

ირაკლი ჯინჭარაძე

დიდმალიანი გადახურვების აგების  
ტექნოლოგია

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
, 2012 წელი

საავტორო უფლება © ირაკლი ჯინჭარაძე, 2012

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სატრანსპორტო და მანქანათმშენებლობის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ირაკლი ჯინჭარაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „დიდიმალისი გადახურვების აგების ტექნოლოგია“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სატრანსპორტო და მანქანათმშენებლობის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

2012 წ.

ხელმძღვანელი:

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2012 წელი

ავტორი: ირაკლი ჯინჭარაძე

დასახელება: დიდმალიანი გადახურვების აგების ტექნოლოგია

ფაკულტეტი : სატრანსპორტო და მანქანათმშენებლობის

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თარიღი

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 დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

დიდმალიანი შენობების, აეროპორტების, ანგარების, სხვადასხვა დანიშნულების დარბაზების, პავილიონების, საწარმოო და სამოქალაქო ობიექტების მშენებლობა – უპირველეს ყოვლისა დაიწყო იქ, სადაც ეს ტექნიკური პროგრესით, ტექნოლოგიური პროცესების ახალი მოთხოვნილებებით იყო განპირობებული. რკინაბეტონის და სხვა კომპოზიციური ახალი მასალების აღმოჩენამ, სამშენებლო მეცნიერების განვითარებამ, განსაკუთრებით გარსის თეორიის ანგარიშის სრულყოფამ მიგვიყვანა თანამედროვე თხელკედლიან სივრცითი კონსტრუქციის შექმნამდე, შესაძლებელი გახადა შენობის დიდი მალის გადახურვა შუასაყრდენების გარეშე, მასალის შედარებით ნაკლები დანახარჯებით.

სამამულო პრაქტიკაში, საზღვარგარეთისაგან განსხვავებით, მთავარი ყურადღება ეთმობა გარსების ასაწყო რკინაბეტონის მშენებლობას. ასეთია სპორტის სასახლე თბილისში, შენობა წყალტუბოში, პავილიონი ერევანში.

განსაკუთრებული ყურადღება უნდა დაეთმოს ძვირადღირებული კომპოზიციური მასალების გამოყენებას ან ორიგინალური, პროგრესული ტექნოლოგიების გამოყენებას, რომელიც საშუალებას იძლევა მასალების, განსაკუთრებით შრომის დანახარჯების და ელექტროენერჯის რესურსების ეკონომიას.

მოსახლეობის მნიშვნელოვანი კონცენტრაცია, რაც დიდი ქალაქების თანამდევ პროცესია პერმანენტულად წარმოქმნის რიგ პრობლემებს, რომელთა გადაწყვეტა ასევე მუდმივ ძალისხმევას მოითხოვს.

საკითხს განსაკუთრებით ართულებს მოქალაქეების თავშეყრის ობიექტები, სადაც ისედაც მჭიდროდ დასახლებულ რაიონებში მათი რაოდენობა მკვეთრად იზრდება, რთულდება ტრანსპორტის მოძრაობა, ირღვევა ეკოლოგია, მძვინვარებს ანტისანიტარია და სხვა.

მსოფლიოს მრავალწლიანი გამოცდილება ადასტურებს, რომ მსხვილი მრავალპროფილიანი სავაჭრო ობიექტები გააქვთ ქალაქგარეთ, ძირითადი მაგისტრალების გადაკვეთების სიახლოვეს და შენდება კომპლექსურად, ინფრასტრუქტურის სრული სპექტრის გათვალისწინებით.

თავისთავად ძალზე საპასუხისმგებლო საინჟინრო ნაგებობებს წარმოადგენს დიდმალიანი გუმბათოვანი რკინაბეტონის გარსები, რომლებიც გამოიყენება ბაზრების, სპორტული ნაგებობების, გამოფენების და სხვათა მშენებლობისას და რომლებიც გარდა ფუნქციონალური დანიშნულებისა, საინტერესო არქიტექტურულ და ღირშესანიშნავ შენობათა კლასს განეკუთვნება, ამიტომ დიდი ხანია მსოფლიოს მრავალი სახელმწიფო საკუთარი სამშენებლო დონისა და ინტელექტუალური პოტენციალის გამოყენებით ცდილობს ვინ უკეთ და სწრაფად ააგებს დიდი მალის გუმბათს, რაც შეიძლება ნაკლები მასალების, შრომის და ენერგორესურსების დანახარჯებით.

დღეისათვის ცნობილია დიდმალიანი გადახურვების მშენებლობის რამდენიმე ტექნოლოგია, რომელთაგან ყველაზე გავრცელებულია მონოლითური, ანაკრები, ან შერეული რკინაბეტონის კონსტრუქციებით აგებული გუმბათოვანი ნაგებობები, რომელთა ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები თითქმის ერთნაირია და ითვლება ძვირადღირებულ ობიექტებად.

დიდმალიანი კოჭოვანი გადახურვის გარსები შეიძლება განვიხილოთ როგორც სივრცული კონსტრუქციები, სადაც თვითოეული წყვილი საპირისპირო კოჭი მუშაობს ერთობლივად, როგორც თაღები.

ამასთან დაკავშირებით დიდმალიანი გადახურვის აგების ტექნოლოგია, კონსტრუქციის გაანგარიშების პრობლემა საკმაოდ რთულია, აქტუალურია და მოითხოვს გაანგარიშების განსაკუთრებული მეთოდების შემუშავებას. სწორედ ამ პრობლემის გადაწყვეტას ეხება წინამდებარე ნაშრომი.

დისერტაციის მიზანი წარმოადგენს დიდმალიანი გადახურვების ახალ ტექნოლოგიას, რომელიც ითვალისწინებს მონტაჟის საიმედოობას და უზრუნველყოფს დროის სიმცირეს, გაიაფებას და ენერგორესურსების შემცირებას, აგრეთვე გარსული გადახურვების დაძაბულ დეფორმირებული მდგომარეობის გამოკვლევას, მისი ელემენტების კვანძების ზომების, ოპტიმიზაცია და ეფექტური გაანგარიშება პრაქტიკული გამოყენებისათვის. გადმოიცეს ღეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი და ღეროვანი გუმბათის გაანგარიშების პროგრამის ალგორითმი. ჩატარდეს გუმბათის კონსტრუქციის ექსპერიმენტული გამოკვლევები.

მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს პროგრესული ტექნოლოგიის შემუშავებაში, რამაც უნდა მოგვცეს ეკონომია შრომის სამუშაოებში, მასალებში და ენერგორესურსებში. აგრეთვე თეორიული მეთოდის შემუშავების შეფასებაში დიდმალიანი გადახურვებისათვის, რომელიც უზრუნველყოფს ოპტიმალურ ზომებს კონსტრუქციისთვის, ხისტი კვანძების გათვალისწინებით. გადმოცემულია ახალი მეთოდი, რომლის მიხედვითაც გუმბათი განიხილება როგორც ერთიანი გარსი წყვეტილად ცვალებადი სიმრუდით, რაც საგრძნობლად ამოკლებს გამოთვლის ალგორითმს.

მიღებულია უმომენტო სივრცითი კონსტრუქციების გათვლების ცდომილება და მისი გამოყენების ზღვარი არათანაბარ განაწილებულ ძაბვებთან მიმართებაში.

მიღებულია ღეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი. შემოთავაზებულია დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციის აგების ტექნოლოგია.

ნაშრომის ღირებულება მდგომარეობს თეორიულ და ექსპერიმენტის გამოკვლევებში, რომელიც წარმოადგენს საფუძველს პრაქტიკული რეკომენდაციებისათვის გარსული კონსტრუქციების მზიდი ელემენტებისათვის.

შედეგების უტყუარობა კი მტკიცდება სხვადასხვა ავტორების მიერ მიღებული თეორიული და ექსპერიმენტალური შედეგების დამაკმაყოფილებელი თანადამთხვევით.

გადმოცემულია ახალი მეთოდი, რომლის მიხედვითაც მთელი გუმბათი განიხილება როგორც ერთიანი გარსი წყვეტილად ცვალებადი სიმრუდით, რაც საგრძნობლად ამოკლებს გამოთვლის ალგორითმს; განსაზღვრულია მომენტური ძაბვების შეფარდებითი სიდიდე გრესა-კუმშვის დაძაბვებთან შედარებით და ამ დაძაბვების ზემოქმედება კონსტრუქციების გამძლეობის და ხანგრძლივობის შეფასებაზე; მიღებულია უმომენტო გათვლების ცდომილება და მისი გამოყენების ზღვარი არათანაბარ განაწილებულ ძაბვებთან მიმართებაში.

მიღებულია ღეროვანი გუმბათების კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის თავისებურებანი; გადმოცემულია ღეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი და ღეროვანი გუმბათის გაანგარიშების პროგრამის ალგორითმი, კომპიუტერის გამოყენებით; აღწერილია გუმბათის კონსტრუქციის ექსპერიმენტული გამოკვლევები.

გადმოცემულია გუმბათის აგების ახალი ტექნოლოგია; შემოთავაზებულია დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციის აგების ტექნოლოგია. აღნიშნული მოდელის ტექნიკური შედეგია დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციების აგების გამარტივება; მიღებულია გუმბათის აწვევის ტექნოლოგია; გადმოცემულია დიდმალიანი გუმბათოვანი გადახურვების მონტაჟის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები.

## Abstract

The construction of large-span buildings, airports, hangars, different-purpose halls, pavilions, industrial and civil objects has begun where it was stipulated with technical progress, new demands of technological process. The discovery of reinforced concrete and other new composite materials, development of building science, particularly the perfection of calculation of the theory of shells brought us to the creation of modern thin-walled spatial structures, made possible to floor large-span constructions without middle support and considerably less consumption of material.

In domestic practice, unlike foreign practice, the main attention is paid to the constructing of prefabricated reinforced concrete shells. Such are Palace of Sport in Tbilisi, building in Tskaltubo, pavilion in Erevan.

The particular attention is to be paid to using of expensive composite materials or original, progressive technologies which result in the economy of materials and, especially in the economy of labor and electric power resources.

The process of intensive concentration of population accompanying the formation of big cities is permanently creating a number of problems the solution of which also is the matter of constant effort.

The problem is particularly complicated in the places of gatherings of citizens where their number is sharply increased in already densely populated districts causing complication of transport motion, violation of ecology, antisanitary, etc.

Many years' world experience proves that big multi-profile commercial objects are taken out of the town, near the crossing of main traffic arteries and are built complexly with consideration of the whole spectrum of infrastructure.

Large-span domelike reinforced concrete shells represent very responsible engineering construction used for building of markets, sport halls, exhibitions and other structures which besides functional purpose belong to the class of interesting architectural and remarkable buildings. Therefore, it is long since many countries of the world using their own engineering level and intellectual potential, try to built large-span cupolas better and quicker with as less material, labor and power resources consumption as possible.

At present several technologies of construction of large-span roofs are known, the most widely-spread being monolithic, precast or hybrid cupola buildings built of reinforced concrete constructions which have almost equal technical economical characteristics and are considered as very expensive objects.

Large-span girder roof shells can be considered as space constructions where each pair of opposite girders works in common, as arches.

In this connection the technology of construction of large-span roofs, problem of calculation of construction structure is quite complicated, urgent and requires the development of particular methods of calculation. The solution of this problem is the very object of the presented work.

The objective of the dissertation theme is to create a new technology of large-span roofs which ensures the reliability of assembling and provides time, cost and power resources decrease, as well as, to research stress-strain state of rod shell roofs, to optimize and calculate dimensions of elements and units for practical use, to present the method of calculation of rod spherical dome and the algorithm of rod cupola calculation program, to carry out experimental researches of dome construction.

The scientific innovation consists in the development of progressive technology which is to give economy in labor work, material and power resources; also, in evaluation of development of theoretical method for large-span roofs which

provides optimum dimensions of construction with consideration of rigid units. A new method is presented according to which dome is considered as a unified shell with discontinuously varying curve which significantly shortens calculation algorithm.

The calculation error of momentless spatial constructions and its application limit in respect to irregularly distributed forces is obtained.

The method of calculation of axial spherical domes is obtained. The technology of construction of large-span roof structures is proposed.

The value of the work lies in theoretical and experimental researches which represent the basis of practical recommendations for shell construction load-bearing elements.

The authenticity of results is proved with satisfactory coincidence of theoretical and experimental results received by various authors.

A new method is presented according to which the whole dome is considered as a one-piece shell with discontinuously varying curvature which significantly shortens calculation algorithm; relative value of moment forces compared to twisting-compression forces and the effect of these forces on construction durability and longevity evaluation are determined; the error of momentless calculations and the limit of its use in respect to irregularly distributed forces is received.

The peculiarities of stress-strain state of axial domelike constructions are studied; the method of calculation of axial spherical domes and computer-aided program algorithm calculations of axial domes are presented; experimental researches of dome construction are described.

A new technology of dome construction is presented; the technology of large-span roof structure constructions is proposed. Technical result of the mentioned model is the simplification of large-span roof structure constructions; the technology of dome raising is received; technical and economic characteristics of large-span dome roof assembling are presented.



## შინაარსი

შესავალი .....	15
1. ლიტერატურის მიმოხილვა .....	18
1.1. პრობლემის თანამედროვე მდგომარეობა .....	18
1.1.1. დიდმალიანი გუმბათების მიმოხილვა .....	18
1.1.2. თხელკედლიანი სივრცითი სისტემების გაანგარიშების მეთოდების განვითარების ძირითადი მიმართულებები .....	31
1.1.3. ფიზიკური ველების ურთიერთქმედების პრობლემა (თერმოდრეკადობა, თერმოპლასტიკურობა) .....	37
1.1.4. სხვადასხვა მოხაზულობის გარსები .....	39
1.1.5. მოქნილი გარსები. ბადისებრი გარსები .....	43
1.1.6. გაანგარიშების ძირითადი მეთოდები .....	44
1.1.7. მათემატიკური აპარატი გარსთა თეორიაში .....	47
1.1.8. პირველი თავის დასკვნები .....	49
2. შედეგები და მათი განსჯა .....	50
2.1. მერიდიანულ-ხოკეროვანი განივი კვეთის გუმბათები .....	50
2.1.1. მერიდიანულ-ხოკეროვანი მოხაზულობის გუმბათების სტატიკურ დატვირთვაზე გაანგარიშების მეთოდი .....	50
2.1.2. აგურის წყობის გუმბათების მოდელების ექსპერიმენტული გამოკვლევა .....	57
2.1.3. 2.1 თავის დასკვნები .....	61
2.2. ღეროვანი გუმბათის კონსტრუქციების დაძაბულ- დეფორმირებული მდგომარეობის თავისებურებანი .....	62
2.2.1. ღეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი .....	62
2.2.2. დამაგრებული ღერძის ერთეული რეაქციების მატრიცის გამოყვანა .....	67
2.2.3. გუმბათის კონსტრუქციის ექსპერიმენტული გამოკვლევების აღწერა .....	71
2.2.4. 2.2 თავის დასკვნები .....	74
2.3. გუმბათის აგების ახალი ტექნოლოგია .....	74
2.3.1. დიდმალიანი გადახურვის აგების ტექნოლოგია .....	78
2.3.2. გუმბათის აწევის ტექნოლოგია .....	81
2.3.3. დიდმალიანი გუმბათოვანი გადახურვების მონტაჟის ტექნიკურ- ეკონომიკური მაჩვენებლები .....	84
2.3.4. წრიულ-წიბოვანი გუმბათის კონსტრუქცია .....	86

2.4. ტექნოლოგიური საიმედოობის შეფასება .....	95
2.5. რეკომენდაციები რკინაბეტონის გუმბათების კონსტრუირებისთვის .....	99
2.6. რკინაბეტონის სფერული გარსის გაანგარიშების მაგალითი .....	106
2.6.1. 2.3-ი თავის დასკვნები .....	122
3. დასკვნა .....	123
გამოყენებული ლიტერატურა .....	124

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. $R_{\chi_i}, R_i, T, K$ მნიშვნელობა სხვადასხვა მარკის აგურებისათვის და სსნარისათვის .....	59
ცხრილი 2. ტრადიციული ტექნოლოგიით, ხის ქარგილებით მოტაჟის .....	85
ცხრილი 3. ახალი ტექნოლოგიით .....	85
ცხრილი 4. რკინაბეტონის გარსის საყრდენი რგოლის ელემენტებში ძალოვანი ფაქტორების ცხრილი .....	114

## ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. იენის პლანეტარიუმის გარსული გადახურვა გუმბათოვანი ჩაკეტილი კომპოზიციით .....	20
ნახ. 2. სპორტის სასახლე ოპორტოში .....	21
ნახ. 3. სპორტის სასახლე დალასში .....	22
ნახ. 4. ურბანოში ილინოისის უნივერსიტეტის აუდიტორიის (აშშ) მასიური კომპოზიცია ნაგებობა .....	23
ნახ. 5. თბილისის სპორტის სასახლე კვადრატული ნაგებობის გეგმა .....	25
ნახ. 6. ტრაპეციული ფორმის საფეხურიანი ელემენტი .....	26
ნახ. 7. სპორტის სასახლე .....	27
ნახ. 8. დამჭერი ხარაჩოების და გუმბათოვანი ფორმის ქარგილის მოწყობა .....	27
ნახ. 9. ....	29
ნახ. 10. დიდმალიანი რკინაბეტონის გუმბათი .....	29
ნახ. 11. სვეტებზე წრიულად განლაგებული რამდენიმე იარუსი ....	30
ნახ. 12. სავაჭრო კომპლექსი, სამი 60-მეტრიანი დიამეტრის გუმბათოვანი ნაგებობა .....	31
ნახ. 13. ღეროვანი სფერული გუმბათი .....	56
ნახ. 14. გაანგარიშების ელემენტების ძირითადი სისტემა .....	58
ნახ. 15. $S(i, j)$ – ელემენტი გამოყოფილი ღეროვანი სისტემიდან. $a$ – ღეროვანი ელემენტი, $\sigma$ – კვანძები $i, j$ (ხისტი დისკოებით), $\epsilon$ – დრეკად-დამყოლი კავშირები .....	64
ნახ. 16. გრძივი ძალვა $N$ ღეროვან ელემენტებში და ვერტიკალური გადაადგილებები $W$ , გუმბათის ექსპერიმენტული კონსტრუქციების კვანძებში .....	70
ნახ. 17. ....	75
ნახ. 18. გუმბათის განაპირა წრიულ კოჭი .....	77
ნახ. 19. სარტყელებს შორის მანძილის ჰიდროცილინდრების ბიჯი .	77
ნახ. 20. ....	79
ნახ. 21. ....	79
ნახ. 22. დომკრატი .....	80
ნახ. 23. ....	82
ნახ. 24. დამქანი და დამჭერი ცანგები .....	83
ნახ. 25. გუმბათის დეტალების შეუღლების დეტალები .....	101

ნახ. 26. გუმბათის წინასწარ დაძაბული საყრდენი რგოლი .....	102
ნახ. 27. რკინაბეტონის გარსის Z ღერძის მიმართ გადაადგილება ....	108
ნახ. 28. რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირება .....	117
ნახ. 29. რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირების პროცენტული შემადგენლობა .....	119
ნახ. 30. საყრდენი რგოლის გაანგარიშება .....	119
ნახ. 31. მონოლითური რკინაბეტონის საყრდენ რგოლში წინასწარდაძაბული ბაგირების განლაგების სქემა .....	119
ნახ. 32. მონოლითური რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირების სქემა, მზიდი წინასწარდაძაბული ბაგირებითა და კონსტრუქციული ღეროვანი არმატურებით .....	120
ნახ. 33. მონოლითური რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირება წინასწარდაძაბული ღეროვანი არმატურით .....	121

## მადლიერება

ავტორი დიდი მადლობელია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სრული პროფესორის, ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორის, საქართველოს მეცნიერებისა და ტექნიკის დარგის სახელმწიფო პრემიის ლაურეატის გელა ყიფიანის იმ კონსულტაციებისათვის, ყურადღების და დახმარებისათვის, რასაც მუდმივად გრძნობდა სადისერტაციო ნაშრომზე მუშაობის პერიოდში.

## შესავალი

დიდმალიანი შენობების, აეროპორტების, ანგარების, სხვადასხვა დანიშნულების დარბაზების, პავილიონების, საწარმოო და სამოქალაქო ობიექტების მშენებლობა – უპირველეს ყოვლისა დაიწყო იქ, სადაც ეს ტექნიკური პროგრესით, ტექნოლოგიური პროცესების ახალი მოთხოვნილებებით იყო განპირობებული. რკინაბეტონის და სხვა კომპოზიციური ახალი მასალების აღმოჩენამ, სამშენებლო მეცნიერების განვითარებამ, განსაკუთრებით გარსის თეორიის ანგარიშის სრულყოფამ მიგვიყვანა თანამედროვე თხელკედლიან სივრცითი კონსტრუქციის შექმნამდე, შესაძლებელი გახადა შენობის დიდი მალის გადახურვა შუასაყრდენების გარეშე, მასალის შედარებით ნაკლები დანახარჯებით.

სამამულო პრაქტიკაში, საზღვარგარეთისაგან განსხვავებით, მთავარი ყურადღება ეთმობა გარსების ასაწყობი რკინაბეტონის მშენებლობას. ასეთია სპორტის სასახლე თბილისში, შენობა წყალტუბოში, პავილიონი ერევანში.

განსაკუთრებული ყურადღება უნდა დაეთმოს ძვირადღირებული კომპოზიციური მასალების გამოყენებას ან ორიგინალური, პროგრესული ტექნოლოგიების გამოყენებას, რომელიც საშუალებას იძლევა მასალების, განსაკუთრებით შრომის დანახარჯების და ელექტროენერჯის რესურსების ეკონომიას.

ამასთან დაკავშირებით დიდმალიანი გადახურვის აგების ტექნოლოგია, კონსტრუქციის გაანგარიშების პრობლემა საკმაოდ რთულია, აქტუალურია და მოითხოვს გაანგარიშების განსაკუთრებული მეთოდების შემუშავებას. სწორედ ამ პრობლემის გადაწყვეტას ეხება წინამდებარე ნაშრომი.

დისერტაციის მიზანი წარმოადგენს დიდმალიანი გადახურვების ახალ ტექნოლოგიას, რომელიც ითვალისწინებს მონტაჟის საიმედოობას და უზრუნველყოფს დროის სიმცირეს, გაიაფებას და ენერგო რესურსების შემცირებას, აგრეთვე გარსული გადახურვების დაძაბულ დეფორმირებული მდგომარეობის გამოკვლევას, მისი ელემენტების კვანძების ზომების, ოპტიმიზაცია და ეფექტური გაანგარიშება

პრაქტიკული გამოყენებისათვის. გადმოიცეს ღეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი და ღეროვანი გუმბათის გაანგარიშების პროგრამის ალგორითმი. ჩატარდეს გუმბათის კონსტრუქციის ექსპერიმენტული გამოკვლევები. მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს პროგრესული ტექნოლოგიის შემუშავებაში, რამაც უნდა მოგვცეს ეკონომია შრომის სამუშაოებში, მასალებში და ენერგორესურსებში. აგრეთვე თეორიული მეთოდის შემუშავების შეფასებაში მდგრადი ელემენტის გარსებისთვის, რომელიც უზრუნველყოფს ოპტიმალურ ზომებს კონსტრუქციისთვის, ხისტი კვანძების გათვალისწინებით. გადმოცემულია ახალი მეთოდი, რომლის მიხედვითაც გუმბათი განიხილება როგორც ერთიანი გარსი წყვეტილად ცვალებადი სიმრუდით, რაც საგრძნობლად ამოკლებს გამოთვლის ალგორითმს.

მიღებულია უმომენტო გათვლების ცდომილება და მისი გამოყენების ზღვარი არათანაბარ განაწილებულ დაბევბთან მიმართებაში.

მიღებულია ღეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი. შემოთავაზებულია დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციის აგების ტექნოლოგია.

ნაშრომის ღირებულება მდგომარეობს თეორიულ და ექსპერიმენტის გამოკვლევებში, რომელიც წარმოადგენს საფუძველს პრაქტიკული რეკომენდაციებისათვის გარსული კონსტრუქციების მზიდი ელემენტებისათვის.

დისერტაციაში წარმოდგენილი კვლევის შედეგებმა გამოყენება ჰპოვეს.

მტკიცდება სხვადასხვა ავტორების მიერ მიღებული თეორიული და ექსპერიმენტალური შედეგების დამაკმაყოფილებელი თანადამთხვევით.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები მოხსენებული იქნა:

- რესპუბლიკური ღია სამეცნიერო კონფერენციაზე „მშენებლობა და ოცდამეერთე საუკუნე“ (თბილისი, 2005 წ.);
- საქართველოს საავტომობილო-საგზაო ინსტიტუტის იუბილისადმი მიძღვნილი საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე (თბილისი, 2005 წ.)



- საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო კონსტრუქციების კათედრის სამეცნიერო სემინარზე (თბილისი, 2006 წ.);
- საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო კონსტრუქციების, თეორიული მექანიკის, სამშენებლო მექანიკისა და სეისმომდებლობის კათედრების გაფართოებულ სამეცნიერო სემინარზე (თბილისი, 2006 წ.).

**პუბლიკაციები:** დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 1 მონოგრაფია, 2 პატენტი და 3 სამეცნიერო ნაშრომი.

**ნაშრომი მოცულობა:** დისერტაცია შედგება შესავლის, 5 თავის, დასკვნების, ლიტერატურის და დანართისაგან. იგი შედგება 135 გვერდისაგან, მათ შორის 42 ნახაზის და 6 ცხრილისაგან. ლიტერატურა მოიცავს 232 დასახელებას.

# 1. ლიტერატურის მიმოხილვა

## 1.1. პრობლემის თანამედროვე მდგომარეობა

მოცემულ თავში გადმოცემულია მიმოხილვითი ხასიათის გუმბათები და გამოკვლეულია თხელკედლიანი სივრცითი სისტემების გაანგარიშების მეთოდების განვითარების ძირითადი მიმართულებები. ჩატარებული ანალიზი ადასტურებს თემის აქტუალობას და საშუალებას გვაძლევს ჩამოვყალიბოთ კვლევის მიზანი.

### 1.1.1. დიდმალიანი გუმბათების მიმოხილვა

მოსახლეობის მნიშვნელოვანი კონცენტრაცია, რაც დიდი ქალაქების თანამდგევი პროცესია პერმანენტულად წარმოქმნის რიგ პრობლემებს, რომელთა გადაწყვეტა ასევე მუდმივ ძალისხმევას მოითხოვს.

საკითხს განსაკუთრებით ართულებს მოქალაქეების თავშეყრის ობიექტები, სადაც ისედაც მჭიდროდ დასახლებულ რაიონებში მათი რაოდენობა მკვეთრად იზრდება, რთულდება ტრანსპორტის მოძრაობა, ირღვევა ეკოლოგია, მძვინვარებს ანტისანიტარია და სხვა.

მაგალითად ქ. თბილისის ერთ-ერთ ცენტრალურ რაიონში მდებარეობს სტადიონი, სარკინიგზო სადგური და იქვე მიმდებარე ტერიტორიაზე რამოდენიმე ბაზრობა, რომლის გარეუბანში გადატანა უდიდეს პრობლემას მოუხსნიდა დედაქალაქს.

თბილისის მერიას უდაოდ აწუხებს აღნიშნული მდგომარეობა და ფიქრობს აიძულოს აღნიშნული ბაზრობათა ხელმძღვანელობა დააფინანსოს შეზღუდული სატრანსპორტო კვანძის სარეკონსტრუქციო სამუშაოები, მაგრამ ნებისმიერი ღონისძიება არაეფექტური იქნება იმ პრობლემატიკასთან შედარებით, რასაც ამ ობიექტების ადგილზე დატოვება უქადის ქალაქს.

მსოფლიოს მრავალწლიანი გამოცდილება ადასტურებს, რომ მსხვილი მრავალპროფილიანი სავაჭრო ობიექტები გააქვთ ქალაქგარეთ, ძირითადი მაგისტრალების გადაკვეთების სიახლოვეს და შენდება კომპლექსურად, ინფრასტრუქტურის სრული სპექტრის გათვალისწინებით.

ბუნებრივია თუ ასეთი საკითხი დადგება თბილისის მერიის წინაშე, კომპლექსის ძირითადი ობიექტი უნდა აშენდეს დახურული ბაზრის სახით, რაც დიდმალიან ნაგებობას წარმოადგენს და მსოფლიოს გამოცდილების მიხედვით, ძვირი ჯდება, მოითხოვს მშენებლობის გახანგძლივებულ ვადებს და სხვა.

ავტორთა მიერ შემოთავაზებული აღნიშნული ობიექტის აგების სიახლე ითვალისწინებს ორივე პრობლემის დაძლევის უნიკალურ შანსს.

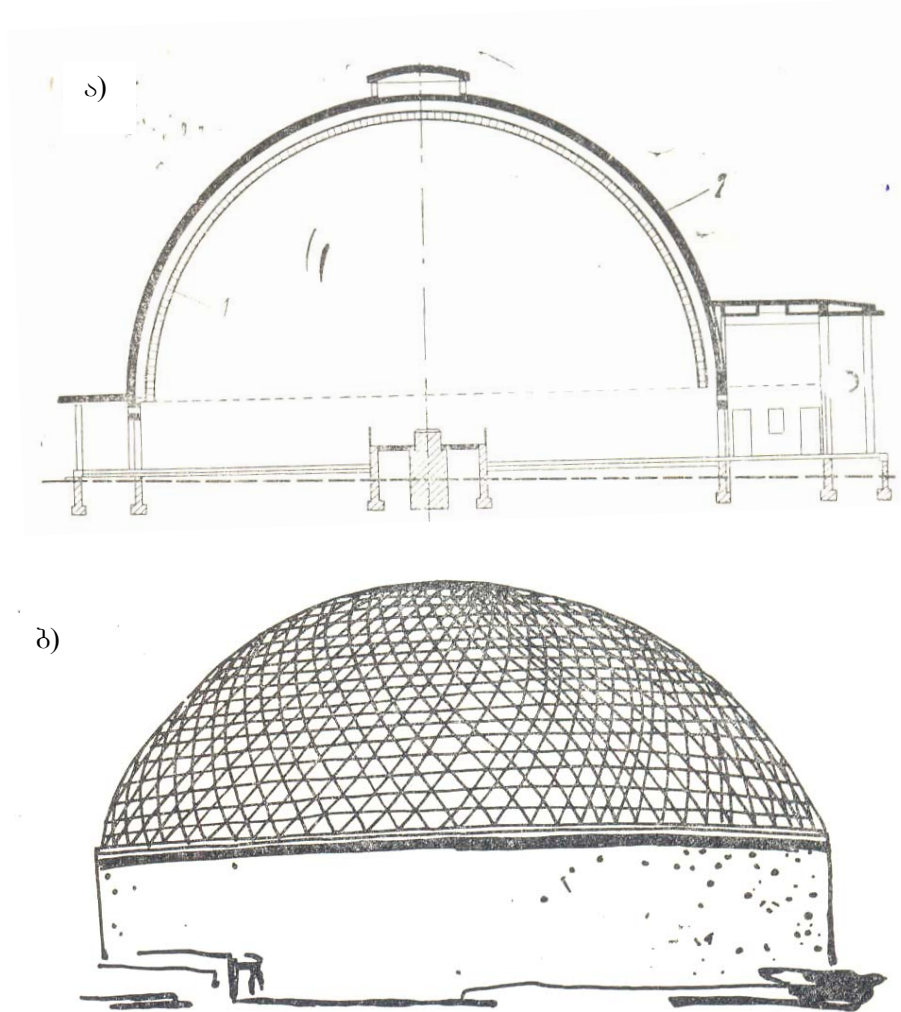
თავისთავად ძალზე საპასუხისმგებლო საინჟინრო ნაგებობებს წარმოადგენს დიდმალიანი გუმბათოვანი რკინა-ბეტონის გარსები, რომლებიც გამოიყენება ბაზრების, სპორტული ნაგებობების, გამოფენების და სხვათა მშენებლობისას და რომლებიც გარდა ფუნქციონალური დანიშნულებისა, საინტერესო არქიტექტურულ და ღირშესანიშნავ შენობათა კლასს განეკუთვნება, ამიტომ დიდი ხანია მსოფლიოს მრავალი სახელმწიფო საკუთარი სამშენებლო დონისა და ინტელექტუალური პოტენციალის გამოყენებით ცდილობს ვინ უკეთ და სწრაფად ააგებს დიდი მალის გუმბათს, რაც შეიძლება ნაკლები მასალების, შრომის და ენერგორესურსების დანახარჯებით.

დღეისათვის ცნობილია დიდმალიანი გადახურვების მშენებლობის რამდენიმე ტექნოლოგია, რომელთაგან ყველაზე გავრცელებულია მონოლითური, ანაკრები, ან შერეული რკინა-ბეტონის კონსტრუქციებით აგებული გუმბათოვანი ნაგებობები, რომელთა ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები თითქმის ერთნაირია და ითვლება ძვირადღირებულ ობიექტებად. ასეთი თუ შეიძლება ითქვას, სახელმწიფოთა შორის შეჯიბრის შედეგების გაცნობა და გამოცდილების გაზიარება წარმოებს პერიოდულად გარსების მშენებლობისადმი მიძღვნილ მსოფლიო სპეციალურ კონგრესებზე ან საერთაშორისო კონფერენციებზე.

დიდმალიანი კოჭოვანი გადახურვის გარსები შეიძლება განვიხილოთ როგორც სივრცული კონსტრუქციები, სადაც თვითოეული წყვილი საპირისპირო კოჭი მუშაობს ერთობლივად, როგორც თაღები.

კოჭები შეიძლება განლაგებული იყოს გარსის, როგორც შიგა ისე გარე ზედაპირზე ერთ-ერთი პირველი იენის პლანეტარიუმის გარსული გადახურვა, წარმოადგენს გუმბათოვან ჩაკეტილ კომპოზიციას

(ნახ. 1 ა,ბ) რომელსაც ირგვლივ წრიულად სარტყლის დონეზე მიშენება აქვს გაკეთებული.



ნახ. 1. იენის პლანეტარიუმის გარსული გადახურვა გუმბათოვანი ჩაკეტილი კომპოზიციით

გარსი არის ნახევრად სფერული ფორმის დიამეტრით 24,8მ. სისქით 6სმ.

სფერული კარკასი აგებულია დიდი დიამეტრის არმატურით, რომელიც განაპირობებს მის სიხისტეს.

გარსის არმატურის მონტაჟის შემდეგ, იწყება ქვემოდან ზევით წრიული სარტყელების ტორკრეტირება.

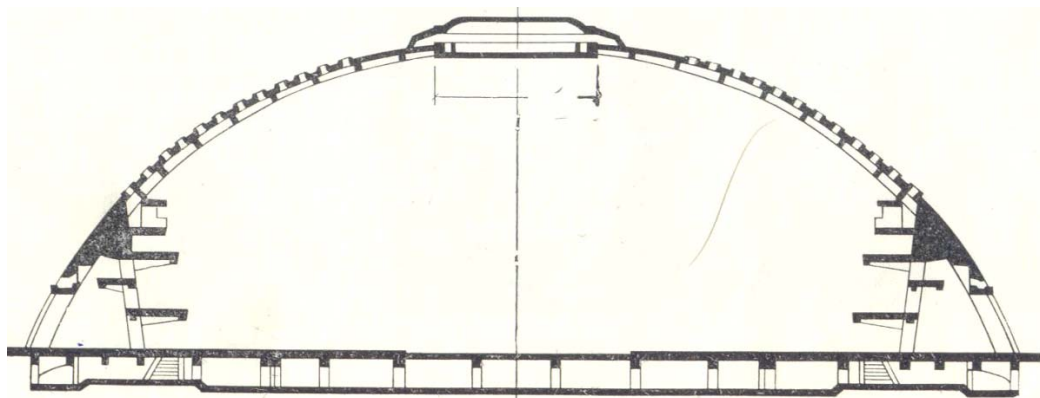
ასეთი თანმიმდევრობით ტორკრეტირების წარმოება უზრუნველყოფს გუმბათის მდგრადობას მშენებლობის პროცესში, რადგან ადრე დაბეტონებული სარტყელი ასწრებს გამავრებას და დატვირთვების თანაბრად გადანაწილებას საძირკველზე.

ამავე დროს წრიული ძაღვები განაწილებულია ისე რომ, დატვირთვები გადაეცემა ცენტრიდან ძირისაკენ თანაბრად სიმრუდის დარღვევის გარეშე.

რკინაბეტონის გარსი დაყრდნობილია წრიულ სარტყელზე რომლის კვეთია 40X80სმ და რომელიც განთავსებულია 20 რკინაბეტონის კოლონაზე.

გარსული გადახურვის სამშენებლო ოპერაციები მრავალრიცხოვანია, რთულია, მოითხოვს დიდ სიზუსტეს და მშენებლობის გახანგრძლივებულ პროცესს.

მაგალითად, სპორტის სასახლე ოპპორტოში (ნახ. 2) და დალასში (ტეხასის შტატი) (ნახ. 3 ა,ბ) წარმოადგენენ უნივერსალურ ნაგებობებს, რომლებიც გადახურულია კოჭოვანი გარსებით და გამოიყენებიან სპორტული შეჯიბრებებისათვის, შეკრებებისათვის და მასობრივი სანახაობებისათვის.



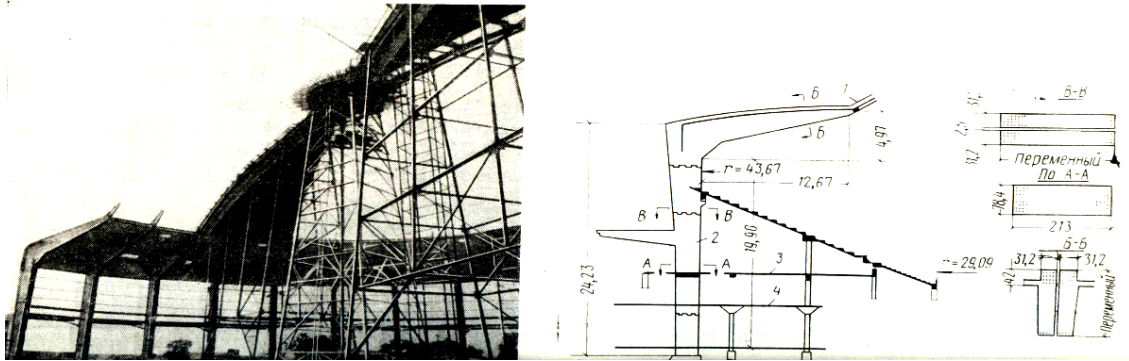
ნახ. 2. სპორტის სასახლე ოპპორტოში

ოპპორტოში გარსული გადახურვის დიამეტრი არის 92 მეტრი და აწევის ისარი 15 მეტრი.

გუმბათი და მზიდი კოლონები აგებულია მონოლითური რკინა-ბეტონისაგან ხის ქარგილების გამოყენებით

პირველ რიგში შესრულებული იქნა ყველა მონოლითური კონსტრუქციების აგების სამუშაოები, შემდეგ დაეწყო გადახურვის ანაკრები კონსტრუქციები სარდაფისთვის შესაბამისი დამონოლიტებით და შემდეგ იქნა ჩასხმული უშუალოდ გუმბათის რკინაბეტონის კონსტრუქციები.

აღნიშნული გუმბათოვანი გადახურვის არქიტექტურა ერთი შეხედვით მძიმეა და ძაღზე დიდი, რაც ძირითადად გამოწვეულია გუმბათის სიმაღლით, სადაც აწევის ისრის შეფარდება გუმბათის მალთან შეადგენს 1/4,8. ძლიერი და დიდი ზომისაა ჭრილში რკინა-ბეტონის წრიული კოჭი, რასაც ეყრდნობა უშუალოდ გუმბათი და ა.შ.



ნახ. 3. სპორტის სასახლე დალასში

გუმბათის აგების აღნიშნული ტექნოლოგია ცნობილია. მოითხოვს შრომის, მასალებისა და ენერგორესურსების მნიშვნელოვან დანახარჯებს.

რაც შეეხება დალასის უნივერსალური დარბაზის გადახურვას, ის საყურადღებოა თავისი კონსტრუქციული გადაწყვეტილებით, მისი სიმაღლე შეადგენს 28 მ, ხოლო დიამეტრი 90 მ.

გუმბათი შედგება ორი კონცენტრირებული ნაწილისაგან. ცენტრალური თხელკედლიანი გარსისაგან დიამეტრით 61,2 მ. და გარე წრიული ნაწილისაგან, რომელიც შედგება 32 ცალი „F“ მაგვარი კოლონა კონსოლისაგან.

მონოლითური რკინაბეტონის გარსი დამზადებულია 16 თხელკედლიანი სფერული სამკუთხა ფორმის კონსტრუქციისაგან-პანელისაგან, რომლებსაც ბოლოში თავი წაკვეთილი აქვს, გვერდები გამაგრებული რადიალური მიმართულების კოჭებით. ყველა სფერული სამკუთხედი გამოყოფილია ტემპერატურული ნაკერით.

სამკუთხედების საყრდენად გამოყენებულია „F“ მაგვარი 32 რკ/ბ კონსოლიანი კოლონა.

ზედა ნაწილით სამკუთხედები ეყრდნობა ცენტრალურ ფილას, რომელიც არის სფერული სეგმენტის ფორმის, დიამეტრით 6,6 მ.

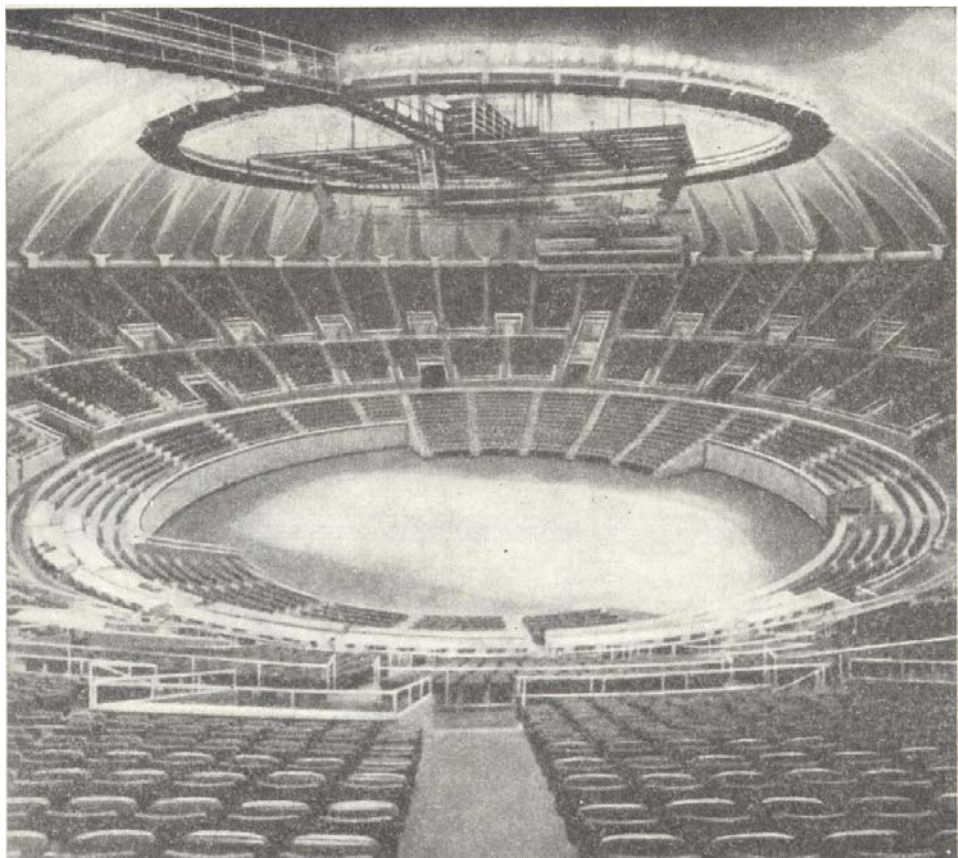
ასეთი კონსტრუქციული სტრუქტურა პირველ რიგში განპირობებულია ეკონომიური ეფექტურობით.

„I“-მაგვარი რკინაბეტონის კოლონები არის ამფითეატრის, გალერეის და ნაწილობრივ არენის მთავარი მზიდი კონსტრუქცია.

მთავარი კონსოლის გარდა კოლონას აქვს საწინააღმდეგო მიმართულებით მეორე კონსოლი, რომელსაც ეყრდნობა გალერეის გადახურვისათვის.

ამ შემთხვევაშიც შრომის და ელექტრო ენერჯის დანახარჯი დიდია.

მასიური კომპოზიცია ნაგებობისა ურბანოში (აშშ) ილინოისის უნივერსიტეტის აუდიტორიისა შესრულებულია თაღის მაგვარი ჩაღრმავების მსგავსი, რომელიც გადახურულია გარსით (ნახ. 4 ა, ბ)



ნახ. 4. ურბანოში ილინოისის უნივერსიტეტის აუდიტორიის (აშშ) მასიური კომპოზიცია ნაგებობა

უზარმაზარი რკინაბეტონის გარსი 132 მ. დიამეტრით, 40,9 სიმაღლით შედგება 48 ერთნაირი სიდიდის სექტორისაგან.

თეფშის მაგვარი ჩაღრმავება, რომელშიც განლაგებულია სკამები, თავდება ძლიერი რკინაბეტონის წრიული სარტყლით.

გუმბათის ელემენტები ზემოთ ეყრდნობა აღნიშნული რკინაბეტონის წრიულ სარტყელს. მონტაჟის მთელ პერიოდში კომპურა ამწე, რომელიც მოთავსებულია შენობის შუაგულში, მაგრდება კომპურა ფორმის დროებით კონსტრუქციაზე. მონტაჟი წარმოებს ორი მოპირდაპირე სექტორისა, რათა მშენებლობის პროცესში დაცული იყოს კონსტრუქციის წონასწორობა.

წრიული რგოლი დგება კომპურაზე, ასაგები გუმბათის ზენიტში. როდესაც შეიკვრება სექტორები, შემდეგ გამოეცლება კომპურა.

გარსი დაბეტონებულია გადასაადგილებელი ქარგილით.

მიუხედავად ამისა, საქარხნო და სამშენებლო მოედანზე ჩატარებული სამონტაჟო სამუშაოების ღირებულება მაღალია.

სიღებელ-აბესში აგებულია გარსული ტიპის ბაზარი კომპლექსი, ირგვლივ პერიმეტრზე მიშენებული სათავსებით, რომლებიც წარმოადგენენ კონტრფორესებს კონსტრუქციებზე და იღებენ გუმბათის გამბჯენ ძალებს.

გუმბათის დიამეტრია 60 მ. (ნახ. 5 ა, ბ).

ასაწყობი რკინაბეტონის ელემენტები ეწყობა წრიულად და მონოლითდება, შემდეგ ეწყობა მომდევნო რიგის ელემენტები, რომლებიც აგრეთვე მონოლითდება და ა.შ. მონტაჟდება 13 ჰორიზონტალური წრიული რიგი, თითოეული რიგი აწყობილია 48 ერთი ტიპოზომის რკინაბეტონის ელემენტისაგან. რაც შეეხება გუმბათის დამამთავრებელ ნაწილს, ისიც შედგება 24 ცალი დიდგაბარიტიანი ასაწყობი ელემენტისაგან.

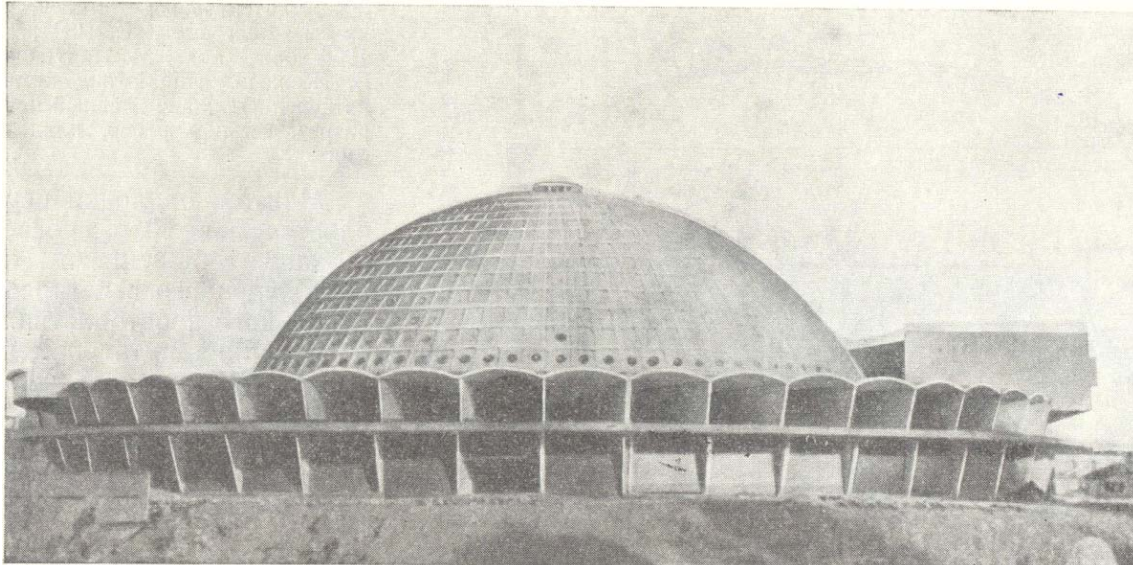
ასაწყობი რკინაბეტონის ელემენტი წარმოადგენს კესონურ რკინაბეტონის წიბოებით კონტურზე შემოზღუდულ ფილას, რომესაც შუაში გააჩნია სანათური ღიობი.

გარსი მთლიანად ეყრდნობა რკინაბეტონის სარტყელს, რომელიც თავის მხრივ დაყრდნობილია რკინაბეტონის კოლონებზე.

აღნიშნული მშენებლობის გაძვირება გამოიწვია ასაწყობი რკინაბეტონის ელემენტების დიდმა რაოდენობამ, რასაც დასჭირდა დიდი რაოდენობის, დიდი სიზუსტით დამზადებული მეტალის ფორმები.



თბილისის სპორტის სასახლე გეგმაში კვადრატული ნაგებობაა. იგი გადახურულია ასაწყობი რკინაბეტონის გარსით, დიამეტრით 77 მ. ისრის აწევით 13მ. გარსის შუაგულში დატოვებულია წრიული ღიობი დიამეტრით-13,5მ.



ნახ. 5. თბილისის სპორტის სასახლე კვადრატული ნაგებობის გეგმა

გარსი დაპროექტებულია 10 ტიპური ტრაპეციის ფორმის საფეხურიანი ელემენტისაგან.

მონოლითური სარტყელი გეგმაში წარმოადგენს სწორ რვაკუთხედს, რომელიც ოთხი გვერდით ეყრდნობა კვადრატული ფორმის სარტყელს, ხოლო დანარჩენი ოთხი გვერდით კი გვერდითკედლებს.

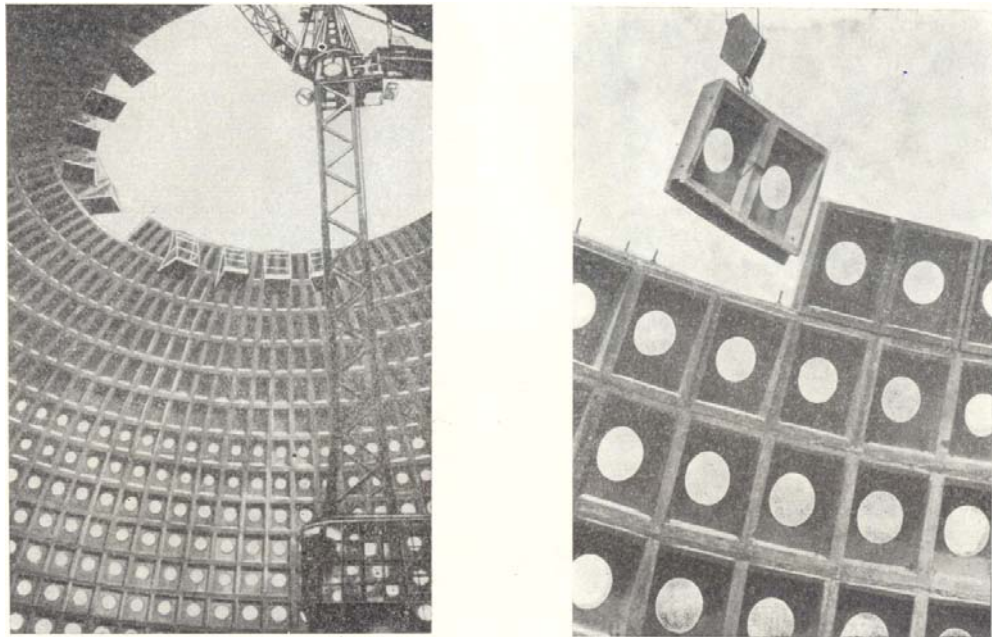
გარსის მონტაჟის დროს დეფორმაციის მინიმუმამდე დასაყვანად, ავტორებმა შეიმუშავეს ციკლური მეთოდი: მონტაჟი წარმოებს 2 ამწვითი “ლკსმ5-5ა” განლაგებული გარსის ქვედა სივრცეში, რომელიც მოძრაობდა პარალელური ქორდების გასწვრივ.

აღნიშნული აგების ტექნოლოგია შედარებით გაადვილებულია, მაგრამ მასაც გააჩნია მნიშვნელოვანი ნაკლოვანებები.

კერძოდ, ტრაპეციული ფორმის საფეხურიანი ელემენტი უნდა იყოს დამზადებული მაღალი სიზუსტით. თითოეული ელემენტი იწონის 8-10 ტონას. ასეთი დიდი ზომის ფორმის დამზადება და შემდეგ მისი ექსპლუატაცია ჯდება ძალიან ძვირი (ნახ. 6).

ასე, რომ აღნიშნული გუმბათის აგების ტექნოლოგია გაადვილებულია, მაგრამ მიუხედავად მონტაჟის სიზუსტის მკაცრი

მოთხოვნების დაცვისა ტექნიკურ ეკონომიური მაჩვენებლების ეფექტურობა დიდად არ განსხვავდება სხვა ტიპის ტექნოლოგიებისაგან.



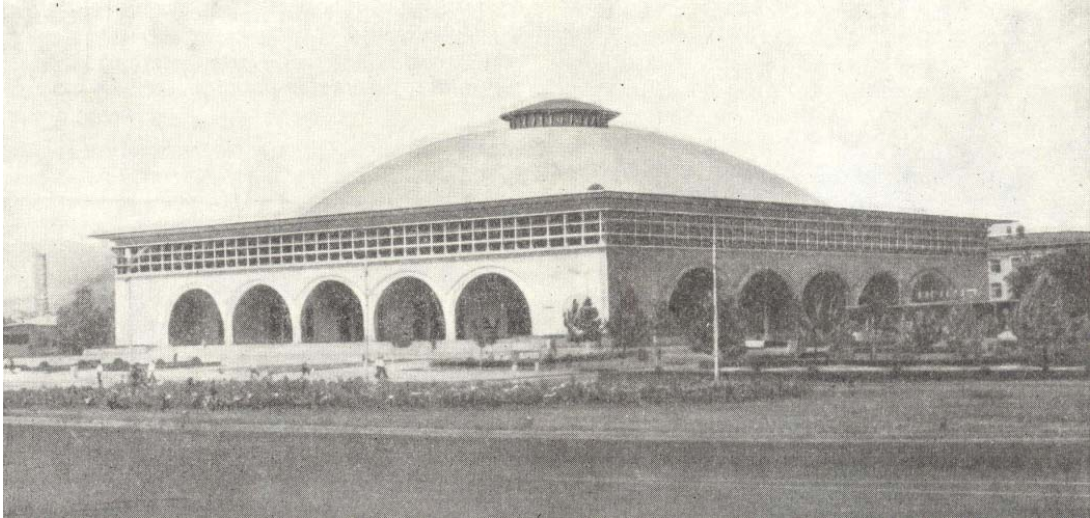
ნახ. 6. ტრაპეციული ფორმის საფეხურიანი ელემენტი

აღნიშნული კონსტრუქციების აგების ტექნოლოგიების მოდიფიკაციის სხვა და სხვა მაგალითები ცხადყოფს მშენებლობის ძვირადღირებულებას.

ზოგიერთი ძალიან ძვირია, რაც გამოწვეულია მასალების, ენერგორესურსების და შრომის დანახარჯების სიძვირით.

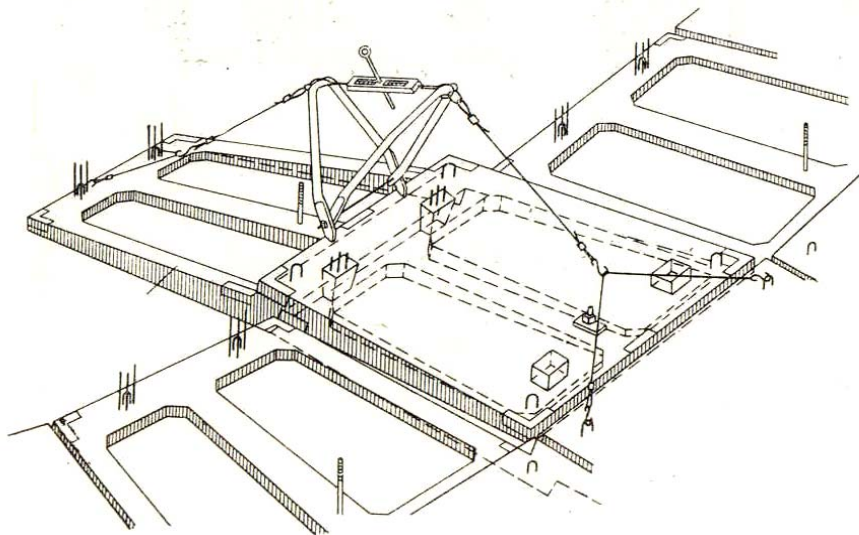
სხვადასხვა დროს ხდებოდა მშენებლობის გაიაფების მცდელობა. ერთ-ერთი ასეთი რკინაბეტონის გუმბათის აგების მონაცემები, რომელსაც პირობითად „ქართული ვარიანტი“ ეწოდება მკვეთრად და მნიშვნელოვლად განსხვავდება ზემოთ აღნიშნული სამივე ტიპის ნაგებობათა ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებისაგან.

მაჩვენებელთა ობიექტური შედარებისა და გაანგარიშების კორექტულობის უზრუნველსაყოფად მიზანშეწონილად მივიჩნიეთ შევარჩიოთ ერთი და იგივე ფართობის და ერთი და იგივე სიმაღლეზე აგებული (  $=10$  მ.) მონოლითური რკინაბეტონის გუმბათოვანი გადახურვების ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები. ამ შემთხვევაში რკინაბეტონის მოცულობა და ლითონის სვეტების წონა – შესადარებელი ობიექტებისათვის თითქმის ერთი და იგივეა.



ნახ. 7. სპორტის სასახლე

რაც შეეხება გუმბათოვანი გადახურვების აგების ტექნოლოგიას, სადაც ტრადიციული ვარიანტისათვის საჭიროა დიდი მოცულობის დამჭერი ხარახოების და გუმბათოვანი ფორმის ქარგილის მოწყობა, აგრეთვე ყველა სამუშაოების – საარმატურე, საშემდუღებლო, დაბეტონების, სახურავის მოწყობის, სამღებრო, ჭაღების შეკიდვის, ხარახოების და ქარგილების მოსხნის შრომატევადი ოპერაციები წარმოებს 10 მეტრის სიმაღლეზე.



ნახ. 8. დამჭერი ხარახოების და გუმბათოვანი ფორმის ქარგილის მოწყობა

ქართული ვარიანტისათვის მკვეთრად შემცირებულია სამუშაოთა ჩამონათვალი, რადგან გუმბათის დაბეტონება, სახურავის მოწყობა და

სხვა წარმოებს უშუალოდ 0-ოვან ნიშნულზე და შემდეგ ხდება მისი საპროექტო ნიშნულამდე ერთდროული აწევა, ამიტომ მშენებლობის ვადები თუ ტრადიციული ვარიანტისათვის შეადგენს 3,5-დან 4 წლამდე, ქართული ვარიანტისათვის ერთი წლით განისაზღვრება.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული კორექტულობის მიზნით ვიღებთ მარტო გუმბათის აგების ღირებულების შედარებას (მხედველობაში მხოლოდ რკინაბეტონის სამუშაოების და ლითონის სვეტების დამზადებისა და მონტაჟის ღირებულებები, რომლებიც უზრუნველყოფს საანგარიშო დატვირთვებისა სეისმომდებლობის მოთხოვნებს).

ტრადიციული ვარიანტისათვის ეს თანხა შეადგენს 882,2 ათას ლარს, ხოლო „ქართული ვარიანტისათვის“ – 529,16 ათას ლარს.

დამატებითი ღირებულების გათვალისწინებით, შესაბამისად ტრადიციული ვარიანტისათვის საჭიროა 1147,3 ათასი ლარი, „ქართული ვარიანტისათვის“ – 638, 5 ათასი ლარი.

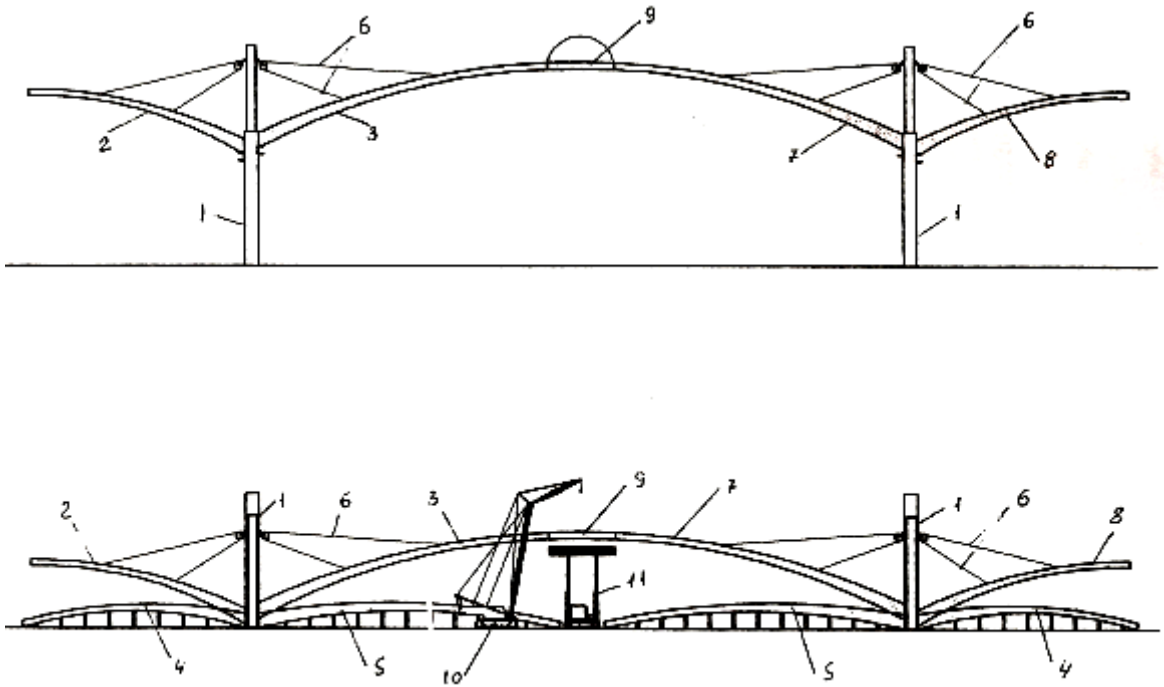
ამრიგად, მხოლოდ რკინაბეტონის მონოლითური გუმბათის აგებისას შეგვიძლია დავზოგოთ 448,5 ათასი ლარი. რასაკვირველია აბსოლუტური ეკონომიკური ეფექტი მეტი იქნება, თუ ყველა სამუშაოების ღირებულებას (სახურავის მოწყობა, შეღებვა, მინების ჩასმა, ჭადების შეკლიდვა და სხვა) გაითვალისწინებდით, რადგან „ქართული ვარიანტისათვის“ აღნიშნული ოპერაციები, გუმბათის აწევამდე 0-ოვან ნიშნულზე ხორციელდება.

ამრიგად შემოთავაზებული ვარიანტი, განსხვავებით ტრადიციულისაგან იძლევა საშუალებას დაეძლიოთ ორივე პრობლემა:

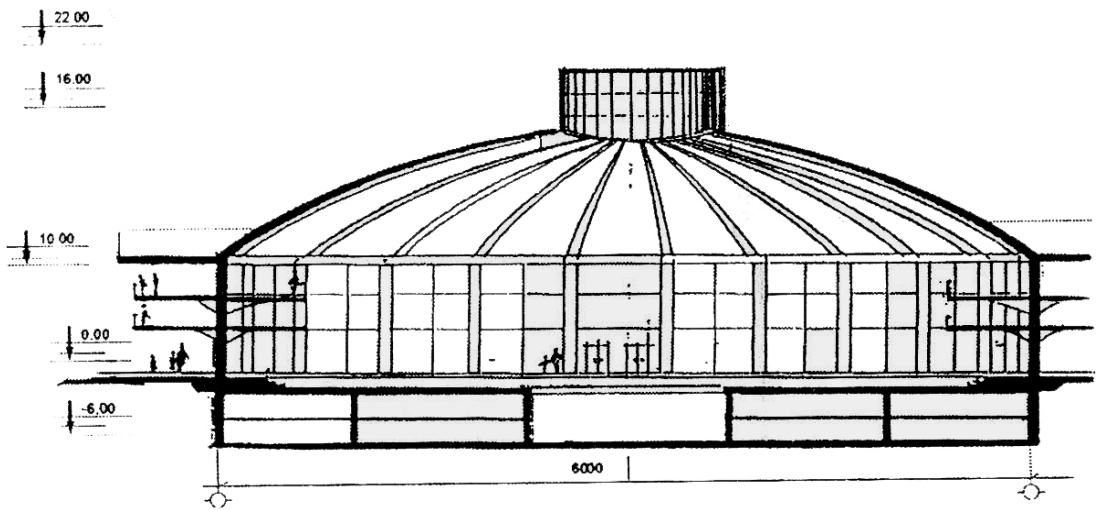
1. მნიშვნელოვნად გააკაიფოდ მშენებლობა;
2. 3-ჯერ შევამციროთ მშენებლობის ვადები.

დიდმალიანი გუმბათოვანი რკინაბეტონის გარსების აგების ახალ ტექნოლოგიას გააჩნია რიგი უპირატესობანი, რაც გამოიხატება შემდეგში:

კონსტრუქციული თვალსაზრისით შემოთავაზებული ვარიანტი თითქმის ანალოგიურია დღეს არსებული დიდმალიანი რკინაბეტონის გუმბათებისა (ნახ. 9), რომელთა გარსსაც გააჩნია რადიალური და წრიული სიხისტის მზიდი კოჭები.



ნახ. 9.

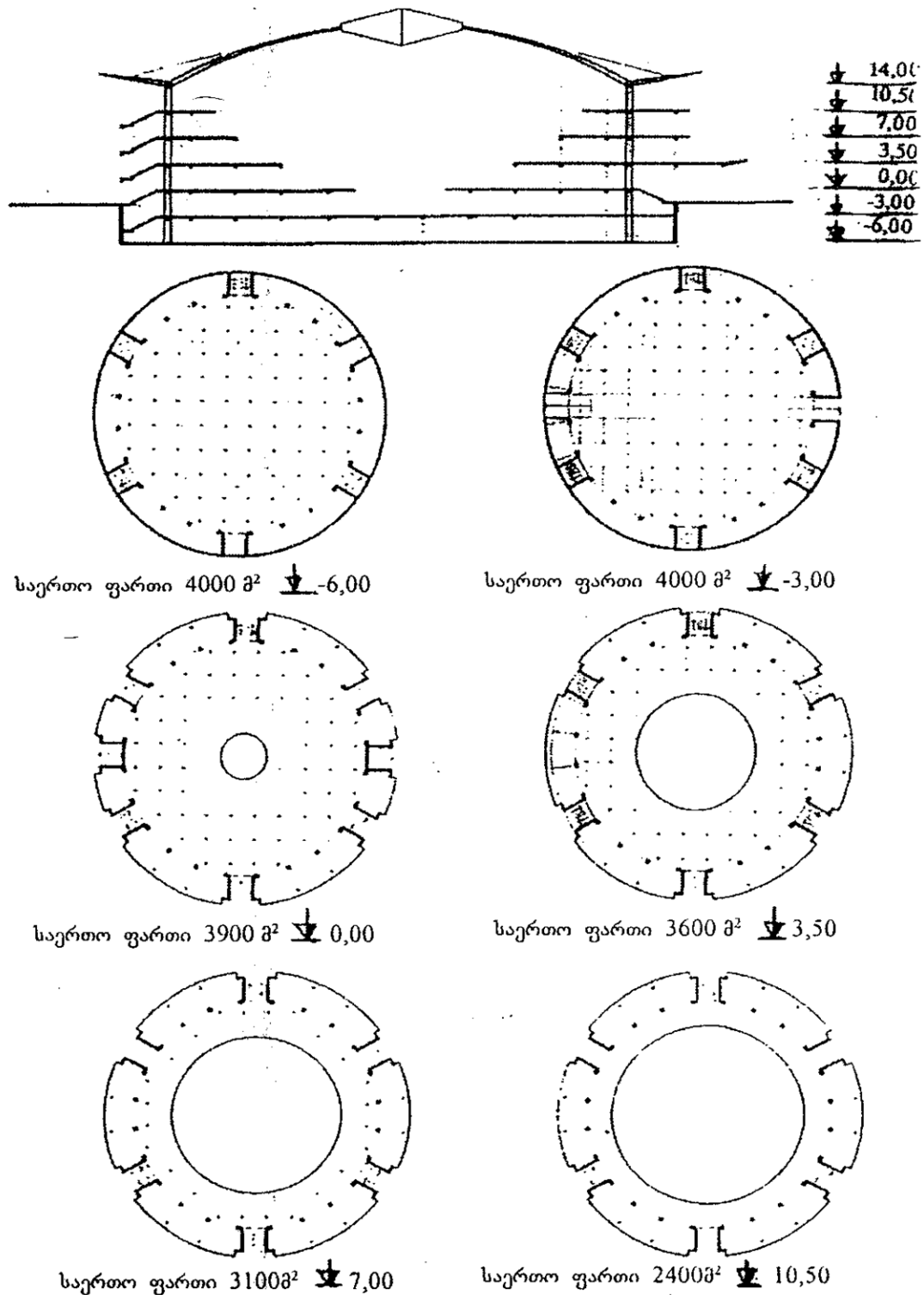


ნახ. 10. დიდმალიანი რკინაბეტონის გუმბათი

წრიული კოჭები, რომლებიც იღებენ დიდ განმბრჯენ ძალებს, არმირებულია უწყვეტი, მაღალი სიმტკიცის წნული არმატურით, რაც მთლიანად გამორიცხავს განსაკუთრებულ საპასუხისმგებლო საშემდგენებლო სამუშაოებს, ხოლო რადიალური კოჭები არმირებულია კლასის დეროვანი არმატურით.

აღსანიშნავია, რომ გუმბათოვანი გადახურვის ცილინდრული ფორმის შენობები საშუალებას აძლევს არქიტექტორს განახორციელოს

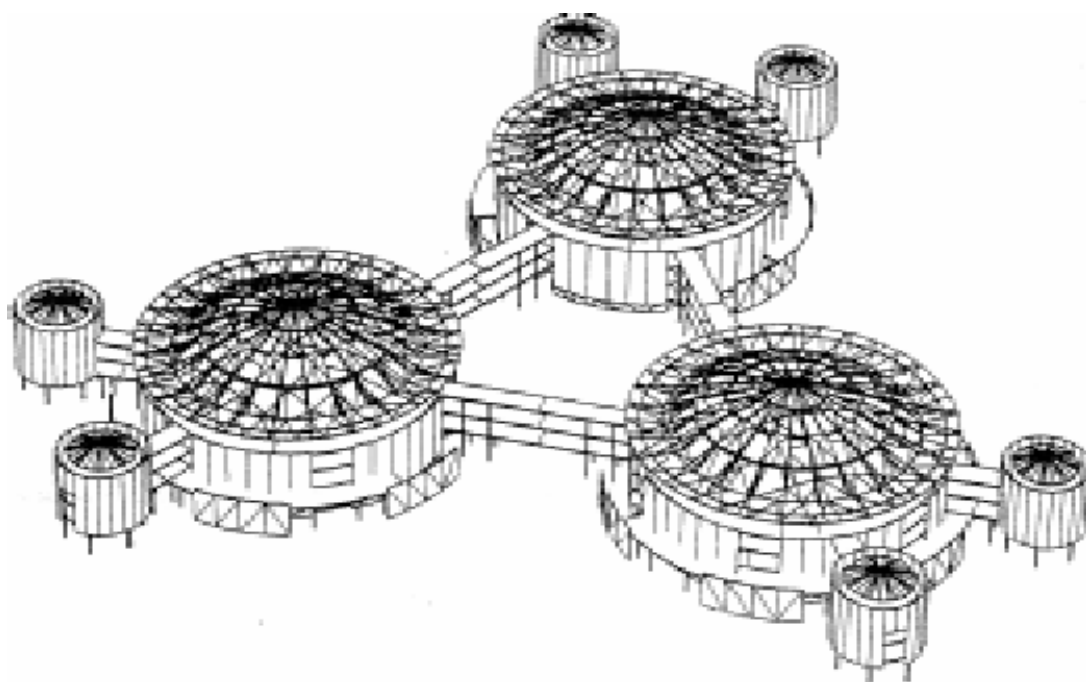
გეგმარების ფართო სპექტრი, რაციონალურად გამოიყენოს ნაგებობის სივრცე – კერძოდ, სასარგებლო ფართობის გაზრდის მიზნით, წრიულად განლაგოს სვეტებზე რამდენიმე იარუსი (ნახ. 11), სვეტების ოპტიმალური სიმაღლის შერჩევის შემთხვევაში, შესაძლებელია გაიზარდოს იარუსების რაოდენობა და სხვა.



ნახ. 11. სვეტებზე წრიულად განლაგებული რამდენიმე იარუსი

სვეტების სიმაღლის 15 მეტრამდე გაზრდის და ნაგებობის სივრცის რაციონალურად გამოყენების შემთხვევაში, შესაძლებელია სასარგებლო ფართი 21 მ<sup>2</sup>-მდე გაეზარდოს, კომუნიკაციების, სასაწყობო მეურნეობის და მისასვლელი საავტომობილო გზების სარდაფში გათვალისწინებით. აღნიშნული ვარიანტი ესკიზურად ნაჩვენებია მე-12 ნახ-ზე.

მე-12 ნახ-ზე პირობითად ნაჩვენებია სავაჭრო კომპლექსი, რომელიც ითვალისწინებს სამი 60-მეტრიანი დიამეტრის გუმბათოვანი ნაგებობის ერთობლივ ფუნქციონირებას – სასარგებლო ფართით 63 ათასი მ<sup>2</sup>.



ნახ. 12. სავაჭრო კომპლექსი, სამი 60-მეტრიანი დიამეტრის გუმბათოვანი ნაგებობა

### 1.1.2. თხელკედლიანი სივრცითი სისტემების გაანგარიშების მეთოდების განვითარების ძირითადი მიმართულებები

თანამედროვე სამშენებლო მეცნიერება იკვლევს მრავალ ობიექტს, რომელთა გაანგარიშება, მათი სირთულიდან გამომდინარე, დაკავშირებულია ანალიზური და რიცხვითი მეთოდების გამოყენებასთან. აქედან გამომდინარე ის უყენებს დიდ მოთხოვნებს კონსტრუქციების გაანგარიშების და პროექტირების ახალი მეთოდების დანერგვას. ასეთ ამოცანას წარმოადგენს დიდმალიანი გადახურვების აგების ტექნოლოგია.

გარსთა თეორია რეოლოგიურ თვისებებთან დაკავშირებით იყოფა რამდენიმე ნაწილად. უკანასკნელ წლებში ყურადღება ექცევა ფიზიკური არაწრფიეობის, პლასტიკურობის, ცოცვადობის, ხანგამძლეობის და სიმტკიცის პრობლემებს.

გარსთა თეორიის ამ განშტოების გამორჩეულ თავისებურებებს წარმოადგენს ის, რომ საანგარიშო განტოლებები მიიღება მასალის რეოლოგიური მოდელის შესაბამისად წონასწორობის განტოლებებისა და დეფორმაციის გათვალისწინებით, რომელთა სახე არ არის დამოკიდებული მოდელის მასალაზე. გეომეტრიულად წრფივი სახით ამოცანის დასმაში იგება ამოხსნად განტოლებათა სისტემა.

გარსების და ფირფიტების პლასტიკურობის თეორიის აგებისას გამოდიან პლასტიკურობის თეორიის სამგანზომილებიანი ამოცანების განტოლებებიდან, თუ არ არის გამოყენებული გარსების და ფირფიტების თეორიის გაანგარიშების აგების პირდაპირი გზა. გამოყენებას პოულობს ასევე დეფორმაციათა თეორია, რომელსაც მიყვავართ სასრულ დამოკიდებულამდე, ასევე დენადობის და ცოცვადობის თეორია.

რთული დატვირთვების შემთხვევაში დეფორმაციათა თეორიასთან სრულყოფილ შედეგებს იძლევა დენადობის თეორია. განსაკუთრებულად გამოითვლება დენადობის ზედაპირის აგებულება (დატვირთვის ზედაპირი). ეს და სხვა სპეციფიკური საკითხები, რომლებიც დაკავშირებულია გარსის მასალის პლასტიკურობის თვისებებთან, განხილულია მთელ რიგ შრომებში, კერძოდ ა. სავჩუკის [1] და ი. ლეპიკის ორ ნაშრომში „გლუვ ფრეკად-პლასტიკურ ფირფიტებისა და გარსების თეორიის ზოგიერთი საკითხები“ [2] და „დრეკად-პლასტიკური და ხისტ-პლასტიკურ ფირფიტებსა და გარსების წონასწორობა“. არადრეკადი გარსების პრობლემებთან დაკავშირებით სპეციალურად მიძღვნილი იყო საზაფხულო სკოლები ესტონეთში [3, 2]. ქვემოთ ნაჩვენებია სხვა განხილვებიც.

ყოფილ საბჭოთა კავშირში პლასტიკურობის თეორიაში ერთ-ერთმა პირველმა დაიწყო მუშაობა ნ.მ. ბელიაევმა: მას აქვს მოცემული შედარებები სენ-ვენანის – მიზესის – გენკის და რეისის თეორიებისა და მათი განზოგადება. ეს გამოკვლევები მოცემულია სამ ნაშრომში,



რომლებიც დაწერილია ნ.მ. ბელიაევის მიერ ა.კ. სინიცკისთან ერთად [4-6].

ფიზიკურად არაწრფივი მასალისაგან შედგენილ გარსებს ეძღვნება მიმოხილვა „ფიზიკურად არაწრფივი თხელკედლიანი გარსების მდგრადობა დიდი გადაადგილების დროს“, რომლის ავტორებია დ.ვ. ვაინბერგი, ე.ა. გოცულიაკი და ვ.ი. გულიაევი [190], ასევე წიგნები ი.ორშიკის [223] და ვ.ვ. პეტროვის, ი.გ. ოფინიკოვის და ვ.ი. იაროსლავსკის [147]. ჩამონათვალში უკანასკნელ წოგნში განიხილება წრიულ ცილინდრულ გარსების ფიზიკური და გეომეტრიული არაწრფივი თეორიები: მომენტური, ნახევრადუმომენტო და უმომენტო, რომლებშიც განტოლებები წარმოადგენილია ნახრდებში. ამ უკანასკნელთა ამოხსნა ხორციელდება გაწრფივების პრინციპით ბიჯური მიმდევრობითი დატვირთვა მეთოდით. ფირფიტებისათვის მიღებულია და მიახლოებითი მეთოდით ამოხსნილია წრფივად ცვლად კოეფიციენტებიანი განტოლებები.

ი.რიხლევსკის და გ.ს. შაპიროს სტატიაში ‘იდეალურად პლასტიკური ფირფიტებისა და გარსები“ [195] განხილულია წრფივი და არაწრფივი ამოცანები, ოპტიმალური პროექტების ამოცანები, ასევე რკინაბეტონის ფირფიტებისა და გარსების გაანგარიშებაში პლასტიურობის ტეორიის გამოყენების შესაძლებლობები.

წრიული ფირფიტის დრეკად-პლასტიური და პლასტიურ-ხისტი ღუნვა, ასევე წრიულ ფირფიტის პლასტიურ-ხისტი დეფორმაციები დარტყმისას განიხილება გ.ს. შაპიროს შემდეგ სტატიებში [202, 205, 206, 105] (უკანასკნელი პ.ა. კუზინთან ერთად). ფიზიკურად არაწრფივი მასალებისაგან (ანიზოტროპული, შედგენილ) ანიზოტროპულ გარსთა თეორიას ეძღვნება მ. მიქელაძის წიგნი [120], რომელშიც განხილულია გარსები პლასტიურ-ხისტი და დრეკად-პლასტიური მასალებისაგან, აგრეთვე თანაბარსიმტკიციანი ორთოტროპული ერთფენიანი და მრავალფენიანი გარსები.

ვ. ოლშაკის და ა. სავჩუკის წიგნში [139] გამოკვლეულია ის სიტუაციები, რომლებშიც გარსის მასალა არის წრფივად ბლანტადდრეკადი და იმყოფება დამყარებულ ცოცვად მდგომარეობაში, ან დრეკად-პლასტიკურ მდგომარეობაში. ამავე წიგნში განიხილება

შრომები დ. დრუკერის, გ. იზოპის, ა.ა. ილიუშინის, მ.შ. მიქელაძის, ი.ნ. რაბოტნოვის, ვ. ოლშაკის, ს.მ. ფაინბერგის, პ.ხოჯას, რ. შილდას და სხვ. რკინაბეტონის გარსებისა, რომლებშიც შეისწავლება გარსების ზღვრული მდგომარეობა და მზიდი შესაძლებლობები.

[231] ნაშრომში, რომელიც წარმოადგენს სადოქტორო დისერტაციას, ნაჩვენებია წრფივი თეორიის გამოყენება, როდესაც გარსი განიცდის დიდ ძვრებსა და დიდ დეფორმაციებს, რომლებიც წარმოიშვებიან დრეკადობის ზღვრის მიღმა იმ პირობებში, როდესაც არ ვითვალისწინებთ ან ვითვალისწინებთ განივ ძვრებს. წონასწორობის განტოლებები მიღებულია შესაძლო გადაადგილებების პრინციპის საფუძველზე სისქის რეგლამენტირებული შეცვლის ჰიპოთეზის გამოყენებით. კლასიკური მეთოდი გამოყენებულია ახალ გეომეტრიულ ფორმულირებასთან ერთად, რომელსაც მივყავართ ერთობლივი დეფორმაციის პირობების უბრალო აღწერასთან წრფივი განზოგადოებული დეფორმაციის ტერმინებში, ისევე როგორც განზოგადოებული ფუნქციის პირობის ტერმინში. განხილულია მრავალკავშირიანი გარსების შემთხვევა. გამოყენებულია ვარიაციული მიდგომა, როგორც ლაგრანჟის, ისე კასტილიანის ფორმით. პრაქტიკული გაანგარიშებისათვის აღებულია სასრულ ელემენტთა მეთოდი (ს.ე.მ.) მრუდწირული სასრული ელემენტებით კომბინაციაში ბიჯურ პროცესებთან.

აღნიშნოთ ა.ვ. ბურლაკოვის, გ.ი. ლვოვის და ო.კ. მორაჩკოვსკის ორი წიგნი [32 და 33]. მათ აქვთ ოდნავ განსხვავებული დასახელებები, მაგრამ სხვადასხვა შინაარსის. პირველ მათგანში განხილულია ხანგრძლივი სიმტკიცის კრიტერიუმები და გარსების რღვევების ექსპერიმენტალური გამოკვლევები, ხოლო მეორეში – ერთგანზომილებიანი და ორგანზომილებიანი ამოცანები.

ა.ნ. პოდგორნის, ვ.ვ. ბორტოვის და ვ.დ. კოლომაკას წიგნში [151] გარდა იმისა, რომ აგებულია ამოხსნად განტოლებათა სისტემა, რომელიც ითვალისწინებს ცოცვადობას, განხილულია დერძსიმეტრიული და არადერძსიმეტრიული დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა (დ.დ.მ.) და მოქნილი იზოტროპულ და ანიზოტროპული გარსების მდგრადობა მუდმივი და ცვლადი სისქით.

აღნიშნოთ კიდევ ორი პუბლიკაცია გარსებზე, რომლებიც

დამზადებულია ცოცვადი მასალისაგან. ესენია ი.ი. გოლდენბლატის და ნ.ა. ნიკოლაენკოს [49] და აგრეთვე ი.გ. ტერეგულოვის წიგნი [191].

ორი შრომის მიმოხილვა, რომელშიც განხილულია სხვადასხვა რეოლოგიური თვისებების მქონე მასალის გარსები, ეკუთვნის ლ.მ. კურშინს [196]. იგი აღნიშნავს ამ კლასის ამოცანების ამოხსნის სირთულეს, განპირობებულს გარსის სისქეზე არაწრფივი ნორმალური ძაბვების განაწილებით, რომელიც წარმოადგენს წრფივი ნორმალური ელემენტის ჰიპოტეზის გამოყენების შედეგს.

ა.ი. სტრელებიციკაიას და სხვების წიგნი [184] გამოკვლეულია სწორკუთხა ფირფიტების ღუნვა დრეკადობის ზღვარს იქით. წიგნი [150] (ი.ი. გოლდენბლატის რედაქციით) ეძღვნება მინაპლასტიკისგან დამზადებულ ფირფიტებისა და გარსების ღუნვას.

რ.ბ. რიკარდსის და გ.ა. ტეტერსის [168] წიგნი მასალის რეოლოგიური თვისებები გათვალისწინებულია მდგრადობის პრობლემებში. ავტორებმა წარმოადგინეს გამოკვლევები ზოგადი გარსების თეორიაში. მათ აღნიშნეს მდგრადობის განტოლების აგების გზები, ტიმოშენკოს გარსის ტიპის თხელკედლიანი სისტემის დინამიკა და უჩვენეს ანიზოტროპული გარსების გაანგარიშების მეთოდები. ამავე წიგნიში განხილულია კომპოზიციური მასალის გარსების ოპტიმალური პროექტირების მეთოდიკა და ექსპერიმენტალური გამოკვლევების შედეგები. ამოხსნილია მთელი რიგი ამოცანებისა (ცილინდრული გარსების ხანგრძლივი და ხანმოკლე დატვირთვების მოქმედებისას, დინამიკური მდგრადობა ცილინდრული გარსების მასალის სიბლანტის გათვალისწინებით) დაძაბულობის ეპიურების, გრაფიკების და სხვადასხვა სიდიდის იზოხაზების თანდართვით.

გარსების თეორიაში, ისევე როგორც სხვადასხვა სისტემების თეორიაში, ისევე როგორც სხვადასხვა სისტემების თეორიაში, ერთ-ერთ მტკივნეულ მხარედ ითვლება მთლიანად კონსტრუქციის საიმედოობის განსაზღვრის არასრული მეთოდი. გაანგარიშების კრიტერიუმები არ იძლევა საშუალებას განესაზღვროთ დიდი მარაგი დასაშვები დაძაბულობისას, რომლებიც აქვს კონსტრუქციას; ამასთანავე ასეთი არასრული შეფასების მისაღებად საჭიროა დიდი ძალისხმევის ფასად მივიღოთ ფართო ინფორმაცია, თუმცა პრაქტიკულად რომლის მცირე

ნაწილიც არის გამოყენებული. მთელ რიგ შემთხვევებში უფრო რაციონალურია (ეკონომიკის, სისწორის აზრით) შეფასება საიმედოობის ზღვრულ მდგომარეობაში, ამ მასალის მუშაობისას პლასტიურობის არეში და მთლიანად კონსტრუქციის ქცევა. ასეთ გაანგარიშებებს აქვთ დიდი სპეციფიკა.

ძალიან ხშირ შემთხვევაში ამოცანის დასმა ისეთია, რომ ერთადერთ მისაღებად ითვლება დრეკადობის გაანგარიშებები. ამავე დროს მხედველობაში უნდა მივიღოთ ისიც რომ სასაზღვრო მდგომარეობაში გაანგარიშებები დიდ სირთულეებთან არის დაკავშირებული.

განსაკუთრებული წვლილი თხელკედლიანი კონსტრუქციების სასაზღვრო ამოცანების გაანგარიშებების გაფართოებაში შეიტანეს: ა.ა. გვოზდევმა, ა.მ. პროცენკომ, ა.რ. რუანიცინმა, ა.მ. სვეჩკინმა, ნ.ვ. ახვლედიანმა, პ.მ. ვარვაკმა, მ.შ. ვარვაკმა, ა.ს. დეხტიარმა, ა.ო. რასკაზოვმა, ა.მ. დუბინსკიმ, მ.ი. ერხოვმა, გ.კ. ჰაიდუკოვმა, ლ. გალინმა, ზ. გედენიძემ, ი. ლუდუშაურმა, ა. ხვოლესმა, ა. მოწონელიძემ, ნ. მოწონელიძემ, ნ. კოლუამ, მ. ყალაბეგიშვილმა, გ. ყიფიანმა, რ. ცხვედაძემ, ასევე უცხოელმა სპეციალისტებმა პ. ხოდჯ, დ. დრუკერი, ვ. პრაგერი და სხვები. აღსანიშნავია ა.ა. გვოზდევის და ა.მ. პროცენკოს მიმოხილვა “გარსებისათვის სასაზღვრო წონასწორობის თეორიის დანართის პერსპექტივები”[196] და ა.პ. რუანიცინის მონოგრაფია [167]. დიდ ინფორმაციას შეიცავს გ. ფილიპის და ჯ. ხოჯას წიგნი [225], სადაც მოცემულია გაანგარიშებების ზოგადი თეორია სასაზღვრო მდგომარეობაში, მითითებულია გარსებისათვის დენადობის პირობები, გამოკვლეულია სასაზღვრო მდგომარეობა წრიული ფირფიტებისათვის, ასევე ცილინდრული, კონუსური, სფერული და დამრეცი გარსების.

კონსტრუქციის სასაზღვრო ამოცანების გაანგარიშებას ეძღვნება ა.ო. რასკაზოვის წიგნი [160,161]. უკანასკნელი დაწერა ა.ს. დეხტირესთან ერთად, მეორე წიგნში დიდი ყურადღება ეთმობა გეგმაში წრიულ ბრუნვით გარსებს და გეგმაში სწორკუთხა ჰიპარებს.

### 1.1.3. ფიზიკური ველების ურთიერთქმედების პრობლემა (თერმოდრეკადობა, თერმოპლასტიკურობა)

ტექნიკის მთელ რიგ სფეროებში ერთ-ერთ პრობლემას თხელკედლიანი კონსტრუქციების დაპროექტებისას წარმოადგენს თერმოდრეკადობა და თერმოპლასტიკურობა. იმ შრომებს შორის, რომლებიც მიეძღვნა ამ პრობლემებს. აღნიშვნის ღირსია შემდეგი შრომები: ა.დ. კოვალენკოს “ფირფიტებისა და გარსების თერმოდრეკადობა” [196], ს.მ. ღურგარიანის “ფირფიტებისა და გარსების ტემპერატურული ამოცანები” [195]; ვ.გ. ბაჟენოვას, გ.ს. მიხაილოვასა და ა.გ. უგოლნიკოვას “თერმოპლასტიკურობის დინამიკური ამოცანები ბრუნვითი გარსებისათვის” [190].

დ. ჯონსის წიგნი [220] სპეციალურად ეძღვნება თერმულ დაძაბულობებს.

მ.დ. მიხაილოვის წიგნში [125] გამოკვლეულია ტემპერატურული ველის არასტაციონარობის გათვალისწინება, რომელსაც დიდი მნიშვნელობა აქვს თვითმფრინავმშენებლობის, რაკეტმშენებლობის, ტურბომშენებლობის და ტექნიკის სხვა დარგებში, სადაც გამოიყენება გარსული კონსტრუქციები, რომლებიც ტემპერატურულ ზემოქმედებისას საჭიროებენ. ასეთი კონსტრუქციების კედლები მზადდება ფორებიანი მასალისაგან და მათი გაციება ხორციელდება თბომატარებლების ჩაბერვით. ამ დროს წარმოქმნილი პრობლემები წყდება არასტაციონარული ერთგანზომილებიანი პროცესებით.

თხელკედლიანი კონსტრუქციების თერმოდრეკადობის დარგში დიდ სპეციალისტად ითვლებოდა ა.დ. კოვალენკო. მის წიგნში [95] გამოკვლეულია წრიული ფირფიტის ზედაპირზე თერმოდრეკადობის დინამიკური ამოცანები სითბური დარტყმის დროს საკითხის ორ ვარიანტში დასმისას დეფორმაციული და ტემპერატურული ველების კავშირების გათვალისწინებით და არ გათვალისწინებით. ამ წიგნშივე ამოსხნილია ამოცანა თბურ დაძაბულობებზე წრიულ ფირფიტებში წრფივი და ცვლადი სისქით, ასევე ცილინდრულ და სფერულ გარსებში.

ვ.მ. რასუდოვის, ვ.პ. კრასილოვის და ნ.დ. პანკრატოვას წიგნში [163], განხილულია ფირფიტებისა და დამრეცი გარსების

თერმოდგრადობა ტემპერატურის წრფივი განაწილების პირობებში.

ა. გრინის და პ. ნაგლის სტატიები [216] სპეციალურად მიძღვნილია გარსების თეორიაში თერმული ეფექტების გათვლაზე.

შეგნერდეთ შემდეგ ოთხ წიგნზე, რომელთა ავტორებია ი.ს. პოდსტრიგაჩი და ი.მ. კოლიანი [152], ი.ს. პოდსტრიგაჩი და რ.ნ. შვეცი [153]; მ.ი. გრიგოლიუკი, ი.ს. პოდსტრიგაჩი და ი.ი. ბურაკი [57] და ი.ი. ბურაკი [31]. პირველ წიგნში განხილულია კვაზისტატიკური და დინამიკური ამოცანები თერმოდრეკადი (მასალა იზოტროპულია ან ანიზოტროპული) და თერმობლანდრეკადი ფირფიტებისათვის. განხილულ ამოცანებში გათვალისწინებულია სითბოგაცვლა და მასალების ფიზიკო-მექანიკური თვისებების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.

წიგნში [153] განხილულია გახურების რეჟიმის ოპტიმიზაციის ამოცანები. [57]-ში ძირითადი ყურადღება ექცევა ძაბვების ოპტიმიზაციის მათემატიკურ მეთოდებს თხელ დამრეც და ბრუნვით გარსებში. ოპტიმიზაციის პრობლემებს თერმოდრეკად გარსებში ამოცანების სხვადასხვა სახით დასმისას ეძღვნება წიგნი [31]. მასში გაკეთებულია აქცენტი დინამიური ეფექტების დაწვეაზე და დაძაბულობის დონეზე ინტენსიური დატვირთვის პირობებში და ტემპერატურული ველის ცვლილება.

დ. ჯონსის წიგნში [220] მოყვანილია საფუძვლები, რომლებიც განსაზღვრავენ ტემპერატურულ დაძაბულობებს, განიხილება ტემპერატურული ძაბვები ფირფიტებში (მემბრანული და ღუნვადი), კოჭებში და წრიულ ცილინდრებში, ნებისმიერი ფორმის გარსებში, წრიულ ცილინდრულ გარსებზე, ყალიბდება პირობები დეფორმაციების ერთობლიობისა გარსულ კონსტრუქციებში, განიხილება მდგრადობის კარგვა თბური მოქმედებისას და სითბოგამტარობა კონსტრუქციებში. არის მსჯელობა პროექტირების სხვადასხვა პრობლემებისა – ოპტიმიზაცია, არადრეკადი დეფორმაციების აღრიცხვა, ციკლური თბური ზემოქმედება, მასალების თვისებების დამოკიდებულება ტემპერატურაზე და სხვა.

#### 1.1.4. სხვადასხვა მოხაზულობის გარსები

განსაკუთრებულ ყურადღებას იქცევენ გარსები ზედაპირების კერძო ფორმებით: ცილინდრული, კონუსური, სფერული, ტორსისებური, ბრუნვითი გარსები, დამრეცი გარსები, ჰიპერბოლური პარაბოლოიდური(ჰიპარი) ფორმის გარსები და სხვები. ბოლო წლებში განიხილება გარსების ისეთი ფორმები, რომლებიც ითვალისწინებენ სხვადასხვა თვისებების მქონე მასალებს, ისეთი როგორცაა ფენოვნობა, ანიზოტროპულობა. ზოგიერთი ასეთი საკითხი ზემოთ უკვე იყო აღნიშნული აქ მოყვანილი ფაქტორების ნიშნებით. მოვიყვანოთ მონაცემებს ზოგიერთი წიგნების შესახებ.

ბრუნვით გარსებს ეძღვნება დ.ვ. ვაინბერგის და ვ.ზ. უდანის წიგნი [34]; რომელშიც მოცემულია ბრუნვითი გარსების გადამწვევტ განტოლებათა სისტემა და მისი ამოხსნის ხერხები – კერძოდ, ყურადღება გამახვილებულია მატრიცული მეთოდის გამოყენებაზე. ასეთი მიდგომის იდეა ახლოა სასრული ელემენტების და საწყისი ფუნქციის მეთოდებთან.

ბრუნვითი გარსების თეორია განხილულია აგრეთვე პოლონელი ავტორების ი. ორკიშის [223] და ზ. ვაშიშინის [232] წიგნებში.

ი.მ. გრიგორენკოს წიგნში [63] განხილულია ფენოვანი გარსები (იზოტროპულია ან ანიზოტროპული), რომელიც განიცდის არაერთგვაროვან დატვირთვებს და იმყოფება არასტაციონალურ ტემპერატურულ ველში. გაანგარიშების შედეგების საფუძველზე, რომლებიც მიღებულია სასრულ ელემენტთა მეთოდით (ს.ე.მ.) და წიგნში წარმოდგენილია გრაფიკებისა და ცხრილების სახით, გაკეთებულია დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის (დ.დ.მ.) (რომელიც დამოკიდებულია კონსტრუქციის ფორმის პარამეტრების მნიშვნელობაზე, მასალაზე და შიდა ძალების მოქმედებაზე) ანალიზი.

ვ.ვ. პიკულის წიგნის [149] გამორჩეულ თავისებურებას წარმოადგენს, რომ მასში განიხილება საშუალო სისქის გარსი, რომელიც აღწერილია სამგანზომილებიანი განტოლებებით. ეს გვაძლევს საშუალებას გავაანალიზოთ ცდომილება ორგანზომილებიანი

განტოლებებისა, უფრო მკაცრად შევაფასოთ სასახლო ეფექტი, ამავე დროს დრეკადობის თვისებების განაწილება გარსის მთელ სისქეზე.

ი.ნ. ნემიშას და დ.ი. ჩერნოპისკის წიგნში [135] განხილულია განივ-გოფრირებული და გრძივად-გოფრირებული სქელკედლიანი ცილინდრული გარსები მუდმივი და ცვლადი სისქით. გაანგარიშება რეალიზებულია ეგმ-ზე და განხორციელებულია “შეშფოთების” თეორიის გამოყენებით, რომელიც უზრუნველყოფს საჭირო სიზუსტეს. დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა (დ.დ.მ.) ნაპოვია კონსტრუქციების და მასალების ფუნქციებში. მთელი ინფორმაცია მოცემულია გრაფიკებით და ცხრილებით.

ბრუნვითი გარსები ფიგურირებენ ასევე შრომებში [12, 25, 54, 57, 75, 88, 102, 138, 161].

ბრუნვითი გარსების კერძო სახეს - სფერულ გარსებს სპეციალურად ეძღვნება შემდეგი ავტორების შრომები: ა.ნ. გუზი და თანაავტორები [70], ა.ი. ლურიე [111], ა.დ. ლიზარევა და ნ.ბ. როსტანინა [109], ვ.ვ. სოკოლოვსკი [180], ე.ი. გრიგოლიუკი და ვ.ი. მამაია [55, 56]. უკანასკნელ წიგნში განხილულია შრომები სფერულ გარსებზე, რომლებშიც აღწერილია დანადგარები, სტენდები და მეთოდური გამოკვლევები, მოცემულია მოდელებზე ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგები. ინფორმაცია სრულ გამოცდებზე და ემპირიული ფორმულა კონსტრუქციის მიახლოებითი გაანგარიშებისათვის.

სფერული გარსები ითვლებიან სხვადასხვა ასპექტში შესწავლის ობიექტებად და განხილულია მთელ რიგ შრომებში. ასეთ შრომებს მიეკუთვნება [51, 52, 54, 82, 87, 103, 110, 179, 225].

მრავალი ნაშრომი მიეძღვნა ცილინდრული გარსების შესწავლას [11, 12, 15, 48, 51, 52, 54, 58, 59, 60-62, 82, 92, 102, 103, 110, 154, 168, 169, 179, 212]. თუმცა მათ სათაურებში ამ ტიპის გარსების სახელები არ ფიგურირებენ. უშუალოდ ცილინდრული გარსები განხილულია [20, 53, 72, 74, 76, 85, 104, 105, 136, 144] და სხვები, რომლებზეც ლაპარაკია ქვემოთ.

არასტანდარტული ფორმის ცილინდრულ გარსებს ეძღვნება ი.მ. გრიგორენკოს, ა.ტ. ვასილენკოს, ნ.დ. პანკრატოვას წიგნი [64]. რომელშიც ნაშრომში განხილულია ფენოვანი ორთოტროპული გარსები,



მათ შორის განივ-გოფორირებული და განივად-წახნაგოვანი, ასევე გარსები მიმართველით.

ცილინდრული გარსები წარმოადგენს განხილვის ობიექტს ს.ნ. კანის და ი.ი. კაპლანის წიგნში [86], ასევე გ.ს. შაპიროს სტატიებში [194, 204]. [86]-ში მოცემულია დაბაზულ-დეფორმირებული მდგომარეობის განსაზღვრის მიახლოებითი მეთოდი, მოყვანილია ფორმულები, ცხრილები, გრაფიკები საძიებელი სიდიდეებისათვის, გამოიყენება პირობა კონტურის განივი კვეთის გაუჭიმვადობისა და ძვრადობის არ არსებობისას. ყველა საძიებელი ფუნქცია ან წარმოდგენილი ორი ცვლადის მიმართ წრფივი კომბინაციით ერთი ცვლადის საშუალებით.

ვ.ზ. ვლასოვის მიხედვით ცილინდრული გარსების რიცხვითი გაანგარიშების მექანიზმის გამარტივებას, ეძღვნება ლ.კ. ნარეცის და ი.ა. კაშირსკის ნაშრომი [133].

კონუსური გარსების გაანგარიშების თეორია განხილულია ა.ნ. გუზის და სხვ. წიგნში [69]-ში და ა.დ. კოვალენკოს ფუნდამენტალურ გამოკვლევებში.

1961 წელს ა.დ. კოვალენკო გამოვიდა ფართო მოხსენებით “გარსების გაანგარიშების თეორიის განვითარება მანქანათმშენებლობის ამოცანების გადაწყვეტაში” [194]. მის წიგნში [94] მოცემულია ზუსტი გაანგარიშება წრიული ფირფიტებისა და ბრუნვითი გარსებისა, მიღებული სპეციალური ფუნქციების გამოყენებით. შედეგი ადაპტირებულია ინჟინრული გაანგარიშებებისათვის გრაფიკებში და მრავალრიცხოვან ცხრილებში.

ა.დ. კოვალენკოს, ი.მ. გრიგორენკოს და ნ.ა. ლობკოვის წიგნში [97] აღწერილია ისეთივე გაანგარიშების მეთოდი, როგორც [94]-ში და მოცემულია კერძო გამოთვლების ცხრილები. ა.დ. კოვალენკოს, ი.მ. გრიგორენკოს და ლ.ა. ილინას წიგნში [96] განხილულია დაბაზულ-დეფორმირებული მდგომარეობა დერძსიმეტრიული, ირიბსიმეტრიული და ციკლურად სიმეტრიული დატვირთვებისა და არათანაბარი გახურებისას.

კონუსური გარსები განხილულია გ.ს. შაპიროს სტატიაში [203] და მთელ რიგ შრომებში [14, 16, 17, 51, 54, 60-62, 82, 87, 103, 154, 155, 179, 225].

ტორინდალური გარსები გამოკვლეულია ს. ბორკოვსკის [211] და ვნ. ბულგაკოვის [30] წიგნებში. ამ უკანასკნელში ბრუნვითი, კერძოდ ტორინდალური გარსებისათვის სტატიკის ძირითადი განტოლებების მსგავსად მოცემულია შესაბამისი განტოლების ამოხსნის მეთოდი.

იმ პუბლიკაციებიდან, სადაც შეისწავლება გარსები შუალედური ზედაპირებით ჰიპერბოლური პარაბოლოიდის (ჰიპარი) ფორმის, აღნიშვნის ღირსია ა.ო. რასკაზოვის წიგნი [160], სადაც მოცემულია ჰიპარების თეორიის დახუსტება მოჭიმვის დეფორმაციის გათვალისწინებით.

ი.ე. მილეიკოვსკის და ა.კ. კუპარის წიგნში [124] მოცემულია არქიტექტურულ-კონსტრუქციული გადაწყვეტა ჰიპარის ტიპის გარსებისა, აგრეთვე დამრეცი ჰიპარების გაანგარიშების უმომენტო და მომენტური თეორია.

ჰიპარებს ეძღვნება ნ.პ. აბოვსკის და ი.ი. სამოლიანოვის წიგნი [3] და ასევე [161].

გარსები, რომელთა შუალედური ზედაპირი წარმოადგენს გადატანით ზედაპირს დადებითი, ნულოვანი და უარყოფითი გაუსის სიმრუდით, განხილულია კ. ეიპლენდის წიგნში [210]. დამრეცი გარსებისათვის წრფივი გადაადგილების შემთხვევაში მომენტური თეორიის ძირითადი დამოკიდებულება წარმოდგენილია ერთი განტოლებით, ხოლო გარსებისათვის მართკუთხა გეგმით ეს განტოლება შეიძლება ამოიხსნას ისე, როგორც ამოხსნილია წრიული ცილინდრული გარსებისათვის. [210]-ში განხილულია გარსის ორთოტროპულობა, ამასთანავე გარსი შეიძლება შედგებოდეს ფენებისაგან და თითოეულ ფენაში ორთოტროპულობის მიმართულება ყველგან პარალელურია დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის მთავარი მიმართულების. დამრეც გარსებს ეძღვნება მრავალი პუბლიკაცია [1, 2, 4, 5, 25, 151].

აღნიშნავთ კიდევ ხუთ ნაშრომს, რომლებიც ეძღვნება დამრეც გარსებს. მათი ავტორებია ი.ნ. ვეკუა [38], ვ.ვ. დიკოვიჩი [73], ა.ა. ნაზაროვა [130], ვ.ვ. პიკულია [148] და ა.რ. რუანიცინა [166].

მონოგრაფიაში [130], გარდა საერთო შეფარდებებისა, ნებისმიერი ფორმის გარსებისათვის განხილულია კერძო შემთხვევა, რომელიც შეესაბამება დამრეც სფერულ და გეგმაში სწორკუთხა გლუვ გარსებს

და მოცემულია გაანგარიშების ფორმულები, მოყვანილია მრავალი რიცხვითი მაგალითი, რომელთა შედეგებიც მოცემულია ცხრილების და გრაფიკების სახით.

წიგნი [148]-ის განმასხვავებელ თვისებას წარმოადგენს ის, რომ მასში განხილულია დამრეცი გარსები, როგორც ერთგვაროვანი, ისე ფენოვანი(მათ შორის ნაკლებადხისტი შუალედური ფენებით). აღნიშვნის ღირსია გაანგარიშების თეორიის აგება, რომელიც ითვალისწინებს განივ ძვრებს(ორი მიახლოება). ა.რ. რუანიცინის [166] მიერ განხილულია გარსების გაანგარიშება სასახდვრო წონასწორობის მეთოდით და ნაოჭოვანი და ტალღისებური გადახურვის ანგარიშის თეორია მინიმალური თეორიული წონით, ასევე გადახურვები საყრდენი რგოლების გათვალისწინებით.

დამრეცი გარსებს ეძღვნება ი.ნ. ვეკუას [36] და ბ.ი. კანტორის [87] წიგნები. ბ.ი. კანტორმა გამოიკვლია მთელი რიგი საკითხებისა: ფიზიკური და გეომეტრიული არაწრფივი ამოცანები არაერთგვაროვანი დამრეცი ცვლადი სისქის კონუსური და სფერული თაღებისა და ფირფიტების თეორია, რომლებიც იმყოფებიან დატვირთვის და ტემპერატურული ველის ცვლილების ქვეშ (დრეკადი მუდმივების ტემპერატურის დონესთან დამოკიდებულების გათვალისწინებით). შესწავლილია პლასტიურობის მდგრადობის კრიტერიუმები კუმშვადობისა და მასალის სიმტკიცის გათვალისწინებით. გათვალისწინებულია არაერთგვაროვნება პლასტიურ თვისებებისა, რომლებიც გამოწვეულია თერმოდამუშავებით, ზედაპირული დაფარვით, დასხივებით სწრაფი ნეიტრონების ნაკადით. განხილულია დინამიური ამოცანები. გაანგარიშებები ორიენტირებულია ეგმ-ების გამოყენებაზე. მოყვანილია გაანგარიშების ფორმულები, პროგრამის ბლოკ-სქემა, შედეგები წარმოდგენილია გრაფიკის სახით.

### 1.1.5. მოქნილი გარსები. ბადისებრი გარსები

მოქნილი გარსების თეორიის ჩამოყალიბება აიხსნება მათი დეფორმაციის სპეციფიკური თავისებურებებით, ღუნვისა და კუმშვის მიმართ წინააღმდეგობის უუნარობით. ასეთ გარსებს ეძღვნება ფართო

ლიტერატურა, საიდანაც ავლნიშნავთ სტატიებს: “მოქნილი გარსების თეორია” [23], და “მოქნილი გარსების საერთო თეორიის საფუძვლები” [165], [196] და სხვა.

ვ.ე. მაგულის წიგნში [112] ნაჩვენებია მოქნილი გარსების გამოყენების მაგალითები საზღვაო კონსტრუქციებში და დამუშავებულია მეთოდები მათი გაანგარიშებისა და პროექტირებისათვის. იმავე ავტორის წიგნში [185], რომელიც დაწერილია ბ.ი. დრუხემის, ვ.დ. კულაგინის, ე.პ. მოლოსლავსკის და მ.ვ. ნოვოსელოვის თანაავტორობით, განხილულია მოქნილი გარსების ძირითადი ტიპების ექსპლუატაციის თავისებურებები (მათ შორის სპეციალური კითხვები) და მოცემულია ზოგადი ცნობები, მეთოდთა და გაანგარიშების პრინციპები.

გემთმშენებლობის გარდა მოქნილი გარსები გამოყენებულია სახალხო მეურნეობის ბევრ სხვა სფეროში. ამ საკითხებს ეძღვნება შრომების კრებული [137] და [189], რომელთა პასუხისმგებელ რედაქტორს წარმოადგენს ი.ი. ვოროვიჩი.

ყურადღებას იპყრობს ბადისებრი კონსტრუქციები, რომელთა გაანგარიშების მეთოდი აგებულია გარსების თეორიის მოდელზე. თანამედროვე მდგომარეობა, რომელიც ეძღვნება ასეთ კონსტრუქციებს (გარსებს), მოცემულია მიმოხილვაში “უმომენტო ბადისებრი გარსების გაანგარიშება” [195]. ბადისებრი გარსების თეორია დეტალურად განხილულია გ.ი. ფშენინოვის წიგნში [159]. თეორია აგებულია კონტინუალურ გაანგარიშების მოდელზე, რომელიც გამოყენებულია სტატიკის, დინამიკის და მდგრადობის ამოცანებში ფირფიტებისა და გარსებისათვის. განხილულია კონსტრუქციის ოპტიმიზაციის პრობლემები, კერძოდ ამოცანის არაწრფივად დასმაში.

### 1.1.6. გაანგარიშების ძირითადი მეთოდები

გარსთა თეორიის ჩამოყალიბების გზების შესახებ საუბრისას, მხედველობაში გვაქვს არა მხოლოდ წრფივი, არამედ გეომეტრიულად და ფიზიკურად არაწრფივი სისტემები.

ზემოთ უკვე ნაჩვენები იყო გარსების თეორიის აგების ანალიტიკური და პირდაპირი გზები. პირველ მათგანს შეიძლება მივაკუთვნოთ ასიმპტოტური მეთოდები, რომლებიც უკვე ვახსენეთ

ზემოთ, და ყველა გეომეტრიული და მექანიკური სიდიდეების დაშლა ამ ან მსგავს რიგებში: კოორდინატების ხარისხებად, გამოთვლები სისქის მიმართულებით ან რომელიმე სპეციალური ფუნქციების სისტემაებად.

ასეთი მიდგომა უფლებას გვაძლევს მივიღოთ საშუალო სისქის გარსების თეორია სამგანზომილებიანი თეორიის განტოლებიდან გამომდინარე დაშლის ან აპროქსიმაციის გზით.

გარდა ადრე ნახსენები ნაშრომისა, რომელშიც ნათქვამია ასიმპტოტური მეთოდების გამოყენებაზე, ავლნიშნავთ ი. კოზაკის ნაშრომს [221]. განვითარება ჰპოვეს მყარი დეფორმირებული სხეულის მექანიკის იმ ნაწილებმა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ გარსების ტექნიკური თეორია ან გადავწყვიტოთ პრობლემები, რომელიც არ ექვემდებარება ტექნიკური თეორიის ამოხსნის მეთოდებს. აქ მხედველობაში არის მიღებული საშუალო სისქის გარსების თეორია და სამგანზომილებიანი ამოცანა. დრეკადობის თეორიის სამგანზომილებიანი ამოცანის კავშირი გარსების თეორიასთან გამოკვლეულია აგრეთვე ბ.გ. გადურკინის და ვ.ვ. ნოვოჟილოვის მიერ. ამ პრობლემას დაუბრუნდნენ მოგვიანებითაც. მაგალითად ნ.ა. კოლჩევსკი მიმოხილვაში “სხვადასხვა მეთოდების გამოყენების ანალიზი დრეკადობის თეორიის სამგანზომილებიანი ამოცანების გამოკვლევა დრეკადობის თეორიის სასაზღვრო ამოცანების დასმაში” [194]. ამ პრობლემებზე მუშაობს ი.ი. ვოროვიჩი და მისი ხელმძღვანელობით სამეცნიერო სკოლა. არსებით როლს მის მიმართულებაში თამაშობს, როგორც უკვე ავლნიშნეთ ასიმპტოტური მეთოდები. მათი დახმარებით შეიძლება დავაკავშიროთ, ერთის მხრივ, სამგანზომილებიანი პრობლემები ორგანზომილებიანთან, ხოლო მეორეს მხრივ მივიღოთ მიახლოებითი შედეგები გამარტივებული ორგანზომილებიანი წარმოდგენის საფუძველზე.

ფ. სიარლეს და პ. რაბიეს წიგნში [186] ნახვენებია, რომ კარმანის არაწრფივი განტოლებები არაწრფივი ფირფიტების თეორიაში წარმოადგენს პირველ ასიმპტოტურ მიახლოებას სამგანზომილებიანი გეომეტრიული არაწრფივი ფილების ამოცანისათვის. შრომების რიცხვს, რომელშიც განხილულია ასიმპტოტური მეთოდების ზოგადი წარმოდგენა და, კერძოდ, მათი გამოყენების ასპექტში გარსებისა და ფირფიტების თეორიაში, მიეკუთვნება გ.კ. იბრაევას წიგნი [80]. ამ წიგნში, განხილულია

გარსების სტატიკის ორგანოზომილებიანი და ერთგანზომილებიანი ამოცანების ამოხსნის ასიმპტოტური მეთოდები, გეომეტრიული და ფიზიკური არაწრფივობის გათვალისწინებით. მოყვანილია გაანგარიშების ალგორითმი ეგმ-ზე რიგი ამოცანებისა (შედგები წარმოდგენილია ცხრილებსა და გრაფიკებში). შედეგების ნაწილი შედარებულია ექსპერიმენტალურ მონაცემებთან. მოცემულია გარსებში სასაზღვრო ეფექტების ექსპერიმენტალური გამოკვლევების მეთოდოლოგია.

თხელი და სქელი დრეკადი გარსების სამგანზომილებიანი თეორიის ასიმპტოტური აპროქსიმაცია და გარსების თეორიის პრობლემების პრაქტიკული კლასიფიკაცია მოცემულია ხ.ს. რატენას ფუნდამენტალურ წიგნში [228]. გარსების თეორიის ასიმპტოტური ამონახსნები განხილულია ა.დ. გოლდენვეიზერის [50], ე. რეისნერის [226,227] და ნ.ა. ალუმიანის [9] სტატიებში.

ა. ნაიფეს შეშფოთების მეთოდები წარმოდგენილი აქვს ორ წიგნად [131, 132].

წიგნში [131] მოცემულია ალგებრული და დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის თანამედროვე ასიმპტოტური მეთოდები, მათ შორის დიდი პარამეტრებით, ინტეგრალებით, კვადრატული და კუბური არაწრფივი სისტემებით.

გეომეტრიული არაწრფივი პრობლემების ამოხსნასთან დაკავშირებით მოქნილი კონსტრუქციებისათვის გამოიყენება პარამეტრების მიხედვით ამოხსნის გაგრძელების მეთოდი. ამ მეთოდების საინტერესო მიმოხილვა მოცემულია ე.ი. გრიგოლიუკის და ე.ი. შალაშილინის [84] ნაშრომში.

განვითარება ჰპოვეს გარსების თეორიის აგების არაკლასიკურმა მეთოდებმა. გამოცემების რიცხვს, რომელიც ამ პრობლემებს ეძღვნება, შეიძლება მივაკუთვნოთ უკვე ნახსენები ი.ნ. ვეკუას [35] და ე.ი. გულიაევის, ე.ა. ბაჟენოვის და პ.პ. ლიზუნოვის [71] წიგნები. მათ შორის პირველში გამოიყენება საძიებელი ფუნქციის დაშლა პოლინომებად. ლეჟანდრის კოორდინატით, რომელიც იზომება გარსის სისქის გასწვრივ, განხილულია გარსების თეორიის სტატიკურად განსაზღვრული ამოცანები, განისაზღვრება გარსების დეფორმაციები, კინემატიკურ პირობებთან ერთად და ბოლოს, განხილულია საინტერესო

საკითხი დრეკადი გარსების ნეიტრალური ზედაპირის შესახებ(მათი არსებობის პირობები და მათთან არსებული შერევის ველი).

გარსების გაანგარიშების არაკლასიკურ მეთოდთა რიცხვს მიეკუთვნება გაანგარიშების მეთოდები ს.პ. ტიმოშენკოს ტიპის გარსების მიხედვით. ტიმოშენკოს ტიპის გარსებისათვის თეორიის შექმნა საშუალებას გვაძლევს თავიდან ავიცილოთ გადაძვწვეტ განტოლებათა სისტემის მაღალი რიგი. ამ ბოლო დროს საქართველოში ი. ღუდუშაურის მიერ შექმნილია გარსთა გაანგარიშების მეტად მარტივი და ამაგდროულად ზუსტი მეთოდი [66-68], რომელმაც დიდი პრაქტიკული გამოყენება ჰპოვა რეალურ სამგანზომილებიან სისტემათა გაანგარიშებისას.

### 1.1.7. მათემატიკური აპარატი გარსთა თეორიაში

ფირფიტებისა და გარსთა თეორიის ამოცანების ამოხსნისათვის მათემატიკური აპარატის გამოყენება ძირითადად ხორციელდებოდა ვარიაციული აღრიცხვის გამოყენებით. მიღებულია განტოლების კომპლექსური ფორმა (ე. მეისნერის, ვ.ვ. ნოვოჟილოვის, კ.ფ. ჩერნიხი, ჯ. სანდერსა [229] და სხვ.), ინტეგრალური განტოლებების აპარატი (ნ.ა. კილჩევსკი, მ. მიქელაძე და სხვ.), ინტეგრალური გარდაქმნები (ლ.ი. სლეპიანი და სხვ.), სპეციალური ფუნქციები (ა.დ. კოვალენკო და სხვ.), ალბათობის თეორიის და მათემატიკური სტატისტიკის აპარატი (ვ.ვ. ბოლოტინი), წრფივი და არაწრფივი პრობლემების ასიმპტოტური ამონახსნი (ა.ლ. გოლდენვეიზერი, ნ.ა. ალუშიაე და სხვ.), პარამეტრების მიხედვით ამონახსნების გაგრძელების მეთოდები(ე.ი. გრიგოლიუკი და ვ.ი.შალაშილინი და სხვ.).

აღნიშნოთ კიდევ სამი ნაშრომი, რომლებშიც მათემატიკური მეთოდები დაყენებულია პირველ ადგილზე – ეს არის ვ.ლ. რვაჩევის და სხვ. [117], ვ.პ. შევჩენკოს [208], ვ.ვ. ბოლოტინის [28] შრომები. წიგნში [117] განხილულია რთული ფორმის ფირფიტების დინამიკური გაანგარიშების მეთოდები  $R$ -ფუნქციის გამოყენების შემთხვევაში (ფუნქციები, რომელთა ნიშანი სრულიად განისაზღვრება არგუმენტის მოცემული ნიშნით) და ამ მეთოდის გამოთვლითი ასპექტი. [208]-ში

მოცემულია ფურიეს ინტეგრალური გარდაქმნების გამოყენება, როგორც კლასიკურ დასმაში, ასევე დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემის ფიზიკური და ფუნდამენტალური ამონახსნების განზოგადების ასპექტში (დრეკადობის თეორიის ბრტყელი ამოცანებისათვის) და დამრეცი გარსების თეორია ნორმალური ძალებისა და მომენტების მოქმედების დროს.

წიგნში [28] მეორე თავში მოცემულია ალბათობის თეორიის მეთოდების გამოყენება თხელი დრეკადი გარსების გაანგარიშებისათვის.

ანალოგიურად ვ.ვ. ბოლოტინის წიგნში [29] განხილულია გარსების გაანგარიშება სტატისტიკური მეთოდების ასპექტში.

ი.ნ. ვეკუამ “გარსთა მათემატიკური თეორიის” კურსის შესასწავლად გამოსცა წიგნი [37], რომელშიც ტენზორული ანალიზის საფუძვლებზე ჩამოყალიბებულია გარსთა მათემატიკური თეორია.

ანალოგიურად კ.ბ. აკსენტიანის, ვ.კ. გორდეევა-გავრიკოვას წიგნში [6] მოყვანილია ინფორმაცია მატრიცულ მეთოდზე განტოლების აგების გამოყენების დროს). გარსთა ტექნიკური თეორიის ჩამოყალიბებაში დიდი წვლილი მიუძღვის ნ. მუსხელიშვილს და ვ. ვლასოვს.

გარსთა თეორიის სხვადასხვა მიმართულების განხილვისა და გამოყენებისათვის გამოქვეყნებულია მრავალრიცხოვანი შრომების კრებული [83, 134, 157, 158, 182, 192, 193, 197]. [197]-ში მოცემულია ორი სტატიის თარგმანი: ე. რეისნერის “გარსების თეორიის ზოგიერთი პრობლემები” და ფან იუან-ჩინა და ე.ე. სეკლერას “თხელი დრეკადი გარსების არამდგრადობა”.

[192]-ში მოყვანილია ექსპერიმენტულ-თეორიული გამოკვლევები, მიძღვნილი გარსებზე, კერძოდ განხილულია უწყვეტი გარსები, გარსები დიაფრაგმებით, დამრეცი გარსები, ჰიპარები, ელიფსური პარაბოლოიდური გარსები, რკინაბეტონის გარსები.

კრებული [157] ეძღვნება ვ.ვ. ნოვოვილოვს 60 წლის იუბილესთან დაკავშირებით. 55 სტატიიდან 17 ეძღვნება გარსების და ფირფიტების თეორიას. ამ კრებულში ზემოთ აღნიშნული სტატიების გარდა, მიუთითებთ კიდევ ორ სტატიაზე ა.დ. გოლდენგეიზერის “თხელი დრეკადი გარსების საკუთარი რხევის ორთოგონალური ფორმების შესახებ” და ე.ე. გრიგოლიუკას და ი.ვ. ლინოვცის “თხელი ბრუნვითი გარსების საკუთარი მნიშვნელობებით ერთი კლასის ამოცანების



ამოსხნა”. [158]-ში განხილულია ღეროს სტატიკა და დინამიკა, დრეკადი, დრეკად-პლასტიკური და პლასტიკურ-ხისტი მასალის ფირფიტები და გარსები, სტატიკური და დინამიკური მდგრადობა. გამოყენებულია დიფერენციალური განტოლებების არათანმიმდევრული ინტეგრირების მეთოდები. სასრულ ელემენტთა მეთოდი, ვარიაციული მეთოდები, თეორიულ-ექსპერიმენტალური მეთოდები. მთელ რიგ სტატიებში ამოსხნა დაიყვანება რიცხვით მნიშვნელობებამდე.

### 1.1.8. პირველი თავის დასკვნები

ლიტერატურის მიმოხილვიდან შეიძლება შემდეგი დასკვნების გაკეთება:

- დიდმალიანი გადახურვების აგების ტექნოლოგია და დრეკად-პლასტიკური მდგომარეობის პირობებში გაანგარიშების პრობლემა აქტუალურია და იმყოფება აქტიური დამუშავების სტადიაში;
- გაანგარიშების ტრადიციული ანალიზური და რიცხვითი მეთოდების გადატანა ამოცანათა განხილულ კლასზე ხვდება სიძნელეებს, რომლებიც დაკავშირებულია კონსტრუქციის გეომეტრიული რეგულარობის დარღვევებთან;
- არასაკმარისად არის გაშუქებული დიდმალიანი გადახურვების აგების ტექნოლოგიის საკითხები.

## 2. შედეგები და მათი განსჯა

### 2.1. მერიდიანულ-ხოკეროვანი განივი კვეთის გუმბათები

#### 2.1.1. მერიდიანულ-ხოკეროვანი მოხაზულობის გუმბათების სტატიკურ დატვირთვაზე გაანგარიშების მეთოდი

განხილულია სხვადასხვა მიდგომების ვარიანტები, გამომდინარე გარსის საერთო თეორიის განტოლებებიდან, კერძოდ, დაფუძნებული უმემონტო თეორიის ჰიპოთეზის გამოყენებით. ეს უკანასკნელი ხშირად გამოიყენება საკუთარი წონებისაგან სიმეტრიული დატვირთვის ქვეშ მყოფი ბრუნავ გუმბათებთან მიმართებაში.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, გამოსაცდელი სისტემების თავისებურება, განსხვავებით სხვა ბრუნვითი გარსისაგან, რომლის გაანგარიშება საკმაოდ კარგად არის შესწავლილი და დაწვრილებით არის აღწერილი სათანადო სახელმძღვანელოებში და მოყვანილია ცხრილებში, მდგომარეობს იმაში, რომ ზედაპირის გაუსისეული სიმრუდე ზედა ნაწილიდან ქვედაზე გადასვლისას იცვლება ნახტომისებურად, რადგან ყოველი ნაწილი შექმნილია სხვადასხვა რადიუსის რკალების ერთი და იგივე ღერძის ირგვლივ ბრუნვით. ჩვეულებრივ, აქამდე გამოყენებული მეთოდები ასეთი სისტემის გაანგარიშებისათვის დაფუძნებული იყო იმაზე, რომ ცალკე განიხილებოდა თითოეული ნაწილი, რომელსაც ჰქონდა მდოვრედ ცვალებადი სიმრუდე, შემდგომში შეერთებით, მათი დეფორმაციის შეთავსების პირობების გათვალისწინებით.

მოცემულ ნაშრომში გამოყენებულია ახალი მეთოდი, რომლის მიხედვითაც მთელი გუმბათი განიხილება როგორც ერთიანი გარსი წყვეტილად ცვალებადი სიმრუდით, რაც საგრძნობლად ამოკლებს გამოთვლის ალგორითმს.

პრაქტიკულად ამის მიღწევა შეიძლება თუ წარმოვადგენთ სიმრუდის რადიუსს, მერიდიანული მიმართულებით წყვეტილი (ჰევისაიდის) ფუნქციის მეშვეობით:

$$R_1 = R_{1(1)}H(\theta_1 - \theta) + R_{1(2)}H(\theta - \theta_1). \quad (1)$$

ზედაპირის ბრუნვისათვის ცნობილი თანაფარდობის გათვალისწინებით:

$$\frac{dR_2 \sin \theta}{d\theta} = R_1 \sin \theta.$$

სიმრუდის რადიუსი წრიული მიმართულებით შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც:

$$R_2 = (R_{1(1)} + \theta_1)H(\theta_1 - \theta) + (R_{1(2)} + \theta_2)(\theta - \theta_1). \quad (2)$$

ასეთი მიდგომა ამარტივებს არა მხოლოდ მოცემული გუმბათის საანგარიშო ფორმულებს, არამედ ნებისმიერი შედგენილი ბრუნვითი გარსის გაანგარიშებასაც და გვაძლევს საშუალებას მივიღოთ გამოსათვლელი ფორმულები ძალებისათვის გარეგნული ფორმით ისეთივე, როგორიც გლუვი არაშედგენილი გარსისათვის:

$$T_1 = -\frac{\sqrt{(1+(r_x^2)^2)}^x}{r} \int_0^x r(X - r_x Z) dx; \quad (3)$$

$$T_2 = -\frac{r \cdot r_x^1}{1+(r_x^1)^2} T_1 + r \sqrt{(1+(r_x^1)^2)} Z,$$

სადაც

$$r = \sqrt{R_1^2 - (x - x_0)^2} (H(x) - H(x - x_1)) + \sqrt{R_2^2 - (x - x_0)^2} (H(x - x_1) - H(x - x_2)).$$

ანალოგიური მიდგომა გამოყენებული იყო გუმბათის გაანგარიშებისას არასიმეტრიულ ქარის დატვირთვაზე. ამ შემთხვევაში ამოცანა დაიყვანება მეორე რიგის დიფერენციულ განტოლებამდე წყვეტის კოეფიციენტებით. მის გამოსათვლელად იყო გამოყენებული ვარიაციული მეთოდი კოჭური ფუნქციების აპროქსიმაციით, რომლებიც შეჯერებულია გუმბათის დაყრდნობის სასაზღვრო პირობებთან, მიღებულია გამოსათვლელი ფორმულები. გარდა ამ გამარტივებული მიდგომისა, უმემონტო თეორიის განტოლების გამოყენებით, დისერტაციაში მოყვანილია წყვეტილად ცვლილებადი სიმრუდის მქონე გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი მომენტური თეორიის მიხედვით რომელიც ითვალისწინებს საყრდენ ზონაში კიდური ეფექტის ზემოქმედებას დაძაბულ მდგომარეობაზე.

ამ გათვლების მიზანია: 1. მომენტური ძაბვების შეფარდებითი სიდიდის განსაზღვრა გრეხვა-კუმშვის ძაბვებთან შედარებით და ამ ძაბვების ზემოქმედება კონსტრუქციების საიმედოობისა და ხანგამძლეობის შეფასებაზე.

2. უმომენტო გაანგარიშების ცდომილების განსაზღვრა და მისი გამოყენების ზღვარი არათანაბარ განაწილებულ ძაბვებთან მიმართებაში.

უკანასკნელი დაკავშირებული იმასთან რომ, როგორც ზემოთ, აღინიშნებოდა, გუმბათის ზედაპირის სიმრუდე განიცდის წყვეტის დაბალი ნაწილიდან მაღალზე გადასვლისას, ამიტომ მოცემული სისტემა არ აკმაყოფილებს უმომენტო მდგომარეობის არსებობის პირობებს, რასაც აქვს ადგილი ფიზიკურ-გეომეტრიული პარამეტრების მდოვრედ ცვლილების დროს.

მიღებული მიდგომა მოითხოვდა საიმედო დასაბუთებას, მიღებული შედეგები კი დაზუსტებას, ამოცანის გადაწყვეტის უფრო მკაცრად დაყენების გზით. გარსის მომენტური თეორიის გამოყენების შემთხვევაში იყო არჩეული (საფუძვლად დაიდო) ამოხსნადი განტოლებების ვარიანტი, გამარტივებული მუშტარი-დონელა-ვლასოვის მეთოდის კომპლექსური ფორმა:

$$\Delta^2 \varphi + in \Delta_k \varphi = P/D, \quad (4)$$

სადაც

$$\varphi = W + i \frac{n}{Eh} F; \quad n = \frac{\sqrt{R(1-\mu)}}{h}; \quad i = \sqrt{-1}.$$

ეს ამოხსნადი განტოლება გამოიყენება გუმბათის როგორც მაღალი ისე დაბალი ნაწილისათვის და ოპერატორებს აქვს სახე:

$$\Delta = \frac{1}{R_1 R_2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{R_2 \sin \theta}{R_1} \frac{\partial ( )}{\partial \theta} + \frac{R_1 \sin \theta}{R_2} \frac{\partial^2 ( )}{\partial \beta^2} \right]; \quad (5)$$

$$\Delta_k = \frac{1}{R_1 R_2 \sin \theta} \left[ \frac{1}{R_1} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\partial ( )}{\partial \theta} + \frac{1}{R_2 \sin \theta} \frac{\partial^2 ( )}{\partial \beta^2} \right].$$

ვინაიდან გუმბათის ზედა და ქვედა ნაწილებს აქვს სხვადასხვა სიმრუდე, და ოპერატორებში შემავალი სიმრუდის რადიუსებს და ექნება განსხვავებული მნიშვნელობა.

–  $R_{1(1)}, R_{1(2)}, \Delta_{(1)}, \Delta_{k(1)}$  სიმრუდის რადიუსები და ოპერატორები ზედა ნაწილისათვის;

–  $R_{2(1)}, R_{2(2)}, \Delta_{(2)}, \Delta_{k(2)}$  სიმრუდის რადიუსები და ოპერატორები ქვედა ნაწილისათვის.

მაშინ ერთდროულად ზედა და ქვედა ნაწილების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა აღიწერება შემდეგი სახის ერთი განტოლებით

$$\begin{aligned} & [\Delta_{(1)} \cdot H(\theta_1 - \theta) \cdot \Delta_{(2)} \cdot H(\theta - \theta_1)] \rho + \\ & + in [\Delta_{k(1)} \cdot H(\theta_1 - \theta) \cdot \Delta_{k(2)} \cdot H(\theta - \theta_1)] \rho = P/D, \end{aligned} \quad (6)$$

სადაც – ჰევისაიდის ფუნქციაა.

შევნიშნოთ ერთი საინტერესო ვითარება, რომ მიღებული განტოლება უშვებს გამარტივებულ გარდაქმნებს, რომელიც ანალოგიურია სფერული გარსებისათვისაც.

ეს გარდაქმნები საშუალებას იძლევა აღმოვაჩინოთ ზოგიერთი ანალოგია სფერული გარსის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობასა და მერიდიანულ-ხოკერული მოხაზულობის გუმბათს შორის.

ამისათვის  $\Delta$  ოპერატორი წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$\Delta = \Delta_{(0)} - k_1 \Delta,$$

სადაც

$$\Delta_{cp} = \frac{1}{R_1^2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial \beta^2} \right], \quad (7)$$

არის ლაპლასის ოპერატორი;  $R_1$  – რადიუსის სფერული გარსისათვის.

$$\begin{aligned} \Delta' &= \frac{C}{R_1^2 R_2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial \beta^2}. \\ k_1 &= \frac{2R_1 + C}{R_1 + C}. \end{aligned} \quad (8)$$

– მერიდიანის სიმრუდის ცენტრის ძვრა (გადაწვევა) ბრუნვის ღერძის ან გარსის სიმეტრიის ღერძის მიმართ.

ადვილად დავრწმუნდებით, რომ გამოსახულებას მიყვავართ ფორმულა -თვის.

ანალოგიურად, ოპერატორი რიგი გარდაქმნების შემდეგ შეიძლება წარმოვადგინოთ სახით:

$$\Delta_k = (k + k_0)(\Delta_c + \Delta'), \quad (9)$$

სადაც

$$\Delta_k = (k + k_0)(\Delta_c + \Delta'),$$

$$k = \frac{1}{R_1}; \quad k_0 = \frac{C}{(R_1 + C)R_1}.$$

მაშინ, თუ გუმბათი ერთი მრუდის ბრუნვით არის შექმნილი, ან, რაც იგივეა, თუ გუმბათი შედგენილია მხოლოდ ზედა ნაწილისგან, განტოლება დებულობს სახეს:

$$\Delta_1^2 \varphi + in \frac{1}{R_x} \Delta_c \varphi - [(2\Delta_c - k_1 \Delta') k_1 \Delta' \varphi + in(k\Delta' + k_0 \Delta_c + k_0 \Delta') \varphi] = P/D. \quad (10)$$

პირველი ორი შესაკრები შეესაბამება ამ განტოლების სფერული გარსის დეფორმაციას, შესაკრებები მოთავსებული კვადრატულ ფრჩხილებში, წარმოადგენენ იმ შესწორებას, რომელიც განასხვავებს მოცემულ გარსს სფერულისაგან.

ასიმეტრიული დეფორმაციის შემთხვევაში მიღებული განტოლება არსებითად მარტივდება. ამ შემთხვევაში ყველა წარმოებული წრიული კოორდინატაზე ნულს უტოლდება, ე.ი. და ამოხსნადი განტოლება (10) ჩაიწერება როგორც:

$$\Delta_c^1 \varphi + in \left( \frac{1}{R_1} + k_0 \right) \Delta_c \varphi = P/D. \quad (11)$$

ეს თანმთხვევა სფერული გარსის ამოხსნადი განტოლებას, რომელსაც მერიდიანის სიმრუდე ტოლია:

$$k = \frac{1}{R_1} + k_0.$$

წარმოდგენილი ამოხსნადი განტოლებების ამოსახსნელად გამოყენებულია აპროქსიმირება ზოგიერთი ფუნქციების მიხედვით, რომლებიც აკმაყოფილებენ სასაზღვრო პირობებს მერიდიანული კოორდინატასთან მიმართებაში.

ბუბნოვ-გალიორკინის მეთოდის პროცედურის გამოყენების შედეგად განტოლება კერძო წარმოებულებით დაიყვანება ერთ განტოლებამდე წრიული კოორდინატის მიმართ.

$$a_1 \varphi_0 + a_2 \frac{d^2 \varphi}{d\beta^2} + a_3 \frac{d^2 \varphi_1}{d\beta^1} + in \left( a_4 \varphi + a_5 \frac{d^2 \varphi_1}{d\beta^2} \right) = P/D. \quad (12)$$

შესაბამის მახასიათებელ განტოლებას აქვს ოთხი კომპლექსური ფესვი, რაც განსაზღვრავს ამოხსნის საბოლოო სახეს. შედეგს, დაძაბულ-დეფორმირებული ყველა კომპონენტი წარმოისახება

ჰიპერბოლური ტრიგონომეტრიული ფუნქციის მეშვეობით ინტეგრირების მუდმივებით. ეს უკანასკნელი უნდა შეესაბამებოდეს ამოხსნის პერიოდულობას.

თუ დავშლით გარე დატვირთვის ფუნქციას და საძებნი ფუნქციას წრიული კოორდინატაზე და გამოვიყენებთ ბუზნოვ-გალიორკინის მეთოდის პროცედურას, მივაღწეოთ ჩვეულებრივი დიფერენციალურ განტოლებასთან რიგის ყოველი წევრისათვის:

$$b_{1k} \frac{d^4 \varphi_k}{d\theta^4} + b_{2k} \frac{d^2 \varphi_k}{d\theta^2} + b_{3k} \varphi_k + i \left( b_{1k} \frac{d^2 \varphi_k}{d\theta^2} + b_{5k} \varphi_k \right) = P/D. \quad (13)$$

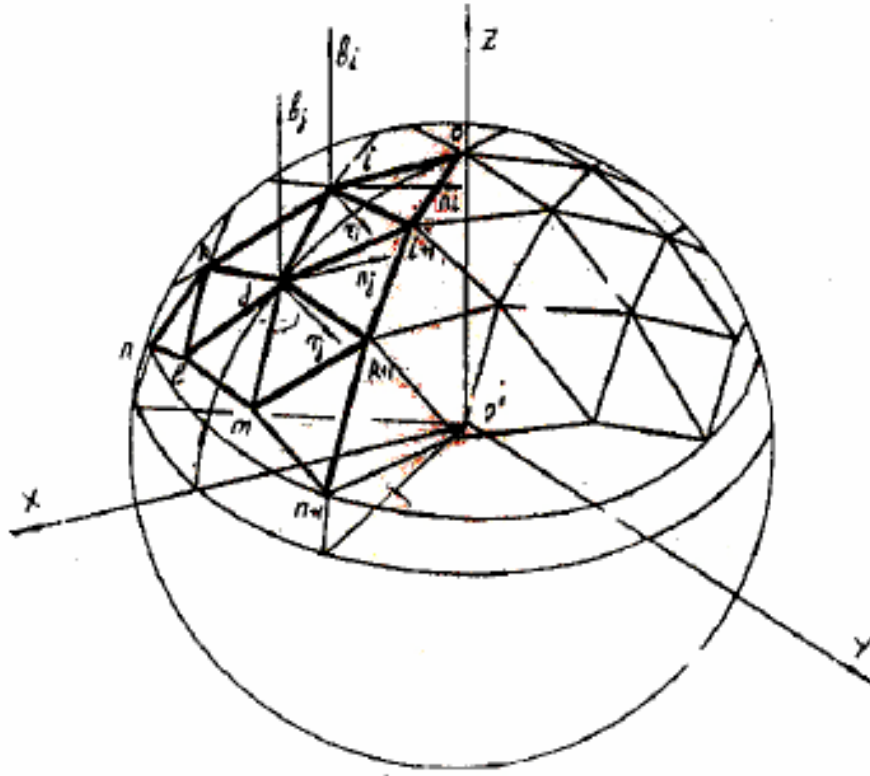
მისი ოთხივე ფუძეც კომპლექსურია, რაც განაპირობებს დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ყველა კომპონენტების დამოკიდებულებას მერიდიანულ კოორდინატასგან და ინტეგრირების მუდმივისგან ჰიპერბოლოტრიგონომეტრიული ფუნქციის მეშვეობით. მერიდიანული კოორდინატები და ინტეგრირების მუდმივი შეიძლება შეირჩეს დამოკიდებული სასაზღვრო პირობების მრუდსაზოვან კიდეზე და, მაშასადამე, შეიძლება იყოს გათვალისწინებული გუმბათის ქვედა ნაპირის კონსტრუქციული გაფორმების პრაქტიკულად ნებისმიერი ვარიანტი.

ნაშრომში გაანალიზებულია ამოხსნები სხვადასხვა სახის სასაზღვრო პირობებში, კერძოდ, სახსრიანი აღწერა და წაჭერა.

აღწერილია ძალის განსაზღვრის, მომენტების და გადაადგილებების დაწვრილებითი ალგორითმი და მოტანილია ამოხსნის მაგალითები. აღწერილია გუმბათის დინამიკური გამოთვლა მოძრაობის განტოლებების მისაღებად გამოყენებულია დალამბერის პრინციპი, რის საფუძველზეც წონასწორობის განტოლებებში გარე დაძაბვის კომპონენტები შეცვლილია ინერციული წევრებით.

ვინაიდან კომპონენტები, რომლებიც განსაზღვრავენ დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობას, სწრაფცვალებადი ფუნქციებია, განტოლებების სისტემა შეიძლება გამარტივდეს მუშტარი-დილეი-ვლასოვის მეთოდით, უფრო საფუძვლიანად, ვიდრე სტატიკური გათვლების დროს და ჩაიწერება სახით:

$$\Delta^2 W - \frac{1}{D} \Delta_k f = -\frac{\rho h}{D} \ddot{W}; \quad Eh \Delta_k W + \Delta^2 F = 0. \quad (14)$$



ნახ. 13. ღეროვანი სფერული გუმბათი

აქ ისევე, როგორც წინა თავში, სიმრუდის რადიუსი და პირველი კვადრატული ფორმის კოეფიციენტები, შემავალი ოპერატორებში, წარმოადგენილია როგორც ორი შესაკრები, თითოეული მადგანი გამრავლებული ჰევისაიდის ფუნქციაზე, და ადგილი აქვს ცალკე ზედა და ქედა ნაწილებისთვის.

ამგვარად მთლიანი არარეგულირებული სისტემის რხევები აღიწერება იმავე რაოდენობის განტოლებებით, (ამ შემთხვევაში – ორი განტოლებით), რაც რეგულირებული სისტემა მისი ორნაწილად ტრადიციული გაყოფის და შემდეგი შეერთების გარეშე.

სისტემის (14) ამოსახსნელად გამოყენებულია ვარიაციული მეთოდი ჩალუნვის ფუნქციის  $W$  და  $F$  ძალვის მრუდხაზოვან კიდეზე სასაზღვრო პირობების შესაბამისად შერჩეული ცნობილი ფუნქციებით აპროქსიმირებით.

წევრების მოცემული რაოდენობის მოძიებული ფუნქციის დაშლაში შენარჩუნების შემდეგ, ვღებულობთ განტოლებების ერთგვაროვან სისტემას. მისი მსაზღვრელის ნულის ტოლობიდან გამომდინარეობს სისწირების განტოლება. დაბალი სისწირისათვის,



რომელიც შეესაბამება რიგის პირველი წევრის შეკავებას, ვიდრე მარტივ და პრაქტიკული გამოყენებისთვის ხელსაყრელ ალგორითმს, რომელიც ადვილად რეალიზდება კომპიუტერზე და მიკრო კალკულატორზე.

### 2.1.2. აგურის წყობის გუმბათების მოდელის ექსპერიმენტული გამოკვლევა

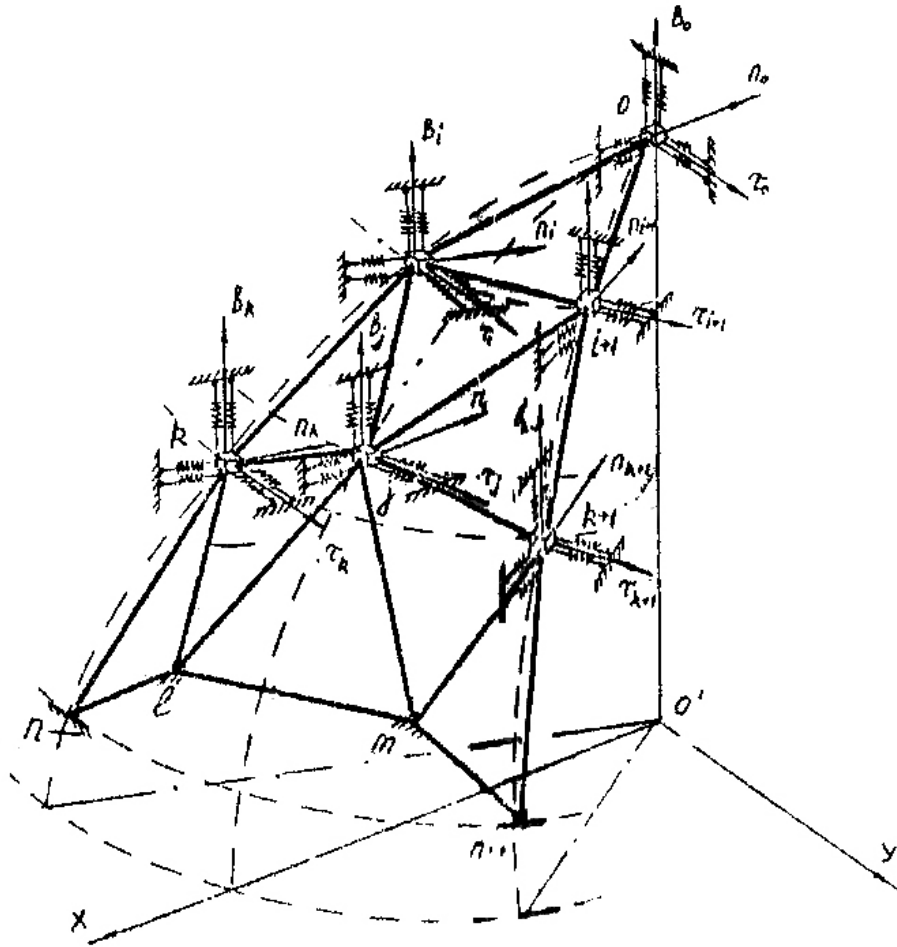
მოყვანილია აგურის წყობის გუმბათების მოდელის ექსპერიმენტული გამოკვლევის შედეგები. წარმოდგენილია აგრეთვე ექსპერიმენტული მონაცემები აგურის წყობის დრეკადი კონსტანტებისათვის, ექსპერიმენტის დამუშავების სტატისტიკური მეთოდების გამოყენებით.

გამოკვლევა სრულდებოდა გუმბათის მცირე მოდელზე, გამოიცადა 5 სხვადასხვა ნიმუში, რომლებიც ერთმანეთისგან განსხვავდებოდა აგურის და ხსნარის მარკით.

მოდელი დაყენებული იყო ლითონის უძრავ ჩარჩოზე და ხისტად იყო დამაგრებული, თანაც, გუმბათის მოდელის ფუძის უძრავს აკონტროლებდა სპეციალური ინდიკატორები. უძრავი ლითონის ჩარჩოებზე მიმაგრებული იყო, აღჭურვილობა, რომელიც შედგენილი იყო მერიდიანული და რგოლისებრი მიმართულებიანი კუთხეებისგან, რომელზედაც დაყენებული იყო საათის ტიპის ინდიკატორები წნევის ფასით 0,01 მმ.

ვინაიდან მერიდიანულ-ხოკეროვანი განივი კვეთის გუმბათის მოდელები შესრულებული იყო არასტანდარტული აგურებისგან ზომით 36X23X8 და ნაკერის სისქე არ აღემატებოდა 1-2 მმ, მთავარი ექსპერიმენტის წინ ჩატარდა დამხმარე ექსპერიმენტი. ეს ექსპერიმენტი მდგომარეობდა გამოცდაში ნორმალური სისქის ნაკერიანი არასტანდარტული აგურისაგან აგურის წყობის ნიმუშების და ნიმუშების, რომელიც შესრულებული იყო არასტანდარტული აგურებისგან.

ნიმუშები დამზადებული იყო ერთი და იგივე მასალისაგან. სულ იყო დამზადებული 15 ნიმუში დაყოფილი 3 ცალად, თითოეული ტიპის აგურის და ხსნარის მარკის შეხამების მიხედვით.



ნახ. 14. გაანგარიშების ელემენტების ძირითადი სისტემა

შერჩეული იყო აგურის და ხსნარის მარკების თანაფარდობა: 58/46, 77/65, 101/94, 152/96, 206/94. ფრჩხილებში მითითებულია ხსნარის მარკა, რომელიც ჩვეულებრივ აირჩევა აგურის მარკის ორჯერ უფრო მაღალი. ეს დაკავშირებულია იმასთან, რომ ჩვეულებრივ წყობაში ხსნარი მტკიცდება (მყარდება?) დროის განმავლობაში, იმ დროს როდესაც პროცესი დროში არის შეზღუდული.

გამოცდების შედეგად თითოეული შემთხვევისთვის იყო გამოთვლილი გადასვლის კოეფიციენტები (კოეფიციენტები) “შეფარდებითი დატვირთვის” სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის  $P/F$ ;  $P$ —ნიმუშზე მიღებული დატვირთვაა;  $F$ — ნიმუშის განივი კვეთის ფართობი.

ექსპერიმენტის მონაცემების სტატისტიკური დამუშავების შემდეგ მიღებულია:

–  $\bar{\chi}_i$  თითოეული დატვირთვისათვის გადასვლის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა;

-  $R\bar{X}_i$  გაქნევა, ანუ მოცემული დატვირთვისთვის გადასვლის კოეფიციენტის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობებს შორის სხვაობა;

შემდეგ შემოწმდა ეკუთვნის თუ არა ერთ გენერალურ ერთობლიობას -ს საშუალო მნიშვნელობა, რომელიც გათვლილი იყო შედარებითი დატვირთვების სხვადასხვა სიდიდეებისათვის. საშუალო მნიშვნელობების შედარება ხორციელდება ლინკი და უოლესის მიხედვით, ამასთან, ნულ-ჰიპოთეზა საშუალო მნიშვნელობების ტოლობის შესახებ უარყოფილია, თუ  $\frac{nR(\bar{X}_i)}{\sum R_{x_i}}$ , სადაც  $n$  - გადასვლის კოეფიციენტის გაზომვის რაოდენობაა გაზომვის თითოეული ერთობლიობისთვის და თითოეული დატვირთვის შეფარდებითი სიდიდისათვის ( $n = 5$ );

-  $R_{x_i}$  სხვადასხვა დატვირთვის სიდიდეებისათვის გადასვლის კოეფიციენტების საშუალო მნიშვნელობის გაქნევა;

-  $K$  მოცემული დატვირთვის ჯგუფების რაოდენობის ( $m = 5$ ) და შეცდომის ალბათობის ( $d = 0,05$ ) კრიტიკული მნიშვნელობა.

სხვადასხვა მარკის აგურებისათვის და ხსნარისათვის  $R_{x_i}$ ,  $R_i$ ,  $T$ ,  $K$  მნიშვნელობა მოცემულია ცხრილში 1.

### ცხრილი 1

$R_{x_i}$ ,  $R_i$ ,  $T$ ,  $K$  მნიშვნელობა სხვადასხვა მარკის აგურებისათვის და ხსნარისათვის

სტატისტიკური მახასიათებლები	აგურის მარკა/ხსნარის მარკა				
	58/46	77/65	101/94	152/96	206/94
1	0,01	0,01	0,005	0,01	0,01
2	0,11	0,09	0,1	0,07	0,08
3	0,4	0,67	0,3	0,86	0,75
4	1,17				

დეფორმაციის მოდულის დასადგენად ნატურული ექსპერიმენტის შედეგების მიხედვით გამოყენებული იყო უმცირესი კვადრატების მეთოდი პოლინომის აგების მიზნით, რომელიც საკმაოდ მჭიდროდ აპროქსიმირებს ფუნქციას

$$E_R = f(P_j).$$

ამ პოლინომის ხარისხი გამოითვლება ფიშერის კრიტერიუმის მიხედვით, მაგრამ, როგორც წესი შეგვიძლია შევიზღუდოთ მეორე ხარისხის პოლინომით.

$$E_R = a_1 P_j^2 + a_2 P_j + a_0. \quad (15)$$

ამასთან ერთად, დეფორმაციის საწყისი მოდული  $E_0$  განისაზღვრება  $P_j = 0$ , ე.ი.  $E_0 = a_0$ . მაგრამ ნატურალური გაზომვის პროცესში გარდაუვალი შეცდომების გამო, სანამ ფორმულა (15) გამოვიყენებთ, აუცილებლად უნდა იყოს მოგლუვებული ნატურალური გაზომვების სიდიდეები.

ამ მიზნით იყო შედგენილი ბოქს-ბენკენის გეგმა ოთხფაქტორიანი ექსპერიმენტისათვის და ამ შემთხვევაში დამოუკიდებელი ფაქტორები იყო კოორდინატები წერტილის 7 მოდელის ზედაპირზე და დატვირთვის სიდიდე.

ოთხ დამოუკიდებელ ფაქტორს შორის კავშირი აპროქსიმირდება კვადრატული მოდელით:

$$\xi_k = b_0 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} \eta_i \eta_j, \quad (16)$$

აქ  $\xi_k$  – გასვლის პარამეტრია (გადაადგილებების სიდიდეები შეყურსული დატვირთვის დროს);

$b_0$  – მუდმივი სიდიდე (საწყისი პარამეტრი);

$\eta_i, \eta_j$  – ფაქტორები (დამოუკიდებელი თავისთავად მოდელის ზედაპირის წერტილის  $X, y, z$ , კოორდინატებში);

$b_i$  – მოდელების პარამეტრებია (რეგრესიის კოეფიციენტები);

$K$  – ფაქტორების რაოდენობა.

დამოკიდებულება (16) ამოსახსნელად მათემატიკურ აპარატად გამოყენებულია მრავალფაქტორიანი რეგრესიული ანალიზი, რომელიც საშუალებას იძლევა ვიპოვოთ ანალიტიკური დამოკიდებულება (რეგრესიის განტოლება) ექსპერიმენტული წერტილების მიხედვით.

სტატისტიკური დამუშავებისთვის გამოყენებული იყო (ზოგიერთი ცვლილებებით) ბიჯური რეგრესიული ანალიზის პროგრამა REGR-1,

რომელიც გვაძლევს საშუალებას შევაფასოთ პოლინომში შეყვანილი თითოეული წევრის ზემოქმედება REGR-1-ს პროგრამა გარდაქმნილი იყო იმისათვის, რომ რეგრესიის განტოლებაში მივიღოთ არაწრფივი წევრები მოცემული ამოსავალი მონაცემების მიხედვით.

გამოსაცდელი ფაქტორების სტატისტიკური მახასიათებლები მოცემულია დანართში. რეგრესიული განტოლების და ექსერიმენტული მონაცემების ადეკვატურობის შეფასება შესრულებულია ფიშერის  $F$  – კრიტერიუმით, რეგრესიის ყველა კოეფიციენტი მნიშვნელოვანია სტიუდენტის  $t$  – კრიტერიუმის მიხედვით ალბათობით 0,99.

მოდელის წყობის ინფორმაციის მოდულის მიღებული შედეგების აპროქსიმირება ხდებოდა უმცირესი კვადრატების მეთოდით,  $n$  – ხარისხის პოლინომით; პოლინომის ხარისხი დაწყებულია პირველიდან მიმდევრულად იზრდებოდა. თითოეულ ნაბიჯზე გამოთვლილი იყო დისპერსია ფიშერის  $F$  – კრიტერიუმით და განისაზღვრებოდა პოლინომის ხარისხის საკმარისობა.

### 2.13. 2.1 თავის დასკვნები

- გადმოცემულია ახალი მეთოდი, რომლის მიხედვითაც მთელი გუმბათი განიხილება როგორც ერთიანი გარსი წყვეტილად ცვალებადი სიმრუდით, რაც საგრძნობლად ამოკლებს გამოთვლის ალგორითმს;
- განსაზღვრულია მომენტური ძაბვების შეფარდებითი სიდიდე გრეს-აკუმშვის ძაბვებთან შედარებით და ამ ძაბვების ზემოქმედება კონსტრუქციების საიმედოობის და ხანგამძლეობის შეფასებაზე;
- მიღებულია უმომენტო გაანგარიშების ცდომილება და მისი გამოყენების ზღვარი არათანაბარ განაწილებულ ძაბვებთან მიმართებაში.

## 2.2. დეროვანი გუმბათის კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის თავისებურებანი

### 2.2.1. დეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი

გადმოცემულია დეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი და დეროვანი გუმბათის გაანგარიშების პროგრამის ალგორითმი კომპიუტერის გამოყენებით.

კონსტრუქციის ელემენტების გადაადგილება და დეფორმაცია დამოკიდებულია კონტურული ზედაპირის კვანძების გადაადგილებაზე, რომელთანაც ისინი არიან დაკავშირებული;

– კონტურული ზედაპირის კვანძების და მასთან დაკავშირებული კონსტრუქციის ელემენტების გადაადგილება ხასიათდება თითოეულ კონტურული ზედაპირის – კვანძში გადაადგილების ბიოვექტორით:

$$\vec{V}_i = \vec{q}_i + \omega \vec{v}_i,$$

სადაც  $\vec{q}_i - i$  – კვანძის კუთხური გადაადგილების ვექტორია;

$\vec{v}_i - i$  – კვანძის ხაზოვანი გადაადგილების ვექტორია;

$\omega$  – კლიფორდის ოპერატორია, რომელიც გარკვეული კომპლექსური  $\omega^2 = 0$  თვისების მქონე ერთეულის როლს ასრულებს.

– მთავარი ფორმულის გამოსაყვანად გამოყენებულია ძალების მეთოდი და გადაადგილების მეთოდი;

– ყველა გამოკვლევა და დასკვნები ტარდება მასალის დრეკადობის ფარგლებში კონტურული ზედაპირის და კონსტრუქციების ელემენტების მცირე გადაადგილების და დეფორმირების ვარაუდით.

გარე დატვირთები, მოდებული  $i$  – კვანძები ხასიათდება  $\vec{F}_i$  – ბიოვექტორებით, რისი კომპონენტებიც მოცემულია ნატურალური დერძების  $\tau, n, b$  კოორდინატულ სისტემებში, რომლებიც დაკავშირებულია თავისი პარალელის კვანძებთან.

$\vec{F}_i$  – ბიოვექტორები წარმოდგენილია  $6 \times 1$  სვეტოვანი მატრიცების სახით

$$\vec{F}_i = \{F_{i\tau}, F_{in}, F_{ib}, M_{i\tau}, M_{in}, M_{ib}\}. \quad (17)$$

დეროვანი სფერული გუმბათები წარმოადგენენ სივრცულ ციკლურად სიმეტრიულ სისტემებს, და მათი გაანგარიშების გამარტივებისათვის მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ ზოგადი ციკლური სიმეტრიული სისტემების გამოთვლის თეორიის ზოგადი დებულებები. შესაბამისად, თითოეული  $\vec{F}$  – კომპონენტი იშლება სიმეტრიულ და ასიმეტრიულ შემადგენლებზე, შეფარდებული სისტემის სიმეტრიის ზოგად ნებისმიერ სიბრტყესთან, რომელიც განიხილება, როგორც ნულოვანი.  $\vec{F}$  – კომპონენტები წარმოდგენილია ტრიგონომეტრიული რიგების ჯამის სახით.

$$F_i = \sum_{\rho=0}^{\infty} S_{\rho}^i \cdot F_{\rho}^i + \sum_{r=0}^{\infty} C_r^i \cdot F_r^{a.c}. \quad (18)$$

სადაც  $\rho$  და  $r$  – რიგის წევრების ნომერია;

$F_{\rho}^c$  და  $F_r^{a.c}$  –  $6 \times 1$  მატრიცის ტრიგონომეტრიული რიგების კოეფიციენტებია.

$S_{\rho}^c$  და  $C_r^i$  –  $6 \times 6$  დიაგონალური მატრიცებია, რომლებიც ტოლია

$$S_{\rho}^c = [\sin \rho i \varphi \cdot \cos \rho i \varphi \cdot \cos \rho i \varphi \cdot \cos \rho i \varphi \cdot \sin \rho i \varphi \cdot \sin \rho i \varphi],$$

$$C_r^i = [\cos \rho i \varphi \cdot \sin \rho i \varphi \cdot \sin \rho i \varphi \cdot \sin \rho i \varphi \cdot \cos \rho i \varphi \cdot \cos \rho i \varphi].$$

$i$  – მოცემულ პარალელზე გამოსათვლელი კვანძის ნომერია;

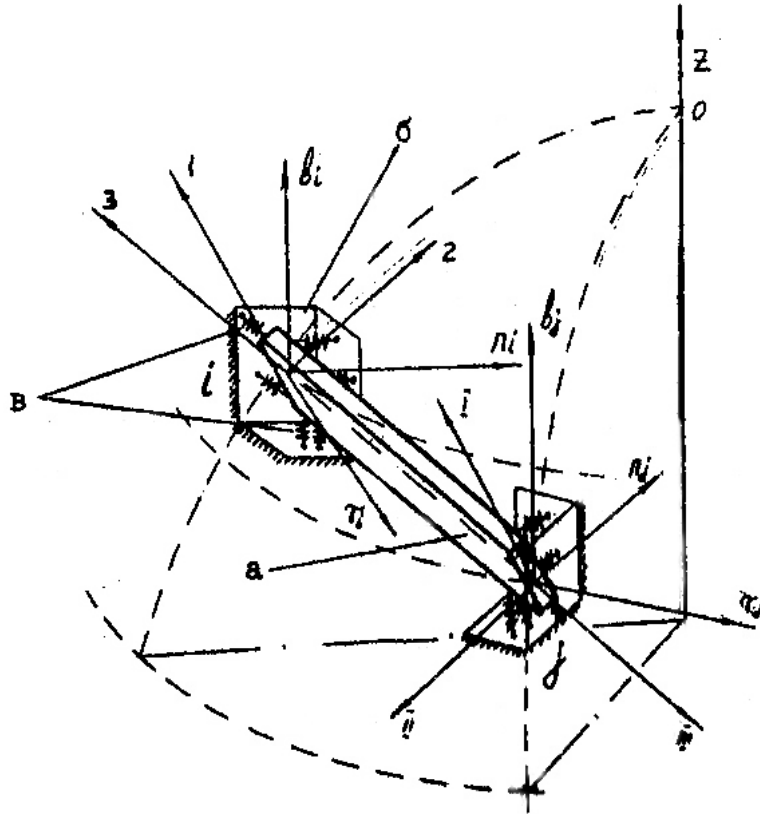
$\varphi = \frac{2\pi}{m}$  – ციკლური სიმეტრიის კუთხეა;

$m$  –  $i$ -კვანძების რაოდენობაა მოცემულ პარალელზე.

სიმეტრიულ დატვირთვებს, მეორე – ასიმეტრიულს, შეფარდებულს ნულოვან სიბრტყესთან. რიგების წევრების კოეფიციენტები (2) (მატრიცა  $F_{\rho}^c$  და  $F_r^{a.c}$ ) განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებებით:

$$\begin{cases} F_0^c = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} S_0^i F_i, & F_{\rho}^c = \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{m-1} S_{\rho}^i F_i, \\ F_0^{a.c} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} C_0^i F_i, & F_r^{a.c} = \frac{2}{m} \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} C_r^i F_i. \end{cases} \quad (19)$$

გუმბათის კვანძების გადაადგილება ხასიათდება გადაადგილებების ბიექტორებით  $\vec{V}$ , რომლებიც წარმოდგენილია  $(6 \times 1)$  სვეტოვანი მატრიცებით.



ნახ. 15.  $S(i, j)$  – ელემენტი გამოყოფილი დეროვანი სისტემიდან.  
 $a$  – დეროვანი ელემენტი,  $\sigma$  – კვანძები  $i, j$  (ხისტი დისკოებით),  
 $\delta$  – დრეკად-დამყოლი კავშირები.

$$\{v_{ir}, v_{in}, v_{ib}, \varphi_{ir}, \varphi_{in}, \varphi_{ib}\},$$

სადაც  $i \in$  – კვანძის ნომერია;

თუ დატვირთვები, რომლებიც მოქმედებენ ციკლურ სიმეტრიულ სისტემაზე წარმოდგენილია ტრიგონომეტრიული რიგების სახით,  $\vec{V}$  კომპონენტები განისაზღვრებიან გამოსახულებებით:

ა) სიმეტრიული დატვირთვის შემოქმედების ქვეშ:

$$V_i = S_\rho^i \cdot V^*; \quad (20)$$

ბ) ასიმეტრიული დატვირთვის შემოქმედების ქვეშ:

$$V_i = C_\rho^i \cdot V^*. \quad (21)$$

$V_i$  და  $V_R$  კომპონენტები განისაზღვრება (4-5).  $i$  – ინდექსის შესაბამისად  $j$  და  $k$ -ზე შეცვლით, ა.შ. გამოსახულებებში (4-5)  $V^*$  არის მოცემული პარალელის კვანძების მთავარი გადაადგილებების ბივექტორი.



დეროვანი კონსტრუქციის გაანგარიშებისათვის გამოყენებულია გადაადგილებების მეთოდი. ძირითადი სისტემა წარმოიქმნება კონსტრუქციის კვანძებში ხისტი სხეულების (დისკების) შეყვანით და მათი დამაგრებით დრეკადი კავშირების მეშვეობით, რომლებიც უზრუნველყოფენ კვანძების წრფივი და კუთხური გადაადგილებების აცილებას  $\tau, n, b$  დერძის მიმართულებით.

გუმბათის დეროები შეერთებულია კვანძებთან დრეკადი კავშირებით. კვანძები  $n, n+1, l, m$  საყრდენია და სახსროვნად დამაგრებულია ხისტი საყრდენი კონტურთან.  $m_0$  – საანგარიშო ელემენტისათვის, რომელიც გამოყოფილია სისტემიდან ცენტრალური კუთხით  $\varphi$ , კანონიკური განტოლებებს აქვს სახე:

$$\begin{cases} r_{0,0}z_0 + r_{0,i}z_i + r_{0,i+1}z_{i+1} + r_{0,i+2}z_{i+2} + r_{0,i+3}z_{i+3} + r_{0,i-i}z_0 + R_{0,p} = 0; \\ r_{i,i}z_0 + r_{i,0}z_0 + r_{i,i+1}z_{i+1} + r_{i,i}z_1 + r_{i,j}z_j + r_{i,j-1}z_{j-1} + r_{i,R}z_R + R_{i,p} = 0; \\ r_{i+1,i+1}z_{i+1} + r_{i+1}z_0 + r_{i+1,i}z_i + r_{i+1,i+1}z_{i+2} + r_{i+n,jn}z_{jn} + r_{i+1,R+1}z_{E+1} + R_{i+1,p} = 0; \\ r_{i,j}z_j + r_{j,i}z_i + r_{j,i+1}z_{i+1} + r_{j,k}z_k + r_{j,k+3}z_{k+3} + R_{j,p} = 0; \\ r_{k,k}z_k + r_{k,i}z_i + r_{k,j}z_j + r_{n,j-1}z_{j-1} + R_{k,p} = 0; \\ r_{k+1,k+1}z_{k+1} + r_{k+1,i+1}z_{i+1} + r_{k+1,j}z_j + r_{k+1,k+1}z_{j+1} + R_{k+1,p} = 0. \end{cases} \quad (22)$$

სისტემაში (22)  $r$  – კოეფიციენტები წარმოადგენენ  $n \times n$  მატრიცების პირველი ინდექსი შეესაბამება კავშირებს კვანძებში რეაქტიული ძალების ბივექტორების კომპონენტებს, რასაც მეორე ინდექსი შეესაბამება კვანძების ერთეული გადაადგილებებით, რომელსაც  $Z_0, Z_i, \dots, Z_{j=1} - 6 \times 1$  მატრიცის  $0, i \dots j-1$  კვანძების გადაადგილებების ბივექტორების კომპონენტები დერძების მიმართულებით, რომლებიც დაკავშირებულია ამ კვანძებთან.

$R_{0,p}, R_{i,p}, \dots, R_{k+1,p} - 6 \times 1$  მატრიცები რეაქტიული ძალების ბივექტორების კომპონენტები  $0, i, j, k$  კვანძების კავშირებში გარე დატვირთვის ზემოქმედებისაგან.

კანონიკური განტოლებების (22) კოეფიციენტები განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებებით:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{0,0} = \varepsilon_0^{0,i} + \varepsilon_0^{0,i+1} + \varepsilon_0^{0,i+2} + \varepsilon_0^{0,i+3} + \varepsilon_0^{0,i-1}; \\ r_{i,j} = \varepsilon_i^{0,i} + \varepsilon_i^{i,i+1} + \varepsilon_i^{0,i-1} + \varepsilon_i^{i,j} + \varepsilon_i^{i,i-1} + \varepsilon_i^{i,R}; \\ r_{i+1,i+1} = \varepsilon_{i+1}^{0,i+1} + \varepsilon_{i+1}^{i,i+1} + \varepsilon_{i+1}^{i+1,i+1} + \varepsilon_{i+1}^{i+1,R+1} + \varepsilon_{i+1}^{i+1,k+1} + \varepsilon_{i+1}^{i+1,j}; \\ r_{j,j} = \varepsilon_j^{j,i} + \varepsilon_j^{j,i+1} + \varepsilon_j^{j,R} + \varepsilon_j^{j,R+1} + \varepsilon_j^{j,R} + \varepsilon_j^{j,m}; \\ r_{R,R} = \varepsilon_R^{R,i} + \varepsilon_R^{R,j} + \varepsilon_R^{R,j+1} + \varepsilon_R^{R,r} + \varepsilon_R^{R,l} + \varepsilon_R^{R,m-1}; \\ r_{R+1,R+1} = \varepsilon_{R+1}^{R-1,i+1} + \varepsilon_{R+1}^{R-1,m} + \varepsilon_{R+1}^{R-1,j} + \varepsilon_{R+1}^{R+1,n+1} + \varepsilon_{R+1}^{R+1,l+1} + \varepsilon_{R+1}^{R+1,j+1}; \\ r_{i,j} = \varepsilon_j^{i,j}. \end{array} \right. \quad (23)$$

სადაც  $\varepsilon_0^{0,i}, \varepsilon_0^{0,i+1}, \dots, \varepsilon_R^{R,m-1}$  –  $6 \times 6$  სიხისტის ღერძების მატრიცებია, რომელიც მართული კვანძებთან და ნომრები განისაზღვრება  $\varepsilon$ -თან პირველი ინდექსით. გამოსახულება დანარჩენი  $r$  – მატრიცებისათვის მიიღება შესაბამისი ინდექსების ჩასმით ბოლო განტოლებების სისტემაში (23)

საერთო გამოსახულება  $\varepsilon$  – მატრიცის ამოსახსნელად მიიღებს სახეს:

$$\varepsilon_i^{i,j} = \Pi_{i123} k'_{mp} \cdot r_{i,j}^i \cdot k_{mp}^j I_{mp}, \quad (24)$$

სადაც  $i$  და  $j$  იღებენ მატრიცა (23) ინდექსების მნიშვნელობებს.

$\Pi_{i123} k'_{mp} \cdot \Pi_1 \cdot k_{mp}^j I_{mp}$  –  $6 \times 6$  ბივექტორების გარდაქმნის კომპონენტების მატრიცებია,  $I_{123}, k_{mb}^j$  კოორდინატის სისტემიდან შესაბამისად  $k_{mb}^i, I_{I \ II \ III}$  სისტემაზე გადასვლისას.

$r_{i,j}^i$  –  $6 \times 6$  ერთეული რეაქციების მატრიცაა. კოორდინატული სისტემები  $k_{mp}^j$  და  $k_{mp}^i$  – ნატურალური ღერძების სისტემებია, რომლებიც დაკავშირებულია  $i$  და  $j$  კვანძებთან შესაბამისად.

$I_{123}$  კოორდინატულ სისტემაში განისაზღვრება კომპონენტები, გამოწვეული ერთეული გადაადგილებებით  $I_{123}$  და  $I_{I \ II \ III}$  ღერძების მიმართულებებით.

სისტემები დაკავშირებულია  $I_{123}$  და  $I_{I \ II \ III}$  კვანძებთან შესაბამისად  $j$ .

$\Pi_i$  ბივექტორების კომპონენტების გარდაქმნის მატრიცები განისაზღვრება გამოსახულებებით:

$$\Pi_{I123} \cdot k_{mp}^i = \begin{bmatrix} A_{I123} \cdot k_{mp}^i & 0 \\ 0 & A_{I123} \cdot k_{mp}^i \end{bmatrix}, \quad (24)$$

სადაც  $A_{1I_{123}} \cdot k_{sp}^i - 3 \times 3$   $I_{123}$  და  $k_{mb}^i e^{i\theta}$  კოორდინატული სისტემების ღერძებით შექმნილი კუთხეების კოსინუსების მატრიცაა;

0-3x3 – ნულოვანი მატრიცაა.

ბიექტორების კომპონენტების გარდაქმნის მატრიცების შედგენა მარტივია. ისინი განისაზღვრებიან განხილული სისტემის გეომეტრიული თანაფარდობით. სიხისტის მატრიცის  $\varepsilon$  განსაზღვრის დროს მთავრია ერთეული რეაქციების  $r$  – მატრიცის კომპონენტების პოვნა (მონახვა).

## 2.2.2. დამაგრებული ღერძის ერთეული რეაქციების მატრიცის გამოყვანა

კვანძებში დრეკად-დეფორმირებად დამაგრებული ღერძის ერთეული რეაქციების მატრიცის გამოსაყვანად შემოტანილია შემდეგი დაშვებები: განივი და გრძივი ძალები საყრდენი კვეთებიც მობრუნების კუთხეებზე არ მოქმედებს; ღერძების და კავშირების მასალა წრფივად დრეკადია და დეფორმაციები წრფივად დაკავშირებულია მიღებული დატვირთვასთან; ღუნვის შემთხვევაში სამართლიანია ბრტყელი კვეთების ჰიპოთეზა, გრეხის დროს დაცულია სენ-ვენანის პრინციპი.

ასეთი ღერძის გაანგარიშების სქემა წარმოდგენილია ხისტი კვანძებიანი ღეროვანი მოდელით, სადაც დრეკადი კავშირების მეშვეობით მირთულია ღერძები).

ძალების მოქმედების დამოუკიდებლობის პრინციპების და მიღებული დაშვებების შესაბამისად ნაშრომში მიღებულია ერთეული რეაქციების მატრიცები მუდმივი კვეთის სწორხაზოვანი ღერძის, რომელიც დრეკად-დეფორმირებადათ არის დამაგრებული კვანძებში ღერძული ზემოქმედების ღუნვით, გრეხითი დეფორმაციების და წრფივი ძვრების შემთხვევაში (დროს?) შესაბამისი დამყოლი მატრიცის შექცევის გზით

$$\delta = \delta^* + \mu,$$

რაც მნიშვნელოვნად ამარტივებს მის ამოყვანას.

$$r = \delta^{-1} = [\delta^* + \mu]^{-1} = [E + r^* \cdot \mu]^{-1} \cdot r^* .$$

აქ  $\delta$  და  $r$  – შესაბამისად დამყოლი და კვანძებში დრეკად-დეფორმირებად დაზარალებული ღეროს სიხისტის მატრიცებია.

$\delta^*$  და  $r^*$  – იგივე სისტემა დამაგრებით კვანძებში;

$\mu$  – დრეკადი კავშირების დამყოლობის მატრიცა;

$E$  – ერთეული მატრიცა.

საბოლოო ელემენტია  $S_{ij}$  დრეკად-დეფორმირებადი კავშირებიან კვანძებში  $i$  და  $j$ .  $i$  – კვანძში ერთეული რეაქციები, რომელიც გამოწვეულია  $i$  – კვანძის ერთეული გადაადგილებებით ელემენტების განივი კვეთის ინერციის მთავარი ღერძების მიმართულებით, მატრიცას აქვს სახე:

$$r_{i,j}^i = \Delta \times \left[ \begin{array}{ccc} \frac{12i_{2,3,1}}{l_s^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12i_{15}}{l_s^2}(1 + \mu_i^* + \mu_j^*) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f_i}{(1 + \mu_i^* + \mu_j^*)\Delta} \\ 0 & \frac{6i_{26}}{l_s}(1 + 2\mu_j^*) & 0 \\ \frac{6i_{26}}{l_s}(1 + 2\mu_j^*) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6i_{26}}{l_s}(1 + 2\mu_j^*) & 0 \\ \frac{6i_{26}}{l_s}(1 + 2\mu_j^*) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 4i_{15}(1 + 3\mu_j^*) & 0 & 0 \\ 0 & 4i_{15}(1 + 3\mu_j^*) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{i_{35}}{(1 + \mu_i^* + \mu_j^*)\Delta} \end{array} \right] \quad (26)$$

$S(i, j)$  ღეროს  $j$  კვანძის ერთეული რეაქციები, რომლებიც გამოწვეულია მოპირდაპირე  $i$  კვანძის ერთეული გადაადგილებებით, ინერციის მთავარი ღერძების მიმართულებით, მისი  $i, j$  კვანძებში დრეკად-დამყოლი დამაგრების პირობებში, მატრიცას აქვს სახე:

$$r_{i,j}^i = \Delta \times \begin{bmatrix} \frac{12i_{1s}}{l_s^2}(1 + \mu_i^* + \mu_j^*) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12i_{1s}}{l_s^2}(1 + \mu_i^* + \mu_j^*) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f_i}{(1 + \mu_i^* + \mu_j^*)\Delta} \\ 0 & \frac{6i_{26}}{l_s}(1 + 2\mu_j^*) & 0 \\ \frac{6i_{26}}{l_s}(1 + 2\mu_j^*) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6i_{26}}{l_s}(1 + 2\mu_j^*) & 0 \\ \frac{6i_{26}}{l_s}(1 + 2\mu_j^*) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2i_{2s} & 0 & 0 \\ 0 & -2i_{2s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{i_{3s}}{(1 + \mu_i^* + \mu_j^*)\Delta} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

აქ სიდიდეები  $i_{1s}, i_{2s}, i_{3s}, f_s$  წარმოადგენენ  $S(i, j)$  დეროს გრძივ სიხისტეს გაჭიმვის (კუმშვის) დეფორმაციაზე, გადანაცვლება და მობრუნება საყრდენის ორ სიბრტყეში და გრეხა:

$$i_{1s} - i_{1s} = \frac{EI_{1s}}{l_s} = \frac{EI_{1s}}{l_s}; \quad i_{2s} - i_{1s} = \frac{EI_{2s}}{l_s} = \frac{EI_{1s}}{l_s};$$

$$i_{3s} - i_{1s} = \frac{GI_{3s}}{l_s} = \frac{GI_{1s}}{l_s}; \quad f_s = \frac{EF_s}{l_s}.$$

$$\Delta = \frac{1}{11 + 4(\mu_i^n + \mu_j^n) + 12\mu_i^n \mu_j^n} \quad \text{აქ და ადრე (3.11-3.12)-ში } \mu_{i(j)}^0, \mu_{i(j)}^U, \mu_{i(j)}^\Gamma$$

კიდური კავშირების დამყოლობის პარამეტრები, მოყვანილი დეფორმირებადი დეროს დამყოლადე.

$$\mu_{i(j)}^0 = \frac{EF_s}{l_s C_{i(j)}^0}; \quad \mu_{i(j)}^U = \frac{EI}{l_s C_{i(j)}^U}; \quad \mu_{i(j)}^m = \frac{EI}{l_s C_{i(j)}^\Gamma}; \quad \mu_{i(j)}^{kp} = \frac{GI^{kp}}{l_s C_{i(j)}^{kp}}$$

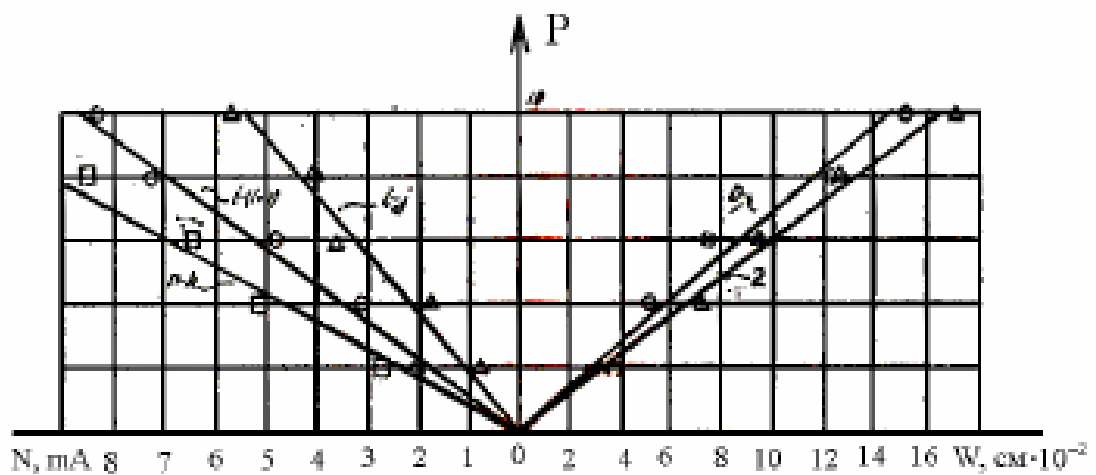
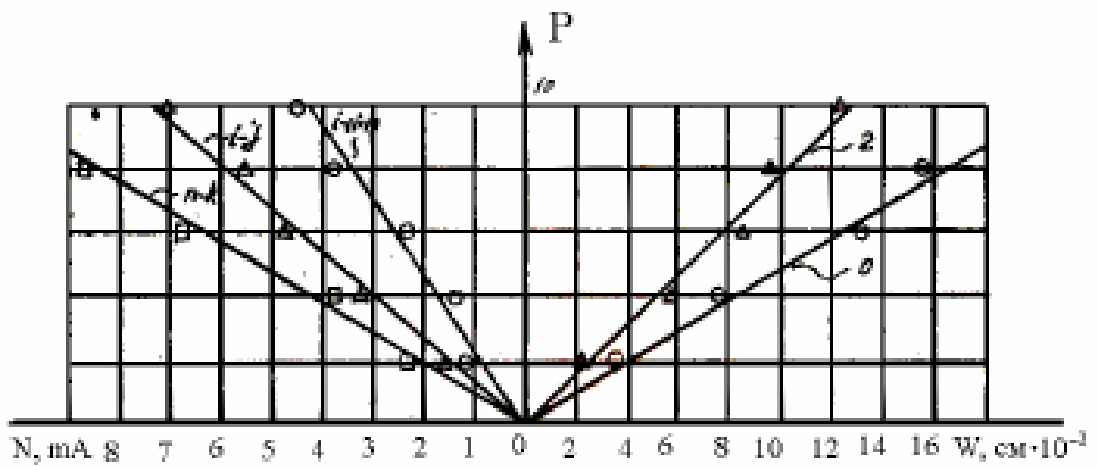
$C_{i(j)}^0, C_{i(j)}^U, C_{i(j)}^\Gamma, C_{i(j)}^{kp}$  - საკვანძო კავშირების სიხისტის კოეფიციენტი ერთეული რეაქციების მატრიცებს (3.1-3.12) აქვს საკმაოდ ზოგადი სახე. მაგალითად  $\mu_i = \mu_j = 0$  ისინი სამართლიანია დეროებისთვის, რომლებსაც აქვს აბსოლუტურად ხისტად წაჭერილი ბოლოები.

ერთეული რეაქციების და  $\Pi_1$  ბივექტორების კომპონენტების გარდაქმნის მატრიცების განსაზღვრის შემდეგ, განისაზღვრება  $\tau$  სიხისტის მატრიცები, შემავალი გამოსახულებაში (3.7). შემდეგ გაანგარიშდება კანონიკური განტოლებების (3.6) კოეფიციენტები.

ციკლური სიმეტრიული სისტემების გადაადგილების მეთოდით გაანგარიშების დროს საკმარისია შევადგინოთ კანონიკური განტოლებები ყოველი კვანძის პარალელის ერთი კვანძისათვის. ისინი ტიპურია მოცემული პარალელის ყველა კვანძისათვის.

(20-21)-დან გამომდინარეობს, რომ კვანძის თითოეული პარალელისათვის უცნობია ექვსი გადაადგილება  $\vec{V}^*$  ბივექტორის კომპონენტები. კანონიკური განტოლებების

ა)



ნახ. 16. გრძივი ძალვა  $N$  დეროვან ელემენტებში და ვერტიკალური გადაადგილებები  $W$ , გუმბათის ექსპერიმენტული კონსტრუქციების კვანძებში.  
 ა) კონსტრუქციის მთლიანი დატვირთვა; ბ) არასიმეტრიული დატვირთვა

(22) უცნობები გამოიხატება მთავარი გადაადგილებების ბივექტორების კომპონენტების მეშვეობით.

კანონიკური განტოლებების (22) გაანგარიშების შემდეგ, განისაზღვრება ამ ბივექტორების კომპონენტები, შემდეგ (20-21) გამოსახულებების მიხედვით დავადგენთ გუმბათის ყველა კვანძების გადაადგილებას.

კვანძების გადაადგილებები დატვირთვის დაშლის ყოველი წევრისაგან მათი განსაზღვრის შემდეგ ჯამდება.

გუმბათის ღეროების კვეთებში ძალები განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$F_{i,j}^i = r_{i,j}^i \cdot \Pi_{1K_{mb}^i} \cdot V_i + r_{i,j}^j \cdot \Pi_{1K_{mb}^j} \cdot V_j, \quad (28)$$

სადაც მატრიცის ქვედა ინდექსი  $F_{i,j}^i$  შესაბამისობაშია ღერძთან, ზედა – კი ღერძის კვეთასთან, სადაც განისაზღვრება ძალები.

გამოსახულებას ძალების მატრიცისათვის სხვა კვეთებში მივიღებთ (3.13)-ში შესაბამისი ინდექსების ჩასმით.

### 2.2.3. გუმბათის კონსტრუქციის ექსპერიმენტული გამოკვლევების აღწერა

პარაგრაფი შეიცავს გუმბათის კონსტრუქციის ექსპერიმენტულ გამოკვლევების აღწერას და მიღებულ შედეგებს. კომპლექსური ექსპერიმენტის მიზანი იყო:

- სისტემის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ცვლილებების ძირითადი კანონზომიერების განსაზღვრა გარე დატვირთვების ზემოქმედების ჩატვირთვის სხვადასხვა სქემების პირობებში;
- ექსპერიმენტული კონსტრუქციების გაანგარიშების სქემაში მიღებული დაშვებების და ჰიპოთეზების შემოწმება;
- კონსტრუქციის შრომისუნარიანობის შეფასება გამოცდების და დაძაბვის ქვეშ ექსპლუატაციის დროს დაყენებული ამოცანების შესაბამისად.

ექსპერიმენტული გამოკვლევისათვის იყო დამუშავებული გუმბათოვანი საფარის კონსტრუქცია, რომელიც შედგებოდა ასაწყობი შეწებებული ხის ელემენტებისგან.

გუმბათის კარკასი წარმოადგენს ღეროვან 180-წახნაგოვანი სისტემის ნაწილს, ჩახაზულს 10,05 რადიუსის სფეროში. გუმბათის დიამეტრი ფუძეზე არის 18 მ, აწვევის ისარი – 5,57 მ, ის შედგება 3 ტიპოზომის 75 შეწებებული ხის ღეროებისაგან, რომლებიც წარმოქმნიან სამკუთხა უჯრედებს, რომელთა გვერდების ზომებია 3,5-დან – 4,0 მ-მდე.

ღეროვანი ელემენტები განივი კვეთით 100×180 მმ<sup>2</sup> შესრულებულია წებოიანი 33 მმ სისქის წიწვოვანი ხის ფიცრებისაგან. ღეროები შეერთებულია კვანძებში წყვილი 4 მმ ფურცლოვანი ფოლადის ზესადებებით, 10 მმ დიამეტრის ორი მოჭრილი ჭანჭიკის მეშვეობით. ღეროებშორისო კვანძური სივრცე შევსებულია პოლიმერბეტონით. კონსტრუქცია დამონტაჟდა 15 კონტრფორსიან საყრდენზე, რომელიც შესრულებულია ბეტონით შევსებული მილებისაგან ამოშენებული როსტვერკში.

გუმბათის კონსტრუქციის გამოცდა წარმოებდა ვერტიკალური დატვირთვებით. ამისათვის დატვირთვები მოდებული იყო საკიდარების მეშვეობით ჩაწერტებულად (შემოკრებულად) კვანძებში.

ძირითადი ექსპერიმენტული გამოკვლევები შესრულებული იყო დატვირთვების ქვეშ გაანგარიშების სიდიდეების ფარგლებში.

დატვირთვის ადგილმდებარეობის მიხედვით გამოკვლეული იყო გუმბათის კარკასის მუშაობა ჩატვირთვის სამი სქემით: თავმოყრილი დატვირთვა ცენტრალურ კვანძში, დატვირთვა გუმბათის სიმეტრიის სამი ბლოკის კვანძებში, და მესამე სქემა შეიცავდა სამივე კვანძის ჩატვირთვას.

ექსპერიმენტული გამოკვლევის მსვლელობის დროს ტარდებოდა კიდური დეფორმაციების, ვერტიკალური გადაადგილებების და კონსტრუქციის კვანძებში შეერთების დამყოლობის გაზომვა.

ხელსაწყოების რაოდენობის შემცირების მიზნით გათვალისწინებული იყო სიმეტრია. ძაღვების და გადაადგილებების ხასიათი ჩატვირთვის ყველა სქემის მიხედვით იყო პრაქტიკულად ხაზოვანი, რაც შესაბამისობაში მიღებული ჰქონდა პიპოთეზებთან და დაშვებებთან (ნახ. 17).

ძაღვების და დეფორმაციების ექსპერიმენტული სიდიდეები, როგორც წესი, იყო თეორიულზე ნაკლები.



შედგების გაფანტვა სიმეტრიულ კვანძებში არ აღემატებოდა 12%-ს. ნარჩენი დეფორმაციების სიდიდე იყო 5% ჩაღუნვებისთვის და 13% დამყოლობისთვის.

გამოცდების ერთერთ ეტაპზე მთლიანი ჩატვირთვის დროს 250 საათის განმავლობაში შემოწმებული იყო გუმბათის მუშაობა ნორმატიული დატვირთვის (1,50 მ²) ზემოქმედებაზე.

გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ დეფორმაციებს დაცხრომის ხასიათი აქვს.

გამოცდები:

სიხისტის კოეფიციენტის გაანგარიშება ჩატარებული იყო “დატვირთვა-დეფორმაციის“ გრაფიკული დამოკიდებულებების აგებით.

გრაფიკებიდან მიღებული სიხისტის კოეფიციენტების საშუალო სიდიდე გაჭიმვის და კუმშვის შემთხვევაში იყო  $C^0 = 10,6 \cdot 10^7$ , გრეხის დეფორმაციის დროს  $C^{KP} = 6,2 \cdot 10^{-4}$ . სიხისტის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა  $C^\alpha$  ღუნვის დროს, როდესაც  $\alpha$  (ძალის მოქმედების მიმართულების და ელემენტის 1 განივი კვეთის ღერძს შორის კუთხე). იცვლებოდა ნაბიჯით 22,50÷900 ფარგლებში მდებარეობდა 1060÷510 ინტერვალში.

$C^\alpha$  მიახლოებით შეიძლება გამოვთვალოთ გამოსახულებიდან, რომელიც მიღებულია უმცირესი კვადრატების მეთოდით

$$C^\alpha = \frac{1000}{0,0121\alpha + 0,986} \quad (29)$$

$C^\alpha$ -ს ცვლილებების გრაფიკი, დამოკიდებული კუთხე  $\alpha$ -ზე და სხვა კავშირთა განტოლებები მოცემულია.

კვანძოვანი შეერთებების გამძლეობის გამოცდების შრომატევადობის გამოსარიცხად და ექსპერიმენტული შედეგების სიზუსტის გაზრდის მიზნით დამუშავდა ხელსაწყო საყრდენი კონტურის სახით, რომელიც გვაძლევს საშუალებას მოსაზღვრე ელემენტების დეფორმაციულობის და მთლიანი კონსტრუქციის კვანძური შეერთებების დამყოლობის მოდელირებას.

ამისათვის ხელსაწყოს საყრდენ კონტურს აქვს სპეციალური დრეკადი ელემენტები, რისი გამოყენებაც გვაძლევს კონსტრუქციის

ფრაგმენტის (კვანძის) მუშაობის მთლიანი სისტემის შემადგენლობაში იმიტირების საშუალებას.

ცალკე განიხილება თოვლის ნალექის ინტენსიობის სამწლიანი დაკვირვებები მრავალწახნაგოვანი სფერული გუმბათის ზედაპირზე არხანგელსკის პირობებში.

დაკვირვებებმა გვიჩვენა, რომ თოვლი გუმბათის მსახველზე და წრეხაზზე მკვეთრად არათანაბრად ნაწილდება. ძირითადი თოვლი გროვდება ქარისაგან დაცულ სამხრეთის ან სამხრეთ-აღმოსავლეთის ფერდობზე (დაქანებაზე?). ინტენსიობა იზრდება წიბოთაშორის სიბრტყეზე. თოვლის საშუალო სიმჭიდროვე (სიმკვრივე) მიწაზე  $10 \pm 20\%$ -ით აღემატება საშუალო სიმჭიდროვეს სახურავზე. მეტროლოგიური დატვირთვის სპეციფიკის გათვალისწინებით, ავტორი გეგმავს ეს გამოკვლევები გააგრძელოს რამდენიმე წლის განმავლობაში სტატისტიკური მონაცემების დასაგროვებლად სფერული გუმბათების პროექტირების ნორმების დასაზუსტებლად.

#### 2.2.4. 2.2 თავის დასკვნები

- მიღებულია ღეროვანი გუმბათების კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის თავისებურებანი;
- წარმოდგენილია ღეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი და ღეროვანი გუმბათის გაანგარიშების პროგრამის ალგორითმი, კომპიუტერის გამოყენებით;
- აღწერილია გუმბათის კონსტრუქციის ექსპერიმენტული გამოკვლევები.

### 2.3. გუმბათის აგების ახალი ტექნოლოგია

გუმბათი იგება მთლიანად 0-ვან ნიშნულზე (ლ. მახვილაძე, ბ. გუსევი და სხვ. საქართველოს პატენტი 1036, 2003).

I ეტაპზე, ასაშენებელი გუმბათის ირგვლივ, ექსკავატორის საშუალებით კეთდება წრიული ტრანშეა, რომლის ჩაღრმავება გუმბათის აწევის ისრის ტოლია.

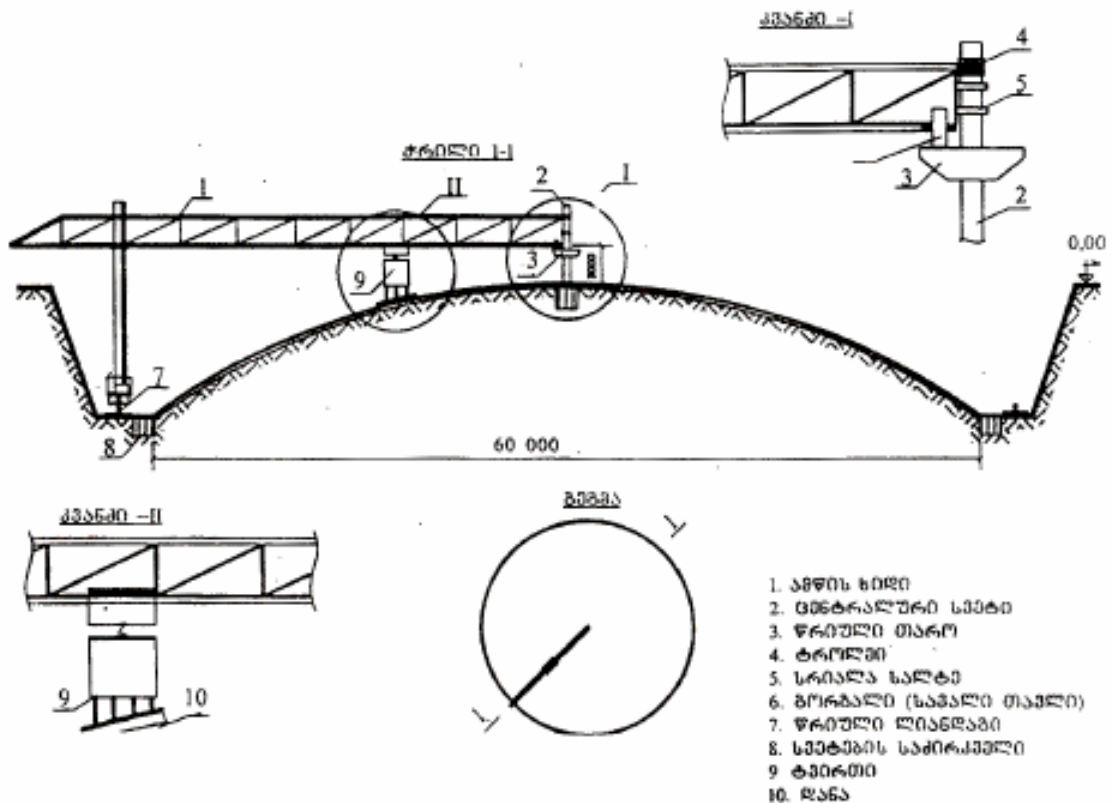
II ეტაპზე ბულდოზერით და გრეიდერით გრუნტს ვჭრით რადიალური მიმართულებით და ჩაგვაქვს ტრანშეაში, საინდანაც

ექსკავატორს გადააქვს გარე ყრილზე, ამგვარად საამშენებლო მოედანს ეძლევა გუმბათის მიახლოებითი ფორმა.

შემდეგ ტრანშეას ძირის ნიშნულზე ეწყობა სვეტებისათვის წერტილოვანი საძირკვლები ანკერებით, შემდეგ ვაწყობთ წრიულ ლიანდაგს და გამონტაჟებთ მოდერნიზებულ ამწეს.

მშენებლობის ორგანიზაციის უზრუნველყოფისა და უშუალოდ გუმბათის აგების გამარტივების მიზნით, მოდერნიზაცია უკეთდება ჯოჯგინა ამწეს ისე, რომ ხიდის ერთი მხარე ბორბლის საშუალებით უშუალოდ ეყრდნობა გუმბათის ცენტრში დამონტაჟებული სვეტის წრიულ თაროს და სრიალა სახსრით მიბმულია სვეტზე. ამწის მეორე მხარე ჩვეულებრივია და მოძრაობს წრიულ ლიანდაგზე, ასაგები გუმბათის ირგვლივ.

მარტივდება ამწესათვის ელექტროენერგიის მიწოდება სვეტის ირგვლივ ტროლეის მცირე საღტის მოწყობით, რაც გამორიცხავს სათრევი კაბელის საჭიროებას.



ნახ. 17.

ამწის ურიკაზე შეკიდული დანიანი ტვირთის და ამწის წრიული მოძრაობის საშუალებით ვიწყებთ გრუნტის დამუშავებას, სანამ არ

მივიღებთ გუმბათის უფრო მიახლოებულ ფორმას. შემდეგ ამწის ხიდზე ვამაგრებთ გუმბათის მოხაზულობის ნახევარწრის თარგს და ამწის წრიული მოძრაობით, ხრეშისა და წვრილფრაქციული ასფალტის დატანა-დატკეპვით ვღებულობთ გუმბათის ფორმას. ასფალტის დატანა-დატკეპვსა მორდება გუმბათის ზუსტი ფორმის მიღებამდე (ნახ. 18).

აღნიშნული ღონისძიებები არა მარტო გამორიცხავს ხარაჩოებისა და ქარგილების დაყენების შრომატევად და ძვირადღირებულ სამუშაოებს, არამედ ძალზე ამარტივებს გეოდეზიურ სამუშაოებსაც.

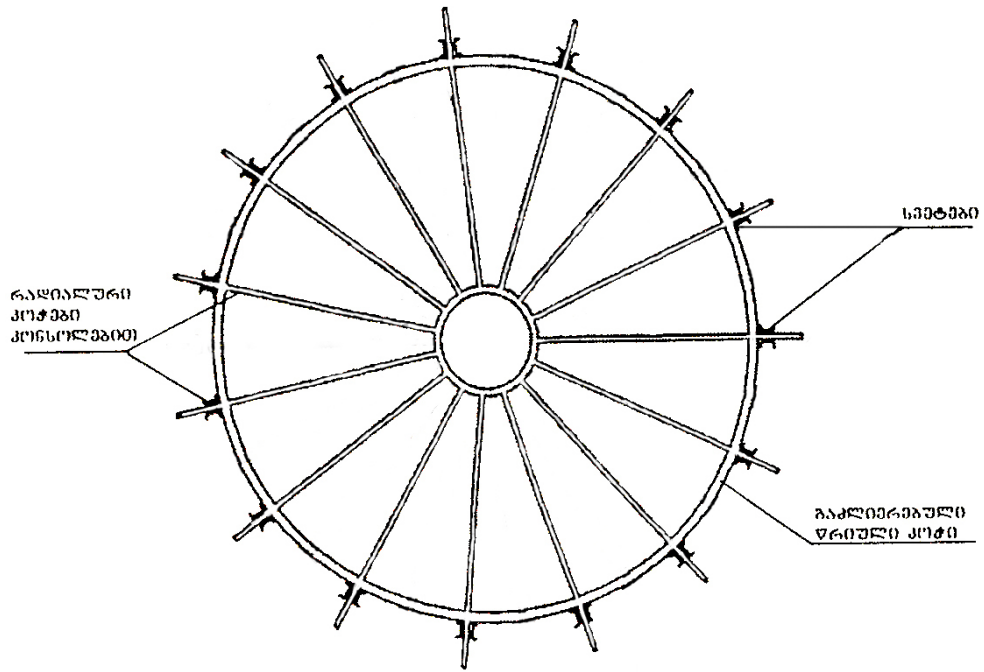
შესაძლებელია გუმბათის შიდა ზედაპირი გადავწყვიტოთ მთლიანად გლუვი. ამისათვის წრიულ კოჭებს ვაუქმებთ და გამბრჯენი ძალების გაზრდასთან დაკავშირებით სათანადოდ ვზრდით და ვაარმირებთ ბოლო წრიულ კოჭს. რაც შეეხება რადიალურ კოჭებს, თავისი კონსოლური ნაწილით, მათი სიმაღლე შესაბამისად ამოიწვევა გუმბათის გარსის ზედაპირზე. ამრიგად, საჭირო აღარ იქნება გრუნტზე რადიალური და წრიული კოჭებისათვის ღარების ამოჭრა მათში ქარგილების განსათავსებლად და სხვა.

III ეტაპზე ვაწყობთ არმატურას. აღსანიშნავია, რომ მოდერნიზებული ამწე საშუალებას გვაძლევს ბაგირის “ბიხტები“, რომელთა საერთო სიგრძე დიამეტრების მიხედვით 1,5-5 კილომეტრია, ადვილად დავაწყობთ წრიულად ან ჩავაწყობთ წრიული კოჭის ქარგილებში უწყვეტად, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს საშემსდუღებლო სამუშაოებს, ლითონის ხარჯს და ზრდის საიმედოობას. ჩვეულებრივი ამწეების საშუალებით ამ ოპერაციების ჩატარება მნიშვნელოვნად გართულებოდა.

IV ეტაპზე მიმდინარეობს გუმბათის უწყვეტი დაბეტონების პროცესი და ვიბრირება.

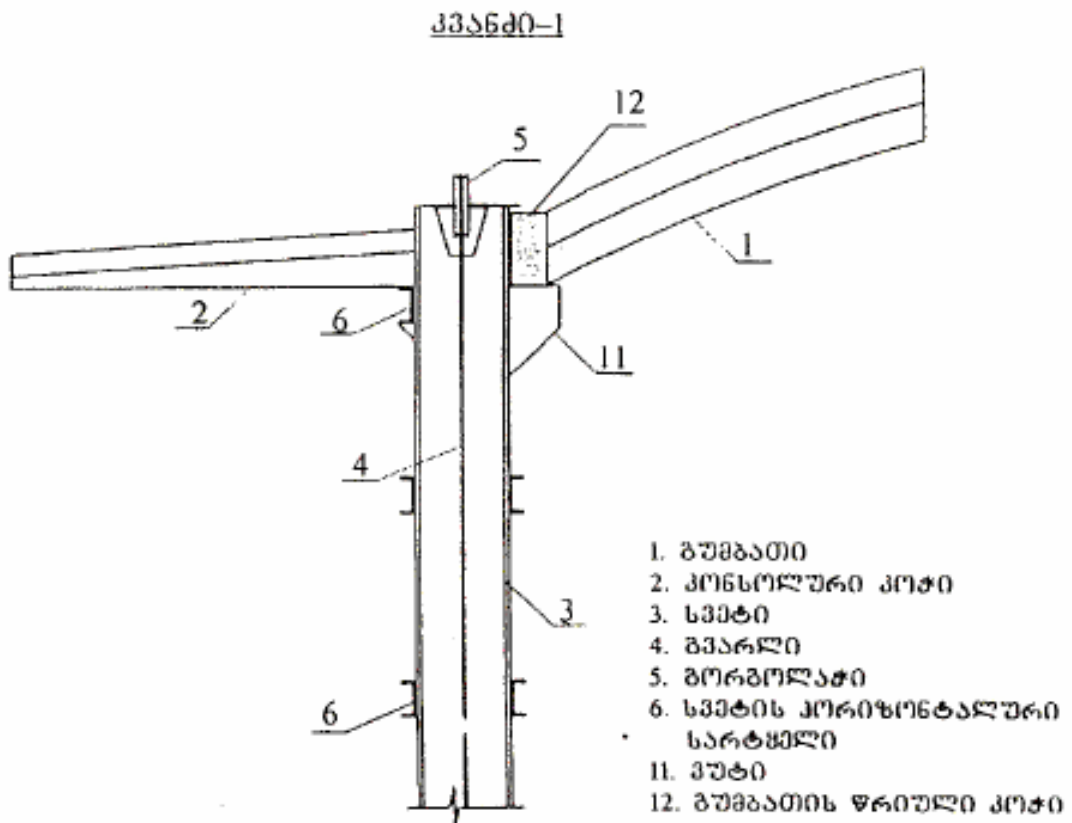
V ეტაპზე, 28 დღის განმავლობაში (სანამ ბეტონი მიიღებს საპროექტო სიმტკიცეს), ვაკეთებთ სახურავს, ზენიტურ ფანრებს და მთლიანად ვამთავრებთ გუმბათის გადახურვის სამუშაოებს.

VI ეტაპზე დემონტაჟს ვუკეთებთ მოდერნიზებულ ამწეს და წერტილოვან საძირკვლებზე გამონტაჟებთ წყვილი შველერისაგან შედგენილ ლითონის სვეტებს, ისე, რომ შველერებს შორის ექცევა რადიალური კოჭების კონსოლები, ხოლო შველერების თაროები, მცირე ღრეჩოთი, უშუალოდ ემჯინება გუმბათის განაპირა წრიულ კოჭს (ნახ 18).



ნახ. 18. გუმბათის განაპირა წრიულ კოჭი

სვეტების წყვილი შველერი ურთიერთდაკავშირებულია ჰორიზონტალური სარტყლებით ჭანჭიკების საშუალებით. სარტყელებს შორის მანძილი ჰიდროცილინდრების ბიჯის ტოლია (ნახ 19).



ნახ. 19. სარტყელებს შორის მანძილის ჰიდროცილინდრების ბიჯი

VII. ჰიდროცილინდრების ბიჯის შესაბამისად, საფეხურებად ვწევთ გუმბათს საპროექტო ნიშნულამდე. აღსანიშნავია, რომ საიმედოობის უზრუნველყოფის მიზნით ორ-ორი ცანგია ჩართული მიმდევრობით ჰიდროცილინდრების დამქან და სვეტებზე გათვალისწინებულ დამჭერ საშუალებებზე.

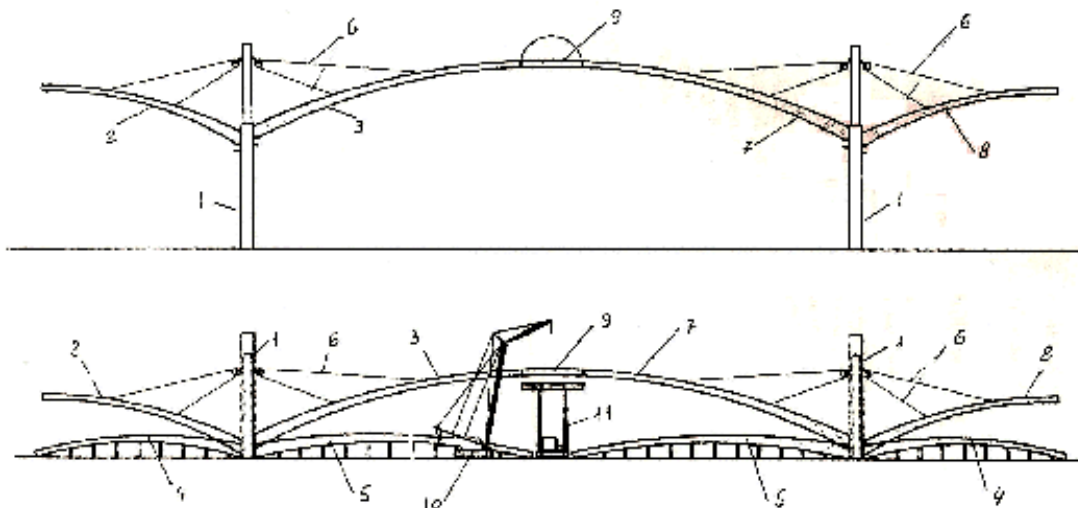
გუმბათის შუალედურ ეტაპზე აწვევის პროცესი ნაჩვენებია ნახ. 21, ბ-ზე.

გუმბათის საპროექტო ნიშნულზე აწვევის შემდეგ სვეტებზე ვაღულებთ კონსოლური კოჭების ქვეშ განლაგებულ ლითონის სარტყელებს, მიბრჯენით, ხოლო წრიული კოჭის ქვეშ დამჭერ ლითონის სვეტებს.

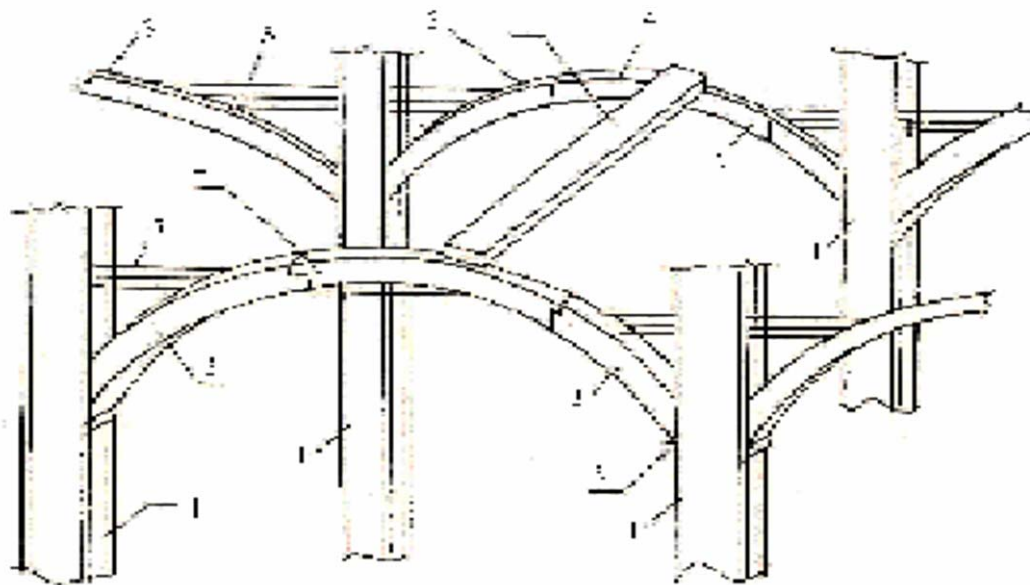
### 2.3.1. დიდმალიანი გადახურვის აგების ტექნოლოგია

ცნობილია დიდმალიანი ანაკრები გადახურვების აგების ხერხი. ასეთი ხერხით შეიძლება აიგოს ისეთი კონსტრუქციები, როგორცაა კოჭები, წამწეები, ბრტყელი და მზიდი სივრცითი გადახურვები, ანაკრები გუმბათის, თაღების და სხვათა დიდგაბარიტიანი შემადგენელი ნაწილები. კონსტრუქციის აწვევა ხდება ვერტიკალურ მიმართველზე, მაგალითად, ჰიდროამწვევი მოწყობილობით. მათი დროებითი დამაგრება შესაძლებელია აწვევის ყოველი შემდგომი ციკლის დასრულებაზე (ნახ. 20).

დიდმალიანი გადახურვების აგების ხერხი ითვალისწინებს მონტაჟის ადგილზე, სვეტის მიმდებარედ, ორი საპირისპირო მრუდწირული კოჭის ნაწილების დამზადებას და მათი ბოლოების სახსრულად დამაგრებას სვეტზე, სვეტზე ამწვევი ბაგირების მოწყობას და მათი ბოლოების მიმაგრებას კოჭების აღნიშნულ ნაწილებზე, კოჭების ნაწილების მეორე ბოლოების აწვევას პირველი ბოლოების სახსრებზე შემობრუნებით გადახურვის საბოლოო სიმრუდის შესაბამისად და სახსრული შეერთების გახისტებას. შემდეგ ხდება კოჭების აწყობა და აწვევა სვეტზე საპროექტო ნიშნულამდე. კოჭის აწყობა და გადახურვის მოწყობა შესაძლებელია, როგორც აწვევის პირველ ეტაპზე, ისე შუალედურ და ბოლო ეტაპებზე (ნახ. 21).



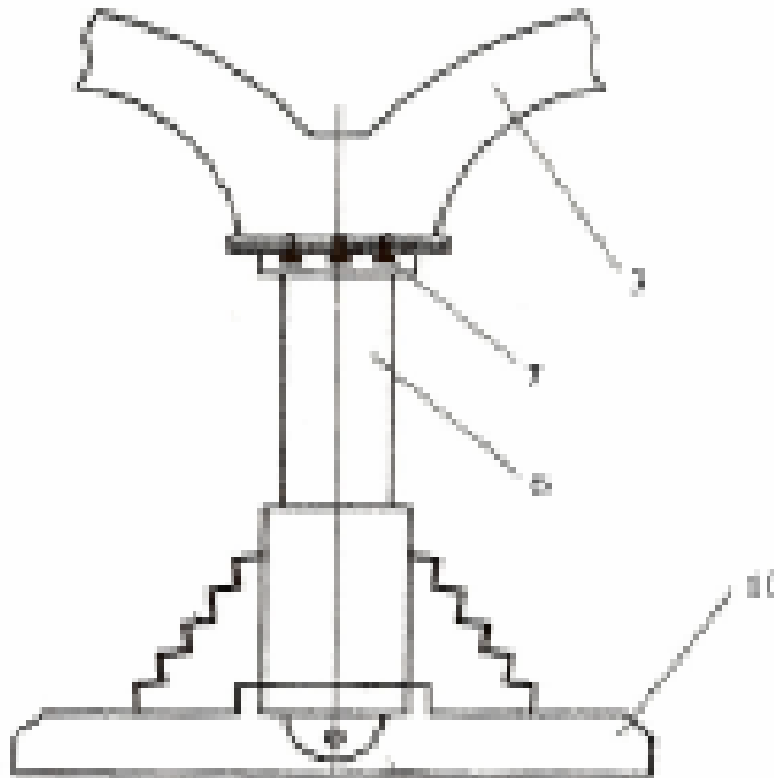
ნახ. 20.



ნახ. 21.

შემოთავაზებული დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციის აგების ტექნოლოგია ითვალისწინებს ნულოვან ნიშნულზე, მალით და ბიჯით მომიჯნავე, ოთხი სვეტის ნაწილების მოწყობას, მაგალითად, თითო სვეტის და მათ მიმდებარე სივრცითი კონსტრუქციის მრუდწირული კოჭების საერთო ქუსლის მქონე V-სებრი კონფიგურაციის ნაწილების დამზადებას. ამვე მოწყობილობის – ჰიდროდომკრატების მონტაჟს, კოჭების ნაწილების დადგმას ჰიდროდომკრატებზე ქუსლებით და სვეტების მეორე სვეტერების დამონტაჟებას, ორ მოპირდაპირე სვეტზე დამაგრებულ კოჭის V-სებრი კონფიგურაციის ნაწილებს შორის წამწის სახით შესრულებული რკინაბეტონის საკეტების ჩამაგრებას

გადახურვის მოღიანმალღიანი შედგენილი კოჭის ასაწყოზად. ანალოგიურად აწყობილ, ბიჯით მომიჯნავე სვეტებზე შედგენილ მრუდწირულ კოჭებს აერთებენ ერთმანეთთან გრძივი ხისტი ელემენტით სივრცითი კონსტრუქციის მისაღებად და აღნიშნულ სივრცით კონსტრუქციას წვევენ ეტაპობრივად ამწე მოწყობილობით საპროექტო ნიშნულზე (ნახ. 22, 23).



ნახ. 22. ღომკრავტი

აღნიშნული მოღელის ტექნიკური შეღეგია დიდმალღიანი გადახურვის კონსტრუქციების აგების გამარტიგება, რადგან ყველა სხვა შემთხვევაში საჭიროა მოეწყოს ხარაჩოები, რაც ართულებს და აძვირებს მშენებლობის ტექნოლოგიურ ოპერაციებს და პროცესებს.

შემოთავაზებული დიდმალღიანი გადახურვის აგება ხორციელდება შემღეგნაირად:

შენობის ერთი ბიჯი შეღება ოთხი მომიჯნავე სვეტისაგან 1, თითოეული სვეტი შეღება ორ-ორი შეღელერისაგან 2, ნულოვან ნიშნულზე ყალიბდება მზადდება გადახურვის მრუდე კოჭების ნაწილები – საერთო ქუსლის მქონე V-სებრი კონფიგურაციის ნაწილები 3 და წამწის სახით შესრულებული რკინაბეტონის საკეტები



4, აქვე წარმოებს მათი გამოშრობა და საჭიროების შემთხვევაში წინასწარი დაძაბვა. კონსოლებზე ძალების შემცირების მიზნით V-სებრი ნაწილების შტოებს ერთმანეთთან აერთებენ მაღალი სიმტკიცის დაძაბული არმატურით – ბაგირებით-5. გადახურვის აგება იწყება ოთხი მომიჯნავე სვეტის მოწყობით შენობის მალისა და ბიჯის შესაბამისად, სადაც ამონტაჟებენ სვეტების თითო შევლერს 2, თითოეულ შევლერთან ათავსებენ დომკრატებს 6 და მათზე დგამენ კოჭის გამყარებულ V-სებრი ნაწილებს 3, რომლებიც ჭანჭიკებით 7 მაგრდება დომკრატებზე, შემდეგ ამონტაჟებენ სვეტების მეორე შევლერებს ისე, რომ დომკრატები ექცევა შევლერებს შორის, მალით მომიჯნავე სვეტებზე დადგმულ V-სებრი ნაწილებს 3 შორის ხისტად ამაგრებენ წამწის სახით შესრულებულ საკეტებს 4, ამით სრულდება კოჭების აწყობა. ბიჯით მომიჯნავე სვეტებზე ანალოგიურად შედგენილ კოჭებს აერთებენ ერთმანეთთან გრძივი ხისტი ელემენტით 8 სივრცითი კონსტრუქციის მისაღებად. აღნიშნულ სივრცით კონსტრუქციას სწევენ საფეხურებად ოთხი დომკრატით 6 საპროექტო ნიშნულზე. აწევის ყოველი ბიჯის გავლის შემდეგ შევლერებზე დუღდება სარტყელები 9, რომლებსაც ეყრდნობა რევერსიულად მოძრავი დომკრატის ცალმხრივად მოძრავი საყრდენები 10.

აღწერიულ მაგალითში განხილულია გადახურვის ოთხ სვეტზე დაყრდნობილი ფრაგმენტის აგების ტექნოლოგია. ასეთი ტექნოლოგიით შეიძლება აიგოს და აიწიოს გადახურვისათვის საჭირო ყველა დანარჩენი მსგავსი ფრაგმენტებიც.

დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციების აგების შემოთავაზებული ტექნოლოგია მარტივია განხილულ მონტაჟის ტექნოლოგიებთან შედარებით.

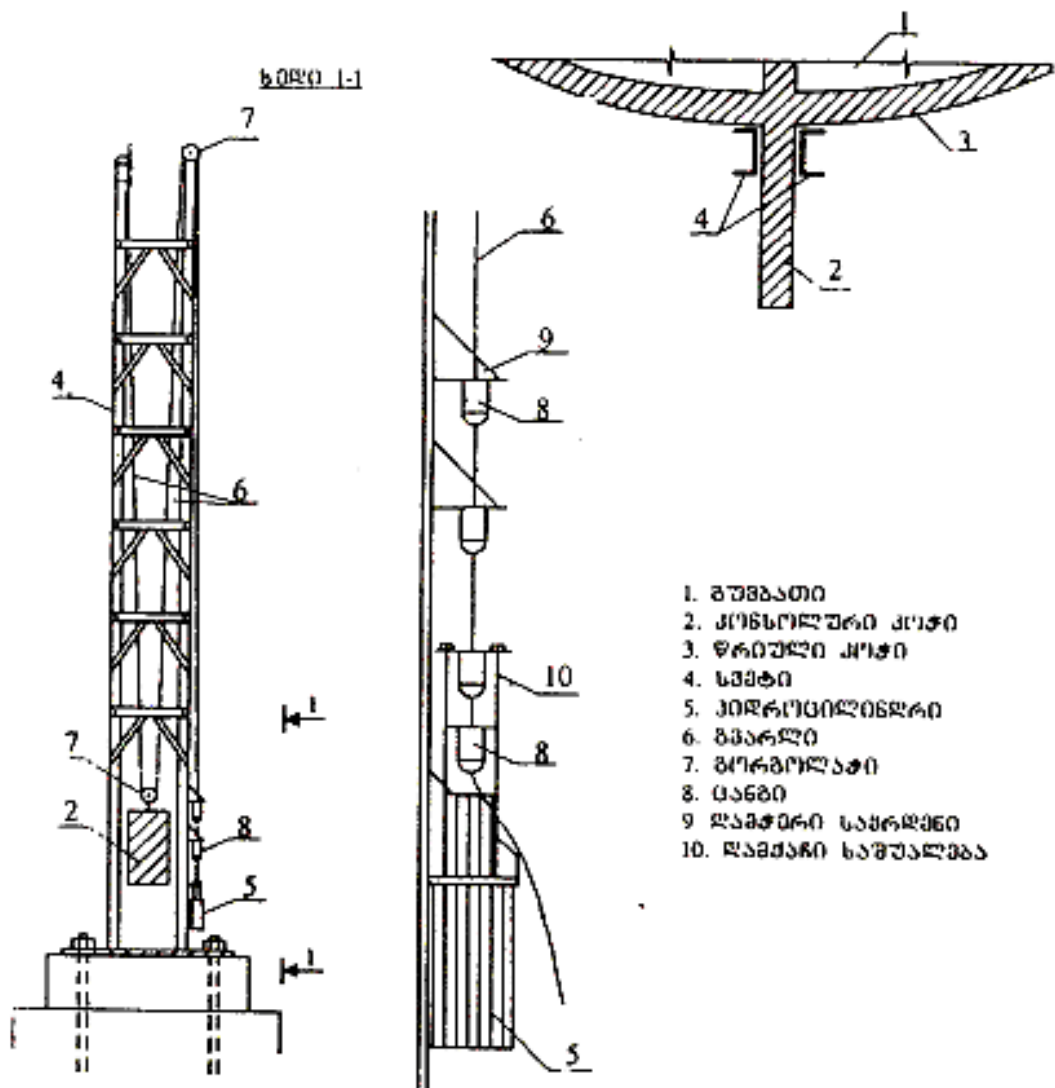
### 2.3.2. გუმბათის აწევის ტექნოლოგია

გუმბათის აწევის დროს განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა, როგორც ცალკეული ოპერაციების, ისე მთლიანად, მთელი პროცესის წარმოების საიმედოობას.

წინა პარაგრაფში აღნიშნული, VI ეტაპის სამუშაოების დამთავრების შემდეგ, ყველა სვეტის შევლერებს შორის განლაგებულ

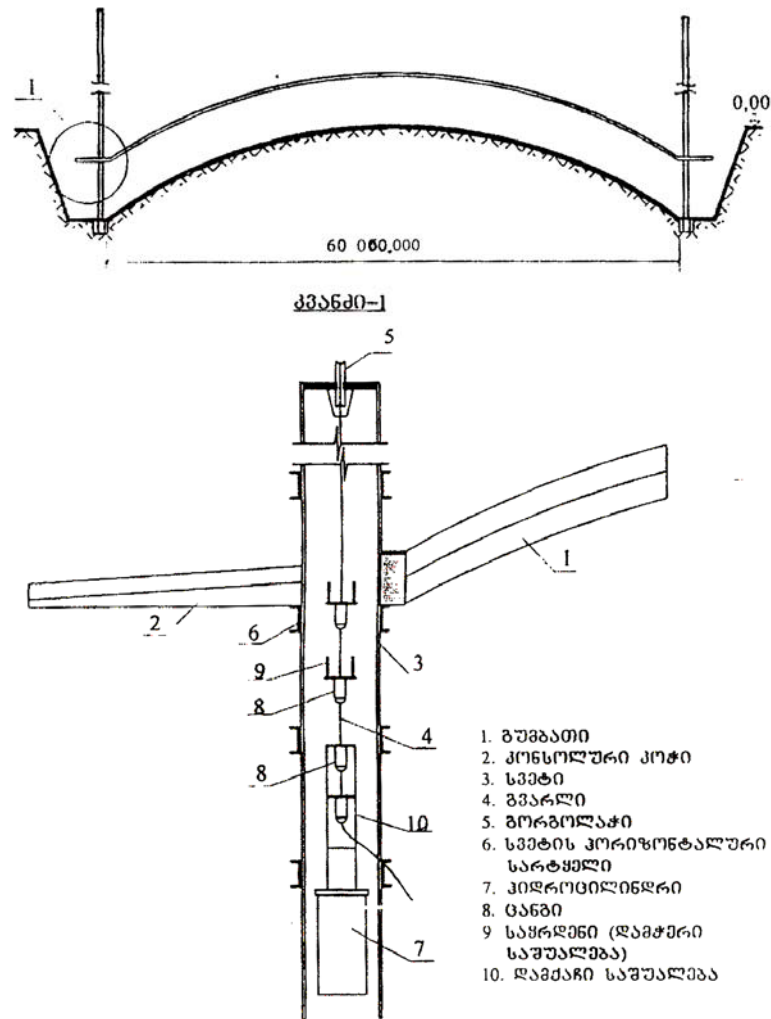
რადიალური, კოჭის კონსოლების ანკერებზე, რომლებიც გუმბათის დაბეტონების დროს იყო მათში ჩატანებული, მაგრდება გორგოლაჭები. თუ სვეტის შემადგენელ სვეტებს პირობითად დავნომრავთ, მაშინ პირველზე ქვემოთ ვამაგრებთ ჰიდროცილინდრს, დამჭერ საშუალებებს – საყრდენებს და ზემო ნაწილში გორგოლაჭს, ხოლო მეორე სვეტის თავზე საიმედოდ და ხისტად მაგრდება გვარლი.

ჰიდროცილინდრების საშუალებით ვაწარმოებთ გუმბათის აწევას ერთდროულად. დომკრატების დამქაჩი საშუალებები და სვეტებზე განთავსებული დამჭერი საყრდენები გათვალისწინებულია წყვილი ცანგების მიმდევრობით მუშაობაზე, რაც უზრუნველყოფს აწევის პროცესის გარანტირებულ საიმედოებას.



ნახ. 23.

დამკრატები აღჭურვილია დიფერენცრებულ რეჟიმში მომუშავე ჰიდროსარქველებით და მიერთებულია წრიული მილსადენით სამართავ პულტთან, ამიტომ ისინი მუშაობენ ზიარი ჭურჭლების პრინციპით კონტროლირებად რეჟიმში და უზრუნველყოვენ გუმბათის თანაბარ, ერთდროულ და ტოლი საფეხურებით აწევის ტექნოლოგიას.



ნახ. 24. დამქანი და დამჭერი ცანგები

რასაკვირველია გუმბათის აწევის მომენტში სვეტების კორიზონტალური სარტყელები, რომლებიც ჭანჭიკებით აკავშირებს სვეტის წვეილ შველერს და ელობება კონსოლური კოჭების ვერტიკალურ გადაადგილებას, დროებით იხსნება და აუცილებელია ამ კავშირების აღდგენა გუმბათის მომდევნო საფეხურზე აწევის შემდეგ.

გეოდეზიური სამუშაოების გაიოლების მიზნით, უშუალოდ სვეტებზე იქნება მსხვილ მასშტაბში დატანილი ნიშნულები, რაც გარდა

სამართავი პულტისა, საშუალებას გვაძლევს ვიზუალურად გამოწმობთ აწვევის მთელი პროცესი.

ასევე საპასუხისმგებლო პროცესია დამქან და დამჭერ საშუალებებზე ცანგების გვარლიდან შემთხვევითი ასხლეტვის თავიდან აცილება, ან მუშაობაში მათი “არ ჩართვის“ გამორიცხვა, რაც იშვიათად, მაგრამ მაინც გვხვდება პრაქტიკაში (ნახ. 24).

აღნიშნული მოვლენების თავიდან აცილების მიზნით ცანგებს გაუკეთდა გარკვეული მოდერნიზაცია, კერძოდ მათ კორპუსზე მოიჭრა მარცხენა ხრახნი და დამზადდა შესაბამისი ქანჩი (ცნობისათვის ცანგების სახურავს გააჩნია მარჯვენა ხრახნი).

ქანჩების მოჭერა უზრუნველყოფს მიმდევრობით ჩართული წყვილი ცანგას ერთდროულ მუშაობას, როგორც დამქან, ისე დამჭერ საშუალებებზე და გამორიცხავს ყოველგვარ შემთხვევითობას.

### **2.3.3. დიდმალიანი გუმბათოვანი გადახურვების მონტაჟის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები**

ტექნიკური მაჩვენებლები: საერთო ფართობი – 6912 მ<sup>2</sup>, აქედან გუმბათისქვეშა ფართობი – 5652 მ<sup>2</sup>, კონსოლისქვეშა ფართობი – 1260 მ<sup>2</sup>, ორ იარუსიანი წრიული ანტრესოლის ფართობი – 5040 მ<sup>2</sup>. გუმბათის დიამეტრი 60 მ, გუმბათის საყრდენი სვეტების სიმაღლე ნულოვანი ნიშნულიდან 10მ, კონსოლის გადმოშვერა 7 მ, გუმბათის და კონსოლის რადიალური წიბოების ბეტონის მოცულობა 525 მ<sup>3</sup>, არმატურის ხარჯი 95 ტ, სვეტების ლითონის კონსტრუქციების წონა 64,8 ტ საძირკვლების ბეტონის მოცულობა 240 მ<sup>3</sup>, არმატურის ხარჯი 35 ტ.

მონოლითური რკინაბეტონის გუმბათის აგების ეკონომიკური მაჩვენებლები (ცხრილი 2 და 3):

საერთო ღირებულებაში არ შედის ანტრესოლების მოწყობის ღირებულება.

ამრიგად, ახალი ტექნოლოგიით დიდმალიანი რკინაბეტონის გუმბათის აგების განხორციელებისას ეკონომიური ეფექტი აბსოლუტურ მაჩვენებელში შეადგენს 448,5 ათას ლარს. თუ გუმბათის საყრდენი სვეტების სიმაღლეს გავზრდით 10-დან 15 მ-მდე, მაშინ აბსოლუტური ეკონომიური ეფექტი იქნება 785 ათასი ლარი.

ტრადიციული ტექნოლოგიით, ხის ქარგილებით მოტაჟისას

დასახელება	რაოდენობა	ფასი, ათასი ლარი	მონტაჟის ღირებულება, ათასი ლარი	სულ, ათასი ლარი
გუმბათი				
<b>გუმბათი, კონსოლით</b>	525,0 მ <sup>3</sup>	50,0	15,7	67,7
არმატურა A-III კლასი	95,0 ტ	85,8	8,2	94,0
ხის ქარგილები	2450,0 მ <sup>3</sup>	392,6	156,0	548,6
			სულ	709,3
<b>საძირკვლები</b>				
ბეტონი B20 კლასი	240,0 მ <sup>3</sup>	20,4	7,2	27,6
არმატურა A-III კლასი	35,0	31,6	2,3	33,9
			სულ	61,5
<b>სვეტები</b>				
პროფილირებული ლითონი	64,8 ტ	69,66	41,8	111,46
			სულ	882,2
			დამატებითი ღირებულების გადასახადი 20%	176,4
			12% სხვა გადასახადები	88,4
			სულ	1147,0
სამშენებლო ოპერაციებისა და პროცესების საერთო ხანგრძლივობა: 42-48 თვე				

ახალი ტექნოლოგიით

დასახელება	რაოდენობა	ფასი, ათასი ლარი	მონტაჟის ღირებულება, ათასი ლარი	სულ, ათასი ლარი
გუმბათი				
<b>გუმბათი, კონსოლით</b>	525,0 მ <sup>3</sup>	50,0	15,7	67,7
არმატურა A-III კლასი	95,0 ტ	85,8	6,7	92,5
მიწის და ღორღის მომზადება	6400,0მ <sup>3</sup>	50,0		50,0
ჯოჯგინა ამწის მოდერნიზაცია მოსამანდაკებლად			48,0	48,0
ასფალტის ფენის დაგება	220,0 მ <sup>3</sup>	22,0	13,0	35
გუმბათის აწევა			63,0	63,0
			სულ	356,2
<b>საძირკვლები</b>				
ბეტონი B20 კლასი	240,0 მ <sup>3</sup>	20,4	7,2	27,6
არმატურა A-III კლასი	35,0	31,6	2,3	33,9
			სულ	61,5
<b>სვეტები</b>				
პროფილირებული ლითონი	64,8 ტ	69,66	41,8	111,46
			სულ	529,16
			დამატებითი ღირებულების გადასახადი 20%	105,8
			12% სხვა გადასახადები	63,5
			სულ	698,5
სამშენებლო ოპერაციებისა და პროცესების საერთო ხანგრძლივობა: 9-12 თვე				

დიდმალიანი სივრცეების გუმბათოვანი გადახურვების რკინაბეტონის კონსტრუქციების ტექნიკურ მანუალებებში მოყვანილი მასალის ხარჯი განსაზღვრულია მათი, როგორც ერთიანი ღეროვან-გარსული სისტემის გაანგარიშების შედეგების საფუძველზე.

გაანგარიშება ჩატარდა საანგარიშო კომპლექსი 9,0-ს მეშვეობით, ვერტიკალურ მუდმივ დატვირთვებზე, აწვევის პროცესში სამონტაჟო დატვირთვებზე, რვაბალიან სეისმურ ზემოქმედებაზე და 70,0 კპა სიდიდის ქარის დაწოლაზე.

გარსის რეალური დეფორმაციული სურათისა და მისი ზიდვის უნარის დადგენის მიზნით დამატებით იქნა ჩატარებული გაანგარიშება გარსის ტანში განვითარებული დრეკად-პლასტიკური დეფორმაციების გათვალისწინებით.

#### 2.3.4. წრიულ-წიბოვანი გუმბათის კონსტრუქცია

ბოლო ათწლეულის სამშენებლო მრეწველობაში შეინიშნება ახალი სამშენებლო მასალების – ერთდროულად სხვადასხვა სახის ხის, პლასტმასის, ლითონის უფრო ფართო და აქტიური გამოყენება.

მოყვანილია მასშტაბური სივრცული კონსტრუქციების დახასიათება, რომელიც აშენებულია ბოლო დროს სხვადასხვა ქვეყნაში.

არსებული და დაგეგმილი გუმბათების და მათთან დაკავშირებული მთავარი კონსტრუქციული იდეების განვითარების ეტაპების (რომლის მიხედვითაც გუმბათოვან გადახურვებში შეიქმნა) გასაანალიზებლად განხილულია მათი შექმნის და სრულყოფის ძირითადი ისტორიული პერიოდები.

გარე და შიდა ფორმისა და რაციონალური კონსტრუქციის ერთობლიობა გამოხატული იყო ძველი საბერძნეთის საკულტო ნაგებობებში. ყველაზე შესანიშნავ ძეგლებს შორის გამოირჩევა პერიპტერის ტიპის ფილიპეიონი, აშენებული 337-338 ა.წ.ა. ოლიმპიაში.

შემდეგში გუმბათების და გუმბათური სახურავების სისტემებმა განვითარება ჰპოვა რომის იმპერიის ნაგებობებში. რომაული სტილის გუმბათოვან სახურავებში გაზრდილია მალი – 41,65 მ-მდე. აღსანიშნავია, რომ სივრცე გუმბათის ქვეშ უნდა გვაგონებდეს სიბრძნის ბროლის ცისკამარას და უნდა ახდენდეს ემოციურ ზემოქმედებას მაყურებელზე.

მალის გაზრდის აუცილებლობა სტიმულს აძლევდა ძველ ხუროთმოძღვრების შემოქმედებას, რადგან გუმბათურ სახურავს (საფარს) ჰქონდა უაღრესად დამოუკიდებელი მნიშვნელობა. წარმოიშვა წიბოვანი გუმბათის ვარიანტები, სადაც წიბოები განლაგებულია რგოლური და

მერიდიანული მიმართულებით, მაგ, როგორც არის პანთონის (125 ა.წ.ა.) გუმბათი. გუმბათის დიამეტრია 43,5 მ, სიმაღლე – 42,75 მ.

განსაკუთრებული არქიტექტორული გამომსახველობით და კონსტრუქციის ორიგინალობით გამოირჩევა გუმბათისებრი სახურავი (საფარი). აღმოსავლეთის ქვეყნებში, კერძოდ ირანში, თურქეთში, ეგვიპტეში და ა.შ., სადაც მათ ფართო გამოყენება ჰქონდა.

დიდ ინტერესს წარმოადგენს კამარა გუმბათისებრი სახურავი (საფარი) საქართველოში. საქართველოს უძველეს ძეგლებს შორის შეიძლება გამოვარჩიოთ ისეთი შესანიშნავი ძეგლი, როგორცაა ჯვრის ტაძარი ქ. მცხეთაში, აშენებული 624-63 წ. ეს არის სივრცული ოთხპილონიანი სისტემა რვაწახნაგოვანი თაღით.

687-691 წწ. იერუსალიმთან აღიმართა შესანიშნავი გუმბათი კუმბატის-სახრა, გუმბათის დიამეტრია 20,4 მ.

1212 წ. კაიროში აშენდა მაგზოლუმი აშ-შაფია. ეს ძეგლი მიეკუთვნება მსხვილ მემორიალურ გუმბათებს, დიამეტრით 15 მ, სტალაქტიტის აფრებზე.

კამარისებრი ფორმის ხის სახურავს (საფარს) ფართოდ იყენებდნენ რუსული კლასიციზმის ოსტატები. საინტერესო ნიმუშები შეიძლება ვიხილოთ ქ. პუშკინში ალექსანდრეს სასახლეში (არქ. კვარენგი).

გუმბათოვანი კონსტრუქციების ისტორიულმა განვითარებამ და სრულყოფამ განაპირობა მათი წონის შემცირება, მობილურობის ამადლება, შეკრებადობა, არქიტექტორული გამოსახვა, მალის გაზრდა და კომპოზიციური მასალების გამოყენება. ამის მაგალითია წიბოვანი კონსტრუქციის ცირკის გუმბათი ქ. ივანოვოში, დიამეტრით 50 მ.

როსტოვის ოლქში, კამენსკის რაიონში 1982 წ. აშენდა საწყობი, რომლის საფარსაც აქვს სეგმენტური ფორმა და წარმოადგენს მრავალწახნაგოვან გუმბათს შემდგარს წებო-ფანერის ფილებისგან დიამეტრით 26,15 მ.

გუმბათის კონსტრუქციის სრულყოფისათვის ბოლო ვარაუდები შედგება: წინასწარი დაძაბვის ხერხებისაგან და ორმაგი გარსის არსებობით.

ხის გუმბათური საფარი (სახურავი) ფართოდ გამოიყენება აშშ-ში, სადაც გუმბათის დიამეტრი აღწევს 162 მ., მაგ. ოლიმპიური

საწვრთნელი კომლექსი აშენებული ქ. ტაკომაში, რომელსაც აქვს მსოფლიოში ყველაზე დიდი დიამეტრი წებოვანი მერქანისაგან.

ნაშრომების მიმოხილვა მიგვითითებს გუმბათების კონსტრუქციის სრულყოფის ისტორიაზე.

ქვის გუმბათები ძირითადად განიცდიან კუმშვის დაძაბულობას, დაჭიმვის ძალა კი აითვისება კედლებითა და საყრდენი რგოლით.

გუმბათებს მარქანისგან აქვს მთელი რიგი უპირატესობა: ნაკლები წონა, ფართობის ერთეული კონსტრუქციული ფორმის და შესრულების მრავალსახეობა, მაღალი მობილურობა, შეკრებადობა, შიდა დაძაბულობის რეგულირების ფართო შესაძლებლობები.

ბრუნვითი გარსების გაანგარიშების ცნობილი მეთოდების მოკლე მიმოხილვაში, (გამოყენებული წრიულ-წიბოვანი გუმბათისათვის) მითითებულია გუმბათის გეომეტრიული ფორმის თავისებურებაზე, რომელიც გამოიხატება იმაში, რომ მერიდიანულ მრუდს აქვს ტეხილი მოხაზულობა. სიმრუდე მერიდიანული მიმართულებით განიცდის ნახტომ ცვლილებას, ანუ გაგლეჯას (გარღვევას).

გეომეტრიული პარამეტრების მსკდომი ხასიათი იწვევს შიდა ძალების და მომენტების განაწილების წყვეტას. ისინი სწრაფცვლადია გარე დატვირთვის თანაბარი განაწილების შემთხვევაშიც.

ამასთან დაკავშირებით მოცემულია ძაბვის კონცენტრაციის (გამოწვეული სიმრუდეების წყვეტით) შეფასების მეთოდები. ეს აისახება ანტონენკოს, ანისიმოვას, გარნენკოს, შაპოვალოვას, შარაპოვას და სხვ. ნაშრომებში.

ამ ჯგუფის ამოცანებისთვის ძალზე ეფექტურია ასიმპტოტური მეთოდი, განვითარებული აღნიშნული ავტორების ნაშრომებში.

კომპაქტურ და ამაღროუღად საკმაოდ ზუსტ ამოხსნას იძლევა სხვადასხვა გამარტივებული განტოლებების გამოყენება ნაწილი გამოყოფილი უმომენტო მდგომარეობით და კიდური ეფექტით ცნობილია სელსკის და ლურიგის ნაშრომები ამ მიმართულებით. მიხაილოვის და ჩუნაევის ნაშრომებში აღწერილია ახალი პერსპექტიული მიდგომის ვარიანტი.

განხილული სისტემების ტეხილი მერიდიანიანი ბრუნვითი გარსის გაანგარიშების ახალი პერსპექტიული მიდგომის ვარიანტი



დაფუძნებულია სპეციალური წყვეტილად ცვალებადი ფუნქციის შემოტანით, რაც არსებითად ამცირებს გამოთვლის ალგორითმს.

აღწერილის გათვალისწინებით ჩამოყალიბდა კვლევის შემდეგი გამოკვლევის ამოცანები:

1. გუმბათის ელემენტების საიმედოობის (ადგილობრივი ეფექტების და ექსპერიმენტული გამოკვლევის გათვალისწინებით) შეფასების თეორიული მეთოდების დამუშავების შედეგად მიღებული მიდგომა, რომელიც მოგვცემს შესაძლებლობას დავადგინოთ გუმბათოვანი საფარის ოპტიმალური კონსტრუქციული ზომები შეერთებების და გარეშემოსვის გათვალისწინებით.
2. გუმბათის ექსპერიმენტული კვლევის ჩატარება მოდელზე სხვადასხვა სახეობის დატვირთვისათვის.

ვითარდება გუმბათის გაანგარიშების მიახლოებითი და დაზუსტებული მეთოდები. თავიდან გუმბათი განიხილება როგორც მერიდიანულ-წიბოვანი გარსი. მიახლოებითი მიდგომა დაფუძნებულია უმომენტო თეორიის განტოლებების საწყისი გამოყენებით.

აღწერილია ექსპერიმენტული გუმბათოვანი საფარის კონსტრუქცია და გამოცდების მეთოდი.

მოყვანილია კვლევის შედეგები ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავების სტატისტიკური მეთოდების გამოყენებით.

გამოკვლევები შესრულებული იყო გუმბათის მოდელზე, რომელსაც გეგმაში ჰქონდა რვაკუთხა ფორმა, ჩახაზული წრეხაზში დიამეტრით 3 მ. საფარი შესრულებულია წიბოვან-რგოლისებრი გუმბათის სახით, სიმაღლით 1 მ და რადიუსით 1,5 მ.

ამ კონსტრუქციის მთავარი განსხვავება ანალოგებისაგან: აქ გამოყენებულია წებო-ფანერის მიღები სხვადასხვა დონის დაძაბვით; გვაქვს შესაძლებლობა სხვადასხვა მოხაზულობის გუმბათების შექმნის, გამოვიყენოთ ორიგინალური კვანძოვანი შეერთებები ლითონის ბალიშების მეშვეობით, რომლებიც უზრუნველყოფენ დრეკად-სახსროვან შეერთებებს.

გუმბათის მთავარი მზიდი კონსტრუქციები, ვერტიკალური მიმართულებით, არის 8 წრიული მოხაზულობის მერიდიანული წიბო. დიამეტრულად განლაგებული წიბოები წყვილად ქმნიან 4 სამსახსრიან თაღს.

წიბოები-მერიდიანები შესრულებულია წებო-ფანერის მიღებისგან დიამეტრი 65 მმ და 5 მმ სისქის. წებო-ფანერის მიღების შიგნით გაყვანილია 8 მმ დიამეტრის ფოლადის ჭიმები.

ჰორიზონტალური მიმართულებით გადამტანი კონსტრუქციები წარმოადგენენ რგოლებს 8 მმ დიამეტრის ფოლადის შემკვრელების სახით. გუმბათის წვერზე წიბოები შეერთებულია 0,32 მმ დიამეტრის ფანერის რგოლით. ზედა საყრდენ რგოლს აქვს მრგვალი მოხაზულობა ის მუშაობს ღუნვაზე, გრესზე და აითვისებს შეკუმშვის ძალებს. ქვედა საყრდენ რგოლს აქვს რვაკუთხა მოხაზულობა (ის შეიძლება იყოს მრგვალი, მრავალკუთხა მოხაზულობის, რკინაბეტონის, ლითონის ან ხის) და მიიღებს გაჭიმვის ძალებს.

კვანძოვანი შეერთებებისთვის გამოყენებულია სპეციალური ლითონის ბალიშები, სადაც ჩასმულია ქანჩებიანი და წინაღქანჩებიანი ღერძები შიდა ღეროების დაჭიმვისთვის.

დაჭიმვა შეიძლება შესრულდეს (განხორციელდეს) ქანჩების და წინაღქანჩების მეშვეობით. შიდა ღეროების დაჭიმვა გვაძლევს სიხისტის რეგულირების საშუალებას.

დეფორმაციის გაზომვის მიზნით გამოყენებული იყო აისტოვის ტენზომეტრი TA-2 და ტენზოგადამწოდი 0,01 მმ დანაყოფის ფასით. ტენზომეტრის ბაზის ზომა მიღებულია  $I=160$  მმ.

დასმული ამოცანის შესაბამისად სტატიკური გამოკვლევების პროგრამა მოიცავდა გუმბათის დატვირთვის სამ ციკლს. მოდელის დატვირთვა წარმოებდა კვანძებში შეყურსული დატვირთვით. კვანძებში დატვირთვის შესაქმნელად ჩამატებულია სპეციალური საკიდები, რომელზედაც ეწყობოდა ათსაფეხურიანი დატვირთვისგან. ამავე დროს თითოეული საფეხური წარმოადგენდა დატვირთვის საანგარიშო მნიშვნელობის 15%. ყოველი საფეხურის მოდების შემდეგ მოდელი ჩერდებოდა 30 წუთის განმავლობაში. ამ ნიმუშებზე განისაზღვრა ყველა მასალის დრეკადობის მოდული: წებოფანეროვანი მიღების, ლითონის ბალიშების და შემკვრელების. გამოცდის შედეგების მიხედვით გამოთვლილი იქნა სხვადასხვა მნიშვნელობის “შეფარდებითი დატვირთვის“  $P/F$  გადასვლის კოეფიციენტები,  $P$  – ნიმუშზე მიღებული დატვირთვა,  $F$  – ნიმუშის კვეთის ფართობი. ექსპერიმენტის მონაცემების

სტატისტიკური დამუშავების შემდეგ მიღებული იქნა:  $x_i$  – გადასვლის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა თითოეულ მოცემულ დატვირთვაზე;  $Rx_i$  – გაქნევა, ე.ი. გადასვლის კოეფიციენტის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობის სხვაობა მოცემული დატვირთვისთვის.

შემდეგ შემოწმდა ეკუთვნის თუ არა  $x_i$ -ს საშუალო მნიშვნელობა, გამოთვლილი სხვადასხვა სიდიდის შეფარდებითი დატვირთვაზე, ერთ გენერალურ ერთობლიობას. საშუალო მნიშვნელობების შედარება ხდება ლინკის და უოლესის მიხედვით, ამავე დროს ნულ-ჰიპოთეზა საშუალოების თანასწორობის შესახებ უგულვებელყოფილია, თუ

$$\frac{nR(x_i)}{\sum Rx_i} = T > K, \quad (30)$$

სადაც  $n$  – გადასვლის კოეფიციენტი გაზომვის რაოდენობა თითოეული გაზომვების ერთობლიობისთვის და თითოეული დატვირთვის შეფასებით სიდიდისათვის ( $n=10$ ),  $Rx_i$  – გადასვლის კოეფიციენტების მნიშვნელობების გაქნევა სხვადასხვა სიდიდის დატვირთვისათვის,  $K$  – მოცემული ჯგუფების (დატვირთვებისთვის) რაოდენობის კრიტიკული მნიშვნელობაა  $m=3$ , და შეცდომების ალბათობაა  $\alpha=0,05$ . ექსპერიმენტის შედეგების მიხედვით მოდულის დეფორმაციის განსაზღვრისათვის გამოყენებული იყო უმცირესი კვადრატების მეთოდი. პოლინომის ასაგებად, რომელიც საკმაოდ მჭიდროდ აპროქსიმირებდა ფუნქციას

$$E_2 = f(P_j).$$

აპროქსიმირებული პოლინომი განისაზღვრა ფიშერის კრიტერიუმით, მაგრამ, როგორც წესი შეიძლება შევიზღუდოთ მეორე ხარისხის პოლინომით.

$$E_2 = a_1 P_j^2 + a_2 P_j + a_0. \quad (31)$$

ამ დროს დეფორმაციის საწყისი მოდული  $E_0$  განისაზღვრება  $P_j = 0$ ,  $E_0 = a_0$ .

მიუხედავად გარდაუვალი შეცდომებისა გამოთვლის პროცესში, სანამ გამოვიყენებთ ფორმულა (20) გაზომვის სიდიდეები აუცილებელია მოგლუვდეს. ამისათვის შედგა ბოქს-ბენენის გეგმა ოთხფაქტორიანი ექსპერიმენტისთვის, ამ შემთხვევაში დამოუკიდებელი ფაქტორები იყო

წერტილის კოორდინატები მოდელის ზედაპირზე, და ფაქტორებს შორის კავშირი აპროქსიმირდებოდა კვადრატული მოდელით (4.3)

$$\xi_k = b_0 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} \eta_i \eta_j. \quad (32)$$

აქ  $\xi_k$  გადაადგილების სიდიდეების გამომავალი პარამეტრებია შეყურსული დატვირთვის დროს;

$\eta_i, \eta_j$  – ფაქტორები  $(x, y, z)$ ;

$b_i$  – მოდელების პარამეტრები (რეგრესიის კოეფიციენტები);

$k$  – ფაქტორების რაოდენობა.

მათემატიკური აპარატი, რომელიც გვაძლევს საშუალებას განესაზღვროთ დამოკიდებულება (4.1), წარმოადგენს მრავალფაქტორიან რეგრესიულ ანალიზს, რომლის გამოყენებით ექსპერიმენტული წერტილების მიხედვით ვპოულობთ ანალიტიკურ დამოკიდებულებას. სტატისტიკური დამუშავებისათვის გამოყენებული იყო (ცოტაოდენი ცვლილებებით) საფეხურიანი (ბიჯური) რეგრესიული ანალიზის პროგრამა REGR-1, რომელიც საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ პოლინომის ყველა შეყვანილი წევრის გავლენა. პროგრამა REGR-1 იქნა გარდაქმნილი იმისათვის, რომ მოცემული საწყისი მონაცემების მიხედვით რეგრესიის განტოლებაში არაწრფივი წევრები მივიღოთ. გამოსაკვლევი ფაქტორების სტატისტიკური მახასიათებლები მოცემულია.

რეგრესიული განტოლების ექსპერიმენტულ მონაცემებთან ადეკვატურობის შეფასება შესრულებულია ფიშერის  $F$  – კრიტერიუმი რეგრესიის ყველა კოეფიციენტი მნიშვნელოვანია სტიუდენტის  $t$  – კრიტერიუმის მიხედვით 0,99 უზრუნველყოფით (სარწმუნო ალბათობით).

მოდელის დეფორმაციის მოდულის მიღებული შედეგების აპროქსიმირება წარმოებდა უმცირესი კვადრატების მეთოდით  $F$  – ხარისხის პოლინომით, პოლინომის ხარისხი დაწყებული პირველიდან თანდათანობით იზრდებოდა. ყოველ ნაბიჯზე გამოითვლებოდა დისპერსია ფიშერის კრიტერიუმით, განისაზღვრებოდა პოლინომის ხარისხის საკმარისობა.

დისერტაციის დანართებში მოყვანილია გამოთვლილი დეფორმაციების და გადაადგილებების ცხრილები.

ნორმალური მოგლუგებული გადაადგილებების საფუძველზე აგებულია მრუდები, რომლებიც ილუსტრირებენ მოდელის გადაადგილებების ცვლილებას დატვირთვის ზრდის დრო.

წარმოდგენილია თეორიული და ექსპერიმენტული გამოკვლევების შედარება, ჩამოყალიბებულია რეკომენდაციები წრიულ-წებოვანი გუმბათის გათვლის შესახებ, შედგენილი შემკვრელებიანი წებოვან-ფანერის მიღებისაგან.

გამოცდების შედეგები დამუშავდა მათემატიკური სტატისტიკის და ალბათობის თეორიის მეთოდების მიხედვით. დატვირთვის ყველა სქემისათვის და დატვირთვის საფეხურებისათვის წარმოებდა თეორიული და ექსპერიმენტული მონაცემების შედარება. ექსპერიმენტული და თეორიული გამოთვლების შედეგები მოყვანილია ნახ. 3-4.

მიღებული შედეგების შედარებამ გვაჩვენა, რომ ექსპერიმენტული გამოკვლევები ემთხვევა (მთლიანობაში) გამოთვლილს. ამგვარად დასტურდება უტყუარობა შემოთავაზებული მეთოდით გაანგარიშებისა. ანსხვავება აიხსნება შემდეგი მიზეზებით:

- რეალური კიდური პირობები არ ემთხვევა გაანგარიშებებში მიღებულს;
- გამოსაცდელ რეალურ ობიექტს პრაქტიკულად ყოველთვის აქვს სხვადასხვა გადახრა თეორიული ზომებისგან.

თეორიული და ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზი გვაჩვენებს, რომ საშუალოდ ისინი განსხვავდებიან 1-24%. ჩაღუნვები აღმოჩნდა 8%-ით თეორიულზე მეტი შუალედ და ზედა დამაკავშირებელ კვანძებში. ეს შეიძლება ავსნათ არასაკმარისი სიხისტით კვანძურ შეერთებებში, შიდა შემკვრელების არასაკმარისი დაჭიმვის დროს. ამის გარდა გვაქვს მნიშვნელოვანი გაფანტვა მიღების მასალის ფიზიკო-მექანიკური მახასიათებლების განსაზღვრის დროს და შესაძლო ცდომილება ტორსის საერთო მოთვლის გამო.

ძალეები მერიდიან-თაღებში გამოთვლილია დაახლოებით 20%-ით ნაკლებია იმ ძალებზე რომლებიც იყო განსაზღვრული როგორც წაჭერიანი თაღისთვის.

უფრო ზუსტი დამთხვევა არსებობს სიმეტრიული დატვირთვის შემთხვევაში. ეს შეიძლება აიხსნას ასაკრავის არასრულ ზემოქმედებით

მთლიანი კონსტრუქციის დეფორმაციაში მისი ჩართვის დროს. ძალები ღეროების გასწვრივ განაწილებულია საკმაოდ თანაბრად. მღუნავი მომენტები ღეროებში წარმოიშვება საყრდენ ზონაში, სადაც არსებობს კიდური ეფექტი.

კვანძური შეერთებების დამყოლობა არის მიზეზი იმისა, რომ თითქმის ყველა ჰორიზონტალური დაჭიმვა აღმოჩნდა გაჭიმული გაჭიმვის ძალები 15%-ით ნაკლები თეორიულ მონაცემებზე.

შესრულებული გამოკვლევების საფუძველზე ჩამოყალიბებულია გუმბათების კონსტრუქციის გაანგარიშებისა და დაპროექტირების რეკომენდაციები. ზემო მოყვანილი თეორიული და ექსპერიმენტული გამოკვლევების შედეგები გვიჩვენებს, რომ გუმბათოვანი სივრცული საფარი, შემდგარი მილების ელემენტებისგან, არიან რთულ დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობის პირობებში, სადაც არსებობს ძვრაზე დამყოლი შუალედური ზედაპირის და წიბოების ტეხილები და შევსებები.

ამიტომ ასეთი საფარის გაანგარიშება უნდა წარმოებდეს საკმაოდ ზუსტი მეთოდების გამოყენებით. ერთ-ერთი ასეთი მეთოდი შემოთავაზებულია ამ ნაშრომის მე-2 თავში. ტეხილებიანი და წიბოებიანი გუმბათოვანი გადახურვის განხორციელებისათვის. დამზადების დროს ყურადღება უნდა მიექცეს კვანძოვან შეერთებებს, რომლის დამყოლობის ხარისხი დამოკიდებულია ლითონის ღეროების დაძაბვაზე, დამზადების სიზუსტეზე, დამაკავშირებელი ელემენტების კვეთებზე. ეს დამყოლობა შეიძლება განსხვავდებოდეს სხვადასხვა კვანძებისთვის. კვანძების სიხისტის ოპტიმალური თანაფარდობა განისაზღვრება დისერტაციაში მოყვანილი გამოთვლის პროგრამით.

შემოსვის დამაგრება წიბოებზე შეიძლება იყოს დამყოლი ან ხისტი.

დამყოლობის ხარისხი შეიძლება იყოს სხვადასხვა. ოპტიმალური თანაფარდობა განისაზღვრება აგრეთვე გამოთვლის პროგრამით.

შემოსვამ შეიძლება იმუშაოს როგორც დამოუკიდებელმა ელემენტმა, აგრეთვე კონსტრუქციის შემადგენლობაში.

განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს კონტურულ წიბოებს. მათი სიდიდე განისაზღვრება აგრეთვე პროგრამული გაანგარიშების საფუძველზე.

## 2.4. ტექნოლოგიური საიმედოობის შეფასება

საიმედოობის მიახლოებითი გამოთვლა წარმოებს იმ ვარაუდით, რომ ყველა ერთი ტიპის ელემენტი, თუ ოპერაცია თანაბრად უსაფრთხოა, ე.ი. მათ აქვთ მტყუნების ერთნაირი ინტენსივობა, საშუალოსტატისტიკური მნიშვნელობის ტოლი.

სივრცული კონსტრუქციების ასაწყოები ელემენტების დამზადებისა და მონტაჟის ტექნოლოგიური ოპერაციებისათვის ასევე ვარაუდი სრულიად დასაბუთებულია, რამდენადაც ყველა ერთი ტიპის ოპერაცია უნდა სრულდებოდეს მოქმედი ნორმატიული დოკუმენტების (სტანდარტების, ტექნიკური პირობების, ტექნოლოგიური რუკების) შესაბამისად.

ამგვარად, ტექნოლოგიური პროცესის საიმედოობის მიახლოებით გამოსათვლელად საჭიროა მასში ტექნოლოგიური ოპერაციების შემადგენლობის, მათი რაოდენობისა და გაუმართაობის ინტენსივობის საშუალოსტატისტიკური მნიშვნელობის ცოდნა, თითოეული სახის ტექნოლოგიური ოპერაციის შესრულებისას.

მტყუნების ინტენსივობის მნიშვნელობები შეიძლება მიღებულ იქნას სივრცული კონსტრუქციების აგებაზე სამუშაოთა შესრულებისას, ხარისხის მოთხოვნათა დარღვევების და ნორმიდან სხვა გადახრების მონაცემთა სტატისტიკური ანალიზის საფუძველზე. ტექნოლოგიურ პროცესებში ოპერაციათა შემადგენლობა და რაოდენობა შეიძლება გამოითვალოს, ცალკეული კონკრეტული შენობისათვის, საპროექტო დოკუმენტების მიხედვით. ამგვარად, ტექნოლოგიური საიმედოობის შეფასება შეიძლება ახალი კონსტრუქციულ-ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებების დაპროექტების საწყის სტადიაში. რაც საშუალებას მისცემს, შეფასდეს შერჩეული გადაწყვეტილების საიმედოობის კონკრეტული მნიშვნელობა, რათა მოინახოს ვარიანტი, პროტოტიპთან შედარებით, გაუმჯობესებული მაჩვენებლებით.

საიმედოობის შეფასება მიზანშეწონილია წარმოებდეს რამდენიმე ოპერაციისაგან შემდგარი სხვადასხვა ტექნოლოგიური პროცესისაგან განცალკევებით (მაგალითად, რადიალური შემაკავშირებელი არმატურის მონტაჟი, ჰორიზონტალური არმატურული კავშირების გაერთიანება,

ვერტიკალური პირაპირის დამონოლითება და სხვა). შემდეგ შეფასდეს რამდენიმე დამოუკიდებელი პროცესისაგან შემდგარი კომპლექსის შესრულების საიმედოობა. ამ პროცესების შესრულებას მოჰყვება შენობის რაიმე კონსტრუქციული ნაწილის დასრულება. საიმედოობის მიღებული შეფასება დაახასიათებს სამუშაოს შესრულების პროცესში პირაპირის ხარისხის მოცემული დონის მიღწევის ალბათობას.

ასეთი მიდგომით შესაძლებელია დაპროექტების პროცესში სხვადასხვა ვარიანტის არა მარტო შრომითი დანახარჯების პირდაპირი სიდიდის მიხედვით შედარება, არამედ შესაძლებლობის მიხედვით ხარისხის საჭირო დონის მიღწევა, საიმედოობის მხრივ ტექნოლოგიური ოპერაციების აგების რაციონალური სტრუქტურის გამოვლენა, აუცილებელი კორექტივების შეტანა.

ექსპლუატაციის სტადიაში შენობის ფუნქციონირებისაგან განსხვავებით, როდესაც ამოქმედებულია ყველა კონსტრუქციული ელემენტი, ტექნოლოგიური პროცესების შესრულება მშენებლობის დროს არ ხდება უწყვეტად ნაგებობის მშენებლობის მთელი პერიოდის განმავლობაში. დროს სხვადასხვა ინტერვალში სრულდება ხან ერთი, ხან მეორე ტექნოლოგიური პროცესი. როგორც ცნობილია, საიმედოობის გამოსათვლელ ფორმულაში შედის იმ სისტემის ფუნქციონირების დრო, რომლის საიმედოობის კვლევაც ხდება, ამიტომ, ყოველი ტექნოლოგიური პროცესის სწორი შეფასებისათვის, აუცილებელია მისი განხილვა არა შენობის აგების მთელი პერიოდის განმავლობაში, არამედ დროის მხოლოდ შესაბამის პერიოდებში.

სხვადასხვა ტექნოლოგიურ პროცესში მტყუნების, როგორც დამოუკიდებელი მოვლენის განხილვისას, ნაგებობის მშენებლობის მთელი სისტემის ფუნქციონირების საიმედოობა აგების დროისათვის განისაზღვრება, როგორც თითოეული ტექნოლოგიური პროცესის შეუფერხებელი შესრულების ალბათობების ნამრავლი:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(\Delta t_i), \quad (33)$$

სადაც  $\Delta t_i$   $i$ -ური ტექნოლოგიური პროცესის შესრულების დროის ინტერვალია;

$P_i$  -  $i$ -ური ტექნოლოგიური პროცესის შესრულების საიმედოობა.



თითოეული ტექნოლოგიური პროცესისათვის, შესაბამისი განაწილების კანონის თანახმად, უნდა ჩაიწეროს მათ პროქსიმირებული თეორიული მრუდის განტოლება.

სეისმომედეგი სივრცული ნაგებობის ტექნოლოგიური საიმედოობის განსაზღვრის ამოცანა მათი აგებისას რამდენადმე განსხვავდება ექსპლუატირებული შენობის საიმედოობის განსაზღვრის ამოცანისაგან. შენობის ექსპლუატაციისას მტყუნებათა გამოჩენა, ანუ მისი გასვლა ზღვრული მდგომარეობიდან, დაკავშირებულია ადამიანების სიცოცხლის საფრთხესთან. ტექნოლოგიური საიმედოობა დაკავშირებულია შენობის მშენებლობის საკმაოდ მოკლე პერიოდთან (რამდენიმე თვე), რომელიც სრულდება ნაგებობების ექსპლუატაციაში იმ მაჩვენებლებით ჩაბარებით, რომლებიც ექსპლუატაციის ხანგრძლივ პროცესში (100 წელი და მეტი) საჭირო საიმედოობის მიღწევის გარანტიას იძლევა. მშენებლობის დროს შეფერხების წარმოშობას, ან თუნდაც უეცარ სრულ მტყუნებასაც კი არ მოსდევს ადამიანთა მსხვერპლი, ამიტომ ნაგებობათა ტექნოლოგიური საიმედოობის კვლევისას ის შეიძლება განვიხილოთ როგორც აღსადგენი ნაკეთობა წმინდა ეკონომიკური პასუხისმგებლობით. ოღონდ უნდა გვახსოვდეს, რომ კვლევის მიზანს წარმოადგენს არა იმდენად მშენებლობის დროს მტყუნებების რაოდენობის, ანუ მტყუნებების ნაკადის ინტენსივობის შემცირება, რამდენადაც საბოლოო შედეგი ნაგებობის ექსპლუატაციაში ჩაბარება, მისთვის პოტენციურად მინიჭებული საიმედოობით. სამუშაოთა წარმოების დროს ნორმებიდან გადახრით გამოწვეული მტყუნებათა ნაკადის შემცირება წარმოადგენს ეკონომიკურ ამოცანას, რომლის მიზანიც შრომის დანახარჯების შემცირებაა. ნათქვამის საილუსტრაციოდ შეიძლება წარმოვადგინოთ სრულიად რეალური სიტუაცია, როდესაც დიდი საქსპლუატაციო საიმედოობა მიიღწევა უფრო დიდი რაოდენობის აღმოფხვრადი მარცხების და აღდგენადი მტყუნებისას, ვიდრე მცირე რაოდენობის გაუმართაობებისას, რომლებიც არ ექვემდებარება აღდგენას. საკითხის ამგვარად დაყენების შემთხვევაში, საიმედოობის ამოცანა წმინდა ეკონომიკურ ხასიათს იძენს და შეიძლება გამოკვლეულ იქნას ოპტიმალური გადაწყვეტილებების გამოძებნის არსებული მეთოდებით. მით უმეტეს, შეიძლება გამოყენებულ იქნას

მეთოდები, რომლებიც გამოსადეგია ნაგებობათა საიმედოობის კვლევისათვის ადამიანების უსაფრთხოების უზრუნველყოფის გათვალისწინებით.

ნაგებობის მაქსიმალურად მისაღები მყარი საიმედოობის გამოსაძებნად, ხალხის პერმანენტული კონცენტრაციის პირობებში, მშენებარე ობიექტის კონსტრუქციული საიმედოობა შეიძლება ამდღეულ იქნას წმინდა ეკონომიკური მოსაზრებების ხარჯზე. ამასთან, ადამიანის სიცოცხლის ღირებულება განიხილება როგორც რაიმე კონსტანტა, რომელიც არ ფასდება ფულადი გამოხატულებით. ასეთი მიდგომა სრულიად გამართლებულია როგორც საინჟინრო, ისე ზნეობრივი თვალსაზრისითაც და ამიტომაც შეიძლება საფუძვლად დაედოს ტექნოლოგიური საიმედოობის კვლევას იმ პირობით, რომ კონსტრუქციული საიმედოობა შენობის ექსპლუატაციის დაწყების მომენტისათვის შეადგენს რაღაც მოცემულ სიდიდეს, ეკონომიკური მოსაზრებებისაგან დამოუკიდებლად.

ანალიზის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ოპტიმალური ტექნოლოგიურობის ძიების ამოსავალ წერტილად მიიღება გადაწყვეტილება, რომელიც პასუხობს მინიმალურ დანახარჯებს ტექნოლოგიური პარამეტრების შემდგომი ვარიაციებით, რაც ხელს შეუწყობს საიმედოობის გაზრდას.

## **2.5. რეკომენდაციები რკინაბეტონის გუმბათების კონსტრუქციებისთვის**

გადახურვის კონსტრუქციებში ყველაზე ხშირად იყენებენ გარსებს, რომელთა შუა ზედაპირი აღიწერება სფეროს, ბრუნვის ელიფსოიდის ან წრიული კონუსის წრფის ზედაპირის გათანაბრებით. კონუსური გუმბათები გამოიყენება საწარმოებისა და სამოქალაქო შენობების გადახურვისათვის მცირე დიამეტრებისას (30 მ-მდე). გამოირჩევა რა სამუშაოს წარმოების სიმარტივით, ისინი ნაკლებად ეკონომიურია, ვიდრე სფერული გარსები. გუმბათის აწევის ისარი რეკომენდებულია ავიდოთ არანაკლებ გარსის საყრდენი კონტურის დიამეტრის 1/10-სა.

რკინაბეტონის გუმბათების ან მათი ელემენტების არმირებისთვის რეკომენდებულია A-II და A-III მარკის ფოლადის ღეროვანი არმატურის გამოყენება, ხოლო საყრდენი რგოლის წინასწარი მოჭიმვისთვის – მაღალი სიმტკიცის ღეროვანი არმატურის, მავთულოვანი არმატურის, კონების, ტროსების, წნულების და ა.შ. გამოყენება. გამოყენებულ უნდა იქნეს მოთუთიებული მავთულის წნული, ბაგროვანი, კონოვანი და სხვ. არმატურა. გუმბათის გარსისთვის რეკომენდებულია არანაკლებ B20 ნორმატიული წინაღობის მძიმე ბეტონის ან არანაკლებ B15 ნორმატიული წინაღობის მსუბუქი ბეტონის გამოყენება.

გარე ჰიდროიზოლაციის გარეშე არსებული გუმბათებისთვის რეკომენდებულია მძიმე ბეტონის გამოყენება წყალგაუმტარობის მარკით არანაკლებ B8-სა. ასეთი კონსტრუქციების ბეტონში ბზარები დაუშვებელია. გათვლილი პირაპირების ამოსაშენებლად გამოყენებული მძიმე წვრილმარცვლოვანი ბეტონის საპროექტო წინაღობა უნდა იყოს შეპირაპირებული ელემენტების შემოჭერის სიმკვრივის საპროექტო წინაღობაზე არანაკლები.

გარსის სისქე ინიშნება კონსტრუქციული მოსაზრებებით, ძირითადად სიმტკიცის პირობებიდან გამომდინარე. მონოლითური გუმბათებისთვის რეკომენდებულია, გარსის სისქედ ავიღოთ გუმბათის სიმრუდის რადიუსის  $1/600$ , მაგრამ არანაკლებ 50 მმ-სა. ასაწყობ გუმბათებში ფილის მინიმალურ სისქედ მიიღება 30 მმ; ასაწყობი ელემენტების გარსშემოვლებული წიბოების ზომა განისაზღვრება გუმბათის სიმტკიცის გაანგარიშებით და მოწმდება სამონტაჟო მდგომარეობით; გუმბათის გადახურვის ნაპირები გარსშემოვლება საყრდენი რგოლებით; ყველაზე საპასუხისმგებლო ელემენტად ითვლება ქვედა საყრდენი გაჭიმული რგოლი.

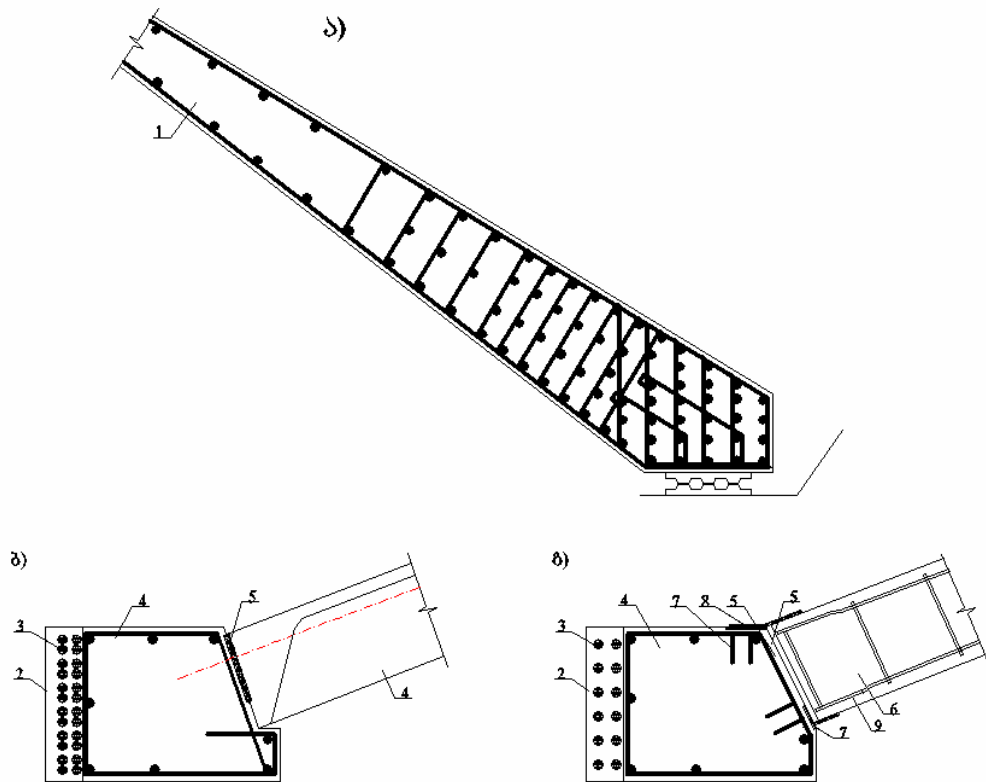
მონოლითური გლუვი გუმბათების არმირებას ახდენენ მერიდიანებზე და კონცენტრირებულ ჰორიზონტალურ წრეებზე განლაგებული ღეროებით. მერიდიანებზე დაწყობილი ღეროების რაოდენობა თანდათანობით მცირდება მწვერვალთან მიახლოებისას გუმბათის გარშემოწერილობის სიგრძის შემცირების შესაბამისად. გუმბათის გარსის 70 მმ-მდე სისქის დროს მისი არმირება რეკომენდებულია გარსის კვეთის შუაში მდებარე ერთმაგი ბადით.

დიდი სისქეების დროს, შეკვებისა და ტემპერატურული ბზარების თავიდან ასაცილებლად, გარსების არმირებას ახდენენ ორი ბადით. როგორც ერთმაგი, ასევე ორმაგი ბადეების შესრულება რეკომენდებულია მრგვალი არმატურით დიამეტრით 4-6 მმ, ღეროს ნაბიჯით 150-200 მმ. არა უმეტეს 15მ ზომის ხვრელების ახლოს ადგილებში დაშვებულია, რომ არ მოეწყოს ფილის ნაპირების გასქელება, მაგრამ აუცილებელია მოეწყოს კონსტრუქციული არმატურა დიამეტრით არანაკლებ 8 მმ-სა, რომელიც გარს შემოეფლება ფილის ხვრელს. რეკომენდებულია ხვრელები დაპროექტდეს მრგვალი, ოვალური ან მრავალკუთხიანი კუთხეების მომრგვალებით რადიუსით 2მ. 15მ-ზე მეტი ზომის ხვრელების ზონაში უნდა იქნეს გათვალისწინებული ფილის 3მ-ზე მეტი სიმაღლისა და 2მ-ზე მეტი სიგანის გასქელება, ამასთან, ბეტონისა და არმატურის ფართობი უნდა იყოს არანაკლები, ვიდრე ბეტონისა და არმატურის ფართობი ფილის ამოჭრილი ნაწილის განივ კვეთაში.

გარსის ქვედა საყრდენ რგოლთან შეპირაპირების ადგილებში არმირება წარმოებს გაანგარიშებით საყრდენი მღუნავი მომენტის აღქმის გათვალისწინებით და აუცილებლად ორმაგი არმატურით (ნახ. 25, ა); გარსის ელემენტების წიბოების ღეროები შეპირაპირდეს შედუღებით გამოშვებებით ან ჩატანებული ნაწილებით, რომლებიც გათვალისწინებულია საყრდენ რგოლში (ნახ. 25, ა).

ქვედა საყრდენი რგოლის არმატურა, რომელიც აღიქვამს განმბჯენს, გამოითვლება გაჭიმვის მთელ ძალაზე ბეტონის მუშაობის ჩაუთვლელად.

მეტაღის ეკონომიისა და საყრდენ რგოლსა და გარსის საყრდენის ახლო ზონაში, ბზარების გაჩენის თავიდან აცილების მიზნით, მიზანშეწონილია მოხდეს რგოლის წინასწარი დაძაბვა, მასზე წვრილი, მაღალი სიმტკიცის მავთულის დახვევით, კარუსელური მანქანის მეშვეობით, რომელიც გამოიყენება მრგვალი რეზერვუარების კედლების არმირებისთვის, ან გარეთა რგოლური ღეროვანი არმატურის ელექტროგახურებით.



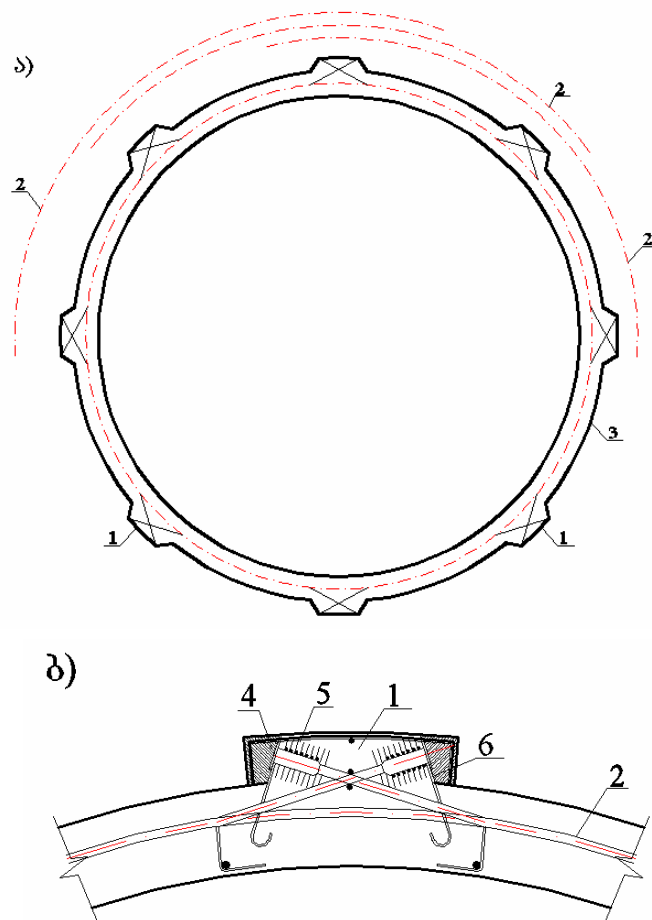
ნახ. 25. გუმბათის დეტალების შეუღლების დეტალები

ა – ქვედა საყრდენი რგოლის შექმნა გუმბათის მონოლითური გარსის გასქელების ხარჯზე; ბ – გუმბათის ასაწყობი წიბოებიანი გარსის სახსრული შეუღლება ქვედა საყრდენ რგოლთან; გ) გუმბათის ასაწყობი წიბოებიანი გარსის ხისტი შეუღლება ქვედა საყრდენ რგოლთან:  
 1 – რკინაბეტონის მონოლითური გარსი; 2 – წინასწარ დაძაბული არმატურის დამონოლითების ბეტონი; 3 – რგოლის წინასწარ დაძაბული არმატურა; 4 – ქვედა საყრდენი რგოლი; 5 – დამონოლითების ნაკერი; 6 – გუმბათის წიბოებიანი გარსი; 7 – ფოლადის ჩასატანებელი დეტალები რგოლის ელემენტებში; 8 – შემაერთებელი დეტალები, შედუღებული გარსისა და რგოლის ჩასატანებლებთან; 9 – ფოლადის ჩასატანებელი დეტალები გუმბათის გარსის ელემენტებში.

შესაძლებელია საყრდენებზე კონების ან ბაგირების მექანიკური გაჭიმვა (ნახ. 26, ა, ბ). დეროები, კონები ან ბაგირები ამ შემთხვევაში განლაგდება რგოლის ელემენტებში ბეტონირების დროს არხის წარმოქმნელებში ფოლადის გოფირებული მილების სახით სისქით 0,2 მმ ან რგოლის მრუდწირულ კილოებში.

რგოლის გარე პერიმეტრზე ბეტონზე არმატურის გაჭიმვის ძალის გადასაცემად გათვალისწინებულია შვერილები – პილასტრები. პილასტრებზე დაჭიმვა ხორციელდება ორმაგი მოქმედების დომკრატებით, ერთდროულად კონის ორი მხრიდან. კონების ნაწილი მაგრდება

პილასტრში, დანარჩენები გადის პილასტრებში, რათა მოხდეს გაბნეული ანკერების დაღარვა, რაც ქმნის რგოლის უფრო თანაბარ მოჭიმვას. დაჭიმვის დამთავრების შემდეგ ხდება ცემენტის ხსნარის ინიექცირება არხებში, ხოლო პილასტრების გვერდითა ზედაპირები გამოთლიანდება. საყრდენი რგოლის წინასწარი დაჭიმვისთვის რეკომენდებულია მაღალი სიმტკიცის მავთულის ბაგირებისა და კონების გამოყენება, რომლებიც გამოთლიანებამდე დაცულია კოროზიისგან



ნახ. 26. გუმბათის წინასწარ დაძაბული საყრდენი რგოლი

ა – გეგმა; ბ – საყრდენ პილასტრებზე ცალკეული დეროების ან კონების დაძაბვისა და დაანკერების დეტალები: 1 – პილასტრები; 2 – არმატურის დეროები ან კონები; 3 – ქვედა საყრდენი რგოლი; 4 – ანკერი; 5 – სპირალები; 6 – დამონოლითების ნაკერი.

მოთუთიებით ან სხვა ხერხით, რაც დაიშვება СНиП II-28-73 თავით. საყრდენი რგოლი შეიძლება შესრულებული იყოს ასაწყობი ელემენტებით, რაც განსაკუთრებით წარმატებით ხორციელდება მისი

წინასწარი დაძაბვით. ამ შემთხვევაში რგოლის ცალკეული ელემენტები ეწყობა საყრდენებზე, არმატურის შვერილები შეპირაპირდება, მათ შორის ნაკერები დამონოლოთება. ბეტონის გამაგრების შემდეგ რგოლის შეპირაპირებებს ჭიმავენ დამძაბველი არმატურით, რასაც ფარავენ 20 მმ სისქის ტორკრეტ-ბეტონით.

საყრდენი რგოლის მოჭიმვა ისე უნდა შეიძინეს, რომ ის უზრუნველყოფდეს გარსის უმომენტო მდგომარეობას გუმბათზე სრული დატვირთვისას. ამასთან, საყრდენ რგოლში წინასწარი დაძაბვისა და გუმბათის განმბჯენის ჯამური ძაბვა ტოლი უნდა იყოს გარსის ნაპირებზე რგოლური დაძაბულობისა, უმომენტო თეორიით გაანგარიშების მიხედვით. საყრდენი რგოლის შესრულებისას წინასწარი დაძაბვის გარეშე, მის არმირებას ახდენენ შედუღებით შეპირაპირებული რგოლური ღეროებით, დიამეტრით 25-40 მმ.

ჰორიზონტალური გადახურვის რგოლის დონეზე გუმბათის მთელ პერიმეტრზე გარშემორტყმული გადახურვის მოწყობის შემთხვევაში რეკომენდებულია განმბჯენის გადაცემა გადახურვაზე. ასეთ შემთხვევაში გადახურვის კონსტრუქცია შესრულებული უნდა იყოს მასზე გადაცემული განმბჯენის გათვალისწინებით.

ასაწყობი რკინაბეტონის გუმბათების აგებისას, მათი მოხაზულობა იმგვარად უნდა შეიძინეს, რომ მთელ გარსში წარმოიშვას მხოლოდ მკუმშავი ძაბვები – ეს შესაძლებელია საკმაოდ დამრეცი გუმბათის არჩევისას. ჩვეულებრივ, ასაწყობ ელემენტებს გრძივი მიმართულებით ანიჭებენ გუმბათის სიმრუდის მოხაზულობას, ხოლო განივი მიმართულებით მათ ბრტყელებს აკეთებენ.

ცალკეულ ტრაპეციისმაგვარ ელემენტებს, რითიც აიწყობა გუმბათი, ჩვეულებრივ აქვს 10-20 მ-მდე სიგრძე, მოხაზულობა გუმბათის რკალის მიხედვით ქვედა მხრის სიგანით 3-7 მ-მდე. გარეთა კონტურის მიხედვით ასეთი ელემენტი გარშემოვლებულია გრძივი წიბოებით, რომლებიც მიმართულია მერიდიანების გასწვრივ და 2-3 მ-ის შემდეგ – წიბოებით, რომლებიც მიმართულია რგოლების გასწვრივ. წიბოებს შორის გარსის ფილის სისქე ტოლია 30-40 მმ-ისა და არმირდება ფილის შუაში განლაგებული 4-5 მმ-იანი მრგვალი ღეროების 150-200 მმ-იანი ბიჯის მქონე ერთმაგი შენადული ბადით.

ასაწყობი ელემენტების გრძივი წიბოებს, როგორც წესი, ფილის 30 მმ სისქისას, პანელის ძირითადი წიბოების განივი კვეთის სიმაღლე უნდა ჰქონდეს მათი სიგრძის 1/20-ის ტოლი, ხოლო კვეთის სიგანე – არანაკლები 40 მმ-სა. გრძივი წიბოები არმირდება გაანგარიშებით, შენადული კარკასებით, მათი ტრანსპორტირებისა და მონტაჟის პირობების გათვალისწინებით. გრძივი წიბოების კვეთის შემცირების მიზნით, ტრანსპორტირებისა და მონტაჟისას, ისინი შეიძლება აღიჭურვოს დროებითი საკოჭით.

ცალკეული ასაწყობი ელემენტების შეუღლების საზებზე გუმბათის დამონოლითებისათვის ტოვებენ 80-100 მმ სიგანის ღრიტოებს. გრძივი და განივი წიბოების შეუღლების ადგილებში არმატურა შედუღდება, რის შემდეგაც წიბოებს შორის შეპირაპირებები დამონოლითდება. შეპირაპირებული შეერთებებისთვის, ჩვეულებრივ, იღებენ B20-B35 ნორმატიული წინაღობის ბეტონს.

შეპირაპირებებში დაპროექტირებული ჩასატანებელი დეტალების ზომებისა და რაოდენობის შემცირების მიზნით, რეკომენდებულია შესაპირაპირებელმა არმატურის თავმოყრა წიბოების შეპირაპირებით გადაკვეთილში ზონაში, მაგრამ არაიშვიათად, ვიდრე 3 მ-ის შემდეგ.

გუმბათი-გარსების შედგენილი კონუსური ელემენტებით აგებისას, ასაწყობი ელემენტები სრულდება ბრტყელი ტრაპეციისმაგვარი მოხაზულობის გეგმაში.

გუმბათის ერთიან საძირკველზე ან კედელზე დაყრდნობის შემთხვევაში, მიზანშეწონილია, შეძლებისდაგვარად უზრუნველყოთ საყრდენი რგოლის თავისუფალი გადაადგილება და მობრუნება. ამ მიზნით, ტემპერატურული და შეკლების დეფორმაციებისას საყრდენი რგოლი უნდა ეყრდნობოდეს ქვემოთ მდებარე საყრდენ კონსტრუქციას, საყრდენი რგოლის ქვეშ ხახუნის დაბალი კოეფიციენტის მქონე მასალის საფენის მეშვეობით, მაგალითად ნაფტლენით (რომელსაც, მაჩვენებლების მაღალი სიმკვრივისას, ხახუნის კოეფიციენტი აქვს 0,02-ის ტოლი), გრაფიტული საცხით და სხვა მსგავსი მასალებით.

თუ გუმბათი ეყრდნობა ცალკეულ სვეტებს, საყრდენი რგოლის ქვეშ მიზანშეწონილია სპეციალური გუმბათქვეშა კოჭის მოწყობა, რომელზეც იგი დაეყრდნობა, უზრუნველყოფს რა გუმბათის კიდების



შეძლებისდაგვარად თავისუფალ გადაადგილებას და ბრუნვას და, ამგვარად, გუმბათქვეშა კოჭს გადასცემს მხოლოდ ნორმალურ დატვირთვას. ამასთან, გუმბათქვეშა კოჭი გათვლილი უნდა იყოს საყრდენებს შორის ღუნვასა და გრესაზე,

იმ შემთხვევებში, როცა გუმბათის საყრდენი რგოლი უშუალოდ ეყრდნობა სვეტებს, საჭიროა მგორავი საყრდენები, რომლებიც უზრუნველყოფს სვეტებზე გუმბათის რადიალურ გადაადგილებას; ამ დროს გუმბათის რგოლსა და გარსში, ასევე სვეტებში, წარმოიშობა მნიშვნელოვანი ვერტიკალური მღუნავი და მგრესი მომენტები. ეს მომენტები გათვალისწინებული უნდა იქნეს პროექტირებისას.

გუმბათის ცენტრში, ზედა გარანის არსებობისას, აწყობენ ზედა რგოლს. წარმოშობილი მომენტების მცირე სიდიდის გამო გუმბათის ამოშენება ამ რგოლში შეიძლება რომ არ იქნეს გათვალისწინებული. ასაწყობი და ასაწყობ-მონოლითური გუმბათები შედგება, ჩვეულებრივ, ირიბი ფილებისგან, რომლებიც ერთი მხრიდან ეყრდნობა ქვედა საყრდენ რგოლს, ხოლო მეორე მხრიდან – ზედას, რომელსაც მონტაჟის დროს იჭერს დროებითი ხარახოები. ასეთი ელემენტები გამოიყენება 40 მ დიამეტრის მქონე გუმბათებისთვის. დიდი დიამეტრის გუმბათები მონტაჟდება ასაწყობი ირიბი ან ბრტყელი წიბოებიანი ფილებისგან, გუმბათის მერიდიანებზე და პარალელებზე. ამ სახის გუმბათის აწყობისას მისი ელემენტები ერთდება საყრდენ რგოლთან და ერთმანეთს შორის ლითონის ჩართული ნაწილების შედუღებით, რომლებიც მათი დამზადებისას გათვალისწინებულია ასაწყობ ელემენტებში. წიბოებიანი გუმბათები არსებითად წარმოადგენს თაღების სისტემას, რომლებიც ერთმანეთთან შეერთებულია ზედა რგოლის მეშვეობით და ეყრდნობა ქვედა საყრდენ რგოლს. წიბოების ელემენტები ჩვეულებრივ შესრულებულია სწორკუთხოვანი კვეთის მქონე არმირებული შენადუდი კარკასებით, წიბოების რგოლებთან შეუღლება ხორციელდება მოყვანილი დეტალების ანალოგიურად.

წიბოებიან-რგოლოვანი გუმბათები ასევე აიწყობა სწორკუთხოვანი კვეთის წიბოებისგან და რგოლებისგან, ამასთან წიბოები ისევე, როგორც წიბოებიან გუმბათში, ეყრდნობა ზედა და ქვედა რგოლებს.

## 2.6. რკინაბეტონის სფერული გარსის გაანგარიშების მაგალითი

განვიხილოთ გუმბათოვანი გადახურვა (გარსი საყრდენი რგოლით ნახ. 27), გლუვი სფერული გარსით სისქით  $h=6$  სმ, გუმბათის მთავარი პარამეტრებით  $r_0 = 30$  მ,  $R = 50$  მ,  $\psi_0 = 40^\circ$  და საყრდენი რგოლი განივი კვეთის ზომებით  $b_0 = 70$  სმ,  $h_0 = 60$  სმ,  $e = h/2 = 30$  სმ. გარსისა და საყრდენი რგოლის დრეკადობის მოდულები ერთნაირია. გუმბათზე მოქმედებს დატვირთვები საკუთარი წონისა  $g = 0.165$  კგ/მ<sup>2</sup> და თოვლისაგან  $P = 0.14$  კგ/მ<sup>2</sup>. დამხმარე სიდიდეები  $\psi_0 = (40^\circ/180^\circ) \cdot \pi = 0.7$ ;  $\sin \psi_0 = 0.644$ ;  $\cos \psi_0 = 0.765$ ;

$$S = 0.76\sqrt{R \cdot h} = 0.76\sqrt{50 \cdot 0.06} = 1.32 \text{ მ} = 132 \text{ სმ}$$

გამოვთვალოთ ერთეულოვანი და დატვირთვებით გამოწვეული გადაადგილებების მნიშვნელობები, გადიდებული  $E$ -ჯერ ზომების სანტიმეტრებში შეტანით, სადაც  $E$  არის მასალის დრეკადობის მოდული:

$$E\theta_M = \frac{12 \cdot S}{1 \cdot h^3} + \frac{12 \cdot r_0^2}{b_k \cdot h_k^3} = \frac{12 \cdot 132}{6^3} + \frac{12 \cdot 3000^2}{70 \cdot 60^3} = \frac{1584}{216} + \frac{108 \cdot 10^6}{15,12 \cdot 10^6} = 7.33 + 7.14 = 14.47$$

$$E\theta_H = \frac{6 \cdot S^2}{1 \cdot h^3} \cdot \sin \psi_0 - \frac{12 \cdot r_0^2}{b_k \cdot h_k^3} \cdot \frac{h_k}{2} = \frac{6 \cdot 132^2}{6^3} \cdot 0,644 - \frac{6 \cdot 3000^2}{70 \cdot 60^2} = 311.7 - 214.29 = 97.4$$

$$E\theta_{P.g.} = \frac{2 \cdot g \cdot R}{h} \cdot \sin \psi_0 = \frac{2}{6} \cdot 0,644 gR = 0.215 gR$$

$$E\xi_H = \frac{6 \cdot S^3}{1 \cdot h^3} \cdot \sin^2 \psi_0 + \frac{r_0^2}{b_k \cdot h_k} + \frac{12 \cdot r_0^2}{b_k \cdot h_k^3} \cdot \left(\frac{h_k}{2}\right)^2 = \frac{6 \cdot 132^3}{6^3} \cdot 0,644^2 + \frac{3000^2}{70 \cdot 60} + \frac{3 \cdot 3000^2}{70 \cdot 60} =$$

$$= 26496,65 + 2142,86 + 6428,57 = 35068,1 \approx 35068$$

$$E\xi_M = \frac{6 \cdot S^3}{1 \cdot h^3} \cdot \sin \psi_0 - \frac{12 \cdot r_0^2}{b_k \cdot h_k^3} \cdot \frac{h_k}{2} = \frac{6 \cdot 132^3}{6^3} \cdot 0,644 - \frac{6 \cdot 3000^2}{70 \cdot 60^2} = 311,7 - 214,29 = 97.4$$

$$E\xi_{P.g.} = gR \frac{r_0}{h} \cdot \left( -\cos \psi_0 + \frac{1}{1 + \cos \psi_0} \right) + gR \cdot \frac{r_0^2}{b_k \cdot h_k} \cdot \frac{\cos \psi_0}{1 + \cos \psi_0} =$$

$$= gR \frac{3000}{6} \cdot \left( -0.765 + \frac{1}{1 + 0.765} \right) + gR \frac{3000^2}{70 \cdot 60} \cdot \frac{0.765}{1 + 0.765} =$$

$$= gR(-99.24 + 928.77) 829.5 gR \approx 830 gR$$

ეს მნიშვნელობები შეგვაქვს განტოლებათა სისტემაში (1):

$$\begin{cases} 14,47M_0 + 97,4H_0 + 0,215gR = 0 \\ 97,4M_0 + 35068H_0 + 830gR = 0 \end{cases}$$

აქედან განვსაზღვრავთ:

$$M_0 = 0,147gR; \quad H_0 = -0,0241gR.$$

რგოლური ძაღვის კიდური მნიშვნელობა იქნება:

$$\begin{aligned} N_{2/\varphi=0} &= gR \cdot \left( -\cos\psi_0 + \frac{1}{1+\cos\psi_0} \right) - \frac{2R}{S^2} \cdot M_0 - \frac{2R}{S} \cdot H_0 \cdot \sin\psi_0 = \\ &= gR \cdot \left( -0,765 + \frac{1}{1+0,765} \right) - \frac{2 \cdot 5000}{132^2} \cdot 0,147gR + \frac{2 \cdot 5000}{132} \cdot (-0,0241gR) \cdot 0,644 = \\ &= (-0,198 - 0,084 + 1,176)gR \approx 0,894gR = 0,894 \cdot (0,165 + 0,14) \cdot 50 = 13,6 \text{ ტ/მ}^2. \end{aligned}$$

$$g = q + S = 0,165 + 0,14 = 0,305 \text{ ტ/მ}^2$$

$$N_{\text{რგოლ.}} = N_2 \cdot r_c \cdot \cos\psi_0 \cdot \sin\psi_0 = 13,6 \cdot 92,5 \cdot 0,765 \cdot 0,644 = 619,77 \text{ ტ}$$

$$r_c = \frac{d^2 + 4f^2}{8f} = \frac{60^2 + 4 \cdot 5^2}{8 \cdot 5} = 92,5 \text{ მ.}$$

მღუნავი მომენტები და რგოლური ძაღვები (გეომეტრიული ზომების სმ-ებში გამოსახვისას), გამოთვლილია ფორმულებით:

$$M_x = -M_0 (\cos\psi + \sin\psi) \cdot e^{-\varphi} - SH_0 \cdot \sin\alpha_0 \cdot \sin\varphi e^{-\varphi};$$

$$N_2 = N_2^{(p+g)} - \frac{2R}{S^2} M_0 (\sin\psi + \cos\psi) \cdot e^{-\varphi} - \frac{2R}{S} \cdot H_0 \sin\alpha_0 e^{-\varphi} \cdot \cos\varphi;$$

მოყვანილი ნახ. 27 *δ, b*.  $M_x$  ეპიურა გვიჩვენებს, რომ გუმბათის ღუნვას მართლაც ლოკალური ხასიათი აქვს.  $N_2$  ძაღვის ეპიურიდან სჩანს, რომ გუმბათის კონტურის სიახლოვეს (მიჯნაზე) საყრდენი რგოლის წაგრძელების გავლენის შედეგად წარმოიშობა ადგილობრივი გაჭიმვა.

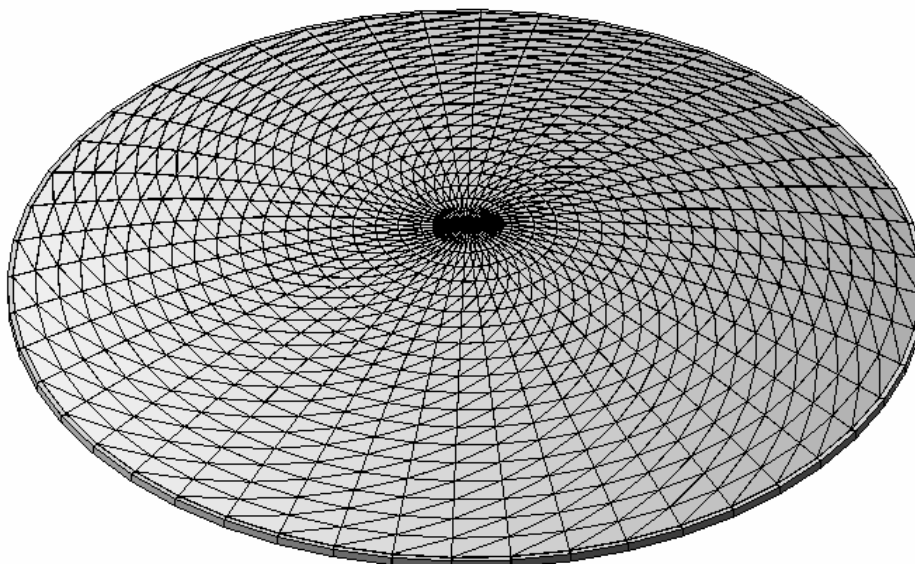
აღნიშნულიდან გამომდინარე მიზანშეწონილია საყრდენი რგოლის დაძაბვა მასში წინასწარი მკუმშავი ძაღვების შექმნით.

საანგარიშო გამჭიმავი ძაღვა საყრდენ რგოლში განისაზღვრება ფორმულით:

$$N_{\text{რგოლ.}} = N_2 \cdot r_c \cdot \cos\psi_0 \cdot \sin\psi_0 = 13,6 \cdot 92,5 \cdot 0,765 \cdot 0,644 = 619,77 \text{ ტ}$$

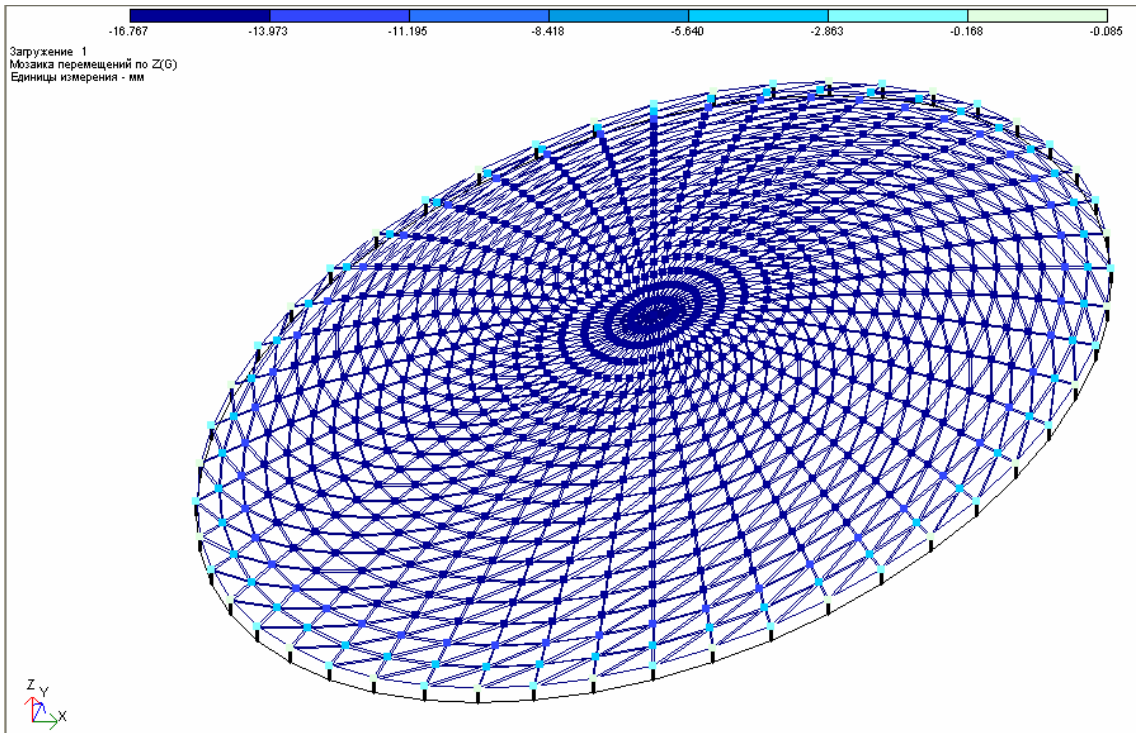
რკინაბეტონის გარსის  $D = 60$  მ,  $f = 5$  მ,  $R = 50$  მ, გაანგარიშების შედეგები.

რკინაბეტონის გარსის საანგარიშო სქემა

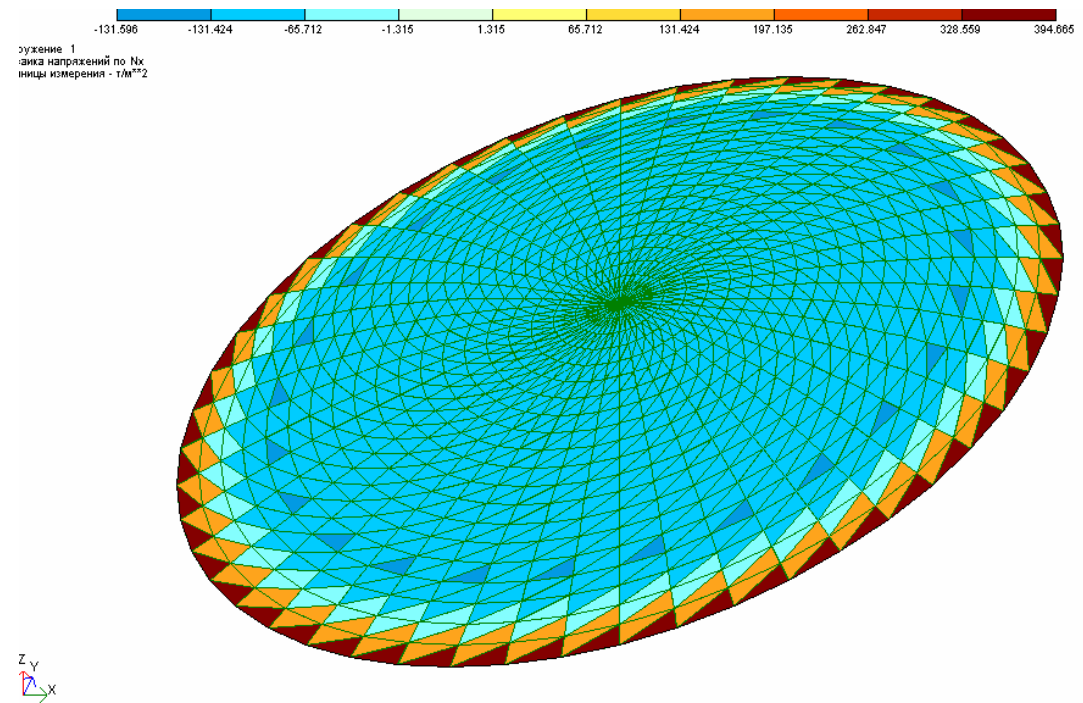


ნახ. 27. რკინაბეტონის გარსის Z ღერძის მიმართ გადაადგილება

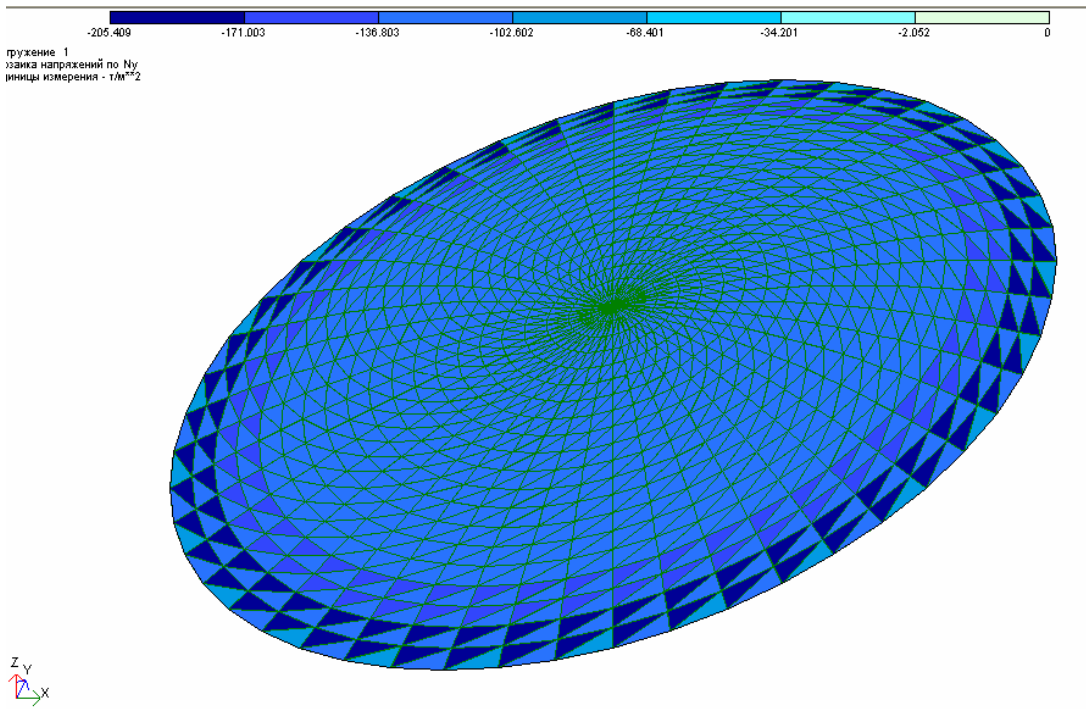
### ძაბვათა მონიჰკა - $N_x$



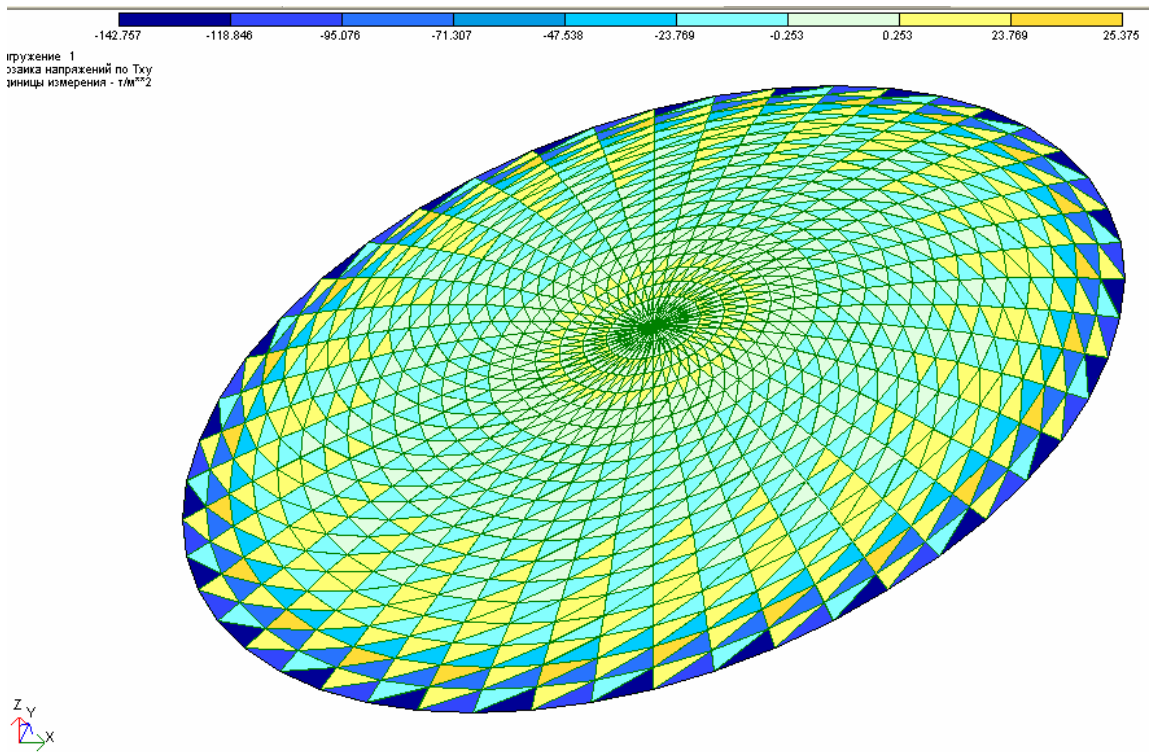
### ძაბვათა მონიჰკა - $N_y$



### ძახვათა მონაცეა - $\tau_{xy}$



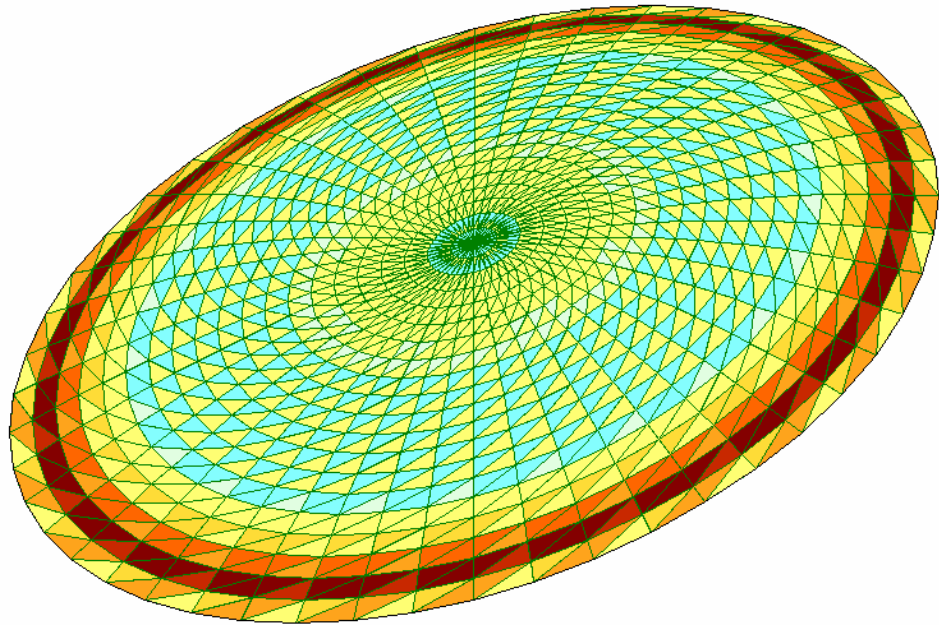
### ძახვათა მონაცეა - $M_x$



### ძაბვათა მოზაიკა – $M_y$



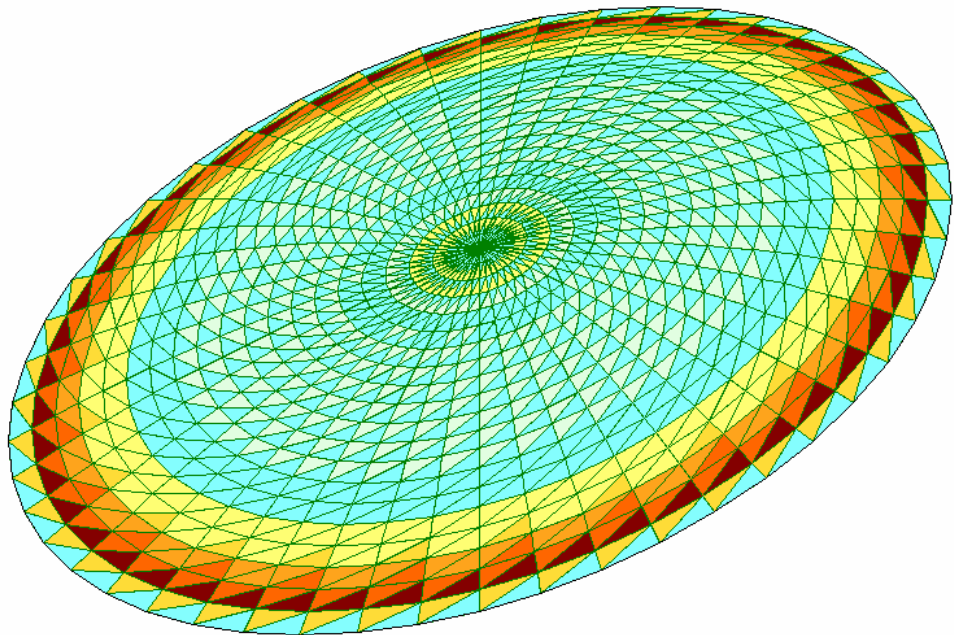
გუჯინე 1  
შანკა ნაჲრაჲენი პო  $M_x$   
ნიცა იზმერენა - ( $1^2$ მ) $^2$ მ



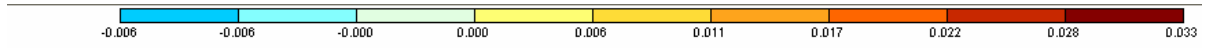
### ძაბვათა მოზაიკა – $M_{xy}$



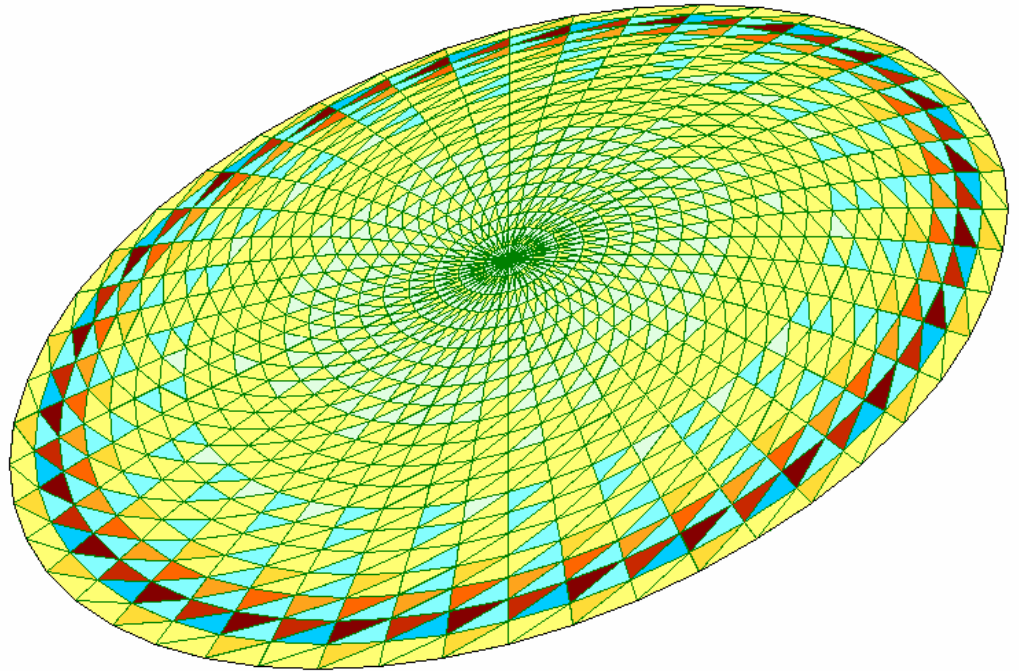
გუჯინე 1  
შანკა ნაჲრაჲენი პო  $M_y$   
ნიცა იზმერენა - ( $1^2$ მ) $^2$ მ



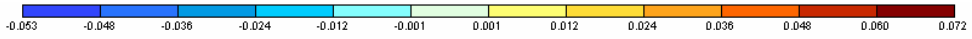
### ძანბვართა მონახიკა - $Q_x$



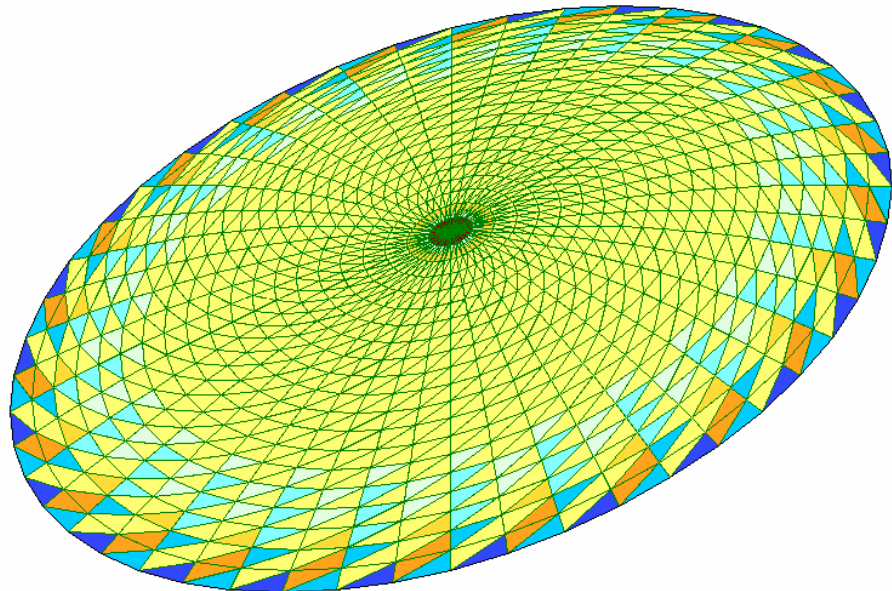
ფურცელი 1  
გრაფიკი დატვირთვის მიხედვით  $Q_x$   
ედიცია გაზომვის -  $(\text{ტ}^{\ast}\text{მ}/\text{მ})$



### ძანბვართა მონახიკა - $Q_y$

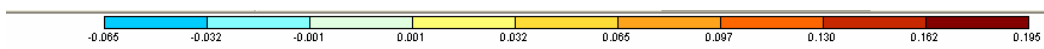


ფურცელი 1  
გრაფიკი დატვირთვის მიხედვით  $Q_y$   
ედიცია გაზომვის -  $\text{ტ}/\text{მ}$

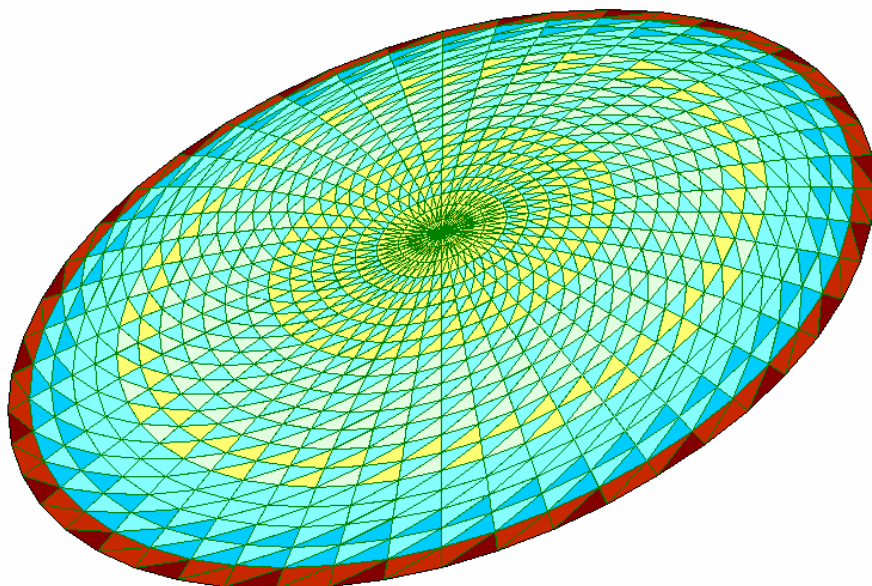




ძაბვათა მოზაიკა -  $Q_{xy}$

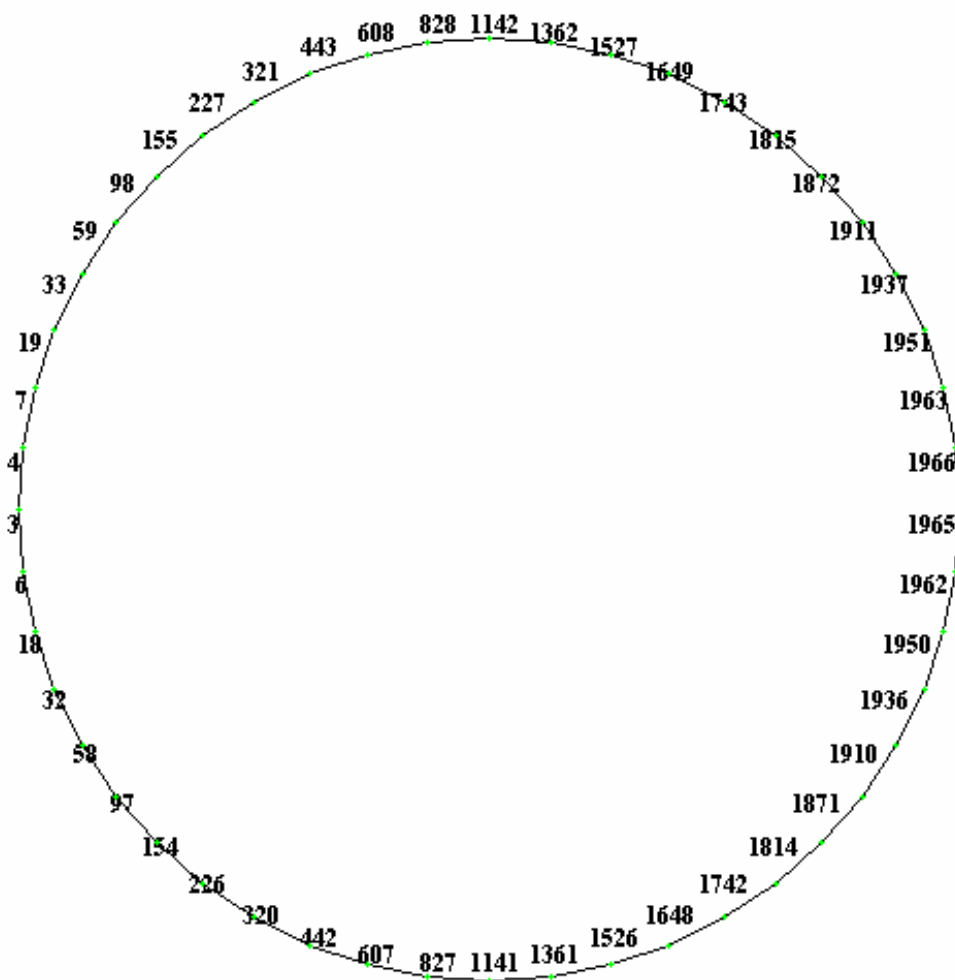


რუკინი 1  
 მაკა ნაპრაჟენი პო  $Q_{xy}$   
 ინიცი იზმერენია - t/M



$z$   
 $y$   
 $x$

რკინაბეტონის გარსის საყრდენი რგოლის ელემენტების ნუმერაცია



ცხრილი 4

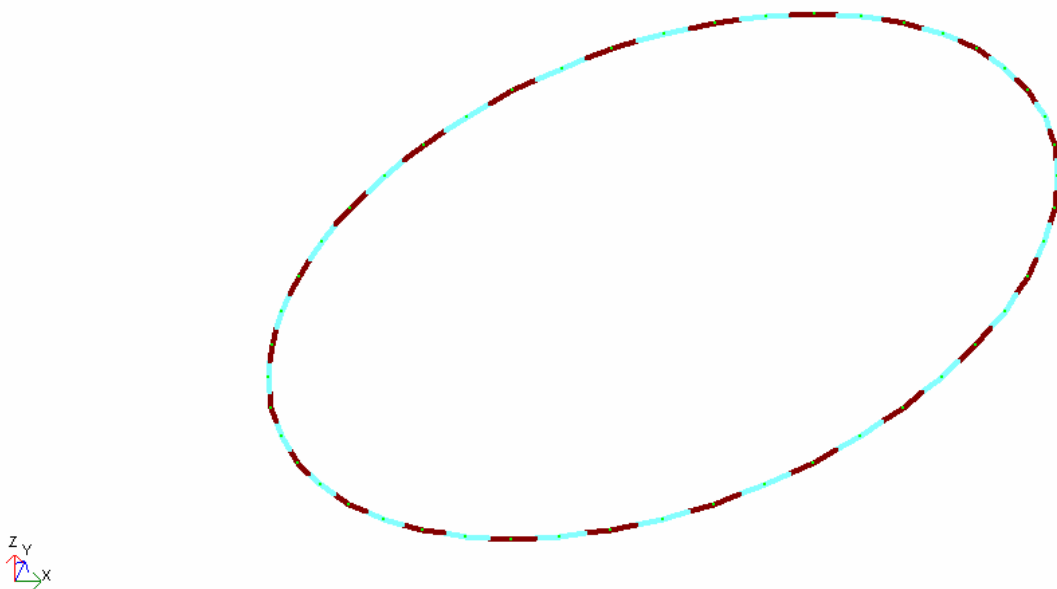
რკინაბეტონის გარსის საყრდენი რგოლის ელემენტებში ძალოვანი ფაქტორების ცხრილი

Таблица РСУ (стержни)								
			Усилия					
№ элем	№ сечен	N (т)	Mx (т*м)	My (т*м)	Qz (т)	Mz (т*м)	Qy (т)	№№ загруз
3	1	319.387	-1.340	30.327	-8.023	-7.196	-3.668	1 2
3	1	173.217	-0.847	17.800	-4.229	-4.544	-2.316	1
3	2	319.387	-1.340	-10.050	-12.556	7.198	-3.668	1 2
4	1	320.289	1.339	-9.944	12.501	7.170	3.654	1 2
4	2	320.289	1.339	30.218	7.968	-7.169	3.654	1 2
4	2	173.787	0.846	17.749	4.203	-4.532	2.310	1
6	1	320.290	1.338	-9.942	12.500	7.169	3.654	1 2
6	2	320.290	1.338	30.218	7.968	-7.169	3.654	1 2
6	2	173.787	0.846	17.749	4.203	-4.532	2.310	1
7	1	319.387	-1.340	30.327	-8.023	-7.196	-3.668	1 2
7	1	173.217	-0.847	17.800	-4.229	-4.544	-2.316	1
7	2	319.387	-1.340	-10.048	-12.555	7.197	-3.668	1 2
18	1	319.386	-1.341	30.331	-8.024	-7.198	-3.668	1 2
18	1	173.216	-0.847	17.802	-4.229	-4.545	-2.316	1
18	2	319.386	-1.341	-10.048	-12.556	7.197	-3.668	1 2
19	1	320.288	1.339	-9.942	12.501	7.169	3.654	1 2
19	2	320.288	1.339	30.222	7.969	-7.171	3.654	1 2
19	2	173.786	0.846	17.751	4.204	-4.533	2.310	1
32	1	320.288	1.339	-9.941	12.501	7.169	3.654	1 2
32	2	320.288	1.339	30.222	7.969	-7.171	3.654	1 2
32	2	173.786	0.846	17.751	4.204	-4.533	2.310	1
33	1	319.387	-1.341	30.331	-8.024	-7.198	-3.668	1 2
33	1	173.217	-0.847	17.802	-4.229	-4.545	-2.316	1
33	2	319.387	-1.341	-10.048	-12.556	7.197	-3.668	1 2
58	1	319.386	-1.340	30.329	-8.023	-7.197	-3.668	1 2
58	1	173.216	-0.847	17.801	-4.229	-4.544	-2.316	1
58	2	319.386	-1.340	-10.048	-12.555	7.197	-3.668	1 2
59	1	320.289	1.338	-9.942	12.501	7.169	3.654	1 2
59	2	320.289	1.338	30.220	7.968	-7.170	3.654	1 2
59	2	173.787	0.846	17.750	4.203	-4.532	2.310	1
97	1	320.287	1.339	-9.945	12.501	7.171	3.654	1 2
97	2	320.287	1.339	30.220	7.969	-7.170	3.654	1 2
97	2	173.786	0.846	17.750	4.204	-4.532	2.310	1
98	1	319.387	-1.341	30.329	-8.024	-7.197	-3.668	1 2
98	1	173.217	-0.847	17.801	-4.229	-4.544	-2.316	1
98	2	319.387	-1.341	-10.051	-12.556	7.198	-3.668	1 2

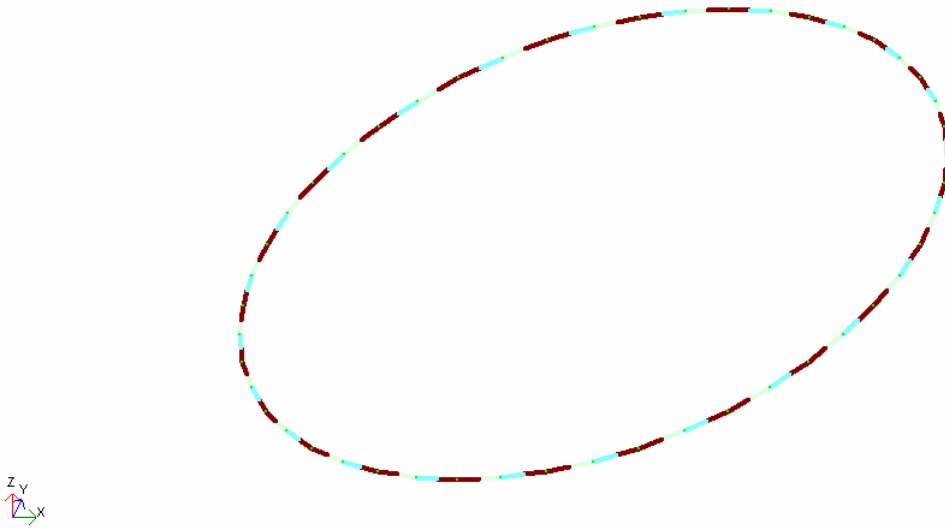
154	1	319.387	-1.341	30.329	-8.024	-7.197	-3.668	1 2
154	1	173.217	-0.847	17.801	-4.229	-4.544	-2.316	1
154	2	319.387	-1.341	-10.051	-12.556	7.198	-3.668	1 2
155	1	320.287	1.339	-9.945	12.501	7.171	3.654	1 2
155	2	320.287	1.339	30.220	7.969	-7.170	3.654	1 2
155	2	173.786	0.846	17.750	4.204	-4.532	2.310	1
226	1	320.289	1.338	-9.942	12.501	7.169	3.654	1 2
226	2	320.289	1.338	30.220	7.968	-7.170	3.654	1 2
226	2	173.787	0.846	17.750	4.203	-4.532	2.310	1
227	1	319.386	-1.340	30.329	-8.023	-7.197	-3.668	1 2
227	1	173.216	-0.847	17.801	-4.229	-4.544	-2.316	1
227	2	319.386	-1.340	-10.048	-12.555	7.197	-3.668	1 2
320	1	319.387	-1.341	30.331	-8.024	-7.198	-3.668	1 2
320	1	173.217	-0.847	17.802	-4.229	-4.545	-2.316	1
320	2	319.387	-1.341	-10.048	-12.556	7.197	-3.668	1 2
321	1	320.288	1.339	-9.941	12.501	7.169	3.654	1 2
321	2	320.288	1.339	30.222	7.969	-7.171	3.654	1 2
321	2	173.786	0.846	17.751	4.204	-4.533	2.310	1
442	1	320.288	1.339	-9.942	12.501	7.169	3.654	1 2
442	2	320.288	1.339	30.222	7.969	-7.171	3.654	1 2
442	2	173.786	0.846	17.751	4.204	-4.533	2.310	1
443	1	319.386	-1.341	30.331	-8.024	-7.198	-3.668	1 2
443	1	173.216	-0.847	17.802	-4.229	-4.545	-2.316	1
443	2	319.386	-1.341	-10.048	-12.556	7.197	-3.668	1 2
607	1	319.387	-1.340	30.327	-8.023	-7.196	-3.668	1 2
607	1	173.217	-0.847	17.800	-4.229	-4.544	-2.316	1
607	2	319.387	-1.340	-10.048	-12.555	7.197	-3.668	1 2
608	1	320.290	1.338	-9.942	12.500	7.169	3.654	1 2
608	2	320.290	1.338	30.218	7.968	-7.169	3.654	1 2
608	2	173.787	0.846	17.749	4.203	-4.532	2.310	1
827	1	320.289	1.339	-9.944	12.501	7.170	3.654	1 2
827	2	320.289	1.339	30.218	7.968	-7.169	3.654	1 2
827	2	173.787	0.846	17.749	4.203	-4.532	2.310	1
828	1	319.387	-1.340	30.327	-8.023	-7.196	-3.668	1 2
828	1	173.217	-0.847	17.800	-4.229	-4.544	-2.316	1
828	2	319.387	-1.340	-10.050	-12.556	7.198	-3.668	1 2
1141	1	319.387	-1.340	30.327	-8.023	-7.196	-3.668	1 2
1141	1	173.217	-0.847	17.800	-4.229	-4.544	-2.316	1
1141	2	319.387	-1.340	-10.050	-12.556	7.198	-3.668	1 2
1142	1	320.289	1.339	-9.944	12.501	7.170	3.654	1 2
1142	2	320.289	1.339	30.218	7.968	-7.169	3.654	1 2
1142	2	173.787	0.846	17.749	4.203	-4.532	2.310	1
1361	1	320.290	1.338	-9.942	12.500	7.169	3.654	1 2
1361	2	320.290	1.338	30.218	7.968	-7.169	3.654	1 2
1361	2	173.787	0.846	17.749	4.203	-4.532	2.310	1

1362	1	319.387	-1.340	30.327	-8.023	-7.196	-3.668	1 2
1362	1	173.217	-0.847	17.800	-4.229	-4.544	-2.316	1
1362	2	319.387	-1.340	-10.048	-12.555	7.197	-3.668	1 2
1526	1	319.386	-1.341	30.331	-8.024	-7.198	-3.668	1 2
1526	1	173.216	-0.847	17.802	-4.229	-4.545	-2.316	1
1526	2	319.386	-1.341	-10.048	-12.556	7.197	-3.668	1 2
1527	1	320.288	1.339	-9.942	12.501	7.169	3.654	1 2
1527	2	320.288	1.339	30.222	7.969	-7.171	3.654	1 2
1527	2	173.786	0.846	17.751	4.204	-4.533	2.310	1
1648	1	320.288	1.339	-9.941	12.501	7.169	3.654	1 2
1648	2	320.288	1.339	30.222	7.969	-7.171	3.654	1 2
1648	2	173.786	0.846	17.751	4.204	-4.533	2.310	1
1649	1	319.387	-1.341	30.331	-8.024	-7.198	-3.668	1 2
1649	1	173.217	-0.847	17.802	-4.229	-4.545	-2.316	1
1649	2	319.387	-1.341	-10.048	-12.556	7.197	-3.668	1 2
1742	1	319.386	-1.340	30.329	-8.023	-7.197	-3.668	1 2
1742	1	173.216	-0.847	17.801	-4.229	-4.544	-2.316	1
1742	2	319.386	-1.340	-10.048	-12.555	7.197	-3.668	1 2
1743	1	320.289	1.338	-9.942	12.501	7.169	3.654	1 2
1743	2	320.289	1.338	30.220	7.968	-7.170	3.654	1 2
1743	2	173.787	0.846	17.750	4.203	-4.532	2.310	1
1814	1	320.287	1.339	-9.945	12.501	7.171	3.654	1 2
1814	2	320.287	1.339	30.220	7.969	-7.170	3.654	1 2
1814	2	173.786	0.846	17.750	4.204	-4.532	2.310	1
1815	1	319.387	-1.341	30.329	-8.024	-7.197	-3.668	1 2
1815	1	173.217	-0.847	17.801	-4.229	-4.544	-2.316	1
1815	2	319.387	-1.341	-10.051	-12.556	7.198	-3.668	1 2
1871	1	319.387	-1.341	30.329	-8.024	-7.197	-3.668	1 2
1871	1	173.217	-0.847	17.801	-4.229	-4.544	-2.316	1
1871	2	319.387	-1.341	-10.051	-12.556	7.198	-3.668	1 2
1872	1	320.287	1.339	-9.945	12.501	7.171	3.654	1 2
1872	2	320.287	1.339	30.220	7.969	-7.170	3.654	1 2
1872	2	173.786	0.846	17.750	4.204	-4.532	2.310	1
1910	1	320.289	1.338	-9.942	12.501	7.169	3.654	1 2
1910	2	320.289	1.338	30.220	7.968	-7.170	3.654	1 2
1910	2	173.787	0.846	17.750	4.203	-4.532	2.310	1
1911	1	319.386	-1.340	30.329	-8.023	-7.197	-3.668	1 2
1911	1	173.216	-0.847	17.801	-4.229	-4.544	-2.316	1
1911	2	319.386	-1.340	-10.048	-12.555	7.197	-3.668	1 2
1936	1	319.387	-1.341	30.331	-8.024	-7.198	-3.668	1 2
1936	1	173.217	-0.847	17.802	-4.229	-4.545	-2.316	1
1936	2	319.387	-1.341	-10.048	-12.556	7.197	-3.668	1 2
1937	1	320.288	1.339	-9.941	12.501	7.169	3.654	1 2
1937	2	320.288	1.339	30.222	7.969	-7.171	3.654	1 2
1937	2	173.786	0.846	17.751	4.204	-4.533	2.310	1

1950	1	320.288	1.339	-9.942	12.501	7.169	3.654	1 2
1950	2	320.288	1.339	30.222	7.969	-7.171	3.654	1 2
1950	2	173.786	0.846	17.751	4.204	-4.533	2.310	1
1951	1	319.386	-1.341	30.331	-8.024	-7.198	-3.668	1 2
1951	1	173.216	-0.847	17.802	-4.229	-4.545	-2.316	1
1951	2	319.386	-1.341	-10.048	-12.556	7.197	-3.668	1 2
1962	1	319.387	-1.340	30.327	-8.023	-7.196	-3.668	1 2
1962	1	173.217	-0.847	17.800	-4.229	-4.544	-2.316	1
1962	2	319.387	-1.340	-10.048	-12.555	7.197	-3.668	1 2
1963	1	320.290	1.338	-9.942	12.500	7.169	3.654	1 2
1963	2	320.290	1.338	30.218	7.968	-7.169	3.654	1 2
1963	2	173.787	0.846	17.749	4.203	-4.532	2.310	1
1965	1	320.289	1.339	-9.944	12.501	7.170	3.654	1 2
1965	2	320.289	1.339	30.218	7.968	-7.169	3.654	1 2
1965	2	173.787	0.846	17.749	4.203	-4.532	2.310	1
1966	1	319.387	-1.340	30.327	-8.023	-7.196	-3.668	1 2
1966	1	173.217	-0.847	17.800	-4.229	-4.544	-2.316	1
1966	2	319.387	-1.340	-10.050	-12.556	7.198	-3.668	1 2



ნახ. 28. რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირება



ნახ. 29. რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირების პროცენტული შემადგენლობა

Схема симметричного армирования

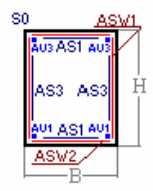
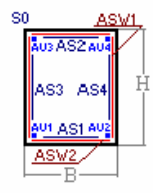
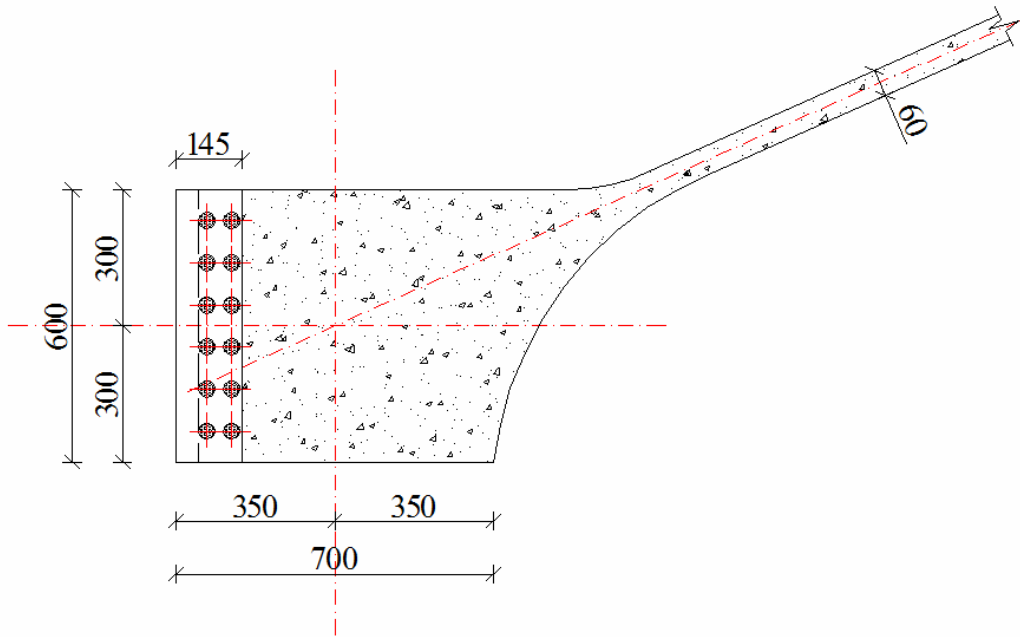


Схема несимметричного армирования



Если был использован алгоритм распределенной арматуры с равномерным расположением расчетных площадей арматуры вдоль сторон сечения, то угловая арматура AU1, AU2, AU3, AU4 будет входить в расположенную вдоль граней AS1, AS2.

ნახ. 30. საყრდენი რგოლის გაანგარიშება



ნახ. 31. მონოლითური რკინაბეტონის საყრდენ რგოლში წინასწარდაძებული ბაგირების განლაგების სქემა

ვინაიდან მანქანური გაანგარიშება უფრო ზუსტია, რადგან უკეთესად აღიწერება ჩვენს მიერ წარმოდგენილი სფერული გარსი და მისი საანგარიშო მოდელი. გარკვეული ანალიზის საფუძველზე შემდგომ ანგარიშს ვაწარმოებთ მანქანური გაანგარიშებით მიღებულ ძალოვან ფაქტორებზე.

საანგარიშო გამჭიმავი ძალვა საყრდენ რგოლში მანქანური გაანგარიშებით მივიღეთ:

$$N_{\text{რგოლ.}} = 530.2 \text{ ტ}$$

საყრდენი რგოლის დაარმატურება სორციელდება *A-IIIb* წინასწარდაძებული ღეროვანი არმატურით საანგარიშო წინალობით  $150 \text{ კგ/მ}^2$ . ბეტონის სიმტკიცის კლასი *B40*. საყრდენი რგოლის არმატურის კვეთის აუცილებელი ფართობი:

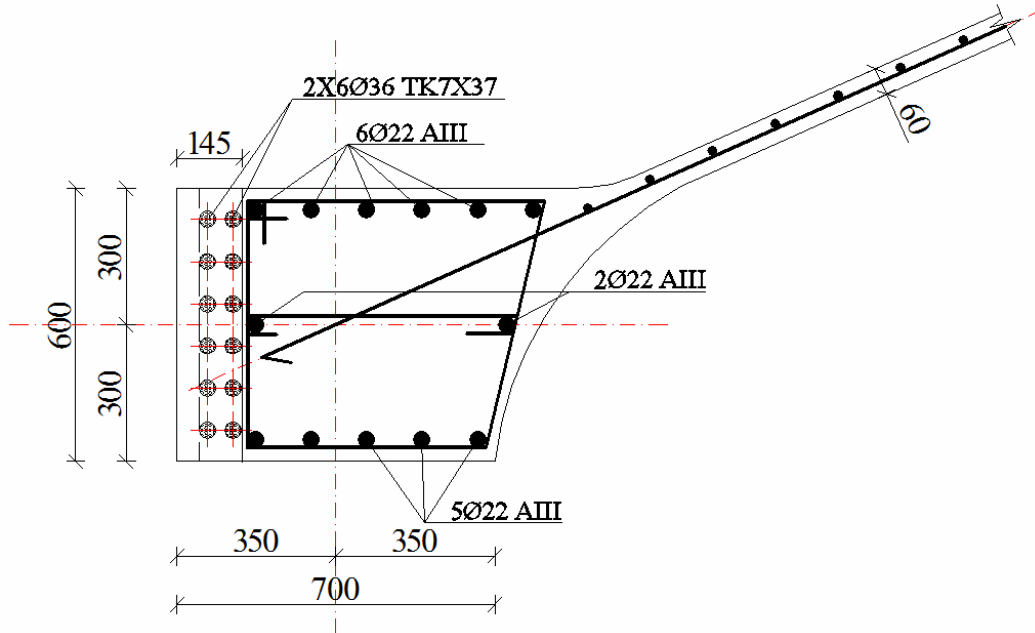
$$A = \frac{N}{m_1 \cdot m_2 \cdot R_{\text{ბაგ}}} = \frac{530200}{0.8 \cdot 0.7 \cdot 150} = 6312 \text{ მმ}^2 = 63.12 \text{ სმ}^2$$

სადაც  $m_1=0.8$  ბაგირის მუშაობის პირობების კოეფიციენტია.

$m_2=0.7$  ბაგირში მავთულის მუშაობის პირობების კოეფიციენტი.

ვიღებთ  $TK \ 7X37=259$  მავთულიან ბაგირს  $12\emptyset 36$  მმ და ფართობით  $A=70.8 \text{ სმ}^2$ , განვათავსებთ დაძაბულ ღეროებს ორ რიგად, 6 ღეროს

თითოეულ რიგში და კლასის 12Ø22 მმ დაუძაბავ არმატურას (საანგარიშო წინააღობით  $R = 34 \text{ კნ/სმ}^2$ ) საყრდენი რგოლის დაარმატურებისათვის.



ნახ. 32 მონოლითური რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირების სქემა, მზიდი წინასწარდაძაბული ბაგირებითა და კონსტრუქციული ღეროვანი არმატურებით

განესაზღვროთ ბაგირის საანგარიშო წინააღობა:

$$R = \frac{m_b \cdot m_{\delta}}{\gamma_{დრ} \cdot \gamma_s \cdot \gamma_{სკ}} \cdot R^{\text{ნორმ.}}$$

აქ  $m_b$  – მუშაობის პირობების კოეფიციენტი, ითვალისწინებს კონსტრუქციის ზღვრული მდგომარეობისას ძალვათა გადანაწილების შესაძლებლობას და დაღლილობის გამო ბაგირის რღვევას, რომელიც არ გაანგარიშდება გამძლეობაზე.

$m_b = 1$  აიღება ცხრილიდან.

$m_{\delta}$  – მუშაობის პირობების კოეფიციენტი, აიღება ცხრილიდან და ითვალისწინებს ბაგირის სიმტკიცეზე ძაბვების მაკონცენტრირებულების გავლენას (საანკერო ჩამაგრებები, გადაღუნვები და სხვა).

$m_b = 0.95$ ;

$\gamma_{დრ} = 1.3$  – საიმედოობის კოეფიციენტი კონსტრუქციის ელემენტებისათვის, რომლებიც დროებითი წინააღობის მიხედვით გაანგარიშდებიან.



$\gamma_b=1.2$  – მასალის მიხედვით საიმედოობის კოეფიციენტი, ითვალისწინებს ბაგირში მავთულების განლაგებას, მავთულის განიგკვეთში ზომების ცვლილებებზე დაშვებებს და მავთულის სიგრძეს.

$\gamma_{s,k} = 1.0$  – საიმედოობის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ნაგებობის კაპიტალურობასა და მისი პასუხისმგებლობის დონეს.

$$R^{ნორმ} = \frac{N_b}{A_b} = \frac{870000}{7080} = 122.9 \text{ კგ/მ}^2$$

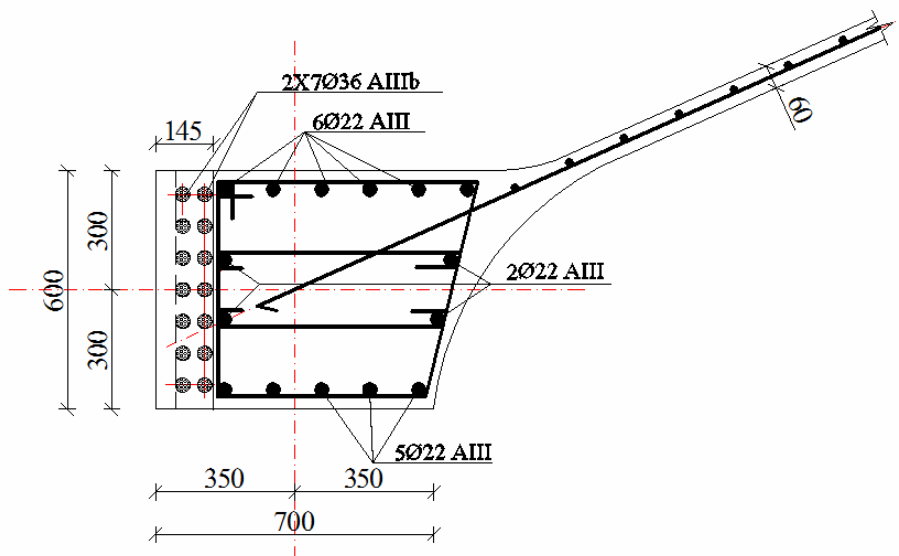
ვაზუსტებთ მზიდი ბაგირის საანგარიშო წინაღობას:

$$R = 0.61 \cdot 122.9 = 75 \text{ კგ/მ}^2$$

მზიდი ბაგირის საბოლოო განიგკვეთის ფართობი:

$$A = \frac{N}{R} = \frac{530200}{75} = 7069 \text{ მ}^2$$

საყრდენი რგოლის არმირება წინასწარდაძაბული ღეროვანი არმატურებით მოცემულია ნახ. 33.



ნახ. 33. მონოლითური რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირება წინასწარდაძაბული ღეროვანი არმატურით

რკინაბეტონის გარსის საყრდენი რგოლის ელემენტებში მუშა არმატურების შერჩევის ცხრილი მოცემულია დანართის სახით.

ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლების განსაზღვრა

I ვარიანტი: წინასწარდაძაბული ღეროვანი არმატურით 14 Ø36 AIII და კონსტრუქციული ღეროვანი არმატურით 15Ø22AIII; 1 გრძ/მ ღირებულება შეადგენს 12.6 ლ;  $14 \times 12.6 + 15 \times 2.8 = 218.4$  ლ.

II ვარიანტი: მზიდი წინასწარდაძაბული ბაგირებითა და კონსტრუქციული დეროვანი არმატურით; ბაგირის TK 7X37=259 12Ø36 საბაზრო ღირებულება შეადგენს 10 ლარს, ხოლო 13 Ø22 AIII – 2.8 ლარი. ე.ი.  $12 \times 10 + 13 \times 2.8 = 156.4$  ლარი.

მაშასადამე მონოლითური რკინაბეტონის საყრდენი რგოლის არმირება ყოველ გრძივ მეტრზე 62.0 ლარით უფრო ეკონომიურია თუ შესრულება წინასწარდაძაბული ბაგირებითა და კონსტრუქციული დეროვანი არმატურებით.

#### 2.6.5. 2.3-ი თავის დასკვნები

- მოცემულია გუმბათის აგების ახალი ტექნოლოგია;
- შემოთავაზებულია დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციის აგების ტექნოლოგია. აღნიშნული მოდელის ტექნიკური შედეგია დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციების აგების გამარტივება;
- დამუშავებულია გუმბათის აწვევის ტექნოლოგია;
- წარმოდგენილია დიდმალიანი გუმბათოვანი გადახურვების მონტაჟის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები.

### 3. დასკვნა

1. წარმოდგენილია ახალი გადაწყვეტა, რომლის მიხედვითაც მთელი გუმბათი განიხილება როგორც ერთიანი გარსი დისკრეტულად ცვალებადი სიმრუდით, რაც საგრძნობლად ამოკლებს გაანგარიშების ალგორითმს;
2. განსაზღვრულია მომენტური ძაბვების ფარდობითი სიდიდე გრესაკუმშვის ძაბვებთან შედარებით და ამ ძაბვების ზემოქმედება კონსტრუქციების საიმედოობის და ხანგამძლეობის შეფასებაზე;
3. განსაზღვრულია უმომენტო გაანგარიშების ცდომილება და მისი გამოყენების ზღვარი არათანაბარ განაწილებულ ძაბვებთან მიმართებაში.
4. მიღებულია ღეროვანი გუმბათების კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის თავისებურებათა გათვალისწინების შედეგები;
5. წარმოდგენილია ღეროვანი სფერული გუმბათის გაანგარიშების მეთოდი და მისი გაანგარიშების ალგორითმი, კომპიუტერიული პროგრამის გამოყენებით;
6. აღწერილია გუმბათის კონსტრუქციის ექსპერიმენტული გამოკვლევები.
7. მოცემულია გუმბათის აგების ახალი ტექნოლოგია;
8. შემოთავაზებულია დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციის აგების ტექნოლოგია. აღნიშნული მოდელის ტექნიკური შედეგია დიდმალიანი გადახურვის კონსტრუქციების აგების გამარტივება;
9. დამუშავებულია გუმბათის აწევის ტექნოლოგია;
10. წარმოდგენილია დიდმალიანი გუმბათოვანი გადახურვების მონტაჟის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. არსებული ნაგებობის ქვეშ ფუძე-გრუნტების მზიდუნარიანობის გაზრდის საკითხი // მახვილაძე ლ., გოგუაძე გ., გოშაძე ტ., ჩირგაძე რ., მახვილაძე კ., ოდიშვილი ლ., გიგინეიშვილი ჰ., ჭიპაშვილი ო., ზოტოვი ვ., ბოტოლოვი ი. // პატენტის № 200 648, კლასი 02 3/2 განცხადების № 2000000801, პრიორიტეტი, 02.02.2000 (საქპატენტი, სამრეწველო საკუთრების ოფიციალური ბიულეტენი 11(64), თბილისი, 2000, გვ. 31)
2. ბიჭიაშვილი ჯ., შენგელია ი. მშენებლობის ორგანიზაციის, ავტომატიზაციისა და სახარჯთაღრიცხვო ღირებულების განსაზღვრის საკითხები. თბილისი, სპი. 1984.
3. დიდმალიანი რკინაბეტონის გუმბათების მშენებლობის ახალი ტექნოლოგია / ლ. მახვილაძე, კ. ოდიშელი, კ. მახვილაძე, რ. ჩირგაძე, გ. ყიფიანი, შ. ახალკაცი. თბილისი, 2004. – 22 გვ.
4. მახვილაძე ლ., ზოტოვი ვ., ოდიშვილი კ., მახვილაძე კ., ჩირგაძე რ., პანასიუკი ლ., ბოლოტოვი ი., ყიფიანი გ. არსებული შენობის გაძლიერების ხერხი. პატენტის U.2003.989 U.E 04 H 9/02. AU 2003001122. (საქპატენტი. საქართველოს საკუთრების ოფიციალური ბიულეტენი.) 9(133). თბილისი. 2003. გვ. 24.
5. მახვილაძე ლ., გუსევი ბ., მახვილაძე კ., ზოტოვი ვ., ოდიშვილი კ., ყიფიანი გ., ჩირგაძე რ., ვაჩეიშვილი ი., ახალკაცი შ. რკინაბეტონის მონოლითური გუმბათის აგების ხერხი. პატენტის AU.2003 1036 U.E 04 B1/35. GEL 20041036 U. (საქპატენტი. საქართველოს საკუთრების ოფიციალური ბიულეტენი.) 10 (137). თბილისი. 2003. გვ. 36.
6. მახვილაძე ლ., შარაბიძე ნ., თორდია პ., მახვილაძე კ., ფაშიაშვილი მ., ყიფიანი გ., გიორგაძე პ. რკინაბეტონის სადაწნეო მილების დამზადების ტექნოლოგია. AU.2005 008696 (საქპატენტი. საქართველოს საკუთრების ოფიციალური ბიულეტენი.) თბილისი. 2005. №19. U.1203.
7. მახვილაძე ლ., მახვილაძე კ., გიორგაძე პ., ჩირგაძე რ., ახალკაცი ს., ყიფიანი გ., შარაბიძე ნ., ფაშიაშვილი მ. ბეტონის უდაწნეო მილების დამზადების ტექნოლოგია. AU. 2005 008698 (საქპატენტი. საქართველოს საკუთრების ოფიციალური ბიულეტენი.) თბილისი. 2005. №19. U.1205.
8. მახვილაძე ლ., მახვილაძე კ., ფაშიაშვილი მ., ჭინჭრაძე ი. დიდმალიანი თაღოვანი გადახურვის აგების ხერხი. U.1233. 2005 07.22 (საქპატენტი. საქართველოს საკუთრების ოფიციალური ბიულეტენი.) თბილისი. 2005. №8. U.1233.
9. მახვილაძე ლ., ჩარკვიანი თ., მახვილაძე კ., აბდუშელიშვილი გ., ჯინჭარაძე ი., ყიფიანი გ., ფაშიაშვილი მ. დიდმალიანი გადახურვის აგების ტექნოლოგია. AU.2005 008756 (საქპატენტი. საქართველოს საკუთრების ოფიციალური ბიულეტენი.) თბილისი. 2005. №9. F.04.
10. პირადოვი ა., პირადოვი კ., კახიანი ლ., იოსებაშვილი გ. ბეტონისა და რკინაბეტონის რღვევითი მექანიკის საფუძვლები. „ტექნიკური უნივერსიტეტი“ თბილისი. 1998, 70 გვ.
11. საქართველოს სამშენებლო ნორმები და წესები – ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა ფუძეები // ავტორები: ლუღუშაური ი., ლომიძე ვ., ჭუმბურიძე გ. რედაქტორი ლუღუშაური ი. თბილისი, 1993, 129 გვ.

12. სამშენებლო ნორმები და წესები – შენობისა და ნაგებობების ფუძეები // ღუდუშაური ი., ლომიძე კ., ბერიშვილი ნ., მეგრელიშვილი გ., კიკნაძე მ., ჯიშკარიანი ვ. ხელმძღვანელი ღუდუშაური ი. // სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოს ანგარიში თემა №68/91-07 თბილისი, ემერგეტისა და ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა სამეცნ. კვლევ. ინსტიტუტი. 1991, 41 გვ.
13. ნადირაძე ა. ბეტონისა და რკინაბეტონის ნაკეთობათა ტექნოლოგია. თბილისი: განათლება, 1994. -614 გვ.
14. ყიფიანი გ., ჩოგოვაძე ჯ., ჭიპაშვილი ო. ავარიულ დეფორმირებული საცხოვრებელი შენობების გამოკვლევა ქ. თბილისის მაგალითზე // საერთ. სიმპოზიუმის „უწყვეტ ტანთა მექანიკის პრობლემებზე“ მოხსენებათა შრომები. სტუ, თბილისი, 1997, გვ. 397-399.
15. ჭიპაშვილი ო. საცხოვრებელი სახლების ტექნიკურ-ეკონომიკური შეფასების ლოკალური კრიტერიუმი // პერიოდული ჟურნალი „ინტელექტი“ №2(5) თბილისი თბილისი, 1999. გვ. 85-87.
16. Балабух Л.И. Изгиб и кручение конических оболочек//Тр. ЦАГИ. 1946. №577. - С.64.
17. Балабух Л.И. Расчет на прочность конических кессонов//Тр. ЦАГИ. 1947. №640. - С. 55.
18. Бартенов В.С. Железобетонные покрытия в виде ортопных оболочек двойкой кривизны. М.: Стройиздат. 1982.
19. Битцкий А.И. расчет висячих покрфтий с предварительно напряженной ортогональной пространственной сеткой тросов. М. 1983.
20. Белоусов Н.И. Римский-Корсаков А.В. Колебание и излучение звука круговыми цилиндрическими оболочками. -Обзор. Л., 1980. - С.89.
21. Беляев Н.М. Теории пластических деформаций//Изв. АН СССР. ОТН. 1937.№1. -С.49-70.
22. Беляев Н.М., Сеницкий А.К. Напряжения и деформации в толстостенных цилиндрах при упруго-пластическом состоянии// Изв. АН СССР. ОТН. 1938.№2. -С.3-54.
23. Беляев Н.М., Сеницкий А.К. Напряжения и деформации в толстостенных цилиндрах при упруго-пластическом состоянии материала с учетом упрочнения// Изв. АН СССР. ОТН. 1938.№4. -С.21-49.
24. Беляев Н.М., Сеницкий А.К. Напряжения и деформации в толстостенных цилиндрах с предварительным напряжением (с учетом упруго-пластического состояния и упрочнения материала)// Изв. АН СССР. ОТН. 1938.№6. -С.45-58.
25. Березовский А.А. Жарий Ю.И. Нелинейные краевые задачи теории гибких пластин и пологих оболочек//Тр. семинара по математической физике. Киев: 1970. Вып.4. - С.416.
26. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
27. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций.М.: Машиностроение, 1980. 375 с.
28. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Стройиздат. 1982. - С.351.
29. Болотин В.В. Статические мегоды в строительной механике. -2-е изд. перераб. и доп. М.: Стройиздат. 1965. -С.279.
30. Булгаков В.Н. Статика тороидальных оболочек. -Киев: Изд-во АН УССР, 1962. - С.100.

31. Бурак Я.И. Оптимизация переходных процессов в термоупругих оболочках. -Киев: Наук. думка. 1984. - С.152.
32. Бурлаков А.В., Львов Г.И., Морачковский О.К. Длительная прочность оболочек. -Харьков: Вища шк., 1981. - С.102.
33. Валишвили Н.В. Методы расчета оболочек вращения на ЭЦВМ. М.: Машиностроение, 1976. 280 с.
34. Ваинберг Д.В., Ждан В.З. Матричные алгоритмы в теории оболочек вращения. -Киев: Изд-во при Киев. ун-те, 1967. - С.164.
35. Векуа И.Н. Некоторые общие методы построения теорий оболочек. -М.: Наука. 1982. - С.286.
36. Векуа И.Н. Об одном варианте теории тонких оболочек. -Новосибирск. 1964. - С.68.
37. Векуа И.Н. Основы тензорного анализа. -Новосибирск, 1964. - С.138.
38. Векуа И.Н. Теория тонких пологих оболочек переменной толщины. - Тбилиси: Мецниереба. 1965. - С.103.
39. Галин Л.А. Плоская упруго-пластическая задача. –Прикладная математика и механика, 1946, т. 12, вып. 3, - С. 367-378.
40. Галин Л. А. Упруго-пластические задачи, -М.: Наука, 1984, - С.232.
41. Геденидзе З.Ш. Исследование статической работы перекрытий многоарочной плотины с применением теории оболочек//Сообщения АН ГССР. 1980. 100. №3.- С. 625-628.
42. Геденидзе З.Ш. Напряженно-деформированное состояние оболочечных гидротехнических конструкций и сооружений. «Технический университет». Тбилиси. 2001. - С. 202.
43. Гвоздев А.А. Задачи расчета и исследования железобетонных оболочек. М. 1976.
44. Глуховский К.А. Сборные железобетонные пространственные конструкции для покрытия промышленных и гражданских зданий в Ленинграде. Л. 1974.
45. Гохар-Хармандарян И.Г. Большепролетных купольные здания. Изд. литературы по строительству. М. 1972. 449 с.
46. Галимов К.З. Основы нелинейной теории оболочек. Казань: КГУ. 1979. 326 с.
47. Григорьев И.В., Фролов А.Н. Нелинейная осесимметричная деформация многосвязных оболочек конструкций // Избранные проблемы прикладной механики. М.: ВИНТИ, ПН СССР, 1974. С. 283-284.
48. Голоскоков Е.Г., Бешенков С.Н. Упругоакустические задачи трехслойных конструкций. -Харьков: Вища шк., 1980. - С.117.
49. Гольденблат И.И., Николаенко Н.А. Ползучесть и несущая способность оболочек. -М.: Госстройиздат, 1960. - С.60.
50. Гольденвейзер А.Л. Построение приближенной теории оболочек при помощи асимптотического интегрирования уравнений теории упругости// ПММ. 1963. Т. 27. вып. 4. -С. 593-608.
51. Григолюк Э.И. Теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости тонких оболочек за пределом упругости//Итоги науки Сер. Механика. Упругость и пластичность. Т. 1. М. 1966. -С. 7-80.
52. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Нестационарная гидроупругость оболочек. -Л. Судостроение. 1974. - С.208.
53. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость круговых цилиндрических оболочек //Итоги науки. Сер. Механика. Механика твердых деформируемых тел, ВИНТИ, 1969,- С.348.

54. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. -М.: Наука. 1978. - С.359.
55. Григолюк Э.И., Мамай В.И. Механика деформирования сферических оболочек. -М.: Изд-во МГУ, 1983. - С.114.
56. Григолюк Э.И., Мамай В.И. Нелинейное поведение тонкостенной сферической оболочки при ее тонкостенных конструкциях. -Под ред. Э.И. Григолюка М.: Изд-во МГУ, 1980. -С. 54-78.
57. Григолюк Э.И., Подстригач Я.С., Бурак Я.И. Оптимизация нагрева оболочек и пластин. -Киев: Наук. думка. 1979. - С.364.
58. Григолюк Э.И., Толкачев В.М. Контактные задачи теории пластин и оболочек. -М.: Машиностроение. 1980, - С.416.
59. Григолюк Э.И., Фильштинский Л.А. Перфорированные пластины и оболочки. -М.: Наука. 1970.- С.556.
60. Григолюк Э.И., Чулков П.П. Критические нагрузки трехслойных цилиндрических и конических оболочек. -Новосибирск: Зап. Сиб. кн. изд-во. 1966. - С.223.
61. Григолюк Э.И., Чулков П.П. Устойчивость и колебания трехслойных оболочек. -М.: Машиностроение. 1973, - С.170.
62. Григолюк Э.И., Чулков П.П. Устойчивость и колебания трехслойных оболочек. -М.: Изд-во МГУ, 1973. - С.215.
63. Григоренко Я.М. Изотропные и анизотропные слоистые оболочки вращения переменной жесткости. -Киев: Наук. думка. 1973. - С.228.
64. Григоренко Я.М., Васмленко А.Т., Панкратова Н.Д. Расчет некруговых цилиндрических оболочек. -Киев: Наук. думка. 1977. - С.104.
65. Гришин М.М. Развитие теории и конструкций гидротехнических сооружений в СССР. Плотины и водосбросы//МИСИ им. В.В.Куйбышева. 1969. №61. Вып.1.- С.3-12.
66. Гудушаури И.И. Теория упругости в обыкновенных дифференциальных уравнениях. -Тбилиси:Мецниереба. 1990. - С.447.
67. Гудушаури И.И. О расчете арочных плотин-оболочек методом наложения фиктивных ортотропных систем//Сообщения АН ГССР. 1965. Т.37. Вып.2.- С.379-386.
68. Гудушаури И.И., Цхведадзе Р.М. Точное решение пространственных задач о кручении цилиндрических стержней с поперечными сечениями различной формы//Труды межд. симп. по проблемам проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. Тбилиси. 1-2 ноября 2000. - С. 10-14. (9).
69. Гузь А.Н., Луговой П.З., Шульга Н.А. Конические оболочки ослабленные отверстиями. -Киев: Наук. думка. 1976. - С.162.
70. Гузь А.Н., Чернышенко И.С., Шнеренко К.И. Сферические днища ослабленные отверстиями. -Киев: Наук. думка. 1970. - С.328.
71. Гулляев В.И.,Баженов В.А., Лизунов П.П. Неклассическая теория оболочек и ее приложение к решению инженерных задач. -Львов: Вища. шк., 1978. - С.190.
72. Джинчарадзе И.Г. Напряженно-деформированное состояние конструкции стержневого купола // Georgian Engineering News, №2, Тбилиси, 2006. С. 84-88.
73. Джинчарадзе И.Г. Технология строительства большепролетных перекрытий // Georgian Engineering News, №3, Тбилиси, 2006. С. 142-144.

74. Дубиня В.А., Соколова В.Т. Расчет цилиндрических оболочек на действие приложенных к шпангауту сосредоточенных поперечных сил. -М.: ЦАГИ. 1972. Вып. 1428. - С.51.
75. Дыхта В.В. Нестационарное рассеяние акустических волн незамкнутыми оболочками. -Киев: Наук. думка. 1982. - С.190.
76. Елпатиевский А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов. -М.: Машиностроение. 1972, - С.168.
77. Ержанов Ж.С. Айтиалиев Ш.М., Масанов Ж.К. Устойчивость горизонтальных выработок в наклонно-слоистом массиве. -Алма-Ата 1975, - С.160.
78. Жгенти В.С., Хволес А.Р., Цхадая Ф.Г. Некоторые вопросы геометрии срединной поверхности арочной плотины//Сообщения АН ГССР. 1964. Т.ХХХІІ. №2.- С.289-292.
79. Жилин П.А. Основные уравнения неклассической теории упругих оболочек/Динамика и прочность машин: Тр. ЛПИ. 1983. №386. С. 29-46. 453.- С.48-54.
80. Ибраев Г.К. Асимптотические методы в нелинейных задачах теории тонких оболочек. -Пермь. 1975. - С.195.
81. Ивлев Д.Д. Об определении перемещений в задаче Л.А Галика // Прикладная математика и механика, 1957, т. 21, вып. 5, - С.716-718.
82. Ильгамов М.А. Колебания упругих оболочек содержащих жидкость и газ. -М.: Наука. 1969. - С.182.
83. Исследования по расчету оболочек, стержневых и массовых конструкций. -Под ред. А.Р. Ржаницына. М.: Гостройиздат. 1963. - С.312.
84. Исследования по теории пластин и оболочек. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1962-1985. Вып. 1-18. 1962. №1. 175 с. 1964. №2. 195 с.: 1965 №3. 330 с.: 1966 №4. 565 с.: 1967. №5. 648 с.: 1970. №6. 7. 804 с.: 1972. №8. 450 с.: №9. 437 с.: 1973. №10. 418 с.: 1975. №11. 390 с.: 1976. №12. 295 с.: 1978. №13. 224 с.: 1979. №14. 229 с.: 1980. №15. 199 с.: 1981. №16. 232 с.: 1984. №17. Ч. 1. 164 с.: Ч. 2. 164 с.: 1985. №18. Ч. 1. 153 с.: Ч. 2. 147 с.
85. Кабанов В.В. Устойчивость неоднородных цилиндрических оболочек. -М.: Машиностроение. 1982, - С.253.
86. Кан С.Н., Каплан Ю.И. Расчет цилиндрических оболочек покрытий зданий. -Киев: Вища шк., 1973. - С.243.
87. Кантор Б.Я. Нелинейные задачи теории неоднородных пологих оболочек. -Киев: Наук. думка. 1971.- С.136.
88. Кантор Б.Я., Катаржнев С.И. Вариационно-сегментный метод в нелинейной теории оболочек. -Киев: Наук. думка. 1982. - С.135.
89. Каринский С. Ю., Масанов Ж. К. Определение зон предельного состояния около круговой выработки в анизотропном массиве// Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат 1975, №3, с. 42-48.
90. Кипиани Г.О. Устойчивость прямоугольной анизотропной пластины с прямоугольным разрезом // статические и динамические расчеты конструкций с учетом нелинейных свойств материалов.:Л.:ЛИСИ, 1991.- С. 38-42.
91. Кипиани Г.О. Изгиб пластин с разрезом с учетом физической нелинейности // Совершенствование и расчет строительных конструкций из дерева и пластмасс. СПб. 1995. - С.112-115.
92. Кобелев В.Н., Коварский Л.И., Тимофеев С.И. Расчет трехслойных конструкций. -Под общ.ред. В.Н. Кобелева. М.: Машиностроение. 1984, - С.303.



93. Коваленко А.Д. Изобр. труды. -Киев: Наук. думка. 1976.- С.762.
94. Коваленко А.Д. Пластины и оболочки в роторах турбомашин. -Киев: Изд-во АН УССР, 1955. - С.304.
95. Коваленко А.Д. Термоупругость пластин и оболочек. -Киев: Изд-во АН УССР, 1971. - С.108.
96. Коваленко А.Д., Григоренко Я.М., Ильин Л.А. Теория тонких конических оболочек и ее приложение в машиностроении. -Киев: Изд-во АН УССР, 1963. - С.287.
97. Коваленко А.Д., Григоренко Я.М., Любкова Н.А. Расчет конических оболочек линейно-переменной толщины. -Киев: Изд-во АН УССР, 1961. - С.328.
98. Корнишин М.С. Нелинейные задачи теории пластин и пологих оболочек и методы их решения. М.: Наука, 1964. 192 с.
99. Корнишин М.С., Исанбаев Ф.С. Гибкие пластины и панел. М.: Наука, 1968. 260 с.
100. Ковальчук Н.В. Метод конечных элементов в применении к исследованию ребристых цилиндрических оболочек // Прикл. механика, 1976, 12 №3. -С. 129-133.
101. Крысько В.А. Нелинейная статика и динамика неоднородных оболочек. Саратов. СГУ, 1976. 214 с.
102. Королев В.И. Слоистые анизотропные пластинки и оболочки на армированных пластмассах. -М.: Машиностроение. 1965, - С.272.
103. Королев В.И. Упруго-пластические деформации оболочек. -М.: Машиностроение. 1971, - С.303.
104. Кубенко В.Д., Ковальчук П.С., Краснопольская Т.С. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек. - Киев: Наук. думка. 1984. - С.219.
105. Кузин П.А., Шапиро Г.С. О влиянии свободного края на динамический изгиб жестко –пластической цилиндрической оболочки // Изв. АН СССР. ОТН. 1965.№3. -С.84-94.
106. Кузнецов А.И. Плоская деформация неоднородных пластических тел// Вестник ЛГУ Сер.мат мех и астроном 1958, №13, - С. 112-131.
107. Леонов М.Я., Панасюк В. В. Развитие найдревнейших трещин в твердом теле. –Прикл. механика, 1969, 5, вып 4, - С. 391-401.
108. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. -М.: 1977, - С. 415.
109. Лизарев А.Д., Ростанина Н.Б. Колебания металлополимерных и однородных сферических оболочек. - Минск: Наука и техника, 1984. - С.192.
110. Лукасевич С. Локальные нагрузки в пластинах и оболочках. - Пер. с англ. Б.Н. Ушакова; Предисл. В.Л. Бидермана. М.: Мир. 1982. - С.542.
111. Лурье А.И. Равновесие упруго-симметрично-нагруженной сферической оболочки. -ПММ. 1943.Т. 7. вып. 6, -С.393-404.
112. Махвиладзе Л.С. Сейсмостойкое крупнопанельные домостроение. М.: Стройиздат, 1987. 221 с.
113. Махвиладзе Л.С. Особенности расчета крупнопанельных зданий с напряженной арматурой // Бетон и железобетон. 1985. №1. -С. 9-11.
114. Материалы летней школы по проблеме «Модель жестко-пластического тела в теории пластин и оболочек». -Тарту-Кяэрику, 2-8 июн., 1969. тез. докл. Тарту, 1969. - С.40.
115. Материалы летней школы по проблеме «Физические и геометрические нелинейные задачи теории пластин и оболочек». -Тарту-Кяэрику, 22-31

- июл., 1966. Тарту, 1969. Ч. 1. Обзорные доклады. 269 с.: Ч.2. Краткие сообщения. - С.158.
116. Масанов Ж. К., Ескалиев М. Е. Влияние упругой анизотропии пород на конфигурацию неупругой области вблизи выработки//Изв. АН КазССР. Сер. физ.-мат 1978, №3, - С. 49-53.
  117. Метод R-функций в задачах об изгибе и колебаниях пластин сложной формы. -В.Л. Рвачев, Л.В. Курпа, Н.Г. Силепус, Л.А. Учишвили. Киев: Наук. думка. 1973. - С.121.
  118. Микеладзе М.Ш. Статика анизотропных пластических оболочек. -Тбилиси: Изв. АН ГрузССР. 1963.- С.118.
  119. Микеладзе М.Ш. Введение в техническую теорию идеально-пластичных тонких оболочек. -Тбилиси. 1969. - С.182.
  120. Микеладзе М.Ш. Статика анизотропных пластичных оболочек. -АН ГССР. Тбилиси. 1963. - С.118.
  121. Моцонелидзе А.Н. Решение нелинейных задач напряженно-деформированного состояния бетонных и грунтовых плотин//Диссертация на соискание ученой степени доктора техн. наук. Тбилиси. ГрузНИИЭГС. 1984. - С.358.
  122. Моцонелидзе Н.С. Устойчивость и сейсмостойкость контрфорсных плотин. -М.:Энергия. 1971. - С.295.
  123. Моцонелидзе Н.С., Геденидзе З.Ш., Калабегидзе М.А. Исследование напряженно-деформированного состояния бетонных плотин при статических и динамических воздействиях // Тезисы докладов на XXIV юбилейной республиканской конференции. Тбилиси. 1983. - С. 139-141.
  124. Милейковский И.Е., Купар А.К., Гипары. Расчет и проектирование пологих оболочек покрытий в форме гиперболических параболоидов. -М.: Строй-издат. 1978. - С.223.
  125. Михайлов М.Д. Нестационарные температурные поля в оболочках.-М.: Энергия, 1967. - С.120.
  126. Михайлов Б.К., Кипиани Г.О. Деформированность и устойчивость пространственных пластинчатых систем с разрывными параметрами. - Стройиздат. СПб. С-Петербург. 1996. - С. 442.
  127. Михайлов Б.К. Пластины и оболочки с разрывными параметрами. -Л.:ЛГУ. 1980.- С.196.
  128. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. -М.: Наука, 1949, - С. 635.
  129. Муштари Х.М., Галимов К.З. Нелинейная теория упругих оболочек. Казань. Таткнигоиздат, 1957. -431 с.
  130. Назаров А.А. Основы теории и методы расчета пологих оболочек. -Л.: Стройиздат. 1966. - С.303.
  131. Найфэ А. Введение в методы возмущений. -Пер. с англ. И.Е. Зино и Э.А. Троппа: Под ред. Р.Г. Баранцева. М.;Мир. 1984.
  132. Найфэ А. Методы возмущений. -Пер. с англ. А.А. Меликяна, А.А. Миронова. Под ред. Ф.Л. Черноусько. М.;Мир. 1976. - С.455.
  133. Нарец Л.К., Каширский Ю.А. Упрощение решения восьмичленных уравнений при расчете цилиндрических оболочек по методу В.З. Власова. -Тр. Уральск. политех. ин-та. 1953. Сб. 44.-С.45-57.
  134. Некоторые прикладные задачи теории пластин и оболочек. -Под. ред. Э.И. Григолюка. М.: Изд-во МГУ, 1981.- С.288.
  135. Немиш Ю.Н., Чернопиский Д.И. Упругое равновесие гофрированных тел. -Киев: Наук. думка. 1983. - С.188.

136. Нерубайло Б.В. Локальные задачи прочности цилиндрических оболочек. - М.: Машиностроение. 1983, - С.248.
137. Оболочечные конструкции и их применение в народном хозяйстве. - Межвуз. сб/Отв.ред. И.И. Ворович. Новочеркасск. 1979, - С.172.
138. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композитных материалов. -М.: Машиностроение. 1977, - С.144.
139. Ольшак В., Савчук А. Неупругое поведение оболочек. -Пер. с англ. под.ред. Г.С. Шапиро. М.: Мир. 1969. - С.144.
140. Ониашвили О.Л. Избранные труды. -Тбилиси: Мецниереба. 1978. - С.297.
141. Осадчук В.А. Метод дисторсий в задачах об упругом равновесии оболочек с разрезами (трещинами). -Мат. методы и физ.-мех. поля, 1979, вып. 10, - С. 27-50.
142. Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. -Киев: Наукова думка, 1968, - С. 245.
143. Панасюк В.В., Саврук М. Л., Дацышин А. Д. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. -Киев: Наукова думка, 1976, - С. 442.
144. Пастернак П.Л. Практический расчет складок и цилиндрических оболочек с учетом изгибающих моментов//Проект и стандарт. 1933. №2 -С. 31-36.
145. Перлин П. И. Приближенный метод решения упруго-пластических задач. - Инженерный журнал 1960, вып. 28, - С. 145-150.
146. Перлин П.И. Упруго-пластическое распределение напряжений вокруг отверстия // Труды МФТИ 1960, №5, - С.30-40.
147. Петров В.В., Овчиников И.Г., Ярославский В.И. Расчет пластин и оболочек из нелинейно-упругого материала. -Под. ред. В.В. Петрова. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1976. - С.133.
148. Пикуль В.В. Общая техническая теория тонких упругих пластин и пологих оболочек. -М.: Наука, 1977. - С.151.
149. Пикуль В.В. Теория и расчет оболочек вращения. -М.: Наука, 1982. - С.158.
150. Пластины и оболочки из стеклопластиков: Учеб. пособие Бажанов В. Л., Гольденблат И.И., Копнов В.А., Пospelов А.Д., Синюков А.М.; Под ред. И.И. Гольденבלата. -М.: Высш. шк., 1970, - С.407.
151. Подгорный А.Н., Бортовой В.В., Коломак В.Д. Ползучесть и устойчивость гибких пологих оболочек вращения. -Киев: Наук. думка. 1982. - С.103.
152. Подстригач Я.С., Коляно Ю.М. Неустановившиеся температурные поля в тонких пластинах. -Киев: Наук. думка, 1972. - С.308.
153. Подстригач Я.С., Швец Р.Н. Термоупругость тонких оболочек. -Киев: Наук. думка, 1978. - С.343.
154. Преображенский И. Н. Устойчивость и колебания пластинок и оболочек с отверстиями. -М.: Машиностроение. 1981, - С.191.
155. Преображенский И.Н., Грищак В.З. Устойчивость и колебания конических оболочек. -М.: Машиностроение. 1986, - С.240.
156. Привалов И. И. Введение в теорию функций комплексного переменного. -М.: Машиностроение. 1977, - С.444.
157. Проблемы механики твердого деформируемого тела. -Л.: Судостроение. 1970. - С.512.
158. Прочность и жесткость тонкостенных конструкций: -Сб. трудов Под ред. И.Г. Терегулова. Л., 1975. - С.218.
159. Пшеничнов Г.И. Теория тонких упругих сетчатых оболочек и пластин. - М.: Наука. 1982. - С.352.

160. Рассказов А.О. Расчет оболочек типа гиперболических параболоидов - Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1972. - С.175.
161. Рассказов А.О., Дехтярь А.С. Предельное равновесие оболочек. -Киев: Вища шк., 1978. - С.151.
162. Рассказов А.О., Соколовская И.И., Шульга Н.А. Теория и расчет слоистых ортотропных пластин и оболочек. - Киев: Вища шк., 1986. - С.191.
163. Рассудов В.М., Красилов В.П., Панкратов Н.Д. Некоторые задачи термоупругости пластинок и тонких оболочек. -Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1973. - С.155.
164. Расчет конических оболочек при антисимметричных нагрузках. -А.Д. Коваленко, Я.М. Григоренко, Л.А. Ильин. Т.И. Полищук. -Киев: Наук. думка. 1966. - С.495.
165. Расчет пространственных конструкций: Сб. статей. М.: Оборонгиз. Стройиздат. 1960-1979, Вып. 1-18. 1950. №1. 342 с. 1951. №2. 479 с.: 1955 №3. 559 с.: 1958 №4. 554 с.: 1959. №5. 556 с.: 1961. №6. 324 с.: 1962. №7. 292 с.: №8. 324 с.: 1964. №9. 274 с.: 1965. №10. 298 с.: 1967. №11. 261 с.: 1969. №12. 229 с.: 1970. №13. 295 с.: 1971. №14. 239 с.: 1973. №15. 229 с.: 1974. №16. 215 с.: 1977. №17. 191 с.: 1979. №18. 167 с.
166. Ржаницын А.Р. Пологие оболочки и волнистые настилы. -Научн. сообщ. Акад. стр.и арх. СССР: ЦНИИСК. 1960. Вып. 14. - С.128.
167. Ржаницын А.Р. Предельное равновесие пластинок и оболочек. -М.: Наука, 1983. - С.288.
168. Рикарде Р.Б., Тетерс Г.А. Устойчивость оболочек из композитных материалов. -Рига: Зинатне, 1974. - С.310.
169. Руруа Г.Б., Горджоладзе И.И. Берегозащитные сооружения из сборных железобетонных элементов ряжевого типа// Транспортное строительство, М.: 1974. #2. С. 24-27.
170. Рудаков В.Л. Исследование прочности тонкостенной оболочки с вырезом при изгибе. -Труды КВ ИАУ, Киев, 1982, вып. 120.
171. Савчук А.О. пластическом анализе оболочек. -Механика деформируемого твердого тела: Направления развития. М., 1983. - С.274-309.
172. Саврук М. П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. - Киев: Наук. думка, 1981. - С.323.
173. Саврук М.П., Панасюк И.В., Осив П.Н. Напряжения в пластине с трещиной и двумя круговыми отверстиями, нагруженными растягивающими усилиями // Физ.- хим. механика материалов, 1981, 17, #6, - С.76-82.
174. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций. А.В. Кармишин, В.А.Лясковец, В.И.Мяченков и др. М.: Машиностроение, 1975. 336 с.
175. Стриклин Дж., Наваратна Д., Пиан Т. Усовершенствование расчета оболочек вращения матричным методом перемещений // Ракет. техн. и космонавтика, 1966, №11. -С. 252-254.
176. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. А.Ф. Смирнов, А.В.Александров, Б.Я.Лящеников и др. М.: Стройиздат, 1984. - 416 с.
177. Сун Цзай-чжень. Применение расширенного варианта метода Кантаровича к нелинейным задачам // Прикл. механика: Тр. Амер. общ-ва инж-мех., 1972. №2, -С. 69-77.
178. Тарсон Г. Применение метода Ньютона в решении нелинейных задач механики // Механика, 1965, №2. -С. 146-152.

179. Серов Н.А. Устойчивость оболочек вращения при некоторых видах нагрузок. -Л.: Изд-во ЛГУ, 1974. - С.207.
180. Соколовский В.В. Упруго- пластическое равновесие полого шара при наличии упрочнения материала. -ПММ 1941. Т. 8. вып. 1. - С.70-79.
181. Соколовский В.В. Теория пластичности. -М.: Наука, 1969, - С.608.
182. Статика и динамика тонкостенных конструкций: Сб. ст.. -Под ред. Э.И. Григолюка М.: Изд-во МГУ, 1980. - С.172.
183. Ставрогин А Н Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. -М 1979, - С.301.
184. Стрельбицкая А.И., Колгадин В.А., Матюшко С.И. Изгиб прямоугольных пластин за пределом упругости. -Киев: Наук. думка. 1971. - С.244.
185. Судовые мягкие емкости. В.Э. Магула. Б.И. Друзь, В.Д. Кулагин, Е.П. Милославская, М.В. Новоселов. -Л.: Судостроение. 1966. - С.287.
186. Сьярле Ф., Рабье П. Уравнения кармана. -Пер. с франц. А.С. Кравчука: Под ред. Б.Е. Победри. М.:Мир. 1983. - С.172.
187. Тархнишвили В.А., Кварацхелия А. В. Определение пластической области в пластинке вокруг эллиптического отверстия//Журнал “Транспорт” М.: 2005, №7, - С.37-39.
188. Тархнишвили В.А., Пономарев А.С. Методы комплексных полиномов в конформном отображении применительно к задачам подземных сооружений//Журнал “Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций”. №3-4, М.: 2000, - С.20-23.
189. Теория мягких оболочек и их использование в народном хозяйстве: сб. ст. -Отв. ред. И.И. Ворович. Ростов н/Д: Изд-во Ростов. ун-та. 1976, - С.168.
190. Теория оболочек и пластин: -Тр. VIII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин (Ростов н/Д, 1971). М.: Наука, 1973. - С.798.
191. Терегулев И.Г. Изгиб и устойчивость пластин и оболочек при ползучести. -М.: Наука, 1969. - С.206.
192. Тонкостенные железобетонные пространственные конструкции: -Сб. ст. Под ред. Г.К. Хайдукова. М.: Стройиздат. 1970. - С.231.
193. Тонкостенные оболочечные конструкции: теория, эксперимент и проектирование. -И. Арбош. Г.В. Бабець, С.Ч. Баттерман, Ч.Д. Бибкок и др.; Пер с англ. К.Г. Бомштейна, А. М. Васильева; Под ред. Э.И. Григолюка. М.: Машиностроение. 1980, - С.607.
194. Труды II Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. -(Львов. 15-21 сент. 1960). Киев: Изд-во АН УССР, 1962. - С.583.
195. Труды VI Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. - (Баку, 1966). М.: Наука, 1966. - С.1016.
196. Труды VII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. - (Днепропетровск, 1969). М.: Наука, 1970. - С.670.
197. Упругие оболочки. -Пер. с англ. А.И. Смирнова; Под ред. Э.И. Григолюка. М.: Изд-во иностр. лит., , 1962. - С.151.
198. Хлебутин Н.В. Экспериментальное исследование напряжений и деформаций цилиндрической каркасированной оболочки с прямоугольным вырезом при изгибе. -Труды ЦАГИ, 1961, вып. - С.828.
199. Цхведадзе Р.М., Кипиани Г.О., Беридзе Т.Ш., Паилодзе Н. Р. Оптимальное проектирование металлических пластинок и оболочек с применением непрерывных неоднородных материалов//Проблемы механики №3(20/1), Тбилиси, 2005.- С.70-75.
200. Цхведадзе Р.М. Оценка несущей способности пологой сборной оболочки// журнал «Georgian Engineering News» №2, 1999. - С. 23-25.(4)

201. Цхведадзе Р.М., Мачаидзе Э.П., Кипиани Г.О. Расчет тонкостенных конструкций типа оболочек при помощи жестко-пластического тела // Известия высших учебных заведений Машиностроения, №3. М.: 2005.-С. 6-10.
202. Шапиро Г.С. О единственности решения одной задачи изгиба круглой жестко-идеально-пластической пластинки//Изв. АН СССР. ОТН. 1959.№3. -С.138, 139.
203. Шапиро Г.С. О равновесии конуса и конической оболочки. -ПММ. 1944. Т. 8.вып. 4, -С.332-336.
204. Шапиро Г.С. О сжатии бесконечного полого кругового цилиндра давлением, приложенным на участке боковой поверхности. -ПММ. 1943. Т.7, вып. 5 -С. 379-382.
205. Шапиро Г.С. Удар по кольцевой жестко-пластической пластинке. -ПММ. 1959. Т. 23.вып. 1, -С. 172-175.
206. Шапиро Г.С. Упруго-пластический изгиб круглой пластинки и существование решения жестко-пластической задачи//Изв. АН СССР. ОТН. 1961. №2. -С.142-146.
207. Швецов В.А. Растяжение изотропной пластинки с бесконечным числом квадратных отверстий, подкрепленных жесткими кольцами. -Сб. "Некоторые задачи теории упругости о концентрации напряжении. равновесии и колебаниях упругих тел". Саратов 1964, - С.54-60.
208. Шевченко В.П. Интегральные преобразования в теории пластин и оболочек. -Донецк, 1977. - С.116.
209. Хейслер В., Стрикли Дж., Стеббинс Ф. Разработка и оценка методов решения геометрически нелинейных задач строительной механики // Ракет. техн. и космонавтики, 1972, №3. С. 32-43.
210. Apeland. K. Analysis of bending stresses in translational shells. including anisotropic and inhomogeneous properties. Trondheim: Norges tekniske vitenskapsakad, 1963. VI. –P.161.
211. Borkowski S. Zgananie ortotropowych piwlok toroidainych. Gliwice, 1965. 91 s.
212. Dynamic stability structures / Proc. of an Intern. Confer. – Ed. by Herrmann G. Oxford. 1967.
213. Green A.E., Naghdi P.M. A note on the Cosserat surface. – Quart. J. Mech. Appl. Math. 1968. 21. – P. 135-139.
214. Green A.E., Naghdi P.M. Micropolar end director theories of plates.- Quart. J. Mech. Appl. Math. 1967. 20 P. 183-199.
215. Green A.E., Naghdi P.M. On electromagnetic effects in the theory of shells and plates. - Phill. Trans. Roy. Soc. London. 1983. A. 309. P. 559-610.
216. Green A.E., Naghdi P.M. On thermal effect in the theory of shells. - Proc. R. Soc. London. Ser. A. 305. 1979. P. 161-190.
217. Green A.E., Naghdi P.M. The Cosserat surface/In: Kroner E(ed) Mechanics of generalized continua. Berlin: Springer Werlag; 1968. P. 36-48.
218. Green A.E., Naghdi P.M. The linear treory of an elastic Cosseral plate / Proc. Cambridge Phil. Soc. 1967. 63. P. 537-550.
219. Green A.E., Naghdi P.M., Wainwright W.L. A general treory of a Cosserat surface. Arch. Rational Mech. anal. 1965. 20 P. 287-308.
220. Johns D.J. Thermal stress analysis. Oxford: Pergamon press. 1965. XVIII. 211 p.
221. Kozak I. Contribution of an approximate linear shell theory by asymptotic integration of the equation of elasticity in terms of stresses // Advances in Mechanies, 1983. Vol. 6, N 1/3. – P. 91-110.

222. Kipiani G., Pailodze N. The condition of rectangular plates with rectangular cuts is intense-deformed//Problems of Mechanics N3(20), Tbilisi, 2005. – P.14-18.
223. Orkisz J. Skonczone odkształcenia wiotkich osiowosymetrycznych powłok z uwzględnieniem reologicznych własności materiału. Krakow. 1967. 200 p.
224. Pailodze N. A special case of the arrangement of cuts // Georgian Engineering News, No. 1, Tbilisi, 2006. – p. 80-82.
225. Philip G., Hodge J. Limit analysis of rotationally symmetric plates and shells Prentice Hall the Englewood Cliffs. N.Y. Prentice Hall series in Solid and Structural Mechanics. P.S. Symond, Editor.
226. Reissner E. On asymptotic expression for circular cylindrical shells. J. Appl. Mech. 1964. 31. P. 245-252.
227. Reissner E. On asymptotic solutions for nonsymmetrical deformations of shallow shells of revolution // Int. J. Engin. Sci. 1964. 2. p. 27-48.
228. Ruttan H.S. Asymptotic approximations in the three-dimensional theory of thin and thick elastic shells. The practical classification of shell problems. Systematic systems of linear equations and conditions. – Netherlands bookdrukk industrie, 1977. XVIII. – P.625.
229. Sanders Jn.J.L. On the shell equations in complex form In: Niordsen P.J. (ed). Theory of thin shells. – Verlin Springer Verlag. 1969. – P. 135-156.
230. Theocaris P.S., Ioakimidis N.I. The inclusion problem in plane elasticity // Quart. I. Mech. and Appl. Math., 1977, 30, N 4, - P. 437-448.
231. Valid R. La theorie lineaire des coques et son applications aux calculs inelastiques. These presa I'Univ. de Poitiers. – 1973. – P. 147.
232. Waszczyszpn Z. Obciążenie skończonych ugięć sprężystoplastycznych powłok osiowo-symetrycznych. Krakow. 1970. 208 c.