

ხატია გორჯოლაძე

**შედგენილი, შედუღებული ბანივკვეთის მქონე  
ფოლადის კოჭების ბანბარიშების ახლებური  
ხერხი**

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის

მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
ივლისი, 2008

საავტორო უფლება © “ხატია გორჯოლაძე, 2008”

## საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ხატია გორჯოლაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: შედგენილი, შედუღებული განიკვეთის მქონე ფოლადის კოჭების გაანგარიშების ახლებური ხერხი და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: პროფ. ნ. ბერიშვილი

პროფ. ი. მშენიერაძე

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2008

ავტორი: ხატია გორჯოლაძე  
დასახელება: შედგენილი, შედუღებული განიკვეთის მქონე ფოლადის კოჭების გაანგარიშების ახლებური ხერხი.  
ფაკულტეტი: სამშენებლო ფაკულტეტი  
ხარისხი: დოქტორი  
სხდომა ჩატარდა:

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

---

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭვდა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

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

## რეზიუმე

ნაშრომში განხილულია შედგენილი, შედუღებული ფოლადის კოჭების განივკვეთის გაანგარიშების მეთოდი და მოცემულია არსებული მეთოდის კრიტიკული ანალიზი. შემოთავაზებულია გაანგარიშების ახალი უფრო რაციონალური წესი, რომელიც ემყარება განივკვეთის რეკომენდებული კონსტრუირების მიხედვით ახალი სორტამენტის შედგენას.

როგორც ცნობილია შედგენილი, შედუღებული კოჭების განივკვეთის შერჩევას კლასიკური მეთოდით გამოიყენება კოჭის განივკვეთის ფართობის მინიმუმაციის პირობა, რომლის თანახმადაც კოჭის თაროების ფართობი უნდა უტოლდებოდეს კედლის ფართობს. ამ პირობის გამოყენებით ისაზღვრება კოჭის ოპტიმალური სიმაღლე, მაგრამ კოჭის სიმაღლის შერჩევის შემდეგ ხელახლა იწყება კოჭის განივკვეთის კონსტრუირება და ვერ ხდება სწორედ იმ პირობის დაცვა, რომლის გამოყენებითაც შერჩეულ იქნა კვეთის სიმაღლე. აქედან გამომდინარე, მიზანშეწონილად მიგვაჩნია წინასწარ იქნეს კონსტრუირებული კოჭის განივკვეთი და მხედველობაში მიღებული ის თანაფარდობანი კვეთის ელემენტებს შორის, რომელიც დამახასიათებელი უნდა იყოს რაციონალური კვეთისათვის და რომელიც რეგლამენტირებულია დადგენილი ტექნიკური პირობებით. ასეთი წინასწარ კონსტრუირებული განივკვეთებისათვის შედგენილია პროგრამა, რომლის რეალიზებითაც მიღებულია სორტამენტთა ცხრილის მსგავსი ცხრილი, რომლიდანაც შესაძლებელია ამოღებულ იქნეს ის კონკრეტული განივკვეთი, რომელიც შეესაბამება კოჭის მოცემული მალისა და დატვირთვის მიხედვით სიმტკიცის პირობისა და სიხისტის პირობის მიხედვით შერჩეულ ინერციის მომენტსა და წინალობის მომენტს. სიმტკიცისა და სიხისტის პირობების გათვალისწინებით მიღებული განივკვეთებიდან შერჩეული უნდა იქნეს უდიდესი. ამავე დროს, ავტომატურად დაკმაყოფილება თაროებისა და კედლის ფართობების ტოლობა.

ასევე მოცემულია შედგენილი, შედუღებული ორტესებრი კოჭების განივკვეთის გაანგარიშების კლასიკურ თეორიაში არსებული მეთოდის კრიტიკული ანალიზი, ნაჩვენებია ის წინააღმდეგობანი, რომელიც გვხვდება ამ ამოცანების გადაწყვეტისას და ნაჩვენებია ამ წინააღმდეგობების აცილების გზები. კერძოდ, არსებული მეთოდის მიხედვით კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრისას ჩათვლილია, რომ კედლის წინალობის მომენტის ფარდობა კოჭის წინალობის მომენტთან მუდმივი სიდიდეა, რაც ეწინააღმდეგება კვეთის მინიმუმის შედგენის პირობას. ნაშრომში განსაზღვრულია ხსენებული ფარდობა, როგორც ცვლადი სიდიდე.

განხილულია შედგენილი, შედუღებული კოჭების გაანგარიშებისას განივკვეთის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრის ამოცანა, რომელიც მოცემულია სხვადასხვა ცნობილი ავტორების მიერ. მითითებულია, კოჭის გაანგარიშების მოდელის დადგენისას იმ შეუსაბამობებზე და წინააღმდეგობებზე, რომელიც არსებობს წინასწარი დაშვების მიუხედავად და რომელიც ართულებს და ხშირად შეუძლებელს ხდის მათემატიკური აპარატის სწორად გამოყენებას. ნაშრომში მითითებულია ზემოთხსენებული წინააღმდეგობების, კერძოდ  $c$  კოეფიციენტის განსაზღვრის,  $\delta_{კედ.}$   $h$  - ზე დამოკიდებულების და სხვა აცილების გზები, რაც კორექტულს გახდის კოჭის განივკვეთის შერჩევას, როგორც მათემატიკური, ისე სამშენებლო მექანიკის მეთოდების თვალსაზრისით.

## Abstract

In this work it is described a calculation method of welded steel joints having composed cross-sections and a critical analysis of the existing method is given. It is proposed a new, more rational rule of calculation, which is based on a composition of a table of new ranges due to designing cross-section by the recommended method.

As it is known choosing the section of melting beams using classical method, condition of minimization of beams square, according to which the square of beam's shelf must be equal to walls square. According to those preconditions, the optimal height of beams is defined, but constructing of section starting again after choosing of height of beams and it is impossible to follow those requirements according to which the height of beams will be chosen. In taking into consideration all mentioned, we deem it desirable to construct initially section of beams and to take into consideration those equations between the elements of sections, which must be characterizing by rational sections and which are defined by the technical regulations. For such previously constructed section, the program is composed, by the realization of which the schedule like of schedule of assortments is received. From such schedule, the concrete slash area can be taken out from that special section that will correspond to the dated spine and loading of beam suitable of conditions of firmness and rough conditions, according to the inertia moment and resistance moment. The biggest section must be chosen according to firmness and rough conditions. In this case, equation of shelf and walls square will be satisfied automatically.

The research gives the analysis of the classical method of identifying optimal height of the cross-section of the built-up welded beam, and shows the contradictions, which occur in the resolution of these tasks and proposes means to eliminate these contradictions. In particular, while identifying the optimal height of the beam and assuming the relation of contradiction moments of the wall with the beam as constant that contradicts the composition of the minimum conditions of the cross-section area of the beam. The work defines the above mentioned relation as variable quantity.

The study discusses the task of defining the optimal height of composed welded beams given in the works of different prominent authors. The study points out those inaccuracies and inconsistencies that exist despite preliminary estimates and that make it difficult and often impossible to properly use a mathematical device. The study shows how to define the above-mentioned inconsistencies and namely the coefficient  $c$ , how to define the dependence of  $\delta_{wall}$  on  $h$  as well as how to avoid them in order to make a correct selection of beams' heights from the perspective of both mathematical and construction mechanics methods.

## შინაარსი

შესავალი . . . . .	xi
ლიტერატურის მიმოხილვა . . . . .	13
შედეგები და მათი განსჯა . . . . .	68

### თავი I

#### შედგენილი კოჭების გაანგარიშების მეთოდი ე. ი. ბელენიას მიხედვით

1.1. კოჭების სიმაღლე. . . . .	68
1.2. კედლის სისქე. . . . .	73
1.3. სარტყელების ჰორიზონტალური ფურცლები. . . . .	75
1.4. კოჭების კვეთის შერჩევა. . . . .	77

### თავი II

#### შედგენილი კოჭების გაანგარიშება კ. კ. მუხანოვის მიხედვით

2.1. გენერალური ზომები. . . . .	82
2.2. კვეთის შერჩევა. . . . .	89
2.3. მოქლონილი კოჭები. . . . .	95

### თავი III

#### შედგენილი კოჭების გაანგარიშების წესი ნ. ს. სტრელეცკის მიხედვით

3.1. კოჭების ტიპები. . . . .	97
3.2. კოჭების სიმაღლის განსაზღვრა. . . . .	99
3.3. კოჭის კვეთის სიმაღლის განსაზღვრა სიხისტის პირობიდან გამომდინარე. . . . .	100
3.4. კოჭის კვეთის სიმაღლის განსაზღვრა ლითონის ეკონომიის პირობიდან გამომდინარე . . . . .	101

### თავი IV

#### ზემოთაღნიშნული მეთოდების ურთიერთშედარება და მათი კრიტიკული ანალიზი

4.1. შედგენილი, შედუღებული განივკვეთის ფოლადის კოჭების სიხისტის პირობების ზოგიერთი არაკორექტულობის შესახებ. . . . .	120
4.2. ფოლადის შედგენილი განივკვეთის მქონე შედუღებული კოჭების გაანგარიშების ახლებური ხერხი. . . . .	123
4.3. შედგენილი, შედუღებული კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრის კრიტიკული ანალიზი. . . . .	130
4.4. ზოგიერთი მოსაზრება ნ. ს. სტრელეცკის მიხედვით შედგენილი, შედუღებული კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრის შესახებ. . . . .	133

დასკვნა. . . . .	138
გამოყენებული ლიტერატურა. . . . .	140
დანართები . . . . .	142

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 3.1. რეკომენდებული შეფარდება $h_{კოჭ.}$ კოჭის სიმაღლის $t_{კელ.}$ კელის სისქესთან. . . . .	70
ცხრილი 4.2. $k_{კელ.}$ პრაქტიკული მნიშვნელობის ცხრილი. . . . .	86
ცხრილი 4.3. უდიდესი შეფარდება $l/b$ , რომლის დროსაც არ საჭიროებს ფოლადის კოჭების შემოწმებას მდგრადობაზე. . . . .	91
ცხრილი 5.1. $\psi$ და $k$ კოეფიციენტთა მნიშვნელობები (5.7) და (5.9') ფორმულებში. . . . .	105
ცხრილი 5.2. ალუმინის შენადნობებისაგან დამზადებული დაწნეხილი პროფილების ზომების ზღვრული თანაფარდობები. . . . .	113
ცხრილი 5.3. კელის სიმაღლის ყველაზე მეტი თანაფარდობა მის სისქესთან შედგენილი კვეთის კოჭებში, რომელთა დროსაც საჭირო არაა სიხისტის წიბოებით გამყარება. . . . .	109
ცხრილი 5.4. $l/b$ უდიდესი შეფარდებები, რომლის დროსაც არ არის საჭირო ფოლადის СТ. 3 - საგან დამზადებული ორტესებრი კოჭების შემოწმება მდგრადობაზე. . . . .	110
ცხრილი 5.5. $l/b$ უდიდესი შეფარდებები, რომლის დროსაც არ არის საჭირო ალუმინის შენადნობებისაგან დამზადებული ორტესებრი კოჭების შემოწმება მდგრადობაზე (როცა $l/b = 3-5$ ). . . . .	111
ცხრილი 6.1. არსებული პროგრამის საილუსტრაციო ცხრილი. . . . .	128
ცხრილი 7.1 პროგრამა I-ის შედეგად მიღებული შედეგი. . . . .	143
ცხრილი 7.2 პროგრამა II-ის შედეგად მიღებული შედეგი. . . . .	153

## ნახაზების ნუსხა

ნახაზი 1.1	სუფთა ღუნვა. . . . .	13
ნახაზი 1.2	წყვილიძალით გაღუნვა. . . . .	13
ნახაზი 1.3	ორი განივი კვეთით გამოყოფილი უსასრულოდ მცირე ზომის ელემენტი. . . . .	15
ნახაზი 1.4	ძაბვების ეპიურა. . . . .	15
ნახაზი 1.5	კოჭის მოკვეთილ ნაწილზე მოქმედი ძალთა სისტემა. . . . .	16
ნახაზი 1.6	ცილინდრული ზედაპირის ფორმის კოჭის კვეთი . . . . .	18
ნახაზი 1.7	კვეთის განაპირა ბოჭკოებში უდიდესი მუშა გამჭიმავი და მკუმშავი ძაბვები. . . . .	18
ნახაზი 1.8	ხის კოჭის სწორკუთხოვანი კვეთი. . . . .	20
ნახაზი 1.9	მღუნავი მომენტი ტესტური კვეთის თუჯის კოჭებისთვის . . . . .	21
ნახაზი 1.10	განივი კვეთის $A$ წერტილში მხები ძაბვის ვექტორების მიმართულება. . . . .	22
ნახაზი 1.11	ძელიდან სამი კვეთით გამოყოფილი $d_x$ სიგრძის ელემენტი. . . . .	23
ნახაზი 1.12	მღუნავი მომენტის ზრდა მარჯვნივ. . . . .	24
ნახაზი 1.13	სწორკუთხედი . . . . .	25
ნახაზი 1.14	მრგვალი კვეთი. . . . .	26
ნახაზი 1.15	მხები ძაბვები თხელკედლიან კოჭებში. . . . .	27
ნახაზი 1.16	სიმეტრიული პროფილი დატვირთული სიმეტრიის სიბრტყეში. . . . .	27
ნახაზი 1.17	ძაბვები კედელში. . . . .	28
ნახაზი 1.18	შველერი მოკვეთილი ფართობებით . . . . .	29
ნახაზი 1.19	ძაბვების მიმართულება და ეპიურა . . . . .	29
ნახაზი 1.20	მღუნავი მომენტისა და განივი ძალის ეპიურები. . . . .	31
ნახაზი 1.21	მთავარი ძაბვები ღუნვის დროს. . . . .	33
ნახაზი 1.22	მთავარი ძაბვების ხუთი ელემენტი . . . . .	34
ნახაზი 1.23	მთავარი ძაბვების ტრაექტორიები. . . . .	34
ნახაზი 1.24	მაქსიმალური მღუნავი მომენტის კვეთის განაპირა წერტილი. . . . .	36
ნახაზი 1.25	ორ საყრდენზე მოთავსებული კოჭი დატვირთული შეყურსული ძალით. . . . .	38



ნახაზი 2.1	დრეკადი წირი. . . . .	39
ნახაზი 2.2	არამთლიანი ძელის შემთხვევაში დარღვეული უწყვეტობა . . . . .	40
ნახაზი 2.3	კოჭის ღერძის სიმრუდე. . . . .	41
ნახაზი 2.4	მლუნავი მომენტების გრაფიკული სქემა. . . . .	42
ნახაზი 2.5	კვეთი კონსოლის შემთხვევაში . . . . .	43
ნახაზი 2.6	ორი უბნის შემთხვევაში მლუნავი მომენტების ფუნქციით წარმოდგენა. . . . .	43
ნახაზი 2.7	დრეკადი წირის დიფერენციალური განტოლება შეყურსული ძალით დატვირთული კონსოლისათვის . . . . .	44
ნახაზი 2.8	ორ საყრდენზე მდებარე კოჭი დატვირთული თანაბარგანაწილებული ძალებით. . . . .	45
ნახაზი 2.9	(2.5) განტოლების ინტეგრირება ორი უბნის შემთხვევაში. . . . .	47
ნახაზი 2.10	შეყურსული მომენტის შემთხვევა . . . . .	50
ნახაზი 2.11	შეყურსული ძალის შემთხვევა . . . . .	51
ნახაზი 2.12	თანაბარგანაწილებული ტვირთის შემთხვევა. . . . .	52
ნახაზი 2.13	დამატებითი ტვირთის შემთხვევა . . . . .	52
ნახაზი 2.14	დრეკადი წირის და მობრუნების კუთხის ზოგადი განტოლება . . .	53
ნახაზი 2.15	ძელს მოდებული რეაქციის ძალები საყრდენების ნაცვლად . . . . .	54
ნახაზი 2.16	დრეკადი წირის განტოლება. . . . .	55
ნახაზი 2.17	შენადული კოჭები. . . . .	56
ნახაზი 2.18	ხის ძელებზე განივი ძალის მოქმედება. . . . .	56
ნახაზი 2.19	შენადული კოჭები I და II კვეთებით . . . . .	57
ნახაზი 2.20	მლუნავი მომენტის ცვლილების გამო წარმოშობილ ძალთა სხვაობით გამოწვეული ძერა . . . . .	57
ნახაზი 2.21	მოქლონვილი კოჭი . . . . .	58
ნახაზი 2.22	შენადული კოჭი. . . . .	59
ნახაზი 2.23	კოჭი სოგმანებით შეერთებული ხის ორი ძელისაგან . . . . .	60
ნახაზი 2.24	არარსიმეტრიული კოჭების ბრტყელი ღუნვა . . . . .	60
ნახაზი 2.25	შველერის ღუნვა განივი ძალით . . . . .	61
ნახაზი 2.26	ღუნვის ცენტრის პოვნა . . . . .	62
ნახაზი 2.27	P ძალის მოდება კედლიდან l მანძილზე, წონასწორობის დაცვა . .	62

ნახაზი 2.28	სიმეტრიის სიბრტყეში ლუნვისას მხები ძაბვების ტოლქმედის დამთხვევა სიმეტრიის ღედის მიმართ . . . . .	63
ნახაზი 2.29	არასიმეტრიული თხელკედლიანი პროფილების ლუნვის ცენტრი, კუთხოვანისთვის, ტესტური კვეთისთვის . . . . .	63
ნახაზი 2.30	ერთ კვეთში გადაცემული მლუნავი მომენტის წარმოდგენა, როგორც ორი განივი ძალის გავლენის ზღვარი. . . . .	64
ნახაზი 2.31	სუფთა ლუნვისას მლუნავი მომენტები . . . . .	64
ნახაზი 2.32	სიმეტრიული კვეთი ნეიტრალური ღერძისადმი. . . . .	65
ნახაზი 2.33	არასიმეტრიული კვეთი ნეიტრალური ღერძისადმი . . . . .	66
ნახაზი 2.34	კოჭის ზღვრული მდგომარეობა, როცა პლასტიკური დეფორმაციები C კვეთში ძელის ღერძამდე გავრცელდა. . . . .	67
ნახაზი 3.1	კოჭის მასის კვეთის სიმაღლეზე დამოკიდებულების გრაფიკი. . . . .	68
ნახაზი 3.2	დაძაბულობის განაწილება შედუღებული კოჭის პაკეტის ფურცლებში . . . . .	76
ნახაზი 3.3	მაგალითისთვის 1. ა) საანგარიშო სქემა; ბ) კოჭის კვეთი . . . . .	78
ნახაზი 4.1	შედგენილი, შედუღებული ორტესტური კვეთის კოჭი. . . . .	83
ნახაზი 4.2	გამძლეობის ხვედრითი მომენტის მრუდები. . . . .	84
ნახაზი 4.3	კოჭის ზედა სარტყელის სიმაღლის დამოკიდებულება თაროს სისქეზე. . . . .	89
ნახაზი 4.4	შედუღებული კოჭების კვეთის შერჩევა. . . . .	93
ნახაზი 4.5	მაგალითი 3. . . . .	93
ნახაზი 4.6	არასიმეტრიული შედუღებული კოჭისთვის კვეთის შერჩევა . . . . .	94
ნახაზი 4.7	მოქლონილი კოჭების კვეთი . . . . .	96
ნახაზი 5.1	კოჭების ტიპები. . . . .	99
ნახაზი 5.2	კოჭის წონის ცვლილება მისი კვეთის სიმაღლის მიხედვით. . . . .	102
ნახაზი 5.3	შედუღებული კოჭის სარტყელის ფურცლებს შორის დატვირთვის განაწილება . . . . .	106
ნახაზი 5.4	სარტყელის ფურცლების დასაშვები კიდული მოქლონილ კოჭებში. . . . .	112
ნახაზი 5.5	მოქლონილი კოჭის კვეთი (მაგალითი 4. მიმართებაში). . . . .	117
ნახაზი 6.1	ფოლადის შედგენილი განივკვეთის მქონე შედუღებული კოჭი. . . . .	124
ნახაზი 7.1	შედგენილი, შედუღებული ფოლადის კოჭზე მოსული ძალები . . . . .	134

## შესავალი

შედგენილი, შედუღებული კოჭების განივკვეთის შერჩევისას მოცემული დატვირთვებისა და ჩალუნვის რეგლამენტირებული მნიშვნელობის დროს მიღებულია, რომ განისაზღვროს კოჭის განივკვეთის მინიმალური და ოპტიმალური სიმაღლე და შემდეგ სიმაღლის მიხედვით მოხდეს კოჭის განივკვეთის კონსტრუირება. კოჭის განივკვეთის ელემენტებს შორის, როგორცაა კოჭის სიმაღლე, კოჭის კედლის სისქე, კვეთის თაროს სიგანე და სისქე, დადგენილია გარკვეული თანაფარდობანი; კოჭის განივკვეთი უნდა იყოს რაციონალური, თაროების ფართობები სასურველია იყოს კედლის ფართობის ტოლი და სხვა. ყველა ამ პირობის დაკმაყოფილება გაანგარიშების არსებული მეთოდით გარკვეულ ობიექტურ სიძნელეებთანაა დაკავშირებული და ხშირად ვერც ხერხდება. წინამდებარე ნაშრომის მიზანია კოჭების გაანგარიშების უფრო მოხერხებული წესის შემუშავება.

როგორც ცნობილია, კლასიკური მეთოდით ფოლადის შედგენილი განივკვეთის მქონე შედუღებული კოჭების გაანგარიშებისას სინისტიისა და სიმტკიცის პირობების გათვალისწინებით ისაზღვრება კოჭის განივკვეთის სიმაღლე  $h$ , რომელიც მიიღება კოჭის ინერციის მომენტის -  $I_x$ , წინალობის მომენტისა -  $W_x$  და განივკვეთის ფართობის -  $A$ , გამოსახულებებს შორის ურთიერთდამოკიდებულებებისგან. [1]; [2]; [3]

$h$  - ის შერჩევის შემდეგ საჭიროა კოჭის განივკვეთის კონსტრუირება, ანუ გარკვეული თანაფარდობების დაცვა კოჭის კვეთის პარამეტრებს შორის, როგორცაა კოჭის კედლის სიმაღლე -  $h_{კედ.}$ , კოჭის კედლის სისქე  $\delta_{კედ.}$ ; კოჭის თაროების სიგანე -  $b_{თარ.}$  და კოჭის თაროს სისქე  $t_{თარ.}$ .

შესაბამისი მოთხოვნების დაკმაყოფილების დროს კოჭის კვეთის დაგეგმარებისას ხშირად ვერ ხერხდება ან ძნელდება კოჭის განივკვეთის ფართობის რაციონალურობის მოთხოვნა, რაც იმაში მდგომარეობს, რომ  $2A_{თარ.} = A_{კედ.}$ . მიუხედავად იმისა, რომ სწორედ ამ პირობის გათვალისწინებითაა განსაზღვრული კოჭის სიმაღლე  $h$ . ე. ი. თაროების ფართობი სასურველია იყოს კოჭის კედლის ფართობის ტოლი, ანუ კოჭის მთელი განივკვეთის ფართობი თანაბრად უნდა

იყოფოდეს თარობისა და კედელს შორის. ამ სიძნელეს შესაძლებელია გვერდი ავუაროთ, თუ შევექმნით შედგენილი კოჭების “სორტამენტს”, რომელშიც  $h$  - ების მიხედვით და ყველა მოთხოვნილი პირობის დაკმაყოფილებით მოცემული გვექნება კოჭის განივკვეთები, ინერციის მომენტები, წინალობის მომენტები და სხვა მახასიათებლები, რაც საშუალებას მოგვცემს ერთი რომელიმე პარამეტრის, ვთქვათ, ინერციის მომენტის  $I$  ან წინალობის მომენტის  $W$  - ს მიხედვით ავირჩიოთ ჩვენთვის საჭირო კვეთი ყველა სხვა პარამეტრებთან ერთად. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ თუ რაიმე მოსაზრებით საჭირო იქნა კვეთის პარამეტრების კორექტირება – ეს უკვე გაცილებით იოლი საქმეა.

სამრეწველო და სამოქალაქო მშენებლობაში ფართო გამოყენება აქვს ლითონის შედგენილ, შედუღებულ, ორტესებრი ფორმის განივკვეთის მქონე კოჭებს. ასეთი კოჭების გაანგარიშებისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება, სიმტკიცისა და სიხისტის პირობების დაკმაყოფილებასთან ერთად, ეკონომიურობის საკითხსაც, რაც კოჭის განივკვეთის ფართობის მინიმალურობასთანაა დაკავშირებული. ამ ამოცანების გადაწყვეტის არსებულ მეთოდში გვხვდება გარკვეული როგორც მათემატიკური, ისე ლოგიკური წინააღმდეგობანი, რომელთა შესახებაც მოსაზრებები მოცემულია წინამდებარე ნაშრომში.

შედგენილი, შედუღებული კოჭების გაანგარიშება სიმტკიცეზე და სიხისტეზე განხილულია მრავალი ავტორის მიერ, რომელთა შორისაც მნიშვნელოვნად უნდა ჩაითვალოს ნ. ს. სტრელეცკის, ე. ი. ბელენიას და კ. კ. მუხანოვის შრომები. შედგენილი კოჭების გაანგარიშების ერთი შეხედვით სამარტივის მიუხედავად უნდა აღინიშნოს, რომ მასში გასათვალისწინებელია მრავალი ნიუანსი, როგორც კონსტრუირებისას, ასევე გაანგარიშებისას სამშენებლო მექანიკის მეთოდების შესაბამისად და მათემატიკური მოდელის შესაქმნელად. საანგარიშო მოდელის შექმნისა და მისი განხორციელების დროს მნიშვნელოვანია, რომ დაცული იქნას ის წინასწარი დებულებები და დაშვებები, რომელიც საფუძვლად უდევს კონკრეტულ საანგარიშო მოდელს და მათი დარღვევა არ არის მიზანშეწონილი გამართლებული იქნას რაიმე პრაქტიკული მოსაზრებებით. წინამდებარე ნაშრომი შეეხება სწორედ ასეთ გადახრებს შედგენილი, შედუღებული კოჭების გაანგარიშებისას.

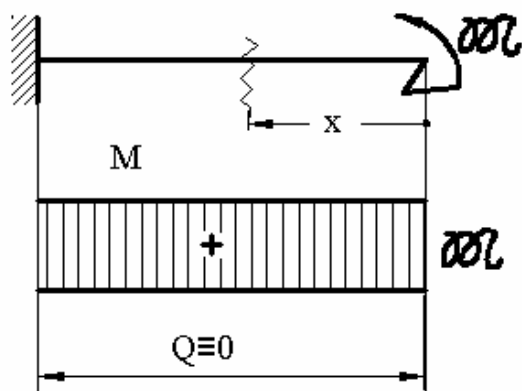
# ლიტერატურის მიმოხილვა

ძაბვები პირდაპირი ღუნვის დროს

## 1. ნორმალური ძაბვები

პირველ რიგში განვიხილოთ ღუნვის კერძო შემთხვევა – სუფთა ღუნვა (ნახ. 1.1). ამ შემთხვევაში ძელის განივ კვეთში აღიძვრება ნორმალური ძაბვები, მხები ძაბვები კი ნული იქნება. ეს მოსაზრება ემყარება ძელის მოკვეთილი ნაწილის წონასწორობის პირობებს:

მხოლოდ ნორმალურმა  $\sigma dF$  ძალებმა შეიძლება შეადგინონ წყვილძალა, რომელიც აქტიური წყვილძალის სიბრტყეში – სიმეტრიის სიბრტყეში მოთავსდება და რომლის მომენტი აქტიური მომენტის ტოლი და შებრუნებული მიმართულების იქნება.

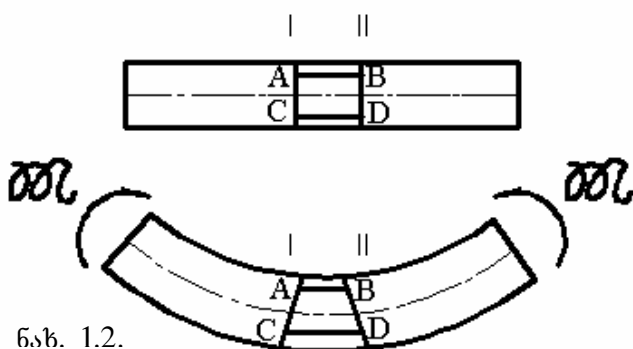


ნახ. 1.1.

რაც შეეხება საკითხს კვეთზე ძაბვების განაწილების შესახებ, სტატიკას პასუხის გაცემა არ შეუძლია – ეს საკითხი სტატიკურად ურკვევია.

ძაბვების განაწილების შესახებ წარმოდგენა უნდა ვიქონიოთ დეფორმაციის ხასიათის მიხედვით. ნიშნის ზედაპირზე დავნიშნოთ ორი განივი ხაზი – ორი ბოჭკო, ხოლო შემდეგ ვაწარმოთ წყვილძალით გაღუნვა (ნახ. 1.2), დავინახავთ:

1. შეზნექილობის მხარეს მოთავსებული  $AB$  ბოჭკო დამოკლდება, ამოზნექილობის მხარეს  $CD$  კი დაგრძელდება.
2. განივი ხაზები დარჩება სწორი და ერთიმეორის მიმართ დაიხრება.
3. განივი ხაზები ბრუნვის დროს გაღუნული ბოჭკოების მართობი რჩება.



ნახ. 1.2.

რადგანაც შეკუმშული ბოჭკოებიდან გაჭიმულზე გადასვლა უწყვეტი ცვლილებით მოხდება, მათ შორის უნდა არსებობდეს ნეიტრალური ბოჭკო, რომელიც მხოლოდ

გამრუდდება, მაგრამ სიგრძეს არ შეიცვლის. ნახაზზე ეს ბოჭკო წყვეტილი ხაზითაა ნაჩვენები.  $ABCD$  სწორკუთხედში კუთხეების უცვლელობა მოწმობს, რომ კოჭის გვერდით სიბრტყეში ძვრა არ არსებობს.

საფუძველი გვაქვს ვიფიქროთ, რომ ზედაპირზე არსებული დეფორმაციის სურათი მართებულია ძელის შიგნითაც. მაშასადამე, შეიძლება ვთქვათ, რომ ლუნვის დროს ძელში ჩნდება ორი ზონა: გაჭიმული და შეკუმშული, რომელთა საზღვარზე მოთავსებულია ნეიტრალური შრე. განივი კვეთები ლუნვის პროცესში რჩება ბრტყელი და პერპენდიკულარულად დეფორმირებული ძელის გალუნული ღერძისა. ისინი, როგორც ხისტი ფირფიტები, ერთიმეორის მიმართ შემობრუნდებიან. კვეთის შემობრუნება წარმოებს ნეიტრალური ღერძის (ხაზის) გარშემო, რომელიც ნეიტრალური შრისა და განივი კვეთის სიბრტყის გადაკვეთას წარმოადგენს.\*

კოჭის და დატვირთვის სიმეტრიულობის გამო დეფორმაციაც სიმეტრიულია ძალთა სიბრტყის მიმართ, რის შედეგადაც ნეიტრალური ღერძი ამ სიბრტყის პერპენდიკულარულად გაივლის.

ბრტყელი კვეთის ჰიპოთეზა ანუ ბერნულის ჰიპოთეზა, რომელიც აქ ჩამოვყალიბეთ, საფუძველად უდევს ლუნვის ტექნიკურ თეორიას. სუფთა ლუნვის შემთხვევაში ის სრულიად სწორია, განივისა კი – საკმაოდ ზუსტი. აღსანიშნავია, რომ თუ გრენის დროს ამ თვისებით მხოლოდ მრგვალი ძელი ხასიათდება, ლუნვის შემთხვევაში ის ყოველი ფორმისთვის მართებულია.

ორი განივი კვეთით გამოვყოთ უსასრულოდ მცირე სიგრძის ელემენტი (ნახ. 1.3).  $O$  ბოჭკოების სიმრუდის ცენტრია,  $O_1O_2$  - ნეიტრალური შრე,  $\rho$  - მისი სიმრუდის რადიუსი. გაჭიმულ ზონაში აღებული ნებისმიერი  $CD$  ბოჭკოს სრული დაგრძელება  $\Delta = CD - dx = (\rho + y) d\alpha - \rho d\alpha = y d\alpha$ , სადაც  $d\alpha$  ელემენტის ბოლოების ურთიერთმობრუნების კუთხეა.  $CD$  ბოჭკოს ფარდობითი დეფორმაცია

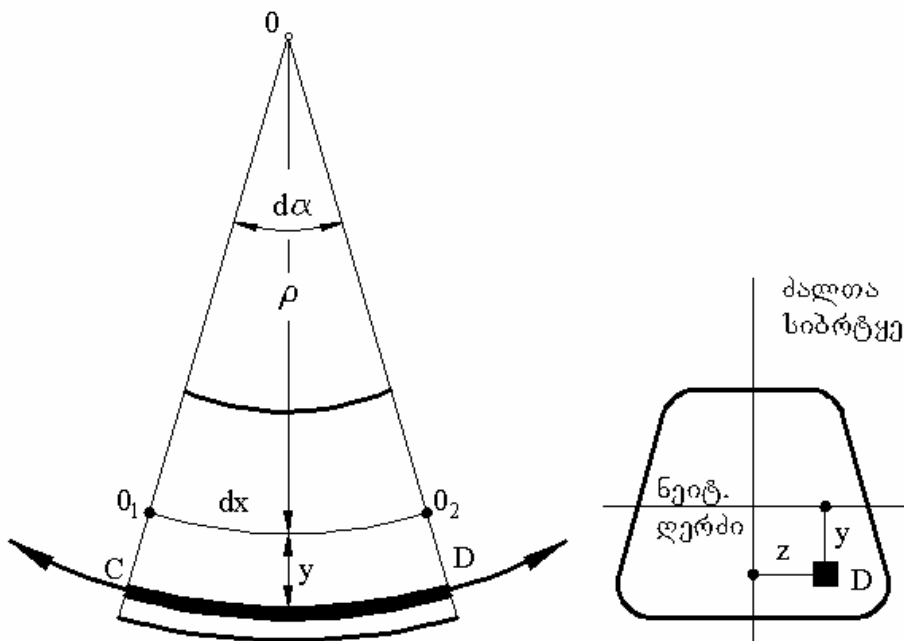
$$\varepsilon = \frac{\Delta}{dx} = \frac{y}{\rho}. \quad (1.1)$$

\* აქ ნეიტრალური ღერძი სწორი ხაზის სახით წარმოვადგინეთ. სინამდვილეში გაჭიმვასა და კუმშვას გრძივი მიმართულებით თან დაერთვის განივი დეფორმაციაც – შეკუმშული ზონა გაფართოვდება, გაჭიმული კი შევიწროვდება, რის შედეგადაც ნეიტრალური შრე განივი მიმართულებითაც გამრუდდება, მისი გადაკვეთა განივ სიბრტყესთან მოგვცემს მრუდს. ჩვეულებრივად ამას მხედველობაში არ ღებულობენ და ნეიტრალურ ხაზს სწორ ხაზად მიიჩნევენ.

დაფორმაციიდან ძაბვებზე ჰუკის კანონით გადავიდეთ. სუფთა ლუნვისას ბოჭკოები ერთდერძა გაჭიმვა-კუმშვას განიცდიან, ამიტომ  $\sigma = E\varepsilon$ . აქ ჩავსვათ (1.1) გამოსახულება, გვექნება

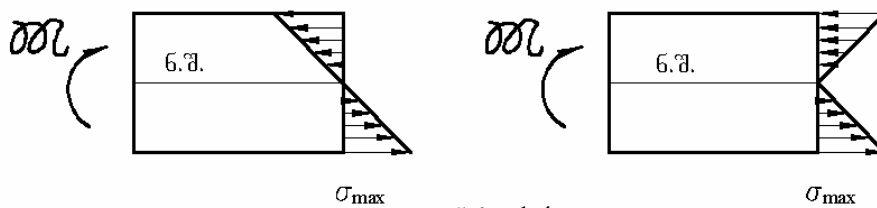
$$\sigma = E \frac{y}{\rho}. \quad (1.2)$$

ნორმალური ძაბვა  $y$  მანძილის პროპორციულია, ძაბვების ეპიურა 1.4 ნახ.-ზეა ნაჩვენები. ერთ ნახაზზე ეპიურა შეკუმშულ და გაჭიმულ ზონაში ერთი სწორი ხაზითაა წარმოდგენილი, მეორეზე – ორით, კვეთის ერთი მხრიდან.



ნახ. 1.3

ბრტყელი ეპიურის ჩვენება საკმარისია, ვინაიდან კოჭის სიგანეზე ძაბვა უცვლელია. ეპიურებში ნაგულისხმევა, რომ მოდული  $E$  გაჭიმვასა და კუმშვაზე თანატოლია.

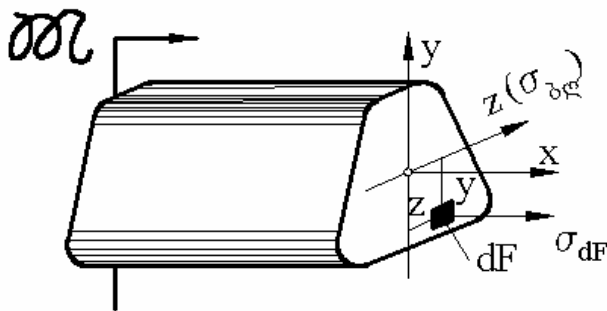


ნახ. 1.4.

სხვადასხვა მოდულის შემთხვევაში ეპიურის დახრის კუთხე გაჭიმულსა და შეკუმშულ ზონაში სხვადასხვა იქნებოდა. კოჭის საშიშ ადგილებს ნეიტრალური შრიდან უშორესი ბოჭკოები წარმოადგენენ, სადაც დაბვა მაქსიმუმს აღწევს.

(1.2) ფორმულაში შედის ორი უცნობი: სიმრუდის რადიუსი და ნეიტრალური შრის (ან ღერძის) მდებარეობა, საიდანაც  $y$  მანძილი აითვლება. ეს უცნობები წონასწორობის განტოლებიდან განისაზღვრება.

კოჭის მოკვეთილ ნაწილზე მოქმედი ძალთა სისტემა სივრცითია (თუმცა არა ზოგადი სახის) – უნდა დაკმაყოფილდეს წონასწორობის ექვსი განტოლება (ნახ. 1.5)  $y$  - ით აღნიშნულია კვეთის სიმეტრიის ღერძი,  $z$  - ით კი ნეიტრალური ღერძი. დავაგეგმილოთ ძალები  $x$  ღერზე



$$\sum X = \int_F \sigma dF = 0.$$

დაბვის გამოსახულების ჩასმის შემდეგ გვექნება  $\frac{E}{\rho} \int_F y dF = 0.$

ნახ. 1.5.

რადგანაც  $\frac{E}{\rho} \neq 0$ , ამიტომ

$$\int_F y dF = 0. \tag{1.3}$$

მაგრამ ეს ინტეგრალი განივი კვეთის სტატიკური მომენტია  $z$  ღერძის მიმართ. მისი ნულოვან ტოლობა გვიჩვენებს, რომ ნეიტრალური ღერძი კვეთის სიმძიმის ცენტრში გადის.

გეგმილების ორი დანარჩენი განტოლება  $\sum Y = 0$ ,  $\sum Z = 0$  იგივეობის  $0 = 0$  სახეს იღებს, რადგანაც მოქმედ ძალებს  $y$  და  $z$  ღერძების მიმართულებით მდგენელები არა აქვთ. მომენტების განტოლება  $x$  ღერძის მიმართ აგრეთვე იგივეურად დაკმაყოფილდება.  $y$  ღერძის მიმართ გვაქვს

$$\sum M_y = \int \sigma dF \cdot z = 0,$$

საიდანაც (1.2) გამოსახულების ჩასმის შემდეგ მივიღებთ პირობას, რომ ცენტრიდანული მომენტი



$$I_{yz} = \int_F yz dF = 0 \quad (1.4)$$

რაც დაკმაყოფილდება, ვინაიდან  $y$ , პირობის თანახმად, სიმეტრიის ღერძია.

შეექვსე განტოლების მისაღებად შევადგინოთ ყველა ძალის მომენტები ნეიტრალური ღერძის მიმართ

$$\sum M_z = M - \int_F \sigma dF \cdot y = 0$$

ჩავსვათ რა  $\sigma$ -ს გამოსახულებას და გავითვალისწინებთ, რომ  $\int_F y^2 dF$

წარმოადგენს ინერციის მომენტს  $z$  ღერძის მიმართ, ხოლო  $M = M$ , უცნობი სიმრუდისთვის მივიღებთ

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_z} \quad (1.5)$$

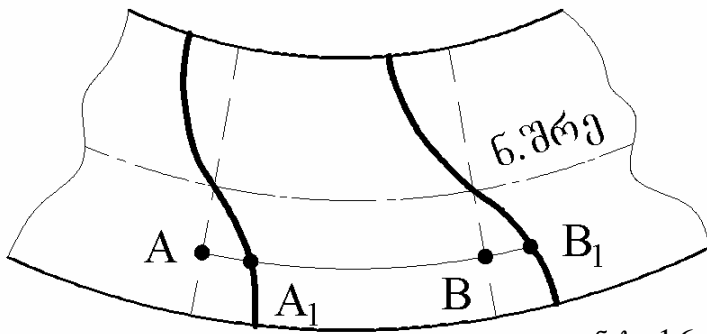
მიღებული ფორმულა ღუნვის თეორიის ერთ-ერთ ძირითად თანაფარდობას გამოსახავს.  $EI_z$ -ს ძელის სიხისტე ეწოდება ღუნვაზე. სიმრუდე პროპორციულია მღუნავი მომენტისა და უკუპროპორციული – სიხისტისა. სიმრუდის გამოსახულება შევიტანოთ (1.2) ფორმულაში, მივიღებთ ნორმალური ძაბვების საანგარიშო ფორმულას

$$\sigma = \frac{My}{I_z}. \quad (1.6)$$

ამ ფორმულის გამოყვანის დროს ვისარგებლებთ ორი დაშვებით: 1. ღუნვა წარმოებს მხოლოდ წყვილძალით და 2. კოჭი სიმეტრიულია. ამ შეზღუდვებიდან შეიძლება განვთავისუფლდეთ.

ღუნვის ზოგად შემთხვევაში, როცა განივი ძალაც არსებობს, კვეთში აღიძვრება მხები ძაბვები, რომლებიც იწვევენ ძვრას კოჭის გრძივ სიბრტყეში. მაქსიმალურ ძვრას ადგილი აქვს ნეიტრალურ შრესთან, შემდეგ მცირდება და განაპირა ბოჭკოებთან ისპობა. ძვრის შედეგად კოჭის ღერძი მართობი არ რჩება განივი კვეთისა, თვითონ კვეთი კი ცილინდრული ზედაპირის ფორმას ღებულობს, რომლის მსახველი ნეიტრალური ღერძის პარალელურია (ნახ. 1.6). როცა აღებულ უბანში  $Q = const$ , ყველა კვეთის გამრუდება ერთნაირია, რის გამოც  $AB$  ბოჭკო მხოლოდ “ხისტ გადაადგილებას” მიიღებს და ძვრის შედეგად არ დაგრძელდება. ცვლადი განივი ძალის შემთხვევაში თუმცა დამატებითი დაგრძელება ჩნდება, მაგრამ მეტად

უმნიშვნელო, ეს უფლებას გვაძლევს იგი უკუვაგლოთ და ძაბვების გასაანგარიშებლად ისევ (1.6) ფორმულა გამოვიყენოთ.



ნახ. 1.6

(1.6) ფორმულა

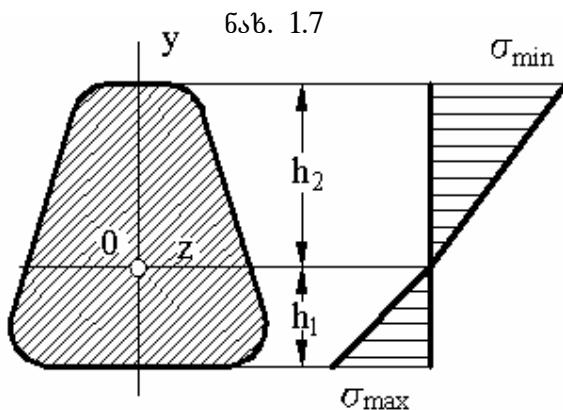
გამოსახავს საერთო ძაბვებს, ტვირთების გადაცემის ზონებში კი ადგილი ექნება საერთო კანონიდან გადახრას, რასაც სენ-ვენანის პრინციპის თანახმად ლოკალური

ხასიათი ექნება და შესაძინე მანძილზე არ გავრცელდება.

(1.6) ფორმულა საკმაო სიზუსტით გვაძლევს საერთო ძაბვებს, თუ კოჭის სიმაღლისა და მალის შეფარდება  $\frac{h}{l} < \frac{1}{5} \div \frac{1}{4}$ , რადგანაც წინააღმდეგ შემთხვევაში უკვე საქმე გვექნება არა ძელის ღუნვასთან, არამედ თავისსავე სიბრტყეში დატვირთულ ფილასთან.

## 2. კოჭების კვეთის შერჩევა

სიმტკიცის პირობის შესადგენად პირველ რიგში უნდა მოიძებნოს კოჭის საშიში კვეთი, სადაც მდუნავი მომენტი აბსოლუტური სიდიდით მაქსიმალურია. შემდეგ კი უნდა მოვითხოვოთ, რომ უდიდესმა მუშა გამჭიმავმა და მკუმშავმა ძაბვებმა ამ კვეთის განაპირა ბოჭკოებში დასაშვებ ზღვრებს არ გადააჭარბონ (ნახ. 1.7)



ნახ. 1.7

$$\max \sigma = \frac{M_{\max} h_1}{I_z} \leq [\sigma]_s \quad (1.7)$$

$$|\max \sigma| = \frac{M_{\max} h_2}{I_z} \leq [\sigma]_s$$

მეიფე მასალის შემთხვევაში კოჭი ორივე პირობაზე უნდა შემოწმდეს,

პლასტიკურისა კი ერთ პირობაზეც საკმარისია, ვინაიდან მისი დასაშვები ძაბვები გამჭიმვასა და კუმშვაზე თანატოლია. სახელდობრ ის პირობა უნდა ავილოთ, რომელშიც აბსოლუტური სიდიდით უდიდესი მუშა ძაბვა შედის.

თუ ნეიტრალური ღერძიც კვეთის სიმეტრიის ღერძია, როგორც, მაგალითად, სწორკუთხოვანი ან ორტესებრი კვეთის შემთხვევაში, მაშინ  $h_1 = h_2 = \frac{h}{2}$ ,  $\max \sigma = (\min \sigma)$  და მყიფე მასალის შემთხვევაში შესამოწმებელი იქნება მხოლოდ გაჭიმული ზონა, პლასტიკურისათვის კი ორივე პირობა მიიღებს სახეს

$$\frac{M_{\max}}{W_z} \leq [\sigma], \quad (1.8)$$

სადაც შეფარდებას

$$\frac{I_z}{h/2} = W_z \quad (1.9)$$

კვეთის წინალობის ღერძული მომენტი ეწოდება. სწორკუთხოვანი კვეთისთვის  $W_z = \frac{bh^2}{6}$ , სადაც  $b$  კვეთის სიგანეა, ხოლო  $h$  - სიმაღლე; მრგვალი კვეთისთვის  $W_z = \frac{\pi d^3}{32}$ ; გაგლინული ორტესებრი და შველერის ფორმის პროფილებისათვის წინალობის ღერძული მომენტი მოცემულია ნაგლინის სორტამენტის ცხრილებში.

(1.7) პირობებში  $[\sigma]_g$  და  $[\sigma]_j$  დასაშვები ძაბვებია გაჭიმვასა და კუმშვაზე, ვინაიდან განაპირა ბოჭკოები, სწორედ, უბრალო გაჭიმვას ან კუმშვას განიცდიან. ზოგიერთი მასალისთვის მათ მაგიერ აიღება ე. წ. დასაშვები ძაბვა ლუნვაზე -  $[\sigma]_{\text{ლ}}$ , რომელიც რამდენიმედ მეტია გაჭიმვა-კუმშვის დასაშვებ ძაბვებზე. ასე, მაგალითად, ფიჭვისათვის გვაქვს

$$[\sigma] = \pm 70 \frac{\text{პბ}}{\text{სმ}^2}, \quad \text{ხოლო} \quad [\sigma]_{\text{ლ}} = \pm 100 \frac{\text{პბ}}{\text{სმ}^2}.$$

ამით მხედველობაში ღებულობენ იმას, რომ კოჭის ზღვრული მდგომარეობა ლუნვისას ნაკლებად საშიშია, ვიდრე გაჭიმული ძელისა.\*

პირველ შემთხვევაში საშიში ძაბვები მხოლოდ განაპირა ბოჭკოებში მიიღწევა, მეორეში კი - მთელ კვეთში ერთბაშად.

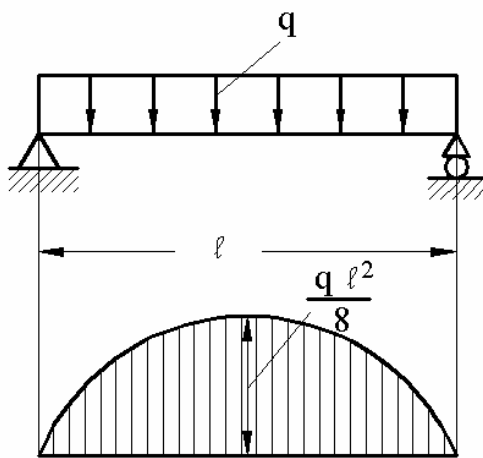
\* აქ მხედველობაში გვაქვს ზღვრული მდგომარეობა დასაშვები ძაბვების მეთოდის მიხედვით.

**მაგალითი 1.** შევარჩიოთ ხის კოჭის სწორკუთხოვანი კვეთი -  $b$  და  $h$ , თუ  $l = 4$  მ,  $q = 0,5$  ტ/მ (ნახ. 1.8). დასაშვები ძაბვა გაჭიმვასა და კუმშვაზე ღუნვის დროს  $[\sigma]_{\text{ღ}} = \pm 100$  კგ/სმ<sup>2</sup> (ფიჭვი).

საშიშია კოჭის შუა კვეთი, სადაც

$$M_{\text{max}} = \frac{ql^2}{8} = \frac{0,5 \cdot 4^2}{8} = 1 \text{ ტმ.}$$

სიმტკიცის პირობიდან საჭირო წინაღობის მომენტი



ნახ. 1.8

$$W_z \geq \frac{M_{\text{max}}}{[\sigma]_{\text{ღ}}} = \frac{100000}{100} = 100 \text{ სმ}^3.$$

კოჭის სიმაღლისა და სიგანის

შეფარდება  $\frac{h}{b} = \frac{3}{2}$ , მაშინ

$$W_z = \frac{h^3}{9} \text{ და}$$

$$h \geq \sqrt[3]{9 W_z} = \sqrt[3]{9 \cdot 10000} \approx 21 \text{ სმ, ხოლო } b \approx 14 \text{ სმ.}$$

**მაგალითი 2.** შევარჩიოთ გაგლინული ორტესი კოჭის ნომერი, თუ  $M_{\text{max}} = 4,2$  ტმ და  $[\sigma] = 1600$  კგ/სმ<sup>2</sup>.

სიმტკიცის პირობიდან საჭირო წინაღობის მომენტი

$$W_z \geq \frac{420000}{1600} = 262 \text{ სმ}^3.$$

შესაბამისად, სორტამენტის ცხრილებიდან ვპოულობთ I № 20<sup>b</sup> - ს, რომლის წინაღობის მომენტი უდრის 250 სმ<sup>3</sup>, რაც საჭირო მომენტისაგან 5% - ით განსხვავდება.

**მაგალითი 3.** განვსაზღვროთ მღუნავი მომენტის დასაშვები სიდიდე ტესი კვეთის თუჯის კოჭისთვის, თუ დასაშვები ძაბვები ღუნვისას გაჭიმვაზე  $[\sigma]_{\text{ღ3}} = 300$  კგ/სმ<sup>2</sup>, კუმშვაზე  $[\sigma]_{\text{ღ3}} = 100$  კგ/სმ<sup>2</sup>. მღუნავი მომენტი ვიგულისხმობთ დადებითი - გაჭიმულია ქვედა მხარე (ნახ. 1.9)

(1.7) ფორმულების გამოსაყენებლად, საიდანაც მომენტი უნდა ვიანგარიშოთ, საჭიროა წინასწარ  $I_z$  და  $h_1$ ,  $h_2$  მანძილები განისაზღვროს. სიმძიმის ცენტრის დაშორება კვეთის ქვედა გვერდიდან

$$h_1 = \frac{8,2 \cdot 1 + 10,1 \cdot 7}{8,2 + 10,1} = 3,31 \text{ სმ}, \quad h_2 = 8,69 \text{ სმ}.$$

ინერციის მომენტი

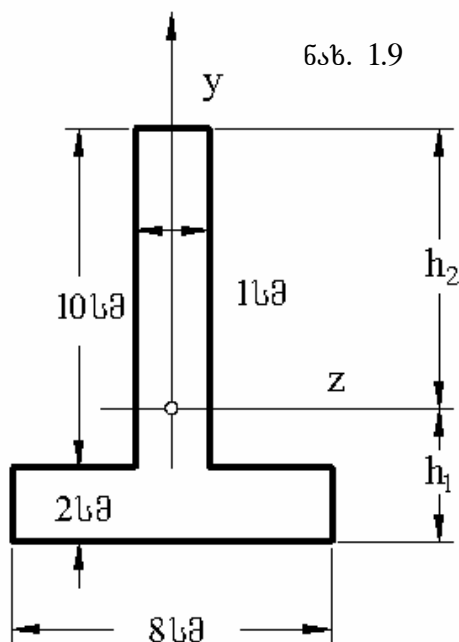
$$I_z = \frac{8,2^3}{12} + (3,31 - 1,0)^2 \cdot 8,2 + \frac{1 \cdot 10^3}{12} + (8,69 - 5)^2 \cdot 10,1 = 310 \text{ სმ}^4.$$

სიმტკიცის პირობებიდან გვაქვს

$$M_{\max} = \frac{[\sigma]_{\text{კვ}} I_z}{h_1} = \frac{300 \cdot 310}{3,31} = 28\,100 \text{ კგსმ}.$$

$$M_{\max} = \frac{[\sigma]_{\text{კვ}} I_z}{h_2} = \frac{1000 \cdot 310}{8,69} = 35\,700 \text{ კგსმ}.$$

მომენტის ამ ორი მნიშვნელობიდან, ცხადია, შეიძლება უმცირესის დაშვება – იგი გაჭიმვაზე სიმტკიცის პირობიდან ისაზღვრება. დაუშვებთ რა ასეთ მომენტს, შეკუმშულ ზონაში სიმტკიცის ჭარბი მარაგი გვექნება.



კოჭის კვეთის რაციონალური ფორმები. მასალის ეკონომიის თვალსაზრისით დიდი მნიშვნელობა აქვს განივი კვეთის ფორმის შერჩევას. ამით განსხვავდება ლუნვა და გრესვა გაჭიმვისაგან, სადაც მნიშვნელობა აქვს მხოლოდ განივი კვეთის ფართობს. ეს განსხვავება აიხსნება ლუნვისა და გრესვის დროს ძაბვების არათანაბარი განაწილებით – მასალის არათანაბარი გამოყენებით.

სიმტკიცის პირობების თანახმად, ძაბვები მხოლოდ განაპირა ბოჭკოებში უტოლდება

დასაშვებს, დანარჩენ ადგილში კი მასალა სიმტკიცის ჭარბი მარაგით მუშაობს. მასალა სუსტად გამოიყენება განსაკუთრებით კვეთის შუა ნაწილში, სადაც დაბეჭები ნულს უახლოვდება. ცხადია, მიზანშეწონილია კვეთის შუა ნაწილი შევამციროთ, გარე ნაწილები კი, პირიქით, გავზარდოთ – ამით მასალის თანაბარ გამოყენებას მივუახლოვდებით. ასე წარმოსდგა ორტესებრი კოჭის იდეა, რომელმაც ფართო გამოყენება ჰპოვა ფოლადის კონსტრუქციებში. პატარა ტვირთების შემთხვევაში გამოიყენება გაგლინული ორტესებრი პროფილები, დიდი დატვირთვებისას კი შედგენილი – მოქლონვილი ან შენადული.

### 3. მხები დაბეჭები მასიური კვეთის კოჭებში

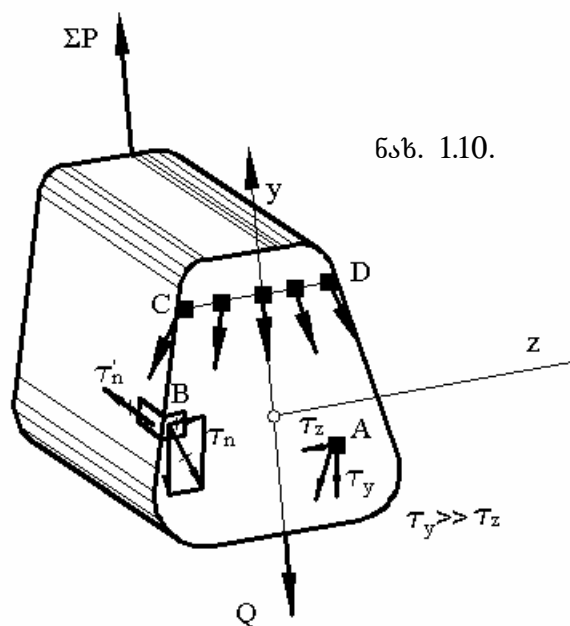
ლუნვის ზოგად შემთხვევაში კვეთში ნორმალური დაბეჭებთან ერთად მხები დაბეჭებიც აღიძვრება. განივი ძალა  $Q$  სწორედ მათ ტოლქმედს წარმოადგენს.

განივი კვეთის ნებისმიერ  $A$  წერტილში მხები დაბეჭის ვექტორს მრავალგვარი მიმართულება აქვს. მაშასადამე, საძიებელია მისი სიდიდე და მიმართულება ან მისი ორი მდგენელი  $\tau_y$  და  $\tau_z$  (ნახ. 1.10). კოჭის მოკვეთილ ნაწილზე მოდებულ ძალებს თუ დავაგეგმილებთ  $y$  და  $z$  ღერძებზე, მივიღებთ

$$\int_F \tau_y dF = \sum P = 0, \quad \int_F \tau_z dF = 0. \quad (1.10)$$

ვერტიკალური მდგენელების ჯამი კვეთის ცალ მხარეს მიღებულ ძალთა ჯამს უნდა აწონასწორებდეს, რაც განივი ძალის ტოლია, ხოლო ჰორიზონტალური მდგენელები კი თვით გაწონასწორებულ სისტემას უნდა წარმოადგენდეს.

მხები დაბეჭის მიმართულება მხოლოდ  $y$  ღერძისა და კონტურის წერტილებშია ცნობილი.  $y$  ღერძზე დაბეჭის ვექტორი სიმეტრიის გამო

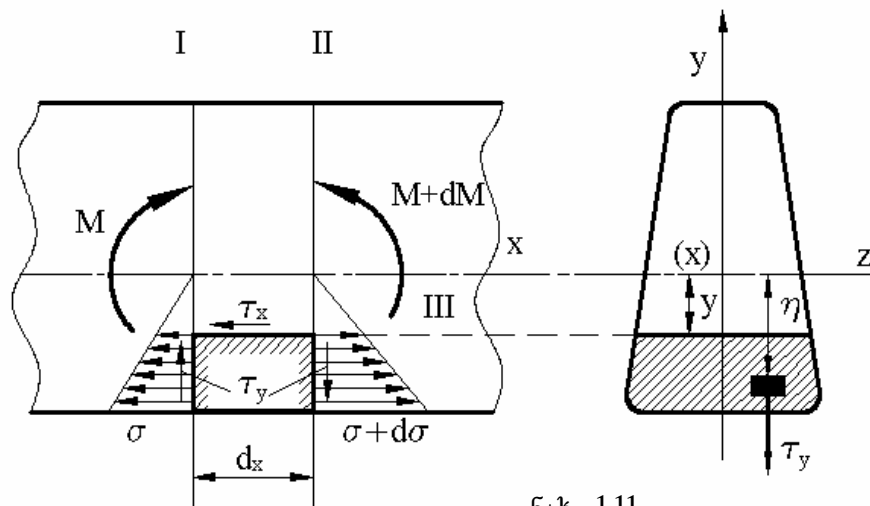


თვით ღერძს ემთხვევა. გამოვიყენებთ რა მხები ძაბვების ურთიერთობის კანონს, ადვილად დავამტკიცებთ, რომ კონტურზე მხები ძაბვის ვექტორი მის მხებზეა მიმართული. დაუშვათ წინააღმდეგი, რომ თითქოს  $\tau$  კონტურის რაიმე  $B$  წერტილში დახრილია მხებთან. მაშინ მისი კონტურის მხებსა და ნორმალზე დაშლით ვნახავთ, რომ ნორმალური მდგენელი  $\tau_n = 0$ , ვინაიდან ძელის ზედაპირზე მისი ტოლი ძაბვა  $\tau'_n$  არ არსებობს, ძელის გვერდითი ზედაპირი დატვირთული არაა. ცრუ ძაბვები ნახაზზე წახაზულია, გვრჩება მხებზე მიმართული ძაბვა.

$C$  წერტილიდან  $D$ -კენ მხები ძაბვის ვექტორი ჯერ ვერტიკალს უახლოვდება და შემდეგ ისევ იხრება.  $y$  ღერძისა და კონტურის გადაკვეთის წერტილებში ძაბვა უდრის 0, ვინაიდან ის ერთი მხრით  $y$  ღერძს უნდა დაემთხვეს, მეორეთი კი კონტურის მხებს, რაც ერთდროულად შეუძლებელია.

ვიცით რა უკვე ნორმალური ძაბვების განაწილება კვეთში, ელემენტარული ხერხით შესაძლებელია მხები ძაბვების ვერტიკალური მდგენელის განსაზღვრა. რაც შეეხება ჰორიზონტალურ მდგენელს, მისი პოვნა დრეკადობის თეორიის მეთოდების გამოყენებას მოითხოვს. არსებითაა, რომ  $\tau_y$  მდგენელი ბევრად აღემატება  $\tau_z$  მდგენელს და ჩვენც კვეთებში მხოლოდ მისი განსაზღვრით დაკმაყოფილდებით.

ძელიდან სამი კვეთით გამოვყოთ  $dx$  სიგრძის ელემენტი. I და II განივი კვეთებია, III – ნეიტრალური შრის პარალელური კვეთი (ნახ. 1.11).



ნახ. 1.11

ელემენტის ვერტიკალურ წახნაგებზე მოქმედებენ ნორმალური და მხები ძაბვები. I და II კვეთზე გადასვლისას, მღუნავი მომენტის ცვლილების გამო, ნორმალური ძაბვა  $d\sigma$  ნაზრდს მიიღებს. ელემენტის მარცხენა წახნაგზე მოქმედი ნორმალური ძალების ტოლქმედი

$$N_1 = \int_{F^*} \sigma dF = \frac{M}{I_z} \int_{F^*} \eta dF,$$

სადაც ინტეგრირება ვრცელდება წახნაგის  $F^*$  ფართობზე – დავარქვათ მას მოკვეთილი ფართობი (განივი კვეთიდან გამოყოფილია III სიბრტყით, ნახაზზე დაშტრიხულია). მიღებული ინტეგრალი მოკვეთილი ფართობის სტატიკური მომენტია  $z$  ღერძის მიმართ. მარჯვენა წახნაგზე მოქმედი ძალა ანალოგიურად მიიღება, საჭიროა მხოლოდ  $M$ ,  $M + dM$  - ით შეიცვალოს

$$N_1 = \frac{MS_z^*}{I_z}, \quad N_2 = \frac{(M + dM)S_z^*}{I_z}.$$

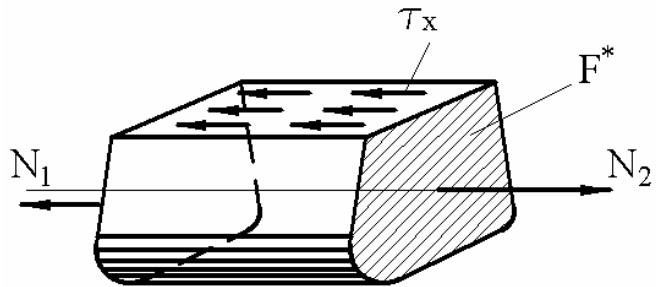
თუ დავუშვებთ, რომ მღუნავი მომენტი მარჯვნივ იზრდება, მაშინ  $N_2 > N_1$  და წარმოიშვება სხვაობა  $N_2 - N_1$ , რომლის გასაწონასწორებლად ელემენტის ზედა კვერდზე უნდა აღიძრას მხები ძაბვები  $\tau_x$ , მიმართული უმცირესი ძალისკენ (ნახ. 1.12). დავუშვათ, რომ კოჭის სიგანეზე მხები ძაბვები თანაბრადაა განაწილებული, მაშინ მათი ტოქმედი

$$dT = \tau_x b dx.$$

ყველა ძალის  $x$  ღერძზე  
დაგეგმილებით მივიღებთ

$$\sum X = N_2 - N_1 - dT = 0.$$

ჩასმის შემდეგ



ნახ. 1.12

$$\frac{(M + dM)S_z^*}{I_z} - \frac{MS_z^*}{I_z} - \tau_x b dx = 0,$$

საიდანაც

$$\tau_x = \frac{dM}{dx} \frac{S_z^*}{I_z b}.$$

მაგრამ მღუნავი მომენტის  $x$  - ით წარმოებული განივი ძალაა, ამიტომ

$$\tau_x = \frac{QS_z^*}{I_z b}. \quad (1.11)$$

თუმცა ჩვენ ძაბვა ჰორიზონტალურ კვეთში განვსაზღვრეთ, მაგრამ ურთიერთობის თვისების მიხედვით ერთდროულად განისაზღვრება ვერტიკალური  $\tau_y$  ძაბვებიც.



(1.11) ფორმულა პირველად მიღებული იყო დ. ი. ჟურავსკის მიერ 1855 წელს. იგი გამოსადგეია ვერტიკალური მხები დაბების გასაანგარიშებლად ნებისმიერი კვეთის შემთხვევაში.

კვეთში წერტილიდან წერტილში გადასვლისას (1.11) ფორმულაში მხოლოდ  $\frac{S_z^*}{b}$  შეიცვლება. მაშასადამე,  $\tau_y$  მდგენელი კვეთში ისეთივე კანონით იცვლება, როგორც ეს შეფარდება.

განვიხილოთ კერძო სახის კვეთები:

1. **სწორკუთხედი** (ნახ. 1.13). სიგანე  $b = const.$  მოკვეთილი ფართობის სტატიკური მომენტი

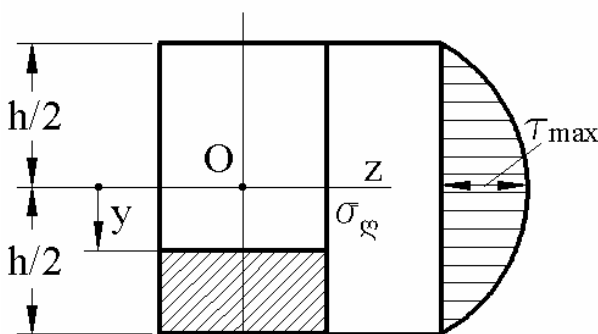
$$S_z^* = b \left( \frac{h}{2} - y \right) \left[ y + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{2} - y \right) \right] = \frac{bh^2}{8} \left( 1 - \frac{4y^2}{h^2} \right).$$

ჩასმით მივიღებთ

$$\tau_y = \frac{3Q}{2F} \left( 1 - 4 \frac{y^2}{h^2} \right) \quad (1.12)$$

როგორც ჩანს, დაბვის ვერტიკალური მდგენელი კვეთის სიმაღლეზე მეორე რიგის პარბოლის კანონით იცვლება. განაპირა წერტილებში დაბვა ნულია, ხოლო მაქსიმუმს აღწევს ნეიტრალურ შრეზე

$$\max \tau_y = \frac{3Q}{2F}. \quad (1.13)$$



ნახ. 1.13.

კვეთის ვერტიკალურ წიბოებსა და  $y$  ღერძზე მხები დაბვის ვექტორი ვერტიკალურია, შიგა წერტილებში ის იხრება – ჩნდება პორიზონტალური მდგენელიც. ზუსტი თეორია გვიჩვენებს, რომ სწორკუთხოვან კვეთებში ეს მდგენელი უმნიშვნელოა და

შეიძლება ის უკუვაგდოთ, ხოლო  $\tau_y$  მდგენელი კი კვეთის სიგანეზე თანაბრად განაწილებული მივიჩნიოთ, როგორც ეს (1.11) ფორმულის შედგენისას მივიღეთ. ეს ორი დაშვება, ცხადია, მით უფრო მართებულია, რაც ვიწრო და მაღალია კოჭი.

თუ  $\frac{h}{b} > 2$ , შეცდომა, დაშვებული მაქსიმალურ დაბვაში, (1.11) ფორმულით სარგებლობისას, 3,3% - ს არ აღემატება.

2. მრგვალი კვეთი. 1.14 ნახ. - დან ჩანს, რომ

$$b_\eta = 2r \cos \varphi, \quad \eta = r \cdot \sin \varphi,$$

$$d_\eta = r \cdot \cos \varphi d\varphi.$$

ელემენტარული ფართობი  $dF = b_\eta d_\eta = 2r^2 \cos^2 \varphi d\varphi$ . მოკვეთილი ფართობის სტატიკური მომენტი

$$S_z^* = \int_{F^*} \eta dF = 2r^3 \int_\alpha^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \varphi \sin \varphi d\varphi = \frac{2r^3}{3} \cos^3 \alpha.$$

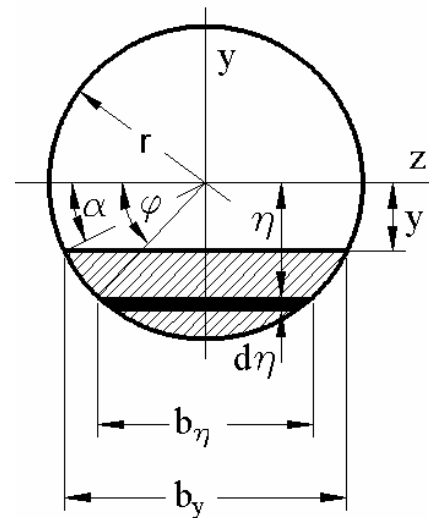
რადგანაც  $\cos^2 \alpha = 1 - \frac{y^2}{r^2}$ , (1.11) ფორმულაში

ჩასმით მივიღებთ

$$\tau_y = \frac{4Q}{3F} \left( 1 - \frac{y^2}{r^2} \right). \quad (1.14)$$

კვეთში უდიდესი დაბვის მიღწევა შეიძლება ნეიტრალური ღერძის წერტილებში, გვაქვს.

$$\max \tau_y = \frac{4Q}{3F}. \quad (1.15)$$



ნახ. 1.14.

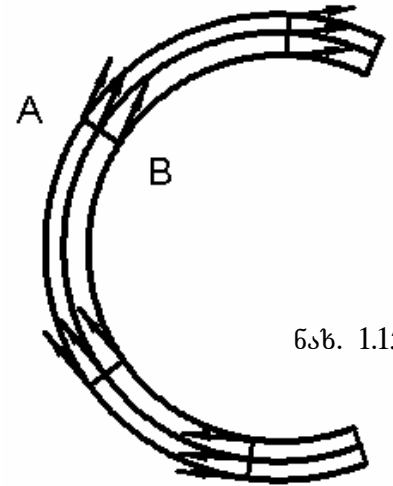
#### 4. მხები დაბვები თხელკედლიან კოჭებში

თხელკედლიან კოჭებში მხები დაბვების განსაზღვრა ემყარება ორ დაშვებას:

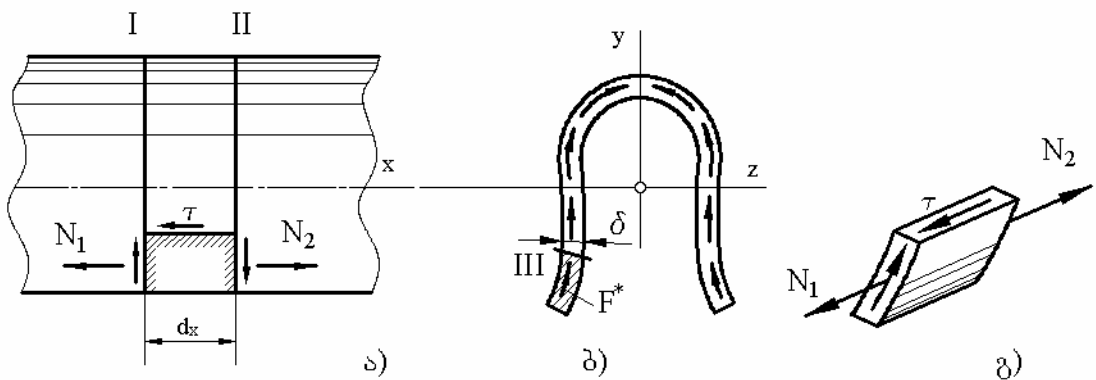
ა) დაბვის ვექტორი კვეთის კონტურის მხებს ემთხვევა და ბ) კედლის სისქეზე უცვლელია (ნახ. 1.15).

$A$  და  $B$  წერტილებში დაბვის ვექტორი ნამდვილად კონტურს ემთხვევა – მხები დაბვების ურთიერთობის კანონით ეს ისევე დამტკიცდება, როგორც მასიურ ძელებში. კედლის სისქის სიმცირე კი უფლებას გვაძლევს დაბვა კონტურის ნორმალზე უცვლელად ჩავთვალოთ.

აქ სრული ძაბვა  $\tau$  იმავე მეთოდით განისაზღვრება, რომლითაც  $\tau_y$  მდგენელი მასიურ კოჭებში. წარმოვიდგინოთ სიმეტრიული პროფილი, დატვირთული სიმეტრიის სიბრტყეში (ნახ. 1.16). I, II და III კვეთებით გამოვყოთ  $dx$  სიგრძის ელემენტი. მასიური ძელებისგან განსხვავებით, სადაც III კვეთა ნეიტრალური შრის პარალელურად ტარდებოდა, აქ ეს კვეთა კონტურის ნორმალზეა მიმართული.  $N_2 - N_1$  ძალთა სხვაობა სიგრძივად მიმართული ძაბვებით წონასწორდება (ნახ. 1.16, გ).



ნახ. 1.15.

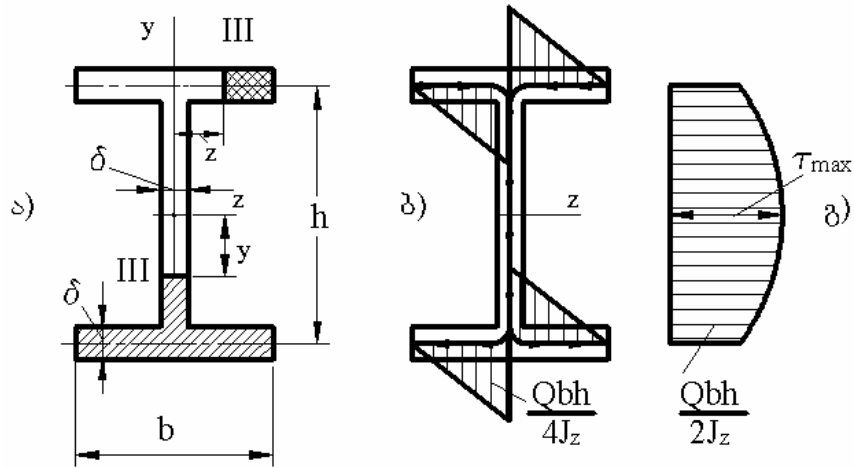


ნახ. 1.16.

შევადგენთ რა გამოყოფილი ელემენტისათვის წონასწორობით განტოლებას  $\sum X = 0$ , კვლავ მივიღებთ ცნობილ ფორმულას

$$\tau = \frac{QS_z^*}{I_z \delta}. \quad (1.16)$$

მხოლოდ  $b$  სიგანის მაგიერ ფორმულაში თაროს სისქე დაჯდება. მოკვეთილი ფართობი, რომლის სტატიკურ მომენტსაც  $S_z^*$  წარმოადგენს, 1.16, ბ ნახ. – ზე დაშტრიხულია.



ნახ. 1.17.

განვიხილოთ ორტესებრი კვეთი. კელლისა და თაროს სისქე თანატოლი მივიჩნიოთ.

ა) **დაბვები კედელში.** მოკვეთილი ფართობი დაშტრიხულია (ნახ. 1.17, ა). მისი სტატიკური მომენტი

$$S_z^* = \delta b \frac{h}{2} + \frac{\delta h^2}{8} \left( 1 - 4 \frac{y^2}{h^2} \right).$$

აქედან ჩანს, რომ კელლის გასწვრივ დაბვა II რიგის პარაბოლის კანონით იცვლება და მაქსიმუმს ნეიტრალურ ღერძზე აღწევს.

ბ) **დაბვები თაროში.** მოკვეთილი ფართობი ორმაგად დაშტრიხულია (ნახ. 1.17, ა). სტატიკური მომენტი

$$S_z^* = \delta \left( \frac{b}{2} - z \right) \frac{h}{2}.$$

თაროს გასწვრივ დაბვები სწორი ხაზის კანონით იცვლება. დაბვების ეპიურა 1.17, ბ და გ ნახაზზეა წარმოდგენილი. დაბვების მიმართულება, რაც იქვეა ნაჩვენები, ქმნის უწყვეტ ნაკადს – ზედა თაროდან გამოსული ორი ნაკადი კედელში ერთდება, ქვედა თაროში კი ისევ ორად იყრება. საკმარისია ნაკადის მიმართულება ერთ წერტილში ვიცოდეთ, რომ მისი მიმართულება მთლიანად გაირკვეს. თუ გამოვალთ განვიკვეთში მოქმედი ვერტიკალური დაბვებიდან, უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ისინი განივ ძალას აღგენენ და, მაშასადამე, კვეთის ცალ მხარეს მოდებულ ძალთა ჯამს აწონასწორებენ. შეიძლება ამოსავალად მივიჩნიოთ სივრცე – III კვეთში მოქმედი დაბვებიც, რომლებიც უდიდესი  $N_2$  ძალის საწინააღმდეგოდ მიმართებიან.

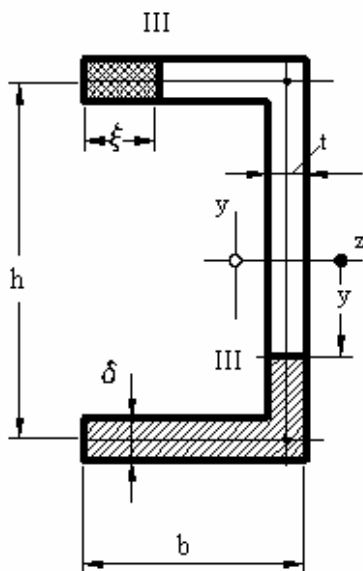
მეორე მაგალითის სახით განვიხილოთ შველერი. თაროსა და კედელში ძაბვების განსასაზღვრავად აქაც უნდა განვიხილოთ III კვეთის ორი მდებარეობა – ვერტიკალური და ჰორიზონტალური. სათანადო მოკვეთილი ფართობები 1.18 ნახ. – ზე დაშტრიხულია. თაროსთვის გვაქვს

$$S_z^* = \delta \xi \frac{h}{2}. \quad (ა)$$

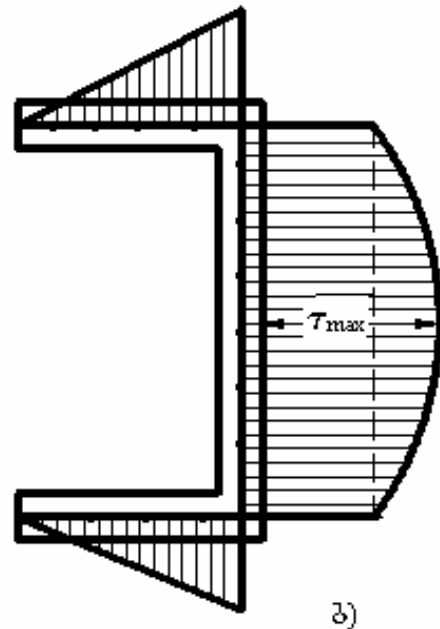
კედლისთვის

$$S_z^* = b\delta \frac{h}{2} + \frac{th^2}{8} \left( 1 - 4 \frac{y^2}{h^2} \right). \quad (ბ)$$

ძაბვების მიმართულება და ეპიურა ნაჩვენებია 1.19 ნახ. – ზე.



ნახ. 1.18



ნახ. 1.19.

**შენიშვნა.** აგებული ეპიურა თაროსა და კედლის შეერთების უბანში ძაბვების განაწილების ნამდვილ სურათს არ იძლევა. აქ, სივანის მკვეთრი ცვლილების გამო, ადგილი აქვს ძაბვათა კონცენტრაციას. კონცენტრაციის შესარბილებლად გაგლინულ პროფილებში ჰალტელებს (არშიას) აკეთებენ.

### 5. სიმტკიცის შემოწმება მხებ ძაბვებზე

მხებ ძაბვებზე სიმტკიცის პირობის შესადგენად პირველ რიგში უნდა მოვძებნოთ საშიში კვეთი, სადაც განივი ძალა უდიდესია, და მოვითხოვოთ, რომ ამ კვეთის

ნეიტრალურ ღერძზე მოქმედმა მუშა ძაბვებმა დასაშვებ ზღვარს არ გადააჭარბონ \*, მივიღებთ

$$\tau_{\max} = \frac{\max Q \cdot \max S_z^*}{I_z \cdot b} \leq [\tau]. \quad (1.17)$$

აქ  $b$  არის კოჭის სიგანე ნეიტრალურ შრესთან, რომელიც თხელკედლიანი პროფილების შემთხვევაში კედლის სისქეს წარმოადგენს. ეს მეორე პირობაა. სიმტკიცის პირველი პირობა ნორმალურ ძაბვებზე შევადგინეთ. კოჭის ზომები ორივე პირობას უნდა აკმაყოფილებდეს.

ჩვეულებრივ ნორმალური ძაბვები მკვეთრად აღემატებიან მხებს, მაგალითად, ბოლოში  $P$  ძალით დატვირთული სწორკუთხოვანი კონსოლის შემთხვევაში

$$\sigma_{\max} = \frac{6Pl}{bh^2}, \quad \tau_{\max} = \frac{3P}{2bh}.$$

შეფარდება

$$\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} = 4 \frac{l}{h}$$

თუ ავიღებთ, მაგალითად,  $\frac{l}{h} = 5$ , მივიღებთ  $\sigma_{\max} = 20\tau_{\max}$ . დასაშვები ძაბვების  $[\sigma]$  და  $[\tau]$  – ს შორის კი ასეთი დიდი განსხვავება არ არსებობს, რის გამოც მხები ძაბვები ნაკლებად საშიშია კოჭის სიმტკიცისათვის. მხოლოდ განსაკუთრებით მოკლე, თხელკედლიანი და მაღალი კოჭებისათვის, ან მძიმე, საყრდენებთან ახლოს მოთავსებული ტვირთების შემთხვევაში შეიძლება  $\tau$  მეტად საშიში აღმოჩნდეს. ჩვეულებრივ პირობებში კი გადამწყვეტ როლს კვეთის შერჩევაში (1.7) პირობა ასრულებს.

აქედან გამომდინარე, პრაქტიკაში კოჭის ზომები (1.7) პირობიდან ისაზღვრება, შემდეგ კი, საეჭვო შემთხვევაში, ხდება მათი (1.17) პირობაზე შემოწმება.

მხებ ძაბვებს ანგარიში უნდა გაეწიოს აგრეთვე ისეთი მასალის შემთხვევაში, რომლებიც ძვრას სუსტად ეწინააღმდეგებიან. ასეთია, მაგალითად, ხე, რომელიც ხლეჩაზე ძალიან სუსტად მუშაობს.

---

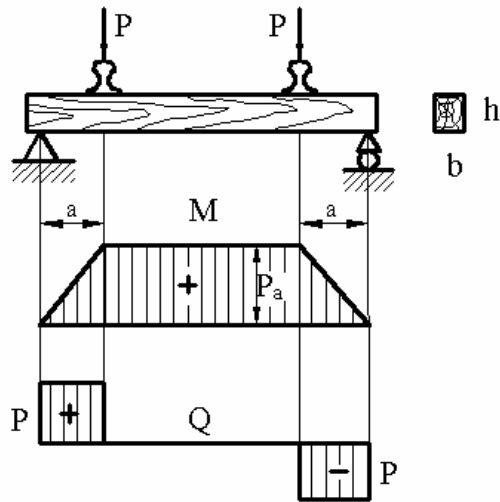
\* პრაქტიკაში ხმარებულ სწორკუთხოვან, მრგვალ, ორტესებერ და სხვა კვეთებში მაქსიმალური ძაბვა სწორედ ნეიტრალურ ღერძზე მოქმედებს. არსებობს გამონაკლისიც, როცა  $\frac{S_z^*}{b}$  შეფარდება მაქსიმუმს ნეიტრალურ ღერძზე არ აღწევს.

**მაგალითი.** განვსაზღვროთ ხიდის განივი კოჭის ზომები  $b$  და  $h$  (მასალა – ხე). ორთქლმავლის ბორბლებიდან რელსებს  $P = 10$  ტ ძალა გადაეცემათ.

$$a = 31,5 \text{ სმ. } [\sigma] = 100 \text{ კგ/სმ}^2. \quad [\tau] = 20 \text{ კგ/სმ}^2 \text{ (ხლენაზე)}, \quad \frac{h}{b} = 2 \quad (\text{ნახ. 1.20}).$$

ნახაზზე ნაჩვენებია მღუნავი მომენტისა და განივი ძალის ეპიურები. მაგალითში სწორედ ის შემთხვევა გვაქვს, როდესაც დიდი ტვირთი საყრდენთან ახლოსაა მოთავსებული, რის გამოც მღუნავი მომენტი შედარებით პატარა გამოდის, განივი ძალა კი დიდი. იმავე დროს ხლენაზე დასაშვები ძაბვა მცირეა. მოსალოდნელია, რომ (1.17) პირობა აღმოჩნდეს გადაშწყვეტი.

$$\text{გვაქვს } M_{\max} = P \cdot a = 10 \cdot 31,5 = 315 \text{ ტ. სმ, } Q_{\max} = 10 \text{ ტ. (1.8) პირობიდან}$$



ნახ. 1.20

$$W_z \geq \frac{M_{\max}}{[\sigma]_{\text{დ}}} = \frac{315000}{100} = 3150 \text{ სმ}^3.$$

წინალობის მომენტის ამ მნიშვნელობის მიხედვით, რადგანაც  $\frac{h}{b} = 2$ , მივიღებთ

$$h = 33,6 \text{ სმ, } b = 16,8 \text{ სმ.}$$

შერჩეული ზომების შემთხვევაში

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \frac{Q_{\max}}{F} = \frac{3 \cdot 10000}{2 \cdot 16,8 \cdot 33,6} = 26,5 \text{ კგ/სმ}^2 > 20 \text{ კგ/სმ}^2.$$

საჭიროა ზომების (1.17) პირობით გადაანგარიშება, მივიღებთ:

$$F \geq \frac{3Q_{\max}}{2[\tau]} = \frac{3 \cdot 10000}{2 \cdot 20} = 750 \text{ სმ}^2,$$

$$h = 2b = 39 \text{ სმ.}$$

## 6. მთავარი ძაბვები ღუნვის დროს

განვსაზღვროთ მთავარი ძაბვები კოჭის ნებისმიერ წერტილში. (1.6), (1.11) ფორმულებით ისაზღვრება ძაბვები კოჭის განივი და ნეიტრალური შრის პარალელურ ფართობებზე

$$\sigma_x = \frac{My}{I_z}, \quad \tau_x = -\tau_y = \frac{QS_z^*}{I_z b}.$$

კოჭის ფასადის (ნახაზის სიბრტყის) პარალელურ ფართობზე, რომელიც პირველი ორი ფართობის პერპენდიკულარულია, ძაბვები  $\sigma = \tau = 0$ . ერთ-ერთ მთავარ ფართობს სწორედ ეს ფართობი წარმოადგენს. შესაბამისი მთავარი ძაბვა უდრის 0.

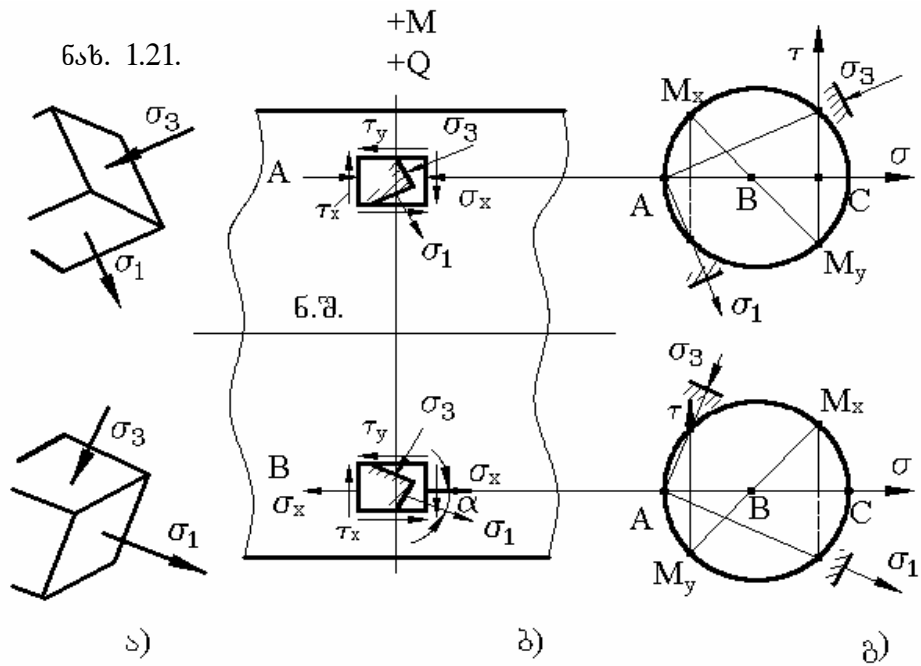
წარმოვიდგინოთ დასახელებული სამი სახის ფართობებით გამოყოფილი ელემენტი (პარალელეპიპედი). 1.21, ბ ნახ. – ზე ნაჩვენებია ორი ასეთი ელემენტი:  $B$  – გაჭიმულ ზონაში,  $A$  – შეკუმშულში. ელემენტი ბრტყელ დაძაბულ მდგომარეობაშია. საძიებელია ორი მთავარი ძაბვა და შესაბამისი მთავარი ფართობები, რომლებიც ნახაზის სიბრტყის პერპენდიკულარულად მოთავსდებიან. აქ საქმე გვაქვს შებრუნებულ ამოცანასთან.

განსახილველ შემთხვევაში ერთ ამოსავალ ირიბ ფართობზე – ნეიტრალური შრის პარალელურ ფართობზე, ნორმალური ძაბვა  $\sigma_y = 0$ . ამიტომ მივიღებთ

$$\sigma_{1,3} = \frac{1}{2} \left( \sigma_x \pm \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_x^2} \right). \quad (1.18)$$

როგორც ჩანს, სადაც არ უნდა იყოს წერტილი, გაჭიმულ თუ შეკუმშულ ზონაში,  $\sigma_1 > 0$ , ხოლო  $\sigma_3 < 0$ . მასალა შერეულ დაძაბულ მდგომარეობაშია – ერთი მთავარი მიმართულებით იჭიმება, მეორეთი კი იკუმშება. მთავარი ძაბვა  $\sigma_2 = 0$  (ნახ. 1.21, ა).





კუთხე, რომელსაც უდიდესი მთავარი დაბვა  $\sigma_1$  კოჭის  $x$  ღერძთან შეადგენს, მოიძებნება ფორმულით

$$\operatorname{tg} \alpha_x = \frac{\tau_x}{\sigma_1}. \quad (1.19)$$

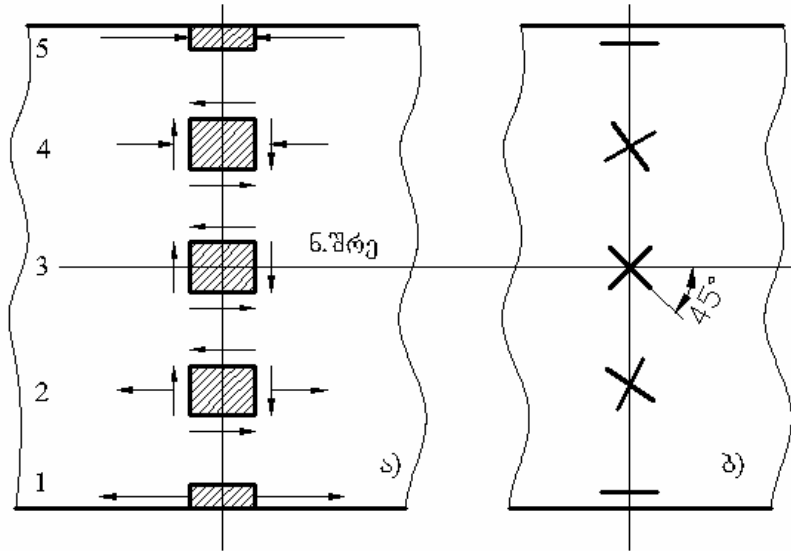
ფორმულაში დაბვები თავისი ნიშნით უნდა იქნეს შეტანილი.

მთავარი დაბვების განსაზღვრა, როგორც ცნობილია, გრაფიკულადაც შეიძლება – მორის წრის აგებით. 1.21, გ ნახ. – ზე ნაჩვენებია აგება  $A$  და  $B$  ელემენტებისათვის.

1.22, ა ნახ. – ზე ნაჩვენებია ხუთი ელემენტი. კოჭის ქვედა კონტურთან გამოყოფილი 1 ელემენტის გვერდებზე მხები დაბვები უდრის – 0. მაშასადამე, ეს გვერდები მთავარი ფართობებია, ხოლო  $\sigma_x$  – მთავარი დაბვა. ელემენტი ხაზობრივ დაბაბულ მდგომარეობაშია.

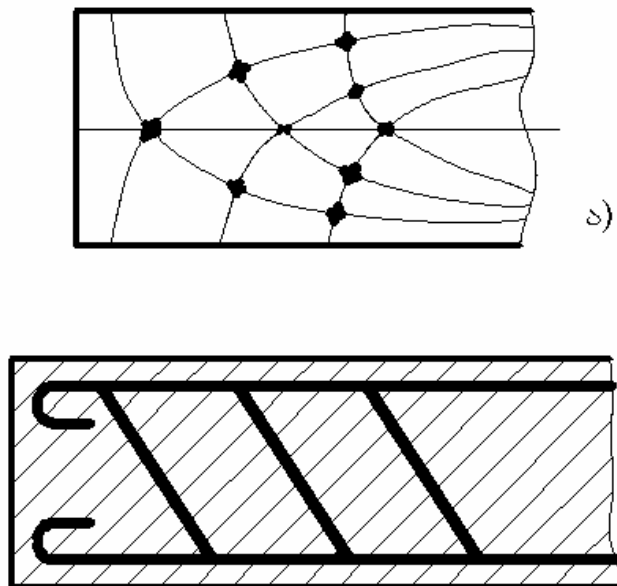
იგივე ითქმის მე-5 ელემენტზე; განსხვავება მხოლოდ დაბვის ნიშანშია: 1 ელემენტი გაჭიმულია, მე-5 – შეკუმშული. ნეიტრალურ შრესთან გამოყოფილ მე-3 ელემენტზე, პირიქით, მხოლოდ მხები დაბვები მოქმედებს – ელემენტი სუფთა ძვრას განიცდის. მთავარი დაბვები სიდიდით ტოლია:  $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_x$  და ძელის ღერძთან  $45^\circ$  - ითაა დახრილი.

მე-2 და მე-4 ელემენტებზე ორივე სახის დაბეჭედი მოქმედებს. მთავარი დაბეჭების მიმართულება დამოკიდებულია  $\tau_x$  და  $\sigma_x$ -ის თანაფარდობისაგან და კვეთის სიმაღლეზე იცვლება.



ნახ. 1.22.

1.22, ბ ნახ.-ზე წარმოდგენილია გამოყოფილ ელემენტებში მოქმედი მთავარი დაბეჭების მიმართულებათა ჯვარი; წვრილი ხაზით – გამჭიმავი მთავარი დაბეჭის მიმართულება, მსხვილით – მკუმშავის. 1-ლი წერტილიდან მე-5 გადასვლისას ჯვარი  $90^\circ$ -ით შემობრუნდება.



ნახ. 1.23.

წარმოვიდგინოთ, რომ კოჭის ფასადზე ყოველ წერტილში ასეთი ჯვარია დასმული, მაშინ მათი უწყვეტი შეერთება მოგვცემს წირთა ორ, ურთიერთ ორთოგონალურ ოჯახს, რომელნიც ნეიტრალურ შრეს  $45^\circ$ -იანი კუთხით კვეთენ, ხოლო კოჭის ზემო და ქვემო კონტურს კი ნორმალურად და მხებად უერთდებიან. ეს წირები

მთავარი დაბეჭების ტრაექტორიებს წარმოადგენენ ღუნვის შემთხვევაში.

ტრაექტორიის მხები ადგილზე წერტილში მთავარი ძაბვის მიმართულებას იძლევა (ნახ. 1.23, ა). ტრაექტორიის ცნება პრაქტიკულ გამოყენებას რკინაბეტონის კონსტრუქციებში პოულობს, სადაც არმატურას, შეძლებისდაგვარად, გამჭიმავი მთავარი ძაბვების მიმართულებით ალაგებენ, რადგანაც ბეტონი გაჭიმვაზე სუსტად მუშაობს (ნახ. 1.23, ბ). სუფთა ღუნვის შემთხვევაში მთავარი ძაბვების ტრაექტორიები კოჭის ღერძის პარალელურ ხაზებად გადაგვარდებიან.

## 7. კოჭების სიმტკიცის სრული შემოწმება

კოჭის ელემენტი ბრტყელ დაძაბულ მდგომარეობაშია, რის გამოც სიმტკიცის პირობის შესადგენად პრინციპულად საჭიროა სიმტკიცის თეორიებს მივმართოთ. ამით ზოგადი თვალსაზრისით ნათელი გახდება ზემოთ შედგენილი (1.7) და (1.17) პირობების არსი, რომელთა მიხედვითაც წარმოებს კოჭების პრაქტიკული გაანგარიშება.

რადგანაც ღუნვის მთავარი ძაბვები განსაზღვრულია –  $\sigma_1$  და  $\sigma_2$  (1.18) ფორმულით გაიანგარიშება, ხოლო  $\sigma_2 = 0$ , დაყვანილ ძაბვებს მათი შემოწმებით ადვილად შევადგენთ. ჩაწერის გამარტივების მიზნით (1.18) ფორმულაში ძაბვებს მოვხსნათ ინდექსები.

დაყვანილია ძაბვა პირველი თეორიით

$$\sigma_{\text{დაყ.}} = \sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}). \quad (1.20)$$

მეორე თეორიით

$$\sigma_{\text{დაყ.}} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1-\mu}{2}\sigma + \frac{1+\mu}{2}\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}. \quad (1.21)$$

ფოლადის შემთხვევაში  $\mu = 0,3$ , ამიტომ

$$\sigma_{\text{დაყ.}} = 0,356\sigma + 0,65\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}. \quad (1.22)$$

მესამე თეორიით

$$\sigma_{\text{დაყ.}} = \sigma_1 - \sigma_3.$$

მთავარი ძაბვების გამოსახულების ჩასმის შემდეგ მივიღებთ

$$\sigma_{\text{დაყ.}} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}. \quad (1.23)$$

მეოთხე თეორიით, ვინაიდან  $\sigma_2 = 0$ , გვექნება

$$\sigma_{\text{ლაყ.}} = \sqrt{\frac{1}{2}[\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}.$$

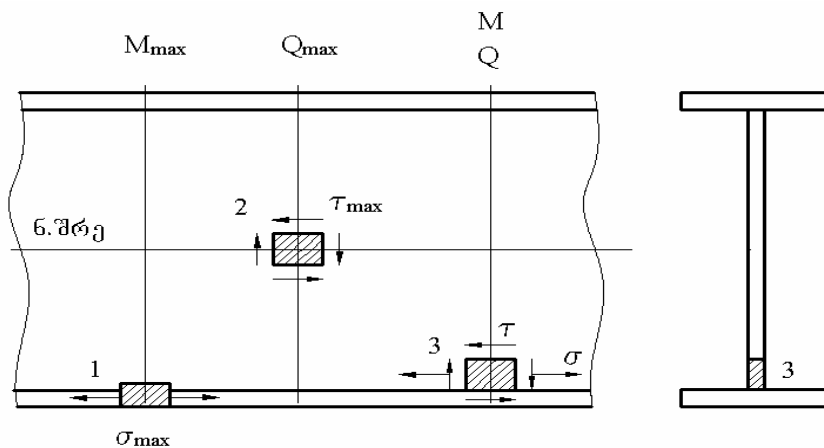
მთავარი ძაბვების გამოსახულების ჩასმისა და გამარტივების შემდეგ

$$\sigma_{\text{ლაყ.}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (1.24)$$

სიმტკიცის პირობის მისაღებად, როგორც ცნობილია დაყვანილი ძაბვა უბრალო გაჭიმვის ან კუმშვის დასაშვებ ძაბვას უნდა გავუტოლოთ.

კოჭის დაძაბული მდგომარეობა არაერთგვაროვანია – ძაბვის ტენზორი ერთი წერტილიდან მეორეში გადასვლისას იცვლება. წერტილიდან წერტილში იცვლება აგრეთვე  $\sigma_{\text{ლაყ.}}$  - იც. უშიშროება უზრუნველყოფილი იქნება, თუ სიმტკიცის პირობა  $\sigma_{\text{ლაყ.}} \leq [\sigma]$  ყოველ წერტილში დაცულია. ამისათვის საკმარისია, რომ ეს პირობა დაცული იქნეს ყველაზე საშიშ წერტილში, სადაც  $\sigma_{\text{ლაყ.}}$  მაქსიმალურია.  $\sigma_{\text{ლაყ.}}$  განივ კვეთში მოქმედი ნორმალური და მხები ძაბვებისაგანაა დამოკიდებული. ამ უკანასკნელთა ცვლილება კი კვეთის სიმაღლეზე ერთიმეორის შებრუნებულია:  $\sigma$  განაპირა ბოჭკოებისაკენ იზრდება,  $\tau$  კი – ნეიტრალური შრისაკენ. ეს ართულებს საშიში წერტილის მოძებნას. რიცხვითი ანგარიშებით ირკვევა, რომ საშიშ წერტილს შეიძლება ჰქონდეს სამგვარი მდებარეობა.

1. ყველაზე ხშირად საშიშია მაქსიმალური მღუნავი მომენტის კვეთის განაპირა 1 წერტილი. ამ წერტილის მახლობლად გამოყოფილი ელემენტი ხაზობრივ დაძაბულ მდგომარეობაშია (ნახ. 1.24), რის გამოც ყველა თეორია დაყვანილი ძაბვის ერთსა და იმავე სიდიდეს იძლევა.



ნახ. 1.24

იმ შემთხვევაში, როდესაც ნეიტრალური ღერძი კვეთის სიმეტრიის ღერძია, ეს დაბვა

$$\sigma_{\text{დაყ.}} = \sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_z}$$

სიმტკიცის პირობას კი ექნება (1.8) ფორმულის სახე ან უფრო ზოგად შემთხვევაში (1.7) ფორმულისა, როცა ნეიტრალური ღერძი სიმეტრიის ღერძი არ არის და მასალაც ერთგვარად არ ეწინააღმდეგება გაჭიმვას და კუმშვას.

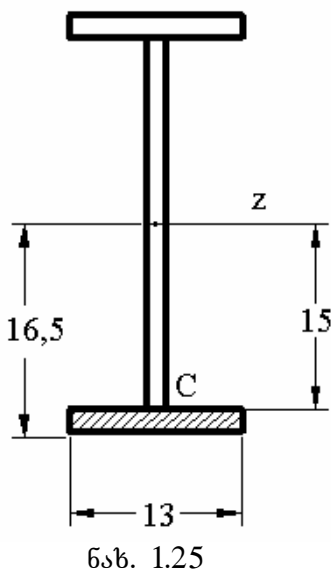
2. გარკვეულ პირობებში საშიში შეიძლება ნეიტრალური შრის წერტილიც 2 აღმოჩნდეს კვეთში, სადაც განივი ძალა უდიდეს მნიშვნელობას აღწევს (ნახ. 1.23). ამ წერტილის მახლობლად გამოყოფილი ელემენტი სუფთა ძვრას განიცდის. მთავარი დაბვები  $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{\text{max}}$ , ხოლო  $\sigma_2 = 0$ . დაყვანილი დაბვა ყოველი თეორიით  $\tau_{\text{max}}$ -ით გამოისახება და ამიტომ სიმტკიცის პირობა  $\sigma_{\text{დაყ.}} \leq [\sigma]$  შეიძლება უკვე ცნობილი განტოლების სახით ჩაიწეროს

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\max Q \cdot \max S_z^*}{I_z b} \leq [\tau], \quad (1.17)$$

სადაც ამორჩეული თეორიის გავლენა დასაშვებ მხებ დაბვებში გამოვლინდება. თუ  $\sigma_{\text{დაყ.}}$  - ის ფორმულებში ჩავსვამთ  $\sigma = 0$ , ხოლო  $\tau = \tau_{\text{max}}$ , ადვილად შევამოწმებთ, რომ დასაშვები მხები დაბვა I თეორიით უდრის  $[\sigma]$ , II- თი 0,77  $[\sigma]$ , III- თი 0,5  $[\sigma]$ , ხოლო IV- თი 0,58  $[\sigma]$ . როგორც ჩანს, ყველაზე ეკონომიურ ანგარიშს I თეორია გვაძლევს, ყველაზე არაეკონომიურს – III. ფოლადის კოჭებისათვის პრაქტიკაში მიღებულია  $[\tau] = 0,6 [\sigma]$ , რაც IV თეორიას ეთანხმება.

3. მესამე სახის შესამოწმებელ წერტილს ვიღებთ მხოლოდ ორტესებრი ტიპის კოჭებში. წერტილი აიღება თაროსა და კედლის შეერთების ადგილას (ნახ. 1.23). აქ გამოყოფილ ელემენტზე მოქმედებენ ორივე სახის დაბვები – მხები და ნორმალური, რომლებიც, როგორც მათი ეპიურებიდან ჩანს, თავის მაქსიმალური მნიშვნელობებიდან ბევრად არ განსხვავდებიან. კვეთი, ცხადია, უნდა ამოვარჩიოთ ისეთი, რომელშიაც ორივე (როგორც მღუნავი მომენტი  $M$ , ისე განივი ძალა  $Q$ ) მაქსიმალურია, ან ყოველ შემთხვევაში საკმაოდ დიდ მნიშვნელობას აღწევს.

**მაგალითი.** ორ საყრდენზე მოთავსებული კოჭი დატვირთულია შეყურსული ძალით  $P = 34,3$  ტ. შევარჩიოთ გაგლინული ორტესებრი კოჭის ნომერი, თუ



$l = 2,4$  მ,  $a = 2$  მ,  $[\sigma] = 1600$  კგ/სმ<sup>2</sup>. კვეთის შერჩევის შემდეგ მოვახდინოთ სიმტკიცის შემოწმება III თეორიით.

უდიდესი ძალები

$$M_{\max} = \frac{34,3 \cdot 2 \cdot 0,4}{2,4} = 11,430 \text{ ტმ};$$

$$Q_{\max} = \frac{34 \cdot 3,2}{2,4} = 28,6 \text{ ტ.}$$

საჭირო წინაღობის მომენტი

$$W_z = \frac{1143000}{1600} = 715 \text{ სმ}^3.$$

ნაგლინის სორტამენტის ცხრილიდან ავიღებთ I № 33<sup>ა</sup>,

$W_z = 721 \text{ სმ}^3$ ,  $I_z = 11900 \text{ სმ}^4$ . ჭარბი მარაგი  $\approx 1\%$ .

$M_{\max}$  და  $Q_{\max}$  - ის კვეთები ერთმანეთს ემთხვევა. საშიში C წერტილი, რომელშიც  $\sigma_{\text{დაყ.}}$  - ს ვანგარიშობთ, ამ კვეთშია თაროსი და კედლის საზღვარზე (ნახ. 1.25). გავიანგარიშოთ  $\sigma$  და  $\tau$ . გვაქვს

$$\sigma = \frac{1143000 \cdot 15}{11900} = 1440 \text{ კგ/სმ}^2.$$

რადგანაც თაროს სტატიკური მომენტი  $S_z = 13 \cdot 1,5 \cdot 15,75 = 307 \text{ სმ}^3$ , მხები ძაბვისთვის მივიღებთ

$$\tau = \frac{28600 \cdot 307}{11900 \cdot 0,95} = 777 \text{ კგ/სმ}^2.$$

მთავარი ძაბვები ამორჩეულ წერტილში

$$\sigma_{1,3} = \frac{1}{2} \left( 1440 \pm \sqrt{1440^2 + 777^2} \right) \quad \begin{cases} +1780 \text{ კგ/სმ}^2 \\ -340 \text{ „} \end{cases}$$

დაყვანილი ძაბვა III თეორიით

$$\sigma_{\text{დაყ.}} = \sigma_1 - \sigma_3 = 1780 - (-340) = 2120 \text{ კგ/სმ}^2 \square 1600 \text{ კგ/სმ}^2.$$

შერჩეული კვეთი გადიდებას საჭიროებს.

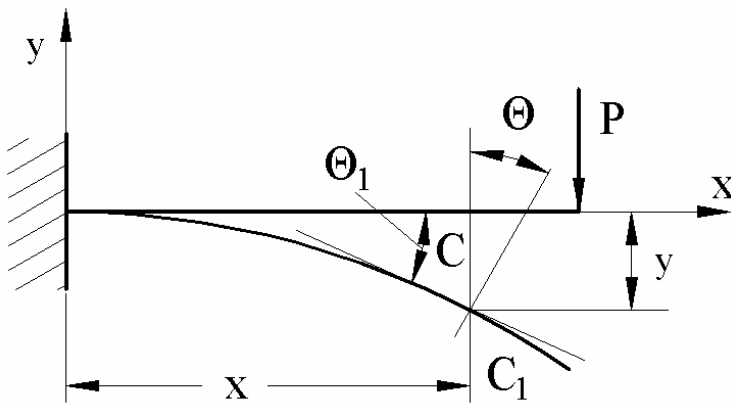
## 8. დრეკადი წირი

### ძირითადი ცნებები

ღუნვისას ძელის სხვადასხვა წერტილი და განივი კვეთები ამა თუ იმ გადაადგილებას განიცდიან. გადაადგილებათა შესწავლას აქვს ორი მიზანი: სიხისტეზე გაანგარიშება და სტატიკურად ურკვევი ამოცანების ამოხსნა.

წინამდებარე თავში მოცემულია ბრტყელი გაღუნვის გადაადგილებები. ძალებს მოვათავსებთ  $xy$  მთავარ სიბრტყეში, რადგანაც ნეიტრალური ღერძები, რომელთა გარშემოც კვეთების მობრუნება წარმოებს, ძალთა სიბრტყის პერპენდიკულარულია, ძელის გაღუნული ღერძი – დრეკადი წირი, მთლიანად ძალთა სიბრტყეში მოთავსდება (ნახ. 2.1).

ცხადია, გადაადგილებას იწვევს როგორც ძლუნავი მომენტი, ისე განივი ძალა, მაგრამ უკანასკნელის გავლენა შედარებით მცირეა და უგულებელვყოთ.



ნახ. 2.1

2.1 ნახაზზე ნაჩვენებია კონსოლის გაღუნული ღერძი, მისი ნებისმიერი კვეთი, საყრდენ კვეთს გარდა, განიცდის ორ მარტივ გადაადგილებას: ვერტიკალურ გადაადგილებას კოჭის ღერძის

პერპენდიკულარულად და მობრუნებას  $\theta$  კუთხით. ბრუნვისას კვეთი ყოველთვის პერპენდიკულარული რჩება კოჭის გაღუნული ღერძისა.  $CC_1 = y$  გადაადგილებას, კვეთის ჩაღუნვა ეწოდება,  $\theta$ -ს კვეთის მობრუნების კუთხე.

უმეტეს კონსტრუქციებში კოჭებისგან სიხისტე მოითხოვება. ბევრ შემთხვევაში ჩაღუნვა ძალის  $1/500-1/1000$  ნაწილს არ უნდა აღემატოს. ამის შესაბამისად ჩვენ დაკმაყოფილებით მცირე დეფორმაციების განხილვით.\*

შევნიშნოთ, რომ რადგან კოჭის ღერძის სიგრძე უცვლელია (იგი ნეიტრალურ შრეში მდებარეობს), კვეთს ვერტიკალური გადაადგილების გარდა უნდა ჰქონდეს

\* 2.1 ნახ.-ზე თვალსაჩინოებისათვის ჩაღუნვები გადიდებული მასშტაბითაა ნაჩვენები.

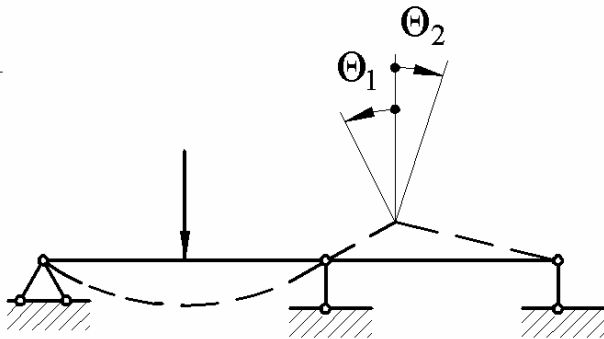
ჰორიზონტალური გადაადგილება. ეს უკანასკნელი მაღალი რივის მცირეა  $y$ -თან შედარებით და მას უგულებელგყოფთ.

გადაადგილებათა განსაზღვრის ამოცანა ამოხსნილი იქნება, თუ ვიცით ნებისმიერი კვეთის ჩაღუნვა და მობრუნების კუთხე, ე. ი. ვიცით ორი ფუნქცია  $y(x)$  და  $\theta(x)$ . ამ ფუნქციებს შორის არსებობს გარკვეული დამოკიდებულება. მართლაც დრეკადი წირის მხების დახრის კუთხე  $x$  ღერძთან  $\theta_1$ -ით აღვნიშნოთ, მაშინ  $\operatorname{tg}\theta_1 = \frac{dy}{dx}$ . კუთხის სიმცირის გამო  $\operatorname{tg}\theta_1 \approx \theta_1$ , მეორე მხრივ  $\theta_1 = \theta$ , ისე რომ

$$\theta = \frac{dy}{dx} \quad (2.1)$$

ე. ი. კვეთის მობრუნების კუთხე უდრის ჩაღუნვის წარმოებულს  $x$ -ით.

მივიღეთ რა საკოორდინატო ღერძების მიმართულება, ავტომატურად შემოდის გადაადგილებათა ნიშნის წესიც. ჩაღუნვა  $y > 0$ , თუ გადაადგილება წარმოებს ზევით და პირიქით. მობრუნების კუთხე განისაზღვრა (2.1) ფორმულით, ამიტომ  $\theta > 0$ , როცა  $y(x)$  ფუნქცია აღებულ წერტილში ზრდადია, და  $\theta < 0$ , როცა იგი კლებადია.



ნახ. 2.2

მთლიანი ძელის გაღუნული ღერძი უწყვეტი და გლუვი წირია, რაც ნიშნავს  $y(x)$  ფუნქციისა და მისი პირველი წარმოებულის  $\theta(x)$  უწყვეტობას.  $x$ -ის აღებულ მნიშვნელობას, ე.ი. აღებულ კვეთს ჩაღუნვის და მობრუნების კუთხის

თითო მნიშვნელობა ეთანადება. მხოლოდ არამთლიანი ძელის შემთხვევაში დაირღვევა უწყვეტობა. ასე, მაგალითად, თუ ძელი სახსრით შეერთებული ორი ნაწილისგან შედგება, მაშინ სახსარში  $\theta(x)$  ფუნქცია წყვეტას მიიღებს – ერთ წერტილში ორი მობრუნების კუთხე გაჩნდება (ნახ. 2.2).

## 9. დრეკადი წირის დიფერენციალური განტოლება

ჩაღუნვა და მობრუნების კუთხე, ცხადია, დამოკიდებული უნდა იქნეს დატვირთვის, მასალისა და ძელის ზომებისაგან. შევადგინოთ ეს დამოკიდებულება.



ნეიტრალური შრის და, მაშასადამე, ძელის ღერძის სიმრუდისთვის გვაქვს ფორმულა

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (2.2)$$

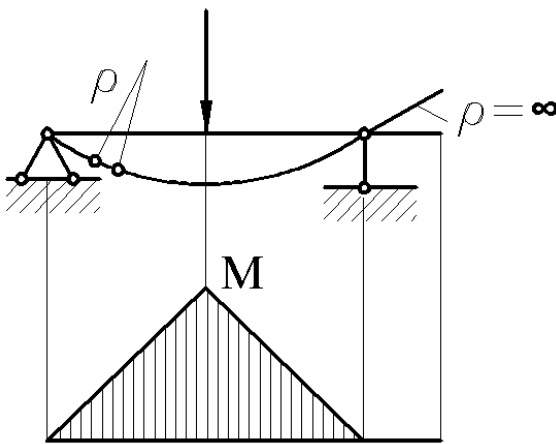
სადაც  $M(x)$  მღუნავი მომენტია, ხოლო  $EI(x)$  - ძელის სიხისტე. მუდმივი სიხისტის შემთხვევაში მღუნავი მომენტის ეპიურა იმავე დროს ძელის გაღუნული ღერძის სიმრუდის ეპიურასაც წარმოგვიდგენს. ასე, მაგალითად, 2.3 ნახ-ზე მოცემული კოჭის ღერძის სიმრუდე საყრდენებიდან ძალის მოდების წერტილისაკენ სწორი ხაზის კანონით იზრდება, ხოლო კონსოლის ფარგლებში, სადაც  $M(x) = 0$ , ისპობა.

მეორე მხრივ, როგორც მათემატიკიდან ცნობილია, ნებისმიერი ბრტყელი წირის სიმრუდე

$$\frac{1}{\rho} = \pm \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}, \quad (2.3)$$

თუ (2.2) და (2.3)-ს ერთმეორეს გავუტოლებთ, მივიღებთ დრეკადი წირის ზუსტ დიფერენციალურ განტოლებას

$$\pm \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} = \frac{M(x)}{EI(x)}. \quad (2.4)$$

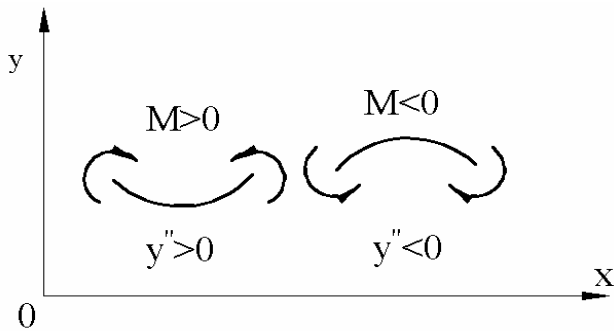


ნახ. 2.3

ეს განტოლება არაწრფივია და ამდენად მისი გამოყენება გარკვეულ სიძნელეს წარმოადგენს. მისი გამოყენება აუცილებელია მხოლოდ მოქნილ ღეროებში დიდი გადაადგილების განსაზღვრისას. ხისტი კონსტრუქციების შემთხვევაში კი დეფორმაციის სიმცირე საშუალებას გვაძლევს ეს განტოლება გავამარტივოთ – გავაწრფივოთ.

მართლაც  $y' = \theta$  მეტად მცირე წესიერი წილადაა, რომლის კვადრატი 1-თან შედარებით უმნიშვნელოა და შეიძლება უგულებელვყოთ, მაშინ მივიღებთ მიახლოებით განტოლებას

$$\pm EI(x) \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x), \quad (2.5)$$



ნახ. 2.4

რომლითაც ვსარგებლობთ მცირე დეფორმაციების განსაზღვრისას\*.

განტოლებაში ნაჩვენები  $\pm$  ნიშნებიდან ისეთი ნიშანი უნდა ამოვარჩიოთ, რომ განტოლება ნიშნითაც მართებული აღმოჩნდეს.

როგორც ცნობილია,  $y'' > 0$ , როცა

მრუდის ჩაზნექილობა  $-y$  ღერძის დადებით მხარესაა მიმართული. ამიტომ თუ  $y$ -ს ზევით მივმართავთ, როგორც ეს 2.4 ნახ.-დან ჩანს, დადებით მღუნავ მომენტს დადებითი  $y''$  ეთანადება და, პირიქით, მაშასადამე (2.5) განტოლებაში “+” ნიშანი უნდა ავიღოთ. ცხადია, თუ  $y$ -ს ქვემოთ მივმართავთ, მაშინ “-” ნიშანი გამოვღებთ.

## 10. ღრეკადი წრის დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირება

პირველ რიგში განვიხილოთ მუდმივკვეთიანი კოჭის გადაადგილებები, ე. ი. მივიჩნიოთ, რომ  $EI = const.$

ჩალუნვისა და მობრუნების მისაღებად საჭიროა (2.5) განტოლება ორჯერ გავაინტეგრავოთ, გვექნება

$$EI \frac{dy}{dx} = EI \theta = \int M(x) dx + C$$

$$EI y = \int dx \int M(x) dx + C \cdot x + D.$$

ინტეგრირების ნებისმიერი მუდმივების  $C$  და  $D$ -ს განსაზღვრისათვის უნდა გავარჩიოთ ორი შემთხვევა.

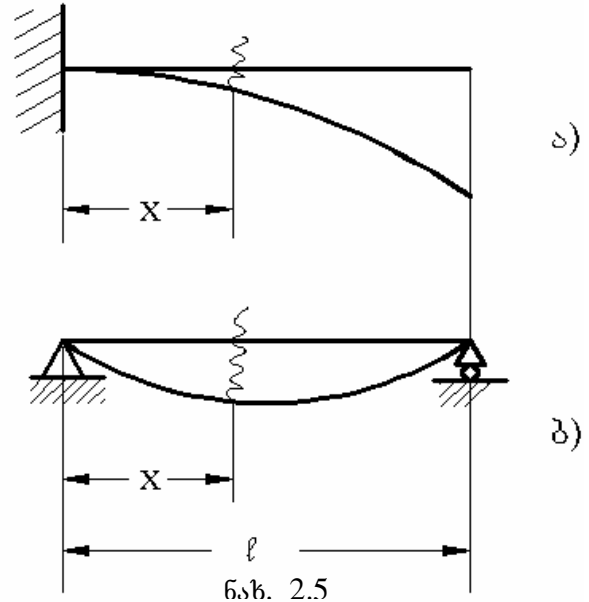
1. ერთი უბნის შემთხვევაში მღუნავი მომენტი კოჭის მთელ სიგრძეზე ერთი ფუნქციით წარმოსდგება. გვექნება ერთი დიფერენციალური განტოლება და ინტეგრირების ორი მუდმივა  $C$  და  $D$ , რომლებიც კოჭის ს ა ყ რ დ ე ნ ი პ ი რ ო ბ ე ბ ი დ ა ნ განისაზღვრება.

\* დეფორმაციის სიმცირე უფლებას ვვაძლევს  $M(x)$ -ის შედგენისას საწყისი ზომებიდან გამოვიდეთ, ისე როგორც ეპიურების აგებისას ვიქცეოდით.

კონსოლის შემთხვევაში (ნახ. 2.5, ა) მარცხენა ბოლო უძრავადაა დამაგრებული -  $x = 0$  კვეთისთვის როგორც ჩაღუნვა, ისე მობრუნების კუთხე ნულია. საყრდენი პირობები იქნება

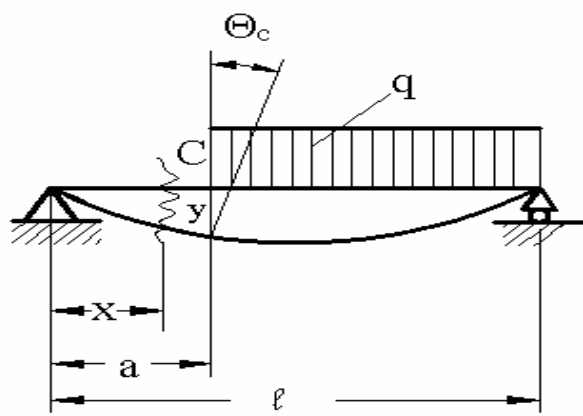
$$y(0) = 0, \quad \theta(0) = 0. \quad (2.6)$$

ორ საყრდენზე მოთავსებული კოჭის შემთხვევაში (ნახ. 2.5 ბ) ორივე ბოლოზე ჩაღუნვა ნულია; საყრდენ პირობებს ექნება სახე  $y(0) = 0, \quad y(l) = 0$  (2.7) კოჭის ბოლოებს სახსროვანი დამაგრების გამო მობრუნება შეუძლიათ.



2. რამდენიმე უბნის შემთხვევა. სხვადასხვა უბანში მღუნავი მომენტი სხვადასხვა ფუნქციით წარმოსდგება.

თუ უბანთა რიცხვი  $n$ -ია, გვექნება  $n$  დიფერენციალური განტოლება და ინტეგრირების  $2n$  მუდმივა. მათი განსაზღვრისათვის საჭირო  $2n$  განტოლებიდან, ორ განტოლებას საყრდენი კვეთებისთვის შევადგენთ, დანარჩენებს კი უბნების სასაზღვრო წერტილებისთვის. ისინი გამოსახვენ  $y(x)$  და  $\theta(x)$  ფუნქციების უწყვეტობას სასაზღვრო წერტილებში. მაგალითად, ორი უბნის შემთხვევაში (ნახ.



ნახ. 2.6

2.6) გვექნება ოთხი მუდმივა:  $C_1, D_1$  და  $C_2, D_2$ . სასაზღვრო  $C$  წერტილი ორივე უბანს ეკუთვნის - მისი გადაადგილებები  $y$  და  $\theta$  შეიძლება გამოისახოს როგორც I, ისე II უბნის განტოლებებით. მოვიქცევით რა ასე, შემდეგ,

უწყვეტობის გამო, მათ ერთმანეთს ვუტოლებთ, გვექნება

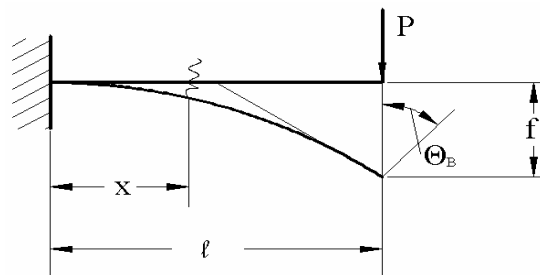
$$\begin{aligned} y_1(a) &= y_2(a), \\ \theta_1(a) &= \theta_2(a) \end{aligned} \quad (2.8)$$

ორ საყრდენ პირობასთან ერთად გვექნება ოთხი განტოლება, საიდანაც განისაზღვრება ოთხი მუდმივა. ამგვარად, ყოველთვის, ერთი ან რამდენიმე უბნის შემთხვევაში, უწყვეტობის და საყრდენი პირობების რიცხვი ერთად – სასაზღვრო პირობები – მუდმივათა რიცხვის ტოლია.

**მაგალითი 1.** გავაინტეგრალთ დრეკადი წირის დიფერენციალური განტოლება შეყურსული ძალით დატვირთული კონსოლისათვის (ნახ. 2.7).

მლუნავი მომენტი  $x$  კვეთში  $M(x) = -P(l-x)$ . ეს ჩავსვათ (2.5) განტოლებაში და ორჯერ გავაინტეგრალთ, გვექნება

$$EI\theta = -P\left(lx - \frac{x^2}{2}\right) + C$$



$$EIy = -P\left(l\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6}\right) + Cx + D$$

ნახ. 2.7

საყრდენი პირობიდან  $\theta(0) = 0$ ,  $y(0) = 0$ . მივიღებთ  $C = D = 0$ , ისე რომ საბოლოოდ

$$\begin{aligned} \theta &= -\frac{Pl}{2EI}x\left(2 - \frac{x}{l}\right) \\ y &= -\frac{Pl}{6EI}x^2\left(3 - \frac{x}{l}\right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

მაქსიმალურ ჩაღუნვას – ჩ ა ლ უ ნ ვ ი ს ი ს ა რ ს და მაქსიმალურ მობრუნების კუთხეს ადგილი აქვს კონსოლის თავისუფალ ბოლოზე

$$f = y_B = -\frac{Pl^3}{3EI} \quad (2.10)$$

$$\theta_B = -\frac{Pl^2}{2EI}$$

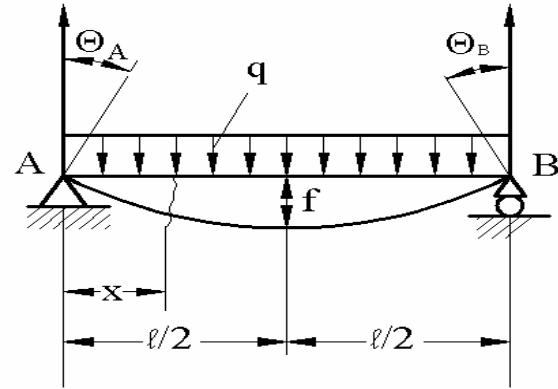
მაგალითი 2. განვიხილოთ ორ საყრდენზე მოთავსებული კოჭი, რომელიც დატვირთულია

თანაბრადგანაწილებული ძალებით (ნახ. 2.8).

მლენავი მომენტი  $M(x) = Ax - \frac{qx^2}{2}$ .

თუ  $M(x)$ -ს (2.5) განტოლებაში ჩავსვამთ და ორჯერ

გავაინტეგრალბთ, მივიღებთ



ნახ. 2.8

$$EI\theta = A\frac{x^2}{2} - q\frac{x^3}{6} + C,$$

$$EIy = A\frac{x^3}{6} - q\frac{x^4}{24} + Cx + D$$

რეაქცია  $A = \frac{ql}{2}$ . ვადგენთ საყრდენ პირობებს:  $y(0) = 0$ ,  $y(l) = 0$  და მათი გამოყენებით ვღებულობთ

$$C = -\frac{ql^3}{24}, \quad D = 0$$

ზოგადი განტოლებები იქნება

$$\theta = -\frac{ql^3}{24EI} \left( 1 - 6\frac{x^2}{l^2} + 4\frac{x^3}{l^3} \right)$$

$$y = -\frac{ql^4}{24EI} x \left( 1 - 2\frac{x^2}{l^2} + \frac{x^3}{l^3} \right) \tag{2.11}$$

საყრდენი კვეთების მობრუნების კუთხეები

$$\theta_A = -\theta_B = -\frac{ql^3}{24EI} \tag{2.12}$$

ჩაღუნვის ისარი მაღის შუაში

$$f = y\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI} \quad (2.13)$$

განვიხილოთ რიცხვითი მაგალითი.  $q=1$  ტ/მ,  $l=8$  მ. შევარჩიოთ ორტესებრი გაგლინული კოჭის კვეთი, თუ  $[\sigma]=1600$  კგ/სმ<sup>2</sup>, ხოლო დასაშვები ჩალუნვა  $[f]=\frac{l}{500}=1,6$  სმ.

სიმტკიცის პირობიდან

$$W \geq \frac{ql^2}{8[\sigma]} = \frac{10 \cdot 800^2}{8 \cdot 1600} = 500 \text{ სმ}^3$$

სორტამენტის ცხრილში ვპოულობთ ნომერს I № 27<sup>b</sup>,  $W = 509$  სმ<sup>3</sup>.  
 $I = 6870$  სმ<sup>4</sup>.

შერჩეული კვეთი შევამოწმოთ სიხისტეზე

$$f = \frac{5}{384} \frac{10 \cdot 800^4}{2 \cdot 10^6 \cdot 6870} \approx 3,9 \text{ სმ} \square \frac{l}{500}.$$

მაშასადამე, კვეთი სიხისტის პირობიდან  $f \leq [f]$  უნდა შევარჩიოთ, მივიღებთ

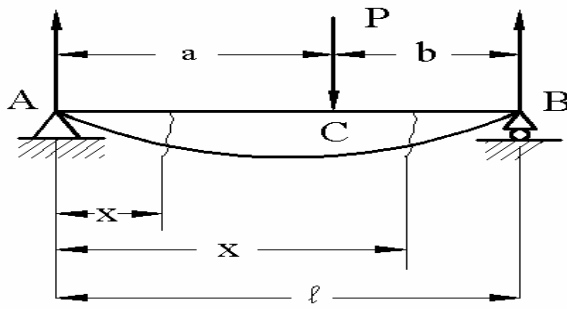
$$I \geq \frac{5}{384} \frac{ql^4}{E[f]} = \frac{5}{384} \frac{10 \cdot 800^4}{2 \cdot 10^6 \cdot 1,6} = 16700 \text{ სმ}^4$$

შესაბამისი ნომერია I № 36<sup>b</sup>,  $I = 16530$  სმ<sup>4</sup>,  $W = 919$  სმ<sup>3</sup> მაქსიმალური დაბვა იქნება

$$\sigma_{\max} = \frac{800000}{919} \approx 872 \frac{\text{კგ}}{\text{სმ}^2} \square 1600 \text{ კგ/სმ}^2.$$

## 11. (2. 5) განტოლების ინტეგრირება ორი უბნის შემთხვევაში

2.9 ნახაზზე მოცემულ შემთხვევაში გვაქვს ორი უბანი AC და CB. გვექნება ინტეგრირების ოთხი მუდმივა. მათი განსაზღვრის გამარტივების მიზნით შევთანხმდეთ შემდეგზე: 1. ორივე უბნის მდუნავი მომენტი მარცხენა ძალებით შევადგინოთ და 2.  $(x-a)^n$  სახის წევრების ინტეგრირება ფრჩხილების გაუხსნელად ვაწარმოოთ.



ნახ. 2.9

მღუნავი მომენტები უბნებში  
 $M_1 = Ax$ ,  $M_2 = Ax - P(x - a)$ .

ჩასმითა და ორჯერ ინტეგრირებით  
 მივიღებთ:

AC უბანში

$$EI\theta_1 = A\frac{x^2}{2} + C_1 \qquad EIy_1 = A\frac{x^3}{6} + C_1x + D_1$$

$$(0 \leq x \leq a)$$

CB უბანში

$$EI\theta_2 = A\frac{x^2}{2} - \frac{P(x-a)^2}{2} + C_2$$

$$EIy_2 = A\frac{x^3}{6} - \frac{P(x-a)^3}{6} + C_2x + D_2$$

$$(a \leq x \leq l)$$

სასაზღვრო პირობები იქნება

$$y_1(0) = 0, \qquad \theta_1(a) = \theta_2(a),$$

$$y_2(l) = 0, \qquad y_1(a) = y_2(a)$$

უკანასკნელი ორი პირობიდან მივიღებთ  $C_1 = C_2$  და  $D_1 = D_2$ . ამით ოთხ მუდმივას ორზე დავიყვანთ. ამას ადგილი ექნება შეყუასული ძალების ნებისმიერი რიცხვის შემთხვევაში, თუ ზემოთ მიღებული ორი შეთანხმება დაცულია. დანარჩენი ორი უცნობი განისაზღვრება საყრდენი პირობებიდან

$$C_1 = C_2 = -\frac{Pb}{6l}(l^2 - b^2), \qquad D_1 = D_2 = 0.$$

საბოლოოდ მივიღებთ:

AC უბანში

$$EI\theta_1 = \frac{Pb}{2l}x^2 - \frac{Pb}{6l}(l^2 - b^2),$$

$$EIy_1 = \frac{Pb}{6l}x^3 - \frac{Pb}{6l}(l^2 - b^2)x,$$

CB უბანში

$$EI\theta_2 = \frac{Pl}{2l}x^2 - \frac{P(x-a)^2}{2} - \frac{Pb}{6l}(l^2 - b^2),$$

$$EIy_2 = \frac{Pb}{6l}x^3 - \frac{P(x-a)^3}{6} - \frac{Pb}{6l}(l^2 - b^2)x. \quad (2.14)$$

კერძოდ, კოჭის შუაში მოდებული ძალის შემთხვევაში მივიღებთ სიმეტრიულ დრეკად წირს. ჩალუნვის ისარი ძალის ქვეშ აღმოჩნდება, ხოლო საყრდენი კვეთების მობრუნების კუთხეები სიდიდით თანატოლი იქნება. ამ კერძო შემთხვევაზე გადასასვლელად საკმარისია ზემოთ მიღებულ ფორმულებში ჩავსვათ  $a = b = \frac{l}{2}$ . კერძოდ საყრდენი კვეთების მობრუნების კუთხეებისა და ჩალუნვის ისრისათვის მივიღებთ

$$\theta_A = -\theta_B = -\frac{Pl^2}{16EI}, \quad f = -\frac{Pl^3}{48EI} \quad (2.15).$$

## 12. საწყის პარამეტრთა მეთოდი

დრეკადი წირის დიფერენციალური განტოლების უშუალო ინტეგრირება მიცემულია 10 და 11 პარაგრაფებში. იმისდა მიუხედავად, რომ თვითონ განტოლება ელემენტარულია, უბნების რიცხვის ზრდასთან ერთად მეტად რთულდება. გარდა საყრდენი ორი პირობისა უნდა დავაკმაყოფილოთ  $y(x)$  და  $\theta(x)$  ფუნქციების უწყვეტობის პირობებიც უბნების საზღვრებზე, რაც  $n$  უბნის შემთხვევაში  $2n$  მუდმივას განსაზღვრავს მოითხოვს.

წინამდებარე პარაგრაფში შეყურსული ძალებისათვის ვაჩვენებთ როგორ დავიყვანოთ მუდმივათა რიცხვი ორზე. ასეთი დაყვანა შესაძლებელია ნებისმიერი სახის დატვირთვის შემთხვევაშიც. შეიძლება განტოლება იმგვარი წესით გავაინტეგრავოთ, რომ უწყვეტობა საზღვრებზე დაცული აღმოჩნდეს. ასეთ შემთხვევაში სპეციალურად საჭირო დარჩება მხოლოდ საყრდენი პირობების დაკმაყოფილება, რაც ორი მუდმივას შერჩევით მოხდება.



დასახული მიზნის მისაღწევად საკმარისია (2.5) განტოლების ამოხსნისას განუსაზღვრელი ინტეგრალები განსაზღვრულით შევცვალოთ.

კვეთის აბსცისა, რომლის ჩაღუნვასა და მობრუნების კუთხეს ვეძებთ,  $x$ -ით აღვნიშნოთ. მისი სათავე ძელის მარცხენა ბოლოზე ავიღოთ.  $x$  ჩვენი ინტეგრალების ზედა საზღვარი იქნება, ამიტომ გარკვეულობისათვის, ინტეგრების ცვლადი სხვა რაიმე ასოთი, მაგალითად  $t$ -თი აღვნიშნოთ.

(2.5) განტოლება ასე ჩაიწერება

$$EI d\left(\frac{dy}{dt}\right) = M_t dt.$$

განტოლების ორივე მხარე 0-დან  $x$ -მდე გავაინტეგრავთ

$$EI(\theta_x - \theta_0) = \int_0^x M_t dt.$$

აღვნიშნოთ

$$\int_0^x M_t dt = \Phi(x) \tag{2.16}$$

მივიღებთ

$$EI\theta_x = EI\theta_0 + \Phi(x) \tag{2.17}$$

თუ ამ განტოლებას ხელახლა გავაინტეგრავთ და მხედველობაში გვკეცნება, რომ  $\theta_t = \frac{dy}{dt}$ , მივიღებთ

$$EI(y_x - y_0) = EI\theta_0 x + \int_0^x \Phi(t) dt.$$

აღვნიშნოთ

$$\int_0^x \Phi(t) dt = \psi(x), \tag{2.18}$$

მაშინ

$$EIy_x = EI(y_0 + \theta_0 x) + \psi(x) \tag{2.19}$$

ამით ყველა უბნის მობრუნების კუთხის და ჩაღუნვის განტოლებანი ზოგადი სახითაა წარმოდგენილი. ეს ამოხსნა მხოლოდ ორ  $y_0$  და  $\theta_0$  მუდმივას შეიცავს.

ეს მუდმივები წარმოადგენენ საწყისი კვეთის ჩალუნვას და მობრუნების კუთხეს. მათ საწყისი პარამეტრები ეწოდება, ხოლო ინტეგრირების განსახილველ მეთოდს – საწყის პარამეტრთა მეთოდი.

შევნიშნოთ, რომ როგორც არ უნდა იცვლებოდეს  $M_t$ , გამოსახულება უბნიდან უბანში, განსაზღვრული ინტეგრალები  $\Phi(x)$  და  $\psi(x)$ , რომლებიც გეომეტრიულად ფართობებით წარმოსდგებიან, უბნების საზღვრებზე უწყვეტნი იქნებიან.

ერთი უბნის განტოლებები მეორისაგან მხოლოდ  $\Phi(x)$  და  $\psi(x)$ -ით იქნება განსხვავებული. შევადგინოთ ეს ფუნქციები რამდენიმე სახის დატვირთვისათვის. ნახაზზე ყველგან ნაჩვენები იქნება ძალების დადებითი მიმართულება.

1. შეყურსული მომენტის შემთხვევა (ნახ. 2.10) I უბანში, ე. ი. როცა  $0 \leq x \leq a$ , მღუნავი მომენტი  $M_t = 0$ , რის გამოც ამ უბანში ორივე უნქცია  $\Phi(x)$  და  $\psi(x)$  იგივეურად ნულია. II უბანში, როცა  $x > a$  გვაქვს  $M_t = M$  და

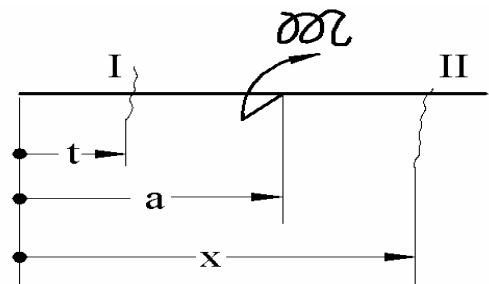
$$\Phi(x) = \int_0^x M_t dt = \int_0^a \underbrace{M_t}_{=0} dt + \int_a^x M dt = M(x-a) \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \psi(x) &= \int_0^x \Phi(t) dt = \int_0^a \underbrace{\Phi(t)}_{=0} dt + \int_a^x \Phi(t) dt = \\ &= \int_a^x M(t-a) dt = \frac{1}{2} M(x-a)^2. \end{aligned} \quad (2.21)$$

2. შეყურსული ძალის შემთხვევა (ნახ. 2.11). უბანში მღუნავი მომენტი იგივეურად ნულია, ამიტომ  $\Phi(x) = \psi(x) \equiv 0$

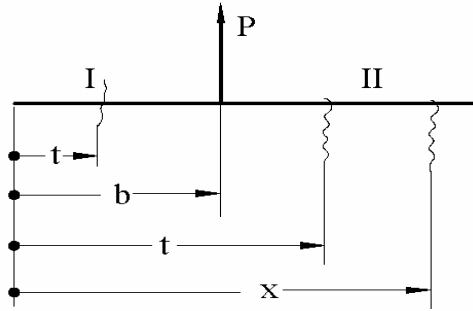
II უბანში, სადაც  $x > b$ , გვაქვს

$$M_t = P(t-b), \text{ ამიტომ}$$



ნახ. 2.10

$$\begin{aligned}\Phi(x) &= \int_0^x M_t dt = \int_0^b \underbrace{M_t}_{=0} dt + \int_b^x M_t dt = \\ &= \int_b^x P(t-b) dt = P \frac{(x-b)^2}{2}\end{aligned}\quad (2.22)$$



ნახ. 2.11

$$\begin{aligned}\psi(x) &= \int_0^x \Phi(t) dt = \int_0^b \underbrace{\Phi(t)}_{=0} dt + \int_b^x \Phi(t) dt = \\ &= \int_b^x \frac{P(x-b)^2}{2} dt = \frac{P}{6} (x-b)^3\end{aligned}\quad (2.23)$$

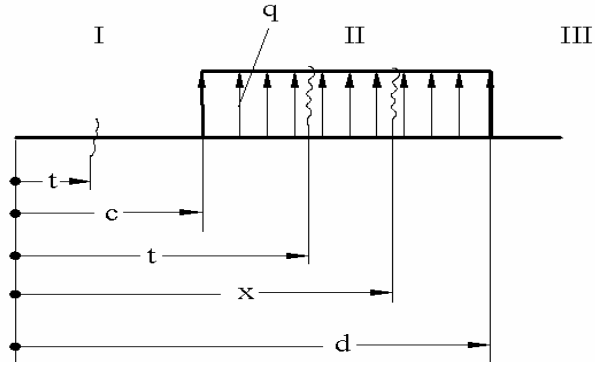
3. თანაბრადგანაწილებული ტვირთის შემთხვევა (ნახ. 2.12). I უბანში მღუნავი მომენტი  $M_t \equiv 0$ , ამიტომ  $\Phi(x) = \psi(x) \equiv 0$ . II უბანში, სადაც  $c \leq x \leq d$ , გვაქვს

$$M_t = \frac{q(t-c)^2}{2}$$

შესაბამისად

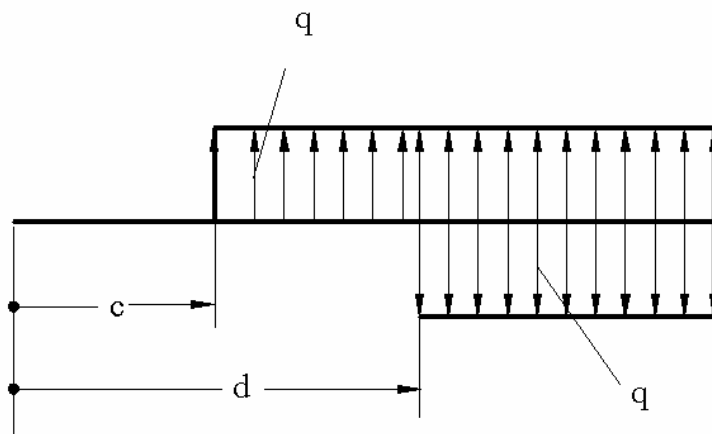
$$\begin{aligned}\Phi(x) &= \int_0^x M_t dt = \int_0^c \underbrace{M_t}_{=0} dt + \int_c^x M_t dt = \\ &= \int_c^x \frac{q}{2} (t-c)^2 dt = \frac{q(x-c)^3}{6}.\end{aligned}\quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \psi(x) &= \int_0^x \Phi(t) dt = \int_0^c \underbrace{\Phi(t)}_{=0} dt + \int_c^x \Phi(t) dt = \\ &= \int_c^x \frac{q}{6} (t-c)^3 dt = \frac{q(x-c)^4}{24}. \end{aligned} \quad (2.25)$$



ნახ. 2.12

გადავალთ რა III უბანში, სადაც  $x > d$ , გამოთვლების გამარტივების მიზნით, მიზანშეწონილია განაწილებული დატვირთვა აზრით გავაგრძელოთ და დამატებული ტვირთის კომპენსირებისათვის შებრუნებული ტვირთიც დავამატოთ (ნახ. 2.13).



ნახ. 2.13

მაშინ საჭირო ფორმულების მისაღებად საკმარისია II უბნის  $\Phi(x)$  და  $\psi(x)$  გამოსახულებები ორ-ორჯერ გამოვიყენოთ, ერთხელ ზემოთ მიმართული ტვირთისათვის, მეორედ – ქვემოთ, შემდეგ კი ერთმანეთს გამოვაკლოთ, გვექნება

$$\Phi(x) = \frac{q(x-c)^3}{6} - \frac{q(x-c)^3}{6},$$

$$\psi(x) = \frac{q(x-c)^4}{24} - \frac{q(x-d)^4}{24}. \quad (2.26)$$

ანალოგიურად შედგება  $\Phi(x)$  და  $\psi(x)$ -ის ფორმულები სხვა სახის დატვირთვებისათვისაც.

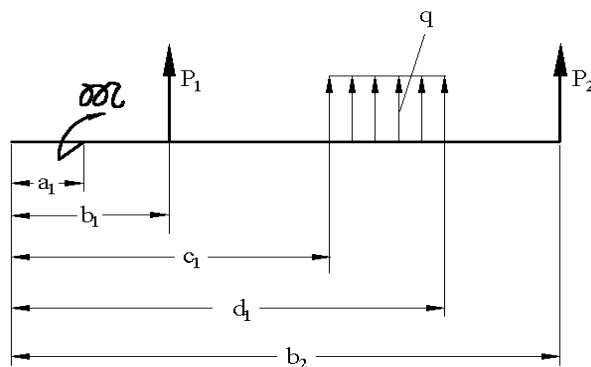
თუ კოჭზე შეყურსული ძალა, მომენტი და განაწილებული ტვირთი ერთდროულად მოქმედებს, მაშინ, ძალთა მოქმედების დამოუკიდებლობის პრინციპის თანახმად,  $\Phi(x)$  და  $\psi(x)$  ფუნქციები მათი ზემოთ მიღებულ გამოსახულებათა შესაფერისი შეკრებით მიიღება. ამ გზით შეიძლება დრეკელი წირის და მობრუნების კუთხის ზოგადი განტოლებები შევადგინოთ. თუ ვიგულისხმებთ, რომ ერთი სახის ტვირთი, მაგ., შეყურსული ძალა რამდენიმე

(ნახ. 2.14), მაშინ შესაბამისი წევრები ჯამების სახით შევა, ისე რომ, ზოგადად განტოლებებს ექნება სახე

$$EI \theta_x = EI \theta_0 + \sum M(x-a) + \sum \frac{P(x-b)^2}{2} + \sum \frac{q}{6} [(x-c)^3 - (x-d)^3] \quad (2.27)$$

$$EI y_x = EI(y_0 + \theta_0 x) + \sum M \frac{(x-a)^2}{2} + \sum \frac{P(x-b)^3}{6} + \sum \frac{q}{24} [(x-c)^4 - (x-d)^4].$$

ამ განტოლებების გამოყენების კერძო შემთხვევაში უნდა გვახსოვდეს, რომ თითოეული ძალა უშუალოდ გავლენას მხოლოდ მარჯვნივ ახდენს, ამიტომ, რომელიმე კვეთის ჩალუნვის ან მობრუნების კუთხის განსაზღვრისათვის საჭიროა



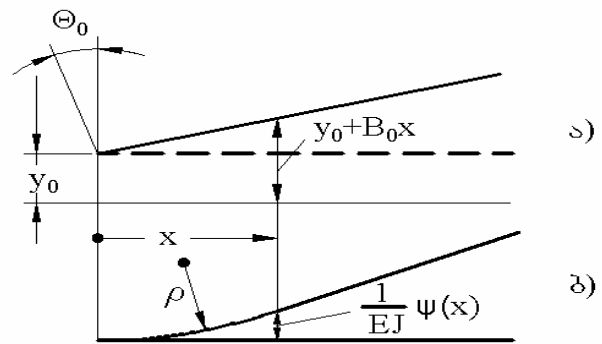
ნახ. 2.14

(2.27) განტოლებებიდან ამოიწეროს მხოლოდ მის მარცხნივ მოდებული ძალების შესაბამისი წევრები.

დრეკელი წირის დიფერენციალური განტოლების ნაჩვენები წესით ინტეგრირებას

გარკვეული გეომეტრიული აზრი აქვს. წარმოვიდგინოთ, რომ ძელს საყრდენები მოვხსენით და მათ მაგიერ მოვდეთ რეაქციის ძალები.  $y_0$ ,  $\theta_0$  პარამეტრები ცნობილად მივიჩნიოთ და  $x=0$  კვეთი თავის ახალ მდებარეობაში გადავიტანოთ. მაშინ ძელი თავის პარალელურად  $y_0$  მანძილით გადაადგილდება და  $\theta_0$  კუთხით შემობრუნდება (ნახ. 2.15, ა). ყოველი სხვა კვეთი ძელის გამრუდების გამო დამატებითი  $\frac{1}{EI} \psi(x)$  გადაადგილებას იღებს (ნახ. 2.15, ბ). ვიწყებთ რა მარცხენა ბოლოდან, ვაჯამებთ – კვეთის გადაადგილებას, გამოწვეულს ძელის ყველა იმ ელემენტის გამრუდებით, რომელნიც  $0, x$  შუალედში არიან მოთავსებულნი.

საწყისი პარამეტრები  $y_0$  და  $\theta_0$  საყრდენი პირობიდან განისაზღვრებიან. იმისდა მიხედვით, თუ როგორ არის დამაგრებული საწყისი კვეთი, შეიძლება ცნობილი იყოს ერთი ან ორივე პარამეტრი.



ნახ. 2.15

**მაგალითი 1.** შევადგინოთ დრეკადი წირის განტოლება შეყურსული ძალით დატვირთული კონსოლისთვის (ნახ. 2.7)

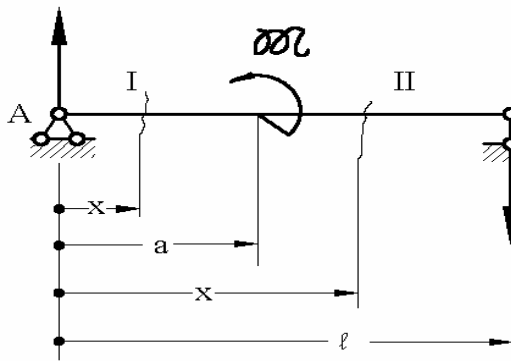
საწყისი კვეთი უძრავია:  $y_0 = \theta_0 = 0$ . გვაქვს ერთი უბანი. კვეთის მარცხნივ მოდებულია რეაქციის ძალები  $A = P$  და  $M_A = -Pl$ . ჩალუნვის ზოგადი განტოლების პირველი და მეორე წევრიდან უნდა ავიღოთ თითო შესაკრები. რადგან  $A$  და  $M_A$ -ს მოდების წერტილების აბსცისები  $a = b = 0$ , გვექნება

$$EI y_x = -Pl \frac{x^2}{2} + P \frac{x^3}{6} = -\frac{Pl}{6} x^2 \left( 3 - \frac{x}{l} \right),$$

რაც (2.9) განტოლებას ემთხვევა.  $\theta_x$  მიიღება  $y_x$ -ის გაწარმოებით.

**მაგალითი 2.** (ნახ. 2.16). შევადგინოთ დრეკადი წირის განტოლება. საწყისი პარამეტრებიდან ცნობილია ერთი  $y_0 = 0$ . გასაგებია  $\theta_0$ . I უბანში  $x$  კვეთის მარცხნივ მოდებულია ერთი ძალა  $A = \frac{M}{l}$ . ჩალუნვის ზოგადი განტოლების მეორე წევრიდან უნდა ავიღოთ ერთი შესაკრები. რადგანაც მანძილი  $b = 0$ , გვექნება

$$EI y_x = EI\theta_0 x + \frac{M}{l} \frac{x^3}{6} \quad (ა)$$



II უბანში კვეთის მარცხნივ მოდებულია ორი ძალა  $A$  და  $M$ ; რადგანაც  $M$  უარყოფითი მიმართულებისაა, მივიღებთ

$$EI y_x = EI\theta_0 x - M \frac{(x-a)^2}{2} + \frac{M}{l} \frac{x^3}{6}. \quad (ბ)$$

ნახ. 2.16

$\theta_0$ -ის გასაგებად შევადგინოთ საყრდენი პირობა მარჯვენა ბოლოსათვის  $y_l = 0$ . გამოვიყენებთ რა (ბ)-ს, მივიღებთ

$$EI\theta_0 l - \frac{M(l-a)^2}{2} + \frac{Ml^2}{6} = 0,$$

საიდანაც

$$\theta = -\frac{Ml}{6EI} \left[ 1 - 3 \left( 1 - \frac{a}{l} \right)^2 \right] \quad (2.28)$$

მობრუნების კუთხის განტოლებები მიიღება (ა) და (ბ)-ს გაწარმოებით. კერძო შემთხვევებში, როცა  $a=0$  ან  $a=l$ , (2.28) ფორმულიდან შესაბამისად მივიღებთ

$$\theta_0 = \frac{Ml}{3EI}, \quad \theta_0 = -\frac{Ml}{6EI} \quad (2.29)$$

ამ ფორმულებით შემდეგ ვისარგებლებთ.

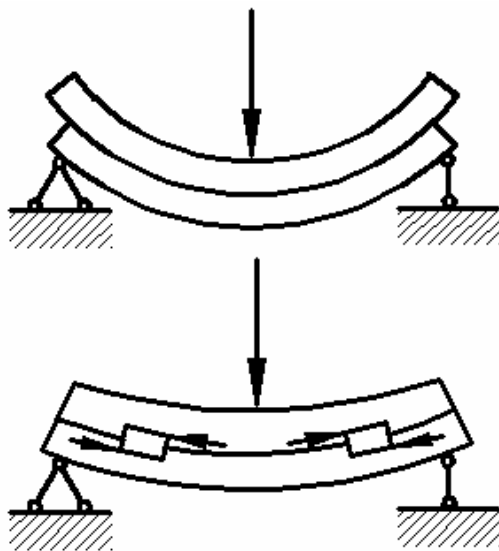
### 13. შედგენილი კოჭების გაანგარიშების საფუძვლები

შედგენილი კოჭები გამოიყენება როგორც ლითონის, ისე ხის კონსტრუქციებში. ორტესებრი მოქლონვილი კოჭი შედგება ფოლადის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური ფურცლებისა და ოთხი კუთხოვანისაგან. ჰორიზონტალური ფურცლები კუთხოვანებთან ერთად ადგენენ კოჭის სარტყელებს, ხოლო ვერტიკალური ფურცლები – კედელს. ნაწილების შეერთება ხდება მოქლონებით. შენადულ კოჭში კუთხოვანები არა გვაქვს, სარტყელები კედელთან შეერთებულია გვერდული ნაკერებით (ნახ. 2.17).

შემართებელი ელემენტების - მოქლონების, შენადულების ნაკერებისა და სხვ. დანიშნულებაა უძრავად შეაერთონ კოჭის ნაწილები ერთიმეორესთან, რაც უზრუნველყოფს სისტემის როგორც მთლიანობის მუშაობას.

არსებითია, რომ დაუკავშირებელი ნაწილების ჯამური წინააღმდეგობა იგივე არაა, რაც დაკავშირებულისა. მაგალითად, თუ ხის ძელებს ერთიმეორეზე დავალაგებთ და განივი ძალით ვიმოქმედებთ, ისინი ერთიმეორის დამოუკიდებლად გაიღუნებიან და გრძივი მიმართულებით ძვრას განიცდიან (ნახ. 2.18, ა).

სწორედ ძვრის შედეგად ძელების სისტემა, იმავე ზომების ერთ მთლიან ძელთან შედარებით, ნაკლებად ხისტი და მტკიცე აღმოჩნდა. მთლიან ძელში შრეების ურთიერთ ძვრას ადგილი არა აქვს – ამას მასალაში არსებული ბმები ეწინააღმდეგება.



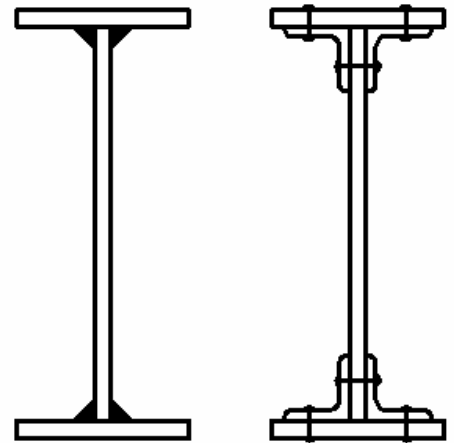
ნახ. 2.18

შეიძლება მთლიანი ძელის ეფექტს მივაღწიოთ, თუ ძელებს წებოთი შევაერთებთ. შეერთება შეიძლება წყვეტილი – ადგილ-ადგილ დაყენებული – ბმებითაც, მაგალითად, სოგმანების

- ა) შემწვობით (ნახ. 2.18, ბ). თუ სოგმანები საკმაოდ ძლიერია, შეიძლება ძვრა სრულიად მოვსპოთ და ამით შედგენილი ძელი მთლიანის ექვივალენტური გავხადოთ. 2.18ბ,ნახ-ზე ნაჩვენებია სოგმანებზე გადაცემული ძალები, რომლებიც მათ გადაჭრას ცდილობენ.

შედგენილი კოჭის გაანგარიშება შედგება ორი ნაწილისაგან: კვეთის

შერჩევისა და შემართებელი ელემენტების გაანგარიშებისაგან. პირველი ისევე წარმოებს, როგორც მთლიანი ძელის შემთხვევაში. შევჩერდეთ გაანგარიშების მეორე ნაწილზე. განვიხილოთ შენადული კოჭი (ნახ. 2.19). ნაკერების სიგრძე  $a$ - თი აღვნიშნოთ, ბიჯი  $l$ - ით. ნაკერებზე გადაცემული ძალა ჟურავსკის მეთოდით განისაზღვრება. ამისათვის საკმარისია I და II კვეთებით ერთი წყვილი ნაკერის ზვედრი უბანი

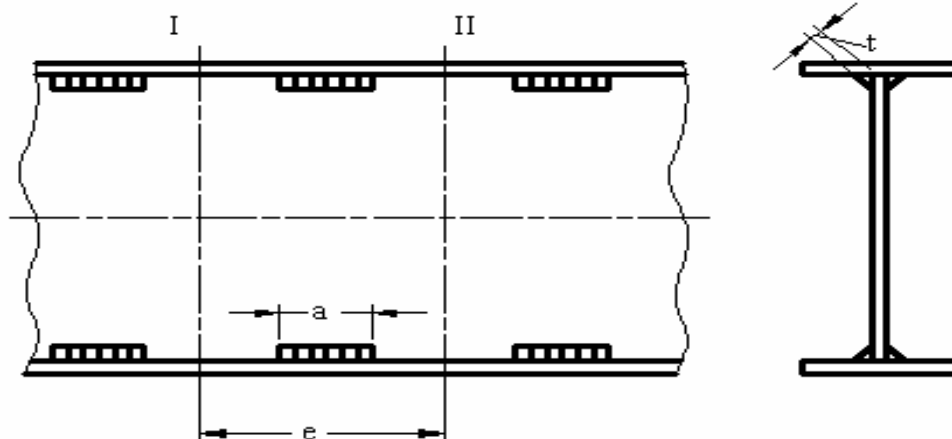


ნახ. 2.17



გამოვყოთ და ამ კვეთში სარტყელზე მოსული ნორმალური ძალები გავიანგარიშოთ. მლუნავი მომენტის ცვლილების გამო წარმოიშვება ძალთა სხვაობა  $N_2 - N_1$ , რომელიც შეეცდება სარტყელი კედლის გასწვრივ დაძრას. სწორედ ამ ძვრას სწორედ წინ აღუდგეს ნაკერი (ნახ. 2.20).

მძვრელი ძალა



ნახ. 2.19

$$T = N_2 - N_1 = \frac{\Delta M S_z^*}{I_z},$$

სადაც  $\Delta M = M_2 - M_1$ , ხოლო  $S_z^*$  - სარტყელის სტატიკური მომენტი.

მომენტის ნაზრდი  $e$  მანძილზე

$$\Delta M = \int_0^l Q(x) dx.$$

ეს ნაზრდი სიჭარბით განისაზღვრება. თუ დავუშვებთ, რომ განივი ძალა მუდმივია და უდრის  $Q_{\max}$ , მაშინ  $\Delta M = Q_{\max} e$ , ხოლო

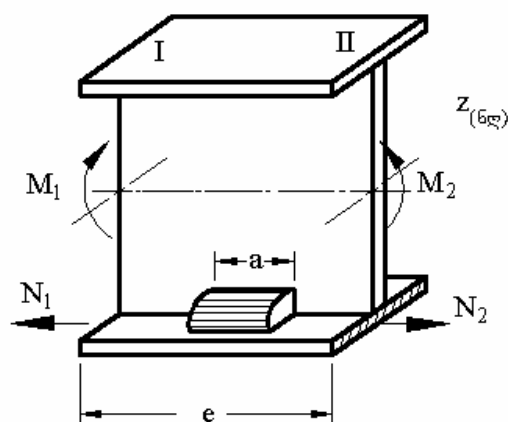
$$T = \frac{Q_{\max} S_z^*}{I_z} e. \quad (1)$$

ნაკერს ჭრახე ვანგარიშობთ

$$\frac{T}{2at} \leq [\tau]_{\text{ელ}}. \quad (2)$$

თუ ნაკერის სისქე (ბისექტორულ სიბრტყეში)  $t$ -ს წინასწარ ავიღებთ, ამ პირობიდან  $e/a$  შეფარდება განისაზღვრება

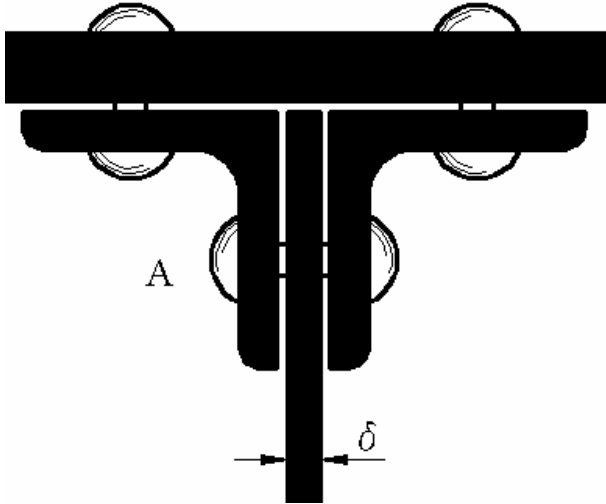
$$\frac{e}{a} \leq \frac{2I_z t [\tau]_{\text{ელ}}}{Q_{\max} S_z^*}. \quad (3)$$



ნახ. 2.20

$T$  ძალის მიღებული (1) ფორმულა გამოსადეგია ნებისმიერი სახის შეერთებისთვის. ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში

უნდა გამოირკვეს შემაერთებელი ელემენტი სისტემის რა ნაწილებს აკავშირებს ერთმანეთთან და ერთ-ერთი ნაწილთაგანის სტატიკური მომენტი ჩაისვას ფორმულაში. ასე მაგალითად, მოქლონვილ კოჭში, სარტყელის ჰორიზონტალურ  $A$  მოქლონზე გადაცემული ძალის გასაგებად უნდა განისაზღვროს სარტყელის სტატიკური მომენტი, ვინაიდან განსახილველი მოქლონით მთელი სარტყელი მაგრდება კედელზე (ნახ. 2.21).



ნახ. 2.21

$T$  ძალა იწვევს მოქლონის ჭრას, ხოლო შემაერთებელი კუთხოვნების და ვერტიკალური ფურცლის თელვას. შესაბამისი სიმტკიცის პირობები იქნება:

$$\frac{T}{2 \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau],$$

$$\frac{T}{d \delta} \leq [\sigma]_{\sigma},$$

სადაც  $d$  მოქლონის დიამეტრია, ხოლო  $\delta$  - კოჭის ვერტიკალური კოჭის სისქე.

**მაგალითი 1.** ორ საყრდენზე მოთავსებული შენადული კოჭი დატვირთულია ძალის შუაში მოდებული ძალით  $p = 20$  ტ. შევარჩიოთ კვეთი და ნაკერის ზომები, თუ  $l = 4,8$  მ,

$$[\sigma] = 1600 \text{ კგ/სმ}^2, [\tau] = 1000 \text{ კგ/სმ}^2, [\tau]_{\text{ელ}} = 800 \frac{\text{კგ}}{\text{სმ}^2}.$$

მაქსიმალური მღუნავი მომენტი

$$M_{\max} = \frac{20 \cdot 4,8}{4} = 24 \text{ ტმ.}$$

საჭირო წინაღობის მომენტი

$$W_z \geq \frac{M_{\max}}{[\sigma]} = \frac{2400000}{1600} = 1500 \text{ სმ}^3.$$

კვეთის შერჩევა ხდება სინჯის ხერხით. დავუშვებთ ზომებს და შემდეგ შევამოწმებთ. პროექტირების პრაქტიკით დადგენილია კოჭის შემადგენელი ელემენტების ზომების ოპტიმალური თანაფარდობანი, რომლითაც ხელმძღვანელობენ ზომების საორიენტაციოდ დანიშნის შემთხვევაში.

ავილოთ: კედლის სიმაღლე  $h = \frac{l}{10} \approx 50$  სმ. თაროს სიგანე  $b = \frac{h}{5} = 10$  სმ. კედლის

სისქე  $\delta = \frac{h}{50} = 1$  სმ. თაროს სისქე უდრის  $2\delta = 2$  სმ (ნახ. 2.22).

შევამოწმოთ ამორჩეული კვეთი. ინერციისა და წინაღობის მომენტები ტოლია:

$$I_z \approx \frac{1 \cdot 50^3}{12} + 2 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 26^2 = 37440 \text{ სმ}^4,$$

$$W_z = \frac{37440}{27} = 1387 \text{ სმ}^3.$$

უკანასკნელი საჭირო მნიშვნელობიდან 7,5 % - ით განსხვავდება. წინააღმდეგობის მომენტის ასეთ უმნიშვნელო გადიდებას შეიძლება თაროს სივრცის მცირე ცვლილებით მივაღწიოთ. ავიღოთ  $b = 11$  სმ, მაშინ

$$I_z = 37440 + 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 26^2 = 40140 \text{ სმ}^4.$$

$$W_z = \frac{40140}{27} = 1485 \text{ სმ}^3$$

მაქსიმალური დაბეჭადვა

$$\sigma_{\max} = \frac{2400000}{1485} = 1616 \text{ კგ/სმ}^2$$

დასაშვებისაგან მხოლოდ ერთი პროცენტით განსხვავდება.

შევამოწმოთ კვეთი მხებ დაბეჭადვებზე. ნახევარი კვეთის სტატიკური მომენტი  $\max S_z^* = 25 \cdot 1 \cdot 12,5 + 2 \cdot 11 \cdot 26 = 885 \text{ სმ}^3$ . განვივი ძალა  $Q = 14$  ტ. მივიღებთ

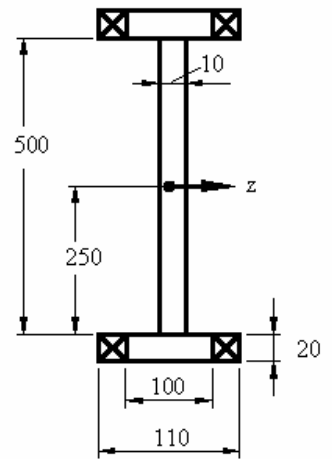
$$\tau_{\max} = \frac{10000 \cdot 885}{40140 \cdot 1} = 220 \text{ კგ/სმ}^2 [\tau].$$

ნაკერის გასაანგარიშებლად გავიგოთ თაროს სტატიკური მომენტი  $S_z^* = 2 \cdot 11 \cdot 26 = 573 \text{ სმ}^3$ . ნაკერის სისქე 1 სმ ავიღოთ, მაშინ  $t \approx 0,7 \cdot 1 = 0,7$  სმ და

$$\frac{e}{a} = \frac{2 \cdot 40140 \cdot 0,7 \cdot 800}{1000 \cdot 573} \approx 7,8.$$

ეს პირობა საკმაო სიზუსტით დაკმაყოფილდება, თუ ავიღებთ  $e = 40$  სმ,  $a = 5$  სმ.

**შენიშვნა.** თუ აღმოჩნდა  $\frac{e}{a} = 1$ , ეს ნიშნავს, რომ აღებული



ნახ. 2.22

სისქის დროს მთლიანი ნაკერია საჭირო, ხოლო თუ  $\frac{e}{a} < 1$ ,

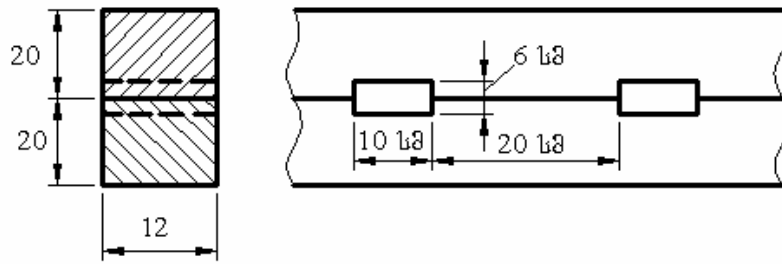
მაშინ მთლიანიც არაა საკმარისი.

**მაგალითი 2.** ორტესებრი მოქლონვილი კოჭი მოთავსებულია ორ საყრდენზე და მასზე მოქმედებს თანაბრად განაწილებული დატვირთვა  $q = 4$  ტ/მ. გავიანგარიშოთ სარტყლის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური მოქლონების გადამჭრელი ძალა, თუ მათი ბიჯი უდრის

100 მმ, კოჭის მალი  $l = 8$  მ, ვერტიკალური კედლის ზომები  $800 \times 10$  მმ-ია, სარტყლის კუთხოვანებისა  $60 \times 60 \times 8$ , ხოლო სარტყლის ჰორიზონტალური ფურცლის  $170 \times 10$  მმ.

**პასუხი.** 725 კგ, 1455 კგ.

**მაგალითი 3.** უბრალო კოჭი შედგება სოგმანებით შეერთებული ხის ორი ძელისაგან.



ნახ. 2.23

კოჭი დატვირთულია მალის შუაში ძალით  $p = 2$  ტ. სოგმანისა და ძელების ზომები მოცემულია 2.23 ნახ-ზე. გავიანგარიშოთ: 1. მხლენავე ძაბვები სოგმანებში, 2. მხლენავე ძაბვები ძელის ჭლობაში და 3. ჭლობის მთელავი ძაბვები.

**პასუხი:** 9,37 კგ/სმ<sup>2</sup>, 4,68 კგ/სმ<sup>2</sup>, 15,6 კგ/სმ<sup>2</sup>.

#### 14. არასიმეტრიული კოჭების ბრტყელი ღუნვა

აქამდე ვიხილავდით სიმეტრიულ კოჭებს, ძალებს კი ვგულისხმობდით სიმეტრიის სიბრტყეში მოთავსებულს. ამ პირობებში დეფორმაციაც სიმეტრიული იყო, ხოლო ნეიტრალური ღერძი ძალთა სიბრტყის პერპენდიკულარული. ასეთი ხასიათის ღუნვას ბრტყელი ღუნვა ვუწოდებთ.

ბრტყელ ღუნვას შეიძლება ადგილი ჰქონდეს არასიმეტრიულ კოჭებშიც. მართლაც, ნებისმიერი ფორმის შემთხვევაში შეიძლება გარეშე  $M$  წყვილძალის სიბრტყე  $yx$  ისე შევარჩიოთ, რომ შესაბამისი ნეიტრალური ღერძი  $z$  მისი პერპენდიკულარული იყოს (ნახ. 2.24). ასეთი შერჩევა წონასწორობის  $\sum M_y = 0$  განტოლებიდან მოხდება. რადგანაც გარე წყვილძალის მომენტი  $y$  ღერძის მიმართ ნულია, გვექნება

$$\int_F \sigma dF \cdot z = 0.$$

ბრტყელი კვეთის ჰიპოტეზის თანახმად

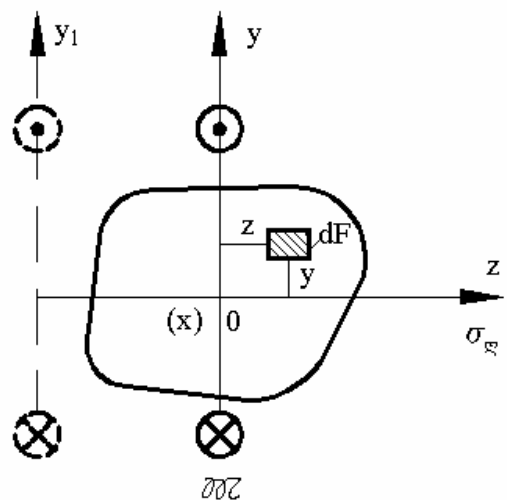
$$\sigma = E \frac{y}{\rho}.$$

ჩასმით მივიღებთ

$$\frac{E}{\rho} \int_F yz dF = \frac{E}{\rho} I_{yz} = 0.$$

მაგრამ  $\frac{E}{\rho} \neq 0$ , მაშასადამე, საჭიროა, რომ

$I_{yz} = 0$ , რასაც მხოლოდ მაშინ ექნება ადგილი, თუ  $y$  და  $z$  მთავარი ღერძებია. მაშასადამე, ნებისმიერი ფორმის კოჭის ბრტყელი ღუნვის მისაღებად საჭიროა წყვილძალა ერთ-ერთ მთავარ სიბრტყეში მოვათავსოთ, მაშინ ნეიტრალური ღერძი



ნახ. 2.24

მეორე მთავარ ცენტრალურ ღერძს დაემთხვევა.

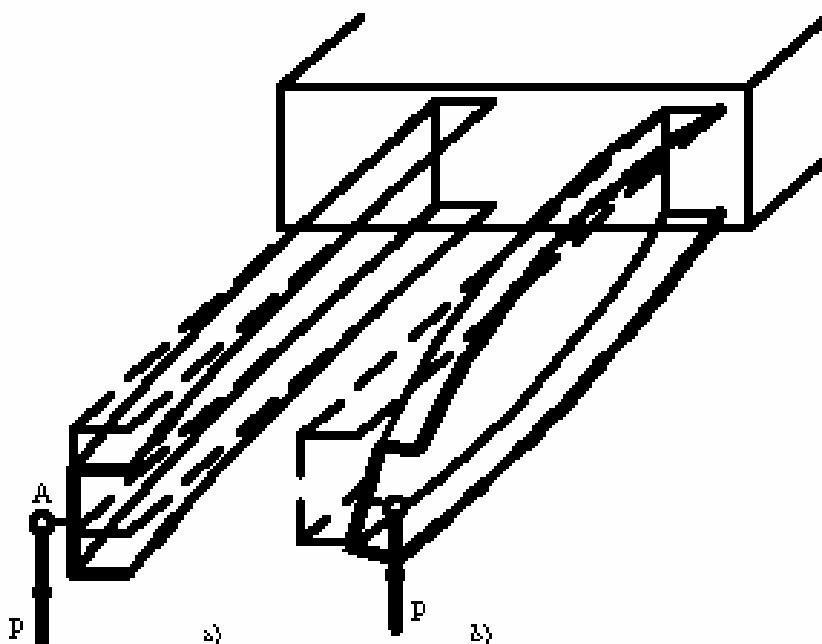
ამით განისაზღვრა გარე წყვილძალის სიბრტყის ორი შესაძლო მიმართულება, მაგრამ მდებარეობა კი განუსაზღვრელი დარჩა. მართლაც, ცენტრიდანული მომენტი ყოველთვის ნული დარჩება, თუ წყვილძალის  $\gamma x$  სიბრტყეს თავის პარალელურად, ნებისმიერ მდებარეობაში გადავიტანთ (პუნქტირი).

ეს იმ ფაქტის ფორმალური გამოსახვაა, რომ შიგა და გარე წყვილძალების წონასწორობა არ დაირღვევა, თუ მათ სიბრტყეებს ერთიმეორის პარალელურად გადავიტანთ. ამგვარად; გარე წყვილძალის სიბრტყის მდებარეობისათვის უსასრულოდ მრავალი შესაძლებლობა მივიღეთ. წონასწორობის განტოლებიდან უფრო გარკვეული პასუხის მიღება სუფთა ღუნვის შემთხვევაში შეუძლებელიც იყო. ეს შესაძლებელი ხდება მხოლოდ განივი ღუნვის შემთხვევაში, რის შესახებაც შემდგომ პარაგრაფში იქნება აღნიშნული.

## 15. ღუნვის ცენტრის ცნება

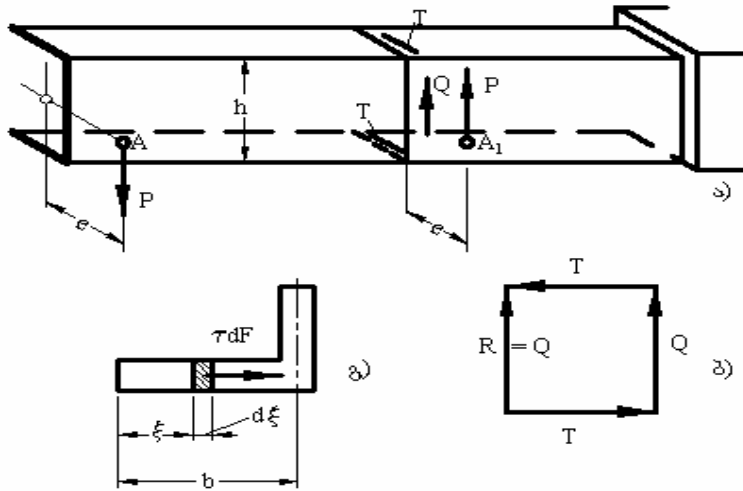
განვიხილოთ შევლერის ღუნვა განივი ძალით. ძალა ვერტიკალურ მთავარ სიბრტყეში მოვათავსოთ და სიმეტრიის სიბრტყის პერპენდიკულარულად მივმართოთ (ნახ. 2.25, ა), შევნიშნოთ, რომ ძალის გადაცემა კვეთის გაბარიტის გარეთ შეიძლება, მაგალითად, მიღუღებული კონსოლის შემწეობით. ცდა გვიჩვენებს, რომ ბრტყელ ღუნვას ადგილი აქვს  $P$  ძალის მხოლოდ ერთ გარკვეულ  $A$  მდებარეობაში. თუ ძალა  $A$  მდებარეობიდან გადავიტანეთ და, მაგალითად, კვეთის სიმძიმის ცენტრში მოვდეთ, მაშინ ღუნვასთან ერთად გრეხაც გაჩნდება (ნახ. 2.25, ბ). რაც უფრო მიუახლოვდება ძალა  $A$  წერტილს, გრეხა მოიკლებს და ბოლოს, როცა ძალა  $A$ -ს მიაღწევს, მოისპობა.

$A$  წერტილს ღუნვის ანუ სიხისტის ცენტრი ეწოდება. მხოლოდ ღუნვის მისაღებად საჭიროა განივი კვეთის სიბრტყეში მოქმედმა გარე ძალების ტოლქმედმა  $A$  წერტილში გაიაროს, წინააღმდეგ შემთხვევაში გაჩნდება გრეხაც. კერძოდ, ბრტყელი ღუნვის მისაღებად მთავარ სიბრტყეში მოთავსებული ტოლქმედი ღუნვის ცენტრში უნდა გადიოდეს.



ნახ. 2.25

ლუნვის ცენტრის საპოვნელად დავუშვათ, რომ შველერი ვერტიკალურ მთავარ სიბრტყეში უკვე გაიღუნა და ვეძებთ  $P$  ძალის ისეთი მდებარეობა, რომელშიც იგი გაღუნულ ძელს გააწონასწორებს.



ნახ. 2.26

ლუნვის ნორმალური ძაბვები  $M$  წვევილძალაზე დაიყვანება, მხები ძაბვები კი ქმნის ნაკადს კვეთის კონტურის გასწვრივ. ვერტიკალურ კედელში ძაბვების ტოლქმედი უდრის  $Q$ , თაროებში კი ადგენენ წვევილძალას, რომლის მომენტი უდრის  $T \cdot h$  (ნახ. 2.26, ა).

შევკრიბოთ სამივე ძალა (შეკრება ნახევრებია ნახ. 2.26, ბ-ზე).  $R$  ტოლქმედი სიდიდით ისევე  $Q$ -ს ტოლია, ოღონდ მისი მოქმედების ხაზი  $e$  მანძილზე  $A_1$  წერტილში გადაინაცვლებს. ცხადია, მხები ძაბვების მთელი ნაკადის მომენტი  $A_1$  წერტილის მიმართ უდრის 0. გვაქვს

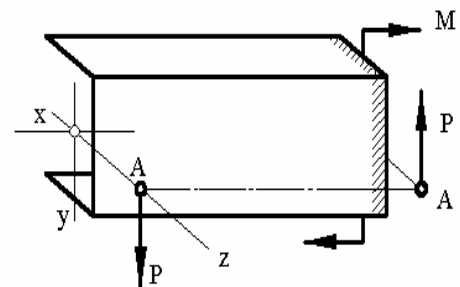
$$-Th + Qe = 0,$$

საიდანაც

$$e = \frac{Th}{Q} \quad (ა)$$

მოვათავსებთ რა გარე  $P$  ძალას კედლიდან  $e$  მანძილზე, კოჭის მოკვეთილ ერთ ნაწილზე ორი თანატოლი და შებრუნებული მიმართულების წვევილძალა აღმოჩნდება მოდებული და წონასწორობაც დაცული იქნება (ნახ. 2.27). თუ ძალას  $A$  წერტილიდან  $z$  ღერძის მიმართულებით რაიმე  $\Delta z$  მანძილით გადავწევთ, წონასწორობა ლუნვის ძაბვებსა და გარე ძალას შორის დაირღვევა – დაცული აღარ აღმოჩნდება მომენტების განტოლება  $\sum M_x = 0$ . დამატებით წარმოშობილი მომენტი  $P\Delta z$  გრეხას გამოიწვევს და მისი ძაბვებითვე გააწონასწორდება.

ვიპოვოთ  $T$ . გვაქვს



ნახ. 2.27

$$T = \int_0^b \tau \delta d\xi,$$

სადაც  $b$  არის თაროს სიგანე, ხოლო  $dF = \delta d\xi$  - მისი ელემენტარული ფართობი (ნახ. 2.26, გ). რადგანაც მოკვეთილი ფართობის სტატიკური მომენტი  $S_z^* = \delta \xi \cdot \frac{h}{2}$ , მივიღებთ

$$T = \frac{Qh\delta}{2I_z} \int_0^b \xi d\xi = \frac{Q\delta hb^2}{4I_z}.$$

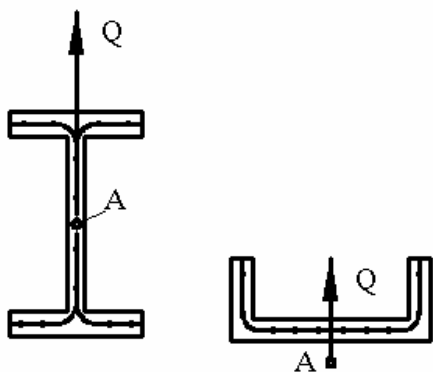
ეს მნიშვნელობა ჩავსვათ (ა) ფორმულაში, გვექნება

$$e = \frac{b^2 h^2 \delta}{4I_z} \quad (5)$$

მიღებული ფორმულა გვიჩვენებს, რომ ღუნვის ცენტრის მდებარეობა მხოლოდ გეომეტრიული ფაქტორებისაგან – კვეთის ფორმისა და ზომებისაგან არის დამოკიდებული.

ღუნვის ცენტრი, როგორც შველერის შემთხვევაში ვნახეთ, წარმოადგენს წერტილს, რომელშიც გადის ღუნვის დროს აღძრული მხები ძაბვების ტოლქმედი. სიმეტრიის სიბრტყეში ღუნვისას ეს ტოლქმედი თვითონ სიმეტრიის ღერძს ემთხვევა (ნახ. 2.28), მაშასადამე, ღუნვის ცენტრი სიმეტრიის ღერძზე ძევს.

თუ კვეთს სიმეტრიის ორი ღერძი აქვს, ღუნვის ცენტრს ძებნა არ სჭირდება – იგი სიმბიძის ცენტრს ემთხვევა. სიმეტრიის ერთი ღერძის შემთხვევაში საძებნი იქნება მისი ერთი კოორდინატი – ასე გვაქვს მაგალითად შველერის შემთხვევაში.



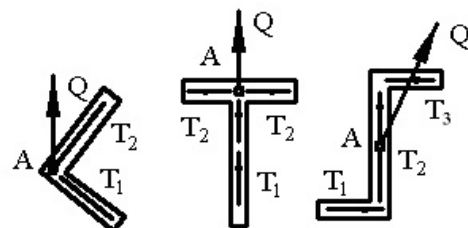
ნახ. 2.28

თხელკედლიან პროფილებში მხები ძაბვებისა და, მაშასადამე, ღუნვის ცენტრის მიახლოებითი განსაზღვრა ელემენტარული საშუალებებით ხერხდება. მასიურ ძელებში ამოცანის ამოხსნა დრეკადობის თეორიის მეთოდების გამოყენებას მოითხოვს.

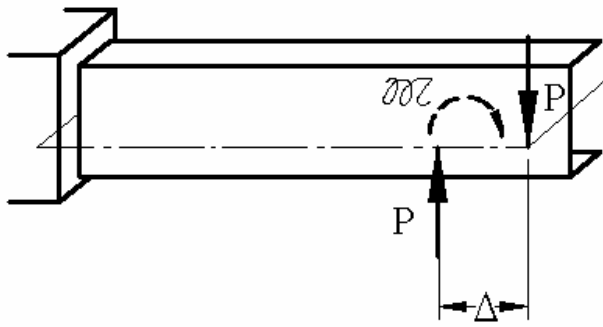
ღუნვის ცენტრის მოძებნა განსაკუთრებულ პრაქტიკულ ინტერესს წარმოადგენს სწორედ თხელკედლიანი პროფილებისათვის, რომლებიც გრეხას სუსტად ეწინააღმდეგებიან. გრეხის დიდი დეფორმაციების თავიდან ასაცილებლად საჭიროა დატვირთვა ღუნვის ცენტრში

გადავცეთ.

გარკვეული სახის არასიმეტრიული თხელკედლიანი პროფილების ღუნვის ცენტრი ადვილად მოიძებნება. ასეთია, მაგალითად, კუთხოვანა (ნახ. 2.29, ა). ღუნვის მხები ძაბვების ტოლქმედი  $T_1$  და  $T_2$  ორივე თაროში მიმართულია ღერძების გასწვრივ, რის გამოც სრული ტოლქმედი მათი გადაკვეთის



ნახ. 2.29



ნახ. 2.30

A წერტილში გაივლის. მსგავსი შემთხვევა გვაქვს ტესტური კვეთისათვის (ნახ. 2.29, ბ).

იმისდა მიუხედავად, რომ Z - ბრ კვეთის სიმეტრიის არც ერთი ღერძი არა აქვს, ღუნვის ცენტრი მაინც სიმძიმის ცენტრს ემთხვევა - ეს გამონაკლისია. თაროებში ღუნვით აღძრული მხები ძაბვების ტოლქმედი  $T_1$  და  $T_3$  თანატოლია და ერთ მხარესაა მიმართული. სამივე  $T_1$ ,

$T_2$  და  $T_3$  ძალის ტოლქმედი, როგორც ეს 2.29 ნახაზიდან ჩანს, კვეთის სიმძიმის ცენტრში გადის, რაც ზემოაღნიშნულს ადასტურებს.

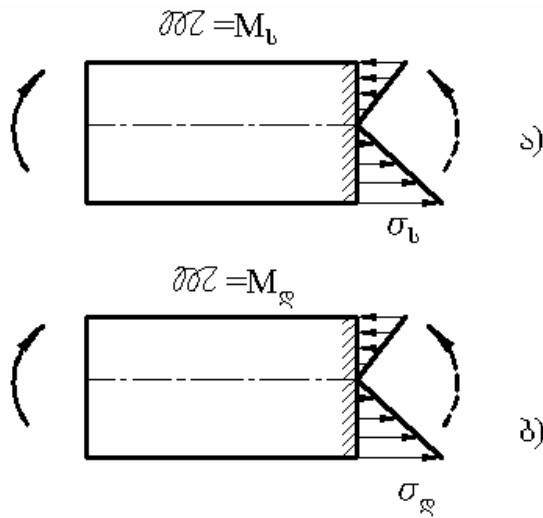
იმის შემდეგ, რაც განივი ღუნვის შემთხვევაში ღუნვის ცენტრის მდებარეობა დავადგინეთ, შეიძლება სუფთა ღუნვას დავუბრუნდეთ. ერთ კვეთში გადაცემული მღუნავი მომენტის გავლენა შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც ორი განივი ძალის გავლენის ზღვარი, როცა მათი მხარი  $\Delta \rightarrow 0$ , მაგრამ სამაგიეროდ P იზრდება ისე, რომ  $M = P\Delta = const$  (ნახ. 2.30).

ამგვარად, M არის ორი განივი ძალის მოქმედების ჯამური ეფექტი და, ცხადია, მხოლოდ მაშინ გამოიწვევს ღუნვას, როცა ორივე ძალა ღუნვის ცენტრშია მოღებული, წინააღმდეგ შემთხვევაში ღუნვასთან ერთად გრეხაც გაჩნდება. ეს გვიჩვენებს, რომ გრეხა შეიძლება გამოიწვიოს არა მარტო განივმა ძალამ, არამედ მღუნავმა წყვილძალამაც და ეს მაშინ მოხდება, როცა მისი სიბრტყე ღუნვის ცენტრების ღერძზე არ გადის. ასეთია დასმული საკითხის პასუხი.

შევნიშნოთ, რომ ზოგიერთ სახელმძღვანელოში და კვლევითი ხასიათის სტატიებშიც კი ვხვდებით მტკიცებას, რომ თითქოს ღუნვის ცენტრის ცნებას სუფთა ღუნვის შემთხვევაში აზრი არა აქვს. როგორც ზემოაღნიშნულიდან ჩანს, ასეთი მტკიცება საფუძველს მოკლებულია.

### 16. კოჭების კვეთის შერჩევა დასაშვები ტვირთების მეთოდით

სუფთა ღუნვა. დასაშვები ძაბვების მეთოდის მიხედვით კოჭის ზღვრულ



მდგომარეობად უნდა ჩავთვალოთ მდგომარეობა, როდესაც განაპირა ბოჭკოებში ძაბვა საშიშ მნიშვნელობას მიაღწევს: მყიფე მასალისათვის სიმტკიცის ზღვარს, პლასტიკურისთვის - დენადობას. ამ მდგომარეობის სათანადო მღუნავი მომენტები  $M_k$  და  $M_g$  - ით აღვნიშნოთ (ნახ. 2.31).

როგორც აღნიშნული იყო, ასეთი შეხედულება მყიფე მასალისათვის საფუძვლიანია, ვინაიდან ნაბზარის

გაჩენა მართლაც რღვევის დასაწყისს

ნახ. 2.31

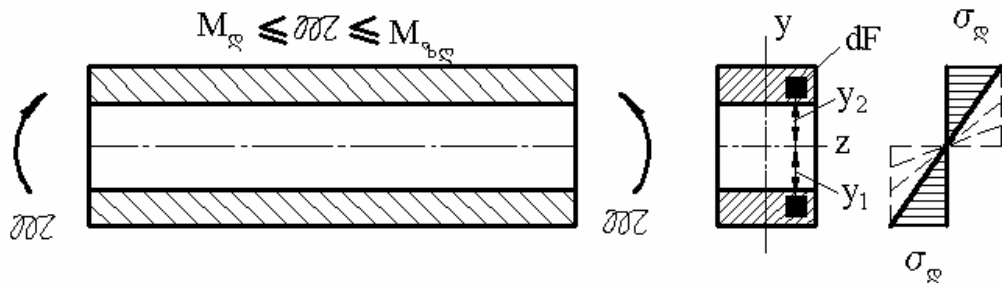


წარმოადგენს. პლასტიკურისთვის და დენადობის დაწყება განაპირა ბოჭკოში არაფრით საშიში არ არის: ტვირთის შემდგომი ზრდა კიდევ შესაძლებელია – ეს მოხდება შიგა ბოჭკოების ხარჯზე, რომლებიც ჯერ კიდევ დრეკადობის ფარგლებში მუშაობენ. მეორე მხრივ, კოჭის საერთო დეფორმაცია  $M_{\text{გ}}$  მომენტის დროს უმნიშვნელოა, რადგანაც ის შეზღუდულია შიგა ბოჭკოების დრეკადი დეფორმაციით.

$M_{\text{გ}}$  მომენტის ზევით, დრეკად-პლასტიკურ სტადიაში, დენადობა ძელის სიღრმეში გაიწვევს და ძაბვების ეპიურა ორი ტრაპეციის ფორმას მიიღებს\* (ნახ. 2.32). ბოლოს ზედა და ქვედა პლასტიკური ზონები ერთმანეთს შეუერთდება – ძაბვების ეპიურა ორ სწორკუთხედად გარდაიქმნება. ამით მიიღწევა ნამდვილი ზღვრული მდგომარეობა, როცა ტვირთის შემდგომი გაზრდა შეუძლებელი ხდება. ძელის სიმრუდე მკვეთრად გაიზრდება, რაც დაუშვებლად დიდ ჩაღუნვებს წარმოშობს.

ვიპოვოთ ნეიტრალური ღერძის მდებარეობა კვეთის ზღვრულ მდგომარეობაში. კვეთი ნეიტრალური ღერძის მიმართ არასიმეტრიული ვიგულისხმობ (ნახ. 2.33), ნორმალური ძაბვები წყვილძალას შეადგენენ, ამიტომ მათი ჯამი  $\int_F \sigma dF = 0$ . თუ გაჭიმული და შეკუმშული ზონების ფართობებს  $F_1$  და  $F_2$  - თი აღვნიშნავთ და მხედველობაში მივიღებთ თითოეულ მათგანში ძაბვების გათანაბრებას, გვექნება  $\sigma_{\text{გ}}(F_1 - F_2) = 0$ , საიდანაც  $F_1 = F_2$ . ამგვარად, ზღვრულ მდგომარეობაში ნეიტრალური ღერძი კვეთს შუაზე ყოფს.

ახლა მლუნავი მომენტის ზღვრული მნიშვნელობა



ნახ. 2.32

$$M_{\text{გ}} = \int_F \sigma y dF = \sigma_{\text{გ}} \int_{F_1} y dF + \sigma_{\text{გ}} \int_{F_2} y dF_1$$

ანუ

$$M_{\text{გ}} = \sigma_{\text{გ}} (S_1 + S_2) = \sigma_{\text{გ}} W_{\text{გ}} \quad (6)$$

აქ  $S_1$  და  $S_2$  გაჭიმული და შეკუმშული ზონების ფართობთა სტატიკური მომენტებია ნეიტრალური ღერძის მიმართ. მათი ჯამი აღნიშნულია  $W_{\text{გ}}$  - თი, რასაც კვეთის წინააღობის პლასტიკური მომენტი ეწოდება.

ნეიტრალური ღერძისადმი სიმეტრიული კვეთის შემთხვევაში (ნახ. 2.32) პლასტიკური დეფორმაციები კვეთის ორივე მხარეს ერთდროულად იწყება და

\* მასალა, როგორც გაჭიმვისა და გრეხის შემთხვევაში, იდეალურად დრეკად-პლასტიკური იგულისხმება.

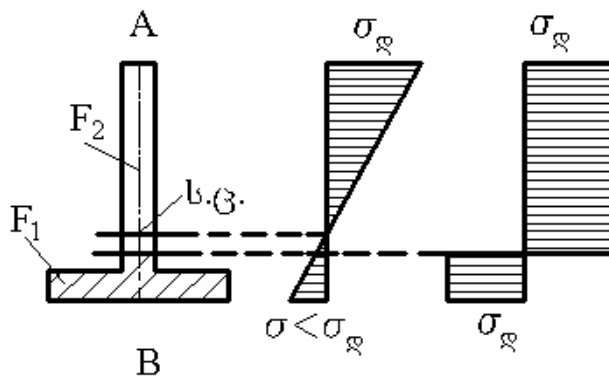
სიმეტრიულად იზრდება  $S_1 = S_2 = S$  და  $W_{\text{გ}} = 2S$ . ნეიტრალური ღერძი დრეკად სტადიაშივე კვეთის ფართობს შუაზე ყოფს და პლასტიკური ზონების გაფართოებისას უძრავია.

ნეიტრალური ღერძისადმი არასიმეტრიული კვეთის შემთხვევაში (ნახ. 2.33) დრეკადობის ფარგლებში  $F_1 \neq F_2$ . პირველად დენადობა ერთი მხრიდან  $-A$ -დან იწყება. დენადობის დაწყებისთანავე ნეიტრალური ღერძი კვეთის სიმძიმის ცენტრიდან დაიძვრება და  $B$  მხარეს გადაინაცვლებს იმდენად, რომ ზღვრულ მდგომარეობაში  $F_1$  და  $F_2$

ფართობები ტოლი აღმოჩნდება.

შენიშნოთ, რომ დენადობა ნამდვილად ძელის ღერძს ვერ მიაღწევს, ვინაიდან ძაბვების წყვეტა  $-\sigma_{\text{გ}}$  - დან  $+\sigma_{\text{გ}}$  - მდე დეფორმაციის წყვეტასაც გამოიწვევდა, სინამდვილეში პატარა დრეკადი გული ყოველთვის დარჩება, რომელიც აქ უკუგდებულა.

განხილული ორი მეთოდის ზღვრული მომენტების შეფარდება



ნახ. 2.33

$$k = \frac{M_{\text{ზღ}}}{M_{\text{გ}}} = \frac{W_{\text{გ}}}{W} > 1. \quad (7)$$

კვეთის საანგარიშო ტვირთმზიდაობა, მასალის პლასტიკური თვისების მხედველობაში მიღებით,  $k$  - ჯერ იზრდება. ადვილად შევამოწმებთ, რომ სწორკუთხოვანი კვეთისათვის  $k = 1,5$ , წრიულისათვის -  $1,7$ . სხვადასხვა ზომის გაგლინული ორტესებრი პროფილებისათვის  $k \approx 1,17$ . აღსანიშნავია, რომ რაც უფრო რაციონალურია კვეთი დრეკადი მუშაობის ზონაში, მით ნაკლებია  $k$  - ს მნიშვნელობა.

დასაშვები ტვირთების მეთოდით სიმტკიცის პირობა სუფთა ლუნვის შემთხვევაში იქნება

$$M \leq [M], \quad (8)$$

სადაც  $M$  არის მუშა მდგომარეობის მომენტი. დასაშვები მომენტი

$$[M] = \frac{M_{\text{ზღ}}}{[n]} = \frac{\sigma_{\text{გ}}}{[n]} kW. \quad (9)$$

თუ მარაგის კოეფიციენტს ორივე მეთოდში თანატოლს ავიღებთ, მაშინ  $\frac{\sigma_{\text{გ}}}{[n]} = [\sigma]$

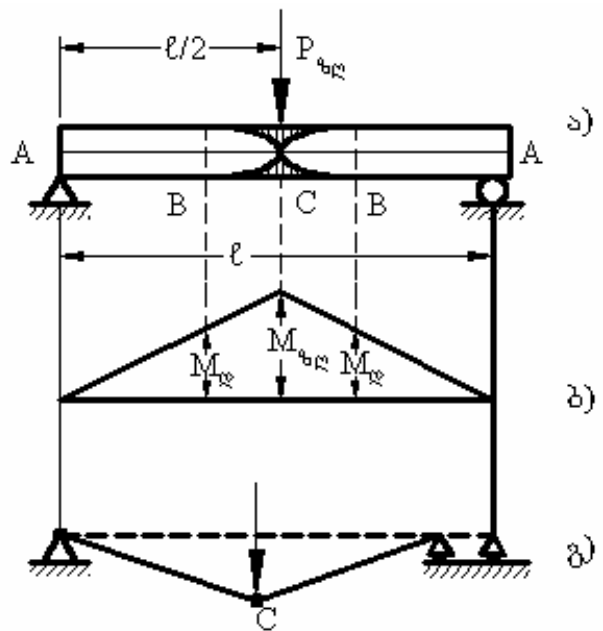
და კვეთის შესარჩევად გვექნება პირობა

$$W \geq \frac{M}{k[\sigma]}, \quad (10)$$

როგორც ჩანს, დასაშვები ტვირთების მეთოდით ვღებულობთ მასალის ეკონომიას - წინააღობის მომენტი  $k$  - ჯერ ნაკლები გამოდის პირველ მეთოდთან შედარებით.

**განივი ღუნვა.** ამ შემთხვევაში, თუ მხები ძაბვების გავლენას უკუვაგდებთ, მივიღებთ ისეთ სუფთა ღუნვის სურათს იმ განსხვავებით, რომ  $M$  - ის სიგრძეზე ცვლილების გამო სხვადასხვა კვეთი დეფორმაციის სხვადასხვა ფაზაში იქნება. მაგალითად, 2.34 ნახაზზე მოცემულ შემთხვევაში ღუნვა პირველად  $C$  კვეთში დაიწყება, სადაც მომენტი მაქსიმალურია, და ძალის ზრდისას როგორც სიღრმეში, ისე სიგრძეზე გაფართოვდება. ამ ნახაზზე ნაჩვენებია კოჭის ზღვრული მდგომარეობა, როცა პლასტიკური დეფორმაცია  $C$  კვეთში ძელის ღერძამდე გავრცელდა. მღუნავი მომენტი საყრდენებისკენ მცირდება.

შესაბამისად მცირდება პლასტიკური ზონის სიღრმეც და ბოლოს  $B$  კვეთებში ისპობა.  $AB$  უბანი სუფთა დრეკადია,  $BB$  კი დრეკა-პლასტიკური. ძლიანი ღუნვების გამო  $C$  კვეთში სიმრუდე შეუფერხებლად გაიზრდება და ძელის ორი ნახევარი ერთიმეორის მიმართ შემობრუნდება, თითქოს ისინი სახსრით იყოს შეერთებული.  $C$  კვეთში არსებულ ბმას პლასტიკური სახსარი ეწოდება. სახსრის გაჩენის შემდეგ ძელი ერთ ბმას კარგავს და გეომეტრიულად ცვლადი ხდება, რაც ზღვარს უდებს ძალის ზრდის შესაძლებლობას (ნახ. 2.34, გ).



ნახ. 2.34

ძალის ზღვრული მნიშვნელობის საპოვნელად მაქსიმალური გარე მომენტი მღუნავი მომენტის ზღვრულ მნიშვნელობას უნდა გავეუტოლოთ

$$\frac{P_{\text{ზღ}} l}{4} = k \sigma_{\text{ღ}} W,$$

საიდანაც

$$P_{\text{ზღ}} = 4k \frac{\sigma_{\text{ღ}} W}{l}.$$

**შენიშვნა.** სტატიკურად რკვევად კოჭს აქვს მხოლოდ გეომეტრიულად უცვლელობისთვის აუცილებელი ბმები, ამიტომ ერთი სახსრის გაჩენით – ერთი ბმის დაკარგვით ის უკვე ცვლადი ხდება.

# შედგები და მათი განსჯა

## თავი I

### შედგენილი კოჭების გაანგარიშების მეთოდი ე. ი. ბელენიას მიხედვით

#### 1.1 კოჭების სიმაღლე

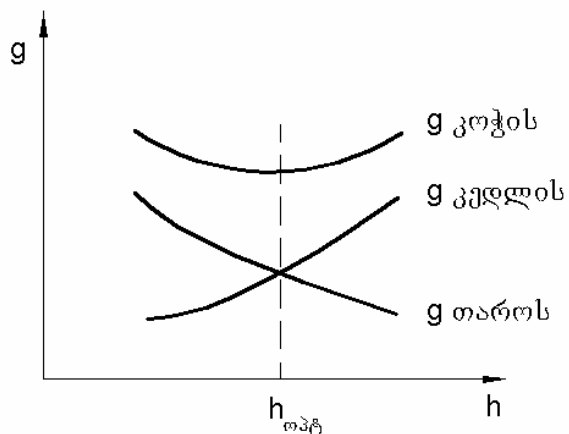
კოჭის სიმაღლე განისაზღვრება ეკონომიური მოსაზრებებით, კოჭის მაქსიმალურად დასაშვები ჩაზნექილობით და რიგ შემთხვევებში გადახურვის კონსტრუქციის სამშენებლო სიმაღლით, ანუ ფენილის წვერის და გადახურვის ქვეშ შენობის წვერის აღნიშვნების სხვაობით. ჩვეულებრივ, სამშენებლო სიმაღლე მოცემულია ტექნოლოგიების ან არქიტექტორების მიერ.

ყველაზე მეტი სიმაღლე  $h_{\text{კოჭ}}$  უმრავლეს შემთხვევაში ნაკარნახევია ეკონომიური მოსაზრებით.

კოჭის მასა შედგება მისი სარტყელის, კედლისა და კონსტრუქციული კოეფიციენტის მიერ გათვალისწინებული ზოგიერთი კონსტრუქციული ელემენტის მასისაგან. ამასთან, კოჭის სიმაღლის ზრდასთან ერთად მცირდება სარტყელის მასა, ხოლო კედლის მასა იზრდება. (ნახ. 3.1).

რამდენადაც კედლისა და სარტყელის მასის ფუნქციები კოჭის სიმაღლის ცვლილებით იცვლება არაერთგვაროვნად ერთი მატულობს, მეორე კლებულობს (როგორც ეს ჩანს ნახ. 3.1), უნდა არსებობდეს ორივე ფუნქციის ჯამის ყველაზე ნაკლები მნიშვნელობა, ანუ სიმაღლე, რომლის დროსაც კედლისა და სარტყელის ჯამური წონა იქნება ნაკლები. ამ

სიმაღლეს ეწოდება ოპტიმალური  $h_{\text{კოჭ}}$ , რამდენადაც ის განსაზღვრავს კოჭზე მასალის ყველაზე ნაკლებ ხარჯს. კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრა შეიძლება შემდეგი სახით.



ნახ. 3.1 კოჭის მასის კვეთის სიმაღლეზე დამოკიდებულების გრაფიკი

1 მ სიგრძის კოჭის სრული მასა უდრის სარტყელებისა და კედლის სრულ

$$\text{მასას } g_{\text{კოჭ.}} = g_{\text{სარტ.}} + g_{\text{კედ.}} = 2 \frac{cM}{hR} \psi_{\text{სარტ.}} \rho + ht_{\text{კედ.}} \psi_{\text{კედ.}} \rho,$$

სადაც  $c$  - მომენტის ნაწილია, რომელიც აღიქმება კოჭის სარტყელებით;  $M$  - კოჭზე მოქმედი საანგარიშო მომენტი;  $R$  - კოჭის მასალის საანგარიშო წინაღობა;  $h$  - კოჭის სიმაღლე;  $t_{\text{კედ.}}$  - კოჭის კედლის სისქე;  $\psi_{\text{სარტ.}}$  - სარტყელთა კონსტრუქციული კოეფიციენტი (სარტყელის თეორიული ფართობიდან ნამდვილზე გადასვლის კოეფიციენტი);  $\psi_{\text{კედ.}}$  - კედლის კონსტრუქციული კოეფიციენტი;  $\rho$  - ლითონის სიმკვრივე.

კოჭის მასის მინიმუმის განსაზღვრისას ვიღებთ წარმოებულს კოჭის მასის გამოსახულებიდან მისი სიმაღლის მიხედვით და მას ვუტოლებთ ნულს:

$$\frac{dg_{\text{კოჭ.}}}{dh} = -\frac{2cM}{h^2 R} \psi_{\text{სარტ.}} \rho + t_{\text{კედ.}} \psi_{\text{კედ.}} \rho = 0,$$

აქედან  $M/R$  შეცვლისას, ვიღებთ

$$h_{\text{კოჭ.}} = \sqrt{2c \psi_{\text{სარტ.}} / \psi_{\text{კედ.}} \sqrt{W/t_{\text{კედ.}}}} = k \sqrt{W/t_{\text{კედ.}}}. \quad (3. 1)$$

$k$  კოეფიციენტი დამოკიდებულია კოჭის კონსტრუქციულ გაფორმებაზე – სარტყელებისა და კედლის კონსტრუქციულ ელემენტებზე. მოქლონური ღიობებით კვეთის შესუსტების გამო ეს კოეფიციენტები მოქლონილი კოჭებისათვის უფრო მეტია, შედუღებულებისთვის - ნაკლები. ეს კოეფიციენტი სიგრძეში ცვლადი კვეთის კოჭებში უფრო ნაკლებია, ვიდრე მუდმივი კვეთის კოჭებში, რამდენადაც ის წარმოადგენს საშუალო კოეფიციენტს, რომელიც განეკუთვნება კოჭის ყველაზე დაძაბულ კვეთს. შედუღებული კოჭებისთვის კოეფიციენტის სიდიდედ ავიღოთ 1,2,.....1,15 ტოლად, მოქლონილისთვის – 1,25.....1,2.

მოყვანილი დასკვნა არ წარმოადგენს მკაცრს, რამდენადაც ის არ ითვალისწინებს თანაფარდობის ცვლილებებს კედლის სისქესა და სიმაღლეს შორის სხვადასხვა სიმაღლის კოჭებში და, მაშასადამე, კოჭის სარტყელებსა და კედელს შორის მომენტის განაწილების  $c$  კოეფიციენტის ცვლილებებსაც.

(3.1) ფორმულიდან ცხადია, რომ თანაფარდობა კოჭის სიმაღლესა და კედლის სისქეს შორის დიდ გავლენას ახდენს კვეთის ეკონომიურობაზე; ამასთან, რაც უფრო თხელია კედელი, მით მეტია სიმაღლე და ხელსაყრელია კოჭის კვეთი.

კ. კ. მუხანოვმა გამოიყენა კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის კედლის მოცემულ მოქნილობაზე დამოკიდებულება 
$$h_{\text{კოჭ.}} = \sqrt[3]{3\lambda_{\text{კედ.}} W / 2} \quad , \quad (3.2)$$

სადაც  $\lambda_{\text{კედ.}} = h_{\text{კედ.}} / t_{\text{კედ.}}$  კედლის მოქნილობაა.

ც ხ რ ი ლ ი 3.1.

რეკომენდებული შეფარდება  $h_{\text{კოჭ.}}$  კოჭის სიმაღლის  $t_{\text{კედ.}}$  კედლის სისქესთან

$h_{\text{კოჭ.}}, \text{ მ}$	1	1,5	2	3	4	5
$t_{\text{კედ.}}, \text{ მმ}$	8-10	10-12	12-14	16-18	20-22	22-24
$h_{\text{კოჭ.}} / t_{\text{კედ.}}$	100-125	125-150	145-165	165-185	185-200	210-230

შენიშვნა: მაღალი სიმკვრივის ფოლადის კოჭებისთვის მახასიათებელი უმცირესი მნიშვნელობები  $h_{\text{კოჭ.}} / t_{\text{კედ.}}$  დროს.

თუმცა, კედლის მოქნილობის პრაქტიკული მნიშვნელობა შემოიფარგლება მისი სიხისტისა და სიმტკიცის უზრუნველყოფის აუცილებლობით მხები ძაბვების მოქმედებაზე.

დაპროექტების პრაქტიკით დადგინდა (ცხრ. 3. 1) მოყვანილი კედლის სისქისა და კოჭის სიმაღლის რეკომენდებული თანაფარდობები. ერთგანიანი კოჭებისათვის 12-16 მ განით ხშირად იღებენ  $t_{\text{კედ.}} = 10-12 \text{ მმ}$ .

კოჭის მიღებული ოპტიმალური სიმაღლე წარმოადგენს ყველაზე რაციონალურს, რამდენადაც  $h_{\text{კოჭ.}}$ -გან სიმაღლის დაშორება გამოიწვევს კოჭზე მასალის გახარჯვის ზრდას.

შეიძლება აღინიშნოს, რომ კედლის მასა ოპტიმალური სიმაღლის კოჭებში უდრის კოჭის სარტყელების მასას. კოჭის სიმაღლის არჩევისას უნდა გვახსოვდეს, რომ კოჭის მასის ფუნქცია  $h_{\text{კოჭ.}}$  განმსაზღვრელი მინიმუმის არეში იცვლება

ნაკლებად, ამიტომაც შესაძლებელია  $h_{\text{კაჭ.}}$  - გან გადახრები. ოპტიმალურისაგან ნამდვილი სიმაღლის 20%-ით გადახრა იწვევს კოჭის მასის ცვლილებას დაახლოებით 4%-ით (ნახ. 3.1).

კოჭის ყველაზე დაბალი რეკომენდებული სიმაღლე  $h_{\text{min}}$  განისაზღვრება კოჭის სიხისტით – მისი ზღვრული ჩაღუნვით (მეორე ზღვრული მდგომარეობა).

კოჭის მინიმალური სიმაღლის მიღება შეიძლება ჩაღუნვის ისრის ფორმულიდან. კოჭის სიგრძეზე თანაბრად განაწილებული დატვირთვისათვის

$$f = 5(p^{\delta} + g^{\delta})l^4 / 384EI \quad ,$$

სადაც  $p^{\delta}$  და  $g^{\delta}$  - დროებითი (საჭიროების შემთხვევაში დინამიკური კოეფიციენტის გათვალისწინებით) და მუდმივი ნორმატიული დატვირთვებია კოჭის სიგრძის ერთეულზე (გადატვირთვის კოეფიციენტის გარეშე);  $l$  - კოჭის მალი;  $EI$  - კოჭის სიხისტე ჩაღუნვაზე.

ჩაღუნვის ისრის ფორმულაში  $M = (p^{\delta} + g^{\delta})l^2 / 8$  ჩასმით, ვიღებთ  $f = 5Ml^2 / 48EI$ . სადაც  $\sigma_{(p+g)}$  არის დაბვა  $p^{\delta} + g^{\delta}$  დატვირთვებისაგან.

გათვალისწინებულია ასევე, რომ  $M = W\sigma(p + g)$  და  $I = W(h/2)$ ,  $f$  - ის ფორმულაში ჩასმის შემდეგ ვიღებთ

$$f = 5\sigma_{(p+g)}l^2 / 24Eh \quad \text{ან} \quad h = \frac{5}{24} \frac{\sigma_{(p+g)}l}{E} \left( \frac{l}{f} \right)$$

ძალების მოქმედების დამოუკიდებლობის კანონით სარგებლობისას ვიღებთ დაბვას ნორმატიული დატვირთვებისაგან

$$\sigma_{(p+g)} = R \frac{p^{\delta} + g^{\delta}}{\Pi_p p^{\delta} + \Pi_g g^{\delta}} \quad ,$$

სადაც  $R$  - კოჭის მასალის საანგარიშო წინაღობაა;  $\Pi_p$  და  $\Pi_g$  - გადატვირთვების შესაბამისი კოეფიციენტები.

კოჭების ჩაღუნვის ისრის ფარდობა მის მაღთან  $[f/l]$  რეკლამენტირებულია ნორმებით კოჭის დანიშნულების მიხედვით. ამის გამოყენებით თანაბრად დატვირთულ სიგრძეზე კოჭისთვის ვიღებთ,

$$h_{\text{მბ.}} = \frac{5}{24} \frac{Rl}{E} \left[ \frac{l}{f} \right] \frac{P^{\delta} + g^{\delta}}{n_p P^{\delta} + n_g g^{\delta}} \quad (3.3)$$

კოჭებისთვის, რომლებიც იყენებენ მასალის დრეკად-პლასტიკურ მუშაობას, მინიმალური სიმაღლე იქნება

$$h_{\text{მბ.}} = \frac{5}{24} \frac{c_1 Rl}{E} \left[ \frac{l}{f} \right] \frac{P^{\delta} + g^{\delta}}{n_p P^{\delta} + n_g g^{\delta}} \quad (3.4)$$

მოცემულ შემთხვევაში მასალის მოქნილი მუშაობისათვის გამოყვანილი ჩალუნვის ისრის ფორმულის გამოყენება შესაძლებელია, რამდენადაც ჩალუნვა განისაზღვრება ნორმატიული დატვირთვისაგან, ხოლო კოჭის კვეთი ირჩევა საანგარიშო დატვირთვის მოქმედებისაგან, ამასთან, გადატვირთვის კოეფიციენტი  $n$  ყოველთვის მეტია მასალის დრეკად-პლასტიკური მუშაობის გათვალისწინების კოეფიციენტზე ( $c_1$ ) და, მაშასადამე, კოჭის მასალა ნორმალური ექსპლუატაციის დროს ყოველთვის მუშაობს მოქნილად.

კოჭის მინიმალური სიმაღლე უზრუნველყოფს აუცილებელ სიხესტეს მასალის მზიდი უნარის სრული გამოყენებისას.

კოჭზე დატვირთვის სხვა სახეების დროს  $h_{\text{მბ.}}$  შეიძლება მიახლოებით განისაზღვროს (3.3) ფორმულით.

(3.3) ფორმულიდან ჩანს, რომ კოჭის საჭირო სიმაღლე იზრდება მასალის სიხისტის ზრდასთან და დასაშვები ჩალუნვის შემცირებასთან ერთად.

თუ (3.3) ფორმულის მიხედვით მიღებული კოჭის სიმაღლე რაიმე მოსაზრებით არ შეიძლება იქნეს მიღებული, ჩალუნვის საჭირო ნორმა შეიძლება დაკმაყოფილდეს მხოლოდ მასალის საანგარიშო წინაღობის შემცირებისას, ვიღებთ რა ნაკლებად მდგრად მასალას ან არასრულად ვიყენებთ რა მის მზიდ უნარს.

*კოჭის სიმაღლის არჩევა.* კოჭის სიმაღლის ცვლილების კანონზომიერებები გვიჩვენებს, რომ ყველაზე მიზანშეწონილია კოჭის სიმაღლე ავიღოთ  $h_{\text{კაჭ.}}$  მიახლოებად, რაც განსაზღვრულია ეკონომიური მოსაზრებებით და არანაკლებ  $h_{\text{მბ.}}$ , რომელიც დადგენილია კოჭის (დასაშვები ჩალუნვის) სიხისტის პირობიდან გამომდინარე. ბუნებრივია, რომ ყველა შემთხვევაში კოჭის მიღებული სიმაღლე ფენილის სისქესთან ჯამში არ უნდა აღემატებოდეს გადახურვის მოცემულ სამშენებლო სიმაღლეს. კოჭის სიმაღლე უნდა შევათავსოთ ასევე სორტამენტზე ფურცლების სიგანის ზომებს. სასურველია, რომ სიმაღლეში კედელი შესრულდეს



ერთი ფურცლისაგან არაუმეტეს 2000-2200 მმ სიგანით. თუ საჭიროა მეტი სიმაღლის კედელი, უნდა გავართულოთ კოჭის კონსტრუქცია კედლის გრძივი პირაპირის მოწყობილობით. ყველა შემთხვევაში, შედგენილი კოჭის სიმაღლე კონსტრუქციების უნიფიკაციის მიზნით რაციონალურად უნდა ავიღოთ მრგვალ რიცხვებში, რომელიც 100 მმ ჯერადია.

## 1.2 კედლის სისქე

კოჭის სიმაღლის შემდეგ კედლის სისქე წარმოადგენს კვეთის მეორე ძირითად პარამეტრს, რამდენადაც ის ძლიერ გავლენას ახდენს შედგენილი კოჭის კვეთის ეკონომიურობაზე.

კედლის ყველაზე ნაკლები სისქის განსაზღვრისათვის მისი მუშაობის პირობებიდან მხებ დაბევებზე შეიძლება ვისარგებლოთ ნ. გ. ჟურავსკის ფორმულით

$$\tau = QS / It_{\text{კედ.}} < R_{\text{ჭრაზე}} \gamma \quad ,$$

სადაც  $Q$  მაქსიმალური განივი ძალაა;  $S$  - კოჭის ნახევარკვეთის სტატისტიკური მომენტი ნეიტრალურ ღერძთან მიმართებაში;  $I$  - კოჭის კვეთის ინერციის მომენტი;  $t_{\text{კედ.}}$  - კედლის სისქე;  $R_{\text{ჭრაზე}}$  - კედლის მასალის საანგარიშო წინაღობა კვეთზე.

ოპტიმალური კვეთის კოჭში, რომლის სარტყელის ფართობი უდრის კედლის ფართობს, შიდა წყვილის მხარი შეადგენს  $I/S \approx 0,85h$ . ამ  $I/S$  თანაფარდობის ჩასმით ნ. გ. ჟურავსკის ფორმულაში და გარდაქმნის მეშვეობით ვიღებთ

$$t_{\text{კედ.}} = QS / IR_{\text{ჭრაზე}} \approx 1,2 Q / hR_{\text{ჭრაზე}} \quad (3.5)$$

კოჭის ტორსზე მიღულებული საყრდენი წიბოს მეშვეობით ჭრილი შენადული კოჭის დაყრდნობისას შეიძლება ჩაითვალოს, რომ კოჭის საყრდენ კვეთზე მხებ დაბევაზე მუშაობს მხოლოდ კედელი, ხოლო სარტყელები ჯერაც არაა ჩართული კოჭის კვეთის მუშაობაში. მაშინ შიდა წყვილის მხარი

$$\frac{I}{S} = \frac{t_{\text{კედ.}} h^3}{12} \frac{8}{t_{\text{კედ.}} h^2} = \frac{2}{3} h \quad .$$

ამ შემთხვევაში კედლის სისქე

$$t_{\text{კედ.}} = \frac{QS}{IR_{\text{ჭრაზე}}} = \frac{3}{2} \frac{Q}{hR_{\text{ჭრაზე}}} \quad (3.6)$$

სიმეტრიული კვეთის კოჭებში, რომლებიც მუშაობს პლასტიკური დეფორმაციების განვითარების გათვალისწინებით და არ არის დატვირთული ადგილობრივი დატვირთვით,  $\sigma_{\text{ავგ.}} = 0$ ; პირობების  $\tau \leq 0,9R_{\text{ჭრაზე}}$ ;  $A_{\text{სარტ.}}/t_{\text{კელ.}} \geq 0,25$  და  $2,2 < \lambda_{\text{კელ.}} \leq 6$  შესრულებისას საჭიროა შემოწმდეს კოჭის მზიდი უნარი კედლის მდგრადობის შესაძლო დანაკარგის გამო, რომელიც მუშაობს პლასტიკური დეფორმაციების გათვალისწინებით, ფორმულის მიხედვით

$$M \leq R\gamma h_0^2 t_{\text{კელ.}} \left( A_{\text{სარტ.}}/A_{\text{კელ.}} + \alpha \right), \quad (3.7)$$

სადაც  $\alpha = 0,24 - 0,15 \left( \tau/R_{\text{ჭრაზე}} \right)^2 - 8,5 \cdot 10^{-3} (\bar{\lambda} - 2,2)^2$ ;  $\tau = Q/h_{\text{კელ.}}$   $t_{\text{კელ.}}$  -კედელში საშუალო მხებითი ძაბვა კოჭის შემოწმების ადგილას;  $\gamma$ -კონსტრუქციის მუშაობის პირობების კოეფიციენტი.

კედლის ადგილობრივი მდგრადობის უზრუნველსაყოფად, მისი გრძივი წიბოთი დამატებითი გამაგრების გარეშე, საჭიროა  $\bar{\lambda}_{\text{კელ.}} < 5,5$  არსებობა, მაშინ

$$t_{\text{კელ.}} \geq \left( h_{\text{კელ.}} \sqrt{R/E} \right) / 5,5 \quad (3.8)$$

2 მ-ზე მაღალი სიმაღლის კოჭებში კონსტრუქციული ფორმის ეს გამარტივება ეკონომიურად არაა გამართლებული, რამდენადაც კედლები საკმაოდ სქელი ხდება, მაღალ კოჭებში კედლის სისქე არის ნაკლები და აღწევს 1/200-1/250 სიმაღლეს, რაც მოითხოვს კედლის გამაგრებას, რომელსაც შეუძლია მისი მდგრადობის უზრუნველყოფა.

ამგვარად, კედლის სისქის განსაზღვრის ამოცანა ვარიანტულია, რომელიც გავლენას ახდენს კოჭის კვეთის ეკონომიურობაზე და მოითხოვს ძალიან ფრთხილ დამოკიდებულებას.

1-2 მ სიმაღლის კოჭებისთვის კედლის სისქის რაციონალური მნიშვნელობა შეიძლება განისაზღვროს ემპირიული ფორმულით

$$t_{\text{კელ.}} = 7 + 3h/1000 \text{ მმ} \quad (3.9)$$

კედლის სისქე უნდა იყოს შეთავსებული ფურცლოვანი ფოლადის გლინვის არსებულ სისქესთან. ჩვეულებრივ, კედლის მინიმალური სისქე არანაკლებ 8 მმ -ია (ძალიან იშვიათად 6 მმ) და 12 მმ –მდე სისქის დროს 1 მმ ჯერადს იყენებენ, 12 მმ მეტის დროს კი, 2 მმ ჯერადს. თუ (3.1) ფორმულის მიხედვით მიღებული კედლის სისქე განსხვავდება (3.6) ან (3.5) ფორმულით მიღებულისაგან 2 მმ და

მეტით, (3.1) ფორმულაში უნდა ჩავსვათ ჭრის პირობიდან განსაზღვრული კედლის სისქე და კვლავ გამოვიანგარიშოთ  $h_{\text{ობტ.}}$ .

სარტყელოვანი შეერთებების მქონე კოჭების სარტყელოვანი კუთხეები მოქლონვაზე და მყარ ჭანჭიკებზე

ასეთი კოჭების სარტყელის შემადგენლობაში შედის სარტყელოვანი კუთხეები, რომლებიც ჩვეულებრივ თანაბართარიანიანია. კუთხეების კალიბრი (მათი თაროების სიგანე  $b_{\text{კუთ.}}$ ) დგინდება კოჭის სიმძლავრის და მასზე დატვირთვის გადაცემის ხერხის მიხედვით.

1-2 მ საშუალო სიმაღლის კოჭებისთვის

$$b_{\text{კუთ.}} \approx (1/10)h .$$

სარტყელოვანი კუთხეების სისქე უნდა ავიღოთ  $t_{\text{კუთ.}} = t_{\text{კვლ.}}$  კედლის სისქის ტოლად, რამდენადაც ეს ამარტივებს სამონტაჟო პირაპირების მოწყობას.

კოჭის კვეთის შემადგენლობაში ჰორიზონტალური ფურცლების არსებობისას საჭიროა, რომ სარტყელის კუთხეებმა უზრუნველყოს კედელზე სარტყელის ძალის საიმედო გადაცემა. ამისათვის, სარტყელის ორი კუთხის კვეთის ფართობი არ უნდა იყოს სარტყელის კვეთის მთელი ფართობის არანაკლებ 30%.

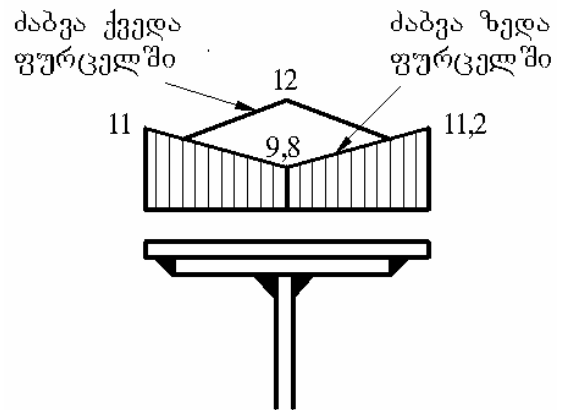
### 1.3 სარტყელების ჰორიზონტალური ფურცლები

შედულებულ კოჭებში სარტყელებს ჩვეულებრივ იღებენ უნივერსალური ფოლადის ცალკეული ფურცლებისაგან. ორი ან მეტი ფურცლისგან სარტყელის დამზადება შედულებულ კოჭებში არარაციონალურია, რამდენადაც ჩვენ ვზრდით ფურცლების მუშაობის არათანაბარზომიერებას კედლიდან გარე ფურცლებისაკენ ძალის გადაცემის სიგრძის ზრდის გამო (ნახ. 3.2). ამასთან, მკვეთრად იზრდება შედულებული ნაწიბურების რიცხვიც. გარდა ამისა, გარდაუვალია ნაპრალების წარმოქმნა მხოლოდ კიდეებზე შესადულებელ ფურცლებს შორის.

შედულებული კოჭის ჰორიზონტალური სარტყელის ფურცლის სისქედ ჩვეულებრივ იღებენ კედლის არაუმეტეს 2-3 სისქეს, რამდენადაც სარტყელის ნაწიბურებში, კედელთან სქელი სარტყელის ფურცლების შედულებისას ვითარდება

მნიშვნელოვანი შეკლების გამჭიმავი დაძაბულობა. 30 მმ –ზე უფრო სქელი სარტყელის ფურცლების გამოყენება არარაციონალურია იმიტომაც, რომ სქელ ფურცლებს გააჩნიათ დენადობის ზღვარის შემცირებული მნიშვნელობები და, მაშასადამე, შემცირებული საანგარიშო წინაღობა.

მოქლონილ კოჭებსა და მალალი სიმტკიცის ჭანჭიკებზე შემდგარ კოჭებში შენადულისგან განსხვავებით ხშირად გამოიყენება პაკეტები ორი-სამი ჰორიზონტალური ფურცლისგან, რამდენადაც მრავალფურცლიან



პაკეტებში, რომელიც გაჭიმულია მთელს სიგანეზე ქლონიტა ან ჭანჭიკებით, ფურცლები მუშაობს

ნახ. 3.2 დაბვის განაწილება შედულებული კოჭის პაკეტის ფურცლებში

საკმაოდ შერწყმულად. ცალკეული ჰორიზონტალური ფურცლების სისქეს, სამონტაჟო პირაპირას კონსტრუირების მოხერხებულობის პირობიდან გამომდინარე, ჩვეულებრივ იღებენ სარტყელის კუთხეების სისქის ტოლად.

ჰორიზონტალური ფურცლების სიგანე ჩვეულებრივ არის კოჭის  $1/2 - 1/5$  სიმაღლის ტოლი, მისი ზოგადი სიმყარის უზრუნველყოფის პირობიდან გამომდინარე.

კონსტრუქციული მოსაზრებებით სარტყელის სიგანე არ უნდა იყოს 180 მმ ნაკლები ან  $h/10$ . მოქლონილი კოჭებისათვის ან ჭანჭიკებზე კოჭებისთვის ასევე სასურველია, რომ ჰორიზონტალური ფურცლები რამდენადაც სცდებოდეს სარტყელის კუთხეების გარე საზღვრებს

$$b_{\text{ჰორ.ფურ.}} \geq t_{\text{კელ.}} + 2b_{\text{კუთ.}} + 10 \text{ მმ}$$

ჰორიზონტალური ფურცლების ყველაზე მეტი სიგანე განისაზღვრება მათი ადგილობრივი მდგრადობისა და სიგანეზე თანაბარი მუშაობით.

კოჭებში შეკრული სარტყელის შვერილის განის  $b_{\text{შვერილი}}$  თანაფარდობა  $t_{\text{სარტ.}}$  მის სისქესთან არ უნდა აღემატებოდეს:

მოქნილად მოქმედ კვეთში

$$b_{შეერილი}/t_{სარტ.} \leq 0.5\sqrt{E/R} \quad (3.10)$$

პლასტიკური დეფორმაციების განვითარების გათვალისწინებით მომუშავე კვეთში

$$b_{შეერილი}/t_{სარტ.} < 0.11h_0/t_{კვლ.}, \quad \text{მაგრამ არაუმეტეს } 0.5\sqrt{E/R}, \quad (3.11)$$

სადაც  $h_0$  კოჭის საანგარიშო სიმაღლეა;  $t_{კვლ.}$  - კოჭის კედლის სისქე.

კოჭების გაჭიმული სარტყელისთვის რეკომენდებული არაა სარტყელის სიგანე აღემატებოდეს სარტყელის 30 სისქეს, ზოლის სიგანეზე ძაბვის თანაბარი განაწილების პირობიდან გამომდინარე.

#### 1.4 კოჭების კვეთის შერჩევა

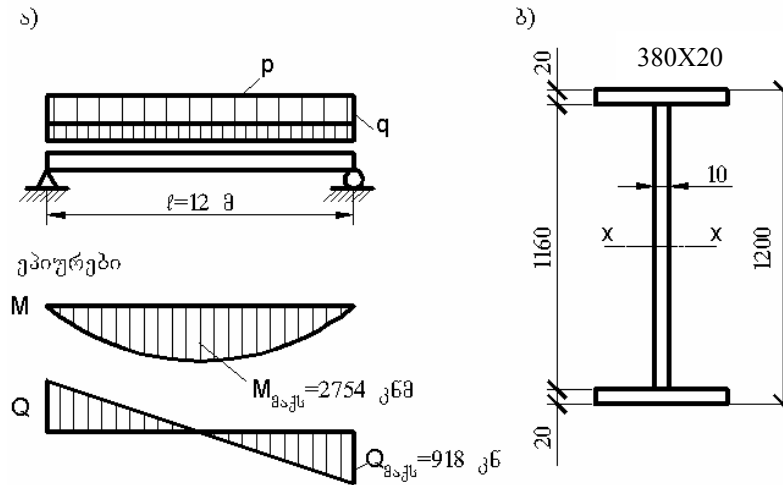
კვეთის შერჩევა მდგომარეობს კოჭის კედლისა და სარტყელის ზომის განსაზღვრაში, პირობების ტექნოლოგიური მოცემულობიდან, ეკონომიურობიდან, სიხისტიდან, დამზადების მდგრადობის და ტექნოლოგიურობიდან გამომდინარე.

მაგალითი 1. საჭიროა შედუღებული მთავარი კოჭის კვეთის შერჩევა, რომლის ჩალუნვის ისარი  $f < (1/400)l$ , სისქე  $t \leq 20 \text{ მმ}$ ,  $R = 230 \text{ Mna} = 23 \text{ კნ/სმ}^2$  და  $R_{ჭრაზე} = 135 \text{ Mna} = 13,5 \text{ კნ/სმ}^2$ , ფენილის წონა და ფენილის კოჭის  $g_1 = 1,023 \text{ კნ/ძ}^2$ . კოჭის წონას საორიენტაციოდ ვიღებთ მასზე დატვირთვისაგან 1-2% ფარგლებში. გადახურვის მაქსიმალურად შესაძლებელი სამშენებლო სიმაღლეა 1,6 მ.

კოჭის საანგარიშო სქემა მოყვანილია (ნახ. 3.3ა) განვსაზღვროთ კოჭზე ნორმატიული და საანგარიშო დატვირთვები:

$$q^{\delta} = p^{\delta} + g^{\delta} = 1,02(20 + 1,023)6 = 128,6 \text{ კნ/ძ}$$

$$q = n_p p^{\delta} + n_g g^{\delta} = 1,02(1,2 \cdot 20 + 1,05 \cdot 1,023)6 = 153 \text{ კნ/ძ}$$



ნახ. 3.3. მაგალითისთვის 1.

ა) საანგარიშო სქემა; ბ) კოჭის კვეთი

განვსაზღვრავთ საანგარიშო მღუნავ მომენტს მალის შუაში

$$M = ql^2/8 = 153 \cdot 12^2/8 = 2754 \text{ კნ.მ} = 275 \text{ 400 კნ.სმ}$$

განივ ძალას საყრდენზე

$$Q = ql/2 = 153 \cdot 12/2 = 918 \text{ კნ.}$$

მთავარ კოჭს განვსაზღვრავთ პლასტიკური დეფორმაციების განვითარების გათვალისწინებით.  $W_{ნეტო} = M_{მ.წ.}/c_1 R \gamma$  ფორმულის მიხედვით განვსაზღვრავთ

კოჭის წინაღობის საჭირო მომენტს, თავდაპირველად ვიღებთ რა  $c_1 = c = 1,1$  :

$$W_{საჭირო} = M_{მ.წ.}/c_1 R \gamma = 275 \text{ 400}/1,1 \cdot 23 \cdot 1 = 10 \text{ 885 სმ}^3$$

განვსაზღვრავთ კოჭის ოპტიმალურ სიმაღლეს (3.1) ფორმულის მიხედვით, წინასწარ ვაძლევთ რა მას სიმაღლეს  $h \approx (1/10)l \approx 1,2 \text{ მ}$  და (3.9) ფორმულით კედლის სისქის გაანგარიშებით  $t_{კედ.} = 7 + 3 \cdot 1200/1000 = 10,6$ . კედლის სისქედ ვიღებთ 10 მმ.

$$h_{ოპტ.} = k \sqrt{W/t_{კედ.}} = 1,15 \sqrt{10 \text{ 885}/1} = 120 \text{ სმ}$$

კედლის მიღებული სისქე და სიმაღლე არის (ცხრ. 3. 1) რეკომენდებული მნიშვნელობების ფარგლებში.

მინიმალურ სიმაღლეს განვსაზღვრავთ (3.4) ფორმულით

$$h_{\text{კოჭ.}} = \frac{5}{24} \frac{c_1 R l}{E} \left[ \frac{l}{f} \right] \frac{P^6 + g^6}{n_p P^6 + n_g g^6} = \frac{5 \cdot 1,1 \cdot 23 \cdot 1200 \cdot 400}{24 \cdot 2,06 \cdot 10^4} \cdot \frac{128,6}{153} = 103,2 \text{ სმ.}$$

კოჭის სამშენებლო სიმაღლეს განვსაზღვრავთ გადახურვის და მისი კონსტრუქციის შესაძლო მაქსიმალური სიმაღლიდან გამომდინარე.

$$h_{\text{კოჭ.}}^{\text{სამშ.}} = h_{\text{გაღ.}}^{\text{სამშ.}} - h_{\text{ფენ. კოჭ.}} - t_{\text{ფენ. კოჭ.}} = 160 - 30 - 0,8 = 129,2 \text{ სმ.}$$

მიღებული სიმაღლის შედარებისას ვიღებთ კოჭის სიმაღლეს, რომელიც ახლოსაა ოპტიმალურთან  $h = 120 \text{ სმ.}$

ვამოწმებთ კედლის მიღებულ სისქეს:

(3.9) ემპირიული ფორმულით

$$t_{\text{კედ.}} = 7 + 3h/1000 = 7 + 3 \cdot 1200/1000 = 10,6 \text{ მმ};$$

(3.6) ფორმულის მიხედვით, საყრდენზე მხებდაბევებზე კედლის მუშაობის პირობიდან გამომდინარე

$$t_{\text{კედ.}} = \frac{3 Q_{\text{მაქს.}}}{2 h_{\text{ჭრაზე}}} = \frac{3 \cdot 918}{2 \cdot 120 \cdot 13,5} = 0,85,$$

სადაც  $R_{\text{ჭრაზე}} = 13,5 \text{ კნ./სმ}^2$ .

სიხისტის გრძივი წიბოების გამოყენებისთვის (3.8) ფორმულის მიხედვით

$$t_{\text{კედ.}} = \left( h \sqrt{R/E} \right) / 5,5 = \left( 120 \sqrt{23/2,06 \cdot 10^4} \right) / 5,5 = 0,73 \text{ სმ.}$$

განგარიშების გზით მიღებული კედლის სისქის მიღებულთან (10 მმ) შედარებისას მივიღებთ დასკვნამდე, რომ ის აკმაყოფილებს სიმტკიცის პირობას მხები დაბევების მოქმედებაზე და არ მოითხოვს მის გამაგრებას სიხისტის გრძივი წიბოთი ადგილობრივი მდგრადობის უზრუნველსაყოფად. ჰორიზონტალური სარტყელის ფურცლების ზომებს ვლევულობთ კოჭის საჭირო მზიდი უნარიდან გამომდინარე. ამისათვის განგარიშობთ კოჭის კვეთის ინერციის საჭირო მომენტს

$$I = Wh/2 = 10885 \cdot 120/2 = 653100 \text{ სმ}^4.$$

ვპოულობთ კოჭის კედლის ინერციის მომენტს, სარტყელის სისქედ 2 სმ ალებისას:

$$h_{\text{კედ.}} = h - 2t_{\text{სარტ.}} = 120 - 2 \cdot 2 = 116 \text{ სმ};$$

$$I_{\text{კედ.}} = t_{\text{კედ.}} h_{\text{კედ.}}^3 / 12 = 1 \cdot 116^3 / 12 = 130074 \text{ სმ}^4.$$

ინერციის მომენტი, რომელიც მოდის სარტყელის ფურცლებზე

$$I_{\text{სარტყ.}} = I - I_{\text{კედ.}} = 653100 - 130074 = 523026 \text{ სმ}^4.$$

კოჭის სარტყელის ფურცლების ინერციის მომენტი მის ნეიტრალურ ღერძთან მიმართებაში  $I_{\text{სარტყ.}} \approx 2A_{\text{თარ.}} (h_0/2)^2$ , სადაც  $A_{\text{თარ.}}$  სარტყელის კვეთის ფართობია. სარტყელის ინერციის მომენტი საკუთარ ღერძთან მიმართებაში, მისი სიმცირის გამო, უგულებელყოფილია.

აქედან ვიღებთ კოჭის სარტყელის კვეთის საჭირო ფართობს.

$$A_{\text{თარ.}} = 2I_{\text{სარტყ.}}/h_0^2 = 2 \cdot 523\,026/118^2 = 75,12 \text{ სმ}^2,$$

სადაც  $h_0 = h - t_{\text{სარტყ.}} = 120 - 2 = 118 \text{ სმ}$ .

380X20 მმ უნივერსალური ფოლადის სარტყელი, რომლისთვისაც  $b_{\text{სარტყ.}}/h = 380/1200 = 1/3,15$  არის რეკომენდებული თანაფარდობის ფარგლებში. ვაზუსტებთ  $c$  პლასტიკური მუშაობის გათვალისწინების ადრე მიღებული თანაფარდობის შედეგიდან გამომდინარე

$$A_{\text{თარ.}} = b_{\text{სარტყ.}} \cdot t_{\text{სარტყ.}} = 38 \cdot 2 = 76 \text{ სმ}^2; \quad A_{\text{კელ.}} = h_{\text{კელ.}} \cdot t_{\text{კელ.}} = 116 \cdot 1 = 116 \text{ სმ}^2;$$

$$A_{\text{თარ.}}/A_{\text{კელ.}} = 76/116 = 0,655.$$

დანართი 5 - ის მიხედვით  $c = 1,104$ , რომელიც პრაქტიკულად შეესაბამება მოცემულ  $c = 1,1$ .

ვამოწმებთ სარტყელთა მიღებულ სიგანეს (კიდულს) (3.11) ფორმულის მიხედვით, ადგილობრივი მდგრადობიდან გამომდინარე:

$$\frac{b_{\text{კელ.}}}{t_{\text{სარტყ.}}} = \frac{38-1}{2 \cdot 2} = 9,25 < 0,11 \frac{h_0}{t_{\text{კელ.}}} = 0,11 \frac{118}{1} = 12,98 < 0,5 \sqrt{E/R} = 14,96.$$

ვამოწმებთ კოჭის მზიდ უნარს (3.7) ფორმულის მიხედვით, კელის მდგრადობა გამომდინარე კოჭის პლასტიკური დეფორმაციების არეში, მაქსიმალური მომენტის მოქმედების მომენტში, სადაც  $Q$  და  $\tau = 0$ :

$$\bar{\lambda}_{\text{კელ.}} = \frac{116}{1} \sqrt{\frac{23}{2,06 \cdot 10^4}} = 3,876,$$

$$M_{\text{აქს.}} = 275\,400 < R \gamma h_0^2 t_{\text{კელ.}} \left( \frac{A_{\text{თარ.}}}{A_{\text{კელ.}}} + \alpha \right) = 23 \cdot 1 \cdot 118^2 \cdot 1 (0,655 + 0,216) = 279\,003 \text{ კნ} \cdot \text{სმ},$$

სადაც

$$\alpha = 0,24 - 0,15 \left( \tau/R_{\text{ჭრახე}} \right)^2 - 8,5 \cdot 10^{-3} \left( \bar{\lambda}_{\text{კელ.}} - 2,2 \right)^2 = 0,24 - 8,5 \cdot 10^{-3} (3,876 - 2,2)^2 = 0,216$$



კოჭის შერჩეულ კვეთს ვამოწმებთ სიხისტეზე. ამისათვის განვსაზღვრავთ ინერციის მომენტს და კოჭის წინალობის მომენტს

$$I = I_{კვლ.} + I_{სარტყ.} = I_{კვლ.} + 2b_{სარტყ.}t_{სარტყ.} \left( h_{0სარტყ.} / 2 \right)^2 = 130\,074 + 2 \cdot 38 \cdot 2 \frac{118^2}{2} = 659\,186 \text{ სმ}^4$$

;

$$W = \frac{I}{h/2} = \frac{659\,186 \cdot 2}{120} = 10\,986 \text{ სმ}^3 .$$

კოჭში ყველაზე მეტი ნორმალური ძაბვა  $\sigma = M_{მკვლ.} / c_1 W_{ნეტო} \leq R\gamma$  ფორმულით

$$\sigma = \frac{M_{მკვლ.}}{c_1 W} = \frac{275\,400}{1,1 \cdot 10\,986} = 22,79 \text{ კნ/სმ} < R = 23 \text{ კნ/სმ}^2$$

კოჭის შერჩეული კვეთი აკმაყოფილებს სიხისტის შემოწმებას და არ გააჩნია 5% - ზე მეტი დაძაბვა. კოჭის ჩალუნვის შემოწმება საჭირო არაა, რამდენადაც კვეთის მიღებული სიმაღლე მეტია მინიმალურზე და რეგლამენტირებული ჩალუნვა უზრუნველყოფილი იქნება.

როგორც განხილული მაგალითიდან ჩანს, იგი ვერ აკმაყოფილებს იმ რეკომენდაციებს, რომლებიც მათ (ე. ი. ბელენია და ავტორები) მიერვე იყო შემოთავაზებული. კერძოდ, თაროების ფართობების ჯამი უნდა უდრიდეს კედლის ფართობს  $2A_{თ.} = A_{კვლ.}$ .

ავილთ აქ განხილული მაგალითი და შევამოწმოთ; გამოდის, რომ თაროების ფართობები 2(380X20) არ არის ტოლი კედლის ფართობისა 1160X10, საიდანაც უკვე კოჭის განიკვეთის შერჩევის რაციონალურობის პირობა დაირღვა. ანუ 2(380X20)=1160X10, ეს კი არის, რომ 15200 ≠ 11600. ((152-116)/116\*100) აქედან ჩანს, რომ 31%-ია განსხვავება.

## თავი II

### შედგენილი კოჭების გაანგარიშება კ. კ. მუხანოვის მიხედვით

#### შედგენილი ფოლადის კოჭები

##### 2.1 გენერალური ზომები

შედგენილი კოჭები არის შედუღებული (უპირატესად) და მოქლონილი. კოჭების გენერალურ ზომებს ნიშნავენ ნაგებობის ზომების ყველაზე ოპტიმალური თანაფარდობიდან გამომდინარე.

სამრეწველო ნაგებობებში მალის დანიშვნა დამოკიდებულია პროექტირებადი

ობიექტის წარმოების ტექნოლოგიაზე. ცხრ. 4. 1 ან 
$$h_{\text{ძბ.}} = \frac{ln_0}{4800 n_g} \quad (4. 1)$$

ფორმულის მიხედვით სიხისტის პირობიდან განსაზღვრული კოჭის მინიმალური სიმაღლე ჩვეულებრივ არ წარმოადგენს ოპტიმალურს მასალის ხარჯვის თვალსაზრისით. კოჭის ყველაზე ხელსაყრელი კვეთი განისაზღვრება კვეთის მინიმალური ფართობით წინააღობის მოცემული მომენტის დროს  $W_{\text{საჭირო}} = M/R$  და კვეთის ამ ფართობის ყველაზე ხელსაყრელ განაწილებით კედელსა და სარტყელს (თაროებს) შორის, რაც დამოკიდებულია კედლის სისქეზე და სიმაღლეზე.

შემოვიღოთ შემდეგი ცნებები: კედლის მოქნილობა (კედლის სიმაღლის ფარდობა მის სისქესთან)

$$K_{\text{კედ.}} = h/\delta \quad (4.2)$$

და მასალის კოჭის კვეთზე განაწილების კოეფიციენტი

$$\alpha = F_{\text{კედ.}}/F = h\delta/F \quad (4.3)$$

$F$  - ით აღვნიშნოთ შედუღებული ორტესებრი კოჭის კვეთის ფართობი (ნახ. 4. 1); მაშინ ერთი სარტყელის კვეთის ფართობი  $F_{\text{სარტყ.}} = 0,5(F - h\delta)$ .

სიმცირის გამო სარტყელთა ინერციის მომენტების უგულვებელყოფისას მათი საკუთარი ღერძების მიმართ, ასევე კედლის სიმაღლის კოჭის სიმაღლესთან გაიგივების შედეგად, შეგვიძლია საკმარისი სიზუსტით გამოვხატოთ კოჭის წინააღობის მომენტი:

$$W = 2 \left[ F_{\text{სარტყ.}} \left( \frac{h}{2} \right)^2 \right] \frac{2}{h} + \frac{\delta h^3}{12} \frac{2}{h} = F_{\text{სარტყ.}} h + \frac{\delta h^2}{6} = \frac{Fh}{2} - \frac{\delta h^2}{3} ; \quad (4.4)$$

(4.4) ფორმულაში  $\delta = h/k_{\text{კელ.}}$  მნიშვნელობის ჩასმისას, ვპოულობთ

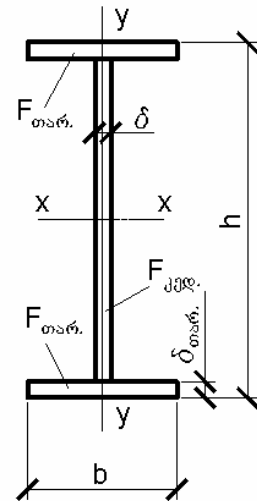
$$F = \frac{2W}{h} + \frac{2h^2}{3k_{\text{კელ.}}} ; \quad (4.5)$$

ვიღებთ რა პირველ წარმოებულს სიმაღლეზე და ვუტოლებთ რა მას ნულს (კედლის არჩეული მუდმივი მოქნილობის  $k_{\text{კელ.}}$  დროს)

$$\frac{dF}{dh} = -\frac{2W}{h^2} + \frac{4}{3} \frac{h}{k_{\text{კელ.}}} = 0$$

ვპოულობთ კოჭის სიმეტრიული კვეთის ოპტიმალურ სიმაღლეს

$$h_{\text{ოპტ.}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} k_{\text{კელ.}} W_{\text{საჭირო}}} ; \quad (4.6)$$



ნახ. 4.1 შედგენილი შედუღებული ორტესებრი კოჭის კვეთი

დავსახეთ რა  $k_{\text{კელ.}}$  კედლის მოქნილობა და მის მიხედვით ვიპოვეთ რა კოჭის ოპტიმალური სიმაღლე, ამით ვადგენთ კვეთის მიხედვით მასალის საუკეთესო განაწილებას. სიმეტრიულ ორტესებრი კოჭში ოპტიმალური სიმაღლის დროს მასალა თანაბრად ნაწილდება კედელსა და სარტყლებს შორის ( $\alpha = 0,5$ ). მართლაც, გამომდინარე (4. 4) ფორმულიდან და მივიღებთ  $F_{\text{კელ.}} = \alpha F$ , ვპოულობთ

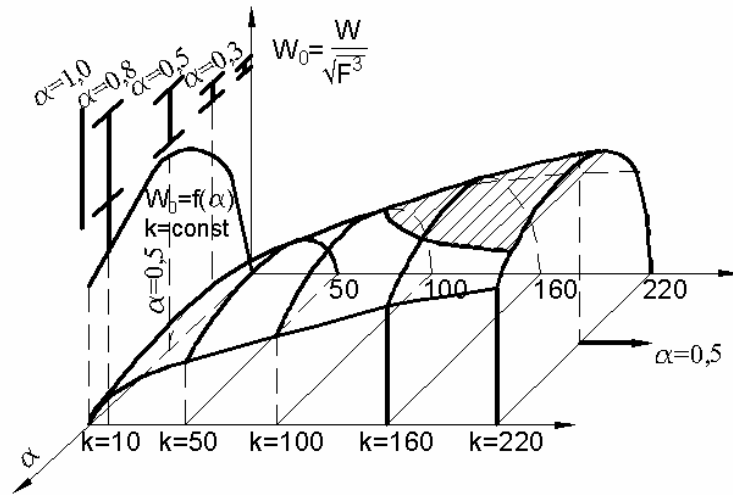
$$W = \frac{Fh}{2} - \frac{\delta h^2}{3} = Fh \left( \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{3} \right)$$

ან, რამდენადაც  $h = k_{\text{კელ.}} \delta$  ან  $h^2 = k_{\text{კელ.}} \delta h = k_{\text{კელ.}} \alpha F$ , ვღებულობთ

$$W = F \sqrt{k_{\text{კვლ.}} \alpha F} (1/2 - \alpha/3) = \sqrt{F^3} \sqrt{k_{\text{კვლ.}} \alpha} (1/2 - \alpha/3) = W_0 \sqrt{F^3}, \quad (4.7)$$

სადაც

$$W_0 = W / \sqrt{F^3} = \sqrt{k_{\text{კვლ.}} \alpha} (1/2 - \alpha/3) \quad (4.8)$$



ნახ. 4.2 გამძლეობის სვედრითი მომენტის მრუდები

წინააღმდეგობის სვედრითი მომენტი  $W_0$  დამოკიდებულია  $k_{\text{კვლ.}}$  და  $\alpha$  - ზე და წარმოადგენს რა უზომო სიდიდეს, ემსახურება ჩალუნული კვეთის გამოსადეგობის მახასიათებელს. ნახ. 4. 2 - ზე ნაჩვენებია წინააღმდეგობის სვედრითი მომენტის მრუდები  $k_{\text{კვლ.}}$  კედლის მოქნილობის და  $\alpha$  კოეფიციენტის ფუნქციებში;  $k_{\text{კვლ.}}$  თითოეულ მნიშვნელობას პასუხობს  $W_0$  მნიშვნელობის ფარდობითი მაქსიმუმი. ვიღებთ რა პირველ წარმოებულს  $\alpha$  კოეფიციენტის მიხედვით და ვუტოლებთ რა მას ნულს (მუდმივი  $k_{\text{კვლ.}}$  დროს), ვიღებთ ფარდობით მაქსიმუმს, ანუ კოჭის კვეთზე მასალის ყველაზე ხელსაყრელ განაწილებას:

$$\frac{dW_0}{d\alpha} = \sqrt{k_{\text{კვლ.}}} \left( \frac{1}{4\sqrt{\alpha}} - \frac{\sqrt{\alpha}}{2} \right) = 0,$$

საიდანაც  $\alpha = 1/2$

ყოველგვარი გადახრა  $\alpha = 0,5$  მნიშვნელობიდან (მუდმივი  $k_{\text{კვლ.}}$  დროს) ზრდის კვეთის ფართობს, ხოლო  $k_{\text{კვლ.}}$  ზრდა ( $\alpha = 0,5$  მუდმივი კოეფიციენტის დროს) იწვევს კვეთის ფართობის შემცირებას. იმის გათვალისწინებით, რომ წყობის

ფუნქციას გააჩნია მცირე გადახრები მინიმუმთან ახლოს, რაციონალურია კოჭის სიმაღლის აღება ოპტიმალურთან შედარებით მცირედით (თუ ეს დასაშვებია ჩალუნვის პირობის მიხედვით). თუ გადახრა ოპტიმალური სიმაღლისგან შეადგენს 10% ფიქსირებული  $k_{კელ.}$  დროს, კვეთის ფართობი იზრდება დაახლოებით 1,5%-ით, ოპტიმალური სიმაღლისგან 20%-ით გადახრისას კვეთის ფართობი იზრდება 5% - 6% - ით.

შედგენილი კოჭის სიმაღლე, კონსტრუქციების უნიფიკაციის მიზნით, რაციონალურია ავილოთ მრგვალ რიცხვებში, რაც 100 მმ - ის ჯერადაა. ინდივიდუალურ პროექტებში დასაშვებია კოჭის კედლის სიმაღლე დამრგვალებულ რიცხვებში ავილოთ.

ამდენად, რაც უფრო მეტია  $k_{კელ.} = h/\delta$ , მით უფრო ხელსაყრელია კოჭი, თუმცა,  $k_{კელ.}$  პრაქტიკული მნიშვნელობა შემოიფარგლება კედლის მდგრადობის უზრუნველყოფის აუცილებლობით და მისი ჭრაზე სიმტკიცით. არსებითი გავლენა  $k_{კელ.}$  არჩევაზე გააჩნია კედლის ფურცლის მინიმალურ სისქეს კოროზიის პირობებისა და მოძრავი დატვირთვისაგან ადგილობრივი ზეწოლის აღქმის მიხედვით. ჩვეულებრივ, კედლის მინიმალურ სისქედ აიღება  $\delta = 8 \text{ მმ}$  და ზოგჯერ  $\delta = 6 \text{ მმ}$ . კედლის სისქის ზრდა ხდება 2 მმ გრადაციით. თუმცა ფოლადის დიდი პარტიის შეკვეთისას შეიძლება აღებული იქნეს კედლის სისქე კენტი სახით (მაგრამ არაუმეტეს 15 მმ). დაპროექტების პრაქტიკით დადგენილია თანაფარდობა  $k_{კელ.} = h/\delta$ , რომელიც მოყვანილია ცხრილში 4. 2.

კედლის სისქე შეიძლება აგრეთვე განისაზღვროს ემპირიული ფორმულით, რომელიც კარგად ასახავს  $k_{კელ.}$  ზრდას კოჭის სიმაღლის ზრდასთან ერთად:

$$\delta = 7 + 3h,$$

(4. 9) სადაც  $\delta \text{ მმ}$  და  $h \text{ მ}$  - ში არის მოცემული.

$k_{კელ.}$  პრაქტიკული მნიშვნელობის ცხრილი

$h, მ$	0,8	1	1,25	1,5	1,75
$\delta, მმ$	8-6	10-8	10-9	12-10	14-12
$k_{კელ.}$	100-133	100-125	125-140	125-150	125-146

გაგრძელება ცხრ. 4. 2.

$h, მ$	2	2,5	3	4	5
$\delta, მმ$	14	16-14	18-16	20	24-22
$k_{კელ.}$	143	156-178	166-187	200	208-227

დიდი კონცენტრირებული დატვირთვის დროს კედლის მინიმალური სისქე უნდა შემოწმდეს სიმტკიცის პირობების მიხედვით  $Q$  მაქსიმალური განივი ძალიდან (საყრდენი რეაქციის) გამომდინარე:

$$\delta_{მინ.} \geq \frac{3}{2} \frac{Q}{hR_{ჭრახე}}, \quad (4.10)$$

სადაც  $R_{ჭრახე}$  ფოლადის ჭრისადმი საანგარიშო წინააღმდეგობაა.

ეს ფორმულა მიღებულია კოჭის კედლის მიერ მხოლოდ მხები ძაბვების აღქმის პირობიდან გამომდინარე.

ეკონომიური თვალსაზრისით კედლის სისქის არჩევას ყურადღებით უნდა მოვეკიდოთ, რამდენადაც  $\delta$  სისქის აღნიშვნის შემდეგ ოპტიმალური სიმაღლის და, მამასადამე, კოჭის მინიმალური ფართობის ( $\alpha = 0,5$  დროს) დადგენის ამოცანა ერთმნიშვნელოვნად წყდება.

მართლაც, (4. 6) ფორმულაში  $k_{კელ.} = h/\delta$  ჩასმით კედლის სისქის მიხედვით ოპტიმალური სიმაღლის გამოსახულებას შემდეგნაირად ვპოულობთ:

$$h_{ობტ.} = 1,23 \sqrt{W_{საჭირო} / \delta} \quad (4.11)$$

ან ვიღებთ რა კოჭების სიმაღლეს ოპტიმალურზე რამდენადმე ნაკლებს, მივიღებთ

$$h_{\text{ოპტ.}} = 1,15 \sqrt{W_{\text{საჭირო}} / \delta}. \quad (4.12)$$

ცხადია, რომ კედლის სისქე რაც შეიძლება ნაკლები უნდა ავიღოთ სინისტისა და სიმტკიცის პირობების დაკმაყოფილებით.

კოჭებისთვის, რომელთა ოპტიმალური სიმაღლე გამოდის ნაკლები, ვიდრე საჭიროა დასაშვები ჩალუნვის (სინისტის) პირობიდან, მასალის რაციონალური განაწილება იქნება განსხვავებული, ვიდრე  $\alpha = 0,5$  დროს. ამ შემთხვევაში ყველაზე ხელსაყრელი კვეთი განისაზღვრება კვეთის მინიმალური ფართობით მოცემულ  $I$  ინერციის მომენტის დროს, რომელიც განსაზღვრავს მოცემული ფარდობითი ჩალუნვისთვის  $1/n_0 = f/l$  საჭირო კვეთის ფართობს.

$$\frac{f}{l} = \frac{5 (p+q)^3}{384 EI} = \frac{5 Ml}{48 EI} \frac{p+q}{pn_p + qn_q} = \frac{5 \sigma l}{24 Eh} \frac{p+q}{pn_p + qn_q} \leq \frac{1}{n_0} \quad \text{ფორმულიდან}$$

გამომდინარე მიახლოებით ვპოულობთ:

$$I_{\text{საჭირო}} = Mln_0 / (10E) \quad (4.13)$$

გამოვსახავთ ინერციის მომენტს (4.4) განტოლების ანალოგიურად და შემდეგ  $F$  კვეთის ფართობს  $I$  - ს მეშვეობით, ვიღებთ რა პირველ მწარმოებელს და ვუტოლებთ მას ნულს

$$\frac{dF}{dh} = -\frac{8I}{h^3} + \frac{4}{3} \frac{h}{k_{\text{კედ.}}} = 0 \quad (4.14)$$

მივიღებთ

$$h_{\text{ოპტ.}} = \sqrt[4]{6Ik_{\text{კედ.}}} = \sqrt[3]{3Wk_{\text{კედ.}}} = 1,73 \sqrt{W/\delta} \quad (4.15)$$

გადმოცემულის მიხედვით ინერციის მომენტი შეიძლება გამოისახოს ინერციის ხვედრითი (უზომო) მომენტის მეშვეობით  $I = I_0 F^2$ , სადაც  $I_0 = k_{\text{კედ.}} \alpha (1/4 - \alpha/6)$

$$\text{თუ } dI/d\alpha = 0, \text{ ვიღებთ } \alpha = 3/4 \text{ და } F_{\text{კედ.}} = 3/4 F.$$

მოცემული (არაოპტიმალური) სიმაღლის კოჭებისთვის კვეთში მასალის განაწილების კოეფიციენტი  $\alpha$  შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით

$$\alpha = \frac{h^2}{k_{\text{კედ.}} F} = \frac{3}{2 \left( 1 + \frac{3W_{\text{საჭირო}} k_{\text{კედ.}}}{h^3} \right)}, \quad (4.16)$$

**მაგალითი 2.** იპოვეთ კოჭის ოპტიმალური სიმაღლე მალით  $l = 12 \text{ მ}$ , რომელიც დატვირთულია თანაბრად განაწილებული სასარგებლო დატვირთვით  $q_0 = 160 \text{ კნ/მ}$ ; სასარგებლო დატვირთვის გადატვირთვის კოეფიციენტი  $n = 1,3$ . მასალა - BCT3 მარკის ფოლადი. მოცემული ფარდობითი ჩალუნვა  $1/n_0 = 1/600$ .

**ამოხსნა.** ცხრ. 4. 1 მიხედვით განვსაზღვრავთ კვეთის მინიმალურ სიმაღლეს გამომდინარე სიხისტის უზრუნველყოფის პირობიდან

$$h_{\text{მინ.}} \geq \frac{1}{10} l = \frac{1}{10} 12 = 1,2 \text{ მ}.$$

კოჭის საკუთარ წონას ვიღებთ  $3 \text{ კნ/მ}$  (ანალოგიური პროექტების მიხედვით). მთლიანი საანგარიშო დატვირთვა კოჭზე  $q = 160 \cdot 1,3 + 3 \cdot 1,1 = 211,3 \text{ კნ/მ}$ .

აქ 1,1 გადატვირთვის კოეფიციენტია მუდმივი დატვირთვისას.

მაქსიმალური საანგარიშო მღუნავი მომენტი მალის შუაში

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{211,3 \cdot 12^2}{8} = 3800 \text{ კნ} \cdot \text{მ}$$

წინააღობის საჭირო მომენტი  $W = 380000/21 = 18100 \text{ სმ}^3$

ცხრ. 4. 2 – ის მიხედვით ვირჩევთ  $k_{\text{კვლ.}} = 125 \text{ ან } 150$

როცა  $k_{\text{კვლ.}} = 150$ ,

$$h_{\text{კობ.}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 150 \cdot 18100}{2}} = 160 \text{ სმ}$$

და კედლის სისქე  $\delta = h_{\text{კობ.}}/k_{\text{კვლ.}} = 160/150 = 1,065 \text{ სმ}$ .

როცა  $k_{\text{კვლ.}} = 125$ ,

$$h_{\text{კობ.}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} k_{\text{კვლ.}} W_{\text{საჭირო}}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 125 \cdot 18100}{2}} \text{ სმ} = 151 \text{ სმ}$$

და კედლის სისქე  $\delta = h_{\text{კობ.}}/k_{\text{კვლ.}} = 151/125 \text{ სმ} = 1,2 \text{ სმ}$ .

თუ კედლის სისქედ ავიღებთ, მაგალითად  $\delta = 10 \text{ მმ}$ , მაშინ (4.12) ფორმულის მიხედვით

$$h_{\text{კობ.}} = 1,15 \sqrt{W_{\text{საჭირო}}/\delta} = 1,15 \sqrt{18100/1} \text{ სმ} = 155 \text{ სმ};$$

როცა  $\delta = 12 \text{ მმ}$ ,

$$h_{\text{კობ.}} = 1,15 \sqrt{\frac{18100}{1,2}} \text{ სმ} = 142 \text{ სმ};$$



(4.10) ფორმულის მიხედვით განვსაზღვრავთ კედლის აუცილებელ მინიმალურ სისქეს კოჭის საყრდენზე შესადლებელი მაქსიმალური მხები ძაბვებიდან გამომდინარე, როცა  $h = 150 \text{ სმ}$  ( $Q = 1270 \text{ კნ}$ , იხ. მაგალითი 3.);

$$\delta_{\text{მხ.}} = \frac{3}{2} \frac{Q}{hR_{\text{კოჭაზე}}} = \frac{3 \cdot 1270}{2 \cdot 150 \cdot 13} \text{ სმ} = 0,975 \text{ სმ} .$$

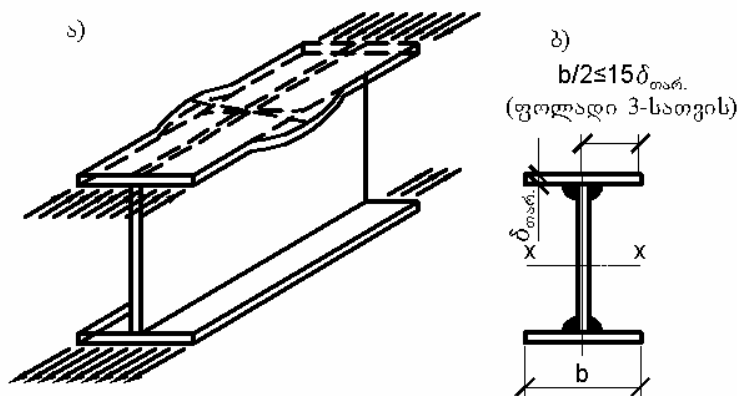
აღვნიშნოთ კოჭის სიმაღლე  $h = 1500 \text{ მმ}$  და კედლის სისქე  $\delta_{\text{კედ.}} = 10 \text{ მმ}$  .

## 2.2 კვეთის შერჩევა

**შედულებული კოჭები.** ვიცით რა წინალობის საჭირო მომენტი  $W_{\text{საჭირო}}$  და განვსაზღვრეთ რა კვეთის ოპტიმალური სიმაღლე და კედლის სისქე, ვირჩევთ ორტესებრი შედულებული კოჭის რაციონალურ კვეთს. კოჭის ნეიტრალური ღერძის მიმართ სიმეტრიულობის შემთხვევაში (ერთნაირი ზედა და ქვედა სარტყელით) კვეთის შერჩევა დაიყვანება სარტყლების ისეთი ზომების დადგენამდე, რომ კოჭის საერთო წინალობის მომენტი უტოლდებოდეს მოთხოვნილ  $W_{\text{საჭირო}}$  - ს. კოჭის საერთო წინალობის მომენტი მიახლოებით გამოიხატება კედლის და სარტყელთა წინალობის მომენტის მეშვეობით [იხ. ფორმულა (4.4)] .

აქედან გამომდინარე, ერთი სარტყლის კვეთის მინიმალური საორიენტაციო ფართობი (როცა  $\alpha = 0,5$ )

$$F_{\text{სარტყ.}} = \frac{W_{\text{საჭირო}}}{h} - \frac{\delta_{\text{კედ.}} \cdot h}{6} = \frac{3}{4} \frac{W_{\text{საჭირო}}}{h} \quad (4.17)$$



ნახ. 4.3 კოჭის ზედა სარტყლის სიმაღლის დამოკიდებულება თაროს სისქეზე

ან უმნიშვნელო ასიმეტრიული კოჭებისათვის ორი სარტყლის ფართობი

$$2F_{\text{სარტყ.}} = \frac{3}{2} \frac{W_{\text{საჭირო}}}{h} \quad (4.18)$$

სარტყლის სიგანე აღენიშნოთ  $b$  - თი და მისი სისქე  $\delta_{\text{სარტყ.}}$  - ით, მაშინ

$$F_{\text{სარტყ.}} = b\delta_{\text{სარტყ.}}$$

სარტყლის სიგანესა და სისქეს შორის ფარდობა, რაც უზრუნველყოფს საჭირო კვეთს, უნდა აკმაყოფილებდეს ზოგიერთ კონსტრუქციულ და საწარმოო მოთხოვნებს. რაც უფრო ფართოა სარტყელი, მით უფრო მდგრადია კოჭი და აგრეთვე უფრო მოსახერხებელია ტრანსპორტირებისა და მონტაჟის დროს. თუმცა, საკმაოდ დიდი სიგანისა და, მაშასადამე, მცირე სისქის დროს კოჭის შეკუმშულმა სარტყელმა შეიძლება დაკარგოს მდგრადობა ნორმალური დაბეჭდვის ზემოქმედების გამო (ნახ. 4. 3. ა). სარტყლის გამოშვებული ნაწილის ადგილობრივი მდგრადობა იქნება უზრუნველყოფილი, თუ იგი არ აღემატება  $15\delta_{\text{სარტყ.}}$ -ს  $CT3$  მარკის ფოლადისათვის (ნახ. 4. 3. ბ) და  $15\delta_{\text{სარტყ.}}\sqrt{21/R}$  დაბალლეგირებული ფოლადისათვის. მაშასადამე, სარტყლის მთლიანი სიგანე უნდა აკმაყოფილებდეს თანაფარდობებს: ფოლადისათვის  $3 b_{\text{სარტყ.}} \leq 30\delta_{\text{სარტყ.}}$ ; დაბალლეგირებული ფოლადისათვის

$$b_{\text{სარტყ.}} \leq 30\delta_{\text{სარტყ.}}\sqrt{21/R} \quad (4.19)$$

სადაც  $R$  – ფოლადის საანგარიშო წინააღმდეგობა,  $კნ/სმ^2$ .

სარტყლის მინიმალური სიგანე უნდა უზრუნველყოფდეს კოჭის საერთო მდგრადობას მისი ჰორიზონტალურ სიბრტყეში ღუნვაზე, რომლის დროსაც საჭირო არაა  $\varphi_{\text{კოჭ.}}$  კოეფიციენტის შემოღება საანგარიშო ფორმულაში. ეს მინიმალური სიგანე განისაზღვრება  $l$  კოჭის საანგარიშო სიგრძის  $b$  სარტყლის სიგანესთან ფარდობაში, რომელიც არ უნდა აღემატებოდეს ცხრ. 4. 3. - ში მოყვანილ მნიშვნელობებს.

უდიდესი შეფარდება  $l/b$ , რომლის დროსაც არ საჭიროებს ფოლადის კოჭების

შემოწმებას მდგრადობაზე

კოჭების ტიპი		$h/\delta_{თარ.} = 100$			$h/\delta_{თარ.} = 50$		
		დატვირთვისათვის მოღებული		ზედა სარტყელზე შუალედური	დატვირთვისას მოღებული		ზედა სარტყელზე შუალედური
		ზედა სარტყელზე	ქვედა სარტყელზე	ჩამაგრებების არსებობის შემთხვევაში დატვირთვის მოღების ადგილისდამი- უხედავად	ზედა თაროსთან	ქვედა თაროსთან	ჩამაგრებების არსებობის შემთხვევაში დატვირთვის მოღების ადგილისდამი- უხედავად
შედუღებული	2	16	25	19	17	26	20
	4	15	23	17	16	24	18
	6	13	21	16	15	22	17
მოქლონილი	2	21	30	22	30	42	33
	4	18	28	19	25	35	27
	6	16	25	18	21	32	24

კოჭის საანგარიშო  $l$  სიგრძე მიიღება შეკუმშული სარტყლის განივი გადაადგილებებისადმი ჩამაგრების წერტილებს შორის მანძილიდან.

ცხრილში მოყვანილი  $l/b$  - ს მნიშვნელობები მოქმედებენ CT3 და 4 მარკის ფოლადისგან დამზადებული კოჭებისათვის; სხვა ფოლადისგან დამზადებული კოჭებისათვის  $l/b$  მნიშვნელობებს ამრავლებენ  $\sqrt{21/R}$  - ზე. იმ შემთხვევებში, როცა შეფარდება  $l/b$  აღემატება ცხრ. 4. 3. - ში მოყვანილ მნიშვნელობებს, აუცილებელია კოჭების შემოწმება საერთო მდგრადობაზე.

სარტყლის სიგანე, კონსტრუქციული მოსაზრებებიდან გამომდინარე, არ უნდა იყოს 180 მმ - ზე ნაკლები.

სარტყლის სისქეს ნიშნავენ 8 - დან 40 მმ - მდე ზღვრებში, მაგრამ არანაკლებ კედლის სისქისა და არაუმეტეს სამმაგი სისქისა, რადგანაც სქელი ფურცლების

მიღულებისას სარტყელურ ნაკერებში ვითარდება მნიშვნელოვანი შეკლებითი გამჭიმავი ძაბვები. სარტყელის სიგანე და სისქე რეკომენდებულია იყოს შემდეგი ზომების: 22 მმ - მღე სისქისათვის – ყოველ 2 მმ - ში და ა. შ. : 25, 28, 30, 32, 36 და 40 მმ; 420 მმ - მღე სიგანისთვის – ყოველ 20 მმ - ში და ა. შ. : 450, 480, 500, 530, 560 და 600 მმ და ა. შ.

კვეთის შერჩევის შემდეგ ანგარიშობენ მის ფაქტობრივი წინააღობის მომენტს და აწარმოებენ კოჭის და კედლის სიმტკიცის შემოწმებას ფორმულებით

$$\sigma = M/W \leq R; \quad \tau = \frac{QS}{J_{\text{კოჭ.}} \cdot \delta_{\text{კედ.}}} \leq R_{\text{ჭრაზე}}. \quad (4.20)$$

აქ  $M$  და  $Q$  - მაქსიმალური საანგარიშო მომენტი და განივი ძალაა;

$W = \frac{J_{\text{კოჭ.}}}{h/2}$  - კოჭის წინააღობის მომენტი (ნახ. 4. 4);  $h$  - კოჭის მთლიანი

სიმაღლე;  $I_{\text{კოჭ.}}$  - მთლიანი კოჭის ინერციის მომენტი ნეიტრალური ღერძის  $X-X$  მიმართ;

$$I_{\text{კოჭ.}} = I_{\text{კედ.}} + I_{\text{სარტყ.}} = \frac{\delta_{\text{კედ.}} \cdot h_{\text{კედ.}}^3}{12} + 2(I_0 + a^2 F_{\text{სარტყ.}}) \quad (4.21)$$

სადაც  $I_{\text{კედ.}}$  - კედლის ინერციის მომენტია ნეიტრალური ღერძის მიმართ;

$I_{\text{სარტყ.}}$  - სარტყლების ინერციის მომენტი ნეიტრალური ღერძის მიმართ;  $I_0$  - ერთი სარტყელის ინერციის მომენტი საკუთარი ღერძის  $X-X$  მიმართ, რომელსაც ჩვეულებისამებრ უგულებელყოფენ;  $h_{\text{კედ.}}$  - კედლის სიმაღლე;  $a$  - მანძილი სარტყელის სიმძიმის ცენტრიდან ნეიტრალურ ღერძამდე;

$S = F_{\text{სარტყ.}} a + \frac{F_{\text{კედ.}}}{2} \cdot \frac{h_{\text{კედ.}}}{4}$  - ნახევარკვეთის სტატიკური მომენტი ნეიტრალური ღერძის მიმართ.

მუდმივი განივკვეთის საერთო მდგრადობის დაკარგვისაგან ჩამაგრებული შეღულებული გაჭრილი კოჭები, რომლებიც დატვირთულია სტატიკური დატვირთვით, გაიანგარიშება მათში პლასტიკური დეფორმაციების გათვალისწინებით.

**მაგალითი 3.** შეარჩიეთ შეღულებული კოჭის კვეთი ამ მონაცემების მიხედვით; მალი  $l = 12$  მ და დატვირთვა  $q = 211,3$  კნ/მ.

საანგარიშო მომენტი  $M = 3800 \text{ კნ.მ}$ .

მაქსიმალური საანგარიშო განივი ძალა

$$Q = \frac{ql}{2} = \frac{211,3 \cdot 12}{2} \text{ კნ} = 1270 \text{ კნ}.$$

წინალობის საჭირო მომენტი  $W_{\text{საჭირო}} = 18\,100 \text{ სმ}^3$ .

2. მაგალითში კოჭის ზომებად მიღებულია:  $h_{\text{კოჭ.}} = 1500 \text{ მმ}$  და  $\delta_{\text{კელ.}} = 10 \text{ მმ}$ .

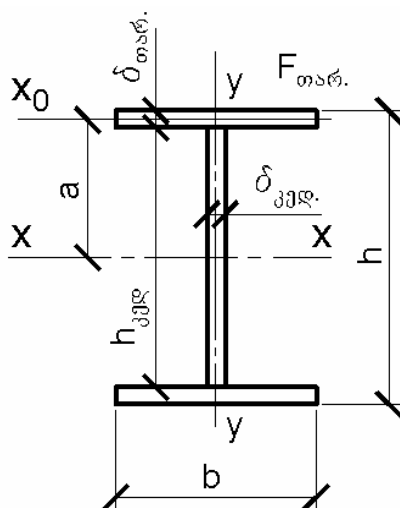
ამოხსნა. განვსაზღვრავთ სარტყლის კვეთის მოთხოვნილ ფართობს (4.17) ფორმულის მიხედვით. მივიღოთ  $h = h_{\text{კელ.}} = 146 \text{ სმ}$  და სარტყლის სისქე  $2 \text{ სმ}$ :

$$F_{\text{სარტყ.}} = \frac{3 W_{\text{საჭირო.}}}{4 h_{\text{კელ.}}} = \frac{3 \cdot 18\,100}{4 \cdot 146} \text{ სმ}^2 \approx 93 \text{ სმ}^2.$$

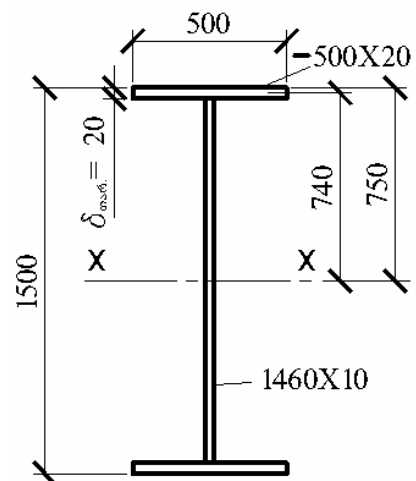
ვიღებთ სარტყლის კვეთს  $500 \times 20 \text{ მმ}$ , რომლისთვისაც  $F_{\text{სარტყ.}} = 100 \text{ სმ}^2$  (ნახ.

4. 5) გარკვეული მარაგით, ფორმულის გამოყვანისას დაშვებული გამარტივებების გათვალისწინებით. ვამოწმებთ კვეთს სიმტკიცეზე. ამისათვის წინასწარ განვსაზღვრავთ (4.21) ფორმულის მიხედვით კოჭის ინერციის მომენტს

$$I_{\text{კოჭ.}} = \frac{\delta_{\text{კელ.}} h^3}{12} + 2a^2 F_{\text{სარტყ.}} = \frac{1 \cdot 146^3}{12} + 2 \cdot 74^2 \cdot 100 \text{ სმ}^4 = 1\,355\,000 \text{ სმ}^4$$



ნახ. 4.4 შედუღებული კოჭების კვეთის შერჩევა



ნახ. 4.5 მაგალითი 3.

წინალობის მომენტი

$$W = \frac{I_{\text{კოჭ.}}}{h/2} = \frac{1\,355\,000}{75} \text{ სმ}^3 = 18\,100 \text{ სმ}^3;$$

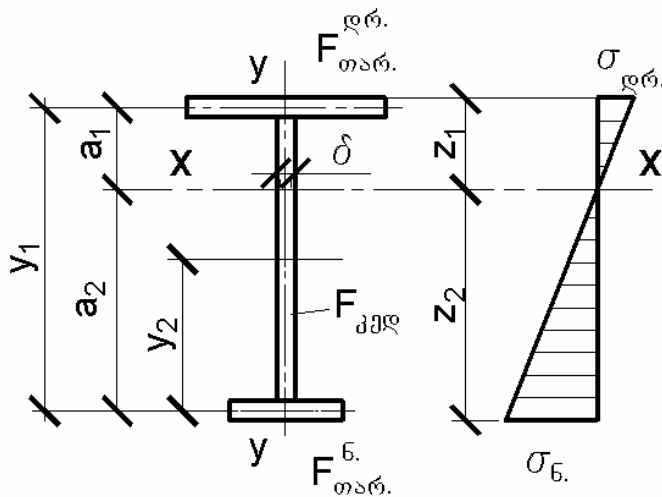
მაბეა  $\sigma = M/W = 380\,000/18\,100 \text{ კნ/სმ}^2 = 21 \text{ კნ/სმ}^2;$

ვამოწმებთ საყრდენთან კედლის სიმტკიცეს ჭრაზე, რისთვისაც წინასწარ განვსაზღვრავთ ნახევარკვეთის სტატიკურ მომენტს

$$S = F_{\text{სარტყ.}} a + \frac{F_{\text{კედ.}}}{2} \cdot \frac{h_{\text{კედ.}}}{4} = 100 \cdot 74 + \frac{146 \cdot 146}{2 \cdot 4} \text{ სმ}^3 = 10\,060 \text{ სმ}^3;$$

მხები ძაბვა

$$\tau = \frac{QS}{I_{\text{კოჭ.}} \delta_{\text{კედ.}}} = \frac{1270 \cdot 10\,060}{1\,355\,000 \cdot 1} \text{ კნ/სმ}^2 = 9,45 \text{ კნ/სმ}^2 < 13 \text{ კნ/სმ}^2;$$



ნახ. 4.6 არასიმეტრიული შეღულებული კოჭისთვის კვეთის შერჩევა

კოჭის კვეთის სრული ფართობი

$F = 200 + 146 = 346 \text{ სმ}^2$ . იმ შემთხვევაში, როცა ვერტიკალური ფურცლის სისქედ მიიღება 12 მმ (იხ. მაგალითი 2.), კოჭის კვეთის ფართობი იქნებოდა :  
 $F = 192 + 175 = 367 \text{ სმ}^2$  ტოლი ანუ 6% - ით მეტი.

კოჭების არასიმეტრიული განიკვეთის დროს წინასწარ

განსაზღვრავენ იმ შერჩეული კვეთის სიმძიმის ცენტრს, რომელზეც გადის ნეიტრალური ღერძი. სიმძიმის ცენტრის კოორდინატი ქვედა სარტყელის ფურცლის შუა ნაწილიდან  $a_2$  (ნახ. 4. 6) განისაზღვრება ფორმულით

$$a_2 = \frac{\sum Fy}{\sum F} = \frac{F_{\text{ზედა სარტყ.}} y_1 + F_{\text{კედ.}} y_2}{F_{\text{ზედა სარტყ.}} + F_{\text{კედ.}} + F_{\text{ქვედა სარტყ.}}} \quad (4.22)$$

ყველა აღნიშვნა ნაჩვენებია ნახ. 4. 6 - ზე.

ასეთი კოჭის ინერციის მომენტი უდრის:

$$I_{კოჭ.} = I_{კელ.} + I_{სარტყ.}^{ზედა} + I_{სარტყ.}^{ქვედა} = \frac{\delta}{3}(a_1^3 + a_2^3) + a_1^2 F_{სარტყ.}^{ზედა} + a_2^2 F_{სარტყ.}^{ქვედა},$$

ხოლო წინააღობის მომენტი ზედა და ქვედა ბოჭკოებისათვის:

$$W_{ზედა} = I_{კოჭ.} / z_1; \quad W_{ქვედა} = I_{კოჭ.} / z_2.$$

ძაბვების შემოწმებას კვეთის განაპირა ბოჭკოებისათვის აწარმოებენ ფორმულებით:  $\sigma_{ქვედა} = M / W_{ქვედა} \leq R$  და  $\sigma_{ზედა} = M / W_{ზედა} \leq R$ .

სიმტკიცეზე შემოწმების გარდა აწარმოებენ კედლის ადგილობრივი მდგრადობის და კოჭის მთლიანი მდგრადობის შემოწმებას.

შეყურსული დატვირთვის მოდებისას კოჭის კედლიდან იმ ადგილას, რომელიც არ არის გამაგრებული სიხისტის წიბოთი, კოჭის კედელი უნდა შემოწმდეს სიმტკიცეზე ადგილობრივი დატვირთვისას ფორმულით  $\sigma_M = P / (\delta z) \leq R$  (სადაც  $\sigma_M$  - ძაბვაა დატვირთვისას კედელში,  $P$  - საანგარიშო შეყურსული დატვირთვა;  $\delta$  - კედლის სისქე;  $z = b + 2h_1$ , სადაც  $b$  არის კოჭის დატვირთული ნაწილის სიგრძე, სადაც  $h_1$  მიღებულია როგორც მანძილი კოჭის სარტყლის განაპირა წიბოებიდან კედლის ზედა წიბომდე).

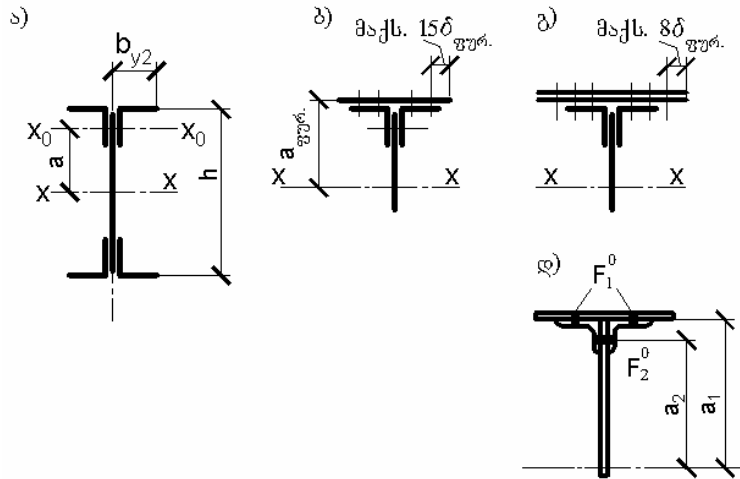
#### მოქლონილი კოჭები

მოქლონილი კოჭის უმარტივესი კვეთი შედგება ვერტიკალური ფურცლისა და ოთხი სარტყლის კუთხისგან (ნახ. 4. 7, ა). დიდ, ძლიერ კოჭებში კვეთი შეიძლება განვითარდეს ჰორიზონტალური ფურცლების დაყენების გზით (ნახ. 4. 7, ბ და გ).

მოქლონილი კოჭების გენერალური ზომები ისევე აღინიშნება, როგორც შედუღებულის. მოქლონილი კოჭების გაანგარიშების თავისებურება მდგომარეობს იმაში, რომ საჭიროა კვეთის შესუსტების გათვალისწინება მოქლონვისთვის საჭირო ხერხელებით, რაც წინასწარ მიახლოებით 15% ტოლია:

$$W_{ნეტო} = 0,85W_{ბრუტო}. \quad (4.23)$$

სიმეტრიული მოქლონილი კოჭის კვეთის შერჩევა ხდება შემდეგი წესით.



ნახ. 4.7 მოქლონილი კოჭების კვეთი

1. დასახული ჩაზნექის მომენტით განსაზღვრავენ ნეტოსა და ბრუტოს წინაღობის მოთხოვნილ მომენტებს:

$$W_{ნეტო} = M/R \text{ და } W_{ბრუტო} = W_{ნეტო} / 0,85. \quad (4.24)$$

$W_{ბრუტო}$  მნიშვნელობისა და  $k_{კელ.}$  არჩეული მოქნილობის მიხედვით განსაზღვრავენ კვეთის გენერალურ ზომებს – კედლის ოპტიმალურ სიმაღლესა და სისქეს. კოჭის საბოლოო სიმაღლის  $h$  (მრგვალ რიცხვებში) აღნიშვნის შემდეგ პოულობენ კვეთის ინერციის საჭირო მომენტს

$$I_{ბრუტო}^{საჭირო} = W_{ბრუტო} \frac{h}{2}, \quad (4.25)$$

2. აღნიშნავენ სარტყლის კუთხეების კალიბრს სორტამენტის მიხედვით, ჩვეულებრივ, იყენებენ რა ტოლგვერდა კუთხეებს თაროების სიგანით  $b_{კუთ.} = (1/10 - 1/11)h$  და სისქით  $\delta_{კუთ.} = (1/10 - 1/11)b_{კუთ.}$

აქაც ისე, როგორც ე. ი. ბელენიას და ავტორების შემთხვევაში, განხილული მაგალითიდან ჩანს, რომ იგი ვერ აკმაყოფილებს მოცემულ რეკომენდაციებს, რომელიც კ. კ. მუხანოვის მიერვე იყო მოცემული  $2A_{თ.} = A_{კელ.}$  ( $2 \cdot 500 \cdot 20 = 1460 \cdot 10$  ანუ  $20000 \neq 14600$ ), საიდანაც ჩანს, რომ 36% - ია განსხვავება. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ კოჭების ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრისას კ. კ. მუხანოვის მიხედვით კვეთის მინიმუმის პირობა სწორადაა შედგენილი, მაგრამ  $h$ -ის განსაზღვრა  $K_{კელ.}$ -ის მნიშვნელობას საჭიროებს, რაც თავის მხრივ  $h$ -ზე დამოკიდებული.



### თავი III

## შედგენილი კოჭების გაანგარიშების წესი ნ. ს. სტრუქციის მიხედვით კოჭის უჯრედები და კოჭები

### 3.1 კოჭების ტიპები

კოჭები წარმოადგენს ღუნვაზე მომუშავე კონსტრუქციების ელემენტს; ის ფართოდ გამოიყენება ყველა სახის გადახურვაში, სამრეწველო შენობების კონსტრუქციებში (ამწესქვეშა კოჭები, საშუალო მოედნების კოჭები), ხიდებში, ასევე სხვა ნაგებობებში. კოჭები გამოიყენება როგორც მცირე, ასევე დიდი დატვირთვის დროს, მაგალითად, 300 ტ ტვირთამწეობის ამწეების ქვეშ. მთლიანი კოჭების განი შეიძლება იყოს 100 მ - ზე მეტი (მაგალითად, მოსკოვში ახალი არბატის ხიდის განიერი წყობა). არსებობს ტექნიკური შესაძლებლობა, რომ კოჭები გაკეთდეს მეტი განის ქვეშ. მაგალითად, ბელგრადში არის კოჭებისაგან შემდგარი ხიდი 75+261+75 მ მალეებით.

სტატიკური სქემის მიხედვით კოჭები შეიძლება იყოს გაჭრილი, გაუჭრელი, კონსოლური. ერთგანიანი კოჭებისთვის, როგორც წესი, გამოიყენება კოჭები, რომლებიც თავისუფლად (დამჭერების გარეშე) თავსდება საყრდენებზე.

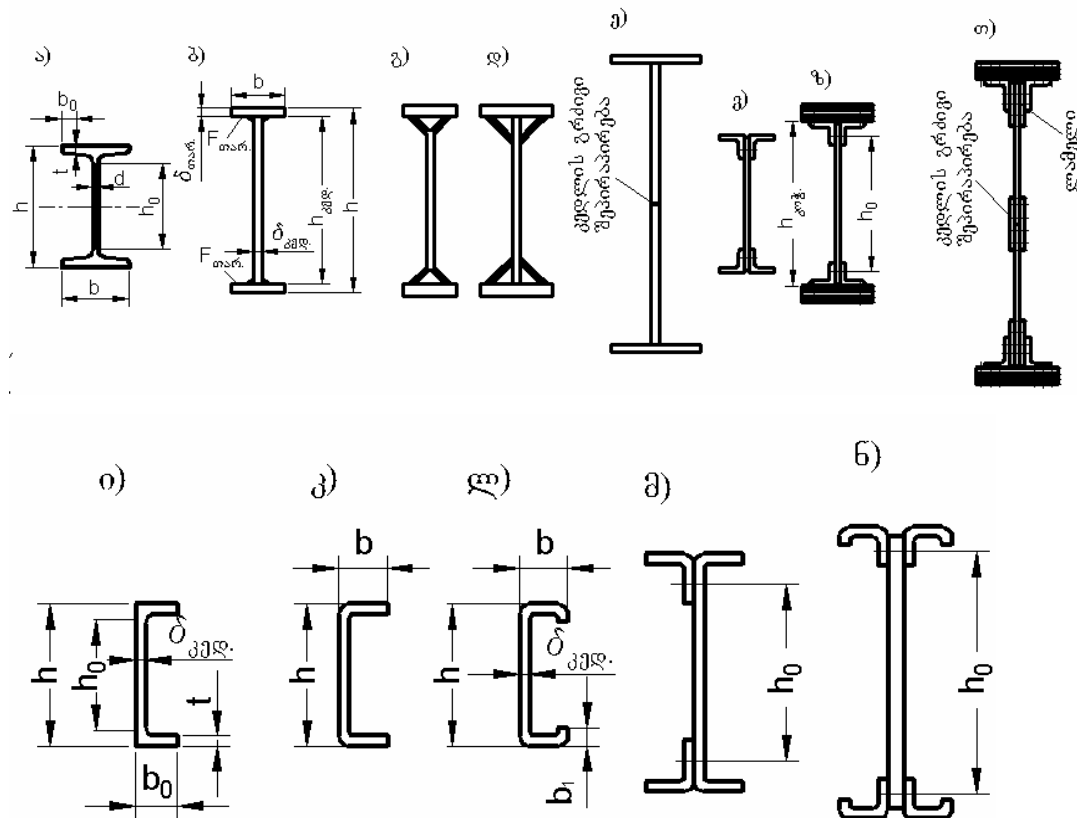
ლითონის დანახარჯის მიხედვით კონსოლური და გაუჭრელი კოჭები უფრო ხელსაყრელია გაჭრილზე, თუმცა დამზადებასა და მონტაჟზე შრომის დანახარჯის მიხედვით ეს უკანასკნელი უმჯობესია.

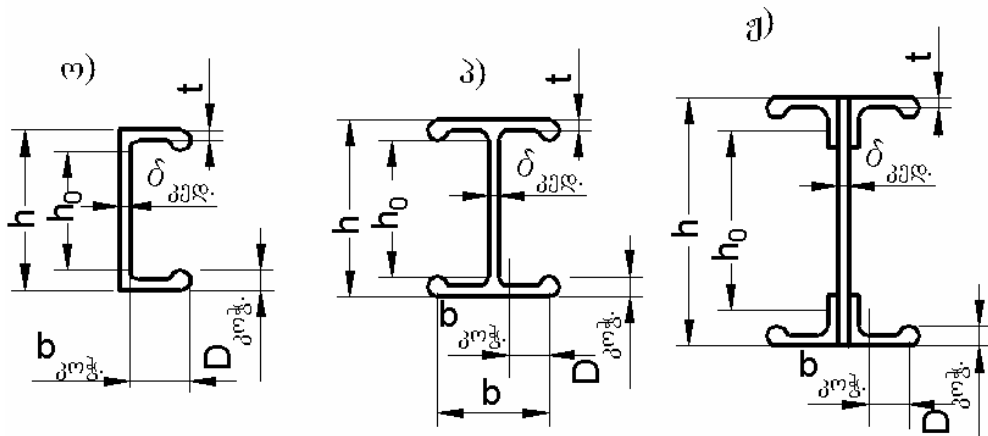
ლითონის ეკონომიის მიღების ნიშნით, კოჭების სიხისტის ზრდისა და მათი კვეთის გაერთმთლიანების მიხედვით ბოლო ხანებში გამოიყენება დატვირთვის რეგულირება მონტაჟის პროცესში, წინასწარი დატვირთვა მაღალი სიმტკიცის მასალების გამოყენებით, ასევე ერთობლივი მუშაობა ლითონის ან რკინაბეტონის ფენილის კოჭებთან.

ლითონის კოჭები ყველაზე ხშირად დაპროექტებულია ორტესებრი კვეთის სახით, რომელიც ყველაზე ეკონომიურია მასალის დანახარჯის (დრეკადი ელემენტებისთვის) მიხედვით და ხელსაყრელია კონსტრუქციული თვალსაზრისით. უფრო იშვიათად გამოიყენება ორკედლიანი კოჭები, რომელთაც გააჩნიათ ორი

ერთმანეთთან განლაგებული კედელი. მცირე კოჭები ზოგჯერ შველერის კვეთის სახითაცაა.

ორტესუბრი კვეთის კოჭები დატვირთვისა და განის მიხედვით გამოიყენება: 1) მთლიანი პროფილის დაგლინული ფოლადის (ნახ. 5. 1, ა) ან დაპრესილი ალუმინის შენაღობისაგან (ნახ. 5. 1, ა,ბ); 2) შედგენილი შედუღებული ან ფოლადის ფურცლებისაგან, ან ალუმინის შენაღობისაგან (ნახ. 5. 1, ბ-დ) ან ფოლადის გრებილი პროფილისგან (ნახ. 5. 1, მ, ნ); 3) შედგენილი მოქლონილი ან ფოლადის დაგლინული, ან გრებილი პროფილისგან (ნახ. 5. 1, ვ-თ, მ,ნ), ან ალუმინის შენაღობისაგან დაპრესილი და დაგლინული პროფილისგან (ნახ. 5. 1, ვ-თ, ყ). შედგენილი კვეთის კოჭები გამოიყენება იმ შემთხვევებში, როცა მთლიანი პროფილის კოჭები არ აკმაყოფილებს სიმტკიცის, სიხისტის ან მდგრადობის პირობებს, ასევე, როცა მთლიანი კვეთის კოჭების გამოყენება უკავშირდება მნიშვნელოვან კონსტრუქციულ გართულებებს, ან ლითონის გადახარჯვას.





ნახ. 5.1 კოჭების ტიპები

როგორც წესი, შედგენილი კოჭები შედუღებულია. მოქლონილი კოჭები შედუღებულთან შედარებით მოითხოვს ლითონის მეტ ხარჯს (დაახლოებით 15 %-ით) და მეტად შრომატევადია დამზადებისას (დაახლოებით 10-20 %-ით). თუმცა, ფოლადის კოჭები დიდი მოძრავი დატვირთვის ქვეშ, რომელთაც გააჩნიათ სარტყელის მეტი კვეთი, რაც ძნელად მისაღწევია შედუღებისას, ხშირად არის მოქლონილი.

ალუმინის შენადნობისაგან შედგენილი კვეთის კოჭები უპირატესად სრულდება AMγ6, АД33Т1, АВТ1 შენადნობებისგან და სხვა. მოქლონილი – АД33Т1, АВТ1, Д16Т შენადნობებისაგან და სხვა. შველერის კვეთის კოჭები შეიძლება იყოს: ფოლადის დაგლინული (ნახ. 5. 1, ი), ან გალუნული ლენტებისაგან (ნახ. 5. 1, კ, ლ) და ალუმინის შენადნობისაგან (ნახ. 5. 1, ი, ო).

### 3.2 კოჭების სიმაღლის განსაზღვრა

გადახურვის სამშენებლო და კონსტრუქციული სიმაღლე  
კოჭის სიმაღლე

კოჭის ზღვრული სიმაღლე განისაზღვრება გადახურვის სამშენებლო სიმაღლით  $h_{სამშ.}$ , რომელიც უდრის გადახურვის ზედა ფენის ნიშნულისა და გადახურვის ქვეშ შენობის ზედა ნაწილის სხვაობას, რომელიც მთლიანად დადგენილია ნაგებობის (შენობის) პროექტით. (ნახ. 5. 3 და ნახ. 5. 4.)

$h_k$  მანძილი გადახურვის ზედა ფენიდან ქვედა საზღვრამდე, რომელიც აკავებს კოჭებს ან გადახურვას (მაგალითად, დაკიდული ჭერის დროს), არის გადახურვის კონსტრუქციული სიმაღლე (ნახ. 5. 3). სწორედ, ამ სიმაღლეთა მეშვეობით განისაზღვრება გადახურვის მთელი კონსტრუქციის სიმაღლე და ასევე კოჭების ზღვრული სიმაღლე.

გადახურვის სამშენებლო და კონსტრუქციული სიმაღლეების ფარგლებში კოჭის სიმაღლე განისაზღვრება შემდეგი პირობებიდან გამომდინარე: 1) სიხისტე; 2) ლითონის ეკონომია; 3) გადახურვის კონსტრუქცია და სწორი თანაფარდობა კოჭის ელემენტთა ზომებს შორის.

### 3.3 კოჭის კვეთის სიმაღლის განსაზღვრა სიხისტის პირობიდან გამომდინარე

გაჭრილი კოჭის ჩალუნვა თანაბრად განაწილებული დატვირთვის დროს

$$f = \frac{5 (\sum p^{\delta} + \sum q^{\delta}) l^4}{384 EJ} \quad (5.1)$$

სადაც  $p^{\delta}$ ,  $q^{\delta}$  მუდმივი და სასარგებლო ნორმატიული დატვირთვაა.

თუ ჩავსვამთ მნიშვნელობას

$$\frac{(\sum p^{\delta} + \sum q^{\delta})}{8} = M_{\delta} ; J = W \frac{h}{2} ; \frac{M_{\delta}}{W} = \sigma_{\delta} ,$$

განვსაზღვროთ კოჭის სიმაღლე, რომლის დროსაც უზრუნველყოფილი იქნება მოცემული სიხისტე

$$h_{\text{მ.წ.}} = \frac{5 \sigma_{\delta} l^2}{24 E [f]} \approx \frac{\sigma_{\delta} l^2}{10^7 [f]} , \quad (5.2)$$

სადაც  $[f]$  ზღვრული (დასაშვები) ჩალუნვაა.

რამდენადაც სიხისტის შემოწმება განეკუთვნება მეორე ზღვრული მდგომარეობის გაანგარიშებას,  $\sigma_{\delta}$  დატვირთვა ნაკლებია საანგარიშო წინალობაზე, რომლის მიხედვითაც ხდება კოჭის კვეთის შერჩევა; ის შეიძლება მიღებულ იქნეს როგორც  $R$  საანგარიშო წინალობის ნაწილი, თანაფარდობა პროპორციული ნორმატიული დატვირთვის გამოთვლილ სიდიდისთან, ანუ:

$$\sigma_{\delta} = R \frac{\sum p^{\delta} + \sum q^{\delta}}{\sum p + \sum q}, \quad (5.3)$$

სადაც  $p = p^{\delta} n_p$ ,  $q = q^{\delta} n_q$  - მუდმივი და სასარგებლო საანგარიშო დატვირთვები მიღებული  $n$  გადატვირთვის შესაბამის კოეფიციენტებზე ნორმატიული დატვირთვის გამრავლების გზით.

ამდენად, კოჭის კვეთის ყველაზე ნაკლები სიმაღლე, რომელიც აკმაყოფილებს სიხისტის პირობებს, შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

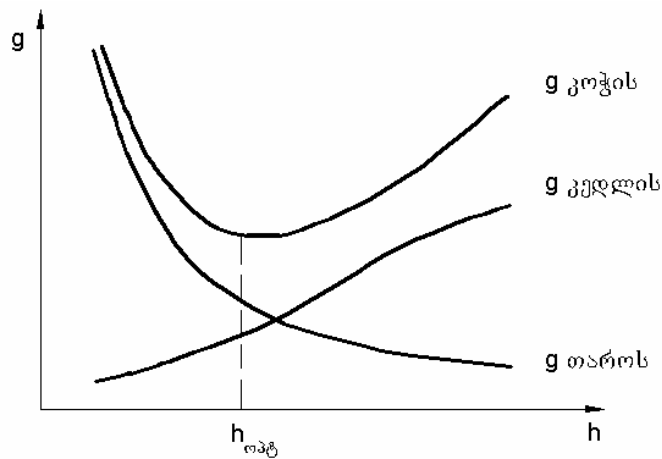
$$h_{\text{მინ.}} = \frac{l^2}{10^7 [f]} R \frac{\sum p^{\delta} + \sum q^{\delta}}{\sum p + \sum q}, \quad (5.4)$$

(5.4) ფორმულის გამოყენება შეიძლება სხვა სახის დატვირთვების დროსაც, როცა გალუნვის მომენტების ეპიურა ახლოსაა თანაბრად განაწილებული დატვირთვის ეპიურასთან.

სიხისტის პირობიდან ნაპოვნი კოჭის სიმაღლე წარმოადგენს მის ყველაზე ნაკლებ, შესაძლო სიმაღლეს; ნაკლები სიმაღლის კოჭის დროს გალუნვა იქნება ნორმაზე მეტი. თუ ასეთი სიმაღლის დროს კოჭი სცდება გადახურვის მოცემული სამშენებლო სიმაღლის საზღვრებს, ის უნდა შეირჩეს ნაკლები დატვირთვით, ანუ ლითონის გადახარჯვით.

### 3.4 კოჭის კვეთის სიმაღლის განსაზღვრა ლითონის ეკონომიის პირობიდან გამომდინარე

კოჭის კვეთის სიმაღლის ზრდისას მცირდება სარტყელთა წონა  $G_{\text{სარტ.}}$ , ხოლო კედლის წონა  $G_{\text{კედ.}}$  იზრდება (ნახ. 5. 2). კოჭის სრულ წონას  $G_{\text{კოჭ.}}$  მინიმალური მნიშვნელობა აქვს კვეთის ოპტიმალური სიმაღლის დროს, კვეთის სიმაღლის გადახრისას იზრდება ოპტიმალური მნიშვნელობიდან ერთ ან მეორე მხარეს.



ნახ. 5.2 კოჭის წონის ცვლილება მისი კვეთის სიმაღლის მიხედვით.

განვსაზღვროთ კოჭის კვეთის ოპტიმალური სიმაღლე, რომლის დროსაც კოჭის წონა იქნება მინიმალური.

კოჭის წონა, რომელიც უდრის ორი სარტყელის წონისა და კედლის წონის ჯამს 1 მ-ზე.

$$g_{\text{კოჭ.}} = g_{\text{სარტ.}} + g_{\text{კედ.}} = \frac{2Mc}{hR} \gamma \psi_{\text{სარტ.}} + h \delta_{\text{კედ.}} \gamma \psi_{\text{კედ.}} \quad (5.5)$$

აქ,  $M$  საანგარიშო დატვირთვისგან მიღებული ღუნვის მომენტია;

$h$  - კედლის სიმაღლე, რომელიც პირობითად უტოლდება კოჭის სიმაღლეს;

$\frac{Mc}{h}$  - ძალა ერთ-ერთ სარტყელში, სადაც  $c < 1$  - კოეფიციენტი,

რომელიც მიუთითებს, ღუნვის მომენტის რა ნაწილი აღიქმება სარტყელების მიერ (მომენტის დანარჩენი ნაწილი აღიქმება კედლის მიერ);

$R$  - ნაგლინი ფოლადის საანგარიშო წინაღობა ღუნვასთან მიმართებაში;

$\delta_{\text{კედ.}}$  - კოჭის კედლის სისქე;

$\gamma$  - ფოლადის კუთრი წონა;

$\psi_{\text{სარტ.}}$ ,  $\psi_{\text{კედ.}}$  - სარტყელისა და კედლის კონსტრუქციული კოეფიციენტები,

რომლებიც მიუთითებენ, თუ რამდენჯერაა ფაქტიური სარტყელის წონა (ზედნადებისა და სხვა დეტალების არსებობის გამო) და ფაქტიური კედლის წონა (პირაპირი ზედნადებების და სიხისტის წიბოების არსებობის გამო) მათ თეორიულ წონაზე მეტი.

კონსტრუქციის კოეფიციენტები დამოკიდებულია კოჭის კონსტრუქციაზე და მათი მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრ. 5. 1.

შედულებულ კოჭებში  $\psi_{\text{სართ.}}$  კოეფიციენტის მნიშვნელობა მიიღება ერთეულზე ნაკლები, რამდენადაც სართყელთა კვეთი საყრდენთან მცირდება, მაშინ როცა კოჭის თეორიული წონა იანგარიშება ყველაზე მეტი კვეთის მიხედვით.

კედლის სისქე  $\delta_{\text{კედ.}}$  ხშირად აღებულია კონსტრუქციული მოსაზრებებით ან სიმაღლისაგან დამოუკიდებელი ლითონის მუდმივას გათვალისწინებით.

ვუტოლებთ რა ნულს  $h$ -სგან წარმოებულს, (5.5) გამოსახულებიდან ვიღებთ

$$\frac{dg_{\text{კოჭ.}}}{dh} = -\frac{2Mc\gamma\psi_{\text{სართ.}}}{R} \frac{1}{h^2} + \delta_{\text{კედ.}} \gamma \psi_{\text{კედ.}} = 0, \quad (5.6)$$

საიდანაც

$$h_{\text{ოპტ.}} = \sqrt{\frac{2c\psi_{\text{სართ.}}}{\psi_{\text{კედ.}}} \frac{M}{R\delta_{\text{კედ.}}}} = k \sqrt{\frac{M}{R\delta_{\text{კედ.}}}} = k \sqrt{\frac{W}{\delta_{\text{კედ.}}}}, \quad (5.7)$$

სადაც  $W$  - კოჭის წინაღობის მომენტი (ბრუტო);

$k$  - კოეფიციენტი, რომელიც უდრის  $\sqrt{\frac{2c\psi_{\text{სართ.}}}{\psi_{\text{კედ.}}}}$

( $k$  მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრ. 5. 1).

(5.6) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ კოჭის კვეთის ოპტიმალური სიმაღლის დროს სართყელთა წონა უტოლდება კედლის წონას. ეს დასკვნა არაა სრულად ზუსტი, რანდენადაც ის მიღებულია  $c$  კოეფიციენტის მუდმივობის დაშვებით. სინამდვილეში  $c$  კოეფიციენტი იცვლება კედლისა და სართყელთა ზომების თანაფარდობის მიხედვით. თუ გავითვალისწინებთ ამ გარემოებას, კოჭის ოპტიმალური სიმაღლე რამდენადმე უფრო მეტია. გარდა ამისა, კოჭის კედლის სისქე არ წარმოადგენს მუდმივს, იცვლება რა კედლის სიმაღლის 1/80 - 1/120 - დან 1/200 - 1/250 -მდე მცირე კოჭებისათვის და ნაკლებია - დიდისთვის. ზოგადად კედლის სისქე შეიძლება ავიღოთ

$$\delta_{\text{კედ.}} = \nu h^t, \quad (5.8)$$

სადაც  $\nu$  პროპორციულობის კოეფიციენტია.

მაშინ

$$h_{\text{ობ.}} = k_{t+2} \sqrt{\frac{W}{v(t+1)}} , \quad (5.8')$$

სადაც  $k = k_{t+2} \sqrt{\frac{2c\psi_{\text{სარტ.}}}{\psi_{\text{კელ.}}}}$  .

პრაქტიკის მონაცემებიდან გამოდინარე  $t$  არის  $1/2$  ტოლი, ანუ

$$\delta_{\text{კელ.}} = v\sqrt{h} \quad (5.9)$$

ამ შემთხვევაში

$$v = \left( \frac{1}{10} \div \frac{1}{13} \right) b\theta^{\frac{1}{2}} ,$$

და

$$h_{\text{ობ.}} = k_{5/2} \sqrt{\frac{W}{1,5v}} , \quad (5.9')$$

სადაც  $k = k_{5/2} \sqrt{\frac{2c\psi_{\text{სარტ.}}}{\psi_{\text{კელ.}}}}$  . რამდენადაც  $5/2$  ხარისხი საკმაოდ ახლოსაა  $2$  -თან,

(5.9') ფორმულაში შეიძლება ჩაისვას კვადრატული ფესვი და  $k$  მნიშვნელობები ასევე შესაძლებელია ავიღოთ ცხრ. 5. 1 მიხედვით.

თუ  $t = 1/2$ ,  $g_{\text{სარტ.}} = 3/2 g_{\text{კელ.}}$  , ანუ კოჭის კვეთის მასალა ნაწილდება სარტყელებსა და კედელს შორის 3:2 თანაფარდობით.

შეიძლება აღვნიშნოთ, რომ მცირე და საშუალო სიმაღლის ( $h \leq 2 \theta$ ) კოჭებისთვის ყველაზე სწორია გამოვიდეთ კედლის სისქის მუდმივიდან და ოპტიმალური სიმაღლე განისაზღვროს (5.7) ფორმულით, ხოლო მაღალი კოჭებისთვის – (5.9') ფორმულით, ანუ  $t = 1/2$  .



$\psi$  და  $k$  კოეფიციენტთა მნიშვნელობები (5.7) და (5.9) ფორმულებში

კოჭების ტიპები	მუდმივი კვეთი			ცვლადი კვეთი		
	$\psi_{თარ.}$	$\psi_{კვლ.}$	$k$	$\psi_{თარ.}$	$\psi_{კვლ.}$	$k$
შედლებული	1	1,2	1,1	0,8	1,2	1
მოქლონილი	1,3	1,3	1,25	1	1,3	1,1

კოჭის ოპტიმალური სიმაღლე წონის მიხედვით წარმოადგენს კოჭის ყველაზე რაციონალურ სიმაღლეს. კოჭის უფრო მეტი სიმაღლის დროს იზრდება მისი წონა და რთულდება კონსტრუქცია. კოჭის სიმაღლეს, ჩვეულებრივ, ყველაზე მეტ - წონის მიხედვით ოპტიმალურსა და სიხისტის პირობიდან ნაპოვნ ყველაზე ნაკლებს შორის, იღებენ გადახურვის კონსტრუქციისა და სამშენებლო სიმაღლის მიხედვით. ამასთან, აღსანიშნავია ის, რომ საკმაოდ დიდი გადახრები წონის მიხედვით ოპტიმალური სიმაღლისგან (15-20% -მდე) მხოლოდ უმნიშვნელოდ აისახება კოჭის წონაზე, რამდენადაც ფუნქციების რაოდენობრივი მნიშვნელობა, მათ მინიმუმთან მიახლოებული, ჩვეულებრივ, სუსტად იცვლება (ნახ. 5. 2).

## 1. კოჭების უჯრედების გამოთლიანება

გადახურვების, მოედნების, ხიდებისა და სხვა კონსტრუქციების სავალი ნაწილის მზიდი კოჭების სისტემას ეწოდება კოჭების უჯრედი. სასარგებლო დატვირთვისა და საკუთარი წონისგან საყრდენზე დატვირთვის გადამცემ კოჭებს ეწოდება მთავარი; მთავარ კოჭებზე დაყრდნობილს კი – დამხმარე; ამ უკანასკნელს შეიძლება დაეყრდნოს მთავარი კოჭის პარალელურად განლაგებული დამხმარე კოჭების კიდევ ერთი სისტემა. ამრიგად, დამხმარე კოჭები მთავარ კოჭთან განლაგების მიხედვით შეიძლება იყოს განივი და გრძივი (ნახ. 5. 3).

## 2. კოჭების უჯრედების ტიპები

პრაქტიკაში გამოიყენება კოჭის უჯრედების შემდეგი 3 ტიპი: გამარტივებული, ნორმალური და გართულებული (ნახ. 5. 3).

გამარტივებული ტიპის კოჭის უჯრედებში არსებობს მხოლოდ ერთი მიმართულების კოჭები - მთავარი კოჭები. ასეთ უჯრედებში ადგილი აქვს სასარგებლო დატვირთვის ორსახოვან გადაცემას: ფენილის მიერ მიღებული დატვირთვა გადაეცემა მთავარ კოჭებს (I საფეხური) და მთავარი კოჭებიდან – საყრდენ კოჭებს (II საფეხური).

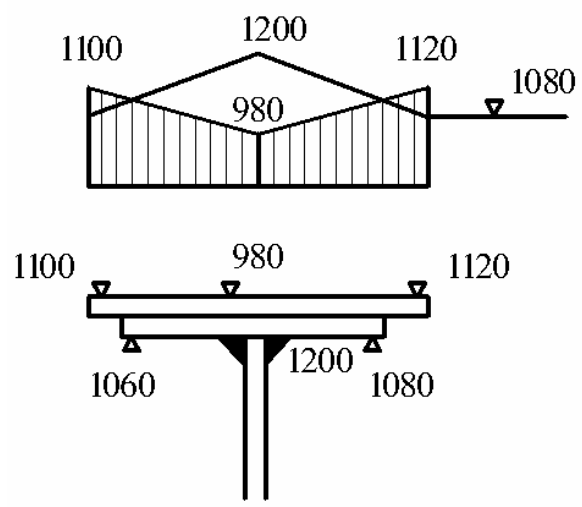
ნორმალური ტიპის კოჭის უჯრედებში არის კოჭების ორი სისტემა – მთავარი და დამხმარე (განივი). აქ სახეზეა სასარგებლო დატვირთვის სამსახოვანი გადაცემა: ფენილიდან დამხმარე კოჭებზე (I საფეხური), დამხმარე კოჭებიდან – მთავარზე (II საფეხური) და მთავარი კოჭებიდან – საყრდენზე (III საფეხური).

კოჭების უჯრედების გართულებულ ტიპში არის სამი სისტემა – მთავარი, დამხმარე განივი და დამხმარე გრძივი. ასეთ უჯრედებში სახეზეა სასარგებლო დატვირთვის ოთხსახოვანი გადაცემა.

### 3. შედგენილი კვეთის კოჭები

ა) კოჭების კვეთის გაერთმთლიანება და შერჩევა.

შედგენილ კოჭებს ჩვეულებრივ გააჩნია ორტყესბრი კვეთი, რომელიც შედგება კედლისა და ორი სარტყელისაგან. შედუღებულ კოჭებში სარტყელი უმჯობესია იყოს უნივერსალური ფოლადის ცალკეული ფურცლისაგან, მათი კედელთან სარტყელის ნაწიბურებით მირჩილვით (ნახ. 5. 1, ბ). სარტყელის შესრულება რამდენიმე ფურცლისაგან (ნახ. 5. 3) ნაკლებად რაციონალურია, რამდენადაც იზრდება დამზადების შრომატევადობა, შინაგანი ძაბვა, რაც მთავარია ძაბვა ფურცლებს შორის ნაწილდება არათანაბრად, რაც აუარესებს კოჭის მუშაობას.



ნახ. 5.3 შედუღებული კოჭის სარტყელის ფურცლებს შორის დატვირთვის განაწილება

ძლიერ შედუღებულ კოჭებში

სარტყელი სრულდება 40 მმ-მდე სისქის ცალკეული ფურცლებისგან. უფრო სქელი ფურცლების გამოყენებისას უნდა გათვალისწინებული იყოს, რომ ნაკლები შემოჭლომის შედეგად სქელ ფურცლებს გააჩნია დენადობის ზღვრის დაბალი მნიშვნელობები და დაბალი საანგარიშო წინააღობა.

გარდა ამისა, უფრო სქელი ფურცლების გამოყენება ძნელია ქარხნებში არსებული მოწყობილობის მეშვეობით.

ზოგჯერ, კედლიდან სარტყელზე ძალის გადაცემისა და ამ უკანასკნელის სიხისტის ზრდისთვის დახვევის საპირისპიროდ, სარტყელი სრულდება ფურცლისა და კუთხედისაგან, რომელიც სარტყელის ფურცელთან მირჩილულია ფრთით. კედელთან კი ქარჩით (ნახ. 5. 1, გ), ან სარტყელს აძლიერებენ დაქანებული ფურცლების მიღულებით (ნახ. 5. 1, დ). თუმცა, ასეთი კონსტრუქციის დროს კოჭების დამზადების შრომატევადობა მკვეთრად იზრდება. ამიტომ, ამგვარი გადაწყვეტილება უნდა იქნეს მიღებული მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ კოჭის ექსპლუატაციის პროცესში შესაძლებელია სარტყელის მუშაობა გრეხვაზე დატვირთვის ექსცენტრული დანართის შედეგად.

მოქლონილ კოჭებში კვეთი შედეგება კედლისა და მასთან მიმაგრებული კუთხოვანებისგან (ნახ. 5. 1, გ). მეტი დატვირთვისა და განის დროს კვეთი ვითარდება სარტყელის ფურცლების მიკრობის გზით (ნახ. 5. 1, ზ). დამზადების შრომატევადობის შემცირების მიზნით სარტყელის ფურცლების რაოდენობა ჩვეულებრივ სამზე მეტი არ უნდა იყოს.

უმჯობესია სარტყელის ფურცელი იყოს არაუმეტეს 600 მმ. სიგანისა. ძლიერ მოქლონილ კოჭებში, განსაკუთრებით ადგილობრივი დატვირთვის არსებობისას (მაგ. , ამწესქვეშა კოჭებში) კედელს სარტყელთან ახლოს აძლიერებენ გრძივი ზოლებით – ლამელებით, რომელთაც ათავსებენ კედელსა და სარტყელის კუთხეებს შორის (ნახ. 5. 1, თ).

კვეთის შერჩევასა საჭიროა დადგინდეს ძირითადი სიდიდე – კოჭის სიმაღლე, რომელზედაც დამოკიდებულია კვეთის ყველა დანარჩენი ზომა.

კოჭის სიმაღლე უნდა იყოს ფურცლების ზომის შესაბამისი სორტამენტის მიხედვით. ფურცლოვანი ფოლადის მაქსიმალური სიგანე შეადგენს 2000 - 2400 მმ -ს, ამიტომაც საჭიროა კოჭის სიმაღლე იყოს აღნიშნულ ფარგლებში.

საჭიროების შემთხვევაში მეტი სიმაღლის კოჭის მიღება შესაძლებელია კედელში გრძივი პირაპირის გათვალისწინებით (ნახ. 5. 1, ე, ვ).

კოჭის კვეთის სიმაღლე  $h$  (ნახ. 5. 1, ბ, ზ) განისაზღვრება ფურცლის სიგანით, რომლისგანაც სრულდება კედელი. მოქლონილ კოჭებში ფურცელი, ჩვეულებრივ, თავსდება კუთხეების ქარჩის უკან 5 მმ - ზე ნაწიბურების უთანასწორობის დასაფარავად (ნახ. 5. 4, ა). ზოგჯერ საჭიროა კედლის დასრულება ზემოთ ერთ ღონეზე კუთხეების ქარჩებით ადგილობრივი დატვირთვის გადასაცემად; ამ შემთხვევაში კედელი ზემოთაა გაშვებული სარტყელის კუთხეებზე 5 მმ-ით და შემდეგ ხდება მათი მორანდვა (ნახ. 5. 4, ბ).

კედლის სისქე სრულდება გადანაჭერზე სიმტკიცის და ადგილობრივი მდგრადობის უზრუნველყოფის პირობებიდან გამომდინარე.

კედლის ყველაზე ნაკლები სისქე გადანაჭერის წინაღობის პირობიდან გამომდინარე (სარტყელის მუშაობის გათვალისწინების გარეშე) განისაზღვრება ფორმულით:

$$\delta_{\text{კედ.}} = 1,5 \frac{Q}{R_{\text{კედ.}} h_{\text{კედ.}}} . \quad (5.10)$$

მაღალი კოჭების კედლები საკმაოდ თხელია და მათ ამაგრებენ ადგილობრივი მდგრადობის დანაკარგის წინააღმდეგ სიხისტის განივი წიბოებით, ხოლო საჭიროებისას – დამატებითი გრძივი წიბოებით. კედლის სიმაღლის ზღვრული ფარდობა მის სისქესთან  $\frac{h_0}{\delta_{\text{კედ.}}}$ , რომლის დროსაც საჭირო არაა კედლის

გამაგრება წიბოებით, აღნიშნულია ცხრილში 5. 3

ცხრ. 5. 3 –ში მიღებული აღნიშვნებია:

$h_0$  - კედლის საანგარიშო სიმაღლე, მიღებული შედუღებულ კოჭში, რაც უდრის სრულ სიმაღლეს, ხოლო მოქლონილში – მანძილს სარტყელის კუთხეების შიდა რისკებს შორის (ნახ. 5. 1, ზ),

$\delta_{\text{კედ.}}$  - კედლის სისქე.

ფოლადის კოჭების კედლის სისქე პრაქტიკული მიზნებისათვის შეიძლება განისაზღვროს (5.9) ფორმულით, ან შემდეგი ფორმულით

$$\delta_{\text{კედ.}} = 7 + 3h \text{ მმ} , \quad (5.11)$$

სადაც  $h$  - კოჭის სიმაღლე მ - ში,

$\delta_{კლ.}$  - კელის სისქე მმ -ში.

ალუმინის შენადნობის კოჭებისთვის კელის სისქე რამდენადმე მეტია (2-10 მმ - ით)

ც ხ რ ი ლ ი 5. 3.

კელის სიმაღლის ყველაზე მეტი ფარდობა მის სისქესთან შედგენილი კვეთის კოჭებში, რომელთა დროსაც საჭირო არაა სიხისტის წიბოებით გამაგრება.

ფოლადის ან ალუმინის შენადნობის მარკა		უდიდესი შეფარდება $\frac{h_0}{\delta_{კლ.}}$ , რომლის დროსაც არაა საჭირო სიხისტის წიბოს დაყენება			
		განივ		გრძივ	
		კოჭებში			
		შელულებულ	მოქლონურ	შელულებულ	მოქლონურ
ფოლადის კოჭები	Ст. 3				
	Ст. 5	70		160	
	14Г2,	65		140	
	15ГС,	60		130	
	15ХСНД				
კოჭები ალუმინის შენადნობისგან	АМГ	60	--	150	--
	АМГ6	60	80	115	125
	АВТ1	70	75	105	115
	Д16Т	45	55	--	90

კოჭის სარტყლის საჭირო ფართობს იღებენ იმ პირობიდან, რომ კოჭის წინალობის ფაქტიური მომენტი პასუხობდეს წინალობის საჭირო მომენტს.

წინალობის საჭირო მომენტი უდრის

$$W_{საჭ.} = \frac{M}{R}, \quad (5.12)$$

სადაც  $M$  საანგარიშო დატვირთვისაგან გამოწვეული ღუნვის მომენტია.

კოჭის მთელი კვეთის ინერციის საჭირო მომენტი

$$J_{საჭ.} \approx W_{საჭ.} \frac{h}{2} = \frac{Mh}{2R}. \quad (5.13)$$

შედულებულ კოჭებში სარტყლის ფურცლების ინერციის საჭირო მომენტი

$$J_{ს. საჭ.} = J_{საჭ.} - J_{ძღ.} = J - \frac{\delta_{ძღ.} h^3}{12}. \quad (5.14)$$

სარტყლის ფურცლების ინერციის მომენტი შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით (ნახ. 5. 1, ბ)

$$J_{სარტ.} \approx 2F_{სარტ.} \left(\frac{h}{2}\right)^2. \quad (5.15)$$

თუ მის მნიშვნელობას გაუვტოლებთ  $I_{საჭ.ფართ.}$  სიდიდეს, მივიღებთ ერთი სარტყელის საჭირო კვეთის ფართობს

$$F_{თარ.} = \frac{2I_{საჭ.ფართ.}}{h^2}. \quad (5.16)$$

იმისათვის, რომ კოჭმა დროზე ადრე არ დაკარგოს საერთო მდგრადობა, შეკუმშული სარტყელის სიგანე უნდა იყოს საკმარისი და უნდა შეესატყვისებოდეს 5. 3 და 5. 4 ცხრილებში მოყვანილ სიდიდეებს.

ც ხ რ ი ლ ი 5. 4

$l/b$  უდიდესი შეფარდებები, რომლის დროსაც არ არის საჭირო ფოლადის СТ. 3 - საგან დამზადებული ორტყესბრი კოჭების შემოწმება მდგრადობაზე

კოჭების ტიპი	$\frac{h}{b}$	$h/\delta_2 = 100$				$h/\delta_1 = 50$			
		დატვირთვისას მოდებული		ზედა სარტყელზე უკუაღებული ჩამაგრების არსებობის შემთხვევაში დატვირთვის მოდების	დატვირთვისას მოდებული		ზედა სარტყელზე უკუაღებული ჩამაგრების არსებობის შემთხვევაში დატვირთვის მოდების		
		ზედა სარტყელზე	ქვედა სარტყელზე		ზედა სარტყელზე	ქვედა სარტყელზე			
შედულებული	2	18	28	22	19	30	23		
	4	16	26	19	18	27	21		
	6	15	24	18	16	25	19		
მოქლონილი	2	21	30	24	30	42	33		
	4	18	28	21	25	35	27		
	6	16	25	19	21	32	24		

შ ე ნ ი შ ვ ნ ა. სხვა ფოლადებისაგან დამზადებული კოჭებისათვის  $l/b$  - ს მითითებული მნიშვნელობები მრავლდება  $\sqrt{\frac{2,1}{R}}$ , (სადაც  $R$  მოცემულია  $მ/სმ^2$ ).

ც ხ რ ი ლ ი 5. 5

$l/b$  უდიდესი შეფარდებები, რომლის დროსაც არ არის საჭირო ალუმინის შენადნობებისაგან დამზადებული ორტესებრი კოჭების შემოწმება მდგრადობაზე (როცა  $l/b = 3-5$ )

კოჭების ტიპი	ალუმინის შენადნობის მარკა	დატვირთვისას მოღებული		ზედა სარტყელზე უკლებლური ჩამაგრების არსებობის შემთხვევაში დატვირთვის მოღების
		ზედა სარტყელზე	ქვედა სარტყელზე	
შედულებული და დაწნეხილი	AMγ			16,0
	AMγ6	13,0	20,0	11,0
	ABT1,	9,0	15,0	13,0
	AΔ33T1	11,0	17,0	
მოქლონილი	AMγ6,	11,0	17,0	13,0
	AΔ33T1	10,0	16,0	12,0
	ABT1	8,0	12,0	9,0
	Δ16T			

ცხრ. 5. 3 და 5. 4 მიღებული აღნიშვნები:

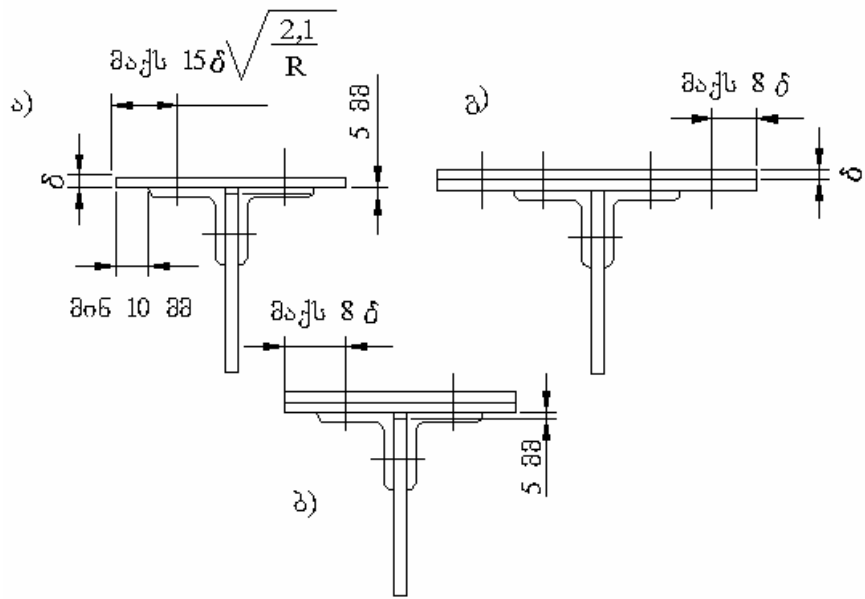
$l$  – კოჭის შეკუმშული სარტყლის თავისუფალი სიგრძე, რომელიც უდრის მანძილს მისი დამაგრების წერტილებს შორის განივი გადაადგილებიდან (გრძივი კავშირების კვანძები, ხისტი ფენილის დაყრდნობის წერტილები) ან განივ კავშირებს შორის, რომლებიც ხელს უშლიან კოჭის კვეთის ბრუნვას;

$l$  დამაგრებათა არარსებობისას – კოჭის განი:

$b, d_1$  – შეკუმშული სარტყლის სიგანე და სისქე;

$h$  – კოჭის კვეთის სრული სიმაღლე.

ჩვეულებრივ სარტყლის სიგანეს იღებენ  $1/3 - 1/5 h$  ფარგლებში. ძაბვა საკმაოდ ფართო სარტყლის დროს არათანაბრად ნაწილდება სარტყლის სიგანეზე; ძალიან ვიწრო კოჭები მოითხოვენ კავშირების ხშირად დამაგრებას და ამიტომ გამოუსადეგარია.



ნახ. 5.4 სარტყლის ფურცლების ყველაზე დასაშვები  
კიდული მოქლონილ კოჭებში

მოცემულია რა სარტყლის სიგანე  $b$  პოულობენ მის სისქესაც

$$\delta = \frac{F_{\text{სარტ.}}}{b} \quad (5.17)$$

ფოლადის კოჭის შეკუმშული სარტყლის კიდულის სიგანე ადგილობრივი სიმტკიცის პირობების მიხედვით არ უნდა იყოს  $15\delta\sqrt{\frac{2,1}{R}}$  – ზე მეტი, სადაც  $\delta$  კიდულის სისქეა,  $R$  – საანგარიშო წინალობა ტ/სმ<sup>2</sup>. შედულებულ კოჭებში კიდული უდრის სარტყლის სიგანის  $\frac{1}{2}$ ; მოქლონილ კოჭებში – მანძილს განაპირა სარტყლის მოქლონივიდან ფურცლის კიდემდე (ნახ. 5.4) ალუმინის შენადნობებისაგან მიღებული კოჭებისთვის კიდულს იღებენ ცხრ. 5. 2 მიხედვით.



ც ხ რ ი ლ ი 5. 2.

ალუმინის შენადნობებისაგან დამზადებული დაწნეხილი პროფილების ზომების ზღვრული ფარდობები

ფარდობა	ზღვრული ფარდობები შენადნობებისათვის			
	$\frac{b_{\text{სარტყ.}}}{t}, \frac{b_{\text{კოჭ.}}}{t}$ და $\frac{h_0}{\delta_{\text{კლ.}}}$			
	AMr	AMr 6	ABT 1	Д16Т
$\frac{b_{\text{სარტყ.}}}{t}$	11,0	10	11,0	7,5
$\frac{b_{\text{კოჭ.}}}{t}$	13,5	13,0	13,5	9,5
$\frac{h_0}{\delta_{\text{კლ.}}}$	80,0	60,0	70,0	45,0

აღნიშნული მოსაზრებების საფუძველზე ადგენენ სარტყლის ფურცლის სიგანესა და სისქეს სორტამენტის ფარგლებში.

მოქლონილ კოჭებში სარტყლის კუთხეები ჩვეულებრივ ტოლგვერდაა. სარტყლის ფურცლების გარეშე (ნახ. 5. 1, ვ) კოჭების მოწყობის შემთხვევაში სარტყლის კუთხეები ტოლგვერდაა და მათ ამაგრებენ კედელთან ვიწრო თარობით.

კუთხეების სიგანე (კალიბრი) დაახლოებით საშუალო კოჭებისათვის  $b_{\text{კუთ.}} = \frac{h}{10}$ ,

დიდი კოჭებისთვის მას ამაღლებენ  $b_{\text{კუთ.}} = \frac{h}{20}$  –მდე ( $h$  – კოჭის სიმაღლე).

რამდენადაც კუთხეების სიგანე განსაზღვრავს სარტყლის სიგანეს, კუთხეების კალიბრი დგინდება სარტყლის სიგანესთან მიმართებაში მოყვანილი მოსაზრებების საფუძველზე.

სარტყლის კუთხეების სისქე უნდა ავიღოთ კედლის სისქის ტოლად, რამდენადაც ეს აადვილებს სამონტაჟო პირაპირების მოწყობას.

მოქლონილ კოჭებში სარტყლის ფურცლებით ძალის უკეთესი გადაცემისას კედლიდან სარტყლის ფურცლებზე და კედლებთან მასალის მეტი

კონცენტრაციისთვის სასურველია, რომ ორი სარტყლის კუთხის კვეთის ფართობი შეადგენდეს არანაკლებ 30% მთელი სარტყლის კვეთის ფართობიდან.

ისევე როგორც შედუღებულ კოჭებში სარტყლის ფურცლები განისაზღვრება იმ პირობიდან, რომ კოჭის კვეთს ჰქონდეს წინალობის საკმარისი მომენტი, რაც მოქლონილ კოჭებში უდრის

$$W_{საჭ.}^{ბრ.} = 1,2 W_{ნეტ.} \frac{1,2M}{R}.$$

სარტყლის ფურცლების ინერციის საჭირო მომენტი

$$I_{ფ. საჭ.}^{ბრ.} = \frac{1,2M}{R} \cdot \frac{h}{2} - I_{კელ.}^{ბრ.} - I_{კუთ.}^{ბრ.},$$

სადაც 1,2 – ინერციის საჭირო მომენტის ზრდის კოეფიციენტია კვეთის ღიობებით დასუსტების ხარჯზე;

$I_{კელ.}^{ბრ.}$ ,  $I_{კუთ.}^{ბრ.}$  – კუთხეების და კედლის ინერციის მომენტები (ბრუტო).

ერთი სარტყლის ფურცლების საჭირო ფართობი  $F_{ფურც.}$  განისაზღვრება (5.16)

ფორმულით.

სარტყლის სიგანის დადგენის შემდეგ განსაზღვრავენ ფურცლების ჯამურ სისქეს

$\varepsilon \delta_{ფურც.} = \frac{F_{ფურც.}}{b_{ფურც.}}$  და ამის შესაბამისად ფურცლების რაოდენობას. საჭიროების

შემთხვევაში, თუ ფურცლების ჯამური სისქე არ ემთხვევა  $\sum \delta_{ფურც.}$  სიდიდეს, რამდენადმე ცვლიან ფურცლების სიგანეს.

მრავალფურცლიან პაკეტში მანძილი სარტყლის ფურცლების კიდიდან მოქლონვის უახლოეს რისკამდე, მოქლონვის სიმკვრივის უზრუნველყოფის პირობიდან გამომდინარე უნდა იყოს არა უმეტეს 8  $\delta$  ფოლადის კოჭებისთვის (ნახ. 5.4, ბ, გ), ხოლო ალუმინის შენადნობის კოჭისთვის – არაუმეტეს 6  $\delta$ . სარტყლის ფურცლების ყველაზე ნაკლები სიგანე დგინდება ისე, რომ მათი კიდული კუთხეებიდან იყოს არანაკლებ 10 მმ თითოეული მხრიდან (ნახ. 5.4, ა).

კოჭის კვეთის დადგენის შემდეგ ამოწმებენ მის სიმტკიცეს ღუნვასა და ჭრაზე.

**მაგალითი 4.** სამრეწველო საამქროს მოედნისთვის საჭიროა СТ. 3 მარკის ფოლადისგან დასაჭრელი მოქლონილი კოჭის კვეთის შერჩევა შემდეგი მონაცემების მიხედვით: კოჭის განი  $l = 10$  მ; კოჭის სიმაღლე არაუმეტეს 110 სმ; ნორმატიული დატვირთვები – დროებითი  $q^{ნორ.} = 11$  ტ/მ, კონსტრუქციის წონა –

$p^{ნორ.} = 2 \text{ ტ/მ}$ ; გადატვირთვის კოეფიციენტები: დროებითი დატვირთვის  $n_q = 1,3$  და კუთრი წონის  $n_p = 1,1$  (შესაბამისად საანგარიშო დატვირთვები  $q = q^{\epsilon} n_q = 11 \cdot 1,3 = 14,3$   $p = p^{\epsilon} n_p = 2 \cdot 1,1 = 2,2 \text{ ტ/მ}$ ); ზღვრული ჩაზნექა  $[f] = \frac{l}{400} = 2,5 \text{ სმ}$ ; მუშაობის პირობების კოეფიციენტი  $m = 1$ .

1) განვსაზღვრავთ საანგარიშო მღუნვ მომენტს და განვიძალას;

$$M = \frac{(p+q)l^2}{8} = \frac{(2,2+14,3) \cdot 10^2}{8} = 206,25 \text{ მმ};$$

$$Q = (p+q) \frac{l}{2} = (2,2+14,3) \frac{10}{2} = 82,5 \text{ მ}.$$

2) განვსაზღვრავთ წინაღობის საჭირო მომენტს (5.12) ფორმულით

$$W_{საჭ.}^{ნეტ.} = \frac{M}{R} = \frac{20625000}{2100} = 9820 \text{ სმ}^3.$$

3) განვსაზღვრავთ კოჭის სიმაღლეს:

ა) საჭირო სიხისტის (ჩაზნექის) უზრუნველყოფის პირობიდან (5.3) და (5.2) ფორმულების მიხედვით:

$$\sigma_{\epsilon} = R \frac{p^{\epsilon} + q^{\epsilon}}{p+q} = 2100 \frac{2+11}{2,2+14,3} = 1650 \text{ კგ/სმ}^2;$$

$$h_{მან.} = \frac{\sigma_{\epsilon} l^2}{10^7 [f]} = \frac{1650 \cdot 1000^2}{10^7 \cdot 2,5} = 66 \text{ სმ};$$

ბ) ლითონის ეკონომიის პირობიდან (5.7) ფორმულის მიხედვით  $k = 1,1$  და  $\delta_{კლ.} = 10 \text{ მმ}$

$$h_{კოჭ.} = k \sqrt{\frac{W}{\delta_{კლ.}}} = 1,1 \sqrt{\frac{9820}{1}} \approx 110 \text{ სმ}.$$

კოჭის კელის სიმაღლეს ვიღებთ იმ ფარგლებში რაც მოცემულია  $h_{კლ.} = 100 \text{ სმ}$  გაბარიტების მიხედვით და კოჭის სიმაღლეს კუთხეების ქარჩებზე  $h_{კოჭ.} = 101 \text{ სმ}$  (ნახ. 5. 1, თ), რაც აკმაყოფილებს მოცემულ გაბარიტებს და ასევე ლითონის სიხისტისა და ეკონომიის პირობებს.

4) განვსაზღვრავთ კელის ყველაზე ნაკლებ სისქეს (5.10) ფორმულის მიხედვით

$$\delta_{კვლ.} = 1,5 \frac{Q}{R_{კრა.} h_{კვლ.}} = 1,5 \frac{82\,500}{1\,300 \cdot 100} = 0,95 \text{ სმ.}$$

ვიღებთ  $\delta_{კვლ.} = 1 \text{ სმ.}$

5) ვნიშნავთ სარტყლის კუთხეების კვეთს

$$\delta_{კუთ.} = \frac{h}{10} = \frac{101}{10} \approx 10 \text{ სმ.};$$

$\delta_{კუთ.} = \delta_{კვლ.} = 1 \text{ სმ}$  ანუ ვიღებთ  $100 \times 10 \text{ მმ}$  კუთხეს.

6) განვსაზღვრავთ სარტყლის ფურცლების ზომებს, რისთვისაც წინასწარ ვანგარიშობთ:

ა) სრული კვეთის ინერციის საჭირო მომენტს

$$\delta_{საჭ.}^{პრ.} = 1,2 W_{ნეტ.} \left( \frac{h_{კოჭ.}}{2} + \sum \delta_{ფურც.} \right) = 1,2 \cdot 9\,820 \left( \frac{101}{2} + 2 \right) = 618\,700 \text{ სმ}^4,$$

სადაც  $\sum \delta_{ფურც.} = 2 \text{ სმ}$ , კოჭის ერთი სარტყლის ფურცლების სავარაუდო ჯამური სისქეა;

ბ) სარტყლის ფურცლების ინერციის საჭირო მომენტი

$$\begin{aligned} I_{ფ.საჭ.}^{პრ.} &= I_{საჭ.}^{პრ.} - I_{კვლ.}^{პრ.} - I_{კუთ.}^{პრ.} = I_{საჭ.}^{პრ.} - \frac{\delta_{კვლ.} h_{კვლ.}^3}{12} - 4 \left( I_{კუთ.}' + F_{კუთ.} y^2 \right) = \\ &= 618\,700 - \frac{1 \cdot 100^3}{12} - 4 \left( 179 + 19,2 \cdot 47,67^2 \right) = 360\,800 \text{ სმ}^4, \end{aligned}$$

სადაც  $I_{კუთ.}'$  – კუთხის ინერციის მომენტი სიმძიმის ცენტრთან მიმართებაში;

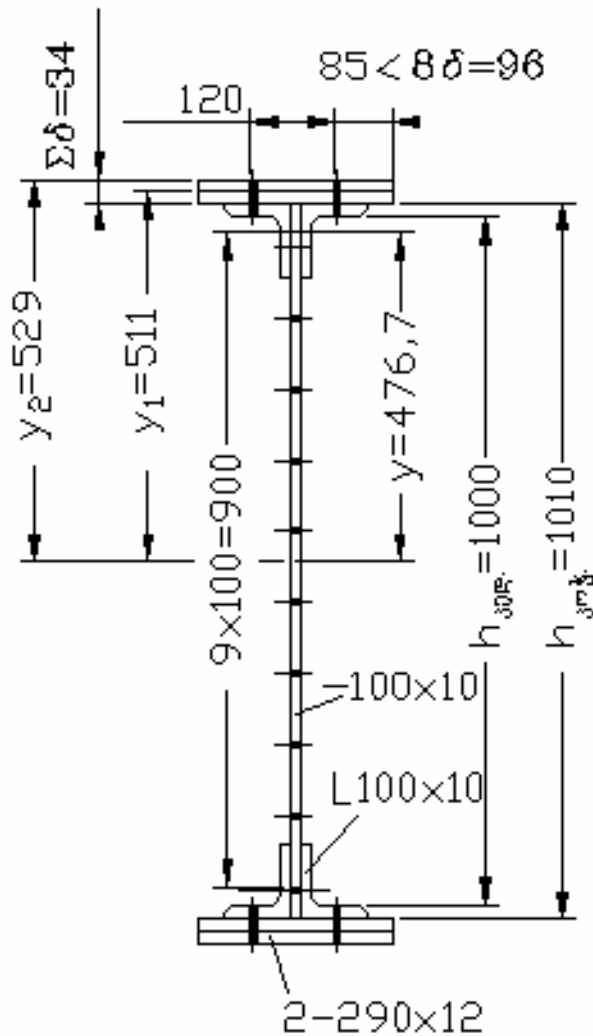
$F_{კუთ.}$  – ერთი კუთხის კვეთის ფართობი;

$y$  – მანძილი კოჭის ნეიტრალური ღერძიდან კუთხის სიმძიმის ცენტრამდე

(ნახ. 5.5).

სარტყლის ფურცლების ფართობი (5.16 ფორმულა).

$$F_{ფურც.} = \frac{2I_{ფ.საჭ.}^{პრ.}}{h^2} = \frac{2I_{ფ.საჭ.}^{პრ.}}{\left( h_{კოჭ.} + \frac{\sum \delta_{ფურც.}}{2} \right)^2} = \frac{2 \cdot 360\,800}{\left( 101 + \frac{2}{2} \right)^2} \approx 70 \text{ სმ}^2.$$



ნახ. 5.5 მოქლონილი კოჭის კვეთი  
(მაგალითი 4. მიმართებაში)

ვიღებთ 12 მმ სისქის 2 ფურცელს; მაშინ ფურცლების საჭირო სიგანა

$$b = \frac{F_{\text{ფურც.}}}{\sum \delta_{\text{ფურც.}}} = \frac{70}{2 \cdot 1,2} \approx 29 \text{ სმ.}$$

თუ ავიღებდით 10 მმ სისქის ფურცლებს, მათი სიგანე იქნებოდა 35 სმ და მაშინ მანძილი ფურცლის ნაწიბურებიდან მოქლონვის რისკამდე იქნებოდა  $\frac{35-12}{2} = 11,5 \text{ სმ}$  ანუ იმაზე მეტი ვიდრე ეს დასაშვებია მოქლონვის სიმკვრივის

(8δ) უზრუნველყოფის პირობიდან.

7) ვამოწმებთ შერჩეული კვეთის მზიდ უნარს სიმტკიცეზე.

ა) შემოწმება ჩაზნექაზე. განვსაზღვრავთ შერჩეული კვეთის (ბრუტო) ინერციის მომენტს, რისთვისაც ვანგარიშობთ:

$$I_{\text{კლ.}} = \frac{\delta_{\text{კლ.}} h_{\text{კლ.}}^3}{12} = \frac{1 \cdot 100^3}{12} = 83\,300 \text{ სმ}^4,$$

$$I_{\text{კუთ.}} = 4(I_x + F_{\text{კუთ.}} y^2) = 4(179 + 19,2 \cdot 47,67^2) = 174\,500 \text{ სმ}^4;$$

$$I_{\text{ფურც.}} = 2F_{\text{ფურც.}} \left( \frac{h_{\text{კოჭ.}}}{2} + 1,2 \right)^2 = 2 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 29(50,5 + 1,2)^2 = 372\,000 \text{ სმ}^4;$$

$$I_{\text{ბრ.}} = I_{\text{კლ.}} + I_{\text{კუთ.}} + I_{\text{ფურც.}} = 83\,300 + 174\,500 + 372\,000 = 629\,800 \text{ სმ}^4.$$

კედლის დასუსტების განსაზღვრისათვის ვიღებთ მოქლონვის განთავსებას, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 5.5 ღიობების დიამეტრი მოქლონვისთვის არის  $d = 20 \text{ მმ}$  ტოლი. მაშინ კედლის დასუსტების ინერციის მომენტი

$$I_{\text{კლ. დას.}} = 2 \cdot 1 \cdot 2(5^2 + 15^2 + 25^2 + 35^2 + 45^2) = 16\,500 \text{ სმ}^4.$$

კედლის დასუსტების ინერციის მომენტის ზუსტი განსაზღვრის ნაცვლად ვიღებთ  $I_{\text{კლ. დას.}} = 0,15 I_{\text{კლ.}}$ , რაც მოცემულ მაგალითში შეადგენს

$$I_{\text{კლ. დას.}} = 0,15 \cdot 83\,300 = 12\,500 \text{ სმ}^4.$$

სარტყელში დასუსტებას ვიღებთ მხოლოდ ვერტიკალური მოქლონვიდან (რამდენადაც კუთხეების ვერტიკალურ და ჰორიზონტალურ თაროებში მოქლონვა ჭადრაკის წესითაა განხორციელებული)

$$I_{\text{სარტ. დას.}} = 4d \sum \delta y_1^2 = 4 \cdot 2 \cdot 3,4 \cdot 51,1^2 = 71\,000 \text{ სმ}^4.$$

აქედან ვპოულობთ:

კოჭის დასუსტებული კვეთის ინერციის მომენტს

$$I_{\text{ნეტ.}} = I_{\text{ბრ.}} - I_{\text{კლ. დას.}} - I_{\text{სარტ. დას.}} = 629\,800 - 12\,500 - 71\,000 = 542\,300 \text{ სმ}^4;$$

კოჭის დასუსტებული კვეთის წინალობის მომენტს

$$W_{\text{ნეტ.}} = \frac{I_{\text{ნეტ.}}}{y_2} = \frac{542\,300}{52,9} = 102\,400 \text{ სმ}^3.$$

ვამოწმებთ კოჭის მზიდ უნარს ჩაზნექაზე და განვსაზღვრავთ ნორმალურ დაბვას

$$\sigma = \frac{M}{W_{\text{ნეტ.}}} = \frac{20\,625\,000}{102\,400} = 2\,020 \text{ კგ/სმ}^2 < 2\,100 \text{ კგ/სმ}^2,$$

ანუ ჩაზნექვაზე კოჭის მზიდი უნარი უზრუნველყოფილია.

ბ) კ ე ლ ლ ი ს შ ე მ ო წ მ ე ბ ა ჭ რ ა ზ ე. კოჭს ვაპროექტებთ ცვლადი კვეთის სახით; ამიტომ, საყრდენი კვეთი შედგება კელისა და სარტყლის კუთხეებისგან.

კელის შემოწმება კვეთაზე ხდება საყრდენთან  $\tau = \frac{QS_{პრ.}}{I_{პრ.} \delta_{კელ.}} \leq R_{ჭრა.}$  ამ ფორმულის

მიხედვით, რისთვისაც ვანგარიშობთ

$$I_{პრ.} = I_{კელ.} + I_{კუთ.} = 83\,300 + 174\,500 = 257\,800 \text{ სმ}^4;$$

$$S_{პრ.} = \delta_{კელ.} \frac{h_{კელ.}}{2} \frac{h_{კელ.}}{4} + 2F_{კუთ.} y = 1 \frac{100^2}{8} + 2 \cdot 19,2 \cdot 47,67 \approx 1\,960 \text{ სმ}^3.$$

მხები ძაბვა

$$\tau = \frac{QS_{პრ.}}{I_{პრ.} \delta_{კელ.}} = \frac{82\,500 \cdot 1\,960}{257\,800 \cdot 1} = 625 \text{ კგ/სმ}^2 < 1\,300 \text{ კგ/სმ}^2,$$

ანუ უზრუნველყოფილია კოჭის მზიდი უნარი კელის ჭრაზე.

ამგვარად, ორივე შემოწმება ( $M$  და  $Q$ ) გვიჩვენებს, რომ კოჭის საანგარიშო პირობები პირველი ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით დაკმაყოფილებულია.

8) ვამოწმებთ კოჭის შერჩეული კვეთის სიხისტეს.

ასეთი შემოწმება წარმოადგენს გაანგარიშებას მეორე ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით. ამიტომ, გაანგარიშებას ვაწარმოებთ ნორმატიული დატვირთვების მიხედვით (გადატვირთვის კოეფიციენტების გათვალისწინების გარეშე)

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{(p^{\delta} + q^{\delta}) l^4}{\alpha EI_{პრ.}} = \frac{5}{384} \frac{(110 + 20) 1\,000^4}{0,8 \cdot 2\,100\,000 \cdot 629\,800} = 1,6 \text{ სმ} < \frac{l}{400} = 2,5 \text{ სმ},$$

სადაც  $\alpha = 0,8$  – კოეფიციენტია, რომელიც ითვალისწინებს კოჭის კვეთის ცვლილებას.

ამგვარად, გაანგარიშების პირობა მეორე ზღვრული მდგომარეობის მიხედვით ასევე დაკმაყოფილებულია.

შედულებული კოჭის შერჩევა ხდება ისევე, როგორც მოქლონილის, თუმცა ის უფრო მარტივია, რამდენადაც შედულებულ კოჭს არ გააჩნია სარტყლის კუთხეები.

## თავი IV

### ზემოთაღნიშნული მეთოდების ურთიერთშედარება და მათი კრიტიკული ანალიზი

#### 4.1 შედგენილი, შედუღებული განივკვეთის ფოლადის კოჭების სიხისტის პირობების ზოგიერთი არაკორექტულობის შესახებ

განვიხილოთ ორ საყრდენზე მდებარე შედგენილი, შედუღებული განივკვეთის მქონე ფოლადის კოჭი, მალით  $\ell$ , დატვირთული თანაბრადგანაწილებული ნორმატიული და საანგარიშო დატვირთვებით, ინტენსივობით, შესაბამისად,  $q^n = p^n + g^n$  და  $q = n_p P^n + n_g g^n$ . ამ შემთხვევაში, როგორც ცნობილია, კოჭის ჩალუნვის ისარი გამოითვლება მასალათა გამძლეობიდან ცნობილი ფორმულით [1] :

$$f = \frac{5(P^n + g^n)\ell^4}{384EI} \quad (6.1)$$

სადაც  $E$  კოჭის მასალის დრეკადობის მოდულია,  $I$  – კი კოჭის განივკვეთის ინერციის მომენტი ნეიტრალური ღერძის მიმართ. კოჭის მალის შეფარდება ჩალუნვის ისრის მნიშვნელობასთან  $\left[\frac{\ell}{f}\right]$  რეგლამენტირებულია ნორმებით კოჭის დანიშნულების შესაბამისად. ლითონის კონსტრუქციების მთელ რიგ სახელმძღვანელოებში [2]; [3]; [4] მოცემულია (1) ფორმულის გარკვეული მოდიფიცირება კოჭის განივკვეთის სიმაღლის  $h$ -ის განსასაზღვრავად, კერძოდ, (6.1) ფორმულაში შეტანილია მაქსიმალური მღუნავი მომენტის გამოსახულება ნორმატიული დატვირთვისაგან:

$$M^n = \frac{(P^n + g^n)\ell^2}{8} \quad (6.2)$$

გათვალისწინებულია აგრეთვე, რომ  $I = W \frac{h}{2}$  და  $M^n = W \sigma_{(P+g)}$ , რის შედეგადაც (6.1) გამოსახულება დებულობს შემდეგ სახეს:

$$f = \frac{5\sigma_{(P+g)}\ell^2}{24Eh} \quad \text{საიდანაც} \quad h = \frac{5}{24} \frac{\sigma_{(P+g)}\ell}{E} \left[\frac{\ell}{f}\right] \quad (6.3)$$



$\sigma_{(P+g)}$  წარმოადგენს დაბვას გამოწვეულს  $(P^6 + g^6)$  ნორმატიული დატვირთვისაგან და მიზნად დასახულია, რომ ზემოთხსენებული დაბვა გამოსახული იქნას  $R$  – მასალის საანგარიშო წინააღობის საშუალებით. ამისათვის გამოყენებულია  $W$  – კოჭის განიკვეთის წინააღობის მომენტის ორგვარი გამოსახულება:

$$W = \frac{M^6}{\sigma_{(P+g)}} \quad (6.4) \quad \text{და} \quad W = \frac{M}{R} \quad (6.5) \quad \text{მათი გატოლებით მიიღება, რომ:}$$

$$\sigma_{(P+g)} = \frac{M^6}{M} R = R \frac{P^6 + g^6}{n_p P^6 + n_g g^6} \quad (6.6)$$

(6.6) – ის გათვალისწინებით და  $\left[ \frac{\ell}{f} \right]$  – დასაშვები ნორმატიული სიდიდის შეტანით (6.3) –ში საბოლოოდ მიიღება:

$$h_{\min} = \frac{5}{24} \frac{R\ell}{E} \left[ \frac{\ell}{f} \right] \frac{P^6 + g^6}{n_p P^6 + n_g g^6} \quad (6.7)$$

კოჭის კვეთის სიმაღლის  $\min$  ინდექსის აზრი ის არის, რომ კოჭის მინიმალური სიმაღლე, ანუ მინიმალური ინერციის მომენტი შეესაბამება  $\left[ \frac{\ell}{f} \right]$  – ის დასაშვებ მნიშვნელობას, კვეთის სიმაღლის უფრო შემცირება გამოიწვევდა დასაშვებზე მეტ ჩაღუნვას. (6.7) გამოსახულება წარმოადგენს, როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, (6.1) ფორმულის სახესხვაობას და მას კოჭის სიხისტის პირობას უწოდებენ. ახლა გავუკეთოთ ანალიზი მიღებულ ფორმულებს. (6.4) – ის მიხედვით დაბვა  $\sigma_{(P+g)}$  ცნობილად შეიძლება ჩაითვალოს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ცნობილი იქნება  $W$  წინააღობის მომენტი და პირიქით. (6.4) გამოსახულება ორ უცნობს შეიცავს  $W$  – ს და  $\sigma_{(P+g)}$ ; ერთის განსასაზღვრად საჭიროა მეორის ცოდნა. აქედან გამომდინარე (6.3) – დან  $h$  – ის განსაზღვრა შეუძლებელია, რადგანაც იგი დამოკიდებულია  $\sigma_{(P+g)}$  – ზე, რაც თავის მხრივ  $h$  – ზეა დამოკიდებული. ასევე (6.5) –დან გამოდის, რომ თუ განვიხილავთ  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  და ა.შ. სხვადასხვა მასალის საანგარიშო წინააღობებს, მივიღებთ  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  და ა.შ. წინააღობის მომენტებს, რომლებიც ცხადია ერთმანეთისაგან განსხვავებული იქნება, რადგანაც  $M$  საანგარიშო მდუნავი მომენტი შეესაბამება მოცემულ საანგარიშო

დატვირთვას და მუდმივი სიდიდეა. აქედან გამომდინარე, (6.4) და (6.5) ფორმულებში შემავალი  $W$  - ების გატოლება კორექტული არ არის და აქედან გამომდინარე არც  $\sigma_{(P+g)}$  ძაბვის გამოსახვა იქნება კორექტული  $R_1, R_2, \dots, R_n$  საანგარიშო წინააღობების საშუალებით. საბოლოოდ, ცხადია, არც (6.7) გამოსახულება იქნება (6.1) ფორმულის კორექტული მოდიფიცირება. (6.7) ფორმულის კრიტიკა შესაძლებელია სხვა მხრივაც: შედგენილი კოჭის განიკვეთის ელემენტების ზომებს შორის, როგორცაა კოჭის სიმაღლე, თაროს სიგანე, კედლისა და თაროს სისქეები და სხვა, არსებობს დადგენილი შესაბამისობანი ე.ი. კვეთი უნდა აკმაყოფილებდეს გარკვეულ პროპორციებს. აქედან გამომდინარე, თუ (6.7) ფორმულაში, მაგალითად,  $R$  - ს გავზრდით, შესაბამისად გაიზრდება კვეთის სიმაღლეც  $h_{\min}$ . გაზრდილ  $h_{\min}$  კი შეესაბამება  $W$ -ს და  $I$ -ს გაზრდილი მნიშვნელობები, მაშინ, როცა სიმტკიცის პირობის თანახმად, გაზრდილ  $R$  - ს შემცირებული  $W$  უნდა შეესაბამებოდეს. ურთიერთშეუთანხმებლობასთან გვექნება საქმე  $R$  - ის შემცირების შემთხვევაშიც. თუ კოჭის კვეთი არ იქნებოდა განსაზღვრული გარკვეული პროპორციებით, მაშინ  $R$  - ის გაზრდას (6.7) ფორმულის თანახმად მოჰყვებოდა  $h$  - ის გაზრდაც, მაგრამ კოჭის კვეთის სხვა ზომები შესაძლებელია ისე შერჩეულიყო, რომ  $W$  გამოსულიყო წინათ არსებულზე ნაკლები, რაც შეესაბამებოდა სიმტკიცის პირობიდან მიღებულ ნაკლებ  $W$  - ს. ასევე  $R$  - ის შემცირებითაც დაცული იქნებოდა შესაბამისობა სიხისტისა და სიმტკიცის პირობებს შორის, თუმცა კვეთის ზომები ვერ დააკმაყოფილებდა წაყენებულ მოთხოვნებს. ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ (6.7) გამოსახულების შესაბამისი სიხისტის პირობა ვერ გამოსახავს კოჭის მუშაობის ჭეშმარიტ აზრს და კოჭების სიხისტეზე გაანგარიშება უნდა მოხდეს (6.1) ფორმულით. ამისათვის წინასწარ შედგენილი უნდა იქნას სორტამენტთა ცხრილი, რომელიც დააკმაყოფილებს შედგენილი განიკვეთისათვის წაყენებულ ყველა მოთხოვნებს. (6.1) ფორმულიდან განისაზღვრება  $I_{\min}$  - ინერციის მინიმალური მომენტი, რომელიც დააკმაყოფილებს სიხისტის პირობას. შემდეგ ხსენებულ სორტამენტთა ცხრილიდან  $I$  - ს მიხედვით შეირჩევა კვეთი, რომლის  $W_{\text{ბობ.}}$  - წინააღობის მომენტი შემოწმდება სიმტკიცის პირობაზე მოცემული  $R$ -სათვის. თუ  $W_{\text{ბობ.}} = \frac{M}{R} < W_{\text{ბობ.}}$ , მაშინ ადგილი ექნება კვეთის დაუძაბავობას

და საჭირო იქნება ახალი  $R_1 < R$  ისეთი საანგარიშო წინალობის შერჩევა, რომელიც საშუალებას მოგვცემდა  $W_{სობ.}$  მიუახლოვდეს  $W_{სობ.}$  - ს. თუ  $W_{სობ.} > W_{სობ.}$  მაშინ შესაძლებელია კოჭის ზომები შერჩეული იქნას  $W_{სობ.}$  - ის მიხედვით შესაბამისი ცხრილიდან, რადგანაც ამ დროს სინისტის პირობა ავტომატურად კმაყოფილდება. შესაძლებელია აგრეთვე შეირჩეს ახალი  $R_1 > R$  საანგარიშო წინალობის მქონე მასალა, რომლის შესაბამისი  $W_{სობ.}$  წინალობის მომენტი სიდიდით მიუახლოვდება (6.1) ფორმულიდან შერჩეულ  $I$  - ს მიხედვით აღებულ  $W_{სობ.}$  წინალობის მომენტს.

#### 4.2 ფოლადის შედგენილი განიკვეთის მქონე შეღულებული კოჭების გაანგარიშების ახლებური ხერხი

როგორც ცნობილია, კლასიკური მეთოდით ფოლადის შედგენილი განიკვეთის მქონე შეღულებული კოჭების გაანგარიშებისას სინისტისა და სიმტკიცის პირობების გათვალისწინებით ისაზღვრება კოჭის განიკვეთის სიმაღლე  $h$ , რომელიც მიიღება კოჭის ინერციის მომენტის -  $I_x$ , წინალობის მომენტისა -  $W_x$  და განიკვეთის ფართობის -  $A$ , გამოსახულებებს შორის ურთიერთდამოკიდებულებებისგან. [1]; [2]; [3]

$h$  - ის შერჩევის შემდეგ საჭიროა კოჭის განიკვეთის კონსტრუირება, ანუ გარკვეული თანაფარდობების დაცვა კოჭის კვეთის პარამეტრებს შორის, როგორცაა კოჭის კედლის სიმაღლე -  $h_{კედ.}$ , კოჭის კედლის სისქე  $\delta_{კედ.}$ ; კოჭის თაროების სიგანე -  $b_{თარ.}$  და კოჭის თაროს სისქე  $t_{თ.}$ .

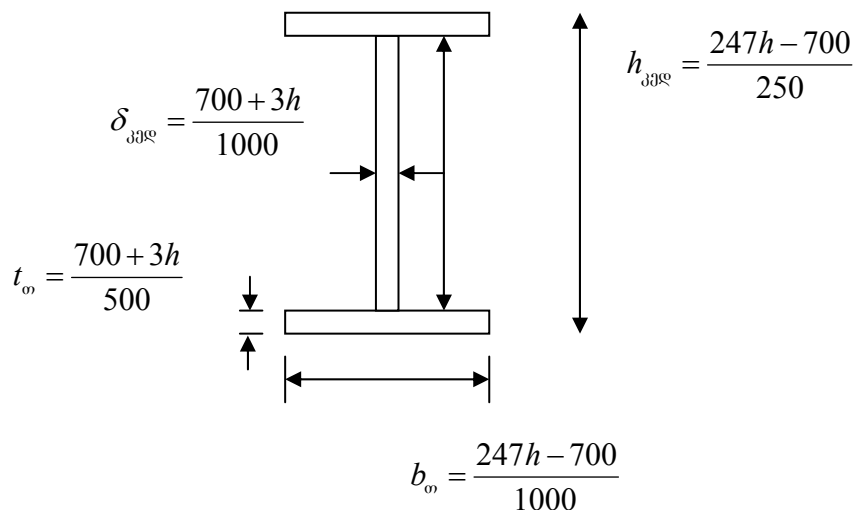
შესაბამისი მოთხოვნების დაკმაყოფილების დროს კოჭის კვეთის დაგეგმარებისას ხშირად ვერ ხერხდება ან ძნელდება კოჭის განიკვეთის ფართობის რაციონალურობის მოთხოვნა, რაც იმაში მდგომარეობს, რომ  $2A_{თ.} = A_{კედ.}$ . მიუხედავად იმისა, რომ სწორედ ამ პირობის გათვალისწინებითაა განსაზღვრული კოჭის სიმაღლე  $h$ . ე. ი. თაროების ფართობი სასურველია იყოს კოჭის კედლის ფართობის ტოლი, ანუ კოჭის მთელი განიკვეთის ფართობი თანაბრად უნდა იყოფოდეს თაროებსა და კედელს შორის. ამ სიძნელეს შესაძლებელია გვერდი

ავუაროთ, თუ შევქმნით შედგენილი კოჭების “სორტამენტს”, რომელშიც  $h$  - ების მიხედვით და ყველა მოთხოვნილი პირობის დაკმაყოფილებით მოცემული გვექნება კოჭის განივკვეთები, ინერციის მომენტები, წინააღობის მომენტები და სხვა მახასიათებლები, რაც საშუალებას მოგვცემს ერთი რომელიმე პარამეტრის, ვთქვათ, ინერციის მომენტის  $I$  ან წინააღობის მომენტის  $W$  - ს მიხედვით ავირჩიოთ ჩვენთვის საჭირო კვეთი ყველა სხვა პარამეტრებთან ერთად. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ თუ რაიმე მოსაზრებით საჭირო იქნა კვეთის პარამეტრების კორექტირება – ეს უკვე გაცილებით იოლი საქმეა. დასახული ამოცანის შესასრულებლად მიზანშეწონილია კოჭის ყველა ზემოთ აღნიშნული პარამეტრი გამოისახოს კოჭის სიმაღლის  $h$  - ის საშუალებით, ამისათვის ვისარგებლოთ კლასიკურ თეორიაში მოცემული ზოგიერთი რეკომენდაციით, კერძოდ:  $\delta_{კვლ} = [7\beta\beta + 3h\beta]$ , თუ შევეცდებით გამოვსახოთ ერთნაირი განზომილებით, მაშინ მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \delta_{კვლ} &= [7\beta\beta + 3h\beta] = \left(7\beta\beta + \frac{3h\beta\beta}{1000}\right)\beta = \left[\left(7\beta\beta + \frac{3h\beta\beta}{1000}\right) \cdot 0,1\right] \beta\beta = \\ &= \left(0,7\beta\beta + \frac{3h\beta\beta}{1000}\right)\beta\beta = \left[\frac{700 + 3h\beta\beta}{1000}\right]\beta\beta \end{aligned} \quad (7.1)$$

ასევე ვისარგებლოთ რეკომენდაციით  $b_w = \left(\frac{1}{2} \div \frac{1}{5}\right)h$  და მხედველობაში

მივიღოთ პირობა კოჭის განივკვეთის ფართობის რაციონალურობის შესახებ, მაშინ კვეთის პარამეტრების სიდიდეები გამოსახული  $h$  - ით იქნება შემდეგნაირი: (ნახ. 6. 1)



ნახ. 6.1 ფოლადის შედგენილი განივკვეთის მქონე შედუღებული კოჭი

შევადგინოთ კოჭის განივკვეთის ფართობის ინერციის მომენტი  $X$  - ღერძის მიმართ და ჩავთვალოთ, რომ თაროების ინერციის მომენტები საკუთარი ღერძის მიმართ უგულებელყოფილია სიმცირის გამო:

$$I_x = 2 \left( \frac{247h-700}{1000} \right) \cdot \frac{(700+3h)}{500} \cdot \left( \frac{497h-700}{1000} \right)^2 + \frac{(700+3h)}{1000} \left( \frac{247h-700}{250} \right)^3 \cdot \frac{1}{12} \text{ სმ}^4 \quad (7.2)$$

კოჭის განივკვეთის წინაღობის მომენტი ტოლი იქნება:  $W_x = \frac{2I_x}{h} \text{ სმ}^3 \quad (7.3)$

გამარტივების შემდეგ (2) და (3) გამოსახულებები მიიღებს შემდეგ სახეს

$$I_x = \frac{0,0183h^4 + 4,142h^3 - 25,836h^2 + 56,466h}{18,75} \text{ სმ}^4 \quad (7.4)$$

$$W_x = \frac{0,0366h^3 + 8,284h^2 - 51,672h + 112,932}{18,75} \text{ სმ}^3 \quad (7.5)$$

კოჭის პარამეტრების გამოთვლის შედეგად შემდეგი პროგრამით:

```
Private Sub CommandButton1_Click()
x = Val(formal.h)
d = (700 + 3 * x) / 1000
t = (700 + 3 * x) / 500
b = (247 * x - 700) / 1000
hk = (247 * x - 700) / 250
a = ((247 * x - 700) / 500) * ((700 + 3 * x) / 500) + ((247 * x - 700) / 250) * ((700 + 3 * x) / 1000)
ix = ((247 * x - 700) / 500) * ((700 + 3 * x) / 500) * ((497 * x - 700) / 1000) ^ 2 + ((700 + 3 * x) / 1000) * ((247 * x - 700) / 250) ^ 3 * (1# / 12)
w = (2# / x) * ((247 * x - 700) / 500) * ((700 + 3 * x) / 500) * ((497 * x - 700) / 1000) ^ 2 + (1# / (6 * x)) * ((700 + 3 * x) / 1000) * ((247 * x - 700) / 250) ^ 3
```

```

formal.d = d
formal.t = t
formal.b = b
formal.hk = hk
formal.a = a
formal.i = ix
formal.w = w
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton2_Click()
Dim i As Integer
For i = 2 To 432
x = Worksheets("a").Cells(i, 1)
d1 = (700 + 3 * x) / 1000
t1 = (700 + 3 * x) / 500
b1 = (247 * x - 700) / 1000
hk1 = (247 * x - 700) / 250
a1 = ((247 * x - 700) / 500) * ((700 + 3 * x) / 500) + ((247 * x - 700) / 250) * ((700 +
3 * x) / 1000)
ix1 = ((247 * x - 700) / 500) * ((700 + 3 * x) / 500) * ((497 * x - 700) / 1000) ^ 2 +
((700 + 3 * x) / 1000) * ((247 * x - 700) / 250) ^ 3 * (1# / 12)
w1 = (2# / x) * ((247 * x - 700) / 500) * ((700 + 3 * x) / 500) * ((497 * x - 700) /
1000) ^ 2 + (1# / (6 * x)) * ((700 + 3 * x) / 1000) * ((247 * x - 700) / 250) ^ 3
Worksheets("a").Cells(i, 2) = d1
Worksheets("a").Cells(i, 3) = t1
Worksheets("a").Cells(i, 4) = b1
Worksheets("a").Cells(i, 5) = hk1
Worksheets("a").Cells(i, 6) = Int(a1)
Worksheets("a").Cells(i, 7) = Int(ix1)
Worksheets("a").Cells(i, 8) = Int(w1)
Next i
End Sub

```

```

Private Sub CommandButton3_Click()

```

Me.Hide

End Sub

Private Sub CommandButton4\_Click()

forma1.h = Clear

forma1.d = Clear

forma1.t = Clear

forma1.b = Clear

forma1.hk = Clear

forma1.a = Clear

forma1.i = Clear

forma1.w = Clear

End Sub

მიიღება შემდეგი ცხრილი ნ. 1. :

$h$ , სმ	$\delta$ , სმ	$t_{\text{თ.}}$ , სმ	$b_{\text{თ.}}$ , სმ	$h_{\delta}$ , სმ	$A$ , სმ <sup>2</sup>	$I_x$ , სმ <sup>4</sup>	$W_x$ , სმ <sup>3</sup>
70	0.91	1.82	16.59	66.36	120	92338	2638
71	0.91	1.83	16.84	67.35	122	96798	2726
72	0.92	1.83	17.08	68.34	125	101407	2816
73	0.92	1.84	17.33	69.32	127	106170	2908
74	0.92	1.84	17.58	70.31	129	111088	3002
75	0.93	1.85	17.83	71.30	131	116166	3097

124	1.07	2.14	29.93	119.71	256	629653	10155
125	1.08	2.15	30.18	120.70	259	647084	10353
126	1.08	2.16	30.42	121.69	262	664862	10553
127	1.08	2.16	30.67	122.68	265	682988	10755
128	1.08	2.17	30.92	123.66	268	701469	10960
129	1.09	2.17	31.16	124.65	270	720307	11167
130	1.09	2.18	31.41	125.64	273	739508	11377
131	1.09	2.19	31.66	126.63	276	759076	11588
132	1.10	2.19	31.90	127.62	279	779015	11803
133	1.10	2.20	32.15	128.60	282	799330	12020
134	1.10	2.20	32.40	129.59	285	820024	12239
135	1.11	2.21	32.65	130.58	288	841103	12460
136	1.11	2.22	32.89	131.57	291	862572	12684
137	1.11	2.22	33.14	132.56	294	884433	12911
138	1.11	2.23	33.39	133.54	297	906692	13140
139	1.12	2.23	33.63	134.53	300	929354	13372
140	1.12	2.24	33.88	135.52	303	952423	13606
141	1.12	2.25	34.13	136.51	306	975903	13842
142	1.13	2.25	34.37	137.50	309	999800	14081
143	1.13	2.26	34.62	138.48	312	1024118	14323
144	1.13	2.26	34.87	139.47	315	1048861	14567
145	1.14	2.27	35.12	140.46	318	1074034	14814
146	1.14	2.28	35.36	141.45	321	1099642	15063
147	1.14	2.28	35.61	142.44	325	1125689	15315
148	1.14	2.29	35.86	143.42	328	1152181	15570
149	1.15	2.29	36.10	144.41	331	1179123	15827
150	1.15	2.30	36.35	145.40	334	1206518	16086

187	1.26	2.52	45.49	181.96	458	2585181	27648
188	1.26	2.53	45.74	182.94	462	2633608	28017
189	1.27	2.53	45.98	183.93	466	2682693	28388
190	1.27	2.54	46.23	184.92	469	2732444	28762
191	1.27	2.55	46.48	185.91	473	2782866	29139
192	1.28	2.55	46.72	186.90	476	2833963	29520
193	1.28	2.56	46.97	187.88	480	2885743	29904
194	1.28	2.56	47.22	188.87	484	2938211	30290
195	1.29	2.57	47.47	189.86	487	2991372	30680
196	1.29	2.58	47.71	190.85	491	3045234	31073
197	1.29	2.58	47.96	191.84	495	3099801	31470
198	1.29	2.59	48.21	192.82	499	3155079	31869
199	1.30	2.59	48.45	193.81	502	3211075	32272
200	1.30	2.60	48.70	194.80	506	3267794	32677



როგორ უნდა ვისარგებლოთ ამ ცხრილით, განვიხილოთ მაგალითი:

ვთქვათ კოჭზე, რომლის მალაია  $\ell=12$  მ, დრეკადობის მოდული  $E=2 \cdot 10^6$  კგ./სმ<sup>2</sup>, დასაშვები ჩაღუნვა  $[f]=\frac{\ell}{400}=3$ სმ, ნორმატიული დატვირთვა  $q^6=128,6$ კნ/მ=128,6 კგ./სმ, საანგარიშო დატვირთვა  $q=153$  კგ./სმ, მოქმედი მღუნავი მომენტი  $M=27540000$  კგ.სმ, კოჭის მალის საანგარიშო წინალობა  $R=2300$  კგ./სმ<sup>2</sup>, მაშინ კოჭის განივკვეთის საჭირო წინალობის მომენტი სიმტკიცის პირობიდან ჭსიმტ. ტოლი იქნება:

$$W_{\text{სიმტ.}} = \frac{M}{C_1 R \cdot \gamma} = \frac{27540000}{2300 \cdot 1,1 \cdot 1} = 10885 \text{ სმ}^3,$$

სორტამენტის ცხრ. 7. 1 - დან შევარჩიოთ  $W_{\text{სიმტ.}}$  - ის მიხედვით  $W=10755$  სმ<sup>3</sup>, რომლის შესაბამისი პარამეტრები იქნება  $h=127$  სმ;  $\delta_j=1,08$  სმ;  $t_{\text{თ.}}=2,16$  სმ;  $b_{\text{თ.}}=30,67$  სმ;  $h_j=122,68$  სმ;  $A=265$  სმ<sup>2</sup>;  $I_x=682988$  სმ<sup>4</sup>.

ახლა გავიანგარიშოთ კოჭის განივკვეთის საჭირო ინერციის მომენტი სიხისტის პირობიდან:  $f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q^6 \ell^4}{EI_{\text{სობ.}}}$ ; აქედან  $I_{\text{სობ.}} = \frac{5 \cdot 128,6 \cdot 12^4 \cdot 10^8}{384 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 3} = 578700 \text{ სმ}^4$

რომელსაც შემოთავაზებული ცხრილიდან შეესაბამება  $I_x=579387$  სმ<sup>4</sup>;  $h=121$  სმ;  $\delta_j=1,06$  სმ;  $t_{\text{თ.}}=2,13$  სმ;  $b_{\text{თ.}}=29,19$  სმ;  $h_j=116,75$  სმ;  $A=248$  სმ<sup>2</sup>;  $W_x=9576$  სმ<sup>3</sup>.

ე. ი. მივიღეთ, რომ სიმტკიცის პირობიდან  $h=127$  სმ, ხოლო სიხისტის პირობიდან  $h=121$  სმ. ჩვენ უნდა ავირჩიოთ უდიდესი, ე. ი.  $h=127$  სმ, რადგან იგი დააკმაყოფილებს როგორც სიხისტის, ისე სიმტკიცის პირობას.

ვთქვათ,  $W_{\text{სიმტ.}} < W_{\text{სობ.}}$ , მაშინ შეგვეძლო აგვერჩია კოჭის სიმაღლე და სხვა პარამეტრები,  $W_{\text{სობ.}}$  - ის მიხედვით ან შევცვლიდით საანგარიშო წინალობას  $R$ -ს.

#### 4.3 შედგენილი, შედუღებული კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრის კრიტიკული ანალიზი

შედგენილი კოჭების განივკვეთის შერჩევა და მისი ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრა განხილულია ლითონის კონსტრუქციების ყველა სახელმძღვანელოში, ამასთან აღსანიშნავია, რომ ამ ამოცანის გადაწყვეტის მეთოდიკა სხვადასხვა ავტორის მიერ განსხვავებულად და ხშირად პრინციპულად განსხვავებულადც არის წარმოდგენილი. ამ მოსაზრების საილუსტრაციოდ საკმარისია ისეთი სახელმძღვანელოების დასახელება, როგორცაა ე. ი. ბელენიას რედაქტორობით, კ. კ. მუხანოვის და ნ. ს. სტრელეცკის ავტორობით გამოყენებული ლითონის კონსტრუქციები. წინამდებარე ნაშრომის მიზანია კრიტიკულად იქნეს გაანალიზებული თითოეულ ამ სახელმძღვანელოში მოცემული კვეთის შერჩევისა და კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრის წესი და ამის საფუძველზე მოცემული იყოს, ჩვენი აზრით, უფრო რაციონალური და ლოგიკური ხერხი. ამავე დროს აღვნიშნავთ, რომ ნაშრომში ყურადღება გამახვილებულია კვეთის შერჩევის პრინციპულ მხარეებზე და არა კონსტრუირების ნიუანსებზე, როგორცაა ნამზადის სტანდარტის გათვალისწინება და სხვა, რომელთა დაკმაყოფილება ყოველთვის შესაძლებელია.

განვიხილოთ ჯერ კოჭის განივკვეთის შერჩევის ოპტიმალური მეთოდი კ. კ. მუხანოვის მიხედვით. შემოტანილია კოჭის კედლის მოქნილობის ცნება, რომელიც ფაქტობრივად წარმოადგენს კოჭის კედლის სიმაღლის შეფარდებას მის სისქესთან

$$K_{\text{კედ.}} = \frac{h}{\delta} \quad (8.1)$$

შემოტანილია აგრეთვე კოჭის კვეთში მასალის განაწილების კოეფიციენტი:

$$\alpha = \frac{F_{\text{კედ.}}}{F} = \frac{h\delta}{F} \quad (8.2)$$

სადაც  $F$  არის კოჭის განივკვეთის ფართობი. ერთი თაროს განივკვეთის ფართობი ტოლი იქნება:

$$F_{\text{თ.}} = 0.5(F - h\delta) \quad (8.3)$$

კოჭის წინაღობის მომენტი შეიძლება გამოისახოს, როგორც ინერციის მომენტისა და  $h/2$  - ის ფარდობა [1] :

$$W = 2 \left[ F_{\text{თ.}} \left( \frac{h}{2} \right)^2 \right] \frac{2}{h} + \frac{\delta h^3}{12} \cdot \frac{2}{h} = F_{\text{თ.}} \cdot h + \frac{\delta h^2}{6} \quad (8.4)$$

(8.3) –ის გათვალისწინება (8.4) – ში მოგვცემს:

$$W = \frac{Fh}{2} - \frac{h^2 \delta}{3} \quad (8.5)$$

თუ (8.5) – ში ჩავსვამთ (8.1) – დან  $\delta = \frac{h}{K_{\text{კვლ.}}}$ , მივიღებთ:

$$W = \frac{Fh}{2} - \frac{h^3}{3K_{\text{კვლ.}}}; \quad \text{საიდანაც} \quad F = \frac{2W}{h} + \frac{2h^2}{3K_{\text{კვლ.}}} \quad (8.6)$$

ცნობილია, რომ მუდმივი წინაღობის მომენტის შემთხვევაში კოჭის განივკვეთის ფართობს აქვს მინიმალური მნიშვნელობა მაშინ, როცა კედელსა და თაროებს შორის ფართობი გადანაწილდება თანაბრად. ამ პირობის გამოყენებით (8.6) – ს მიხედვით მიიღება:

$$\frac{dF}{dh} = -\frac{2W}{h^2} + \frac{4}{3} \cdot \frac{h}{K_{\text{კვლ.}}} = 0 \quad (8.7)$$

საიდანაც განისაზღვრება კოჭის კვეთის ოპტიმალური სიმაღლე:

$$h_{\text{ოპტ.}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot K_{\text{კვლ.}} \cdot W} \quad (8.8)$$

ფორმულა (8.8) განსაზღვრავს კოჭის სიმაღლეს, როცა  $\alpha = 0.5$ , ე. ი. როცა კედლის ფართობი ტოლია გაორკეცებული თაროს ფართობისა. მართლაც, თუ ჩავთვლით, რომ  $F = 2h\delta$  და შევიტანთ (8.5) გამოსახულებაში მივიღებთ:

$$W = \frac{2h^2 \delta}{2} - \frac{h^2 \delta}{3} = \frac{2h^2 \delta}{3} = \frac{2h^3}{3K_{\text{კვლ.}}} \quad (8.9)$$

საიდანაც 
$$h = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot K_{\text{კვლ.}} \cdot W} \quad (8.10)$$

როგორც ვხედავთ მიღებულ იქნა იგივე (8) გამოსახულება.

მასასადამე, (8.7) პირობის გამოყენება გვაძლევს განივკვეთის ეკონომიურად შერჩევის საშუალებას, რაც იმაში მდგომარეობს, რომ თაროებსა და კედელს შორის კოჭის განივკვეთის ფართობი უნდა გადანაწილდეს თანაბრად, მაგრამ, ჩვენი აზრით, ეს პირობა ვერ იძლევა კვეთის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრის საშუალებას. მართლაც, (8.8) ფორმულის მიხედვით  $h_{\text{ოპტ.}}$  - ის განსაზღვრავად

საჭიროა  $K_{\text{კმლ.}}$  - ის ცოდნა, რაც, თავის მხრივ,  $h_{\text{ოპტ.}}$  - ზეა დამოკიდებული. ახლა განვიხილოთ იგივე ამოცანა ე. ი. ბელენიას მიხედვით. ამ შემთხვევაში კოჭის განიკვეთის ფართობი ტოლია:

$$F = \frac{2W \cdot c \psi_{\text{თარ.}}}{h} + h \delta \psi_{\text{კმლ.}} \quad (8.11)$$

სადაც  $\psi_{\text{თარ.}}$  და  $\psi_{\text{კმლ.}}$  კოჭის თაროსა და კედლის კონსტრუქციული კოეფიციენტებია, ხოლო  $c$  გვიჩვენებს, თუ მოქმედი მღუნავი მომენტის რა ნაწილი გადაეცემა კოჭის სარტყელებს.  $c < 1$ ; ცხადია, რომ  $c$  კოეფიციენტი ცვლადია და დამოკიდებულია მასალის განაწილებაზე კოჭის თაროებსა და კედელს შორის. (8.11) ფორმულის გამოყენებით შედგენილია განიკვეთის ფართობის მინიმუმის პირობა მუდმივი წინალობის მომენტის შემთხვევაში [2] :

$$\frac{\partial F}{\partial h} = -\frac{2W \cdot c}{h^2} + \delta_{\text{კმლ.}} = 0 \quad (8.12)$$

როგორც (8.12) – დან ჩანს, ჩათვლილია, რომ  $c$  და  $\delta_{\text{კმლ.}}$  მუდმივია და ამიტომ არ მონაწილეობს გაწარმოებაში, რაც, ცხადია, არ შეეფერება სინამდვილეს. კ. კ. მუხანოვის მიხედვით  $\delta$  - ს სიდიდე  $K_{\text{კმლ.}}$  კოეფიციენტის საშუალებით დაკავშირებული იყო  $h$  - თან და წარმოვადებოდა,  $c$  კოეფიციენტის გავლენა კი კოჭის თაროებსა და კედლის ფართობების ურთიერთდამოკიდებულებით იყო გათვალისწინებული. (8.12) გამოსახულებიდან ისაზღვრება  $h$  - ის ოპტიმალური მნიშვნელობა:

$$h = \sqrt{\frac{2W \cdot c \cdot \psi_{\text{თ.}}}{\delta \psi_{\text{კმლ.}}}} = \sqrt{\frac{W}{\delta_{\text{კმლ.}}}} \cdot \sqrt{2 \cdot c \frac{\psi_{\text{თარ.}}}{\psi_{\text{კმლ.}}}} = K \sqrt{\frac{W}{\delta_{\text{კმლ.}}}} \quad (8.13)$$

განვსაზღვროთ  $c$  - ს გამოსახულება:

$$c = \frac{W_{\text{თარ.}}}{W} = \frac{W - W_{\text{კმლ.}}}{W} = \frac{W - \frac{\delta h^2}{6}}{W} = \frac{6W \cdot K_{\text{კმლ.}} - h^3}{6WK_{\text{კმლ.}}} = 1 - \frac{h^3}{6WK_{\text{კმლ.}}} \quad (8.14)$$

თუ შევიტანთ (8.14) - ს (8.11) - ში  $\psi_{\text{თარ.}}$  და  $\psi_{\text{კმლ.}}$  გათვალისწინების გარეშე მივიღებთ:

$$F = \frac{2W}{h} \left( 1 - \frac{h^3}{6W \cdot K_{\text{კმლ.}}} \right) + h \delta = \frac{2W}{h} - \frac{2W \cdot h^2}{6W \cdot K_{\text{კმლ.}}} + \frac{h^2}{K_{\text{კმლ.}}} = \frac{2W}{h} + \frac{2}{3} \frac{h^2}{K_{\text{კმლ.}}} \quad (8.15)$$

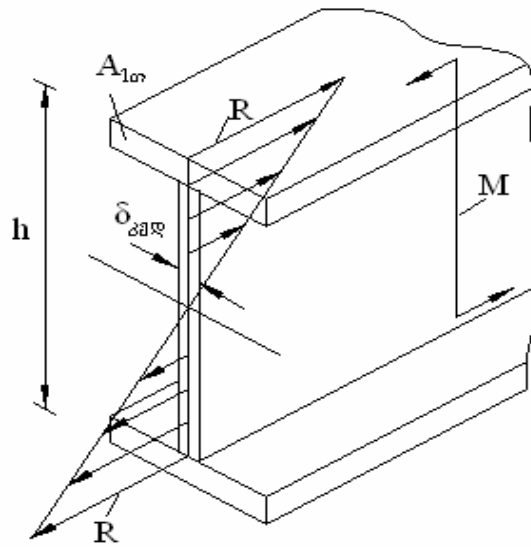
როგორც ჩანს, (8.15) სავსებით ემთხვევა (8.6) გამოსახულებას. კ. კ. მუხანოვისა და ე. ი. ბელენიას შორის ის განსხვავებაა, რომ კ. კ. მუხანოვი თაროების წინაღობის მომენტს უშუალოდ თაროს ფართობით საზღვრავს, კედლის სისქეს კი  $h$ -სა და  $K_{კედ.}$  კოეფიციენტის ფარდობით, ე. ი. ბელენია კი  $h$ -ს სრულებით არ აკავშირებს  $\delta_{კედ.}$  - კედლის სისქესთან და მას მუდმივად მიიჩნევს. გარდა ამისა, კოეფიციენტი  $c$ -ს იგი ცვლადად არ თვლის და გაწარმოებაშიც არ იყენებს. ამის შედეგად თუ  $c$  კოეფიციენტს სხვადასხვა მნიშვნელობას მივანიჭებთ, მაგრამ ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში მუდმივი იქნება, მაშინ (8.11) და (8.15) ფორმულების თანახმად თაროებსა და კედლის ფართობებს შორის ტოლობის მიღება შეუძლებელი იქნება. აქედან გამომდინარე, კოჭის კვეთის რაციონალურობისათვის აუცილებელია, რომ  $c$  კოეფიციენტი ცვლადად ჩაითვალოს და (8.11) ფორმულის გაწარმოებისას გაწარმოვდეს, როგორც ცვლადი.

#### 4.4 ზოგიერთი მოსაზრება ნ. ს. სტრელეცკის მიხედვით შედგენილი, შედუღებული კოჭების ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრის შესახებ

განვიხილოთ შედგენილი, შედუღებული, ორტესებრი ფორმის განივკვეთის მქონე კოჭი, რომლის სიმაღლეა  $h$ , თაროს განივკვეთის ფართობი  $A_{1,თ.}$ , კედლის სისქე კი  $\delta_{კედ.}$ . ასეთი განივკვეთის წინაღობის მომენტი შესაძლებელია წარმოვდგენილ იქნას, როგორც ინერციის მომენტისა და  $h/2$ -ის ფარდობა [1]:

$$W = 2 \left[ A_{1,თ.} \left( \frac{h}{2} \right)^2 \right] \frac{2}{h} + \frac{\delta_{კედ.} h^3}{12} \cdot \frac{2}{h} = A_{1,თ.} \cdot h + \frac{\delta_{კედ.} h^2}{6} = W_{თარ.} + W_{კედ.} \quad (9.1)$$

(9.1)-დან მიიღება, რომ ერთი თაროს ფართობია:  $A_{1,თ.} = \frac{W_{თარ.}}{h}$  (9.2)



ნახ. 7.1 შედგენილი, შედუღებული ფოლადის კოჭზე მოსული ძალები  
 თუ გამოვსახავთ  $W_{\text{თარ.}}$ -ს მთელი კოჭის წინალობის მომენტის  $W$  - ს საშუალებით,  
 შეიძლება დაიწეროს  $W_{\text{თარ.}} = c \cdot W$  (9.3), სადაც  $c$  - არის წინალობის მომენტის  
 ის ნაწილი, რომელიც მოდის ორივე თაროზე.  $c < 1$  ; მაშასადამე ორივე თაროს  
 ფართობი იქნება:

$A_{\text{თარ.}} = \frac{2cW}{h}$  ; ხოლო კედლის ფართობი კი იქნება  $A_{\text{კვლ.}} = \delta_{\text{კვლ.}} \cdot h$  ; თუ  $A_{\text{თარ.}}$  და  
 $A_{\text{კვლ.}}$  გავამრავლებთ კოჭის მოცულობით წონაზე  $\gamma$  და მხედველობაში მივიღებთ  
 კონსტრუქციულ კოეფიციენტებს  $\psi_{\text{თარ.}}$  და  $\psi_{\text{კვლ.}}$ , აგრეთვე იმას, რომ  $W = \frac{M}{R}$  ,  
 მივიღებთ მათი შეკრებით კოჭის ერთეული სიგრძის წონას [2]:

$$g_{\text{კოჭ.}} = g_{\text{თარ.}} + g_{\text{კვლ.}} = \frac{2M \cdot c}{hR} \gamma \psi_{\text{თარ.}} + h \delta_{\text{კვლ.}} \gamma \psi_{\text{კვლ.}} \quad (9.4)$$

(9.4) გამოსახულების მიღება შესაძლებელია სხვა გზითაც.  $A_{1.თ.}$  - ზე მოსული  
 ძალვა ტოლი იქნება  $A_{1.თ.} \cdot R$ , ორივე თაროზე მოსული ძალები შექმნიან მომენტს  
 $2 \cdot A_{1.თ.} \cdot R \cdot \frac{h}{2} = A_{1.თ.} \cdot R \cdot h$  ; თუ ჩავთვლით, რომ ეს მომენტი რაღაც  $c$  ნაწილია  
 მთელი  $M$  მომენტისა, მაშინ მივიღებთ, რომ  $M_{\text{თარ.}} = cM = A_{1.თ.} \cdot Rh$ , საიდანაც

$A_{1.თ.} = \frac{M \cdot c}{R \cdot h}$  ; ხოლო  $A_{\text{თ.}} = \frac{2M \cdot c}{Rh}$  - ეს გამოსახულება კი როგორც ჩანს,

შეესაბამება (9.4) გამოსახულების პირველ წევრს, ხოლო მეორე წევრი იგივე დარჩება. ნ. ს. სტრელეცკისა და ე. ი. ბელენიას მიხედვით კოჭის ოპტიმალური, ანუ მინიმალური წონის განსაზღვრისათვის გამოიყენება მინიმუმის პირობა:

$$\frac{dg_{\text{კოჭ.}}}{dh} = -\frac{2M \cdot c \gamma \psi_{\text{თარ.}}}{R} \cdot \frac{1}{h^2} + \delta_{\text{კელ.}} \gamma \psi_{\text{კელ.}} = 0 \quad (9.5)$$

მაგრამ გაწარმოებისას ჩათვლილია, რომ როგორც  $c$ , ისე  $\delta_{\text{კელ.}}$  მუდმივია ე. ი. არ არის დამოკიდებული კოჭის სიმაღლეზე  $h$ -ზე და ამიტომ, ცხადია არ მონაწილეობს გაწარმოებაში, რაც არ შეესაბამება სინამდვილეს. (9.5)- დან განისაზღვრება კოჭის ოპტიმალური სიმაღლე:

$$h_{\text{ოპტ.}} = \sqrt{\frac{2 \cdot c \psi_{\text{თარ.}}}{\psi_{\text{კელ.}}} \frac{M}{R \delta_{\text{კელ.}}}} = K \sqrt{\frac{W}{\delta_{\text{კელ.}}}} \quad (9.6)$$

სადაც კოეფიციენტი  $K = \sqrt{\frac{2 \cdot c \psi_{\text{თარ.}}}{\psi_{\text{კელ.}}}}$  (9.7)

ნ. ს. სტრელეცკი მიუთითებს ზემოთაღნიშნულ შეუსაბამობაზე და შემოაქვს კედლის სისქისა და კოჭის სიმაღლის დამაკავშირებელი გამოსახულება:

$$\delta_{\text{კელ.}} = \nu h^t \quad (9.8) \quad \text{სადაც } \nu \text{ პროპორციულობის კოეფიციენტია. მაშინ}$$

$h_{\text{ოპტ.}}$  - ის განსაზღვრის პროცესი მიიღებს შემდეგ სახეს [3] :

$$g_{\text{კოჭ.}} = \frac{2M \cdot c}{hR} \gamma \psi_{\text{თარ.}} + h^{t+1} \cdot \nu \gamma \psi_{\text{კელ.}}$$

$$\frac{dg_{\text{კოჭ.}}}{dh} = -\frac{2M \cdot c \gamma \psi_{\text{თარ.}}}{Rh^2} + (t+1) \nu \gamma \psi_{\text{კელ.}} h^t = 0 \quad \text{აქედან}$$

$$h^{t+2} = \frac{W}{\nu(t+1)} \cdot \frac{2c\psi_{\text{თარ.}}}{\psi_{\text{კელ.}}};$$

$$h_{\text{ოპტ.}} = {}^{t+2}\sqrt{\frac{W}{\nu(t+1)}} \cdot {}^{t+2}\sqrt{\frac{2c\psi_{\text{თარ.}}}{\psi_{\text{კელ.}}}} = K {}^{t+2}\sqrt{\frac{W}{\nu(t+1)}} \quad (9.9)$$

ნ. ს. სტრელეცკის მიხედვით პრაქტიკის მონაცემებიდან გამოდინარე  $t$  შეიძლება

აღებულ იქნას  $\frac{1}{2}$  - ის ტოლი ე. ი.  $\delta_{\text{კელ.}} = \nu \sqrt{h}$  ხოლო  $\nu = \left(\frac{1}{10} \div \frac{1}{13}\right) \text{სმ}^{\frac{1}{2}}$  ;

ამ შემთხვევაში

$$h_{\text{ოპტ.}} = K {}^{2.5}\sqrt{\frac{W}{1,5\nu}} \quad (9.10)$$

და რადგანაც 2,5 ახლოსაა 2- თან შესაძლებელია საბოლოოდ დაიწეროს:

$$h_{\text{ობტ.}} = K \sqrt{\frac{W}{1,5\nu}} \quad (9.11)$$

როგორც ვხედავთ,  $\delta_{\text{კვლ.}}$  - ის გამოსახულების დადგენის დროს ამ საკმაოდ არაზუსტი გარდაქმნებისას  $c$  კოეფიციენტის ცვლადობის საკითხი კვლავ გადაუწყვეტელი დარჩა. ამასთანავე  $K$  კოეფიციენტის გამოსახულებაში  $c$  - ს მნიშვნელობა შეტანილია ისეთი, რომელიც შეესაბამება რაციონალურ კვეთს, თუმცა რაციონალური კვეთის განსაზღვრა შემდეგ ხდება მინიმუმის პირობის გათვალისწინებით. ზემოთაღნიშნული შეუსაბამოების თავიდან ასაცილებლად მიზანშეწონილად მიგვაჩნია  $c$  - ს, როგორც  $h$  - ზე დამოკიდებული ფუნქციის განსაზღვრა:

$$c = \frac{W_{\text{თარ.}}}{W} = \frac{W - W_{\text{კვლ.}}}{W} = \frac{W - \frac{\delta_{\text{კვლ.}} \cdot h^2}{6}}{W} = \frac{6W - \nu \sqrt{h} \cdot h^2}{6W} = \frac{6W - \nu h^{2,5}}{6W} = 1 - \frac{\nu h^{2,5}}{6W} \quad (9.12)$$

$c$  შეიძლება გამოისახოს კოჭის განივკვეთის ფართობების საშუალებითაც და დამყარდეს დამოკიდებულება  $c$  - სა და  $\alpha = \frac{A_{\text{კვლ.}}}{A}$  - ს შორის:

$$\begin{aligned} c &= \frac{W_{\text{თარ.}}}{W} = \frac{A_{\text{თარ.}} \cdot h}{A_{\text{თარ.}} \cdot h + \frac{\delta_{\text{კვლ.}} \cdot h^2}{6}} = \frac{6A_{\text{თარ.}} \cdot h}{6A_{\text{თარ.}} \cdot h + \delta_{\text{კვლ.}} \cdot h^2} = \frac{6A_{\text{თარ.}}}{6A_{\text{თარ.}} + \delta_{\text{კვლ.}} \cdot h} = \\ &= \frac{3(A - h\delta_{\text{კვლ.}})}{3(A - h\delta_{\text{კვლ.}}) + h\delta_{\text{კვლ.}}} = \frac{3A - 3h\delta_{\text{კვლ.}}}{3A - 2h\delta_{\text{კვლ.}}} = \frac{3A - 3A \cdot \alpha}{3A - 2A \cdot \alpha} = \\ &= \frac{3A(1 - \alpha)}{A(3 - 2\alpha)} = \frac{3(1 - \alpha)}{3 - 2\alpha} \end{aligned} \quad (9.13)$$

თუ (9.13) გამოსახულებაში შევიტანთ  $\alpha$  - ს მნიშვნელობას, როცა კოჭის თარობის ფართობი ტოლია კედლის ფართობისა ე. ი. როცა  $\alpha = 0,5$  , მივიღებთ:

$$c = \frac{3(1 - 0,5)}{3 - 2 \cdot 0,5} = 0,75$$

აგრეთვე, თუ განვსაზღვრავთ (9.7)- დან  $c$  - ს მნიშვნელობას, როცა  $K = 1,1$

აღებულს ნ. ს. სტრელეცკის მიხედვით, მივიღებთ:  $1,1 = \sqrt{\frac{2 \cdot c \cdot 1}{1,2}}$  ; აქედან

$$c = 0,75$$



ე. ი. გამოდის, რომ (9.5) ფორმულაში წინასწარ შეტანილია  $c$ -ს ის მნიშვნელობა, რომელიც განსაზღვრავს კვეთის რაციონალურობას და შემდეგ ხდება მინიმუმის პირობის გამოყენებით კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის დადგენა.

(9.12)- დან განსაზღვრული  $c$ -ს გამოსახულება შევიტანოთ (9.4)- ში და შემდეგ გამოვიყენოთ კვეთის მინიმუმის პირობა:

$$g_{\text{კოჭ.}} = \frac{2M}{R} \gamma \psi_{\text{თარ.}} \left( \frac{6W - \nu h^{2,5}}{6Wh} \right) + \nu h^{1,5} \cdot \gamma \psi_{\text{კედ.}} \quad (9.14)$$

$$\frac{dg_{\text{კოჭ.}}}{dh} = \frac{2M \gamma \psi_{\text{თარ.}}}{R} \left[ \frac{-2,5 \nu h^{1,5} \cdot 6Wh - 6W(6W - \nu h^{2,5})}{36W^2 h^2} \right] + 1,5 \nu h^{0,5} \gamma \psi_{\text{კედ.}} = 0 \quad (9.15)$$

საბოლოოდ გამარტივებისა და გარდაქმნების შედეგად მივიღებთ:

$$h_{\text{ოპტ.}} = 2,5 \sqrt[2,5]{\frac{2W \psi_{\text{თარ.}}}{\nu (1,5 \psi_{\text{კედ.}} - 0,5 \psi_{\text{თარ.}})}} \quad (9.16)$$

## დასკვნა

ნაშრომში კრიტიკულად გაანალიზებულია ფოლადის შედგენილი, შეღებული კოჭების გაანგარიშების არსებული მეთოდი. მითითებულია იმ არაკორექტულობაზე, რომელზეც ემყარება კოჭების სიხისტის პირობა. ამავე დროს შემოთავაზებულია კოჭების კვეთის შერჩევის ახლებური წესი, რომელიც დამყარებულია განიკვეთის კონსტრუირების პრინციპების შესაბამისად ახალი სორტამენტთა ცხრილის შედგენაზე, რომლით სარგებლობაც უაღრესად აადვილებს და ამარტივებს კოჭების გაანგარიშების საკმაოდ შრომატევად საქმეს.

კოჭების ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრისას მუხანოვის მიხედვით კვეთის მინიმუმის პირობა სწორადაა შედგენილი, მაგრამ  $h$  - ის განსაზღვრა  $K_{კვლ.}$  - ის მნიშვნელობას საჭიროებს, რაც, თავის მხრივ,  $h$  - ზეა დამოკიდებული. ე. ი. ბელენიას მიხედვით გამოყენებული მინიმუმის პირობაში  $c$  და  $d$  მუდმივადაა ჩათვლილი, რაც ეწინააღმდეგება სინამდვილეს. წინამდებარე ნაშრომში განსაზღვრულია  $c$ , როგორც კოჭის სიმაღლის ფუნქცია, რის შედეგადაც მიღწეულია იდენტურობა კ. კ. მუხანოვისა და ე. ი. ბელენიას მეთოდებს შორის, მაგრამ რჩება  $K_{კვლ.}$  - ის განსაზღვრის ზემოთ ნაჩვენები წინააღმდეგობა, ამ წინააღმდეგობის აცილების გზები ნაჩვენებია ნაშრომში.

ე. ი. ბელენიას მიხედვით  $h_{ობტ.}$  გამოითვლება ფორმულით:

$$h_{ობტ.} = K \sqrt{\frac{W}{t_{კვლ.}}}$$

სადაც  $K$ , როგორც აღინიშნა ზემოთ, უკვე შეიცავს თავის თავში კვეთის რაციონალურობის იდეას, ხოლო  $t_{კვლ.}$  - ითვლება მუდმივად, მიუხედავად იმისა, რომ იგი დამოკიდებულია  $h$  - ზე და პრაქტიკულ ანგარიშებში ასეც გამოიყენება.

კ. კ. მუხანოვის მიხედვით ოპტიმალური სიმაღლე შეირჩევა ფორმულით:

$$h_{ობტ.} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} K_{კვლ.} \cdot W}$$

სადაც  $K_{კვლ.}$  კოეფიციენტი თვით დამოკიდებულია  $h$  - ზე. ნ. ს. სტრელცკის

მიხედვით  $h_{\text{ობ.}}$  გამოითვლება  $h_{\text{ობ.}} = K \sqrt{\frac{W}{1,5v}}$  გამოსახულებით, სადაც  $K$

კოეფიციენტი შერჩეულია ისე, როგორც  $h_{\text{ობ.}} = K \sqrt{\frac{W}{t_{\text{კლ.}}}}$  ამ ფორმულაში.

ამგვარად,  $h_{\text{ობ.}}$  შერჩევას ყველა მეთოდს გააჩნია თავისი ნაკლი, რომელიც თეორიულად მოცემულ დებულებებს ასე თუ ისე ეწინააღმდეგება.

გარდა ამისა, კვეთის ოპტიმალური სიმაღლის შერჩევის შემდეგ საჭიროა კოჭის განივკვეთის ხელახალი დაპროექტება, ანუ კვეთის ელემენტების კედლის სისქის, თაროების სისქის, სიგანის და სხვა ურთიერთშესაბამისობაში მოყვანა და ამავე დროს წინაღობის მომენტის საჭირო სიდიდის გათვალისწინება, ინერციის საჭირო მომენტის მხედველობაში მიღება, კვეთის რაციონალურობის მიღწევა, რაც საკმაოდ შრომატევადია და ხშირად ვერც მიიღწევა. ამიტომ მიზანშეწონილად მიგვაჩნია წინასწარ იქნეს კონსტრუირებული კვეთი, თეორიაში მოცემული კრიტერიუმებით და შედგენილი იქნას შესაბამისი სორტამენტი, რომელიც გაცილებით გაადვილებს კოჭისათვის განივკვეთის შერჩევას.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. А. Ф. Смирнов и др. «Сопротивление материалов». Москва, Высшая школа 1975 г.
2. Е. И. Беленя и др. «Металлические конструкции». Москва, Стройиздат 1985 г.
3. К. К. Муханов «Металлические конструкции». Москва, Стройиздат 1978 г.
4. Н. С. Стрелецкий и др. «Металлические конструкции». Москва 1962 г.
5. Феодосьев В. И. «Сопротивление материалов». Физматиздат, Москва 1960 г.
6. Рекас В. Г. «Руководство к решению задач по теории упругости». Изд. Высшая школа, Москва 1966 г.
7. Безухов Н. И. «Основы теории упругости, пластичности и ползучести». Высшая школа, 1961 г.
8. Ван цзи-де. «Прикладная теории упругости». Физматиздат, Москва 1959 г.
9. СН и П 1-В. 12-62. «Металлы и металлические изделия». Гостройиздат, 1962 г.
10. Стрелецкий Н. С., Беленя Е. И. и др. «Металлические конструкции». Специальный курс. Стройиздат, 1965 г.
11. И. Н. Бронштейн и К. А. Семендяев «Справочник по Математике». Издательство «Наука», Москва 1964 г.
12. ა. შანშიაშვილი. «მასალათა გამძლეობა». გამომცემლობა «ცოლნა», თბილისი-1964 წ.
13. Бычков Д. В. «Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций». Стройиздат, 1962 г.
14. Власов В. З. «Тонкостенные упругие стержни». Физматиздат, 1958 г.
15. Джанелидзе Г. Ю., Пановко Я. Г. «Статика упругих тонкостенных стержней». Гостехтеоретиздат, 1948 г.
16. Корневиц Э. Ф., Эндер Г. В. «Формулы для расчёта балок и плит на упругом основании». Стройиздат, 1932 г.
17. Кузьмин Н. Л., Рекач В. Г., Розенблат Г. И. «Сборник задач по теории сооружений». под. ред. И. М. Рабиновича. Стройиздат, 1950 г.

18. Кулешов Ю. И. «О расчёте составных балок учётом упругой и пластической деформации связей ». Труды ЛПИ, №5, 1949 г.
19. Миекладзе Ш. Е. «Некоторые задачи строительной механике». Гостехтеоретиздат, 1948 г.
20. Ржаницын А. Р.«Расчёт тонкостенных стержней ступенчато-переменного сечения». ИТС, вып. 1951 г.
21. Тимошенко С. П. «Соппротивление материалов». ч. I и II. «Наука»., 1960-1965 г.

სადისერტაციო ნაშრომში მოცემული ძირითადი დებულებები გამოქვეყნებულია შემდეგ სამეცნიერო სტატიებში:

1. ნ. ბერიშვილი, ი. მშვენიერაძე, ხ. გორჯოლაძე. “შედგენილი, შედუღებული განიკვეთის ფოლადის კოჭების სინისტის პირობების ზოგიერთი არაკორექტულობის შესახებ“. “მშენებლობა” №2(5) 2007 წ.
2. ნ. შ. ბერიშვილი, ხ. შ. გორჯოლაძე. “ფოლადის შედგენილი განიკვეთის მქონე შედუღებული კოჭების გაანგარიშების ახლებური ხერხი“. “ენერჯია” №3, №4, 2007 წ.
3. ნ. შ. ბერიშვილი, ი. მ. მშვენიერაძე, ხ. შ. გორჯოლაძე. “შედგენილი, შედუღებული კოჭის ოპტიმალური სიმაღლის განსაზღვრის კრიტიკული ანალიზი“. “საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომები” № 1 (467) 2008 წ.
4. Berishvili N. Sh. , Gorjladze Kh. Sh. “Some considerations about definition of optimal height of composed, welded beams according to N. S. Streletsky” “Problems of mechanics”, №1 (30) / 2008 year.

ந ா ன ா ள த ற ி ன

ცხრილი 7.1

h, სმ	$\delta_3$ , სმ	$t_0$ , სმ	$b_0$ , სმ	$h_3$ , სმ	A, სმ <sup>2</sup>	$I_x$ , სმ <sup>4</sup>	$W_x$ , სმ <sup>3</sup>
70	0,91	0,89	35,00	68,23	124	100142	2861
70	0,91	1,31	23,33	67,37	122	98302	2808
70	0,91	1,73	17,50	66,54	121	96531	2758
70	0,91	2,14	14,00	65,73	119	94825	2709
71	0,91	0,89	35,50	69,22	126	104882	2954
71	0,91	1,32	23,67	68,36	124	102975	2900
71	0,91	1,74	17,75	67,53	123	101139	2848
71	0,91	2,14	14,20	66,71	121	99369	2799
72	0,92	0,89	36,00	70,21	128	109779	3049
72	0,92	1,32	24,00	69,35	127	107803	2994
72	0,92	1,74	18,00	68,51	125	105900	2941
72	0,92	2,15	14,40	67,69	124	104064	2890
73	0,92	0,90	36,50	71,21	130	114836	3146
73	0,92	1,33	24,33	70,34	129	112790	3090
73	0,92	1,75	18,25	69,50	127	110817	3036
73	0,92	2,16	14,60	68,68	126	108915	2983
74	0,92	0,90	37,00	72,20	133	120056	3244
74	0,92	1,33	24,67	71,33	131	117937	3187
74	0,92	1,76	18,50	70,49	129	115894	3132
74	0,92	2,17	14,80	69,66	128	113923	3079
75	0,93	0,90	37,50	73,19	135	125441	3345
75	0,93	1,34	25,00	72,32	133	123249	3286
75	0,93	1,76	18,75	71,47	132	121134	3230
75	0,93	2,18	15,00	70,64	130	119093	3175
76	0,93	0,91	38,00	74,19	137	130996	3447
76	0,93	1,34	25,33	73,31	136	128728	3387
76	0,93	1,77	19,00	72,46	134	126539	3329
76	0,93	2,19	15,20	71,63	132	124427	3274
77	0,93	0,91	38,50	75,18	139	136723	3551
77	0,93	1,35	25,67	74,30	138	134377	3490
77	0,93	1,78	19,25	73,45	136	132114	3431
77	0,93	2,19	15,40	72,61	135	129928	3374
78	0,93	0,91	39,00	76,18	142	142625	3657
78	0,93	1,35	26,00	75,30	140	140201	3594
78	0,93	1,78	19,50	74,43	139	137860	3534
78	0,93	2,20	15,60	73,59	137	135599	3476
79	0,94	0,92	39,50	77,17	144	148706	3764
79	0,94	1,36	26,33	76,29	142	146201	3701
79	0,94	1,79	19,75	75,42	141	143782	3640
79	0,94	2,21	15,80	74,58	139	141444	3580
80	0,94	0,92	40,00	78,16	146	154969	3874
80	0,94	1,36	26,67	77,28	145	152382	3809
80	0,94	1,80	20,00	76,41	143	149882	3747
80	0,94	2,22	16,00	75,56	142	147466	3686
81	0,94	0,92	40,50	79,16	149	161417	3985
81	0,94	1,37	27,00	78,27	147	158745	3919
81	0,94	1,80	20,25	77,40	145	156164	3855

81	0,94	2,23	16,20	76,54	144	153668	3794
82	0,95	0,92	41,00	80,15	151	168054	4098
82	0,95	1,37	27,33	79,26	149	165296	4031
82	0,95	1,81	20,50	78,38	148	162630	3966
82	0,95	2,24	16,40	77,53	146	160052	3903
83	0,95	0,93	41,50	81,14	154	174882	4214
83	0,95	1,38	27,67	80,25	152	172037	4145
83	0,95	1,81	20,75	79,37	150	169285	4079
83	0,95	2,24	16,60	78,51	149	166624	4015
84	0,95	0,93	42,00	82,14	156	181906	4331
84	0,95	1,38	28,00	81,24	154	178970	4261
84	0,95	1,82	21,00	80,36	153	176132	4193
84	0,95	2,25	16,80	79,50	151	173385	4128
85	0,96	0,93	42,50	83,13	158	189127	4450
85	0,96	1,39	28,33	82,23	157	186101	4378
85	0,96	1,83	21,25	81,34	155	183173	4309
85	0,96	2,26	17,00	80,48	153	180339	4243
86	0,96	0,94	43,00	84,13	161	196551	4570
86	0,96	1,39	28,67	83,22	159	193431	4498
86	0,96	1,83	21,50	82,33	157	190412	4428
86	0,96	2,27	17,20	81,46	156	187489	4360
87	0,96	0,94	43,50	85,12	163	204180	4693
87	0,96	1,40	29,00	84,21	161	200965	4619
87	0,96	1,84	21,75	83,32	160	197853	4548
87	0,96	2,28	17,40	82,45	158	194839	4479
88	0,96	0,94	44,00	86,11	166	212018	4818
88	0,96	1,40	29,33	85,20	164	208706	4743
88	0,96	1,85	22,00	84,31	162	205499	4670
88	0,96	2,28	17,60	83,43	160	202392	4599
89	0,97	0,95	44,50	87,11	168	220068	4945
89	0,97	1,40	29,67	86,19	166	216657	4868
89	0,97	1,85	22,25	85,29	164	213353	4794
89	0,97	2,29	17,80	84,41	163	210152	4722
90	0,97	0,95	45,00	88,10	170	228334	5074
90	0,97	1,41	30,00	87,18	169	224821	4996
90	0,97	1,86	22,50	86,28	167	221419	4920
90	0,97	2,30	18,00	85,40	165	218121	4847
91	0,97	0,95	45,50	89,09	173	236818	5204
91	0,97	1,41	30,33	88,17	171	233203	5125
91	0,97	1,87	22,75	87,27	169	229700	5048
91	0,97	2,31	18,20	86,38	168	226304	4973
92	0,98	0,96	46,00	90,09	175	245526	5337
92	0,98	1,42	30,67	89,16	174	241805	5256
92	0,98	1,87	23,00	88,25	172	238200	5178
92	0,98	2,32	18,40	87,37	170	234704	5102
93	0,98	0,96	46,50	91,08	178	254459	5472
93	0,98	1,42	31,00	90,15	176	250632	5389
93	0,98	1,88	23,25	89,24	174	246922	5310
93	0,98	2,33	18,60	88,35	172	243323	5232
94	0,98	0,96	47,00	92,08	180	263623	5609
94	0,98	1,43	31,33	91,14	179	259686	5525



94	0,98	1,89	23,50	90,23	177	255869	5444
94	0,98	2,33	18,80	89,33	175	252167	5365
95	0,99	0,96	47,50	93,07	183	273020	5747
95	0,99	1,43	31,67	92,13	181	268972	5662
95	0,99	1,89	23,75	91,22	179	265046	5579
95	0,99	2,34	19,00	90,32	177	261238	5499
96	0,99	0,97	48,00	94,06	185	282653	5888
96	0,99	1,44	32,00	93,12	184	278492	5801
96	0,99	1,90	24,00	92,20	182	274456	5717
96	0,99	2,35	19,20	91,30	180	270539	5636
97	0,99	0,97	48,50	95,06	188	292528	6031
97	0,99	1,44	32,33	94,12	186	288252	5943
97	0,99	1,90	24,25	93,19	184	284102	5857
97	0,99	2,36	19,40	92,29	182	280075	5774
98	0,99	0,97	49,00	96,05	190	302647	6176
98	0,99	1,45	32,67	95,11	189	298253	6086
98	0,99	1,91	24,50	94,18	187	293989	5999
98	0,99	2,37	19,60	93,27	185	289849	5915
99	1,00	0,98	49,50	97,05	193	313014	6323
99	1,00	1,45	33,00	96,10	191	308500	6232
99	1,00	1,92	24,75	95,17	189	304119	6143
99	1,00	2,37	19,80	94,25	187	299865	6057
100	1,00	0,98	50,00	98,04	196	323632	6472
100	1,00	1,46	33,33	97,09	194	318997	6379
100	1,00	1,92	25,00	96,15	192	314497	6289
100	1,00	2,38	20,00	95,24	190	310126	6202
101	1,00	0,98	50,50	99,03	198	334506	6623
101	1,00	1,46	33,67	98,08	196	329747	6529
101	1,00	1,93	25,25	97,14	194	325126	6438
101	1,00	2,39	20,20	96,22	193	320636	6349
102	1,01	0,99	51,00	100,03	201	345640	6777
102	1,01	1,47	34,00	99,07	199	340754	6681
102	1,01	1,94	25,50	98,13	197	336009	6588
102	1,01	2,40	20,40	97,21	195	331399	6498
103	1,01	0,99	51,50	101,02	203	357036	6932
103	1,01	1,47	34,33	100,06	201	352022	6835
103	1,01	1,94	25,75	99,12	200	347151	6740
103	1,01	2,40	20,60	98,19	198	342418	6648
104	1,01	0,99	52,00	102,01	206	368699	7090
104	1,01	1,47	34,67	101,05	204	363555	6991
104	1,01	1,95	26,00	100,10	202	358556	6895
104	1,01	2,41	20,80	99,17	200	353697	6801
105	1,02	1,00	52,50	103,01	209	380633	7250
105	1,02	1,48	35,00	102,04	207	375355	7149
105	1,02	1,95	26,25	101,09	205	370227	7051
105	1,02	2,42	21,00	100,16	203	365241	6956
106	1,02	1,00	53,00	104,00	211	392842	7412
106	1,02	1,48	35,33	103,03	209	387429	7309
106	1,02	1,96	26,50	102,08	207	382167	7210
106	1,02	2,43	21,20	101,14	205	377052	7114
107	1,02	1,00	53,50	105,00	214	405329	7576

107	1,02	1,49	35,67	104,02	212	399778	7472
107	1,02	1,97	26,75	103,07	210	394382	7371
107	1,02	2,44	21,40	102,13	208	389134	7273
108	1,02	1,00	54,00	105,99	217	418098	7742
108	1,02	1,49	36,00	105,01	215	412407	7637
108	1,02	1,97	27,00	104,05	213	406874	7534
108	1,02	2,44	21,60	103,11	211	401492	7435
109	1,03	1,01	54,50	106,98	219	431154	7911
109	1,03	1,50	36,33	106,00	217	425320	7804
109	1,03	1,98	27,25	105,04	215	419647	7699
109	1,03	2,45	21,80	104,10	213	414129	7598
110	1,03	1,01	55,00	107,98	222	444500	8081
110	1,03	1,50	36,67	106,99	220	438521	7973
110	1,03	1,99	27,50	106,03	218	432706	7867
110	1,03	2,46	22,00	105,08	216	427049	7764
111	1,03	1,01	55,50	108,97	225	458140	8254
111	1,03	1,51	37,00	107,99	223	452014	8144
111	1,03	1,99	27,75	107,02	221	446055	8037
111	1,03	2,47	22,20	106,06	219	440256	7932
112	1,04	1,02	56,00	109,97	227	472078	8429
112	1,04	1,51	37,33	108,98	225	465803	8317
112	1,04	2,00	28,00	108,00	223	459697	8208
112	1,04	2,48	22,40	107,05	221	453755	8102
113	1,04	1,02	56,50	110,96	230	486319	8607
113	1,04	1,52	37,67	109,97	228	479891	8493
113	1,04	2,00	28,25	108,99	226	473636	8382
113	1,04	2,48	22,60	108,03	224	467548	8275
114	1,04	1,02	57,00	111,95	233	500866	8787
114	1,04	1,52	38,00	110,96	231	494283	8671
114	1,04	2,01	28,50	109,98	229	487876	8559
114	1,04	2,49	22,80	109,02	227	481640	8449
115	1,05	1,03	57,50	112,95	236	515723	8969
115	1,05	1,53	38,33	111,95	233	508983	8851
115	1,05	2,02	28,75	110,97	231	502422	8737
115	1,05	2,50	23,00	110,00	229	496034	8626
116	1,05	1,03	58,00	113,94	238	530895	9153
116	1,05	1,53	38,67	112,94	236	523995	9034
116	1,05	2,02	29,00	111,95	234	517278	8918
116	1,05	2,51	23,20	110,99	232	510736	8805
117	1,05	1,03	58,50	114,94	241	546385	9339
117	1,05	1,54	39,00	113,93	239	539323	9219
117	1,05	2,03	29,25	112,94	237	532446	9101
117	1,05	2,51	23,40	111,97	235	525749	8987
118	1,05	1,04	59,00	115,93	244	562198	9528
118	1,05	1,54	39,33	114,92	242	554971	9406
118	1,05	2,04	29,50	113,93	240	547933	9287
118	1,05	2,52	23,60	112,96	238	541077	9170
119	1,06	1,04	59,50	116,92	247	578338	9719
119	1,06	1,54	39,67	115,91	245	570943	9595
119	1,06	2,04	29,75	114,92	242	563741	9474
119	1,06	2,53	23,80	113,94	240	556724	9356

120	1,06	1,04	60,00	117,92	249	594809	9913
120	1,06	1,55	40,00	116,90	247	587244	9787
120	1,06	2,05	30,00	115,90	245	579874	9664
120	1,06	2,54	24,00	114,92	243	572694	9544
121	1,06	1,04	60,50	118,91	252	611615	10109
121	1,06	1,55	40,33	117,89	250	603877	9981
121	1,06	2,05	30,25	116,89	248	596338	9856
121	1,06	2,55	24,20	115,91	246	588992	9735
122	1,07	1,05	61,00	119,90	255	628761	10307
122	1,07	1,56	40,67	118,88	253	620847	10177
122	1,07	2,06	30,50	117,88	251	613136	10051
122	1,07	2,55	24,40	116,89	249	605621	9928
123	1,07	1,05	61,50	120,90	258	646251	10508
123	1,07	1,56	41,00	119,87	256	638159	10376
123	1,07	2,07	30,75	118,87	254	630273	10248
123	1,07	2,56	24,60	117,88	252	622586	10123
124	1,07	1,05	62,00	121,89	261	664089	10711
124	1,07	1,57	41,33	120,87	259	655815	10577
124	1,07	2,07	31,00	119,86	256	647752	10447
124	1,07	2,57	24,80	118,86	254	639891	10320
125	1,08	1,06	62,50	122,89	264	682280	10916
125	1,08	1,57	41,67	121,86	261	673822	10781
125	1,08	2,08	31,25	120,84	259	665578	10649
125	1,08	2,58	25,00	119,85	257	657540	10520
126	1,08	1,06	63,00	123,88	267	700827	11124
126	1,08	1,58	42,00	122,85	264	692182	10987
126	1,08	2,08	31,50	121,83	262	683755	10853
126	1,08	2,58	25,20	120,83	260	675538	10722
127	1,08	1,06	63,50	124,87	269	719735	11334
127	1,08	1,58	42,33	123,84	267	710901	11195
127	1,08	2,09	31,75	122,82	265	702288	11059
127	1,08	2,59	25,40	121,82	263	693888	10927
128	1,08	1,07	64,00	125,87	272	739009	11547
128	1,08	1,59	42,67	124,83	270	729982	11405
128	1,08	2,10	32,00	123,81	268	721180	11268
128	1,08	2,60	25,60	122,80	266	712596	11134
129	1,09	1,07	64,50	126,86	275	758652	11762
129	1,09	1,59	43,00	125,82	273	749430	11619
129	1,09	2,10	32,25	124,79	271	740437	11479
129	1,09	2,61	25,80	123,78	269	731664	11343
130	1,09	1,07	65,00	127,86	278	778670	11979
130	1,09	1,59	43,33	126,81	276	769250	11834
130	1,09	2,11	32,50	125,78	274	760063	11693
130	1,09	2,62	26,00	124,77	271	751099	11555
131	1,09	1,08	65,50	128,85	281	799067	12199
131	1,09	1,60	43,67	127,80	279	789446	12052
131	1,09	2,12	32,75	126,77	277	780061	11909
131	1,09	2,62	26,20	125,75	274	770904	11769
132	1,10	1,08	66,00	129,84	284	819847	12421
132	1,10	1,60	44,00	128,79	282	810022	12273
132	1,10	2,12	33,00	127,76	280	800437	12127

132	1,10	2,63	26,40	126,74	277	791083	11986
133	1,10	1,08	66,50	130,84	287	841015	12646
133	1,10	1,61	44,33	129,78	285	830983	12495
133	1,10	2,13	33,25	128,74	282	821194	12348
133	1,10	2,64	26,60	127,72	280	811642	12205
134	1,10	1,08	67,00	131,83	290	862576	12874
134	1,10	1,61	44,67	130,77	288	852333	12721
134	1,10	2,13	33,50	129,73	285	842338	12572
134	1,10	2,65	26,80	128,71	283	832583	12426
135	1,11	1,09	67,50	132,83	293	884533	13104
135	1,11	1,62	45,00	131,76	291	874077	12949
135	1,11	2,14	33,75	130,72	288	863873	12798
135	1,11	2,65	27,00	129,69	286	853913	12650
136	1,11	1,09	68,00	133,82	296	906891	13336
136	1,11	1,62	45,33	132,76	294	896219	13179
136	1,11	2,15	34,00	131,71	291	885803	13026
136	1,11	2,66	27,20	130,68	289	875635	12876
137	1,11	1,09	68,50	134,81	299	929656	13571
137	1,11	1,63	45,67	133,75	297	918765	13412
137	1,11	2,15	34,25	132,70	294	908134	13257
137	1,11	2,67	27,40	131,66	292	897754	13105
138	1,11	1,10	69,00	135,81	302	952831	13809
138	1,11	1,63	46,00	134,74	300	941717	13648
138	1,11	2,16	34,50	133,68	297	930868	13490
138	1,11	2,68	27,60	132,65	295	920274	13337
139	1,12	1,10	69,50	136,80	305	976422	14049
139	1,12	1,64	46,33	135,73	303	965082	13886
139	1,12	2,16	34,75	134,67	300	954012	13726
139	1,12	2,68	27,80	133,63	298	943201	13571
140	1,12	1,10	70,00	137,80	308	1000432	14291
140	1,12	1,64	46,67	136,72	306	988864	14126
140	1,12	2,17	35,00	135,66	303	977569	13965
140	1,12	2,69	28,00	134,62	301	966538	13807
141	1,12	1,11	70,50	138,79	311	1024868	14537
141	1,12	1,65	47,00	137,71	309	1013068	14369
141	1,12	2,18	35,25	136,65	306	1001545	14206
141	1,12	2,70	28,20	135,60	304	990290	14046
142	1,13	1,11	71,00	139,78	314	1049732	14784
142	1,13	1,65	47,33	138,70	312	1037697	14615
142	1,13	2,18	35,50	137,63	309	1025943	14449
142	1,13	2,71	28,40	136,58	307	1014462	14288
143	1,13	1,11	71,50	140,78	317	1075031	15035
143	1,13	1,65	47,67	139,69	315	1062757	14863
143	1,13	2,19	35,75	138,62	313	1050770	14696
143	1,13	2,72	28,60	137,57	310	1039059	14532
144	1,13	1,11	72,00	141,77	320	1100769	15288
144	1,13	1,66	48,00	140,68	318	1088253	15114
144	1,13	2,19	36,00	139,61	316	1076029	14944
144	1,13	2,72	28,80	138,55	313	1064084	14778
145	1,14	1,12	72,50	142,76	324	1126950	15544
145	1,14	1,66	48,33	141,67	321	1114190	15368

145	1,14	2,20	36,25	140,60	319	1101724	15196
145	1,14	2,73	29,00	139,54	316	1089544	15028
146	1,14	1,12	73,00	143,76	327	1153580	15802
146	1,14	1,67	48,67	142,66	324	1140571	15624
146	1,14	2,21	36,50	141,59	322	1127862	15450
146	1,14	2,74	29,20	140,52	319	1115442	15280
147	1,14	1,12	73,50	144,75	330	1180663	16063
147	1,14	1,67	49,00	143,65	327	1167403	15883
147	1,14	2,21	36,75	142,57	325	1154446	15706
147	1,14	2,75	29,40	141,51	322	1141784	15534
148	1,14	1,13	74,00	145,75	333	1208204	16327
148	1,14	1,68	49,33	144,65	330	1194689	16144
148	1,14	2,22	37,00	143,56	328	1181482	15965
148	1,14	2,75	29,60	142,49	326	1168574	15791
149	1,15	1,13	74,50	146,74	336	1236209	16593
149	1,15	1,68	49,67	145,64	334	1222435	16408
149	1,15	2,23	37,25	144,55	331	1208974	16227
149	1,15	2,76	29,80	143,48	329	1195817	16051
150	1,15	1,13	75,00	147,73	339	1264681	16862
150	1,15	1,69	50,00	146,63	337	1250645	16675
150	1,15	2,23	37,50	145,54	334	1236928	16492
150	1,15	2,77	30,00	144,46	332	1223518	16313
151	1,15	1,14	75,50	148,73	342	1293626	17134
151	1,15	1,69	50,33	147,62	340	1279325	16944
151	1,15	2,24	37,75	146,52	337	1265347	16759
151	1,15	2,78	30,20	145,45	335	1251681	16578
152	1,16	1,14	76,00	149,72	346	1323049	17408
152	1,16	1,70	50,67	148,61	343	1308480	17216
152	1,16	2,24	38,00	147,51	341	1294237	17029
152	1,16	2,78	30,40	146,43	338	1280312	16846
153	1,16	1,14	76,50	150,72	349	1352955	17685
153	1,16	1,70	51,00	149,60	346	1338113	17491
153	1,16	2,25	38,25	148,50	344	1323603	17302
153	1,16	2,79	30,60	147,42	341	1309415	17116
154	1,16	1,14	77,00	151,71	352	1383349	17965
154	1,16	1,70	51,33	150,59	349	1368231	17769
154	1,16	2,26	38,50	149,49	347	1353450	17577
154	1,16	2,80	30,80	148,40	344	1338996	17389
155	1,17	1,15	77,50	152,70	355	1414236	18248
155	1,17	1,71	51,67	151,58	353	1398838	18049
155	1,17	2,26	38,75	150,48	350	1383783	17855
155	1,17	2,81	31,00	149,39	348	1369058	17665
156	1,17	1,15	78,00	153,70	359	1445621	18533
156	1,17	1,71	52,00	152,57	356	1429940	18332
156	1,17	2,27	39,00	151,46	353	1414606	18135
156	1,17	2,81	31,20	150,37	351	1399609	17943
157	1,17	1,15	78,50	154,69	362	1477508	18821
157	1,17	1,72	52,33	153,56	359	1461541	18618
157	1,17	2,27	39,25	152,45	357	1445925	18419
157	1,17	2,82	31,40	151,36	354	1430651	18224
158	1,17	1,16	79,00	155,69	365	1509904	19112

158	1,17	1,72	52,67	154,55	362	1493646	18906
158	1,17	2,28	39,50	153,44	360	1477745	18705
158	1,17	2,83	31,60	152,34	357	1462190	18508
159	1,18	1,16	79,50	156,68	368	1542813	19406
159	1,18	1,73	53,00	155,55	366	1526261	19198
159	1,18	2,29	39,75	154,43	363	1510071	18994
159	1,18	2,84	31,80	153,33	360	1494232	18795
160	1,18	1,16	80,00	157,67	372	1576241	19703
160	1,18	1,73	53,33	156,54	369	1559390	19492
160	1,18	2,29	40,00	155,42	366	1542908	19286
160	1,18	2,85	32,00	154,31	364	1526781	19084
161	1,18	1,17	80,50	158,67	375	1610191	20002
161	1,18	1,74	53,67	157,53	372	1593040	19789
161	1,18	2,30	40,25	156,40	370	1576261	19580
161	1,18	2,85	32,20	155,29	367	1559843	19376
162	1,19	1,17	81,00	159,66	378	1644671	20304
162	1,19	1,74	54,00	158,52	376	1627214	20089
162	1,19	2,30	40,50	157,39	373	1610135	19878
162	1,19	2,86	32,40	156,28	370	1593422	19671
163	1,19	1,17	81,50	160,66	382	1679685	20609
163	1,19	1,75	54,33	159,51	379	1661918	20391
163	1,19	2,31	40,75	158,38	376	1644535	20178
163	1,19	2,87	32,60	157,26	373	1627524	19969
164	1,19	1,17	82,00	161,65	385	1715237	20917
164	1,19	1,75	54,67	160,50	382	1697158	20697
164	1,19	2,32	41,00	159,37	379	1679467	20481
164	1,19	2,88	32,80	158,25	377	1662153	20270
165	1,20	1,18	82,50	162,64	388	1751335	21228
165	1,20	1,75	55,00	161,49	385	1732938	21005
165	1,20	2,32	41,25	160,35	383	1714936	20787
165	1,20	2,88	33,00	159,23	380	1697316	20573
166	1,20	1,18	83,00	163,64	392	1787981	21541
166	1,20	1,76	55,33	162,48	389	1769264	21316
166	1,20	2,33	41,50	161,34	386	1750946	21095
166	1,20	2,89	33,20	160,22	383	1733017	20879
167	1,20	1,18	83,50	164,63	395	1825183	21858
167	1,20	1,76	55,67	163,47	392	1806141	21630
167	1,20	2,33	41,75	162,33	389	1787504	21407
167	1,20	2,90	33,40	161,20	387	1769261	21188
168	1,20	1,19	84,00	165,63	398	1862946	22177
168	1,20	1,77	56,00	164,46	396	1843575	21947
168	1,20	2,34	42,00	163,32	393	1824615	21721
168	1,20	2,91	33,60	162,19	390	1806054	21500
169	1,21	1,19	84,50	166,62	402	1901274	22500
169	1,21	1,77	56,33	165,45	399	1881570	22267
169	1,21	2,35	42,25	164,31	396	1862283	22038
169	1,21	2,91	33,80	163,17	393	1843400	21815
170	1,21	1,19	85,00	167,61	405	1940173	22825
170	1,21	1,78	56,67	166,45	402	1920132	22589
170	1,21	2,35	42,50	165,29	400	1900514	22358
170	1,21	2,92	34,00	164,16	397	1881306	22133

171	1,21	1,20	85,50	168,61	409	1979649	23153
171	1,21	1,78	57,00	167,44	406	1959267	22915
171	1,21	2,36	42,75	166,28	403	1939314	22682
171	1,21	2,93	34,20	165,14	400	1919777	22453
172	1,22	1,20	86,00	169,60	412	2019706	23484
172	1,22	1,79	57,33	168,43	409	1998980	23243
172	1,22	2,37	43,00	167,27	406	1978688	23008
172	1,22	2,94	34,40	166,13	404	1958817	22776
173	1,22	1,20	86,50	170,60	415	2060352	23819
173	1,22	1,79	57,67	169,42	413	2039276	23575
173	1,22	2,37	43,25	168,26	410	2018641	23336
173	1,22	2,94	34,60	167,11	407	1998433	23103
174	1,22	1,21	87,00	171,59	419	2101590	24156
174	1,22	1,80	58,00	170,41	416	2080161	23909
174	1,22	2,38	43,50	169,25	413	2059179	23668
174	1,22	2,95	34,80	168,10	410	2038629	23432
175	1,23	1,21	87,50	172,58	422	2143426	24496
175	1,23	1,80	58,33	171,40	419	2121640	24247
175	1,23	2,38	43,75	170,23	417	2100306	24003
175	1,23	2,96	35,00	169,08	414	2079411	23764
176	1,23	1,21	88,00	173,58	426	2185866	24839
176	1,23	1,80	58,67	172,39	423	2163719	24587
176	1,23	2,39	44,00	171,22	420	2142030	24341
176	1,23	2,97	35,20	170,07	417	2120785	24099
177	1,23	1,21	88,50	174,57	429	2228916	25185
177	1,23	1,81	59,00	173,38	426	2206403	24931
177	1,23	2,40	44,25	172,21	423	2184354	24681
177	1,23	2,97	35,40	171,05	421	2162756	24437
178	1,23	1,22	89,00	175,57	433	2272581	25534
178	1,23	1,81	59,33	174,37	430	2249698	25277
178	1,23	2,40	44,50	173,20	427	2227285	25025
178	1,23	2,98	35,60	172,04	424	2205329	24778

ცხრილი 7.1-ის შესაბამისი პროგრამა I

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Dim d, b, t, hk, a, ix, w As Double
```

```
x = Val(F1.h)
```

```
If op1.Value = True Then b = x / 2
```

```
If op2.Value = True Then b = x / 3
```

```
If op3.Value = True Then b = x / 4
```

```
If op4.Value = True Then b = x / 5
```

```
d = (700 + 3 * x) / 1000
```

```
t = d * x / (2 * (b + d))
```

```
hk = x - 2 * t
```

```
a = hk * d + 2 * b * t
```

```
ix = 2 * (b * t ^ 3 / 12 + b * t * x ^ 2 / 4) + d * hk ^ 3 / 12
```

```
w = ix * 2 / x
```

```
F1.b = b
```

```
F1.d = d
```

```
F1.t = t
```

```
F1.hk = hk
```

```
F1.a = a
```

```
F1.i = ix
```

```
F1.w = w
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
F1.b = Clear
```

```
F1.d = Clear
```

```
F1.t = Clear
```

```
F1.hk = Clear
```

```
F1.a = Clear
```

```
F1.i = Clear
```

```
F1.w = Clear
```

```
F1.h = Clear
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton3_Click()
```

```
Me.Hide
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton4_Click()
```

```
Dim i, k, j As Integer
```

```
k = 1
```

```
For i = 2 To 272
```

```
x = 28 + i
```

```
d1 = (700 + 3 * x) / 1000
```

```
For j = 2 To 5
```

```
k = k + 1
```

```
b1 = x / j
```



$$t1 = d1 * x / (2 * (b1 + d1))$$

$$hk1 = x - 2 * t1$$

$$a1 = hk1 * d1 + 2 * b1 * t1$$

$$ix1 = 2 * (b1 * t1 ^ 3 / 12 + b1 * t1 * x ^ 2 / 4) + d1 * hk1 ^ 3 / 12$$

$$w1 = ix1 * 2 / x$$

Worksheets("a").Cells(k, 1) = x

Worksheets("a").Cells(k, 2) = d1

Worksheets("a").Cells(k, 3) = t1

Worksheets("a").Cells(k, 4) = b1

Worksheets("a").Cells(k, 5) = hk1

Worksheets("a").Cells(k, 6) = Int(a1)

Worksheets("a").Cells(k, 7) = Int(ix1)

Worksheets("a").Cells(k, 8) = Int(w1)

Next j

Next i

End Sub

ცხრილი 7.2

h, სმ	w <sub>0</sub> , სმ <sup>3</sup>	w <sub>კ</sub> , სმ <sup>3</sup>	w <sub>კ</sub> /w <sub>0</sub>	2A <sub>0</sub> , სმ <sup>2</sup>	A <sub>კ</sub> , სმ <sup>2</sup>
70	633,16	2005,09	0,32	60,39	60,39
71	654,69	2072,02	0,32	61,49	61,49
72	676,64	2140,23	0,32	62,60	62,60
73	699,02	2209,75	0,32	63,71	63,71
74	721,83	2280,57	0,32	64,83	64,83
75	745,07	2352,71	0,32	65,95	65,95
76	768,74	2426,18	0,32	67,08	67,08
77	792,85	2500,98	0,32	68,22	68,22
78	817,40	2577,12	0,32	69,36	69,36
79	842,39	2654,62	0,32	70,51	70,51
80	867,83	2733,48	0,32	71,67	71,67
81	893,72	2813,70	0,32	72,83	72,83
82	920,05	2895,31	0,32	73,99	73,99
83	946,84	2978,30	0,32	75,16	75,16
84	974,09	3062,69	0,32	76,34	76,34
85	1001,80	3148,48	0,32	77,53	77,53
86	1029,97	3235,69	0,32	78,72	78,72
87	1058,60	3324,32	0,32	79,91	79,91
88	1087,71	3414,38	0,32	81,11	81,11
89	1117,28	3505,88	0,32	82,32	82,32
90	1147,33	3598,82	0,32	83,54	83,54

91	1177,86	3693,23	0,32	84,76	84,76
92	1208,87	3789,10	0,32	85,98	85,98
93	1240,36	3886,45	0,32	87,21	87,21
94	1272,34	3985,28	0,32	88,45	88,45
95	1304,80	4085,60	0,32	89,69	89,69
96	1337,76	4187,43	0,32	90,94	90,94
97	1371,21	4290,76	0,32	92,20	92,20
98	1405,16	4395,62	0,32	93,46	93,46
99	1439,61	4502,00	0,32	94,73	94,73
100	1474,56	4609,92	0,32	96,00	96,00
101	1510,02	4719,38	0,32	97,28	97,28
102	1545,99	4830,40	0,32	98,56	98,56
103	1582,47	4942,98	0,32	99,85	99,85
104	1619,46	5057,14	0,32	101,15	101,15
105	1656,97	5172,87	0,32	102,45	102,45
106	1695,01	5290,19	0,32	103,76	103,76
107	1733,56	5409,11	0,32	105,08	105,08
108	1772,64	5529,64	0,32	106,40	106,40
109	1812,26	5651,78	0,32	107,72	107,72
110	1852,40	5775,55	0,32	109,06	109,06
111	1893,08	5900,95	0,32	110,39	110,39
112	1934,30	6027,99	0,32	111,74	111,74
113	1976,06	6156,69	0,32	113,09	113,09
114	2018,36	6287,04	0,32	114,44	114,44
115	2061,21	6419,06	0,32	115,81	115,81
116	2104,61	6552,76	0,32	117,17	117,17
117	2148,56	6688,14	0,32	118,55	118,55
118	2193,06	6825,22	0,32	119,93	119,93
119	2238,13	6964,00	0,32	121,31	121,31
120	2283,75	7104,50	0,32	122,71	122,71
121	2329,94	7246,71	0,32	124,10	124,10
122	2376,70	7390,66	0,32	125,51	125,51
123	2424,02	7536,34	0,32	126,92	126,92
124	2471,92	7683,77	0,32	128,33	128,33
125	2520,40	7832,96	0,32	129,75	129,75
126	2569,45	7983,92	0,32	131,18	131,18
127	2619,08	8136,64	0,32	132,61	132,61
128	2669,30	8291,15	0,32	134,05	134,05
129	2720,11	8447,45	0,32	135,50	135,50
130	2771,51	8605,55	0,32	136,95	136,95
131	2823,49	8765,46	0,32	138,40	138,40
132	2876,08	8927,19	0,32	139,87	139,87
133	2929,26	9090,74	0,32	141,34	141,34
134	2983,05	9256,13	0,32	142,81	142,81
135	3037,44	9423,36	0,32	144,29	144,29
136	3092,43	9592,45	0,32	145,78	145,78
137	3148,04	9763,40	0,32	147,27	147,27
138	3204,26	9936,21	0,32	148,77	148,77
139	3261,10	10110,91	0,32	150,27	150,27
140	3318,55	10287,50	0,32	151,78	151,78
141	3376,63	10465,98	0,32	153,30	153,30
142	3435,33	10646,36	0,32	154,82	154,82

143	3494,66	10828,67	0,32	156,35	156,35
144	3554,62	11012,89	0,32	157,88	157,88
145	3615,22	11199,05	0,32	159,42	159,42
146	3676,45	11387,14	0,32	160,97	160,97
147	3738,32	11577,19	0,32	162,52	162,52
148	3800,83	11769,20	0,32	164,08	164,08
149	3863,99	11963,17	0,32	165,64	165,64
150	3927,79	12159,12	0,32	167,21	167,21
151	3992,25	12357,05	0,32	168,79	168,79
152	4057,36	12556,97	0,32	170,37	170,37
153	4123,12	12758,90	0,32	171,95	171,95
154	4189,55	12962,84	0,32	173,55	173,55
155	4256,64	13168,80	0,32	175,15	175,15
156	4324,39	13376,79	0,32	176,75	176,75
157	4392,81	13586,81	0,32	178,36	178,36
158	4461,90	13798,88	0,32	179,98	179,98
159	4531,67	14013,01	0,32	181,60	181,60
160	4602,11	14229,20	0,32	183,23	183,23
161	4673,24	14447,46	0,32	184,87	184,87
162	4745,04	14667,80	0,32	186,51	186,51
163	4817,53	14890,24	0,32	188,15	188,15
164	4890,71	15114,77	0,32	189,80	189,80
165	4964,58	15341,41	0,32	191,46	191,46
166	5039,15	15570,16	0,32	193,13	193,13
167	5114,41	15801,04	0,32	194,80	194,80
168	5190,37	16034,06	0,32	196,47	196,47
169	5267,04	16269,22	0,32	198,16	198,16
170	5344,41	16506,53	0,32	199,84	199,84
171	5422,49	16746,00	0,32	201,54	201,54
172	5501,28	16987,64	0,32	203,24	203,24
173	5580,79	17231,45	0,32	204,94	204,94
174	5661,01	17477,46	0,32	206,65	206,65
175	5741,95	17725,65	0,32	208,37	208,37
176	5823,62	17976,06	0,32	210,10	210,10
177	5906,01	18228,67	0,32	211,83	211,83
178	5989,14	18483,51	0,32	213,56	213,56
179	6072,99	18740,58	0,32	215,30	215,30
180	6157,58	18999,89	0,32	217,05	217,05
181	6242,90	19261,45	0,32	218,80	218,80
182	6328,97	19525,26	0,32	220,56	220,56
183	6415,78	19791,34	0,32	222,33	222,33
184	6503,33	20059,69	0,32	224,10	224,10
185	6591,64	20330,33	0,32	225,87	225,87
186	6680,70	20603,26	0,32	227,66	227,66
187	6770,51	20878,49	0,32	229,45	229,45
188	6861,08	21156,03	0,32	231,24	231,24
189	6952,41	21435,88	0,32	233,04	233,04
190	7044,51	21718,07	0,32	234,85	234,85
191	7137,37	22002,59	0,32	236,66	236,66
192	7231,00	22289,46	0,32	238,48	238,48
193	7325,40	22578,68	0,32	240,30	240,30
194	7420,58	22870,26	0,32	242,13	242,13

195	7516,54	23164,21	0,32	243,97	243,97
196	7613,27	23460,55	0,32	245,81	245,81
197	7710,79	23759,27	0,32	247,66	247,66
198	7809,10	24060,39	0,32	249,51	249,51
199	7908,20	24363,91	0,32	251,37	251,37
200	8008,09	24669,86	0,32	253,24	253,24
201	8108,78	24978,22	0,32	255,11	255,11
202	8210,26	25289,02	0,32	256,99	256,99
203	8312,55	25602,26	0,32	258,87	258,87
204	8415,64	25917,95	0,32	260,76	260,76
205	8519,53	26236,10	0,32	262,66	262,66
206	8624,24	26556,71	0,32	264,56	264,56
207	8729,76	26879,80	0,32	266,47	266,47
208	8836,09	27205,38	0,32	268,38	268,38
209	8943,25	27533,46	0,32	270,30	270,30
210	9051,22	27864,03	0,32	272,22	272,22
211	9160,02	28197,12	0,32	274,16	274,16
212	9269,65	28532,73	0,32	276,09	276,09
213	9380,11	28870,86	0,32	278,04	278,04
214	9491,40	29211,54	0,32	279,98	279,98
215	9603,53	29554,76	0,32	281,94	281,94
216	9716,49	29900,54	0,32	283,90	283,90
217	9830,30	30248,88	0,32	285,87	285,87
218	9944,95	30599,80	0,33	287,84	287,84
219	10060,45	30953,29	0,33	289,82	289,82
220	10176,80	31309,38	0,33	291,80	291,80
221	10294,00	31668,07	0,33	293,79	293,79
222	10412,06	32029,37	0,33	295,79	295,79
223	10530,98	32393,28	0,33	297,79	297,79
224	10650,76	32759,82	0,33	299,80	299,80
225	10771,41	33128,99	0,33	301,81	301,81
226	10892,92	33500,81	0,33	303,83	303,83
227	11015,31	33875,28	0,33	305,86	305,86
228	11138,56	34252,41	0,33	307,89	307,89
229	11262,70	34632,21	0,33	309,93	309,93
230	11387,71	35014,69	0,33	311,97	311,97
231	11513,61	35399,86	0,33	314,02	314,02
232	11640,39	35787,73	0,33	316,08	316,08
233	11768,06	36178,29	0,33	318,14	318,14
234	11896,62	36571,58	0,33	320,21	320,21
235	12026,07	36967,58	0,33	322,28	322,28
236	12156,42	37366,32	0,33	324,36	324,36
237	12287,68	37767,79	0,33	326,44	326,44
238	12419,83	38172,02	0,33	328,53	328,53
239	12552,89	38579,00	0,33	330,63	330,63
240	12686,85	38988,75	0,33	332,73	332,73
241	12821,73	39401,28	0,33	334,84	334,84
242	12957,52	39816,59	0,33	336,96	336,96
243	13094,23	40234,69	0,33	339,08	339,08
244	13231,86	40655,59	0,33	341,21	341,21
245	13370,41	41079,31	0,33	343,34	343,34
246	13509,89	41505,84	0,33	345,48	345,48

247	13650,30	41935,20	0,33	347,62	347,62
248	13791,64	42367,40	0,33	349,77	349,77
249	13933,91	42802,45	0,33	351,93	351,93
250	14077,12	43240,34	0,33	354,09	354,09

ცხრილი 7.2 –ის შესაბამისი პროგრამა II

Private Sub CommandButton1\_Click()

x = Val(F1.h)

d = (700 + 3 \* x) / 1000

t = (700 + 3 \* x) / 500

b = (247 \* x - 700) / 1000

hk = (247 \* x - 700) / 250

wk1 = (0.7 + 0.003 \* x) \* (0.988 \* x - 2.8) ^ 3# / (6 \* x)

wt1 = (0.247 \* x - 0.7) \* (1.4 + 0.006 \* x) \* (0.994 \* x - 1.4) ^ 2# / x

at1 = 2 \* b \* t

ak1 = hk \* d

wkwt1 = wk1 / wt1

F1.wk = wk1

F1.wt = wt1

F1.wkwt = wkwt1

F1.at = at1

F1.ak = ak1

End Sub

Private Sub CommandButton2\_Click()

F1.h = Clear

F1.wk = Clear

F1.wt = Clear

F1.wkwt = Clear

F1.ak = Clear

F1.at = Clear

End Sub

Private Sub CommandButton3\_Click()

Me.Hide

End Sub

Private Sub CommandButton4\_Click()

Dim i As Integer

For i = 2 To 182

x = Worksheets("a").Cells(i, 1)

d = (700 + 3 \* x) / 1000

t = (700 + 3 \* x) / 500

b = (247 \* x - 700) / 1000

hk = (247 \* x - 700) / 250

wk1 = (0.7 + 0.003 \* x) \* (0.988 \* x - 2.8) ^ 3 / (6 \* x)

wt1 = (0.247 \* x - 0.7) \* (1.4 + 0.006 \* x) \* (0.994 \* x - 1.4) ^ 2 / x

at1 = 2 \* b \* t

ak1 = hk \* d

wkwt1 = wk1 / wt1

Worksheets("a").Cells(i, 2) = wk1

Worksheets("a").Cells(i, 3) = wt1

Worksheets("a").Cells(i, 4) = wkwt1

Worksheets("a").Cells(i, 5) = at1

Worksheets("a").Cells(i, 6) = ak1

Next i

End Sub