

საქართველოს განათლების და მეცნიერების სამინისტრო  
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი  
საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

*ხელნაწერის უფლებით*

მალხაზ დოგრაშვილი

**თანამედროვე ლითონის მასალებით  
დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების  
საიმედოობის კვლევა**

07.19 – სამრეწველო ინჟინერია და ტექნოლოგია

**დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა**

ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური  
ხარისხის მოსაპოვებლად

სამეცნიერო ხელმძღვანელი-  
აკადემიური დოქტორი,  
პროფესორი პარმენ ყიფიანი

ქუთაისი

2022

## შინაარსი

შესავალი .....	4
<b>თავი 1</b>	
<b>მშენებლობაში გამოყენებული ლითონის მასალებით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების მიმოხილვა და მათი შედარება თანამედროვე ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი მასალებით დამზადებულ სამშენებლო კონსტრუქციებთან .....</b>	<b>11</b>
1.1 მშენებლობაში გამოყენებული ლითონის მასალებით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების განვითარების მოკლე ისტორიული მიმოხილვა .....	11
1.2 თანამედროვე მშენებლობაში გამოყენებული ლითონის მასალებით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციები .....	18
1.3 ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციების გამოყენების არეალი..	22
1.4 თხელკედლიანი მსუბუქი ფოლადის კონსტრუქციების უპირატესობა და ნაკლოვანებები .....	25
1.5 შენობათა გადახურვის ლითონის შენადული კონსტრუქციების (ფერმების) სახეობები, მათი კონტურის მოხაზულობა და გისოსების სქემები..	27
1.5.1. ფერმები და მათი სახეობები .....	27
1.5.2. ფერმების შემოწერილობა .....	28
1.5.3. ფერმების სიმაღლე .....	31
1.5.4. გისოსების სქემები .....	33
<b>თავი 2</b>	
<b>სივრცითი ღეროვანი სისტემების გაანგარიშების მეთოდები .....</b>	<b>38</b>
2.1. შენობის გადახურვის ღეროვანი ლითონკონსტრუქციის გაანგარიშების მეთოდის ძირითადი განტოლებები .....	40
2.2. შენობის გადახურვის ღეროვანი ლითონკონსტრუქციის გაანგარიშება .....	49
2.3. ძირითადი განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა Mathcad - ის სისტემაში .....	55

### თავი 3

#### თხელკედლიანი პროფილებისაგან დამზადებული

#### შენადული სამშენებლო კონსტრუქციების ოპტიმალური ტექნოლოგიების

დამუშავება .....	57
3.1. მშენებლობაში გამოყენებული ფოლადები .....	61
3.1.1. სამშენებლო ფოლადები და მათი კლასიფიკაცია .....	61
3.1.2. მშენებლობაში გამოყენებული ფოლადების ქიმიური შედგენილობა და მექანიკური თვისებები .....	63
3.2. საშემდუღებლო მასალები .....	65
3.3. ძაბვების და დეფორმაციების გავლენა კონსტრუქციების მუშაუნარიანობაზე და საიმედოობაზე .....	68
3.4. შედუღების ხერხის და მეთოდის შერჩევა .....	73
3.5. შედუღების რეჟიმების შერჩევა და ოპტიმალური ვარიანტის დამუშავება...	74
3.6. საშემდუღებლო მოწყობილობების შერჩევა .....	78
3.7. დეფექტები შენადულ შეერთებაში და მათი წარმოქმნის მიზეზები .....	79
3.8. ნივნივა ფერმის დამზადების და მონტაჟის ტექნოლოგია .....	81
3.8.1. ნივნივა ფერმის დამზადება .....	81
3.8.2. ნივნივა ფერმების მონტაჟი .....	85
3.9. შენადული ნაკერების ხარისხის კონტროლი .....	90

### თავი 4

#### თხელკედლიანი ლითონის კონსტრუქციებში წარმოქმნილი ძაბვების

ანალიზი ტენზორეზისტორების გამოყენებით .....	91
4.1. ტენზომეტრიების საფუძვლები .....	92
4.2. მზომი სქემის ტარირება .....	96
4.3. გაზომვის შესრულების თანმიმდევრობა .....	97
4.4. წამწის გამოსაცდელ სეგმენტის ელემენტებში ძაბვების განსაზღვრა .....	99
დასკვნები .....	106
ლიტერატურა .....	108
ინტერნეტრესურსები.....	115

## შესავალი

მშენებლობების გაზრდილი ტემპები ბოლო პერიოდში მნიშვნელოვნად განაპირობებს ლითონის კონსტრუქციების მზარდ გამოყენებას, რაც მათი უნივერსალობით, მაღალი სიმტკიცით და შესაბამისი პლასტიკურობით აიხსნება. გარდა ამისა, მათი გამოყენება მნიშვნელოვნად ამცირებს მშენებლობის ხარჯებს და ვადებს. როგორც ბოლო წლებში აგებული ნაგებობების ანალიზმა გვიჩვენა, სავაჭრო კომპლექსების, სპორტული დარბაზების, სასაწყობო მეურნეობების ობიექტების აგებისას და განსაკუთრებით ძველი შენობების რეკონსტრუქციისას, ან მთლიანად ლითონის კონსტრუქციები გამოიყენება, ან დიდი ნაწილი მოდის ლითონის კონსტრუქციებზე.

როგორც ცნობილია, ექსპლუატაციის პერიოდში შენობა-ნაგებობებზე მოქმედებს როგორც მუდმივი (კონსტრუქციების საკუთარი წონა, ტექნოლოგიური მილგაყვანილობების, სხვადასხვა მოწყობილობის წონა და სხვა), ასევე დროებითი (ქარისა და თოვლისაგან გამოწვეული) დატვირთვები.

ლითონის კონსტრუქციების პროექტირების, გაანგარიშებისა და დამზადების ტექნოლოგიის დამუშავებისას საჭიროა ისეთი ლითონური მასალების გამოყენება, რომლებიც საშუალებას მოგვცემს მნიშვნელოვნად შემცირდეს კონსტრუქციის წონა, რაც თავის მხრივ, შეამცირებს შენობა-ნაგებობებზე მოსულ დატვირთვებს. ეს საკითხი განსაკუთრებით აქტუალურია ძველი შენობების რეკონსტრუქციის დროს და უფრო მეტად მნიშვნელოვანია ძველ შენობებზე მანსარდული სართულის მოწყობისას, რადგან ასეთი შენობების საძირკველს სიმტკიცის ლიმიტირებული მარაგი გააჩნია [2].

ამ მიმართულებით, ბოლო წლებში, აქტიურად ხორციელდება თხელკედლიანი მსუბუქი კონსტრუქციების გამოყენება, რომელთა დასამზადებლად ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა თხელკედლიანი, როგორც ღია, ისე ჩაკეტილი პროფილი, მათ შორის კუთხოვანები, ორტესებრი კოჭები, შველერები, ოთხკუთხა ან მრგვალი მილები და სხვა. თუმცა ჯერ კიდევ არსებობს კითხვები მათ გამოყენებასთან და საიმედოობასთან დაკავშირებით [49].

აღნიშნული საკითხით დაინტერესება და მეცნიერული კვლევის დაწყება, უწინარესად, განაპირობა აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ტექნიკური ფაკულტეტის მშენებლობისა და ტრანსპორტის დეპარტამენტის პროფესორ-მასწავლებელთა დაკვირვებამ და დაგროვილმა გამოცდილებამ, რამაც ერთობლივი საკონფერენციო და სასწავლო მუშაობის დროს აღძრა სურვილი სიღრმისეულად შეგვესწავლა და დაგვემუშავებინა ფოლადის თხელკედლიანი მასალების გამოყენების უპირატესობები და ნაკლოვანებები.

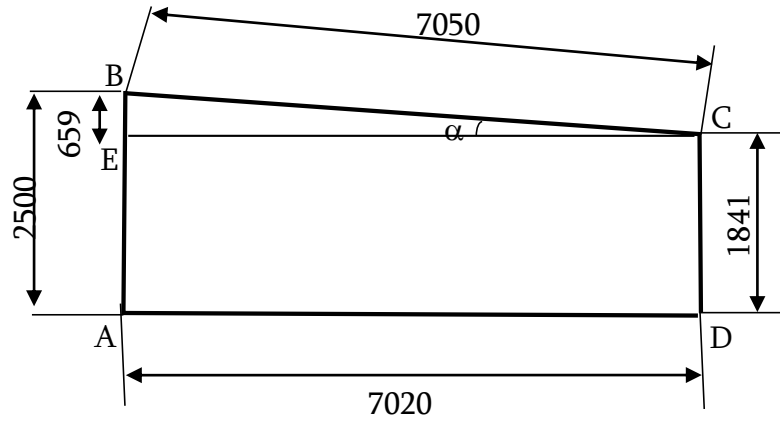
საგულისხმოა, რომ ეს პრობლემა დღემდე აქტუალური და მკვლევართა ინტერესის საგანია.

**წინამდებარე კვლევით გამოიკვეთა, რომ ფოლადის თხელკედლიანი ლითონების გამოყენებისას**

1. არ არის საჭირო დიდი ზომის საძირკვლის მომზადება;
2. კონსტრუქციის აკრება პროფილის სიმსუბუქის გამო შედარებით ადვილია და სწრაფად ხდება;
3. არ არის საჭირო დიდი ზომის ამწე-სატრანსპორტო საშუალებების გამოყენება;
4. ე.წ. „სველი სამუშაოების“ არარსებობა საშუალებას იძლევა სამუშაოები წარიმართოს მთელი წლის განმავლობაში;
5. ეფექტურია რემონტისა და რეკონსტრუქციის შესაძლებლობა;
6. კონსტრუქციის წონა შემცირებულია;
7. მასალები ეკონომიურადაა გამოყენებული.

**საკვლევ ემპირიულ მასალას** წარმოადგენს ღეროვანი ლითონკონსტრუქცია, რომლითაც მოწყობილია შენობის გადახურვა (ნახ. 1), რომლის საყრდენებს შორის მანძილია 7020 მმ. გადახურვის ერთი მხარის სიმაღლეა 1841 მმ, მეორესი კი 2500 მმ (ნახ. 2.12). გადახურვის დახრის კუთხე  $2500-1841=659$  მმ.

შენობა-ნაგებობების გადახურვისას, ასევე შემომზღუდ კონსტრუქციებში დიდი წილი უჭირავს ნივნივურ წამწებს და საკმაოდ ფართოდ გამოიყენება ორი კუთხოვანისაგან შედგენილი ღეროები, რომლებიც ერთმანეთთან შეერთებულია



ნახ. 1.

საფენების საშუალებით. ეს ტრადიციული გადაწყვეტილება საშუალებას იძლევა დაპროექტდეს სხვადასხვა ტიპის წამწები და ყველა დატვირთვის გათვალისწინებით შერჩეული იქნას კვეთის ფართი, ეფექტურად გადაწყდეს შერთების კვანძები და სხვა.

კვეთის შერჩევასა ცდილობენ, რომ სხვადასხვა პროფილის კუთხოვანების რაოდენობა არ იყოს 4-6-ზე მეტი მთელ წამწეზე. თუმცა ხშირ შემთხვევაში კუთხოვანების კვეთის ფართი და მარაგის კოეფიციენტი არის მნიშვნელოვნად გაზრდილი.

ჩვენს ქვეყანაში და მის ფარგლებს გარეთ დაგროვილი გამოცდილება წარმოების, დიზაინის და ექსპლუატაციის შესახებ, გვიჩვენებს, რომ მიღების გამოყენება ფერმის (კარკასში/ღეროებში) დაწყვილებული კუთხეების ნაცვლად, არა მხოლოდ ამცირებს ლითონის დანაკარგს, არამედ ხელს უწყობს კონსტრუქციების წარმოების სირთულის შემცირებას, კონსტრუქციების დამზადების, საიმედოობის და გამძლეობის გაუმჯობესებას.

თხელკედლიანი პროფილები კვადრატული და მართკუთხა მილების სახით არიან გაცილებით კონსტრუქციული და ტექნოლოგიური, ვიდრე მრგვალი მილები, რადგან მათი გამოყენების დროს მნიშვნელოვნად მარტივდება მართკუთხა ღეროების კვანძოვანი შეერთება და ამსუბუქებს მათი დამზადების ტექნოლოგიას.

თხელკედლიანი მართკუთხა პროფილების კიდევ ერთი უპირატესობა ის არის, რომ ისინი იოლად ექვემდებარებიან უნიფიკაციას განივი კვეთების განზომილებებით.

დღეს, ტექნოლოგიების განვითარების ასეთ პირობებში, მეტად აქტუალურია ანალიზურ მეთოდთან ერთად რიცხვითი მეთოდებით გადაწყვეტა ჩვენ მიერ დასმული ამოცანების ამოხსნისათვის. თანამედროვე კომპიუტერული პროგრამული პაკეტების გამოყენება, კერძოდ Mathcad-ის პროგრამული პაკეტი საშუალებას იძლევა უმოკლეს დროში შესრულდეს ისეთი დიდი სამუშაო, რაც საჭიროა ჩვენ მიერ აღნიშნული საკვლევ კონსტრუქციის ანალიზური მეთოდით ანგარიშისას. ეს პროგრამები ხელმისაწვდომია მკვლევარებისათვის და პრაქტიკოსი სპეციალისტებისათვის. ისინი ფართოდ დაინერგა სასწავლო პროცესში ინჟინრების მომზადებისათვის, რაც, მიგვაჩნია, არის მყარი საფუძველი ჩვენ მიერ შერჩეული სისტემისათვის.

**სადისერტაციო ნაშრომის მიზანი** განსაზღვრა იმ კონკრეტულმა ამოცანებმა, რომლებიც გამოიკვეთა კვლევის პროცესში და განაპირობა შემდგომი მეცნიერული მუშაობა. მშენებლობის ხარჯების და ვადების მნიშვნელოვნად შესამცირებლად, მშენებლობაში რკინაბეტონის ფართოდ გამოყენების მიუხედავად, ლითონის მოხმარება იზრდება, განსაკუთრებით ისეთ კონსტრუქციებში, სადაც რკინაბეტონის გამოყენება არარაციონალური და გაუმართლებელია.

თანამედროვე ეტაპზე სამშენებლო კონსტრუქციების ტიპის შერჩევის ტექნიკურ-ეკონომიკური დასაბუთება წარმოადგენს უმნიშვნელოვანეს ეტაპს ნაგებობათა პროექტირების დროს. სწორედ, აღნიშნული საკითხების კვლევას ეძღვნება წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომი.

**ნაშრომში კომპლექსურადაა შესწავლილი:**

1. თხელკედლანი მსუბუქი ფოლადის კონსტრუქციების უპირატესობა და ნაკლოვანებები;
2. შენობათა გადახურვის ლითონის შენადული კონსტრუქციების (ფერმების) სახეობები, მათი კონტურის მოხაზულობა და გისოსების სქემები;
3. ღეროვანი სივრცითი კონსტრუქციების სიმტკიცის, სიხისტის და მდგრადობის უზრუნველყოფისათვის ღეროების კვეთების შერჩევა-გაანგარიშების საფუძველზე შედგენილი საანგარიშო მოდელის გამოყენებით;
4. განტოლებათა სისტემის ამოხსნა რიცხობრივად სტანდარტული პროგრამების გამოყენებით პერსონალურ კომპიუტერებში ჩაშენებული

ფუნქციებით, კერძოდ Mathcad - ის სისტემით;

5. მშენებლობაში გამოყენებული ფოლადები;

6. მსუბუქი კონსტრუქციების დასამზადებლად გამოყენებული სხვადასხვა შეერთებების ტიპები;

7. შედუღების ხერხის და მეთოდის შერჩევა;

8. შედუღების რეჟიმების შერჩევა და ოპტიმალური ვარიანტის დამუშავება;

9. ნივნივა ფერმის დამზადების და მონტაჟის ტექნოლოგია.

**მეცნიერული სიახლე.** ნაშრომში განხილულია ფოლადის თხელკედლიანი მსუბუქი პროფილებისაგან სამშენებლო კონსტრუქციების დამზადების, მათი გამოყენების შესაძლებლობა სხვადასხვა ტიპის სამშენებლო და სარეკონსტრუქციო სამუშაოების შესრულების დროს; ნაჩვენებია ფოლადის თხელკედლიანი მსუბუქი კონსტრუქციებით მშენებლობის ხერხის ძირითადი უპირატესობანი და მათი მექანიკური და ტექნოლოგიური თვისებების სხვა მასალებთან შედარებითი ანალიზი; კონსტრუქციების დამზადებისას გამოყენებული შეერთებების ტიპები და მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეები.

**ნაშრომის თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა.** ნაშრომში წარმოდგენილი კვლევა და მისი შედეგები სასარგებლო და გამოსადეგი იქნება ქვეყნის ისეთი მნიშვნელოვანი დარგის განვითარებისათვის, როგორცაა მშენებლობა და ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი მასალების გამოყენების თემით დაინტერესებული მკვლევრებისათვის, მისი უფრო სრულყოფილად შესწავლისათვის.

**კვლევის მეთოდოლოგია.** ნაშრომის მეთოდოლოგიური და თეორიული საფუძველია ლითონის მასალებით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების საიმედოობის შემსწავლელი მკვლევრების სამეცნიერო ნაშრომები, ტექნიკური ხასიათის სამეცნიერო ლიტერატურა, სადაც განხილულია ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი მასალების თეორიული და პრაქტიკული საკითხები, კვლევის პროცესში გამოყენებულია უახლესი მეთოდოლოგიური მიდგომები: ექსპერიმენტალურ ნაწილზე დაყრდნობით სადოქტორო ნაშრომში საფუძვლიანადაა განხილული მათი არსი.



**სადისერტაციო ნაშრომის სტრუქტურას** განსაზღვრავს მისი მიზანი და კონკრეტული ამოცანები. ის შედგება შესავლის, ოთხი თავისა და დასკვნისაგან. ნაშრომს დაერთვის გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია სამეცნიერო შრომებში დეპარტამენტის სამეცნიერო სემინარებზე და კოლოკვიუმებზე.

კვლევის ძირითადი შედეგები მოხსენებათა სახით წარმოდგენილ იქნა IV საერთაშორისო კონფერენციებზე „ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ქუთაისი; IX საერთაშორისო კონფერენცია „თანამედროვე პრობლემები არქიტექტურასა და მშენებლობაში“, შოთა რუსთაველის სახელობის ბათუმის სახელმწიფო უნივერსიტეტი.

**პირველ თავში** მოცემულია ლითონის მასალებით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების მოკლე ისტორიული მიმოხილვა. დღემდე არსებული მზიდი ლითონის კონსტრუქციების სახეები და ტიპები და საკვლევ თემასთან დაკავშირებული სამეცნიერო ლიტერატურის მიმოხილვა. არსებული სამეცნიერო ნაშრომების კრიტიკული ანალიზის საფუძველზე ჩამოყალიბებულია კვლევის ამოცანები.

**მეორე თავში** განიხილება სივრცითი ღეროვანი სისტემების გაანგარიშების მეთოდები, შენობის გადახურვის ღეროვანი ლითონკონსტრუქციის გაანგარიშების მეთოდის ძირითადი განტოლებები, მისი გაანგარიშება, ძირითადი განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა Mathcad - ის სისტემაში.

**მესამე თავში** მოცემულია თხელკედლიანი პროფილებისაგან დამზადებული შენადული სამშენებლო კონსტრუქციების ოპტიმალური ტექნოლოგიების დამუშავება, კერძოდ: სამშენებლო ფოლადები და მათი კლასიფიკაცია, მშენებლობაში გამოყენებული ფოლადების ქიმიური შედგენილობა და მექანიკური თვისებები, საშემდუღებლო მავთულისა და ელექტროდის, შედუღების ხერხის, მეთოდის, რეჟიმების შერჩევა და ოპტიმალური ვარიანტის დამუშავება, საშემდუღებლო მოწყობილობების შერჩევა, ნივნივა ფერმის დამზადების და მონტაჟის ტექნოლოგია.

**მეოთხე თავში** განხილულია შენადულ სამშენებლო კონსტრუქციების, კერძოდ თხელკედლიანი ლითონით დამზადებული ფერმის საიმედოობის კვლევის ექსპერიმენტული მეთოდი.

ძაბვების თეორიული გაანგარიშებები ბევრ შემთხვევაში მეტად მიახლოებულია და არ ასახავს დამაბული მდგომარეობის ნამდვილ სურათს. ზოგიერთ შემთხვევაში ძაბვების განსაზღვრის ამოცანას ჯერაც არ აქვს თეორიული გადაწყვეტა. ასეთ შემთხვევებში დიდ მნიშვნელობას იძენს ძაბვების განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდები, რომელთა მეშვეობით შესაძლებელია დამაბული მდგომარეობის ნამდვილი სურათის განსაზღვრა, მაგალითად, სხვადასხვა დატვირთვების დროს. ამასთან დაკავშირებით, ძაბვების განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდები როგორც თეორიული კვლევის მეთოდების დამატებითი (ზოგჯერ კი შემცვლელიც) მეთოდები სულ უფრო დიდ მნიშვნელობას იძენს.

დისერტაციის ბოლოს მოყვანილია ძირითადი შედეგები და დასკვნები.

## I თავი

### 1. მშენებლობაში გამოყენებული ლითონის მასალებით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების მიმოხილვა და მათი შედარება თანამედროვე ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი მასალებით დამზადებულ სამშენებლო კონსტრუქციებთან

#### 1.1 მშენებლობაში გამოყენებული ლითონის მასალებით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების განვითარების მოკლე ისტორიული მიმოხილვა

ადამიანის მიერ შექმნილი ნებისმიერი ქმნილება, თუ არ ჩავთვლით წმინდა ხელოვნებას (მუსიკა, ფერწერა და სხვა) ხასიათდება სამი ძირითადი თვისებით, ესენია: ფუნქციური დანიშნულების ხარისხი, თვითღირებულება და ესთეტიკური სახე. ფუნქციური დანიშნულების ხარისხი და თვითღირებულება ეს ასე თუ ისე გასაგებია, მაგრამ ობიექტის ესთეტიკური სილამაზე, ეს არის ადამიანის შეგრძნება მიღებული გარე სამყაროს ჰარმონიულობისაგან, რომელშიც თავის მხრივ ასახულია სამყაროს ძირითადი კანონები [51].

საუკუნეების მანძილზე ადამიანი ჰქმნიდა ხელოვნების უამრავ ნიმუშს სხვადასხვა სფეროში და შეიძლება ითქვას მშენებლობა ეს ის დარგია, რომელშიც ადამიანის აზროვნებისა და შემოქმედებითობის პიკია წარმოდგენილი.

ნაგებობის ესთეტიკა იქმნება მისი პროპორციებისა და ფერების შერწყმით, ასევე გამოყენებული სამშენებლო კონსტრუქციების ლოგიკური გადაწყვეტით. ლოგიკურად გადაწყვეტილი კონსტრუქცია ყოველთვის ლამაზი და ეკონომიურია. ეს კავშირი სილამაზესა და ეკონომიურობას შორის კონსტრუქციის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი თვისებაა.

თანამედროვე სამშენებლო საქმეში ნამდვილ შემოქმედებად ითვლება, როცა კონსტრუქციაში ჰარმონიულადაა გაერთიანებული დანიშნულება, პროპორციები, ფერები და კონსტრუქციის ლოგიკური გადაწყვეტა.

კონსტრუქციის ისეთი ფორმა ითვლება შედარებით ეფექტურად, რომელიც საკმარისი მდგრადობისა და სიმტკიცის მისაღწევად საჭიროებს შედარებით მცირე

მასალების დანახარჯს. ყველაზე კარგად ამ მოთხოვნებს, წაყენებულს სამშენებლო კონსტრუქციის მიმართ, აკმაყოფილებს ლითონის მასალით დამზადებული და განსაკუთრებით თხელკედლიანი ლითონის მასალით დამზადებული კონსტრუქციები, რომლებიც გამოიყენება ავიაციაში, რაკეტმშენებლობაში, გემთმშენებლობაში და რა თქმა უნდა, ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე მშენებლობაში [13].

გაზვიადების გარეშე, თამამად შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ლითონი ყველაზე გავრცელებული მასალაა. კაცობრიობა აქტიურად იყენებს მას არა მხოლოდ წარმოებაში, არამედ ყოველდღიურ ცხოვრებაშიც. თუ პრიმიტიულ ეპოქაში, როცა მეტალმა ახლახან დაიწყო ადამიანის ცხოვრებაში ადგილის დამკვიდრება/შესვლა, ადამიანებს ჯერ კიდევ შეეძლოთ ყოფიერება მის გარეშე, დღეს ვერც ერთი ადამიანი ვერ შეძლებს მეტალის გარეშე ცხოვრებას. ყოველივე ამის შემდეგ, მისი გამოყენება სხვადასხვა ფორმით უბრალოდ აუცილებელია გზისა და საცხოვრებლის მშენებლობაში, მანქანათმშენებლობაში და სხვა ინდუსტრიებში.

კაცობრიობის ისეთი დარგების განვითარება, როგორცაა მრეწველობა, მშენებლობა, ხელოვნება ძალიან მჭიდრო კავშირშია ლითონების შესწავლასა და გამოყენებასთან. ლითონის თითოეული სახეობა ძალიან გასაკვირი და უნიკალურია, ხშირად მისი აღმოჩენის ისტორია არის მთელი ეპოსი, რომელშიც ძალიან ხშირად სანდო ისტორიული ფაქტები მჭიდროდ არის გადაჯაჭვული მითებთან და ფიქციასთან. იმისათვის, რომ სრულად გავაცნობიეროთ, თუ რა როლს თამაშობს მეტალი ჩვენს ცხოვრებაში, საკმარისია მხოლოდ შემობრუნდეთ და მიმოიხედეთ გარშემო. თითოეული ლითონის უნიკალურმა თვისებებმა შესაძლებელი გახადა მისი ადამიანის ცხოვრება უფრო კომფორტული. ზოგჯერ ჩვენ უბრალოდ არ ვფიქრობთ ბევრ რამეზე, რაც ასე მტკიცედ არის ჩადებული ჩვენს ყოველდღიურ ცხოვრებაში.

ცივილიზაციის ისტორიაში არის ეტაპები, რომელთა გარეშეც ძნელი წარმოსადგენია ადამიანთა საზოგადოების განვითარება. ერთხელ, მრავალი ათასი წლის წინ, ჩვენმა შორეულმა წინაპრებმა ისწავლეს ცეცხლის ანთება. ფ. ენგელსის აზრით, „ცეცხლის დაუფლებამ“ პირველად მისცა ადამიანს ბატონობა ბუნების

გარკვეულ ძალაზე და ამით საბოლოოდ გამოეყო ადამიანი ცხოველთა „სამეფოს“. შემდეგ ადამიანებმა დაიწყეს სამეურნეო დარგების განვითარება, მოაშენეს მარცვლეული კულტურები, განავითარეს მესაქონლეობა და, ბოლოს, კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი ნაბიჯი გადადგა წინ - მათ აღმოაჩინეს მადნის ლითონად გადაქცევის საიდუმლო [27].

მეტალურგიის ოსტატობა - ლითონების მოპოვების, დნობისა და დამუშავების ხელოვნება ადამიანთა საქმიანობის ერთ-ერთი უძველესი სფეროა, რომელმაც ძლიერი ბიძგი მისცა საწარმოო ძალების განვითარებას. კაცობრიობის ცხოვრების ისტორიულ ეტაპებს უწოდებენ იმ დროს გაბატონებული ლითონის მასალების სახელებს: სპილენძის ხანა, ბრინჯაოს ხანა და რკინის ხანა.

დაარსების მომენტიდან დღემდე, მეტალურგიამ გაიარა გრძელი, რთული, საინტერესო გზა - კოცონის ალიდან და უმარტივესი ღუმელებიდან, რომლებიც ცივილიზაციის გარიჟრაჟზე მადნის ქვებს ლითონის ზოდად აქცევდნენ, თანამედროვე გიგანტურ სახელოსნოებამდე. და ქარხნები, სადაც ტრადიციულ ცეცხლმოკიდებულ ღუმელებთან ერთად მძლავრი ელექტროსაგლინი, ელექტროსხივი და პლაზმური დანადგარებია, რაც საშუალებას იძლევა მივიღოთ მაღალი ხარისხის ლითონი.

XVIII საუკუნეს უწოდებენ რკინის საუკუნის მეორედ მოსვლის პერიოდს და უკავშირებენ აბრაჰამ დერბის სახელს და მის მოღვაწეობას.

პირველი მნიშვნელოვანი ლითონის კონსტრუქცია - თუჯის ხიდი ააგეს ინგლისში, ქ. ქულბრუქდეილში 1781 წელს. აღსანიშნავია, რომ ხიდი დღესაც ფუნქციონირებს და ბევრ მნახველს იზიდავს.

თუმცა ლითონის კონსტრუქციების გამოყენების პირველი მცდელობები იყო XVIII საუკუნის ბოლოს რუსეთში სამრეკლოს გუმბათზე ფოლადის ნივნივების სახით ზაგორსკის ტაძრის სატრაპეზოს გადახურვისას [9].



სურ. 1 თუჯის ხიდი ქ. ქულბუქდეილში 1781 წელს აშენებული. ინგლისი

XIX საუკუნის ღირსშესანიშნაობას წარმოადგენს გუსტავ ეიფელისა და მისი კომპანიის მიერ დაპროექტებული და აგებული 300-ზე მეტი სიმაღლის კოშკი, პარიზში.



სურ. 2. ეიფელის კოშკი, პარიზი. საფრანგეთი.



სურ. 3. წითელი ხიდი, ქუთაისი. საქართველო



სურ. 4 ბორჯომ-ბაკურიანის სარკინიგზო ხიდი. საქართველო

საქართველოში, ქუთაისში „წითელი ხიდის“ პროექტი, რომელიც ითვალისწინებდა ლითონის ხიდის აგებას, ქვის ბურჯებზე, შედგა 1859 წელს. ავტორი გახლდათ სამხედრო ინჟინერი ნ. პოსტელნიკოვი. ლითონის ნაწილები შეუკვეთეს პარიზში. მონტაჟი დამთავრდა 1862 წელს. ხიდის მალის სიგრძე 35 მეტრია, ხოლო სიმაღლე 8,5 მეტრი. ეს იყო იმ დროისთვის პირველი ლითონის ხიდი კავკასიაში. ლითონის ნაწილები და მოაჯირი წითლად შეღებეს, რის გამოც, მას „წითელი ხიდი“ ეწოდა. ეს სახელი მას დღემდე შემორჩა.



სურ. 6 რკინიგზის სადგური ანტვერპენში. ბელგია

XIX საუკუნეში ლითონის კონსტრუქციების გამოყენებასა და განვითარებაში დიდი წვლილი მიუძღვით ინჟინრებს: ს. კერბედუს და დ. ჟუკოვსკის, პროფესორებს - ავ. იასინსკის და ნ. ბელოლიუბსკის (სურ.5.). მათ მიერ აშენდა ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი გასახსნელი ხიდი მდინარე ნევაზე (რუსეთი, სანკტ - პეტერბურგი) [51].



სურ. 5 გასახსნელი ხიდი მდინარე ნევაზე. ქ. სანკტ-პეტერბურგი, რუსეთი.

XIX საუკუნის დასაწყისში, კონსტრუქციებში ქანჩებით, ჭანჭიკებით და მოქლონებით შეერთებების ტიპების გამოყენებასთან ერთად დაიწყო შედუღებით შეერთების გამოყენება. თანდათან ვითარდებოდა ლითონის კონსტრუქციების



განგარიშების თეორია, ოპტიმალური კონსტრუქციების თავისებურებანი. დაზუსტდა ლითონის კონსტრუქციების მუშაობა სხვადასხვა სახის დატვირთვებისას. ამ თეორიის განვითარებაში დიდი როლი ითამაშა აკადემიკოსმა ვ. შუხოვმა, რომელმაც შექმნა მთელი რიგი ორიგინალური კონსტრუქციები. მის სახელთანაა დაკავშირებული გადახურვებისა და სხვადასხვა დანიშნულების სივრცითი კონსტრუქციების დამუშავება და აგება. ამ მიმართულებით მნიშვნელოვანია აკად. ა. პატინის წვლილი. განსაკუთრებული წვლილი აქვს შეტანილი პროფ. ნ. სტრელეცკის, რომელმაც წამოაყენა და დაამუშავა მთელი რიგი ფუნდამენტური იდეები კონსტრუქციების ზღვრული მდგომარეობის შესახებ, მათი განგარიშების და დაპროექტების საფუძვლების შესახებ.

XX საუკუნის დასაწყისში პროფ. ლ. პროსკურიაკოვმა შემოიღო წამწების თანამედროვე სამკუთხა გისოსი, განავითარა თეორია სარტყლების საუკეთესო კონფიგურაციის შესახებ.

XX საუკუნის მეორე ნახევრიდან საქართველოში და მათ შორის ქუთაისშიც, აქტიურად დაიწყო ლითონის კონსტრუქციების გამოყენება შენობა-ნაგებობების გადახურვისათვის. სადაც გამოყენებული იყო სხვადასხვა სახის კონფიგურაციები



სურ. 7 სასაწყობე მეურნეობის გადახურვა. საქართველო, ქ. ქუთაისი.

## 1.2. თანამედროვე მშენებლობაში გამოყენებული ლითონის მასალით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციები

თანამედროვე მშენებლობაში მზიდი სამშენებლო კონსტრუქციების ძირითად სახეებს წარმოადგენს რკინაბეტონის, ფოლადის, ქვისა და მერქნის კონსტრუქციები.

სახალხო მეურნეობის თითქმის ყველა დარგში ასევე ფართოდაა გამოყენებული მრავალნაირი ლითონის კონსტრუქციები.

ლითონის კონსტრუქციების გამოყენება მიზანშეწონილია, თუ ნაგებობები განკუთვნილია სამუშაოდ დიდი სიმაღლის, დიდი მასის მქონე და დიდ დატვირთვებზე მომუშავე კონსტრუქციების დასამზადებლად.

მშენებლობაში რკინაბეტონის ფართოდ გამოყენების მიუხედავად, ლითონის გამოყენება იზრდება, განსაკუთრებით ისეთ კონსტრუქციებში, სადაც რკინაბეტონის გამოყენება არარაციონალური და გაუმართლებელია.

სამშენებლო კონსტრუქციები უნდა აკმაყოფილებდეს სხადასხვა მოთხოვნებს: საექსპლუატაციო, ტექნიკურს, ეკონომიკურს, საწარმოო, ესთეტიკურსა და სხვას.

საექსპლუატაციო და ტექნიკური მოთხოვნები იმაში მდგომარეობს, რომ სამშენებლო კონსტრუქციები უნდა იყოს მოხერხებული ნაგებობათა ექსპლუატაციის დროს და მათ უნდა ჰქონდეს საკმარისი სიმტკიცე, მდგრადობა, ამტანობა, სიხისტე, რაც უზრუნველყოფს ნაგებობის ხანგამძლეობას.

ერთ-ერთ ძირითად მოთხოვნას ეკონომიურობა წარმოადგენს. ის დამოკიდებულია მასალების ხარჯსა და ღირებულებაზე; დამზადების, ტრანსპორტირების, მონტაჟის ღირებულებაზე და საექსპლუატაციო ხარჯებზე. ამიტომ კონსტრუქციის შერჩევასას საჭიროა გათვალისწინებული იქნას მისი დამზადებისა და მონტაჟის შრომატევადობა და ნაგებობის მშენებლობის ვადების შემცირება. ეკონომიურობა ასევე დამოკიდებულია კონსტრუქციის ტიპზე (სიბრტყივი, თაღოვანი, წამწე, ან სივრცითი, გარსოვანი), ნაგებობის კონსტრუქციულ სქემაზე და სხვა [48].

კონსტრუქციული გადაწყვეტის შერჩევასას განსაკუთრებული ყურადღება უნდა იქნას მიქცეული იმაზე, რომ გამოვიყენოთ მასობრივი წარმოების

ინდუსტრიალური ტიპური ნაკეთობების წარმოება. ეს საშუალებას იძლევა მაქსიმალურად იქნას მექანიზირებული და ავტომატიზირებული მათი დამზადების პროცესი, რაც მნიშვნელოვნად აიაფებს კონსტრუქციებს, ამარტივებს და აჩქარებს მათი მონტაჟის პროცესს სამშენებლო ბაჟანზე.

სამშენებლო კონსტრუქციების ტიპის შერჩევის ტექნიკურ-ეკონომიკური დასაბუთება წარმოადგენს უმნიშვნელოვანეს ეტაპს ნაგებობათა პროექტირების დროს.

კონსტრუქციების ძირითადი უპირატესობანი და ნაკლოვანებები შეიძლება შევაფასოდ ისეთი მაჩვენებლებით, როგორებიცაა მათი წონა, ცეცხლგამძლეობა, ხანგამძლეობა, საექსპლუატაციო ხარჯები და სხვა.

ლითონის კონსტრუქციები შეიძლება გამოყენებული იქნას შემდეგ ნაგებობებში: კარკასებში (ჩარჩოები, კოლონები, ამწისქვეშა კოჭები და სხვა); გადახურვათა კონსტრუქციებში, რომლებიც კედლებს, კოლონებსა და სვეტებს ეყრდნობა; სპეციალურ შენობათა კარკასებში (ანგარები, საზამთრო სტადიონები და სხვა), რომელთა ძირითადი კონსტრუქცია დაკიდებულია; ფხვიერი მასალების, სითხეებისა და ნავთობგაზსადენების ნაგებობათა კონსტრუქციებში (ბუნკერები, რეზერვუარები, გაზგოდერები, ბრძმედები და სხვა), რომელთაც ფურცლოვან კონსტრუქციებს უწოდებენ; მალლივ ნაგებობებში, კოშკებსა და ანძებში (რადიო- და ტელეანძა, ელექტროგადაცემის ხაზების საყრდენები და სხვა); დიდმალიან



სურ. 9 სივრცითი გადახურვის კონსტრუქცია. ქუთაისი, საქართველო



სურ. 10 ამწისქვეშა კოჭი. ლითონის საამქრო ქ. ქუთაისში. საქართველო



სურ. 8 თბილისის საერთაშორისო აეროპორტის საჰაერო ხომალდების ანგარი. საქართველო

ხიდებისა და ამწეების კონსტრუქციებში და სხვა საპასუხისმგებლო ნაგებობებში. გარდა ამისა, ფოლადის კონსტრუქციებს იყენებენ ნაგებობებში, რომლებიც მუშობენ დინამიკურ დატვირთვებზე [64].



სურ. 11 სატელევიზიო ანძა ქ. თბილისში. საქართველო



სურ. 12 ნავთობის რეზერვუარი ქ. ბათუმში. საქართველო



სურ. 13 მანჰეტენის ხიდი. ნიუ-იორკი. აშშ.

### 1.3 ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციების გამოყენების არეალი

ლითონის კონსტრუქციებში ლითონის ეკონომიის მიზნით ფართოდ გამოიყენება მაღალი სიმტკიცის ფოლადები. დიდ ეფექტს და ეკონომიას ნაგლინი პროფილების, ალუმინის შენადნობთა გამოყენება იძლევა. ფართოდ ინერგება



სურ. 14 ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი მასალა

რაციონალური კონსტრუქციები, მათ შორის წინასწარდადგენილი და კომპოზიციური მასალებისგან დამზადებული. ასევე დიდ ეკონომიას იძლევა კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდების სრულყოფა.

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია შედეგებით დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების შენადული შეერთების ხარისხი, ამიტომ კონსტრუქციის დაპროექტების, დამზადების და მონტაჟის პერიოდში ყურადღება უნდა მიექცეს გამოყენებული ძირითადი და საელექტროდო მასალების, შედეგების ხერხის და მეთოდის, შედეგების რეჟიმების, ნაკერების შესრულების თანმიმდევრობის სწორად შერჩევას [15].

ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციები გამოიყენება კარკასულ შენობებში და სხვადასხვა დანიშნულების ნაგებობებში:

1. საცხოვრებელი სახლები (ერთიდან სამ სართულამდე, მანსარდები, კოტეჯები და სხვა).

2. საზოგადოებრივი დანიშნულების შენობა-ნაგებობები (ადმინისტრაციული შენობები და სავაჭრო-სამეურნეო დანიშნულების შენობები, სასტუმროები, კაფე-რესტორნები, სავაჭრო-საგამოფენო პავილიონები, ავტო სახელოსნოები, სახურავები, ქოლგა და სხვა).

3. საწარმოო და სასოფლო-სამეურნეო დანიშნულების შენობა-ნაგებობები (საწყობები, ანგარებიანი სათბურები, ფერმები, საამქროები და სხვა).

კომბინირებული ფოლადის კარკასები, რომლებიც დამზადებული არიან გაგლინული პროფილებისაგან და თხელკედლიანი მსუბუქი კონსტრუქციებისაგან, შეიძლება გამოყენებული იქნას სამი და მეტი სართულების შენობაში.

მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციებისგან დამზადებული კარკასი წარმატებით მუშაობს რკინა-ბეტონთან და აგურთან ერთად კომბინაციაში (მიშენებები, ქოლგები, მანსარდები)

ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციები განსაკუთრებით ეფექტურად გამოიყენება შენობა-ნაგებობების რეკონსტრუქციისას, მაგალითად, მანსარდული სართულის დაშენებისას არსებულ შენობაზე, რკინა-ბეტონის



სურ. 16. მეტროპოლის ქოლგა სევილიაში

გადახურვების შეცვლისას ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციების კარკასით. ნათელია ფმთვ გამოყენების უპირატესობა რეკონსტრუქციისას:



სურ. 17 შემოსავლების სამსახურის რეკონსტრუირებული მანსარდი. ქუთაისი. საქართველო



დატვირთვების შემცირება არსებულ კონსტრუქციებზე, რეკონსტრუქციის ჩატარების შესაძლებლობა მაცხოვრებლების გამოსახლების გარეშე, სამუშაოების ჩატარების შესაძლებლობა წლის ნებისმიერ დროს [9].

#### 1.4 თხელკედლიანი მსუბუქი ფოლადის კონსტრუქციების უპირატესობა და ნაკლოვანებები

ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციები (ფმთკ) წარმოადგენს ფოლადის მსუბუქი კონსტრუქციების ფართო კლასის ერთ-ერთ სფეროს. ამ კლასის კონსტრუქციების მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს: მცირე ლითონშემცველობა, მაღალი ტექნოლოგიურობა, ტრანსპორტირების და მონტაჟის სიადვილე, მთელი შენობა-მოდულების კომპლექსური მიწოდების შესაძლებლობა, ასევე მათი მზიდი კონსტრუქციები. ფოლადის თხელკედლიანი მსუბუქი კონსტრუქციების ძირითადი ელემენტია თხელკედლიანი ცივადნალური პროფილი (სურ.14.).

საჭიროა აღინიშნოს თხელკედლიანი მსუბუქი კონსტრუქციების ძირითადი უპირატესობა ტრადიციული აგურის, რკინა-ბეტონის, ხის და აგრეთვე ფოლადის (ე.წ. ცხლადნაგლინი „შავ“ ლითონებიდან) კონსტრუქციებთან:

1. კონსტრუქციების სიმსუბუქე სიმტკიცესთან და მდგრადობასთან შეთანხმებაში დატვირთვების შემცირებას საკუთარი წონის გამო;
2. სეისმური და სხვა დინამიკური ზემოქმედების ამალელებული მდგრადობა. ნაგებობებს თხელკედლიანი მსუბუქი კონსტრუქციებისაგან შეუძლიათ გაუძლონ ცხრა ბალიან მიწისძვრას რიხტერის შკალით, რომელიც შეიძლება აიხსნას ნაგებობის ფოლადის კარკასის ელასტიურობით;
3. სატრანსპორტო ხარჯების შემცირება კონსტრუქციების მცირე მასის გამო. მშენებლობის ადგილზე კონსტრუქციების სრული კომპლექტის და მათი ელემენტების მიტანა ნებისმიერი ტრასპორტით;
4. შრომის დანახარჯების და ენერგო მოხმარების შემცირება მონტაჟის დროს;
5. მშენებლობის ვადების შემცირება კონსტრუქციების დამზადების, მიტანის

და მონტაჟის დროის შემცირების გამო;

6. სამშენებლო მანქანების მინიმალურად გამოყენება, განსაკუთრებით დიდი ტვირთამწეობის ამწე-სატრანსპორტო მანქანებისა;

7. თითქმის „სველი“ ტექნოლოგიური სამუშაოების სრული არარსებობა, რაც საშუალებას იძლევა სამუშაოები მიმდინარეობდეს წლის ნებისმიერ დროს, ნებისმიერ ამინდში;

8. ღრმა ფუნდამენტის მოწყობის (1.5-2.0 მ) საჭიროების არარსებობა. ფმთკ-ის კარკასისათვის საკმარისია მცირე ზომის ფუნდამენტის მოწყობა;

დადებითთან ერთად ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციებს გააჩნიათ ნაკლოვანებები:

1. ფმთკ მუშაობის ხანგრძლივობა აგრესიულ გარემოში არ აღემატება 25 წელს;
2. გადახურვების მცირე მდგრადობა, რომელიც დაკავშირებულია მათ დეფორმაციულობასთან და მცირე მასასთან;
3. კონსტრუქციების დაბალი ცეცხლმედეგობა;
4. ფმთკ დაზიანების მეტი ალბათობა მათი ტრანსპორტირების, დატვირთვა-გადმოტვირთვისთვის და მონტაჟის დროს;



სურ. 18. არასწორად შერჩეული ფოლადის მსუბუქი თხელკედლიანი მასალით დამზადებული კონსტრუქციის რღვევა (ხარაგაულის მუნიციპალიტეტი, საქართველო)

მიუხედავად ზემოთ ჩამოთვლილი ნაკლოვანებებისა, ფთმკ აქვთ თავისი გამოყენების სფეროები, რომლებშიც მათი გამოყენება გაცილებით ეფექტურია, ვიდრე ტრადიციული კონსტრუქციებისა.

ფთმკ-ს ძირითადი განსხვავება ტრადიციული ლითონკონსტრუქციებისგან შემდეგში მდგომარეობს:

1. ცივად დეფორმირებული პროფილების გამოყენება თხელი ფურცლოვანი ნაგლინი ფოლადისაგან სისქით 4 მმ-მდე;
2. ღეროების კვეთის დიდი არჩევანი (მათ შორის მრგვალი, კვადრატული, ჩაკეტილი, ღია);
3. შეერთების შესრულების პრინციპები;
4. გაანგარიშების და კონსტრუირების თავისებურებანი, რომელიც დაკავშირებულია პროფილის მცირე სისქესთან;

ცალკეული კვანძების შეერთების სიმარტივე მიიღწევა თვითსახრახნი „ვინტების“, ქანჩების და ჭანჭიკების, მოქლონების და უფრო იშვიათად წებოს დახმარებით. საჭიროა ყურადღება მივაქციოთ იმ გარემოებას, რომ შედუღებით შეერთება ჯერჯერობით აქტიურად არ გამოიყენება, თუმცა ზოგიერთი კონსტრუქციის (განსაკუთრებით მზიდი კონსტრუქციები) დამზადებისას შესაძლებელია შეერთების ამ ტიპის გამოყენება [33].

## **1.5 შენობათა გადახურვის ლითონის შენადული კონსტრუქციების (ფერმების) სახეობები, მათი კონტურის მოხაზულობა და გისოსების სქემები**

### **1.5.1. ფერმები და მათი სახეობები**

ფერმები მრავალი სახეობის არსებობს და კონკრეტული ფორმის მიცემა და სემდგომ მათი დამზადება ხდება კონკრეტული მუშაობის პირობიდან გამომდინარე, ისინი წარმოადგენენ წარმოადგენენ გეომეტრიულად უცვლელ გისოსოვან კონსტრუქციებს, რომელთა კვანძების სიხისტე უმნიშვნელოდ მოქმედებს ელემენტების მუშაობაზე და აქედან გამომდინარე საშუალებას იძლევიან განხილული იქნას როგორც სახსროვან-ღეროვანი სტრუქტურები.

ფერმები წარმოდგენენ ჩაკეტილ, სივრცულ გეომეტრიულად უცვლელ ფიგურებს, მაგალითად: ანძები, ხიდები, ჰიდრავლიკური კონსტრუქციების საკეტები და ა.შ. გაანგარიშების მოსახერხებლად, სივრცულ ფიგურებს ანაწევრებენ ბრტყელ ნაწილებად.

განასხვავებენ ორსაყრდენიან - წყვეტილ, მრავალსაყრდენიან - უწყვეტ ფერმებს. მრავალსაყრდენიანი ფერმები, შუალედური საყრდენების რეაქციების ღუნვის მომენტების სიდიდეზე განმტვირთავი ზემოქმედების გამო, განიცდიან უფრო ნაკლებ ძალისხმევებს სარტყელებში, ვიდრე ორსაყრდენიანები, მაგრამ უფრო მეტ ძალისხმევებს) შუალედური საყრდენების ცხაურაში. უწყვეტი ფერმები უფრო მსუბუქია, ვიდრე წყვეტილი ფერმები. უწყვეტი სტრუქტურებისთვის დამახასიათებელი უარყოფითი მხარეები. განაპირობებენ უწყვეტი ფერმების გამოყენების მიზანშეწონილობას შედარებით იშვიათ შემთხვევებში.

თანამედროვე სამრეწველო და სამოქალაქო მშენებლობაში ძირითადად გამოიყენება წყვეტილი თავისუფლად დაყრდნობილი ფერმები, რომლებიც კარკასების ჩარჩოებში შედიან რიგელის სახით.

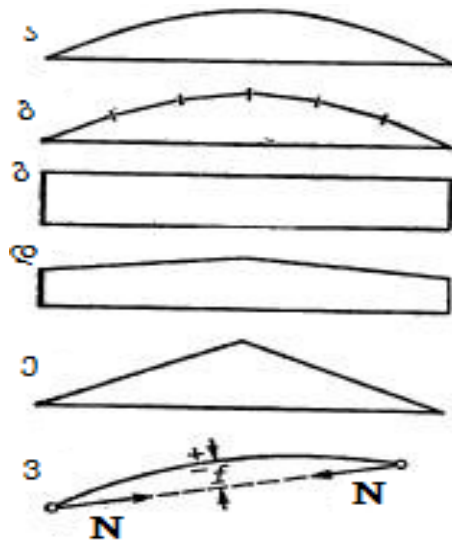
ლითონის ფერმები პირობითად იყოფა მსუბუქ და მძიმე ფერმებად. მსუბუქ ფერმებს მიეკუთვნება ისინი, რომელთა კვანძების კონსტრუირება ხდება ერთი ფორმის ჩანართის გამოყენებით და ან მთლიანად ჩანართებისა და მისადგამების გარეშე. მძიმეებს მიეკუთვნება ფერმები, რომლებშიც თითოეული კვანძი იქმნება ორი პარალელურად განლაგებული ფასონურები [37].

მსუბუქი ფერმებიდან გამოყოფენ ღეროვან ფერმებს და ხისტი შეკუმშული სარტყელის მქონე ფერმებს; ეს ფერმები გამოიყენება ხიდური ამწეების საკრანო და ქვე-საკრანო ხიდებში, სარკინიგზო ხიდებში ზედა სარტყელზე მოძრაობით.

### 1.5.2. ფერმების შემოწერილობა

ფერმის პერიმეტრის ყველაზე ხელსაყრელი მოხაზულობაა, რომლის დროსაც მისი პერიმეტრი შეესაბამება მომენტების ეპიურის მოხაზულობას. მაგალითად, თანაბრად განაწილებული დატვირთვის და ჰორიზონტალური ქვედა სარტყელის

დროს, ზედა სარტყელი მოხაზულია პარაბოლას რკალის გასწვრივ (ნახ.1), ხოლო ერთი კონცენტრირებული დატვირთვისას მის მალში. ამ შემთხვევაში, ძალები წარმოიშობა მხოლოდ სარტყელებში; გისოსის ღეროებში ძალები პრაქტიკულად ნულის ტოლია. რეალურად კი დატვირთვების გარკვეული უთანაბრობის, კონსტრუქციული სიმძიმის ცენტრის დარღვევის და სხვა ფაქტორების გამო, გისოსის ელემენტები განიცდიან ძალზე მცირე ძალებს [20].



ნახ.2. წამწეების სარტყელების მოხაზულობა:

ა-მრუდწირული სარტყელით (პარაბოლური);

ბ-მრავალკუთხედა;

გ-პარალელური სარტყელებით;

დ-ტრაპიციადალური;

ე-სამკუთხა;

ვ-დამატებითი მღუნავი მომენტი მრუდწირული სარტყელის პანელში.

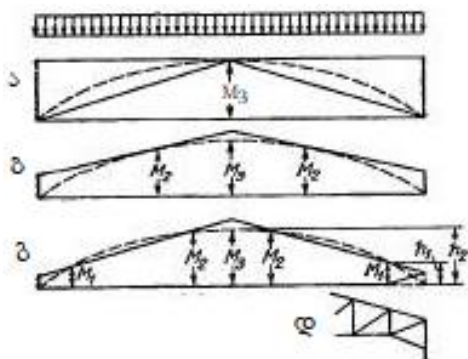
მრუდხაზოვანი სარტყელის მქონე ფერმების დამზადება უფრო რთულია და უფრო მეტ დროს მოითხოვს თუმცა უფრო თანაბრად ნაწილდება მოსული დატვირთვები. ამავე დროს მრუდხაზოვანი სარტყელის ელემენტებში წარმოიქმნება

მნიშვნელოვანი ღუნვის მომენტები, მისი სარტყელების მუშაობას აგრეთვე აფერხებენ საწყისი ძაბვები. რის გამოც თანამედროვე მშენებლობაში თითქმის არ გამოიყენება ფოლადის მრუდხაზოვანი სარტყელის მქონე ფერმები.

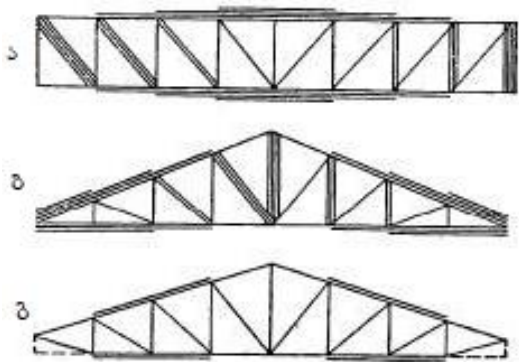
როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული ყველაზე ხშირად, მსუბუქ ფერმებში გამოიყენება სწორხაზოვანი მოხაზულობა კარალელურად განლაგებული სარტყელებით ან დახრილი ზედა სარტყელით, სახურავის დაქანებების წარმოსაქმნელად თუმცა გასათვალისწინებელია ქანობის დახრის კუთხე, განსაკუთრებით ისეთ რეგიონებში სადაც უხვი ნალექია მოსალოდნელი (იხ. ნახ.1,გ,დ).

თუ ჩვენს მიერ წარმოდგენილ ყველა ფერმას გავიანგარიშებთ თანაბრად განაწილებული დატვირთვების, ერთნაირი ზომის ძალების და ერთნაირი კონსტრუქციის ელემენტებისას და შევადარებთ შედეგებს, მივიღებთ, რომ ყველაზე დიდი ძაღვის სიდიდე სამკუთხა ფერმის სარტყელებში თითქმის 2-ჯერ მეტია, ვიდრე დანარჩენი ფერმების სარტყელის ძაღვების ანალოგიურ მაჩვენებელზე [33].

დანარჩენი ფერმების სარტყელის ძაღვების მაქსიმალურ სიდიდეებს შორის სხვაობა უმნიშვნელოა (15%-მდე) და დიდ გავლენას არ ახდენს ასეთი ფერმების კონსტრუირებაზე და მათ წონაზე. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული სამკუთხა ფერმები, საკმაოდ დიდი სარტყელის ძაღვების გამო, გაცილებით მძიმეა, ვიდრე სხვა ტიპის ფერმები. ამიტომ, მათი გამოყენება შეზღუდულია.



ნახ.3. თანაბრად განაწილებული დატვირთვის მომენტების ეპიურის შეთანწყობა წამწის კონტურებთან და მათ ზიდვის უნართან (ა-გ); წამწის კონტურის მოყვანილობის ცვლილება საყრდენიმომენტის არსებობისას (დ).



ნახ.4. ძალვათა ზრდა წამწის ღეროებში:  
 ა-პარალელური სარტყელებით და ტრაპეციადალურში სარტყელის მცირე დახრით; ბ-სამკუთხა წამწეში;  
 გ-ტრაპეციადალურში სარტყელის ციკაბო დახრით.

ნახაზი 3-ზე ნაჩვენებია მომენტების ეპიურა ერთნაირად განაწილებული დატვირთვებით და ერთნაირი სიმაღლის მქონე ფერმების კონტურები. ხოლო ნახაზი 4 ნაჩვენებია პარალელური სარტყელებით ტრაპეციადალური და სამკუთხა კონტურის წამწე.

ფერმების სარტყელების მოხაზულობა მნიშვნელოვნად ზემოქმედებს არა მხოლოდ თავად სარტყელების მუშაობაზე, არამედ გისოსის მუშაობაზეც. ზემოთ აღინიშნა, რომ პარაბოლურ და პოლიგონურ ფერმებში, გისოსის ელემენტები ძალიან სუსტად არის დატვირთული. პარალელური სარტყელების მქონე და სამკუთხა და ტრაპეციადალურ ფერმებში, პირიქით, გისოსი განიცდის ძალიან დიდ ძალვას.

ასეთი ტიპის ფერმების გისოსის ღეროების მაქსიმალური ძალვა 2-3-ჯერ აღემატება ანალოგიურ ძალვებს მრუდხაზოვანი სარტყელის მქონე ფერმებში. ეს კი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მასალების ხარჯზე კონსტრუქციაში [6].

### 1.5.3. ფერმების სიმაღლე

მას შემდეგ რაც ფერმის კონტურის მოხაზულობის საკითხი გადაწყდება დამპროექტებელმა უნდა განსაზღვროს ფერმის სიმაღლე. ფერმის სიმაღლის მატებასთან ერთად ძალვები სარტყელებში განიცდიან ვარდნას და მცირდება სარტყელზე ლითონის ხარჯი. ფერმის სიმაღლის ზრდასთან ერთად, იზრდება ირიბანების და დგარების სიგრძე და, შესაბამისად, მათზე ლითონის ხარჯიც. გარდა ამისა, გისოსის შეკუმშული ელემენტების დაგრძელებას თან სდევს მათი

მოქნილობის ზრდა, რაც, თავის მხრივ, მოითხოვს ამ ელემენტების განივი კვეთის ზრდას, რაც იწვევს ლითონის ხარჯის ზრდას. შედეგად ფერმის სიმაღლის ზრდასთან ერთად, მცირდება სარტყელების ზომა, ხოლო გისოსის ელემენტების წონა იზრდება.

ფერმის ყველაზე ხელსაყრელი თეორიული სიმაღლე არის ის, როდესაც სარტყელების წონა უახლოვდება გისოსის წონას. პრაქტიკაში კი, გისოსის წონა მეტწილად სარტყელების წონის ნახევარზე ნაკლებია. საჭიროა აღინიშნოს, რომ ფერმის თეორიულად ყველაზე ხელსაყრელი სიმაღლიდან გადახრები მისი კლებადობის მიმართულებით იწვევს ფერმის წონის ნელ-ნელა ზრდას, მაგრამ მეორეს მხრივ, ისინი ხელს უწყობენ არქიტექტურული იერსახის გაუმჯობესებას და სხვა [45].

ფერმების მინიმალური სიმაღლე განისაზღვრება სიხისტის მოთხოვნებით - დასაშვები ჩანაღუნის სიდიდით. რაც უფრო ნაკლებია დასაშვები ჩანაღუნის სიდიდე, და რაც უფრო მეტია ძაბვები ფერმის ელემენტებში, მით უფრო მეტი უნდა იყოს ფერმების სიმაღლე. ფერმების სიმაღლე უნდა იყოს დაკავშირებული ირიბანების სარტყელის მიმართ სასურველი დახრის კუთხესთან და პანელების ზომებთან. ფერმების ტრანსპორტირების შემთხვევაში რკინიგზით ან საავტომობილო ტრანსპორტით მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული ფერმების შესაბამისი ზომები [31].

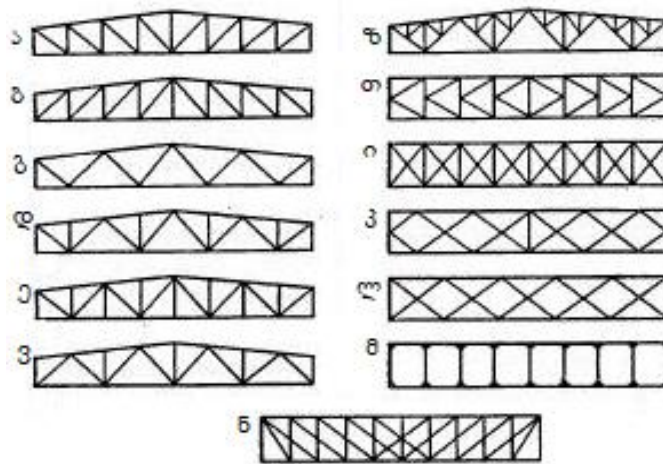
ზემოთ აღნიშნული გარემოებების გათვალისწინებით, ყველაზე მეტად გამოყენებული მსუბუქი ფერმების სიმაღლე  $h$  დგინდება საკმაოდ ფართო დიაპაზონში: პარალელური სარტყელებით და ტრაპიციადალურებში სარტყელის მცირე დახრით - მალის  $1/5$  - დან  $1/20$ -მდე (1); ჰიდრავლიკური ნეგებობების ჩამკეტების და კიდურა სახურავებიანი ფერმების -  $h = (1 / 7-1/8) l$ . ხიდურა კრანების ფერმებში  $h = (1/12-1/15)$ ; ხოლო სამკუთხა ფერმებში  $h = (1/4-1/6)l$ . V-2, c ნახატზე ნაჩვენები ფერმებისათვის რეკომენდებული სიმაღლეა  $h = (1 / 5-1 / 5.5) l$ .



#### 1.5.4. გისოსების სქემები

გამოყენების მიხედვით ლითონის კონსტრუქციებში - ფერმებში გამოყენებული გისოსები მრავალფეროვანია. ისინი კლასიფიცირებულია სხვადასხვა კრიტერიუმის მიხედვით.

გისოსების (დგარების, ირიბანების, ღეროების) და სარტყელების მიერ წარმოქმნილი ფიგურების გარეგნული სახის მიხედვით შეიძლება იყოს: სამკუთხა, რომბისებური, მართკუთხა.



ნახ.5. წამწეების გისოსების სხვადასხვა სქემები:

ა- დაღმავალი ირიბანებით; ბ- აღმავალი ირიბანებით; გ- ირიბანების ცვალებადი მიმართულებით; დ- დამატებითი დგარებით; ე- დამატებითი დგარებით და საკიდრებით; ზ- შპრენგელებით; თ-ნახევრად ირიბანული; ი- ორირიბანული; კ-რომბული; ლ-რომბული; მ-უირიბანო; ნ-მრავალირიბანული [29].

**ირიბანების და დგომების არსებობით:** ირიბანული ძირითადი დგომებით (ნახ.5,ა,ბ), ირიბანული დგომების გარეშე (ნახ.5,გ); ირიბანული დამატებითი დგომებით (ნახ.5,დ,ე); ირიბანის გარეშე (ნახ.5,მ);

**ირიბანების მიმართულებით:** ირიბანების მუდმივი მიმართულებით; ქვემოთ მიმავალი ირიბანებით, საყრდენიდან მაქსიმალური მიმენტებისკენ მიმართულებით, აღმავალი ირიბანებით, ირიბანების ცვალებადი მიმართულებით.

**ირიბანების რაოდენობის მიხედვით:** ერთ პანელში; ერთირიბანისანი (ნახ.5,ა-ე);

ორიბნიანი (ნახ.5,ი) ან მრავალიბნიანი (ნახ.5, კ), ნახევრად ირიბნიანი (ნახ.4,თ).

სტატიკურად რკვევადი სისტემების წარმომქნელი გისოსები (ნახ.4,ა-თ) და სტატიკურად ურკვევი (ნახ.5,ი,ლ,მ,ნ).

გისოსის ტიპის შერჩევას უნდა ვისწრაფოდეთ მისი უმარტივესი მონახაზისაკენ, რომ გასაგები იყოს ღეროებს შორის ძაღვების განაწილების თვალსაზრისით. გისოსში და მთლიანად კონსტრუქციაში ფოლადის ხარჯის შემცირებისთვის და დამზადების ხარჯის შრომატევადობის შესამცირებლად, უნდა შეირჩეს გისოსის ისეთი სქემა, რომელსაც ექნება მინიმალური რაოდენობის ღეროები და მათი მინიმალური ჯამური სიგრძე, შუალედური კვანძების მინიმალური რაოდენობა და ერთნაირი კვანძების ყველაზე მაღალი განმეორებადობა.

გარდა ამისა, სასურველია, რომ გისოსის უფრო გრძელი ელემენტები (ირიბანები) ძირითადად მუშაობდეს დაჭიმვაზე, ხოლო უფრო მოკლეები (დგომები) - ძირითადად შეკუმშვაზე, ვინაიდან გრძივი ჩანაღუნის ზემოქმედება მოკლე შეკუმშული ღეროების მუშაობაზე ნაკლებია, ვიდრე გრძელების მუშაობაზე.

გისოსის ღეროების ყველაზე მცირე რაოდენობას და ღეროებისა და კვანძების ტიპების ყველაზე მაღალ განმეორებადობას იძლევა უირიბანო (ირიბანის გარეშე) გისოსი (ნახ.5,მ). ირიბანების სარტყელის მიმართ მოცემული დახრის კუთხის დროს, ირიბანების ცვალებადი მიმართულების მქონე და სადგომების გარეშე გისოსს (ნახ.5, გ) გააჩნია კვანძებისა და ღეროების ყველაზე მცირე რაოდენობა და მათი ყველაზე მცირე საერთო სიგრძე. სარტყელის პანელების სიგრძის შესამცირებლად ირიბანების ცვალებადი მიმართულების დროს, ხდება დამატებითი დგომების დადგმა (ნახ.5,დ,ვ). ამ შემთხვევაში, გისოსის შუალედური ღეროების რაოდენობა და კვანძების რაოდენობა ასევე ნაკლებია, ვიდრე ირიბანების მუდმივი მიმართულების დროს [17].

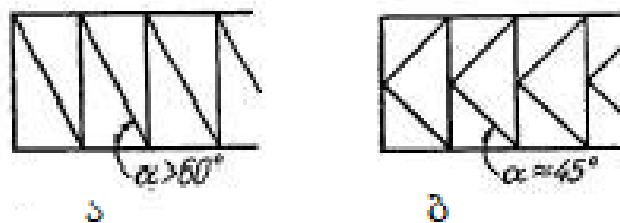
თუ დატვირთვის მეთოდი მოითხოვს პანელის სიგრძის შემცირებას ქვედა სარტყელის გასწვრივ, რაც მიიღწევა საკიდარების განთავსებით (ნახ.5,ე), მაშინ ირიბანების ცვალებადი მიმართულების მქონე ფერმა თითქმის დაკარგავს თავის

უპირატესობებს ირიბნების მუდმივი მიმართულების მქონე ფერმებთან მიმართებაში. ამ შემთხვევაშიც მისი უპირატესობაა: ღეროების ნაკლები რაოდენობა, რომლებიც მონაწილეობენ განივი ძალის გადაცემაში მალიდან საყრდენებზე [36]; ირიბანების მუდმივი მიმართულების მქონე ფერმების უპირატესობაა კვანძების ერთსახოვნება და ირიბანების ისეთი მიმართულების დანიშვნის შესაძლებლობა, რომლის დროსაც ისინი თითქმის ყველა დაჭიმულები იქნებიან, ხოლო დგომები კი, როგორც უფრო მოკლე ელემენტები, იქნებიან შეკუმშულები.

ირიბანების (მიმართულების მიუხედავად) სარტყელის მიმართ დახრილობის კუთხე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ძალვის სიდიდეზე და, შესაბამისად, ირიბანების კვეთის ზომაზე და შესაბამისად წონაზე. ფერმების წონის ცვლილების თეორიული ანალიზი, ირიბანებს და სარტყელებს შორის კუთხის სიდიდის მიხედვით, გვიჩვენებს, რომ ირიბნების ცვალებადი მიმართულების მქონე ფერმებში სასურველია ეს კუთხე დაახლოებით  $45^\circ$  იყოს, ხოლო ირიბნების მუდმივი მიმართულების მქონე ფერმებში - დაახლოებით  $35^\circ$ .

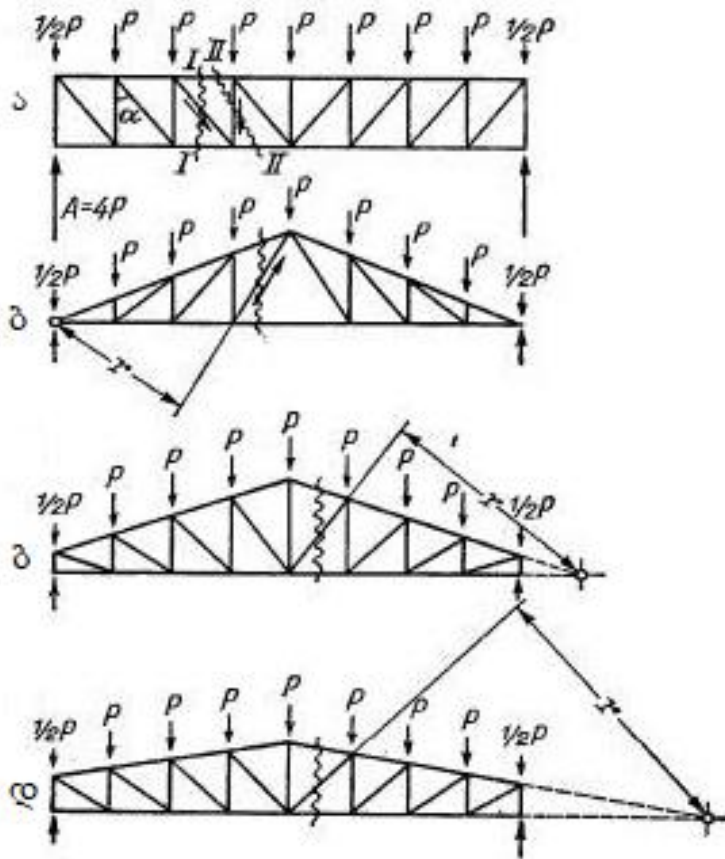
ნახევრად ირიბანიანი გისოსის (ნახ.5,თ), მარტივ ირიბანიანთან (ერთირიბანიანთან) შედარებით გააჩნია მნიშვნელოვნად მეტი ღეროები და კვანძები. ჩვეულებისამებრ, ასეთი გისოსის მქონე ფერმები, მძიმე და შრომატევადია. ნახევრად ირიბანიანი გისოსის უპირატესობა არის ის, რომ დგომების თავისუფალი სიგრძე განახევრებულია და მათ შესაბამისად გააჩნიათ მეტი მოქნილობა ფერმის სიბრტყეში;

ნახევრად ირიბანიანი გისოსები გამოიყენება, როდესაც პანელების სიგრძე გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ფერმის სიმაღლე.



ნახ.6. გისოსი დიდი სიმაღლისა და მცირე სიგრძის პანელების მქონე წამწებში: ა-ერთირიბანული; ბ-ნახევრად ირიბანული.

ტრაპიციადალური ფერმერებში სარტყელების მცირე დახრილობისას, გაჭიმვაზე მუშაობენ დაღმავალი ირიბანები, ხოლო სამკუთხა ფერებში, პირიქით. აღმავლები (ნახ.7).



ნახ.7. გისოსის მუშაობა უმარტივეს წამწებებში.

პარალელური სარტყელების მქონე ფერმებში, ყველაზე დიდ ძალვას განიცდიან გისოსები კიდურა პანელებში; საყრდენ კვანძებიდან დაშორებასთან ერთად, ძალები გისოსის ღეროებში განიცდიან მნიშვნელოვან შემცირებას. ეს კარგად ჩანს მარცხენა განკვეთილი ნაწილის წონასწორობის განტოლებიდან (ნახ. 7, ა):

$$\Sigma Y = A - \Sigma P_i - D \cos \alpha = 0.$$

სამკუთხა ფერმების გისოსში, ძალის შუა ნაწილთან მიახლოებისას, ძალები

გოსოსის ღეროებში იზრდება. მრავალ ირიბანიანი სისტემები (ნახ.5,კ) მათი დამზადების მაღალი შრომატევადობის გამო ამჟამად მშენებლობაში არ გამოიყენება. მხოლოდ მათი გამოყენება ხდება (ნახ.5,ი) კავშირის ფერმებში, რომლებიც განკუთვნილია ძირითადი ფერმების სივრცულ სიმკვრივისათვის. ამ შემთხვევაში, ირიბანების კონსტრუირება ხდება დრეკადი ელემენტებისგან, რომლებსაც შეუძლიათ მხოლოდ გამჭიმი ძაღვების ტარება [29].

ორ ირიბანიანი გოსოსის მქონე ფერმები, რომელთა ელემენტებს შეუძლიათ მუშაობა როგორც გაჭიმვაზე, ასევე შეკუმშვაზე, იძლევიან მნიშვნელოვნად ნაკლებ შეღუნვებს, ვიდრე ერთირიბანიანი ფერმები. ამიტომ, მათი გამოიყენება, უფრო ხშირად ხდება ხიდურა ამწეების მთავარი წამწის, კრანქვემა კოჭების და ხიდების სამუხრუჭე ფერმებში შეზღუდული სიმაღლის დროს.

ფერმების დამზადების დროს მათ ცხაურებში შპრენგელური გოსოსის საჭიროება (იხ. ნახ.5,ზ) წარმოიქმნება დიდი სიმაღლის დროს, როდესაც ირიბანების დახრის სასურველი კუთხე სარტყელის მიმართ სასურველია და პანელების სიგრძე არის მეტი, ვიდრე საჭიროა ფერმის მიერ დამჭერ კონსტრუქციისთვის.

## თავი II

### სივრცითი ღეროვანი სისტემების გაანგარიშების მეთოდები

ცნობილია, რომ ღეროვანი სივრცითი კონსტრუქციების სიმტკიცის, სიხისტის და მდგრადობის უზრუნველყოფისათვის ღეროების კვეთების შერჩევა ხორციელდება გაანგარიშების საფუძველზე შედგენილი საანგარიშო მოდელის გამოყენებით. საანგარიშო მოდელების განვითარება უშუალოდაა დაკავშირებული მათემატიკური ანალიზის მეთოდების, დიფერენციალური და ინტეგრალური აღრიცხვის მეთოდების, რიცხვითი ანალიზის მეთოდების განვითარებასთან.

მე-17 საუკუნემდე კაცობრიობისათვის თითქმის არაფერი იყო ცნობილი გაანგარიშების რამენაირად დასაბუთებულ მეთოდებზე. ჰუკის კანონმა საშუალება მოგვცა წარმოგვედგინა კონსტრუქციის მუშაობა და შეგვესრულებინა შემდგომი გაანგარიშებები. მათი ანალიზის მეთოდებით შესაძლებელი გახდა მიღებული ყოფილიყო ძირითადი დიფერენციალური დამოკიდებულებები შიგა ძალებსა და გარე ძალების ინტენსივობას შორის, დაგვეკავშირებინა შიგა ძალოვანი ფაქტორები და გადაადგილებები (ხაზოვანი და კუთხური), გვეპოვა კვეთის ინერციის მომენტები, გაგვეანგარიშებინა ძაბვები და დეფორმაციები [39].

სივრცითი ღეროვანი კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდების განვითარებაში მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანეს უცხოელმა მეცნიერებმა: ვ. ზ. ვლასოვმა, ვ. გ. შუხოვმა, ვ. ლ. კირპიჩევმა, ნ. ს. სტრელეცკიმ, ა.ა. გვოზდევმა, ი. მ. რაბინოვიჩმა, პ. ლ. პასტერნაკმა, ა. ფ. სმირნოვმა, ა. რ. რჟანიცინმა, ბ. ნ. გორბუნოვმა, ი. ვ. კროტოვმა, ჯ. არგირისმა, ფეკლმა, მიზესმა, კლეპელმა და სხვებმა. საქართველოს მეცნიერებმა: კ. ს. ზავრიევმა, ი.კ მელაშვილმა, ო. გ. სულაბერიძემ [27].

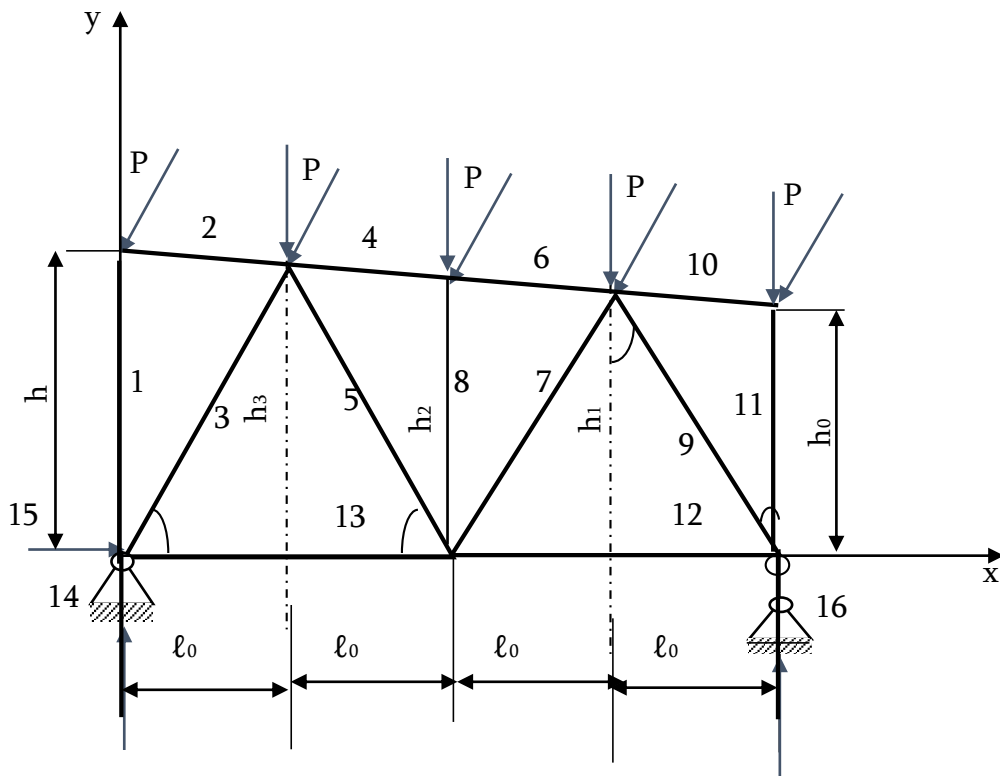
სივრცითი კონსტრუქციების და ნაგებობების პრაქტიკულმა მოთხოვნილებებმა სწრაფადგანვითარებად მანქანათმშენებლობაში, გემთმშენებლობაში, მშენებლობაში, ავიამშენებლობაში განაპირობა სიმტკიცეზე და მდგრადობაზე გაანგარიშების მეთოდების სრულყოფა და განვითარება.

მეთოდოლოგიური თვალსაზრისით მნიშვნელოვანი იყო განსხვავების



## 2.1. შენობის გადახურვის ღეროვანი ლითონკონსტრუქციის გაანგარიშების მეთოდის ძირითადი განტოლებები

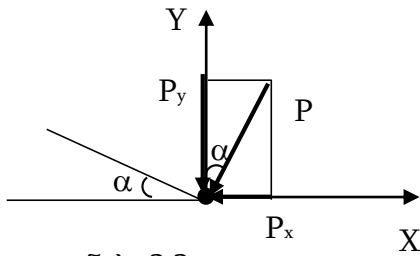
ფერმებში ღეროები კვანძებში შეერთებულია ან მოქლონურად, ან შედუღებით, ანუ ხისტად. როგორც გაანგარიშებები აჩვენებს, ლითონურ ფერმებზე კვანძებში მოქმედი ძალებისას, ფერმის ღეროებში აღძრული ძალები ხისტი შეერთებისას მცირედით განსხვავდება იმ ძალებისაგან, რომლებიც აღიძვრება ღეროებში სახსრულად შეერთებისას კვანძებში [2]. ამიტომ გაანგარიშებისას განვიხილავთ ფერმას, რომლის ყველა ელემენტი კვანძებში შეერთებულია სახსრულად (იდეალური სახსრებით) (ნახ. 2.2.)



ნახ. 2.2.

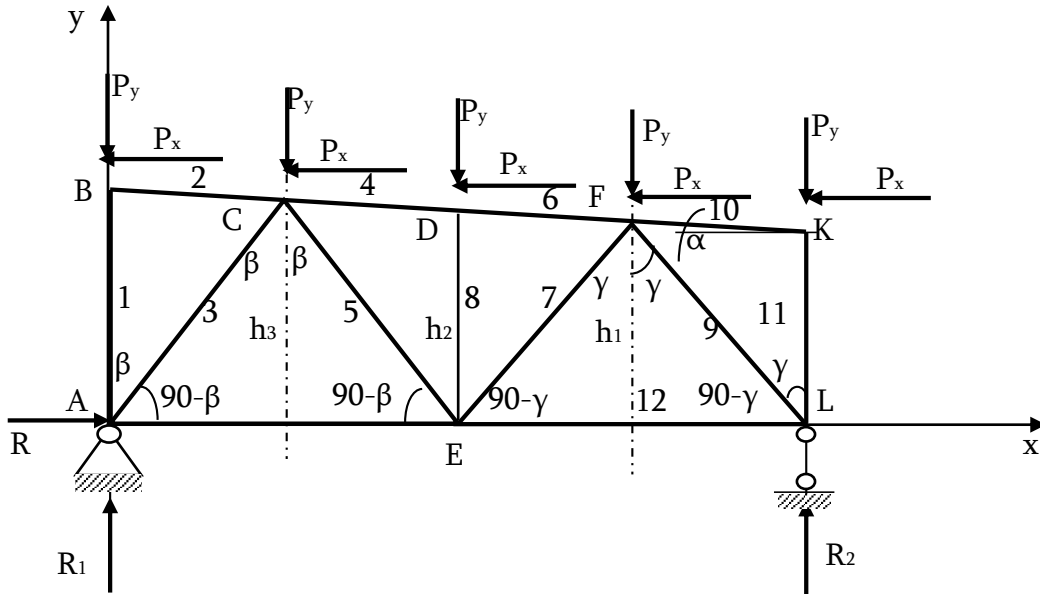
გარე დატვირთვის  $P$  ვექტორი დავშალოთ  $P_x$  და  $P_y$  მდგენელებად  $X$  და  $Y$  ღერების მიმართ (ნახ. 2.3.).





ნახ. 2.3.

$$P_y = P \cdot \cos \alpha; \quad P_x = P \cdot \sin \alpha$$



ნახ. 2.4.

A და L საყრდენებში აღძრული რეაქციის ძალების ( $R, R_1, R_2$ ) განსაზღვრისათვის

ჩავწეროთ წონასწორობის განტოლებები ნახ. 2.4-ის შესაბამისად. მივიღებთ:

$$R = 5P_x = 5P \cdot \sin \alpha.$$

$$\sum M_A = 0; \quad R_2 \cdot 4l_o = P_y \cdot l_o + P_y \cdot 2l_o + P_y \cdot 3l_o + P_y \cdot 4l_o + P_x(h + h_3 + h_2 + h_1 + h_o);$$

საიდანაც:

$$R_2 = [10P_y l_o + P_x(h + h_3 + h_2 + h_1 + h_o)] / (4l_o) = P[10 \cos \alpha l_o + \sin \alpha(h + h_3 + h_2 + h_1 + h_o)] / (4l_o)$$

რეაქციის ძალა,  $R_1$  ტოლია:

$$R_1 = 5P_y - R_2 = 5P \cdot \cos \alpha - R_2$$

ღეროებში აღიძვრება ძალები მხოლოდ გრძივი მიმართულებით.

ფერმას აქვს მარცხენა საყრდენი უძრავი სახსრით და მარჯვენა მოძრავი



(2.1) განტოლებათა სისტემა შეიძლება წარმოვადგინოთ ვექტორულ მატრიცული ფორმით:

$$AX = B \tag{2.2}$$

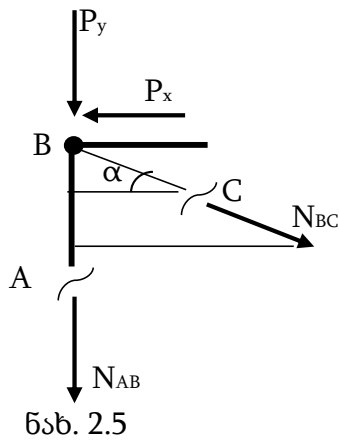
სადაც

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} y_{1p} \\ y_{2p} \\ \dots \\ y_{np} \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

(2.2.) განტოლებათა სისტემის ამონახსნი შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

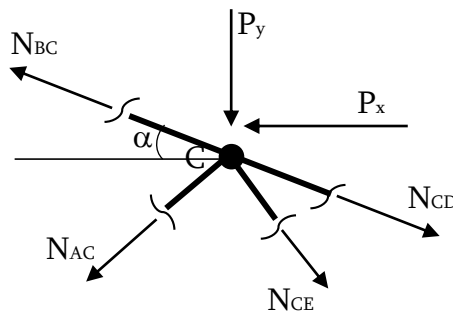
$$X = A^{-1}B$$

(2.1) განტოლებათა სისტემის შედგენისათვის ჩავწეროთ წონასწორობის განტოლებები ნახ. 2.3.-ზე გამოსახული ფერმის  $ABCD F K L E$  კვანძებისათვის.



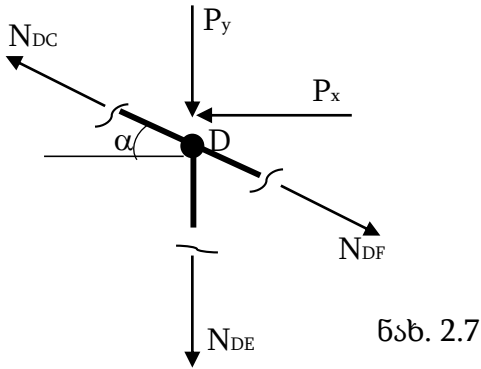
$$\begin{cases} N_{BC} \cdot \sin \alpha + N_{AB} + P_y = 0 \\ N_{BC} \cdot \cos \alpha - P_x = 0 \end{cases} \tag{2.4}$$

ნახ. 2.5

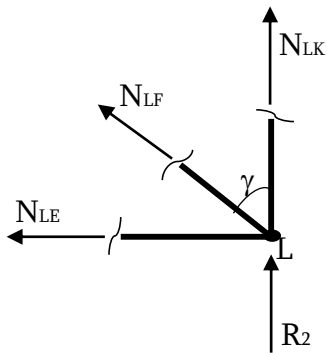


ნახ. 2.6.

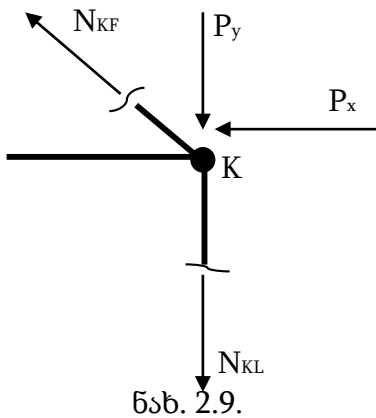
$$\begin{cases} N_{BC} \cos \alpha + P_x - N_{CD} \cos \alpha + N_{AC} \sin \beta - N_{CE} \sin \beta = 0 \\ P_y + N_{CE} \cos \beta + N_{AC} \cos \beta + N_{CD} \sin \alpha - N_{BC} \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$



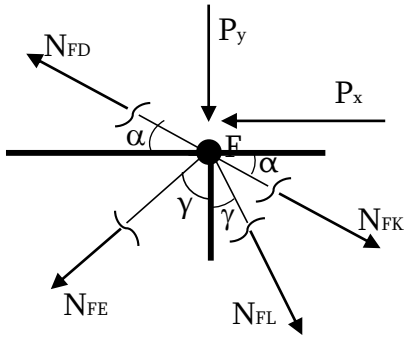
$$\begin{cases} -N_{DC} \cos \alpha - P_x + N_{DF} \cos \alpha = 0 \\ P_y + N_{DE} - N_{DC} \sin \alpha + N_{DF} \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$



$$\begin{cases} N_{LF} \cdot \sin \gamma + N_{LE} = 0 \\ N_{LF} \cos \gamma + N_{LK} + R_2 = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

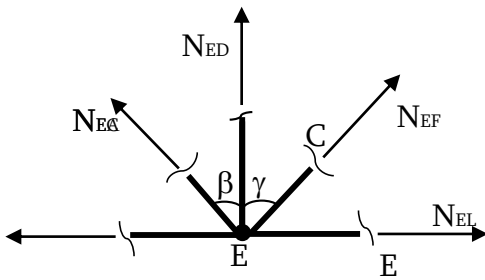


$$\begin{cases} P_y + N_{KL} - N_{KF} \sin \alpha = 0 \\ N_{KF} \cos \alpha + P_x = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$



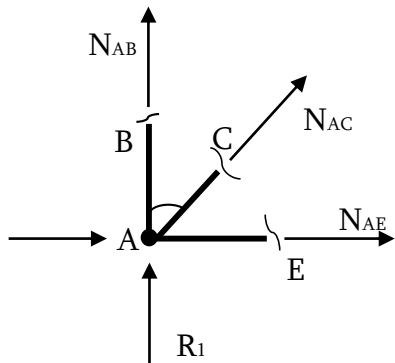
ნახ. 2.10.

$$\begin{cases} N_{FK} \cos \alpha - N_{FD} \cos \alpha + N_{FL} \sin \gamma - N_{FE} \sin \gamma - P_x = 0 \\ N_{FK} \sin \alpha - N_{FD} \sin \alpha + N_{FL} \cos \gamma + N_{FE} \cos \gamma + P_y = 0 \end{cases} \quad (2.9)$$



ნახ. 2.11

$$\begin{cases} N_{ED} + N_{EF} \cos \gamma + N_{Ec} \cos \beta = 0 \\ N_{EF} \sin \gamma + N_{EL} - N_{Ec} \sin \beta - N_{EA} = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$



ნახ. 2.12

$$\begin{cases} N_{AB} + N_{AC} \cdot \cos \beta + R_1 = 0 \\ N_{AC} \cdot \sin \beta + N_{AE} + R = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$\begin{aligned} N_{AB} = X_1; \quad N_{BC} = X_2; \quad N_{AC} = X_3; \quad N_{CD} = X_4; \quad N_{CE} = X_5; \quad N_{DF} = X_6; \\ N_{FE} = X_7; \quad N_{DE} = X_8; \quad N_{FL} = X_9; \quad N_{FK} = X_{10}; \quad N_{KE} = X_{11}; \quad N_{LE} = X_{12}; \\ N_{AE} = X_{13}; \quad R_1 = X_{14}; \quad R = X_{15}; \quad R_2 = X_{16}; \end{aligned} \quad (2.12)$$

განტოლებები, (2.4), (2.5), (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), (2.10), (2.11) და საყრდენების

რექაციის ძალების განმსაზღვრელი განტოლებები ჩავწერთ შემოღებული აღნიშვნებით:

$$\begin{aligned}
 \cos \alpha X_2 &= P \sin \alpha \\
 X_1 + \sin \alpha X_2 &= -P \cos \alpha \\
 X_{10} \cos \alpha &= -P \sin \alpha \\
 X_{11} - X_{10} \sin \alpha &= -P \cos \alpha \\
 X_2 \cos \alpha - X_4 \cos \alpha + X_3 \sin \beta - X_5 \sin \beta &= -P \sin \alpha \\
 X_5 \cos \beta + X_3 \cos \beta + X_4 \sin \alpha - X_2 \sin \alpha &= -P \cos \alpha \\
 -X_4 \cos \alpha + X_6 \cos \alpha &= P \sin \alpha \\
 X_8 - X_4 \sin \alpha + X_6 \sin \alpha &= -P \cos \alpha \\
 X_9 \sin \gamma + X_{12} &= 0 \\
 X_9 \cos \gamma + X_{11} + X_{16} &= 0 \\
 X_{10} \cos \alpha - X_6 \cos \alpha + X_9 \sin \gamma - X_7 \sin \gamma &= P \sin \alpha \\
 X_{10} \sin \alpha - X_6 \sin \alpha + X_9 \cos \gamma + X_7 \cos \gamma &= -P \sin \alpha \\
 X_8 + X_7 \cos \gamma + X_5 \cos \beta &= 0 \\
 X_7 \sin \gamma + X_{12} - X_5 \sin \beta - X_{13} &= 0 \\
 X_1 + X_3 \cos \beta + X_{14} &= 0 \\
 X_{13} + X_3 \sin \beta + X_{15} &= 0
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

(2.13) წრფივი განტოლებათა სისტემა აღწერს რვა კვანძიანი ფერმის სტატიკას ღეროებში აღძრული ნორმალური ძალების განსაზღვრისათვის. განტოლებათა სისტემის ამოხსნა საკმაოდ შრომატევადია და მოსახერხებელია რიცხვითი მეთოდის გამოყენება.

თუ (2.13) განტოლებათა სისტემას ჩავწერთ (2.2) ფორმით, მაშინ (2.3) ფორმულაში აღნიშვნების შესაბამისად გვაქვს:

$$X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \\ X_{13} \\ X_{14} \\ X_{15} \\ X_{16} \end{Bmatrix}, \quad B = \begin{Bmatrix} P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ -P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ -P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ 0 \\ 0 \\ P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

$$A = \begin{Bmatrix} 0 & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \beta & -\cos \alpha & -\sin \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \beta & \sin \alpha & \cos \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \gamma & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \gamma & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\cos \alpha & -\sin \gamma & 0 & \sin \gamma & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \gamma & 0 & \cos \gamma & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \beta & 0 & \cos \gamma & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \beta & 0 & \sin \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cos \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{Bmatrix} \quad (2.15)$$

რიცხვითი გაანგარიშებისათვის შემოვიღოთ უგანზომილებო სიდიდეები შემდეგი სახით:  $\bar{X}_i = X_i / P \quad i = 1, 2, \dots$ , (2.15) მატრიცა არ შეიცვლება, ხოლო  $X$  და  $B$  ვექტორები ჩაიწერება ასე:

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \\ X_{13} \\ X_{14} \\ X_{15} \\ X_{16} \end{pmatrix} \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ 0 \\ 0 \\ \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

(2.16) მატრიცების გათვალისწინებით (2.2) განტოლებათა სისტემა უგანზომილებო სიდიდეებში ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$A \bar{X} = \bar{B} \quad (2.17)$$

წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემა ეფექტურად ამოიხსნება რიცხობრივად გაუსის მეთოდით.[17]

კვეთის ანგარიში:

(2.17) ალგებრულ განტოლებათა სისტემის რიცხვითი ამონახსნის პოვნის შემდეგ ვადგენთ ღეროს, რომელშიც აღიმკვრება აბსოლუტური მნიშვნელობით მაქსიმალური ნორმალური ძალა და გავიანგარიშებთ მაქსიმალური ძაბვის მნიშვნელობას. სიმტკიცის პირობიდან [3].

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\text{ღ6}}}{n}$$



სადაც,  $\sigma_{\text{დნ}}$  - მასალის დენადობის ზღვარია,  $n$  - მარაგის კოეფიციენტი.

მაქსიმალური ძაბვა ტოლია:

$$\sigma_{\text{max}} = \left| \bar{X}_{i \text{max}} \right| P / A; \quad (A \text{ განივკვეთის ფართობი}).$$

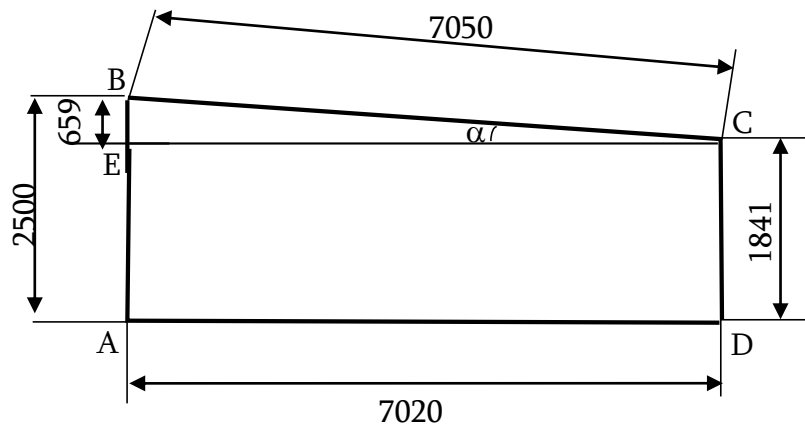
შესაბამისად, სიმტკიცის პირობიდან გვაქვს:

$$\frac{\left| \bar{X}_{i \text{max}} \right|}{A} P \leq \frac{\sigma_{\text{დნ}}}{n} \quad (2.18)$$

(2.18) პირობიდან შეიძლება განვსაზღვროთ ძალის სიდიდე  $P$  თუ მოცემულია ღეროს განივი კვეთის ფართობი ან პირიქით.

## 2.2. შენობის გადახურვის ღეროვანი ლითონკონსტრუქციის გაანგარიშება

საანგარიშოდ აღებულია ღეროვანი ლითონკონსტრუქცია, რომლითაც მოწყობილია შენობის გადახურვა, რომლის საყრდენებს შორის მანძილია 7020 მმ. გადახურვის ერთი მხრის სიმაღლეა 1841 მმ, მეორის კი 2500 მმ (ნახ. 2.12). გადახურვის დახრის კუთხის საპოვნელად გამოვთვალოთ სიმაღლეებს შორის სხვაობა  $2500 - 1841 = 659$  მმ.



ნახ. 2.13.

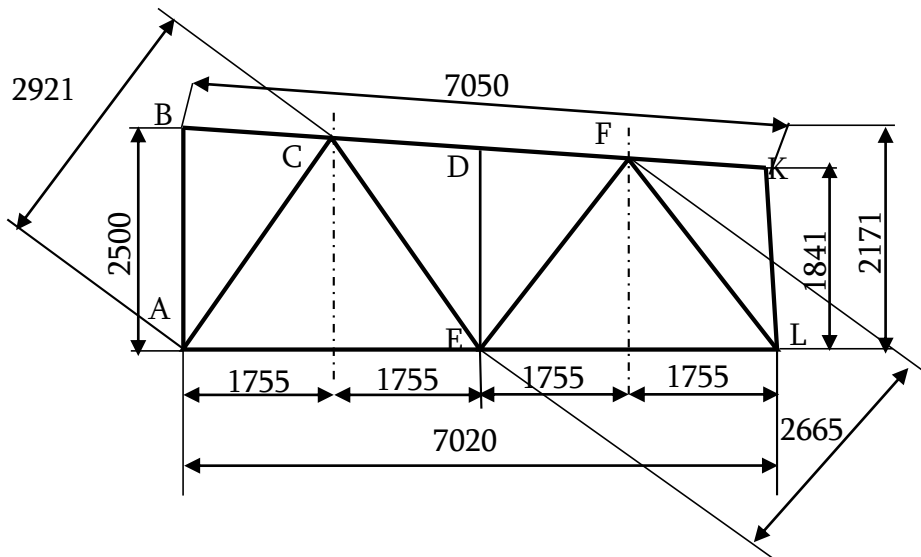
ნახაზი 2.13.-ის მიხედვით

$$BC^2 = BE^2 + EC^2$$

$$BC = \sqrt{434281 + 49280400} = \sqrt{49714624} \approx 7050 \text{ მმ.}$$

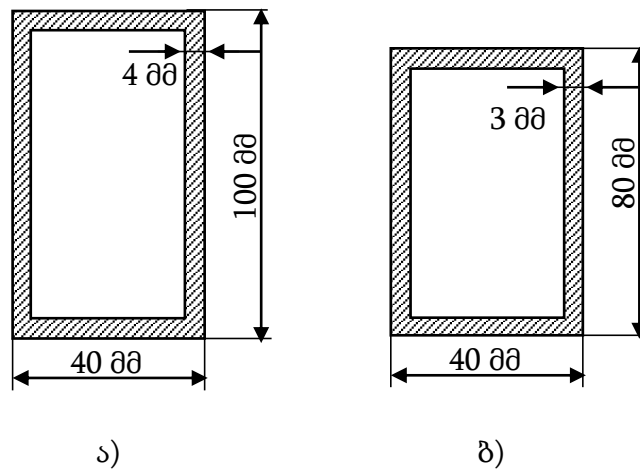
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2500 - 1841}{7020} = 0,09387$$

$$\operatorname{tg} \alpha \approx 0,094$$



ნახ. 2.14.

საანგარიშო ღეროვანი კონსტრუქციის (ფერმის) ზედა და ქვედა სარტყლის განივკვეთის ზომებია: 40X100X4მმ. ხოლო დგარების და ირიბანების 40X100X3მმ (ნახ. 2.15).



ნახ. 2.15.

$$|AC|=|CE|$$

ნახაზი 2.14.-ის მიხედვით AC და CE ირიბანების ზომა ერთმანეთის ტოლია და ასევე EF და FL ირიბანებიც ტოლია  $|EF|=|FL|$ .

ვიანგარიშით კონსტრუქციის საკუთარი წონა:

$$(40 \text{ მმ} + 100 \text{ მმ}) \cdot 2 \cdot 4 \text{ მმ} = 1120 \text{ მმ}^2.$$

$$1120 \text{ მმ}^2 \cdot (7020 \text{ მმ} + 7050 \text{ მმ}) = 15758400 \text{ მმ}^3 = 0,0158 \text{ მ}^3$$

$$m_1 = 7800 \cdot 0,0158 = 123,24 \text{ კგ.}$$

$$m_1 g = 1234,4 \text{ ნ.}$$

$$(40 \text{ მმ} + 80 \text{ მმ}) \cdot 2 \cdot 3 \text{ მმ} = 720 \text{ მმ}^2$$

$$720 \text{ მმ}^2 \cdot (2921 \text{ მმ} + 2921 \text{ მმ} + 2665 \text{ მმ} + 2665 \text{ მმ}) = 8043840 \text{ მმ}^3 = 0,08 \text{ მ}^3$$

$$m_2 = 7800 \cdot 0,08 \text{ მ}^3 = 62,741 \text{ კგ.}$$

$$m_2 g = 627,41 \text{ ნ.}$$

$$m_1 g + m_2 g = (1234,4 \text{ ნ} + 627,416 \text{ ნ}) = 1861 \text{ ნ.}$$

ღეროვანმა კონსტრუქციამ (ფერმამ) უნდა აიღოს დატვირთვა  $\approx 300000 : 12 = 25000 \text{ კგ.}$

საწყისი წონა 186 კგ.

$$q = 250000 \text{ ნ} : 7,05 \text{ მ} = 35460 \text{ ნ/მ}$$

$$q = 3,55 \text{ ნ/მ}$$

$$p = 250000 \text{ ნ} : 5 = 50000 \text{ კგ.}$$

$$p = 300000 : 18 : 5 : 3 = 1,1 \text{ ტ.}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}} = 0,094 \quad \frac{\sin^2 \alpha}{1 - \sin^2 \alpha} = 0,008836$$

$$\frac{\sin \alpha}{1 - \sin^2 \alpha} = 0,094$$

$$Px = P \sin \alpha \quad \frac{1}{0,008836} = \frac{1 - \sin^2 \alpha}{\sin^2 \alpha}$$

$$\frac{1}{\sin^2 \alpha} - 1 = 113,17 \quad \frac{1}{\sin^2 \alpha} = 114,17$$

$$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{114,17}} = \frac{1}{\sqrt{114,17}} \quad \sin \alpha = 0,093$$

$$\cos \alpha = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{0,093}{0,94} \quad \cos \alpha = 0,989$$

$$R = 5Px = 5P \sin \alpha = 0,465P.$$

$$\sum M_A = 0$$

$$R_1 = 2,5 Py$$

$$R_2 \cdot 7020 + Px[(1841 + 2171 + 2500 + 1755 \operatorname{tg} \alpha + 2171 + 1755 \operatorname{tg} \alpha)] - Py \cdot 17550 = 0$$

$$R_2 \cdot 7020 = Py \cdot 17550 - Px \cdot 9013$$

$$R_2 \cdot 7020 = P \cdot \cos \alpha \cdot 17550 - P \cdot \sin \alpha \cdot 3013 = P[17550 \cdot 0,989 - 9013 \cdot 0,033]$$

$$R_2 \cdot 7020 = P \cdot 16360,8 \quad R_2 = 2,33p$$

$$R_1 = 5Py - R_2$$

$$R_1 = 5P \cos \alpha - 2,33P$$

$$R_1 = 5P \cdot 0,989 - 2,33P = 2,57P$$

$$R_1 = 2,57P \quad R_2 = 2,33P$$

(2.4) ფორმულის მიხედვით

$$N_{BC} = \frac{P \sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{0,093P}{0,989} = 0,094P$$

2.2. პარაგრაფში ჩაწერილი განტოლებების ამოხსნით ვიპოვით:

$$N_{AB} = -P_y \cdot \sin \alpha$$

$$N_{AB} = -P \cos \alpha - N_{BC} \cdot \sin \alpha = -0,98P \cdot 0,093$$

$$N_{AB} = -0,989P$$

$$N_{AB} + N_{AC} \cdot \cos \beta + 2,57P = 0$$

$$\sin \beta = \frac{1755}{2921} = 0,6$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - 0,36}$$

$$\cos \beta = 0,8$$

$$N_{AC} = -\frac{-2,57p + N_{AB}}{\cos \beta}$$

$$N_{AC} = -1,98P$$

$$F^* = (4088 + 8088) \cdot 2 \cdot 388 = 72088^2$$

$$\sigma_{AC} = \frac{N_{AC}}{F^*} = \frac{1,98P^2}{720 \cdot 10^{-6} \delta} = 2,75 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot P6/\delta^2$$

$$\sigma_{AC} = 2750P6/\delta^2$$

$$2750P6/\delta^2 \leq [6]$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{გ6}}}{n} \quad \sigma_{\text{გ6}} = 250 \text{მპა} \quad n = 5$$

$$2750 \cdot p \leq 50 \cdot 10^6$$

$$P \leq \frac{50 \cdot 10^6}{27506} \leq 0,0182 \cdot 10^6 \text{გ} \leq 182006$$

(2.5) ფორმულის მიხედვით

$$\begin{cases} N_{BC} \cos \alpha \sin \alpha + P_x \sin \alpha - N_{CD} \cos \alpha \sin \alpha + N_{AC} \sin \beta \sin \alpha - N_{CE} \sin \beta \sin \alpha = 0 \\ P_y \cos \alpha + N_{CE} \cos \beta \cos \alpha + N_{AC} \cos \beta \cos \alpha + N_{CD} \sin \alpha \cos \alpha - N_{BC} \sin \alpha \cos \alpha = 0 \end{cases}$$

$$P_x \sin \alpha + N_{AC} (\sin \beta \sin \alpha + \cos \beta \cos \alpha) + P_y \cos \alpha = N_{CE} (\sin \beta \sin \alpha - \cos \beta \cos \alpha)$$

$$N_{CE} = \frac{P \sin \alpha \cdot \sin \alpha - 1,98P(\sin \beta \sin \alpha + \cos \beta \cos \alpha) + P \cos \alpha \cos \alpha}{\sin \beta \sin \alpha - \cos \beta \cos \alpha}$$

$$N_{CE} = \frac{P \cdot 0,0087 - 1,98(0,0558 + 0,784) + 0,9604}{0,0558 - 0,784} P$$

$$N_{CE} = \frac{P(-0,6937)}{(-0,728)} = 0,953P$$

$$N_{CD} = \frac{N_{BC} \cos \alpha + P \sin \alpha + N_{AC} \sin \beta - N_{CE} \sin \beta}{\cos \alpha}$$

$$N_{CD} = \frac{0,094 \cdot 0,98 + 0,093 - 1,98 \cdot 0,6 - 0,953 \cdot 0,6}{0,98}$$

$$N_{CD} = -1,6P$$

$$\sigma_{CD} = \frac{-1,6P}{1120 \cdot 10^{-6} \delta^2} = 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 \text{გ}/\delta^2 \approx 14006/\delta^2$$

(2.6) ფორმულის მიხედვით

$$N_{DF} = \frac{P \sin \alpha - 1,6P \cos \alpha}{\cos \alpha}$$

$$N_{DF} = P \frac{0,093 - 1,6 \cdot 0,6}{0,98} = -1,5P$$

$$N_{DF} = N_{DC} \sin \alpha - N_{DF} \sin \alpha - P \cos \alpha = [-1,6 \cdot 0,093 - (-1,5) \cdot 0,093 - 0,98]P$$

$$N_{DE} = -0,99P$$

(2.7) ფორმულის მიხედვით

$$N_{LF} = \frac{-N_{LK} - R_2}{\cos \alpha}$$

$$\sin \alpha = \frac{1755}{2665} = 0,659 \quad N_{LF} \frac{0,99P + 2,33P}{0,75} = -1,787P$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - 0,659^2} = \sqrt{0,966} = 0,75$$

$$N_{LF} \cos \alpha + P_x = 0 \quad N_{LF} = -\frac{P_x}{\cos \alpha} = -\frac{p \sin \alpha}{\cos \alpha}$$

$$N_{LF} = -0,094P$$

(2.8) ფორმულის მიხედვით

$$N_{KL} = N_{KF} \sin \alpha - P_y$$

$$N_{KL} = (-0,094 \cdot 0,093 - 0,98)P = -0,99P$$

მცირენახშირბადიანი ფოლადისათვის  $\sigma_{\text{ღ6}} = \sigma_{\text{ღ6}} = 250 \text{ მპა}$ , მარაგის კოეფიციენტი ავირჩიოთ  $n = 5$ . თხელკედლიანი მართკუთხა კვეთისათვის  $40 \times 80 \times 3$  (მმ).

$$\bar{X}_{i \max} = 1,98$$

$$\text{განივი კვეთის ფართი } A = (40 + 80) \cdot 2 \cdot 3 = 720 \cdot 10^{-6} \text{ მ}^2 \quad (2.18) \text{ პირობიდან ძალის}$$

სიდიდე

$$P \leq \frac{\sigma_{\text{ღ6}} \cdot A}{n \cdot \bar{X}_{i \max}} \quad (2.19)$$

$$P \leq \frac{250 \cdot 10^6 \cdot 720 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 1,98} = 18200 \text{ (ნ)}$$

განვსაზღვროთ კონსტრუქციის წონა (ნახ. 2.14. ა)-ზე მოცემული გომეტრიული ზომების მიხედვით. მასალის სიმკვრივე  $P = 7800 \text{ კგ/მ}^3$ . თხელკედლიანი კვეთისათვის  $= 40 \times 100 \times 4$  (მმ) განივი კვეთის ფართი

$$A_1 = (40+100) \cdot 2 \cdot 4 = 1120 \text{ მმ}^2.$$

$$G_2 = m_2 g = 720 \cdot 10^{-6} (2 \cdot 2921 + 2 \cdot 2665) \cdot 10^{-3} \cdot 7800 \cdot 10 = 627,4 \text{ (6)}$$

$$G_1 = m_1 g = 1120 \cdot 10^{-6} (7020 + 7050) \cdot 10^{-3} \cdot 7800 \cdot 10 = 1226,5 \text{ (6)}$$

$$G_3 = m_3 g = 720 \cdot 10^{-6} (1841 + 2171 + 2500) \cdot 10^{-3} \cdot 7800 \cdot 10 = 365,7 \text{ (6)}$$

$$\text{კონსტრუქციის წონა } G = G_1 + G_2 + G_3 \approx 2220 \text{ (6)}$$

### 2.3. ძირითადი განტოლებების რიცხვითი ამოხსნა Mathcad - ის სისტემაში

(2.3) წრფივ განტოლებათა სისტემის ანალიზურად ამოხსნა მოცემულია 2.3 პარაგრაფში. თექვსმეტუცნობიანი განტოლებათა სისტემის ანალიზური ამოხსნა საკმაოდ შრომატევადია. ფერმის გეომეტრიის ყოველი ცვლილებისათვის საჭიროა განტოლებათა სისტემის ამოხსნა და კვეთის ანგარიში.

განტოლებათა სისტემის ამოხსნა მოსახერხებელია რიცხობრივად. მით უფრო წრფივ განტოლებათა სისტემის ამოხსნის სტანდარტული პროგრამები, ჩაშენებული ფუნქციები არის პერსონალური კომპიუტერებისათვის თავსებად ყველა სისტემაში. ჩვენ ავირჩიეთ Mathcad - ის სისტემა [23].

როგორც ცნობილია, წრფივ განტოლებათა სისტემას აქვს ერთადერთი ამონახსენი, თუ A მატრიცა არის არაგადაგვარებული (არასინგულარული) ანუ მისი დეტერმინანტი არ არის ნულის ტოლი.

A მატრიცა არის კვადრატული მარტიცა (16X16). წრფივ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა კვადრატული მატრიცით მათემატიკური თვალსაზრისით არ წარმოადგენს სირთულეს თუ ის არ არის ძალიან დიდი. (2.17) მატრიცული სახით ჩაწერილი განტოლებები (2.15) და (2.16) მატრიცების გათვალისწინებით, Mathcad - ის სისტემაში ამოიხსნება ჩაშენებული ფუნქციით *ISOLVE (A,B)* [4]

A - სისტემის კოეფიციენტების მატრიცაა (2.15) მატრიცა.

B - მარჯვენა მხარეების ვექტორია, მეორე მატრიცა (2.16)

რიცხვითი გაანგარიშებისათვის საჭიროა ფერმის გეომეტრიის პარამეტრების შეტანა:

$$h = 2500 \text{ მმ} \quad h_0 = 1841 \text{ მმ} \quad l_0 = 1755 \text{ მმ}$$

$$AL = 4 l_0 \quad LF = 2665 \text{ მმ} \quad AC = 2921 \text{ მმ}$$

$$\alpha = \text{azctg} [(h - h_0) / |AL|]; \quad \gamma = \text{azc sin} l_0 / |KFI| \quad \beta = \text{azc sin} l_0 / |AC|$$

საჭიროა ასევე შეტანილ იქნას A და B მატრიცები. ცხრილში 2.1. მოცემულია რიცხვითი გაანგარიშების შედეგები  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_{16}$  უცნობებისათვის. ცხრილში ბოლო სამი რიცხვი შეესაბამება რეაქციის ძალების მნიშვნელობებს.

მაქსიმალური განსხვავება რიცხვით გაანგარიშებასა და ანალიზურ ამონახსენს შორის ნაკლებია 3%-ზე.

რიცხვითი გაანგარიშების შედეგების მიხედვით:

$$\left| \bar{X}_{i \max} \right| = \left| \bar{X}_3 \right| = 2,038$$

ჩვენ მიერ 2.3 პარაგრაფში შესრულებული გაანგარიშებისას  $|X_{i \max}|$  მიღებული იქნა 1,98 - ის ტოლი.

Mathcad-ის სისტემაში შედგენილი პროგრამა მნიშვნელოვნად ამცირებს გაანგარიშების მოცულობას და საშუალებას იძლევა ავტომატიზირებულ რეჟიმში შევასრულოთ რიცხვითი ექსპერიმენტები.

	0
0	-1.004
1	0.094
2	-2.038
3	-1.643
4	0.996
5	-1.549
6	0.277
7	-1.004
8	-1.781
9	-0.094
10	-1.004
11	1.173
12	0.757
13	2.634
14	0.467
15	2.345



### თავი III

## თხელკედლიანი პროფილებისაგან დამზადებული შენადული სამშენებლო კონსტრუქციების ოპტიმალური ტექნოლოგიების დამუშავება

ლითონის კონსტრუქციების დამზადებისას მისი ცალკეული ელემენტებს ერთმანეთთან შესაერთებლად გამოიყენება შენადული, ჭანჭიკური და მოქლონური შეერთებები. შეერთების სახის შერჩევა დამოკიდებულია შესაერთებელი ელემენტების ფორმაზე, შეერთების მუშაობის პირობებზე კონსტრუქციის ელემენტების განლაგებაზე და სხვა.

აღნიშნული შეერთების ტიპებიდან ყველაზე მეტად გავრცელებულია შენადული შეერთება. მისი გამოყენების შემთხვევაში საჭიროა გაცილებით ნაკლები დრო ლითონის კონსტრუქციების დასამზადებლად, ვიდრე ჭანჭიკური და მოქლონური შეერთებისას. შედუღებით შეერთების გამოყენებისას შესაძლებელია ნებისმიერი სირთულის კონსტრუქციის დამზადება. შედუღების გამოყენება უზრუნველყოფს შეერთების მაღალ სიმტკიცეს, პროცესის ავტომატიზაციას, შენადული შეერთების მაღალ ხარისხს, სამუშაოს შესრულებას არამარტო საქარხნო პირობებში, არამედ სამშენებლო მოედანზე სამონტაჟო სამუშაოების შესასრულებლად. აღნიშნული განაპირობებს მის გამოყენებას ყველა ტიპის ლითონის კონსტრუქციების დასამზადებლად. შედუღებით შეერთებაზე მოდის დამზადებული ლითონის კონსტრუქციების 80%-ზე მეტი [33].

ლითონის კონსტრუქციების დასამზადებლად შედუღების ძირითადი ხერხია დნობით ელექტრორკალური შედუღება.

შედუღების ამ ხერხის გამოყენების შემთხვევაში შენადული შეერთების მისაღებად შედუღებულსას აბაზანაში ტემპერატურა 1800°C აღწევს და ცვლის ნაკერის და ნაკერმიმდებარე ზონის სტრუქტურას და ლითონის ქიმიური შედგენილობის და მექანიკური თვისებების მიხედვით ქმნის დეფექტების (ცივი და ცხელი ბზარები, ფორები) წარმოქმნის ალბათობას. გარდა ამისა, შესაერთებელი

დეტალების არათანაბარი გახურება-გაცივების გამო წარმოიქმნება შედუღების მახვები და დეფორმაციები.

იმის გათვალისწინებით, რომ შენადული შეერთების მიმართ წაყენებული ძირითადი პირობაა ლითონის და შენადული შეერთების თანაბარსიმტკიცეობა, დეფექტების წარმოქმნის გარეშე აკრება-შედუღების ტექნოლოგიის დამუშავებისას აუცილებელია ყველა იმ ნიუანსის გათვალისწინება, რომელიც უზრუნველყოფს ხარისხიანი უდეფექტო შენადული შეერთების მიღებას, განსაკუთრებით თხელკედლიანი კონსტრუქციების შემთხვევაში.



სურ. 19. უდეფექტო შენადული შეერთება

ყოველივე ზემოთქმულის გათვალისწინებით ყურადღებით უნდა იქნას შერჩეული მასალა კონსტრუქციების დასამზადებლად, საშემდუღებლო მასალები, შედუღების ხერხი და მეთოდი, შედუღების რეჟიმები. გატარებული უნდა იქნას ღონისძიებები ნარჩენი ძაბვებისა და დეფორმაციების შესამცირებლად. სწორად იქნას შერჩეული ნაკერების შესრულების თანმიმდევრობა ძაბვების კონცენტრაციის თავიდან ასაცილებლად.



სურ. 20. სწორად შესრულებული ნაკერი



სურ. 21. უდეფექტო შენადული შეერთება

კონსტრუქციების დამზადების დროს ყურადღება უნდა გამახვილდეს არა წარმოქმნილი დეფექტების აღმოჩენაზე და გამოსწორებაზე, არამედ მათი წარმოქმნის მიზეზების გაფრთხილებაზე. აღნიშნული პრობლემების მოგვარება გაცილებით რთულია თხელკედლიანი კონსტრუქციების შედუღებით დამზადების

შემთხვევაში. იმის გათვალისწინებით, რომ როგორც ჩვენთან, ისე საზღვარგარეთ თხელკედლიანი კონსტრუქციების დასამზადებლად, ძირითადად იყენებენ ჭანჭიკებით, ქანჩებით და მოქლონებით შეერთებას. ამის მიზეზი შეიძლება იყოს როგორც შემკვეთების, ისე დამპროექტებლების კონსერვატიზმი თხელკედლიან კონსტრუქციებზე და მისი შედეგებით შეერთების გამოყენებაზე უარს ხსნიან იმით, რომ იზრდება ისეთი ტექნოლოგიური ოპერაციების მოცულობა, როგორცაა სითბოს არინება შენადული შეერთებიდან, შედეგების აბაზანის გაცივება და საელექტროდე ლითონის დნობის სიჩქარე [35].

### **3.1. მშენებლობაში გამოყენებული ფოლადები**

#### **3.1.1. სამშენებლო ფოლადები და მათი კლასიფიკაცია**

სამშენებლო კონსტრუქციების დაპროექტების, წარმოების და ექსპლუატაციის პროცესზე მნიშვნელოვანი გავლენა აქვს ფოლადების (ლითონის) ქიმიურ და მექანიკურ თვისებებს.

მშენებლობაში უმთავრესად გამოიყენება ჩვეულებრივი ხარისხის საკონსტრუქციო ფოლადები.

სამშენებლო კონსტრუქციებში ლითონის მუშაობა ხასიათდება მისი სიმტკიცით, პლასტიკურობით, დრეკადობით, შედეგადობით და სხვა მექანიკური თვისებებით, რომლებიც მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ამ ფოლადების ქიმიურ შედგენილობაზე.

სამშენებლო კონსტრუქციებში ფოლადის გამოყენების ერთ-ერთი განმსაზღვრელი ფაქტორია მათი საკმაო პლასტიკურობა მაღალ სიმტკიცესთან ერთად.

ლითონის კონსტრუქციების დასამზადებლად ფოლადის გამოყენების ერთ-ერთი მთავარი განმსაზღვრელია მასში ნახშირბადის შემცველობა. ლითონის კონსტრუქციების დასამზადებლად შეიძლება გამოყენებული იქნას დაბალნახშირბადიანი (0,08-0,25%), საშუალონახშირბადიანი (0,25-0,5%) და

მაღალნახშირბადოვანი ფოლადები (0,6-1,2%). თუმცა, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული სამშენებლო კონსტრუქციების დასამზადებლად, ძირითადად გამოიყენება დაბალნახშირბადიანი ფოლადები. ეს ფოლადები ხასიათდებიან მაღალი პლასტიკურობით და კარგი შედუღებადობით. არ გააჩნიათ მყიფე რღვევისადმი მიდრეკილება. დამატებითი ტექნოლოგიური ოპერაციების გარეშე შეიძლება ძირითადი ლითონის ტოლფასი შენადული შეერთების მიღება დეფექტების გარეშე, რაც სავსებით პასუხობს სამშენებლო ფოლადების მიმართ წაყენებულ მოთხოვნებს [33].

საკონსტრუქციო ფოლადებს მექანიკური თვისებები მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული მათში მავნე მინარევების (გოგირდი, ფოსფორი, ჟანგბადი, აზოტი) შემცველობაზე, რომლებიც მნიშვნელოვნად ზრდიან სიმყიფეს და ამიტომ მათი შემცველობა მკაცრად კონტროლდება. ასევე მნიშვნელოვანია მათში მალეგირებელი ელემენტების (ნიკელი, ქრომი, მოლიბდენი) შემცველობის კონტროლი, რომლებიც ზრდიან სიმტკიცეს, პლასტიკურობას და შედუღებადობას, თუმცა იზრდება წრთობადობაც.

განჯანგვის ხერხის მიხედვით მშენებლობაში გამოიყენება მშვიდი და ნახევრადმშვიდი ფოლადები.

ნორმატივებიდან გამომდინარე, სამშენებლო კონსტრუქციების დიდი პასუხისმგებლობიდან გამომდინარე, მათ დასამზადებლად გამოიყენება გ. ჯგუფის ფოლადები, ქიმიური შედგენილობისა და მექანიკური შედგენილობისა და მექანიკური თვისებების საგარანტიო მახასიათებლებით.

მექანიკური თვისებების მიხედვით, საკონსტრუქციო ფოლადები დაყოფილია: ჩვეულებრივი (C 235 - C 285), ამაღალი (C 345 - C 390) და მაღალი სიმტკიცის (C 440- - C 590) ფოლადებად.

მშენებლობაში კონსტრუქციების დასამზადებლად ყველაზე მეტად გამოიყენებულია შემდეგი საკონსტრუქციო ფოლადები - C 235 (B CT3KN2), c245 (BCT3nc6), c255 (BCT 3cn5) და ამაღლებული სიმტკიცის ფოლადები - C 345 (09ГZ), C 345 (14 ГZ), C 345 (09 ГZC), C 390 (10T2C1), C 390 (10 XCHD) [2].

### 3.1.2. მშენებლობაში გამოყენებული ფოლადების ქიმიური შედგენილობა და მექანიკური თვისებები

როგორც აღვნიშნეთ, მშენებლობაში ძირითადად გამოიყენება მცირენახშირბადიანი და მცირენახშირბადიანი მცირედლეგირებული ფოლადები.

სამშენებლო კონსტრუქციების წარმოებისას მნიშვნელოვანია, მათი დამზადებისათვის გამოყენებული ფოლადებს როგორც ქიმიური შედგენილობის, ისე მექანიკური თვისების ანალიზი ამ კონსტრუქციების მუშაობის პირობებისა და დატვირთვების გათვალისწინებით.

ფოლადის მექანიკური თვისებების ძირითადი მახასიათებლებია: სიმტკიცე, დრეკადობა, პლასტიკურობა და მიდრეკილება მყიფე რღვევისადმი: თითოეული ეს მახასიათებელი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ფოლადის კონსტრუქციების მუშაობაზე. მაგრამ განსაკუთრებით ყველაზე მაღალი საშიშროება მაშინაა, როდესაც სამუშაო კვებებში წარმოიქმნება სხვადასხვა სახის შესუსტებები. როგორც ცნობილია ლითონის სამშენებლო კონსტრუქციები 80% მეტი შედუღებით მზადდება და ხშირად ძირითადი ლითონიდან შენადული ნაკერებზე გადასვლისას ადგილი აქვს ჩანაჭრებს და ასევე ფუძის ნაკერის შეუდუღებლობას, რის გამოც ამ შესუსტების ადგილებში მათ ნაპირებთან წარმოიქმნება ძაბვების კონცენტრაცია, რომელთა მნიშვნელობა ორ-სამჯერ აღემატება ნორმალურ  $\sigma$  ძაბვებს შესუსტებულ კვებებში (ნახ. 20).

განსაკუთრებით საშიშ ზემოქმედებას სამშენებლო კონსტრუქციებზე ლითონის დაღლილობა ახდენს, რაც გამოიხატება ლითონის რღვევაში მრავალჯერ განმეორებადი, ნიშანცვალებადი + დატვირთვების ზემოქმედებისას. ასეთ შემთხვევაში კონსტრუქციის რღვევა, როგორც წესი მყისიერია მყიფე რღვევის გამო [26].

დაღლილობისაგან გამოწვეული რღვევისადმი კონსტრუქციის წინააღმდეგობას ამტანურანიანობა ეწოდება სამშენებლო კონსტრუქციების დაპროექტებისას, რომლებიც ნიშანცვლადი და დინამიკური დატვირთვის

პირობებში მუშაობენ, მიღებული ნორმები ითვალისწინებს საანგარიშო წინაღობების დაწევას, შენადული კონსტრუქციების და ძაბვების კონცენტრაციის გამომწვევი შეერთებების მოცულობის შემცირებას.

ცხრილებში №1 და №2 მოცემულია ზოგიერთი სამშენებლო ფოლადის ქიმიური შედგენილობა და მექანიკური თვისებები.

ცხრილი №1  $BCt3_{გა}$  და  $BCt3I_{გა}$  ფოლადების ქიმიური შედგენილობა

ქიმიური ელემენტების შემცველობა %									
მარ	C	S	M	G	I	C	S	P	
	i	n	z	Vi	u				
	0,14- 0,22	0,12- 0,30	0,40- 0,65	0,3- მდე	0,3- მდე	0,3- მდე	0,05- მდე	0,04- მდე	ფოლად ის მარკა
BCt3	0,14- 0,22	0,15- მდე	0,80- 1,10	0,3- მდე	0,3- მდე	0,3- მდე	0,05- მდე	0,04- მდე	

$BCt3_{გა}$  ფოლადის მექანიკური თვისებები ცხრილი #2

მპა $\delta_{\rho\delta}$	$\delta_{0,2}$ მპა	$\delta$ მპა	დარტყმითი სიბლანტე	
			-20°C	-20°C
230	250	460	0,5	0,5



### 3.2. საშემდუღებლო მასალები

ლითონის კონსტრუქციების დამზადებისას ძირითადი ლითონის ტოლფასი უდეფექტო შენადული შეერთების მისაღებად დიდი მნიშვნელობა აქვს საშემდუღებლო მასალების სწორ შერჩევას, რადგან საშემდუღებლო მასალები მონაწილეობენ შედუღების თხევადი აბაზანის დაცვაში მეტალურგიული პროცესების მიმდინარეობის ზონაში, ნაკერის ლითონის ქიმიური შედგენილობის რეგულირებაში მისი ლეგირების და განჟანგვის გზით, მავნე მინარევების (გოგირდი და ფოსფორი) შემცირებაში მათი წიდაში და ჟანგეულებში გადაყვანის გზით და სხვა.

საშემდუღებლო მასალების არჩევა ხდება უკვე შერჩეული შედუღების ხერხისა და მეთოდის გათვალისწინებით. როგორც 3.4 ქვეთავში არის აღნიშნული ჩვენ მიერ ფერმების დასამზადებლად და მათი მონტაჟისათვის შერჩეული იყო დამცავ აირებში ნახევრადავტომატური შედუღება და ხელით დნობადი ელექტროდით შედუღება. აღნიშნულის გათვალისწინებით საჭიროა დნობადი ელექტროდის, საშემდუღებლო მავთულის და დამცავი აირის შერჩევა [15].

**დამცავი აირი.** დაბალი ღირებულებებისა და არდეფიციტურობის გამო, ძირითადად დამცავ აირად ნახშირორჟანგი გამოიყენება, თუმცა ნახშირორჟანგი ინტენსიურად ჟანგავს გამდნარ ლითონს. მისი გამოყენების შემთხვევაში დიდი რაოდენობით თავისუფალი ჟანგბადის გამო აირულ ფაზაში საჭიროა რომ საშემდუღებლო მავთული შეიცავდეს მალეგირებელ დამატებით რაოდენობას, რომლებსაც დიდი სწრაფვა აქვთ ჟანგბადის მიმართ, ძირითადად ეს ელემენტებია მანგანუმი და სილიციუმი. ხშირ შემთხვევაში ამით აიხსნება საშემდუღებლო მავთულის მარკის არჩევა, გარდა ამისა, ნახშირორჟანგში შედუღებისას ადგილი აქვს გამდნარი ლითონის დანაკარგს მისი ინტენსიური გაშხეფვის გამო და დანაკარგის შესამცირებლად უკეთესია ნახშირორჟანგისა და არგონის ნარევის გამოყენება ( $80 CO_2 + 20\% Ar$ ), თუმცა არგონის დეფიციტის გამო ეს ყოველთვის არაა შესაძლებელი. ბალონებში, რომლებშიც მოთავსებულია ნახშირორჟანგი არ უნდა

იყოს წყალი. შედუღებაში სასურველია გამოყენებული იყოს მაღალი ხარისხის ნახშირორჟანგი, მაგრამ მისი დეფიციტურობის გამო გამოიყენება II ხარისხის ე. წ. კვების ტექნოლოგიაში გამოყენებული. ამ შემთხვევაში აუცილებელია აირის მოწოდების გზაზე დაყენებული იყოს ე. წ. გამომშრობი, წინააღმდეგ შემთხვევაში შენადულ ნაკრებში წარმოიქმნება ფორები და მცირდება შენადული შეერთების პლასტიკურობა [77].

### საშემდუღებლო მავთული

$CO_2$ -ში შედუღებისას შერჩეული უნდა იქნას ისეთი საშემდუღებლო მავთული, რომელიც შეიცავს სილიციუმისა და მანგანუმის გაზრდილ რაოდენობას მხუთავი აირის  $CO$ -ს წარმოქმნის შესაჩერებლად. დაბალნახშირბადიანი ფოლადების შედუღებისას სილიციუმის 0,2%-ზე მეტი და მანგანუმის 0,4%-ზე მეტი შემცველობა ხელს უშლის ფორების წარმოქმნას, რადგან ამ ელემენტებს აქვთ მეტი სწრაფვა ჟანგადისადმი, ვიდრე რკინას და იერთებენ ჟანგბადს, რითაც ურთიერთქმედებენ მასთან რკინის მაგივრად.

შესადუღებელი დეტალების კედლის ზომებიდან გამომდინარე ვირჩევთ საელექტროდე მავთულს  $Cb-08\Gamma 2C$ . შერჩეული მავთულის ქიმიური შედგენილობა მოცემულია ცხრილში №3

ელემენტების შემცველობა, % არაუმეტეს						
C	Si	Mn	Gz	Ni	S	P
0,05-0,11	0,70-0,95	1,80-2,10	0,2	0,25	0,025	0,03

დაბალნახშირბადოვანი  $BCt 3_{\text{გა}}$  ფოლადებს შედუღებისას ნაკერის ლითონის ქიმიური შედგენილობა განსხვავდება ძირითადი ლითონის ქიმიური შედგენილობისაგან. ეს სხვაობა გამოიხატება შენადულ ნაკერში ნახშირბადის შემცირებულ რაოდენობაში, რადგან საშემდუღებლო მავთულში ნახშირბადის

შემცველობა ნაკლებია, ვიდრე ძირითად ლითონში და სილიციუმისა და მანგანუმის მომატებულ შემცველობაში (მათი შემცველობა მავთულში მეტია, ვიდრე ძირითად ლითონში), ჩვენ მიერ შესწავლილი ხუთი ნიმუშის ქიმიურმა ანალიზმა აჩვენა ძირითადი ლითონისა და შენადული ნაკერის ასეთი შედგენილობა (ცხრილი №4).

შენადული ნაკერის და ძირითადი ლითონის ქიმიური შედგენილობა ცხრილი №4

	C	Si	Mn
ძირითადი ლითონი	0,15-0,22	0,10-0,30	0,40-0,65
ნაკერის ლითონი	0,10-0,15	0,20-0,45	0,60-0,74

ფოლადი  $BCT_{3\text{მმ}}$ -ის შედუღებისას ნაკერის ლითონის და ნაკერის მიმდებარე ზონის მექანიკური თვისებები ძირითადი ლითონის მექანიკურ თვისებებთან შედარებით განიცდიან მცირეოდენ ცვლილებას. რაც გამოიხატება გადახურების ზონის უმნიშვნელო განმტკიცებაში. გარდა ამისა,  $BCT_{3\text{მმ}}$  ფოლადების შედუღებისას შესაძლებელია დარტყმითი სიბლანტის შემცირება, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს კონსტრუქციის საიმედოობის შემცირება [24].

### ელექტროდები ხელით ელ. რკალური შედუღებისათვის

ნახშირბადოვანი ფოლადებისაგან დამზადებული საპასუხისმგებლო კონსტრუქციების შესადუღებლად კარგ შედეგას იძლევა  $VOHH 13/55$  მარკის ელექტროდის გამოყენება ( $\approx 50A$  ტიპის). ამ მარკის ელექტროდით შედუღება შეიძლება ვაწარმოოთ ყველა სივრცით მდგომარეობაში მუდმივ დენზე შებრუნებული პოლარობით. ამ ტიპის ელექტროდების უპირატესად ანალოგებთან შედარებით ითვლება ის, რომ მისი დახმარებით წარმოქმნილი ნაკერი ხასიათდება

კრისტალიზაციური ბზარების მიმართ მაღალი წინააღმდეგობით და წყალბადის შემცირებული შემცველობით. ამ ტიპის ელექტროდისათვის ღეროდ იყენებენ Cb-08 ან Cb-08A საშემდუღებლო მავთულებს, რომელიც უზრუნველყოფს ნაკერის ლითონის მაღალ სიბლანტეს. ამ ელექტროდების დაფრვაში ორგანული ჩანართების არარსებობა საშუალებას იძლევა ელექტროდები გამოვაშროდ 350-400°C -ზე, რაც უზრუნველყოფს ტენის მიმართ დაბალ მგრძნობელობას.

UOOH13/55 საშემდუღებლო ელექტროდების გამოყენებისას აუცილებელია განსაკუთრებული ყურადღება მივაქციოთ შესადუღებელი დეტალების ზედაპირს, რადგანაც ზედაპირზე არსებულ ჟანგს და ტექნიკურ ზეთს შეუძლია ფორების წარმოქმნა ნაკერში და შენადული შეერთების ექსპლუატაციის ვადის შემცირება. რკალის დაგრძელებაც უარყოფითად მოქმედებს ნაკერის ლითონის ხარისხზე. [64]

UOOH13/55 მარკის ელექტროდით შესრულებული ნაკერის მექანიკური თვისებები მოცემულია ცხრილში №5

ელექტროდის მარკა	$\delta_{ღენ}$ მკა	ნ <sub>s</sub> მკა	$\delta_1$ %	KCU კჯ/მ <sup>2</sup>
UOOH13/55	400-440	520-540	24-28	600

### 3.3. ძაბვების და დეფორმაციების გავლენა კონსტრუქციების

#### მუშაუნარიანობაზე და საიმედოობაზე

ბოლო წლებში მშენებლობაში შეინიშნება ტენდენცია, როდესაც სავაჭრო ცენტრებში, სპორტულ დარბაზებში და სხვა მსგავსი ტიპის შენობა-ნაგებობებში არ ხდება გადახურვის კონსტრუქციების შეფუთვა, რაც მოითხოვს ლითონის კონსტრუქციების ისეთ შედუღების ტექნოლოგიით დამზადებას, რომელიც უზრუნველყოფს მაღალ სიზუსტეს და ნარჩენი ძაბვების და დეფორმაციების მინიმუმამდე შემცირებას, რაც აუცილებელია არამარტო მათი საიმედოობის,

არამედ ვიზუალურის თვალსაზრისითაც.



სურ. 22. სავაჭრო ცენტრი „კარფური“, ქუთაისი, საქართველო



სურ. 23. სავაჭრო ცენტრი „კარფური“, ქუთაისი, საქართველო

შენადული კონსტრუქციების დამზადების პროცესში კონცენტრირებული სიტბოს წყაროს მოქმედების შედეგად წარმოიქმნება დროებითი და ნარჩენი ძაბვები. დროებით საშემდუღებლო ძაბვები წარმოიქმნებიან და არსებობენ შედუღებისას მხოლოდ გარკვეული დროის მონაკვეთში ტემპერატურის ცვლილების მომენტში, ხოლო ძაბვები რომლებიც არსებობენ შედუღების დამთავრების შემდეგ მას სრულ გაცივებამდე ნარჩენი ძაბვებია და ისინი წარმოიქმნებიან ლითონის გაფართოების და კუმშვის შედეგად მისი გახურება გაციებისას.

ლითონის გაფართოება და კუმშვა განპირობებულია იმით, რომ გახურებული უბანი ყველა მხრიდან გარშემორტყმულია ცივი ლითონით, რომლის ზომები არ განიცდიან ცვლილებას და ეწინააღმდეგებიან გახურების შედეგად წარმოქმნილი ლითონის გაფართოებას.

შენადული კონსტრუქციების ექსპლუატაციის პრაქტიკა გვაჩვენებს, რომ უმრავლეს შემთხვევაში შედუღების ძაბვები არ ამცირებენ კონსტრუქციების ზიდვითუნარიანობას, მაგრამ ისეთი პლასტიკური ლითონიც კი როგორც დაბალნახშირბადიანი ფოლადია გარკვეულ პირობებში (დაბალი ტემპერატურა, ძაბვების კონცენტრაცია, დეფექტების არსებობა) შეიძლება იმყოფებოდეს მყიფე მდგომარეობაში (არ ექვემდებარება პლასტიკურ მდგომარეობას) და რამაც შეიძლება გამოიწვიოს მისი ზიდვითუნარიანობის შემცირება [67].

აღნიშნულის გათვალისწინებით სამშენებლო კონსტრუქციების აწყობა-შედუღების ტექნოლოგია საჭიროა დამუშავდეს იმის გათვალისწინებით, რომ უზრუნველყოფილი იყოს შედუღები ძაბვების მინიმალური მნიშვნელობა.

იმ შემთხვევაში, თუ შედუღების ძაბვების მნიშვნელობა მიაღწევს ლითონის დენადობის ზღვარს ისინი გამოიწვევენ მის პლასტიკურ დეფორმაციას და შედეგად შენადული კონსტრუქციის ზომებისა და ფორმის ცვლილებას ანუ დეფორმაციას (დაბრეცვას).



სურ. 24. არათანმიმდევრული შედუღების შედეგი  
(დაბრეცილი კონსტრუქცია)

შედუღების პროცესში ხდება დროებითი და ნარჩენი ძაბვების წარმოქმნა. პრაქტიკული თვალსაზრისით განსაკუთრებული ყურადღება უნდა დაეთმოს ნარჩენ შედუღების ძაბვებს.

ნარჩენი ძაბვების ხასიათი და სიდიდე მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული და განისაზღვრება ძირითადი ლითონის სისქით და თვისებებით, შედუღების რეჟიმით, ნაკრების შესრულების თანმიმდევრობით, ნაკერის ფორმით და შესადუღებელი დეტალების კონსტრუქციული ფორმებით.

შესადუღებელი დეტალების ლითონის სისქის გაზრდით მცირდება დეფორმაციის სიდიდე, რაც დაკავშირებულია კონსტრუქციის სიხისტესთან,

შესადულებელი დეტალების სისქის შემცირებით კი პირიქით იზრდება დეფორმაციის სიდიდე.

შენადული კონსტრუქციების ფორმისა და ზომების ცვლილება ხშირ შემთხვევაში ამცირებს მის მუშაუნარიანობას და აფუჭებს მის შესახედაობას. თუ ნარჩენი დეფორმაციები მიაღწევენ მნიშვნელოვან სიდიდეს, მათ შეუძლიათ გამოიწვიონ გამოუსწორებელი წუნი, ამიტომ კონსტრუქციების აკრება-შედულების ტექნოლოგიის დამუშავებისას საჭიროა გათვალისწინებული იყოს ნარჩენი დეფორმაციების შემცირების აუცილებლობა იმ დონემდე, რომელიც არ მოახდენს გავლენას კონსტრუქციის ან მისი ცალკეული ელემენტების აკრების პროცესს.

შედულების ძაბვების და დეფორმაციების სიდიდე და ხასიათი ბევრ ფაქტორთანაა დაკავშირებული, მათ შორისაა შედულების ხერხი და მეთოდი: ძირითადი და საშემდულებლო მასალები; შედულების რეჟიმები; საშემსრულებლო მოწყობილობა; შესადულებელი დეტალების ჩამაგრება; ნაკრების შესრულების თანმიმდევრობა და სხვა [55].

ამ ფაქტორების გათვალისწინება და სწორი გადაწყვეტილებების მიღება მნიშვნელოვნად განაპირობებს თხელკედლიანი პროფილისაგან დამზადებული სამშენებლო კონსტრუქციების მუშაუნარიანობას და საიმედოობას და ვიზუალურ მხარეს.



სურ. 26. ჩვენი რეკომენდაციით აკრებილი ფერმა. ქუთაისი, საქართველო



### 3.4. შედულების ხერხის და მეთოდის შერჩევა

ნივნივა ფერმა მისი ელემენტების განლაგების მიხედვით ითვლება ადვილად მისადგომად მათი აკრება-შედულების პროცესისთვის. თუმცა შეერთებები განლაგებულია სხვადასხვა სივრცულ მდებარეობაში და ნაკერის ზომებიც არ არის დიდი. გასათვალისწინებელია ისიც, რომ ფერმების შედულებით დამზადებისას ძირითადად გვხვდება კუთხური ნაკერები.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე შედულების ხერხის და მეთოდის შერჩევასა გათვალისწინებული უნდა იქნას პროცესის და საშემდულებლო მოწყობილობის სიმარტივე, შენადული ნაკერების კარგი ფორმირება და საიმედოობა, შენადულ შეერთებაში დეფექტების წარმოქმნის მიმართ წინააღმდეგობა და სხვა.

მშენებლობაში ლითონის კონსტრუქციების დასამზადებლად ძირითად ელექტრორკალური შედულების სხვადასხვა ხერხებს და მეთოდებს იყენებენ.

ნაკერის ფორმირების, მისი ხარისხის და პლასტიკური დეფორმაციის ზონის შემცირების თვალსაზრისით საუკეთესო შედეგს იძლევა ფლუსის საფარში ავტომატური შედულება. თუმცა ნაკერის ზომების გათვალისწინებით და შედულების ხარისხის გამო 15°-ზე მეტი დახრის შემთხვევაში შედულების აბაზანის დაცვის გაუარესების გამო მისი გამოყენება არამიზანშეწონილია. რაც შეეხება ნახევრავტომატურ შედულებას ფლუსის საფარში, ნაკერის ფორმირებაზე გამწვანებული ზედამხედველობის გამო მისი გამოყენებაც არასასურველია.

ფლუსის საფარში ელექტრორკალურ შედულებასთან შედარებით უფრო მოსახერხებლად და რაციონალურად შეიძლება ჩაითვალოს ხელით ელექტრორკალური შედულება და დამცავ აირებში ( $CO_2$  – ში) ნახევრავტომატური შედულება [38].

დამცავ აირში ნახევრავტომატური შედულება უკეთეს შედეგს იძლევა ფერმის დამზადების პროცესში. მისი ეკონომიურობას, სისწრაფის და ხარისხის გათვალისწინებით, თუმცა სამონტაჟო სამუშაოების შესრულების დროს უპირატესობა უნდა მივანიჭოთ ხელით ელექტრორკალურ შედულებას.

ფლუსის საფარში შედუღებასთან შედარებით  $CO_2$  –ში შედუღებას აქვს სამი უპირატესობა: ნახევრადავტომატური შედუღების შესაძლებლობა და ნაკერის მაღალი ხარისხი; შედუღება სხვადასხვა სივრცულ მდებარეობაში და სხვა. წიდის მცირე მოცულობა ნაკერის ზედაპირზე საშუალებას იძლევა მივიღოთ ნაკერის მაღალი ხარისხი.

ხელით ელექტრორკალური შედუღების უპირატესობად შეიძლება ჩაითვალოს მოწყობილობის სიმარტივე, შედუღების შესაძლებლობა ყველა სივრცულ მდებარეობაში და კვების წყაროების გამოყენება, რომლებიც მუშაობენ როგორც ცვლად, ისე მუდმივ დენზე.

### 3.5. შედუღების რეჟიმების შერჩევა და ოპტიმალური ვარიანტის დამუშავება

როგორც აღვნიშნეთ, კონსტრუქციების დასამზადებლად შერჩეული გვექონდა დამცავ აირებში ნახევრადავტომატური შედუღება და ხელით ელექტრორკალური შედუღება დნობადი ელექტროდებით.

შედუღების რეჟიმების გამოთვლა ნახშირორჟანგში ნახევრად ავტომატური შედუღებისათვის განხორციელდა რეალური ფერმის დასამზადებლად შერჩეული პროფილების კედლის სისქის მიხედვით. ზედა და ქვედა სარტყლები მზადდება ოთხკუთხა მილებით კედლის სისქით 4 მმ, დგარები და გამბჯენებით კედლის სისქით 3 მმ, ორივე შემთხვევაში ოთხკუთხა მილის კვეთის ზომებია 100X40 მმ. საფენებად კი გამოყენებულია ფურცლები სისქით 6 მმ.

შედუღების რეჟიმის პარამეტრად დამცავ აირებში ნახევრადავტომატური შედუღებისათვის ითვლება: შედუღების დენის ძალა  $I_{შედ}$ , ელექტროდის დიამეტრი  $d_{ელ}$ , საშემდუღებლო მავთულის მიწოდების სიჩქარე  $V_{მავთ}$ , ელექტროდის შვერის სიგრძე  $l_{ელ}$  და დამცავი აირის ხარჯი  $Q$  [25].

კათეტისათვის  $K=4$  მმ შედუღების რეჟიმის პარამეტრები გამოთვლილი იქნა შემდეგი გამოსახულებებით:

- დადუღებული ლითონის ფართი

$$F = K^2 / 2$$

- ელექტროდის დიამეტრს ვირჩევთ შესაძლებელი დეტალების სისქის



სურ. 27. ჩვენი რეკომენდაციით შეერთებული ფერმის კვანძი.  
ქუთაისი, საქართველო

მიხედვით ცხრილიდან [19] და შევირჩევთ

$d_{ელ} - 1,4 მმ$

- შედულების დენის ძალის გამოთვლა ხდება გამოსახულებით

$$I_{შედ} = \pi d^2 j / 4$$

$j$  –ს მნიშვნელობას ელექტროდის დიამეტრის მიხედვით ვიღებთ ცხრილიდან [19]

- ელექტროდის შვერის სიგრძეს ვირჩევთ მისი დიამეტრის მიხედვით ცხრილიდან [19]- რკალის ძაბვას ვანგარიშობთ გამოსახულებიდან

$$U_{სკ} = 20 + 0,05 (I_{შედ} \cdot / d_{ელ}^{1/2}) \pm 13$$

შედულების სიჩქარეს ვანგარიშობთ გამოსახულებით

$$V_{შედ} = A / I_{შედ}, მ/სთ$$

$A$  კოეფიციენტის შერჩევა ხდება საელექტროდე მავთულის დიამეტრზე დამოკიდებულებით ცხრილებიდან [19]

- საელექტროდე მავთულის მიწოდების სიჩქარის გამოთვლა ხდება შემდეგი

გამოსახულების მიხედვით

$$V_{\text{მაგთ}} = \frac{V_{\text{შელ}} \cdot F_{\text{დადღ}}}{F_{\text{კლ}} (1 - \psi)}$$

სადაც  $F_{\text{დადღ}}$  - დადუღებული ლითონის ფართობი,

$F_{\text{კლ}}$  - საელექტროდე მავთულის განივი კვეთის ფართობი

$\psi$  - დანაკარგების კოეფიციენტი შედუღებისას

$CO_2$  - ში და გამოითვლება ემპირიული ფორმულით

$$\tau = [-4,72 + 0,2j - 4,48 \cdot 10^{-4} \cdot j^2] / 100$$

- დამცავი აირის ხარჯი და დაცილება საქმენიდან ნაკეთობამდე აიღება ცხრილიდან [19].

საწყის ეტაპზე ჩატარებული გამოთვლებიდან და შერჩეული ელექტროდის დიამეტრის და დენის ძალის მნიშვნელობებმა გამჭოლი „ჩადნობის“ თავიდან ასაცილებლად გვაჩვენა, რომ ნაკერის ფორმირება დამაკმაყოფილებელია, მაგრამ 1,2 მმ ელექტროდი მავთულისათვის საჭირო შეიქნა დენის ძალის გაზრდა 150 ა-მდე. თუმცა ნაკერის ხარისხთან ერთად საჭირო იყო მწარმოებლურობის გაზრდა. [11]

შემდგომში კათეტისათვის  $K = 4$  მმ გამოთვლები ვაწარმოეთ დადუღებული ლითონისათვის  $F = 4^2/2 = 8$  მმ გავლების რაოდენობა აღნიშნული ფართისათვის  $n = 1$ .

შევარჩიეთ საელექტროდე მავთული  $d_{\text{შელ}} = 1,6$  მმ

შერჩეულ დიამეტრზე დამოკიდებულებით ვიანგარიშეთ:

დენის ძალა  $I_{\text{შელ}} = 160$  ა

რკალის ძაბვა  $U_{\text{რკ}} = 28$  ვ

შედუღების სიჩქარე  $V_{\text{შელ}} = 50$  მ/სთ

ელექტროდის შვერის სიგრძე  $l_{\text{კლ}} = 15$  მმ

საელექტროდო მავთულის მიწოდების სიჩქარე  $V_{\text{ა}} = 140$  მ/სთ

დამცავი აირის ხარჯი 15 ლ/წთ.

ანგარიშით მიღებული შედუღების რეჟიმები შევამოწმეთ ლაბორატორიის პირობებში. სამუშაოები შესრულდა ნახევრადავტომატების გამოყენებით



სურ. 28. სწორად შესრულებული ნაკერი

100X40X4 ზომას პროფილიდან ჩამოჭრილი იქნა ნიმუშები. გავჭერით შუაზე და ანგარიშით მიღებული რეჟიმების მიხედვით მიდულელებული იქნა ფოლადის ფირფიტებზე სისქით 3 და 4 მმ. რეალურად გამოყენებული საფენების სისქის მაგივრად (6 მმ). აღნიშნული სისქის ფირფიტები აღებული იქნა უდეფექტო შენადული შეერთების შესამოწმებლად. შედულებისას გამოყენებული იყო საშუმდულებლო მავთული ( $b-08I'2 \in$ ) როგორც სურ. 28-დან ჩანს, ნაკერის ლითონს აქვს კარგი ფორმირება და ნაკერის უკანა მხრიდან ადგილი არ ჰქონია გამდნარი ლითონის გამოდინებას და დეფექტების წარმოქმნას.

ლაბორატორიულ პირობებში ასევე დადგენილი იქნა ხელით ელ. რკალური შედულების რეჟიმები ელექტროდის დიამეტრისათვის  $d_{ელ} - 2\text{მმ}$   $d_{ელ} - 3\text{მმ}$ . შედულებისათვის გამოყენებული იყო მრავალპოსტიანი შედულების აპარატი და იგივე ზომის ნიმუშები. გამოყენებული იყო შერჩეული YOHU13/55 ელექტ. შედულების ელექტროდის დიამეტრით 2 მმ და დენის ძალით  $I_{CB} - 75 - 80\text{ა}$  მოგვცა კარგი ხარისხის შენადული ნაკერი, თუმცა ჩადულების სიღრმე და მწარმოებლურობა არ იყო საკმარისი. შედულებამ ელექტროდის დიამეტრით 3 მმ

შედულების დენით  $I_{\text{შედ}} = 90 - 100 \text{ ა.}$

ისე როგორც დამცავ აირებში ნახევრადავტომატური შედულებისას ხელით ელ. რკალური შედულებისას ელექტროდის დიამეტრით 3 მმ ნაკერის ხარისხი დამაკმაყოფილებელია და ადგილი არ ჰქონია ნაკერის ლითონის გაწვას და გადინებას შედულების ზონიდან მიუხედავად იმისა, რომ ნაკერის ხარისხი და მწარმოებლურობა უკეთესია დამცავ აირში ნახევრადავტომატური შედულებისას ხელით ელექტრორკალური შედულების გამოყენების აუცილებლობა განაპირობა იმან, რომ სამონტაჟო სამუშაოების შესრულებისას მოწყობილობას სიმარტივე საშუალებას იძლევა შედულება შესრულდეს ნებისმიერ სივრცულ მდებარეობაში, თუმცა გასათვალისწინებელია ის გარემოებაც, რომ შენადული შეერთების ხარისხი დამოკიდებულია შემდულებლის კვალიფიკაციაზე და განსაკუთრებით ეს ფაქტორი აქტუალურია თხელკედლიანი კონსტრუქციების შემთხვევაში.

### 3.6. საშემდულებლო მოწყობილობების შერჩევა

საშემდულებლო მოწყობილობების შერჩევა და გამართული მუშაობა ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კომპონენტია კონსტრუქციების აკრების პროცესში და მნიშვნელოვნად განაპირობებს უდეფექტო შენადული შეერთების მიღების საკითხს.

შედულების ლაბორატორიაში ჩატარებული სამუშაოებისათვის გამოყენებული იყო საშემდულებლო ნახევრადავტომატი და ხელით შედულებისათვის მრავალპოსტიანი კვების წყარო *BDM-1202*. საშემდულებლო ობიექტზე ფერმების დამზარების და მონტაჟის პროცესში გამოყენებული გვექონდა საშემდულებლო ნახევრადავტომატი *POWERTEC-5000* და ინვერტერი (სურ. 29).



სურ.29. შედუღების აპარატი



სურ.30. შედუღების აპარატი

### 3.7. დეფექტები შენადულ შეერთებაში და მათი წარმოქმნის მიზეზები

შენადული შეერთების ხარისხი მნიშვნელოვნად განაპირობებს კონსტრუქციების საექსპლუატაციო საიმედოობას და ეკონომიურობას. შენადულ შეერთებაში დეფექტების არსებობამ (გადახრები თვისებებიდან, გეომეტრიული ზომებიდან, ნაკერის ფორმისა და მთლიანობისაგან, სიმტკიცის და სხვა საექსპლუატაციო მახასიათებლების დარღვევა და ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება გამოიწვიოს ავარია დამზადების, მონტაჟის ან მუშაობის პროცესში.

შენადული კონსტრუქციების დამზადებისას ამოცანა დგას არა წარმოქმნილი დეფექტების გამოსწორებაზე, არამედ მათი წარმოქმნის გაფრთხილებაზე.

შენადულ შეერთებაში წარმოქმნილი დეფექტები განლაგების მიხედვით

გვხვდება როგორც შინაგანი (ნაკერის შიგნით), ისე გარეგანი (ამოდის ნაკერის ზედაპირზე).

შენადულ შეერთებაში გვხვდება დეფექტები, რომლებიც დაკავშირებულია მეტალურგიულ, თერმიულ და ჰიდრო დინამიკურ მოვლენებთან (ცივი და ცხელი ბზარები, ფორები და სხვა) და დეფექტები, რომლებიც ხშირად ნაკერის ფორმირების პროცესში წარმოიქმნებიან (შედულებულობა, ჩაჭრები, გაწვა, კრატერი და სხვა).

პირველი ჯგუფის დეფექტების წარმოქმნა ნაკლებსავარაუდოა დაბალნახშირბადიანი ფოლადებისაგან დამზადებულ კონსტრუქციებში. თუმცა სხვადასხვა უარყოფითი ფაქტორების (დიფუზიური წყალბადი, არასწორი რეჟიმების შემთხვევაში ნაკერის ლითონის გამყიფება და სხვა) თანხვედრით შეიძლება გამოიწვიოს აღნიშნული ტიპის დეფექტების წარმოქმნა. დაბალნახშირბადიანი ფოლადებისაგან დამზადებულ ფოლადებში გაცილებით საშიშია მეორე ჯგუფის დეფექტები. განსაკუთრებით თხელკედლიანი კონსტრუქციების შემთხვევაში. ასეთი ტიპის დეფექტების წარმოქმნა ძირითადად დაკავშირებულია არასწორ ტექნოლოგიურ პროცესთან: შედულების რეჟიმის დარღვევასთან, შემდულებლის დაბალ კვალიფიკაციასთან, შესადულებელი დეტალების უზუსტოდ / არაზუსტად აკრებასთან, ელექტროდის თავის შესადულებელი დეტალების ნაწიბურებთან არასწორი განლაგების გამო.

შენადული კონსტრუქციების დამზადების პროცესში შეინიშნება ცალკეული ელემენტების ან შეიძლება მთელი კონსტრუქციის ფორმის ცვლილება, რომელიც განსხვავდება პროექტით განსაზღვრული ზომებისაგან. ეს გადახრებიც, რომელიც გამოწვეულია ნაკეთობის დეფორმაციით (დაბრეცვით) ან ნაკერის „ჩაჯდომი“, ითვლება დეფექტებად.





სურ. 31. დეფექტური შენადული კონსტრუქცია

### 3.8. ნივნივა ფერმის დამზადების და მონტაჟის ტექნოლოგია

#### 3.8.1. ნივნივა ფერმის დამზადება

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული თხელკედლიანი მსუბუქი შენადული კონსტრუქციების დამზადება გარკვეულ სიძნელეებთანაა დაკავშირებული. განსაკუთრებით რთულია იმ შემთხვევაში, როდესაც მალეზს შორის მანძილი 3-ის ჯერადი არაა და კონკრეტული შენობა-ნაგებობებისათვის სპეციალური სამარჯვი კონდუქტორის დამზადება არაა მომგებიანი და ასაკრები დეტალების ჩამაგრების გარეშე აკრება-შედულება მნიშვნელოვნად ზრდის ნარჩენი ძაბვების და დეფორმაციების წარმოქმნის ალბათობას.

ზოგადად წამწის დაპროექტება-დამზადების ძირითადი პირობაა, რომ კვანძში შემავალი ყველა ელემენტის (ღეროს) სიმძიმის ცენტრის ღერძების ერთ წერტილში

- ცენტრში გადაკვეთა. ამ შემთხვევაში მიიღწევა ღერძული ძაბვების შენარჩუნება ყოველ ღეროვან ელემენტში. კვანძში ღერძების არაცენტრულობის შემთხვევაში ტოლქმედი ძალა  $F_{ტოლქ}$  სარტყელის მიმართ მოდებული იქნება გარკვეული ექსცენტრიტეტით, რის შედეგადაც კვანძში გაჩნდება დამატებითი მღუნავი მომენტი, რაც გამოიწვევს წამწის სიბრტყეში კვანძის დაგრეხასა და ღეროებში არაცენტრალურ გაჭიმვას და კუმშვას, რაც თავის მხრივ გამოიწვევს მასალის ხარჯის გაზრდას [19].

კვანძებში ფასონურების ზომები განისაზღვრება იმ პირობით, რომ ღეროვანი ელემენტების მიმაგრება ხორციელდება ფლანგური შენადული ნაკერებით, შესაძლებელ ელემენტებს შორის 40-50 მმ ღრეჩოს გათვალისწინებით. სასურველია, ფასონურებს ჰქონდეთ მარტივი მართკუთხა ფორმა, ხოლო შეერთების სიმტკიცის უზრუნველსაყოფად განიკვეთის ზომები უნდა იყოს ისეთი, რომ უზრუნველყოფილი იქნეს ფასონურებისა და ღეროვანი ელემენტების თანაბარი სიმტკიცე. ფასონურის განლაგება ძალვის ღერძის მიმართ ასიმეტრიულად დაუშვებელია, რადგანაც ამ შემთხვევაში წარმოიქმნება ადგილობრივი მღუნავი მომენტი. მნიშვნელოვანია, რომ ყველა კვანძში ფასონურის სისქე იყოს ერთნაირი, რომ არ მოხდეს ამ კვანძში ღეროს ტორსსა და საყრდენი კვანძის სიხისტის წიბოებს შორის უბანზე, ფასონურის მდგდარობის დაკარგვა.

ქ. ქუთაისში წერეთლის ქუჩაზე მიმდინარე სავაჭრო ცენტრის გადახუდვის მოწყობისათვის მსუბუქი თხელკედლიანი ფერმების დამზადება მოხდა კოპირების მეთოდით. რაც შემდეგში მდგომარეობს: პირველ ფერმას, რომელიც დამზადებულია მოცემული ზომების მონიშვნით და შემდგომი აკრება-შედულებით, ათავსებენ სტელაჟზე და ის გამოიყენება თარგად. ყოველი მომდევნო ფერმის დამზადებისას დეტალებს განალაგებენ თარგი ფერმის დეტალების შესაბამისად და ხდება მათი მოჭიდებზე აყვანა. მას შემდეგ, რაც ყველა ფერმა აიკრიბება, ხდება მათი გადატანა შედულების ადგილზე იმ რეკომენდაციების მიხედვით, რომელიც ითვალისწინებს უდეფექტო შენადული შეერთების მიღებას და ნარჩენი ძაბვების და დეფორმაციების მინიმალურ მნიშვნელობას. გარდა ამისა, შედულების პროცესში სრულად უნდა იქნეს გადადნობილი მომჭიდების ლითონი,

რომელიც მართალია შესრულებულია იმავე მარკის საშემდუღებლო მასალებით, რომლითაც ნაკერები დულდება, მაგრამ გამდნარი ლითონის მცირე მოცულობის გამო არსებობს მათში დეფექტების არსებობის ალბათობა.

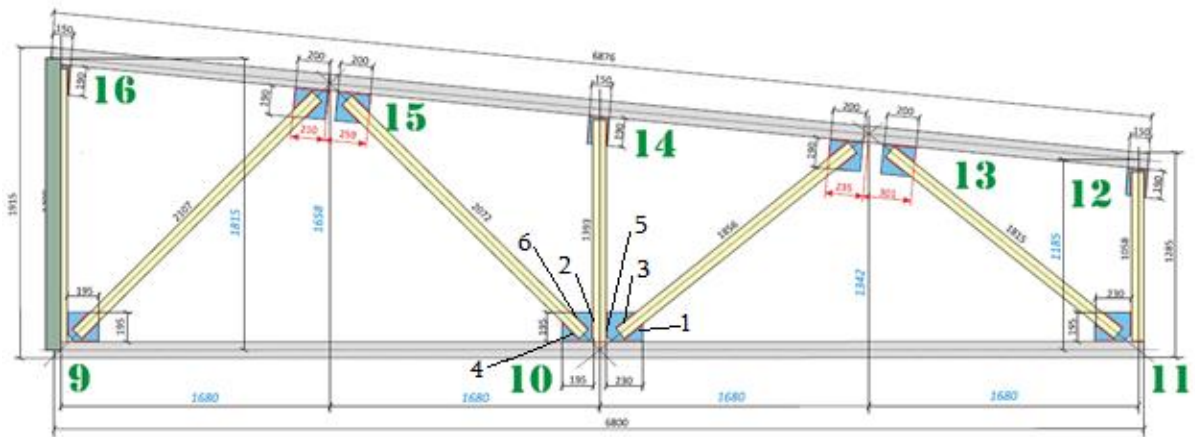


სურ.32. სწორად შესრულებული  
შედულებით აკრებილი კონსტრუქცია

ფერმის აკრება მომჭიდებით იწყება ფასონურების მიმაგრებით ზედა და ქვედა სარტყელის მონიშნულ ადგილებზე, ამის შემდეგ, ზომაზე დაჭრილი დგარები და ირიბანები ელექტროხერხით იჭრება შუაზე ფასონურების ზომების გათვალისწინებით და უერთდება ფასონურების კვანძებში ცენტრირების გათვალისწინებით (სურ. 32.). გასათვალისწინებელია ის გარემოებაც, რომ დგარებს და ირიბანებს გაჭრის ადგილი აქვს დეფორმაციის, რის გამოც მათი ფასონურებთან

მიერთებისას ადგილი აქვს არათანაბარ ღრეჩოს, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს დეფექტების წარმოქმნა შენადულ შეერთებაში, ამიტომ აუცილებელია მათი მომჭიდებზე აყვანის წინ მექანიკური დამჭერების დახმარებით ღრეჩოს ზომების გათანაბრება.

ფერმის კვანძების შედუღება იწყება მისი შუა ადგილიდან საყრდენებისაკენ, რომელიც უფრო „დამყოლ“ მდგომარეობაში იმყოფება, ვიდრე ფერმის შუა ნაწილი, ამ შემთხვევაში ფერმის კვანძებში ძაბვები იქნება მინიმალური. სხვადასხვა კვეთის ზომის ნაკერების შემთხვევაში დასაწყისში ადუღებენ დიდი კვეთის ნაკერს, შემდეგ კი მცირე კვეთისას. ერთმანეთთან ახლოს განლაგებული ნაკერები არ შეიძლება შედუღებული იქნას ერთმანეთის მიყოლებით. საჭიროა გაცივდეს ძირითადი ლითონის ის უბანი, რომელზედაც უნდა შესრულდეს მეორე ახლომდებარე ნაკერი ლითონის გადახურების თავიდან ასაცილებლად და საშემდუღებლო პლასტიკური



ნახაზი 3.1 შედუღების თანმიმდევრობა

დეფორმაციების შესამცირებლად ნაკერები უნდა შესრულდეს მიდუღებული ელემენტების ბოლოს მიმართულებით. ნაკერები სრულდება წინასწარშერჩეული შედუღების რეჟიმების და საშემდუღებლო მოწყობილობის მიხედვით.

ნარჩენი დეფორმაციების შემცირების მიზნით შედუღებას აწარმოებს ორი შემდუღებელი. სამუშაოს საწყის ეტაპზე მიღებული რეკომენდაციებიდან გადახრამ, კერძოდ, გადახრებმა შედუღების რეჟიმიდან ერთი შემდუღებლით მუშაობამდა ნაკერების შესრულების თანმიმდევრობის დარღვევამ გამოიწვია მნიშვნელოვანი დეფორმაციები, როგორც ფერმის სიბრტყეში, ისე მისი

მართობული მიმართულებით. (სურ. 32. ), რამაც შეიძლება სიძნელეები გამოიწვიოს სახურავის ფენილის მოწყობის დროს და ასევე, როგორც აღნიშნული იყო წინა თავის დასაწყისში, გააუარესოს ვიზუალური მხარე.

### 3.8.2. ნივნივა ფერმების მონტაჟი

ლითონის თხელკედლიანი კონსტრუქციების გამოყენების უპირატესობა მისი მონტაჟის სიმარტივეში გამოიხატება, კერძოდ, როგორც პირველ თავში იყო აღნიშნული, კონსტრუქციის მცირე წონის გამო სამშენებლო მოედანზე არაა საჭირო მძიმეწონიანი ტექნიკის გამოყენება. ზოგიერთ ადგილებში შეუძლებელიც არის ტექნიკის მიდგომა სამუშაოების შესასრულებლად, როგორც მშენებარე, ისე სარეკონსტრუქციო ობიექტებზე. როგორც სურ. 32-დან ჩანს, აკაკი წერეთლის ქუჩაზე მშენებარე სავაჭრო ცენტრის სახურავის თხელკედლიანი კონსტრუქციებით მოწყობის სამუშაოები სრულდება მარტივი, სამშენებლო მოედანზე დამზადებული მექანიზმებით. ფერმის დაყრდნობის ადგილზე ატანა და დაფიქსირება ხდება მარტივად, წინასწარ გამზადებული და კოლონაზე მიდულებული ორ ერთმანეთზე შეერთებულ კოჭზე კუთხოვანების დახმარებით. სურ. 33.



სურ. 33. ფერმების სიმაღლეზე სამონტაჟო მოწყობილობა



სურ. 34. ფერმის მონტაჟის პროცესი

მსუბუქი თხელკედლიანი კონსტრუქციების მონტაჟის სიმარტივე თვალნათლით გამოჩნდება თუ ერთმანეთს შევადარებთ მშენებარე ობიექტის სახურავის მოსაწყობად დამზადებულ კონსტრუქციას და ამ ობიექტზე არსებული ძველი შენობის ფერმებს (სურ. 34, 35, 36).



სურ. 35. სასაწყობე ფართის გადახურვის კონსტრუქცია ჩვენს მიერ დამუშავებული ტექნოლოგიით



სურ. 36. სასაწყობე ფართის გადახურვის კონსტრუქცია



სურ. 37. სასაწყობე ფართის გადახურვის მსუბუქი კონსტრუქციის ერთიანი ხედი გამზადებული ფენილის მოსაწყობად.

ძველი შენობის ფერმები დამზადებული იყო წყვილი კუთხოვანებისაგან, სადაც ზედა და ქვედა სარტყლების კვეთის ზომა იყო 100X100X10, ხოლო დგარებისა და ირიბანების ზომა 80X80X8. ხოლო ახალი შენობის სახურავის ფერმები დამზადებული არის ოთხკუთხა მილით, რომლის ზედა და ქვედა სარტყელის კვეთის ზომებია 100X40X4, ხოლო დგარების და ირიბანების 80X40X4, რაც წონაში იძლევა 300% მეტ სხვაობას.





სურ. 38. ძველად არსებული გადახურვის კონსტრუქცია



სურ. 39. ძველად არსებული გადახურვის კონსტრუქცია

სამონტაჟო სამუშაოების შესასრულებლად, როგორც აღნიშნული იყო გამოყენებულია ხელით ელექტრორკალური შედუღების მოწყობილობა და დნობადი ელექტროდი *UOHN13/55*.

### **3.9. შენადული ნაკერების ხარისხის კონტროლი**

დამზადებული კონსტრუქციების შენადული ნაკერების შესამოწმებლად ძირითადად იყენებენ ვიზუალურ ოპტიკურ მეთოდს, კონტროლის ამ მეთოდის გამოყენების არსი ითვალისწინებს ნაკერების გეომეტრიული ზომების გაზომვას და ვიზუალურ დათვალიერებას, ნაკერების გარეგანი დათვალიერება ბევრ შემთხვევაში საკმაოდ ინფორმაციულია, შედარებით იაფი და კონტროლის ოპერატიული მეთოდია. როგორც შეუიარაღებელი თვალით, ისე გამადიდებელი შუშის გამოყენებით შეიძლება შევამოწმოთ ბზარები, ფორები, გაწვა, ლითონის ჩამოდნობა, ფუძის ნაკერის შეუდუღებლობა და სხვა. ჩამოთვლილი დეფექტებიდან ზოგიერთი დაუშვებელია შენადულ ნაკერში და აუცილებელია მათი ამოჭრა და ხელახლა შედუღება. დათვალიერებისას ასევე შეიძლება აღმოჩენილი იქნას ნაკერის ფორმის დეფექტები, ნაკერის სიმაღლის და სიგანის ცვლილება მის სიგრძეზე, რაც შეიძლება რკალის სიმძლავრის ცვლილების მიზეზის იყოს, ასევე არათანაბარი ზედაპირი რკალის არამდგრადი წვის გამო [22].

დამცავ აირებში შედუღებისას ნაკერი უნდა იყოს გლუვი, ბრჭყვიალა და ღრმულების გარეშე. ნაკერის გეომეტრიულ ზომებს ამოწმებენ შაბლონების ან მზომი ინსტრუმენტების დახმარებით.

## თავი 4

### თხელკედლიანი ლითონის კონსტრუქციებში წარმოქმნილი ძაბვების ანალიზი ტენზორეზისტორების გამოყენებით

შენადრე კონსტრუქციების დაპროექტებისა და ექსპლუატაციისას ხშირად მათ ელემენტში წარმოიქმნება ძაბვები, რომელთა განსაზღვრა შესაძლებელია როგორც თეორიული, ასევე სხვადასხვა ექსპერიმენტული მეთოდებით. ზოგიერთი მათგანი გამოყენებული გვაქვს ჩვენს მიერ შექმნილი კონსტრუქციების დამაბული მდგომარეობის კვლევისათვის.

კონსტრუქციების და მათი ელემენტები, როგორც წესი მუშაობენ ცვლადი დატვირთვების პირობებში, მათ მასალაში წარმოიქმნება რთული დამაბული მდგომარეობა, რომელსაც თან სდევს სხვადასხვა დადლილობითი მოვლენები. ამავე დროს კონსტრუქციებს ახასიათებს რთული გეომეტრიული ფორმები, სადაც მრავლადაა ერთი ზედაპირიდან მეორეზე მკვეთრი გადასვლის ადგილები, რომლებიც წარმოადგენს ადგილობრივი ძაბვების კონცენტრატორებს. როგორც ექსპლუატაციის პრაქტიკა აჩვენებს, მათი რღვევა უმრავლეს შემთხვევებში სწორედ ამ ადგილებში ხდება. მაგალითად კონცენტრატორების ზონაში 300-350 მპა საშუალო ძაბვებისას, უდიდესი ძაბვები შეიძლება 900-1000 მპა-ს სიდიდისა იყოს. ცხადის, რომ კონსტრუქციის საიმედოობა და ხანგამძლეობა ამ უდიდესი ძაბვებით განისაზღვრება [46].

ძაბვების თეორიული გაანგარიშებები ბევრ შემთხვევაში მეტად მიახლოებულია და არ ასახავს დამაბული მდგომარეობის ნამდვილ სურათს. ზოგიერთ შემთხვევაში ძაბვების განსაზღვრის ამოცანას ჯერაც არ აქვს თეორიული გადაწყვეტა. ასეთ შემთხვევებში დიდ მნიშვნელობას იძენს ძაბვების განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდები, რომელთა მეშვეობით შესაძლებელია დამაბული მდგომარეობის ნამდვილი სურათის განსაზღვრა, მაგალითად, სხვადასხვა დატვირთვების დროს. ამასთან დაკავშირებით, ძაბვების განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდები როგორც თეორიული კვლევის მეთოდების

დამატებითი (ზოგჯერ კი შემცვლელიც) მეთოდები სულ უფრო დიდ მნიშვნელობას იძენს.

ამჟამად ძაბვების განსაზღვრის რამდენიმე ექსპერიმენტული მეთოდი, რომელთაგან ყველაზე დიდი გამოყენება ჰპოვა ტენზომეტრულმა მეთოდმა. ტენზომეტრული მეთოდი დაფუძნებულია კონსტრუქციის ელემენტების ზედაპირებზე დეფორმაციების უშუალო გაზომვაზე მექანიკური, მავთულის და სხვა სახის ტენზომეტრების გამოყენებით. ყველაზე უნივერსალურია ელექტროტენზომეტრირების მეთოდი მავთულის ტენზომეტრების გამოყენებით [23].

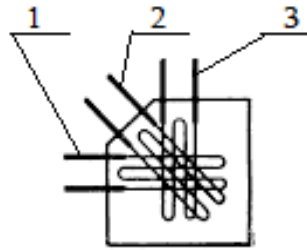
#### 4.1. ტენზომეტრირების საფუძვლები

ზემოთ აღნიშნა, რომ კონსტრუქციის ელემენტის საანგარიშო სქემის შერჩევასა კეთდება რიგი დაშვებებისა და გამარტივებებისა, რის შედეგად გაანგარიშებაში მიიღება გარკვეული ცდომილებები. საჭირო ხდება გაანგარიშების შედეგების ექსპერიმენტით დაზუსტება.

ამან გამოიწვია ტენზომეტრირის მეთოდის ფართო გავრცელება, რომლის დროს ხდება ელემენტის ზედაპირზე მცირე დეფორმაციების გაზომვა და შემდეგ მათგან ძაბვებზე გადასვლა ჰუკის კანონის გამოყენებით [49].

ტენზომეტრირის მეთოდით მცირე სიდიდის ძაბვების განსაზღვრისას ექსპერიმენტულად ისაზღვრება დეფორმაციები ელემენტის რაღაც წერტილში. რადგან ელემენტის თავისუფალ ზედაპირზე შეიძლება წარმოიქმნას როგორც წრფივი, ასევე ბრტყელი დამაბული მდგომარეობა, ზოგად შემთხვევაში გაზომილი დეფორმაციებიდან ძაბვებზე გადასასვლელად უნდა ვიცოდეთ ორი წრფივი და ერთი კუთხური დეფორმაცია. რადგან ტენზომეტრის მეშვეობით კუთხური დეფორმაციის გაზომვა შეუძლებელია, ამიტომ ხდება სამი წრფივი დეფორმაციის გაზომვა გარკვეული კუთხით განლაგებული ტენზოგადამწოდებით და შემდეგ

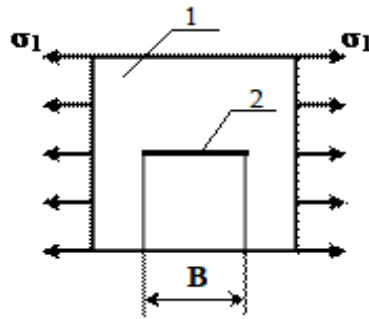
განგარიშების გზით ხდება იმ მონაცემების მიღება, რომლებიც საჭიროა ძაბვების განსაზღვრისათვის (ნახ. 4.1).



ნახ.4.1. 45° კუთხით სამი ტენზოგადამწოდის განთავსება ზედაპირზე:

1,2,3 - ტენზოგადამწოდები.

წრფივი დაძაბული მდგომარეობისას საკმარისია ერთი ტენზომეტრის განთავსება, რომლის ბაზა  $B$  განლაგებულია ძაბვების  $\sigma_1$  მოქმედების მიმართულებით (ნახ.4.2).



ნახ.4.2. ტენზოგადამწოდის განთავსება ზედაპირზე წრფივი დაძაბული მდგომარეობისას:

1 – დეტალი; 2 - ტენზოგადამწოდი;  $B$  - ტენზოგადამწოდის ბაზა;  $\sigma_1$  - ერთღერძა ძაბვები.

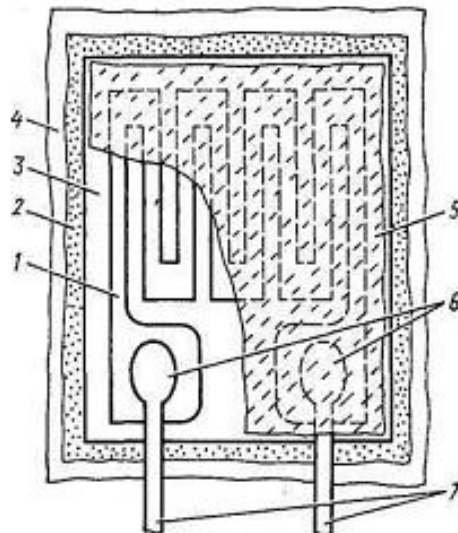
ლაბორატორიულ დანადგარზე შენადულ კონსტრუქციებში წარმოქმნილი ძაბვების განსაზღვრისათვის ხშირად გამოიყენებენ სხვადასხვა კონსტრუქციის მავთულის ტენზოგადამწოდებს (ნახ.4.3, 44.).

შესასწავლი ტენზოგადამწოდი, რომელსაც მავთულის ტენზოგადამწოდი ეწოდება, წარმოადგენს კონსტანტანის მავთულს. მისი დიამეტრია 0,015 მმ. ის წებოს საშუალებითაა მიკრული ქაღალდის ფუძეზე.

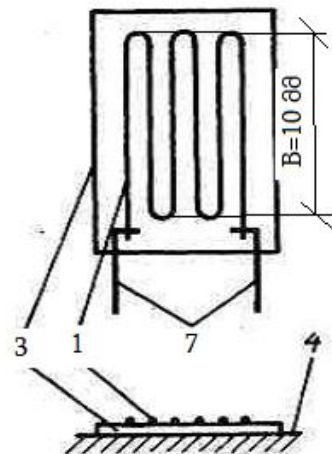
როგორც ცნობილია, გამჭიმავი ძალის ზემოქმედებისას იცვლება მავთულის კუთრი წინაღობა, რაც დაკავშირებულია მავთულის სიგრძისა და კვეთის ცვლილებასთან.

ეს ცვლილება ზოგიერთი მასალისათვის, მათ შორის კონსტანტანისათვის, პროპორციულია გამოსაცდელ ლითონში წარმოქმნილი დეფორმაციისა. აღნიშნული მოვლენა შეიძლება გამოყენებული იქნას წარმოქმნილი დეფორმაციის გაზომვისათვის.

ტენზოგადამწოდით დეფორმაციის გაზომვისას უნდა გავითვალისწინოთ, რომ გაზომვის შედეგზე შეიძლება გავლენა მოახდინოს ტემპერატურულმა ზემოქმედებამ. ამის მიზეზი შემდეგია. გარემოსა და ობიექტის ტემპერატურის ცვლილების შედეგად ხდება მავთულის სიგრძისა და ელექტროწინაღობის ცვლილება და საკვლევი ობიექტის წრფივი ზომების ცვლილება. ამიტომ საჭიროა მოხდეს ტემპერატურული ზეგავლენის კომპენსირება (გაბათილება).



ნახ.4.3. ტენზოგადამწოდი:



ნახ.4.4. მავთულის დამაგრების

სქემა:

1-მავთული; 2-წებო; 3-ქალაქის ფუძე; 4-გამოსაკვლევი დეტალი; 5-დამცავი ელემენტი; 6-გამომყვანების შეერთების ადგილი; 7-გამტარები; B - ტენზოგადამწოდის ბაზა.

მავთულის ელექტრული წინააღმდეგობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

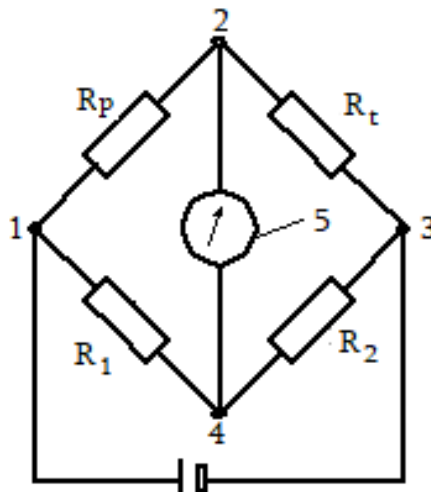
სადაც  $S$  – მავთულის კვეთის ფართობია;

$l$  – მავთულის დეფორმირებადი უბნის სიგრძე;

$\rho$  - მავთულის მასალის კუთრი წინააღმდეგობა.

ცვალებადი ტემპერატურული ზეგავლენის კომპენსირების ყველაზე გავრცელებულ ხერხს წარმოადგენს ორი ერთნაირი ტენზოგადამწოდის გამოყენება, რომელთაგან ერთი დაწებებულია გამოსაცდელ დეტალზე, მეორე კი - დაუტვირთავ ფირფიტაზე, რომელიც იგივე მასალიდანაა დამზადებული. ცხადია ორივე ტენზოგადამწოდი ერთნაირ ტემპერატურულ პირობებში უნდა იმყოფებოდეს.

მზომი და მაკომპენსირებელი ტენზოგადამწოდები ჩართულია ბოგირული სქემის (უიტსტონის ხიდი) (ნახ.4.5.) მეზობელ მხრებში. მზომი ტენზოგადამწოდი აღრიცხავს როგორც დატვირთვისაგან, ასევეც ტემპერატურული ზემოქმედებისაგან მიღებულ დეფორმაციას. მაკომპენსირებელი ტენზოგადამწოდი აღრიცხავს მხოლოდ ტემპერატურული ზემოქმედებისაგან მიღებულ დეფორმაციას, რომელიც გამოირიცხება მზომის მონაცემიდან და მიიღება დეფორმაციის ის ნაწილი, რომელიც ძალის მოქმედებითაა გამოწვეული. [64]



ნახ.4.5. წინაღობის გასაზომად გამოიყენება ბოგური სქემა:  
 $R_p$  – დეტალის ზედაპირზე დაწებებული ტენზოგადამწოღია;  
 $R_t$  – ტემპერატურის მაკომპენსირებელი ტენზოგადამწოღია;  
 $R_1$  და  $R_2$  - მუდმივი წინაღობებია; 1,2,3,4 - ბოგის წვეროებია; 5 -  
პოტენციომეტრი.

საკვლევი ობიექტის დეფორმაციის სიდიდის გასაზომად ტენზოგადამწოდეები მაგრდება (დაეწებება) იმ წერტილში, სადაც უნდა იქნას გაზომილი დეფორმაცია. ნახ.4.3. და 4.4-ზე ნაჩვენებია ზედაპირზე მიწებებული ტენზოგადამწოდი. დეფორმაციის მაქსიმალურად ზუსტად გაზომვისათვის, საჭიროა, რომ დეფორმაციტენზოგადამწოღია დანაკარგების გარეშე გადაეცეს ობიექტისაგან ტენზოგადამწოდის მავთულის გისოსს. ეს მიიღწევა შესაბამისი წებოს შერჩევით. წებოს ოპტიმალური პარამეტრები მითითებულია ტენზორეზისტორების ტექნიკურ დოკუმენტაციაში. ხშირად გამოიყენება EΦ-2 მარკის წებო.

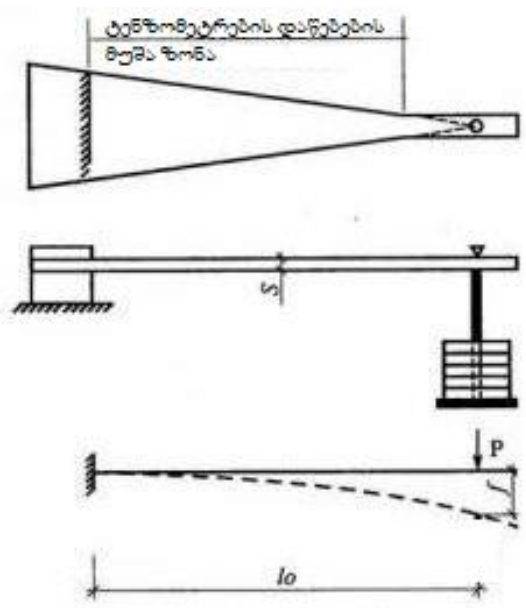
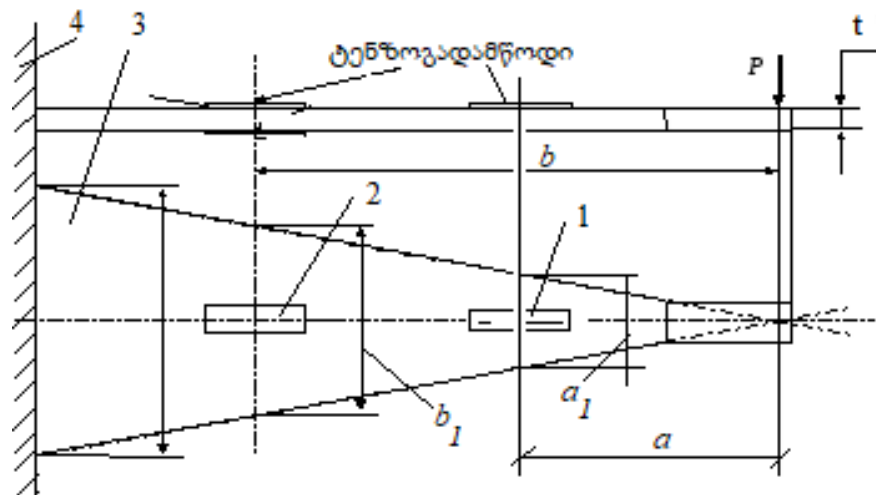
#### 4.2. მზომი სქემის ტარირება

ტარირება - ეს არის რაღაც ერთი სიდიდის მიხედვით (ჩვენს შემთხვევაში, მავთულის წინაღობის მიხედვით), რომლის გაზომვა არ წარმოადგენს სირთულეს, მეორე სიდიდის (დეფორმაციის) განსაზღვრის შესაძლებლობა. ტარირება ხორციელდება თანაბარი წინაღობის კოჭზე დაწებებული მუშა ტენზოგადამწოდის ჩართვით.

თანაბარი წინაღობის ეწოდება კოჭს, რომელიც ერთი ბოლოთი ჩამაგრებულია და მის ნებისმიერ წერტილში დატვირდვის ზრდისას დეფორმაცია პროპორციულად იზრდება (ნახ.4.6). ასეთი კოჭის სისქე მთელს სიგრძეზე ერთნაირია, ხოლო სიგანე ცვალებადია.

იმისათვის, რომ ამაში დავრწმუნდეთ საჭიროა კოჭი დავტვირთოთ ფოლადის ტვირთებით.





ნახ.4.6. თანაბარი წინაღობის კოჭი:

1,2-ტენზოგადამწოდები; 3-კოჭი; 4-ჩამაგრება;  $a, b$  - მანძილები ტენზოგადამწოდების ბაზიდან დატვირთვის მოდების წერტილამდე.

#### 4.3. გაზომვის შესრულების თანმიმდევრობა

საჭიროა გაიზომოს თანაბარი წინაღობის კოჭის გეომეტრიული პარამეტრები ( $a, b, a_1, b_1$ ). შემდეგ კაკვზე უნდა დავკიდოთ  $P_1=10$  ნ წონის ტვირთი. მიღებული

მონაცემების გამოყენებით გავიანგარიშოთ  $M_1$  და  $M_2$  მომენტები 1 და 2 წერტილებში ფორმულებით:

$$M_1 = P \cdot a; \quad M_2 = P \cdot b.$$

თანაბარი წინააღობის კოჭზე დაეკიდოს ტვირთი წონით  $P_2=20$  ნ და გავიანგარიშოთ  $M_1$  და  $M_2$  მომენტები გამოწვეული ამ ტვირთით. მიღებული მონაცემებით ავაგოთ მომენტების ეპიურები და გრაფიკი ტვირთის წონაზე დამოკიდებულებით. მივიღებთ წრფეს, რაც მოწმობს, რომ თანაბარი წინააღობის კოჭის ნებისმიერ წერტილში განთავსებული ტენზოგადამწოდის მონაცემებით შეიძლება შევასრულოთ მისი ტარირება.

შემდეგ გავიანგარიშოთ კვეთების წინააღობები 1 და 2 წერტილებში ფორმულებით:

$$W_1 = (a_1 \cdot \delta^2)/6; \quad W_2 = (b_1 \cdot \delta^2)/6,$$

რომელთა გამოყენებით გავიანგარიშოთ  $\sigma_1$  და  $\sigma_2$  ძაბვები 1 და 2 წერტილებში ფორმულებით (როცა  $P_1=10$  ნ და  $P_2=20$  ნ) :

$$\sigma_1 = M_1 / W_1; \quad \sigma_2 = M_2 / W_2.$$

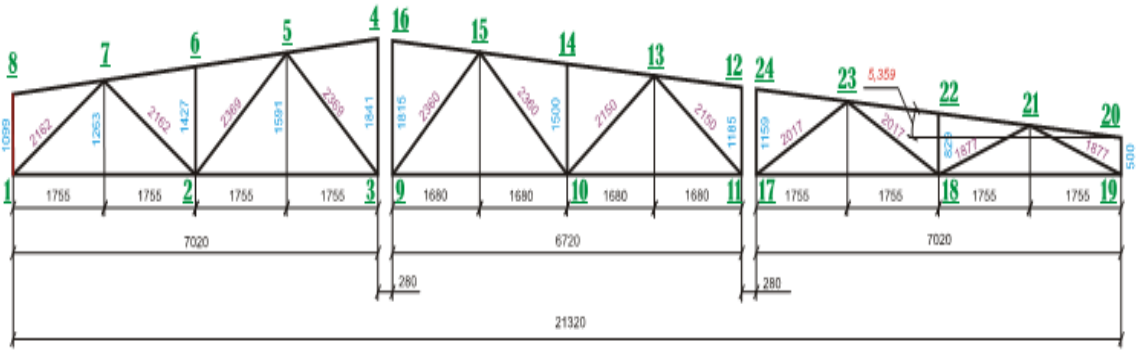
ჩავიწეროთ ხელსაწყოს შესაბამისი ჩვენება  $n_1$  და  $n_2$  (ციფრული სახით).

იმის გამო, რომ მომენტების ეპიურები წრფივია (პირდაპირპროპორციული დამოკიდებულება), ჩვენ შეგვიძლია გავაკეთოთ დასკვნა, რომ კოჭის ნებისმიერი წერტილის მიხედვით შესაძლებელია შევასრულოთ ტენზოგადამწოდის ჩვენების ტარირება ძაბვათა სიდიდეებში.

ფარდობითი დეფორმაციის ერთეულის (ფ.დ.ე.) ფასი შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

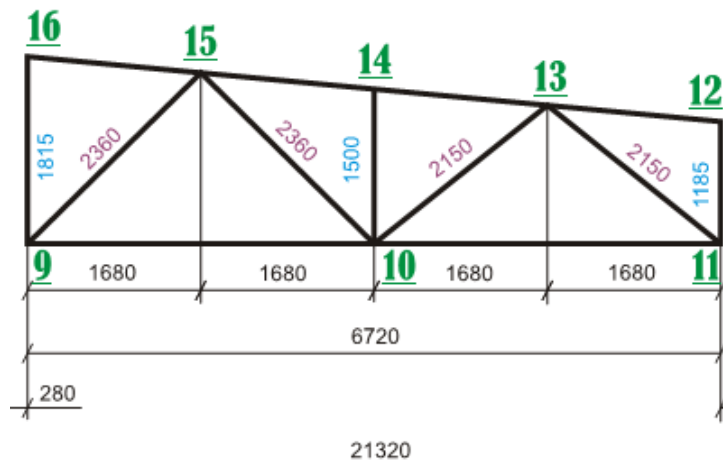
$$1 \text{ ფ.დ.ე.} = |(\sigma_1 - \sigma_2) / (n_1 - n_2)| \text{ (მპა).}$$

ფარდობითი დეფორმაციის ერთეულის (ფ.დ.ე.) ფასის დადგენის შემდეგ შეიძლება ექსპერიმენტების ჩატარება საკვლევი წამწეზე, რომლის საერთო ხედი მოყვანილია ნახ.4.7-ზე.



ნახ.4.7. წამწის საერთო ხედი.

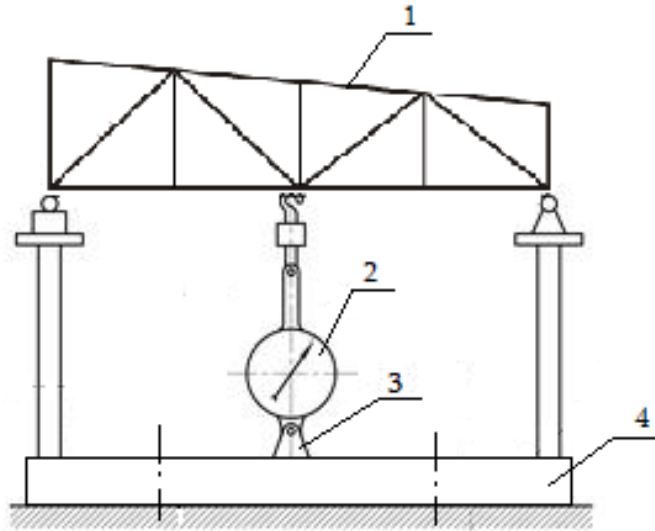
რადგან საკვლევი წამწის გაბარიტები საკმაოდ დიდია, ექსპერიმენტი ჩატარდა წამწის ერთ-ერთ სეგმენტის მოდელზე, რომლის სქემა ნაჩვენებია ნახ.4.8-ზე.



ნახ.4.8. წამწის გამოსაცდელი სეგმენტი.

#### 4.4. წამწის გამოსაცდელ სეგმენტის ელემენტებში ძაბვების განსაზღვრა

ლაბორატორიულ დანადგარზე უნდა იქნას გამოცდილი წამწის სეგმენტის მაკეტი (ნახ.4.8). ქვემოთ ნახ.4.9-ზე ნაჩვენებია დანადგარზე წამწის განთავსების სქემა.



ნახ.4.9. წამწის დატვირთვის სქემა:

1-საკვლევი წამწის მოდელი; 2-დინამომენრი; 3-ყუნწი; 4-საყრდენი.

კონსტრუქციის საანგარიშო ელემენტებში მაქსიმალური ძალვის განსაზღვრისათვის გამოიყენება ე.წ. გავლენის ხაზები, რომლებიც წარმოადგენს ტვირთის მდებარეობის ძალვის სიდიდეზე დამოკიდებულებას.

გავლენის ხაზების აბსცისები ახასიათებს ტვირთის მდებარეობას, შესაბამისი ორდინატა კი - ძალვას ღეროში ტვირთის მოცემული მდებარეობისას.

საკვლევი წამწის 1 ყოველი კვანძის ქვეშ მიდუღებულია ნახვრეტებიანი ყუნწები (ნახაზზე არ ჩანს). ასეთივე ყუნწები მიდუღებულია საყრდენ შველერზე 4. დინამომეტრი 2 კავისა და ხრახნული ჭიმის საშუალებით შეიძლება დაკიდებული იქნას მთავარი წამწის ნებისმიერ კვანძში. ხრახნის ხელით მოჭიმვით წარმოიქმნება კვანძზე მოქმედი ძალა, რასაც დავინახავთ დინამომეტრის ისრის გადახრით. დინამომეტრი ტარირებულია ძალებში და შესაძლებელია განვსაზღვროთ რა ძალა მოქმედებს კვანძში.

ექსპერიმენტის შესრულება შემდეგი თანმიმდევრობით ხდება. როგორც უკვე დადგენილია ფარდობითი დეფორმაციის ერთეულის ფასი შეადგენს

$$1 \text{ ფ.დ.ე.} = |(\sigma_1 - \sigma_2) / (n_1 - n_2)|, \text{ მპა.}$$

წამწის მოდელის ცალი მხრიდან, თითოეული ელემენტის (განმზღენი, დგარი, სარტყელი) სიბრტყეზე დავაწებოთ ტენზოგადამწოდი და შევაერთოდ მზომ

ხელსაწყოსთან.

ვწარმოთ ბოგირის ბალანსირება (ნახ.5) თითოეული მუშა ტენზოგადამწოდის თანმიმდევრული ჩართვით, ჩავწერთ ხელსაწყოს ჩვენება ანათვლები ცხრილის მიხედვით. დავტვირთოთ წამწის კვანძი I ხრახნის მოჭიმვით და ჩავწერთ სატარირებელი გრაფიკის მიხედვით რეალური დატვირთვა P.

ჩავწერთ ანათვლები ცხრილში წამწის ელემენტებზე დაწებებული ტენზოგადამწოდების ჩვენებებით.

მოვხსნათ დატვირთვა P ხრახნის მოშვებით და დავტვირთოთ წამწის კვანძი II ხრახნის მოჭიმვით და ჩავწერთ სატარირებელი გრაფიკის მიხედვით რეალური დატვირთვა P. განვსაზღვროთ ძაბვები გამოსაკვლევ ელემენტებში.

როგორც აღვნიშნეთ დეფორმაციის გაზომვა ჩატარდა ტენზომეტრის მეთოდით მეთორმეტე ელემენტზე დაწებებული ტენზოგადამწოდის დახმარებით.

$$X_{12} = 1,173$$

საათური ტიპის ინდიკატორით (ნახაზი 4.9) ხდება დატვირთვის გაზომვა ტარირების ცხრილის დახმარებით. ამისათვის საჭიროა ავილოთ ინდიკატორის ჩვენება  $P=0$  ( $\Delta_1$ ) და p დატვირთვის შემთხვევაში ( $\Delta_2$ ) ანათვალთა სხვაობა  $\Delta=\Delta_2-\Delta_1$ , რომელიც შეესაბამება P ძალას. დეფორმაციის სიდიდე ექსპერიმენტალურად  $E_{ექსპ.}=\Delta^*\alpha$ , სადაც ალფა დანაყოფის ფასია და  $\alpha=10^{-5}$  1/დეფ.ერთ.

ძაბვის სიდიდე ექსპერიმენტალურ ელემენტში განისაზღვრება შემდეგი სახით  $\delta_{ექსპ.}=E^* \epsilon_{ექსპ.}$ , სადაც E მასალის დრეკადობის მოდულია.

ნორმალური ძალის სიდიდე LE მონაკვეთში ტოლია  $N_{LE}^{ექსპ.} = \delta_{ექსპ.} \cdot A$ , სადაც A განივი კვეთის ფართია.

მიღებული მნიშვნელობა შედარდება გაანგარიშებით მიღებული ნორმალური ძალის მნიშვნელობასთან  $N_{LE}=X_{12}*P=1,173*P$

ექსპერიმენტალური და თეორიული მნიშვნელობების შედარებით ვადგენთ ფარდობით ცდომილებას  $\psi = \frac{N_{LE} - N_{LE}^{ექსპ.}}{N_{LE}} \cdot 100\%$  .

მიღებული შედეგების შედარებამ გვაჩვენა რომ სხვაობა შეადგენს 8% პროცენტს.



სურ. 40. კონსტრუქციის გამოსაცდელი სტენდი



სურ. 41 კონსტრუქციაზე დამაგრებული სენსორული გადამწოდები



სურათი 42 კონსტრუქციის მაკეტზე მოდებული დატვირთვა



სურათი 42 ძაბვების ამოვლელი ხელსაწყოები





სურ. 41. კონსტრუქციის გამოცდა სამშენებლო მოედანზე

## ძირითადი შედეგები და დასკვნები

- 1) გაანგარიშებით დადგენილია და ექსპერიენტალურად შემოწმებულია, რომ შესაძლებელია გადახურვისთვის მსუბუქი ლითონ კონსტრუქციის დამზადება მილკვადრატების გამოყენებით, რომელიც საიმედოა საექსპლუატაციო პირობებში.
- 2) დადგენილია, რომ თხელკედლიანი კონსტრუქციების დასამზადებლად შეერთების სხვა სახეებთან ერთად შესაძლებელია შედუღებით შეერთების გამოყენება.
- 3) ღეროვანი სივრცითი კონსტრუქციის ელემენტების (ნივნივა ფერმას) სიმტკიცის და სიხისტის უზრუნველსაყოფად საჭირო კვეთის შერჩევის და გაანგარიშებისათვის შედგენილია და გამოყენებულია საანგარიშო მოდელი.
- 4) შედგენილია გამოყენებითი პროგრამა და ამოხსნილია ამოცანები, რიცხვითი გაანგარიშებები შესრულებულია Mathcad-ში.
- 5) გაანგარიშებით დადგენილია და ექსპერიმენტალურად დადასტურებულია შედუღების ოპტიმალური რეჟიმები, რომლებიც საშუალებას იძლევიან მივიღოთ ნაკერის საჭირო პარამეტრები.
- 6) თხელკედლიანი პროფილის ქიმიური შედგენილობის და მექანიკური თვისებების გათვალისწინებით შერჩეულია საშემდუღებლო მასალები, რომლებიც დადგენილ შედუღების რეჟიმებზე იძლევიან შესაძლებლობას, მივიღოთ ძირითადი ლითონის ტოლფასი შენადული შეერთება დეფექტების გარეშე.
- 7) კონსტრუქციის ზომების, შენადული ნაკერის ზომების და სივრცული მდებარეობის გათვალისწინებით შერჩეულია საშემდუღებლო მოწყობილობა.

- 8) დადგენილია ნივნივა ფერმის აკრებისა და შედულების დაწყების ადგილი და ნაკერების შესრულების თანმიმდევრობა, რომელიც უზრუნველყოფს ნარჩენი ძაბვებისა და დეფორმაციის მინიმალურ დასაშვებ მნიშვნელობას.
- 9) თხელკედლიანი კონსტრუქციების შედულებით დამზადებისათვის ნაკერიდან სითბოს არიდების და ნაკერების ოპტიმალური სიჩქარით გაცივებისათვის ექსპერიმენტალურად შერჩეულია შედულების ხერხი და მეთოდი.
- 10) დამუშავებულია თხელკედლიანი კონსტრუქციების (ნივნივა ფერმის) შედულებით დამზადების ოპტიმალური ტექნოლოგია, რომელიც უზრუნველყოფს კონსტრუქციის საიმედოობას, მინიმალურ ნარჩენ დეფორმაციას და ძირითადი ლითონის ტოლფასი უდეფექტო შენადული შეერთების მიღებას.
- 11) ექსპერიმენტალურად გაანგარიშებულია ნარჩენი ძაბვები და დეფორმაციები წამწის ელემენტებში და მიღებული შედეგები შემოწმებულია, რეალურ კონსტრუქციებში.

## ლიტერატურა

1. გიორგიძე ე. მასალათმცოდნეობა, გამომცემლობა „განათლება“, თბილისი 1984, 496 გვ.
2. დოგრაშვილი მ., ყიფიანი პ., გერაძე პ., მინდაძე ს. მშენებლობაში ენერგო და რესურსდამზოგი ტექნოლოგიები მსუბუქი, თხელკედლიანი ფოლადის კონსტრუქციების გამოყენებით, ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები, IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, მოხსენებების კრებული, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ქუთაისი, 2016.29.10. 240-242 გვ.
3. ვალიშვილი ნ., დ. გიორხელიძე მასალების და კონსტრუქციების გამძლეობა.- თბილისი, გამომცემლობა „ჯისიაი“-2008-548გვ.
4. კიკვიძე ო., მინაძე ე., სახანბერიძე ნ., სირაძე ზ. გაანგარიშების ზღვრული მდგომარეობის მეთოდი თერმოდრეკადი ღეროების ღუნვისას //ქსტუ-ს სამეცნიერო შრომები, №2 ( 15).-2004.-გვ.20-23
5. ლითონის კონსტრუქციები, პროფესორ მამუკა სანიკიძის საერთო რედაქციით, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 2017.
6. მცხილაძე გ., ფაღავა ო. ლითონის კონსტრუქციები, გამომცემლობა „განათლება“, თბილისი, 1986 წ.
7. მინაძე ე., ო.კიკვიძე თერმოდრეკადი ღეროების სიმტკიცე დინამიკური დატვირთვისას // აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მოამბე, №2(12).-2018. - გვ. 191-199
8. ნადირაძე ა, საშენი მასალები და ნაკეთობები, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 2010 წ.
9. ფირყულაშვილი ლ. შენობა-ნაგებობების გადახურვის ახალი ტიპის წინასწარ დამაბული რეგულარული (სტრუქტურული) სივრცითი კონსტრუქციის გაანგარიშება და კონსტრუირება, დისერტაცია, საქართველოს ტექნიკური

უნივერსიტეტი, თბილისი, 2013.

10. ქარცივაძე გ. სეისმომედეგი მშენებლობა. თბილისი.: გამომცემლობა „განათლება“, 1979
11. წულეისკირი მ. „რკინა-ბეტონის ზოგადი კურსი“, გამომცემლობა „განათლება“, თბილისი 1973 წ.
12. Александров А.В. , Лашенников Б.Я., Шапошников Н.Н. Стойтельная механика. Тонкостенные пространственные системы. Под ред. А.Ф. Смирнова. – Н.: Стройиздат , 1983 – 488с.
13. Ареева Е. Ю., Тишков В. А., Филимонова А. Е. Конструктивные особенности висячих покрытий в общественных зданиях, Утверждено редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия, Нижний Новгород, ИНГАСН, 2015 г.
14. Ажермачев Г. А., Морозова Е. В., Кузьменко А. В. Применение легких металлических конструкций при реконструкции зданий, Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. Вып. 37, - Днепропетровск, ПГАСА, 2006. - 688 с. (в обл.). - с. 13-14.
15. Бердник М. М., Вишневская Н. С. Строительные конструкции, Учебное пособие, Ухта, УГТУ, 2013.
16. Бычков Д. В. (1962). Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций, Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, Москва, 1962 г..
17. Брудка ... 1974: Брудка, Я., Лубиньски,М. Легкие стальные конструкции. Изд.2-е, доп. – М.: Стройиздат, 1974. 342 с.
18. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. -М.: Наука, гл.ред.физ.-мат.литературы. -1986.-560с.
19. Винокуров В. А., Куркин С. А., Николаев Г. А. Сварные конструкции, Механика разрушения и критерии работоспособности,
20. Ватин Н. И., Попова Е. Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях, Санкт-Петербург, 2006.

21. Гафаров Р. Х., Жернаков И. С. Что нужно знать о сопротивлении материалов, под редакцией заслуженного деятеля науки РФ д-ра техн. наук проф. В. С. Жернакова, москва, "Ъаниностроение", 2001 г.
22. Голованов А. И., Корнишин М. С. Введение в метод конечных элементов статики тонких оболочек, Академия наук СССК, Казанский филиал, Физико-технический институт, Казань, 1989 г.
23. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов.- М.: Высш. шк., 1989.-624 с.
24. Денилова А. Длительная работоспособность металлических материалов и тонкостенных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой, Автореферат, Сакт-Петербург, 2011.
25. Dograshvili M., Kifiani P., Geradze P. The development of practical methods for the calculation of thin-walled rod systems, Contemporary problems of architecture and construction, Proceedings of 9<sup>TH</sup> international conference contemporary problems of architecture and construction, Batumi-georgia, September 13-18, 2017. - 162-164 p.
26. Елисеев В. В., Зиновьева Т. В. Механика тонкостенных конструкций, Теория стержней, Санкт-Петербург, Издательство политехнического университета, 2008.
27. Ермолаев Н. Н., Каскевич Н. М. Проектирование стропильных ферм из прямоугольных труи, Учебное пособие, Куйбышевский государственный университет, Темплан. 1980. поз. 744.
28. Ильяшенко А. В., Пуашенко А. В. "Вестник" журнал, МГСУ, Эффективное сечение сжатых неидеальных тонкостенных стержней открытого профиля, москва, 2011. 4.
29. Кирсанов Н. М. Висячие покрытия производственных зданий. Москва, 1990 г. 128 с.
30. Канчели Н. В. Строительные пространственные конструкции, Издание третье переработанное и дополненное, Издательство Ассоциации строительных вузов, москва, 2008 г.

31. Кирьянов Д.В. Самоучитель Mathcad 13. – СПб. : БХВ – Петербург , 2006. – 528 с.
32. Куракова ... 2011: Куракова В.Г., Намзеева Т.В. Виды узловых соединений в легких стальных тонкостенных конструкциях /Инженерно-строительный журнал, №3(21), 2011, с.47-52.
33. ](Куражова В. Г., Намзеева Т. В. В...ы узловяч соединении в легких стальных тонкостенных конструкциях. ГОУ Цереповецкии государственный университет, 2011 г.).
34. Копытов М. М. Металлические конструкции каркасов одноэтажных зданий, Учебное пособие, Томск, Издательство ТГАСУ, 2012.
35. Комета - 2, Система расчета и конструирования узлов стальных конструкций, Программный комплекс Structure CAD Office, Руководство пользователя, Киев, 2007.
36. Кинасошвили Р.С., Соппротивление материалов, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. 384 с.
37. Кирьянов Д. Самоучитель Mathcad 13. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006.-528 с
38. Киселев В.А. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. М.: Стройиздат. 1980. 616 с.
39. Кудрявцев Е.М. Mathcad 8. Символьное и численное решение разнообразных задач.- М.:ДМК, 2000.-320с.
40. Лукин А. О. (1980), Сканировал и обрабатывал, Проектирование стропильных ферм из прямоугольных труб, учебное пособие. Куйбышевский государственный университет, 1980 г.
41. Лизин В. Е., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций, 3-е издание, переработанное и дополненное, Москва, "Машиностроение", 1994.
42. Лебедева Н. В. Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции, Москва, Архитектура - С, 2006 г.
43. Макаров Е.Г. Соппротивление материалов на базе Mathcad.- СПб.: БХВ – Петербург, 2004.-512с.

44. Металлические конструкции, Под общей редакцией д-ра техн. наук, засл. деятеля и техники РСФСР проф. Е. и. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г.
45. Марутян А. С. Легкие металлоконструкции из перекрестных систем, включая модули типа "Пятигорск", Збірник наукових праць, Українського інституту сталевих конструкцій, імені В. М. Шимановського - В Шимановського. - Випуск 11, 2013.
46. Погорелов В. И. Строительная механика тонкостенных конструкций, учебное пособие,
47. Рыбаков ... 2011: Рыбаков В.А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций: учеб. пособие /В.А.Рыбаков – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 207 с.
48. Рыбаков В. А., Гамаюнова О. С. Напряженно-деформированное состояние элементов каркасных сооружений из тонкостенных стержней. Интернет-журнал "Строительство уникальных зданий и сооружений", 2013. №7 (12).
49. Рыбаков В. А, Трубина Д. А. Местная устойчивость стальных тонкостенных профилей в условиях поперечного изгиба, Виссертация, Санкт-Петербург, 2014.
50. Свод правил, СП (проект, первая редакция), Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутой оцинкованной профилированной и гофрированной листов, Правила проектирования, Москва, 2014.
51. Снитко Н.К. Строительная механика – М. : Высшая школа, 1972. – 488 с
52. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций, Москва, "Машиностроение", 1975 г.
53. стальные строительные конструкции, Правила изготовления, Технический кодекс, Установившейся практики, Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, Минск, 2009.
54. Трофимов В. И. большепролетные пространственные покрытия из тонколистового алюминия, Сканировал и обрабатывал Лукин А. О. Москва, Стройиздат, 1975.
55. Тарасов А. Экспериментально-теоретические исследования рамных



конструкций из стальных тонкостенных жолодногнутых профилей, Автореферат, Томск, 2013.

56. Уэй З., Хэйвуд М, Беляев Н. А., Билык С. И., Билык А. С. Расчет элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с еврокодом 3, Украинский Центр Стального Строительства, 2015.
57. Шешештьен Д. Легкие конструкции в строительстве, Перевод с английского М. С. Школьникова, Сканировал и обрабатывал Лукин А. О. москва, Стройиздат, 1983 г.
58. Шатов Дмитрий Сергеевич, Конечноэлементное моделирование стальных тонкостенных перфорированных стоек, Магистерская диссертация, Санкт-петербург, 2011 г.
59. Хисамов Р. Расчет и конструирование структурных покрытий, Библиотека строителя, Серия "Инженеру-проектировщику", Издательство "Будивельник", 1981 г.
60. AISI (1991). "The specification for design of cold-formed steel structural members." American Iron and Steel Institute, Washington, DC., U.S.A.
61. Amer. Iron and Steel Institute. The Durability of Light-weight Types of Steel Construction, 1942.
62. American Welding Society. "Recommended Practices for Spot Welding LowCarbon Steel," Welding Handbook, 3rd ed., 1950, p. 403.
63. Cheng Y., Schafer B. W. Distortional buckling of cold-formed steel members in bending. Maryland: american Iron and Steel Institute Baltimore, 2005. 213 p.
64. European Convention for Constructional Steelwork: "European Recommendations for the Design of Light Gauge Steel Members", Publication 49, ECCS, 1987.
65. George Winter and R. H. J. Pian. "Crushing Strength of Thin Steel Webs," C.U.E.E.S. Bull. No. 35, Part 1, 1946.
66. George Winter. "Strength of Slender Beams," Trans. Amer. Soc. Civ. Eng., 109, 1944, p. 1321.
67. Green G. G. George Winter and T. R. Cuykendall. "Light Gage Steel Columns in Wall-

- Braced Panels," C.U.E.E.S. Bull. No. 35, Part 2, 1947.
68. Landolfo, R. EUROCODES Background and Applications Cold-Formed (CF) Structures. Available online: [https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1999\\_8\\_Landolfo.pdf](https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1999_8_Landolfo.pdf) (accessed on 19 October 2021).
  69. Lansing W. "Performance of Thin Walled Open Section Beams Loaded in Combined Torsion and Flexure" (approved by Amer. Soc. Civ. Eng. for early publication as a Proc. Separate)
  70. Roșca, O.V. Experimental Tests of Thin-Walled Steel Roof Profiles. Bull. Polytech. Inst. Jassy Construction. Archit. Sect. 2011, LVII, 85–96
  71. Savitsky G. A. Wind loads on structures - Moskow: Stroyizdat, 1972. (In Russian).
  72. Simiu E., Scanlan R. H. Wind effects on structures - New York-Chichester-Bisbane-Toronto: John Willey and Sons Inc, 1978.
  73. Schafer, B. W. Local, distortional, and euler buckling of thin-walled columns // Journal of structural engineering. 2002. 11 p.
  74. Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members; American Iron and Steel Institute (AISI) Specifications, Standards, Manuals and Research Reports (1946–present); American Iron and Steel Institute: Washington, DC, USA, April 1946
  75. Tăranu, G.; Budescu, M. 35 m Large Opening Roof Structural System Made of Hot Rolled and Cold Formed Steel Profiles. Bull. Polytech. Inst. Jassy Construction. Archit. Sect. 2018, 64, 33–40
  76. Vlasov v. z. Thin-walled elastic rods Moskow: Strojizdat, 1940. 276 p. (In Russian)
  77. Vera Roy\*, Oxana Izvekova and Issa Togo., The problems of calculating the load-bearing structures made of light steel thin-walled profiles. „The Authors, published by EDP Sciences, 2016
  78. Ungureanu, V.; Both, I.; Burcă, M.; Nguyen, T.H.; Grosan, M.; Dubină, D. Experimental Investigations on Spot Welded Built-Up Cold-Formed Steel Beams. Bull. Polytech. Inst. Jassy Construction. Archit. Sect. 2018, 64, 19–30

### ინტერნეტ-რესურსები:

1. <http://mega-lloadu.gb9-tula.pp.ua/?q>
2. <http://studentbank.ru/download.php?id=15803>
3. [https://www.youtube.com/watch?v=OTCo\\_SSHLuI](https://www.youtube.com/watch?v=OTCo_SSHLuI)
4. [https://gtu.ge/Library/Pdf/El\\_jurnalebi/samsh\\_41.pdf](https://gtu.ge/Library/Pdf/El_jurnalebi/samsh_41.pdf)
5. [Ogmni555ALiS\\_WC9j9Cdg:1664965645182&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved](https://www.youtube.com/watch?v=Ogmni555ALiS_WC9j9Cdg:1664965645182&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved)
6. <https://stroymodule.ru/zdaniya-lstk>
7. <https://xn--80aaaftebbc3auk2aepkhr3ewjpa.xn--p1ai/legkie-stalnyie->
8. <https://timesteel.ru/lstk>
9. steel is a light thin-walled materials
10. <https://www.google.com/search?q=steel+is+a+light+thin>