с.

50. Александров А.В., Лашеников Б.Я., Шапошников Н.Н., Строительная  
механика, тонкостенные пространственные системы. Стройиздат, 1983  
488с.