

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გიორგი ნოზაძე

რკინაბეტონის შედგენილი კვების კონსტრუქციებში აღძრული  
ძაღვების სტატისტიკური ანალიზი

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: მშენებლობა 0406

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

2017 წ. 24 თებერვალი

საავტორო უფლება 2017 წელი, გიორგი ნოზაძე

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური  
უნივერსიტეტის ა. სოხაძის სახ. სამოქალაქო და სამრეწველო  
მშენებლობის №102 დეპარტამენტში

ხელმძღვანელი: პროფესორი მ. ჭანტურია

დაცვა შედგება 2017 წლის 24 თებერვალს, 14<sup>00</sup> საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო  
ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე,  
სტუ, კორპუსი I, აუდიტორია 227  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 68ა

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი:

პროფესორი

დ. ტაბატაძე

## საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ნოზაძე გიორგის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში აღძრული ძალების სტატისტიკური ანალიზი“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი: 24.02.2017 წელი

ხელმძღვანელი: პროფესორი

მ. ჭანტურია

რეცენზენტი: პროფესორი

ლ. ბალანჩივაძე

რეცენზენტი: ტ.მ.კ. აკად. დოქტ.

ნ. ერემაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
2017 წ.

ავტორი: ნოზაძე გიორგი

დასახელება: „რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში  
აღძრული ძაღვების სტატისტიკური ანალიზი“

ფაკულტეტი: სამშენებლო

ხარისხი: დოქტორი

ინდივიდუალურ პირობების ან ინსტიტუტის მიერ ზემოთმოყვანილი დასახელების საშრომის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნით 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 გადაბეჭდვის 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 სპეციფიკურ მიმართულებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო შრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

ბეტონი და რკინაბეტონი ძირითად კონსტრუქციულ სამშენებლო მასალებს წარმოადგენენ სამშენებლო საქმეში. რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების თეორიაში ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ამოცანას კონსტრუქციის ხანგრძლივი დეფორმაციის მოქმედების ქვეშ გაანგარიშება წარმოადგენს, თუმცა ამ სფეროში არასაკმარისად სანდოდ არის განსაზღვრული ბეტონის ცოცვადობის მახასიათებლის შესაძლო მნიშვნელობების გაბნევის საზღვრები და ამ ფაქტორის გავლენა რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ძალვათა გადანაწილებაზე, ასევე მისი გავლენა ისეთი ტიპის კონსტრუქციულ ელემენტებზე, რომლებშიც ერთობლივად მუშაობენ ბეტონი და ფოლადი, ფოლადი და კომპოზიტი, სხვადასხვა მახასიათებლის მქონე (სხვადასხვა კლასის) ბეტონები და ა.შ.

დამუშავებულია მიახლოებითი მეთოდები, რომლებიც საკმაოდ სრულად ითვალისწინებენ კონსტრუქციაში შიდა ძაღვების ცვლილების ხასიათის განსაკუთრებულებას, თუმცა დღემდე სათანადოდ არ არის დამუშავებული საანგარიშო მეთოდიკა, რომელიც ამ ტიპის კონსტრუქციებში გამოყენებული ბეტონის ცოცვადობის ექსპერიმენტული მონაცემების სტატისტიკურ დამუშავებაზეა დაფუძნებული. ეს მეთოდიკა კი იძლევა ბეტონის ცოცვადობის გავლენით ძალვათა ცვლილების შეფასების საშუალებას და ამ გზით ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების მასალის ხარჯისა და ხანმედეგობის რესურსების განსაზღვრას.

ამასთან დაკავშირებით გაკეთდა მცდელობა დამუშავებულიყო შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების საფუძვლიანი მეთოდიკა ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ალბათური ბუნების გათვალისწინებით, რაც ბეტონის ხანგრძლივი დეფორმაციების გათვალისწინებით კონსტრუქციის გაანგარიშების თეორიაში წარმოადგენს ერთ-ერთ აქტუალურ ამოცანას.

კვლევის მიზნიდან გამომდინარე დაისვა შემდეგი ამოცანები:

განხილულ იქნეს ძაღვები და ძაბვები, რომლებიც აღიძვრებიან რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში, როგორც შემთხვევითი არგუმენტის (ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის) ფუნქცია; განსაზღვრულ იქნას ძაღვებისთვის და ძაბვებისთვის შესაძლო გადახრათა საზღვრები და მათი გაანგარიშების კანონი - დადგინდეს ძაღვათა და ძაბვათა როგორი შესაძლო გადახრები შეესაბამებინ ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრებს.

- ნაშრომში მოცემული თეორიული კვლევის დასასაბუთებლად ჩატარდა პრაქტიკული ექსპერიმენტი, რომლის დინამიკასაც დამუშავებულ თეორიასთან საკმაოდ ახლოს მდგომი შედეგი უნდა მოეცა.

სადისერტაციო ნაშრომში დამუშავებულ იქნა შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების ხანგრძლივ დეფორმაციებზე გაანგარიშების მეთოდოლოგია ბეტონის ცოცვადობის შესაძლო გადახრების სტატისტიკური გაფანტულობის გათვალისწინებით; დადგინდა ძაღვათა და ძაბვათა შესაძლო გადახრები, რომლებიც აღიძვრებიან შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად, მისი ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრებთან შესაბამისობაში.

სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევების საფუძველზე დამუშავდა რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდოლოგია, ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ალბათური ბუნების გათვალისწინებით და განსაზღვრულ იქნა ცოცვადობის დეფორმაციის ზღვრული მახასიათებლის, როგორც შემთხვევითი სიდიდის გაანგარიშების შესაბამისი ძაღვათა და ძაბვათა შესაძლო გადახრების საზღვრები. დადგინდა, რომ შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ცოცვადობის დეფორმაციის შედეგად

განვითარებული ძაბვების შესაძლო გადახრების საზღვრები მერყეობს -45%-დან +50%-მდე, ხოლო ამ დეფორმაციებისგან განვითარებული ძაღვის (მღუნავი მომენტის) შესაძლო გადახრების საზღვრები მერყეობს -20%-დან +50%-მდე;

ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრების ვარიაციის კოეფიციენტი შედარებით დიდია - 26%, ვიდრე ამ დეფორმაციისგან აღძრული ძაღვის - 18%, ხოლო ძაღვისა - 17%;

ძაღვები, რომლებიც აღიძვრებიან რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად, წარმოდგენილია როგორც ფუნქცია ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლისა, რომელიც წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს და მნიშვნელოვნად მოქმედებს რკინაბეტონის შენობა-ნაგებობების დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. მიღებულია, რომ ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო მნიშვნელობები ემორჩილებიან ნორმალური განაწილების კანონს. ამასთან 0,95-იანი გარანტიით ამ სიდიდის გადახრები მერყეობს  $\pm 45\%$ -ის ფარგლებში, ხოლო 0,84 გარანტიით -  $\pm 25\%$ -ის ფარგლებში.

შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კონსტრუქციებში ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრებს  $\pm 25\%$ -ის ფარგლებში, შეესაბამება მღუნავი მომენტის შესაძლო გადახრის მნიშვნელობა  $\pm 5\%$ -ის ფარგლებში.

რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების საინჟინრო გაანგარიშებებში დასაშვებია გამოყენებულ იქნას ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრები -30%-დან +45%-მდე, რასაც შეესაბამება ძაღვის და ძაღვის შესაძლო გადახრები -10%-დან +10%-მდე.

შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ხანგრძლივი დეფორმაციების შედეგად განვითარებული ძაღვების შესაძლო გადახრები 0,87 საიმედოობით ექვემდებარებიან ნორმალური (გაუსის) განაწილების კანონს.



შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კონსტრუქციებში ცოცვადობის დეფორმაციისგან განვითარებული მღუნავი მომენტის შესაძლო გადახრების თეორიული განაწილების კანონი ახლოსაა ლოგისტიკურ განაწილების კანონთან.

პრაქტიკულმა ექსპერიმენტმა დაწყებიდან ხუთი თვის შემდეგ უკვე გვიჩვენა, რომ ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების დინამიკა თეორიული გაანგარიშებით მიღებულ შედეგებთან დამაკმაყოფილებლად ახლოსაა. ამ შედეგმა და სხვა მეცნიერთა მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების სტატისტიკურმა ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ძაბვები და ძაღვები, რომლებიც რედუცირებული კვეთისთვისაა გამოთვლილი, საკმაოდ ახლოსაა მათი უშუალო დათვლის მეთოდით მიღებულ სიდიდესთან.

## **Abstract**

# **STATISTICAL ANALYSIS OF STRESSES ARISEN IN COMPOSITE SECTION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

Concrete and reinforced concrete represent the basic structural materials in the construction field. In the theory of analysis of reinforced concrete structures one of the important tasks represents the analysis of structure under the action of long-time deformation, but in this scope is not sufficiently reliable determined the possible scattering boundaries of the concrete creep characteristics values and impact of this factor on stress distribution in reinforced concrete composite section structures, as well as its impact on such types of structural elements, in that jointly are working concrete and steel, steel and composite, having different characteristics concretes (different classes), etc.

There are developed the approximate methods, in that are quite completely taken into account the singularity of internal stresses variation nature in structure, but so far has not been adequately developed the methodology of analysis that will be based on processing of creeping statistical experimental data of applied in this type of concrete structures. This methodology provides a possibility of assessment of stress variation due concrete creep influence and determination by this way of concrete and reinforced concrete structur materials consumption and resources of durability.

In this connection there was made an attempt to develop well-grounded methodology for analysis of composite section structures reinforced concrete structures taking into account the concrete creep deformation probabilistic nature that taking into account the long-time deformations of the concrete in the structure calculation theory represents one of the most urgent tasks.

Proceeding from the purposes of the study there were arisen the following tasks: there were considered forces and stresses that are arisen in the reinforced concrete composite section structures as a random argument (concrete creep limit characteristic) function; will be specified for the forces and stresses possible deviation limits and their calculating the law – to determine what possible deviations of forces and stresses to concrete creep characteristics possible limit deviations.

For the justification of stated in this work the theoretical research there was conducted the practical experiment, the dynamics of which turned out quite close to the result of developed theory.

In the dissertation work there was developed analysis methodology for composite section structures taking into account the possible deviations of statistical dispersion of the concrete creep deformations; there are defined the possible deviations of forces and stresses those are arisen in the composite section structures due to development of concrete creep deformation, in accordance with its ultimate possible deviations.

On the basis of carried out in the dissertation work theoretical and experimental studies there is developed the methodoligg of reinforced concrete composite sections structures analysis taking into account the probability nature of concrete creep deformation and were determined the accordance of creep deformation ultimate characteristic, as a random variable calculating limits of accordingly forces and stresses possible deviations. It was defeined that in the composite section structures range of the possible deviations developed due creep deformation as a result of stresses varies from -45% up to + 50%, while the possible deviations range of developed due these deformation torque (bending moment) varies from -20% up to + 50%;;

The variation coefficient of creep characteristics possible limit deviations is relatively high - 26%, while at arisen due deformation stress - 18%, but for forces - 17%;

Stresses those are arisen in the reinforced concrete composite section structures as a result of the development of concrete creep deformation, are presented as a function of creep limit characteristic, which represents a random value and significantly affects on mode of deformation of reinforced concrete buildings. It is accepted that possible values of concrete creep characteristics limit obey the normal distribution law. At the same time with 0.95-percent guarantee this value deviations range vary in the range from  $\pm 45\%$ , and with the guarantee of 0,84 – in the range of  $\pm 25\%$ .

To the composite section reinforced concrete structures ultiamate creep characteristics possible deviations within range of  $\pm 25\%$  corresponds the bending moment possible deviation in the range of  $\pm 5\%$ .

In the engineering calculations reinforced concrete composite section structures there is possilee the use of creep characteristics possible ultimate deviations from -30%

up to + 45%, which corresponds to the stress and force possible deviations from -10% up to + 10%.

In the composite section structures possible deviations 0.87 with reliability the developed as a result of long-time deformations is subjected to normal (Gaussian) distribution law.

The law of theoretical distributor of possible deviations of bending moments arises in the RC composite sections due to creep deformations is close to the law of logistic distribution

The practical experiment after five months from the start have shown that creep deformation development dynamics is satisfactory close to the obtained by theoretical calculations. This result and results obtained by other scientists shows that stresses and forces calculated for reduced section are rather close with obtained by direct readings method.

## შინაარსი

შესავალი .....	17
თავი 1. რკინაბეტონის კონსტრუქციათა გაანგარიშება ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების გათვალისწინებით .....	20
1.1. რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშება ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის გათვალისწინებით .....	20
1.2. ბეტონის ცოცვადობის თეორიები .....	37
1.3. ბეტონის ცოცვადობის ალბათური ბუნება .....	43
1.4. ხიდების გაანგარიშების მეთოდების ისტორიული მიმოხილვა .....	44
1.5. რკინაბეტონის მრავალმალნიანი უჭრი ხიდის გაანგარიშება მასში განვითარებული ცოცვადობის დეფორმაციის ალბათური ბუნების გათვალისწინებით .....	56
1.6. ძალვათა განსაზღვრა საავტომობილო ხიდში ცოცვადობის დეფორმაციის გათვალისწინებით .....	59
1.7. ბეტონის დრეკადობის მოდულის მათემატიკური მოდელი .....	67
თავი 2. შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების გაანგარიშება .....	71
2.1. ღუნვაზე მომუშავე შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების ხანგრძლივ დეფორმაციებზე გაანგარიშება .....	71
2.2. რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში აღძრული ძალების სტატისტიკური ანალიზი .....	76
თავი 3. ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კოჭის ხანგრძლივი დატვირთვის ქვეშ მუშაობის ექსპერიმენტული კვლევა .....	86
ძირითადი დასკვნები .....	98
გამოყენებული ლიტერატურა .....	100
დანართები .....	103

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. რეალურ ხიდში ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციებისგან აღძრული მომენტის მნიშვნელობათა სტატისტიკური განაწილების რიგი.

ცხრილი 2. შედარებითი ცხრილი მომენტის მნიშვნელობისთვის, რომლებიც აღიძვრებიან რეალურ ხიდში ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების პირობებში.

ცხრილი 3. რეალურ ხიდში ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციისგან აღძრული მომენტის მნიშვნელობათა ნორმალური განაწილების სიმკვრივეები.

ცხრილი 4.  $\mu$  სტატისტიკური განაწილების რიგი.

ცხრილი 5.  $k_x$ -კოეფიციენტის შესაძლო გადახრათა ნორმალური განაწილების სიმკვრივეები.

ცხრილი 6. მლუნავი მომენტის შესაძლო გადახრათა სტატისტიკური განაწილების რიგი.

ცხრილი 7. მლუნავი მომენტის შესაძლო გადახრათა თეორიული განაწილების ფუნქციის მნიშვნელობები.

ცხრილი. 8. ელექტროტენზომეტრების ანათვლები.

ცხრილი: 9. ინდიკატორების და ჩალუნმზომების ანათვლები

ცხრილი 10. B20 და B15 კლასის ბეტონის შემადგენლობა (მენიუ).

## ნახაზების ნუსხა

- ნახ. 1. ჰემისჰოფის ხიდი მდ. რეინზე (შვეიცარია).
- ნახ. 2. თალოვანი ხიდი მდინარე რეინზე ქ. კონსტანცაში (გერმანია).
- ნახ. 3. კიდული ხიდი პოტუგალიაში.
- ნახ. 4. ხიდი მდ. მაგანაზე ვანტური ფერმით.
- ნახ. 5. საავტომობილო ხიდის სქემა
- ნახ. 6. მლუნავი მომენტის ეპიურა
- ნახ. 7. საავტომობილო ხიდში აღძრული მლუნავი მომენტის ჰისტოგრამა და ნორმალური განაწილების მრუდი
  
- ნახ. 8. ოს ჰისტოგრამა და თეორიული განაწილების მრუდი
  
- ნახ. 9. შედგენილი კვეთი
- ნახ. 10.  $k_x$ -კოეფიციენტის ჰისტოგრამა და თეორიული განაწილების მრუდი
- ნახ. 11. მოძრავი მალღივი შენობა ვან-კუვერში (კანადა)
- ნახ. 12. საანგარიშო სქემა
- ნახ. 13. საანგარიშო სქემა
- ნახ. 14. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციისგან განვითარებული მლუნავი მომენტის შესაძლო მნიშვნელობათა განაწილების გრაფიკები; ა) ჰისტოგრამა, ბ) ლოგისტიკური განაწილების მრუდი.
- ნახ. 15 შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კოჭი
- ნახ. 16. შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კოჭი
- ნახ. 17. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 18. კოჭის საანგარიშო სქემა
- ნახ. 19. რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კოჭი
- ნახ. 20. რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კოჭი
- ნახ. 21. დატვირთული კოჭი
- ნახ. 22. დაუტვირთავი კოჭი
- ნახ. 23. ბზარწარმოქმნის მომენტი

- ნახ. 24. კოჭის რღვევა
- ნახ. 25 კოჭის რღვევა
- ნახ. 26. კოჭის რღვევა
- ნახ. 27. ძაბვა-დეფორმაციის გრაფიკები
- ნახ. 28. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 29. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 30. დატვირთული კოჭი
- ნახ. 31. კოჭის დამზადების პროცესი
- ნახ. 32. კოჭის დამზადების პროცესი
- ნახ. 33. კოჭის დამზადების პროცესი
- ნახ. 34. კოჭის დამზადების პროცესი (ვიბრირება)
- ნახ. 35 კუბიკების გამოცდა
- ნახ. 36. ბეტონის სიმტკიცის მონაცემები
- ნახ. 37. საყრდენის სქემა
- ნახ. 38. საყრდენის სქემა
- ნახ. 39. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 40. შედგენილი კვეთი
- ნახ. 41. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 42. დატვირთვის მოქმედების სქემა
- ნახ. 43. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 44. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 45. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 46. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 47. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 48. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 49. დატვირთვის სქემა
- ნახ. 50. დატვირთვის სქემა



## შესავალი

*თემის აქტუალობა:* ბეტონი და რკინაბეტონი ძირითად კონსტრუქციულ სამშენებლო მასალებს წარმოადგენენ სამშენებლო საქმეში. რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების თეორიაში ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ამოცანას კონსტრუქციის ხანგრძლივი დეფორმაციის მოქმედების ქვეშ გაანგარიშება წარმოადგენს, თუმცა ამ სფეროში არასაკმარისად სანდოდ არის განსაზღვრული ბეტონის ცოცვადობის მახასიათებლის შესაძლო მნიშვნელობების გაბნევის საზღვრები და ამ ფაქტორის გავლენა რკინაბეტონის შედგენილი კვების კონსტრუქციებში ძალვათა გადანაწილებაზე, ასევე მისი გავლენა ისეთი ტიპის კონსტრუქციულ ელემენტებზე, რომლებშიც ერთობლივად მუშაობენ ბეტონი და ფოლადი, ფოლადი და კომპოზიტი, სხვადასხვა მახასიათებლის მქონე (სხვადასხვა კლასის) ბეტონები და ა.შ.

კონსტრუქციების ცოცვადობის დეფორმაციის გათვალისწინებით გაანგარიშების ამოცანის ამოხსნა დაიყვანება დიფერენციალურ და ინტეგრირ-დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნაზე.

დამუშავებულია მიახლოებითი მეთოდები, რომლებიც საკმაოდ სრულად ითვალისწინებენ კონსტრუქციაში შიდა ძალების ცვლილების ხასიათის განსაკუთრებულებას, თუმცა დღემდე სათანადოდ არ არის დამუშავებული საანგარიშო მეთოდიკა, რომელიც ამ ტიპის კონსტრუქციებში გამოყენებული ბეტონის ცოცვადობის ექსპერიმენტული მონაცემების სტატისტიკურ დამუშავებაზეა დაფუძნებული. ეს მეთოდიკა კი იძლევა ბეტონის ცოცვადობის გავლენით ძალვათა ცვლილების შეფასების საშუალებას და ამ გზით ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების მასალის ხარჯისა და ხანმედეგობის რესურსების განსაზღვრას.

ამასთან დაკავშირებით გაკეთდა მცდელობა დამუშავებულიყო შედგენილი კვების რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების საფუძვლიანი მეთოდიკა ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ალბათური ბუნების გათვალისწინებით, რაც ბეტონის ხანგრძლივი დეფორმაციების

გათვალისწინებით კონსტრუქციის გაანგარიშების თეორიაში წარმოადგენს ერთ-ერთ აქტუალურ ამოცანას.

**დისერტაციის მიზანს** შეადგენს რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების გაანგარიშება ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის შემთხვევითი ხასიათის გათვალისწინებით, კვლევის მიზნიდან გამომდინარე დაისვა შემდეგი ამოცანები:

- განხილულ იქნას ძალები და ძაბვები, რომლებიც აღიძვრებიან რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში, როგორც შემთხვევითი არგუმენტის (ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის) ფუნქცია; განსაზღვრულ იქნას ძალებისთვის და ძაბვებისთვის შესაძლო გადახრათა საზღვრები და მათი გაანგარიშების კანონი - დადგინდეს ძალვათა და ძაბვათა როგორი შესაძლო გადახრები შეესაბამებიან ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრებს.
- დამუშავებული მეთოდიკის საიმედოობა (გამართული მუშაობა) შემოწმდეს კონკრეტული რკინაბეტონის კონსტრუქციის გაანგარიშების საფუძველზე.
- ნაშრომში მოცემული თეორიული კვლევის დასასაბუთებლად ჩატარდა პრაქტიკული ექსპერიმენტი, რომლის დინამიკასაც დამუშავებულ თეორიასთან საკმაოდ ახლოს მდგომი შედეგი უნდა მოეცა.

**მეცნიერული სიახლე:**

- დამუშავებულ იქნა შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების ხანგრძლივ დეფორმაციებზე გაანგარიშების მეთოდიკა ბეტონის ცოცვადობის შესაძლო გადახრების სტატისტიკური გაფანტულობის გათვალისწინებით;
- დადგინდა ძალვათა და ძაბვათა შესაძლო გადახრები, რომლებიც აღიძვრებიან შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ბეტონის ცოცვადობის

დეფორმაციის განვითარების შედეგად, მისი ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრებთან შესაბამისობაში.

*მიღებული შედეგების პრაქტიკული ღირებულება:* სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევების საფუძველზე დამუშავდა რკინაბეტონის შედგენილი კვების კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდიკა, ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ალბათური ბუნების გათვალისწინებით და განსაზღვრულ იქნა ცოცვადობის დეფორმაციის ზღვრული მახასიათებლის, როგორც შემთხვევითი სიდიდის გაანგარიშების შესაბამისი ძალვათა და ძაბვათა შესაძლო გადახრების საზღვრები.

**1. რკინაბეტონის კონსტრუქციათა გაანგარიშება  
ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების  
გათვალისწინებით**

**1.1 რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშება  
ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის გათვალისწინებით**

ცოცვადობის დეფორმაცია წარმოადგენს პლასტიკური დეფორმაციის ერთ-ერთ სახეს. ის ვითარდება დატვირთვის ხანგრძლივი მოქმედებისას. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია კომბინირებულ კონსტრუქციებში, კონსტრუქციებში, რომლებიც მონტაჟის მომენტში მუშაობენ სხვა სტატიკური სქემით, ხოლო ექსპლუატაციის მომენტში – სხვა სტატიკური სქემით.

რკინაბეტონის სტატიკურად ურკვევ კონსტრუქციებში, განსაკუთრებით უნივერსალური ტექნოლოგიით აგებულ კონსტრუქციებში და შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში, მნიშვნელოვანია ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად აღძრული ძალები და ძაბვები. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის მახასიათებელი სიდიდე წარმოადგენს ექსპერიმენტულად დადგენილ სიდიდეს, რომელსაც გააჩნია შესაძლო გადახრები. გადახრები შესაძლოა იმდენად დიდი იყოს, რომ გამოიწვიოს კონსტრუქციის მდგრადობის დაკარგვა.

რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდების დამუშავებაში, ბეტონის ცოცვადობის გათვალისწინებით, ცნობილ მეცნიერთა /2,3,4,9,10,20/ ნაშრომების ანალიზმა განაპირობა სათანადო მეთოდის შექმნა, სადაც გათვალისწინებულია ცოცვადობის დეფორმაციის სავარაუდო ბუნება და კონსტრუქციაში ამ დეფორმაციებით წარმოქმნილი დაძაბული მდგომარეობები. ქვემოთ განხილულია ამ სფეროს ძირითადი შრომები.

რკინაბეტონის სტატიკურად ურკვევი კონსტრუქციების გაანგარიშება ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციების გათვალისწინებით გაშუქებულია ი.დ. ლივშიცის მრავალრიცხოვან ნაშრომებში.

ი.დ. ლივშიცის /13/ მიხედვით, ბეტონის ცოცვადობის გავლენა არსებითად საყურადღებოა ასაწყობ-მონოლითური კონსტრუქციებისთვის. მონოლითური ბეტონის დამაბული მდგომარეობა, მათში ბზარების გაჩენის ხასიათი, შეიძლება გამოვლინდეს მათში მოქმედი ხანგრძლივი ფაქტორების გათვალისწინებით. ამ ფაქტორების გაანგარიშება უნდა ეყრდნობოდეს კონსტრუქციების მუშაობას სხვადასხვა სტადიის განხილვას (დროებით საყრდენზე განივი ელემენტების განთავსება, განივი ჭრილების გაერთიანება და დროებითი საყრდენების მოშორება, მონოლითური ბეტონის ჩამოსხმა, მუდმივი დატვირთვის მეორე ნაწილის ჩამოსხმა და სხვა.) აქედან გამომდინარე, ავტორი გვთავაზობს მეთოდიკას, რომელიც ეყრდნობა დაძველების მოდიფიცირებული თეორიის გამოყენებას.

ამ შრომების შედეგები აღწერილია ლივშიცის წიგნებში. მიღებული მონაცემების შესაბამისად დადგენილია, რომ ასეთ სისტემებში ბეტონის ცოცვადობის გამო დროის გარკვეულ მომენტში ხდება დამაბულობის არსებითი გადანაწილება კვეთებს შორის.

ერთ-ერთ სტატიაში განხილულია ხიდების ანგარიშის შემთხვევა ბეტონის ცოცვადობის და ჯდენის დეფორმაციების აუცილებლობის გათვალისწინებით. აქ ყურადღება გამახვილებულია ცვლადი სტატიკური სქემის ხიდების ანგარიშზე (მონტაჟის პროცესში). მოცემულია გაანგარიშების გამარტივებული და დაზუსტებული მეთოდები.

ა.ბ. გოლიშევის მიერ დამუშავებულია სტატიკურად ურკვევი კონსტრუქციების გაანგარიშების სხვადასხვა მეთოდები ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის გათვალისწინებით.

სხვა სტატიაში მოცემულია ძაბვების განსაზღვრა რკინაბეტონის სტატიკურად ურკვევ ღეროვან (კოჭის ტანი) კონსტრუქციებში მუშაობის I სტადიაში. ხანგრძლივი დეფორმაციებისაგან აღძრული ძალები

გამოთვლილია ბეტონის დაძველების მოდიფიცირებული თეორიით, მათემატიკური მოდელის გამოყენებით.

წარმოდგენილი გადაწყვეტა მისაღები ფორმით საშუალებას იძლევა გათვალისწინებულ იქნეს ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციების ცვლილება ბეტონის დაძველების გავლენის გათვალისწინებით სტატიკურად ურკვევ რკინაბეტონის კონსტრუქციები. კონკრეტული მაგალითის სახით მოყვანილია გადახურვის კოჭები.

ზემოთ მოცემულ ნაშრომში აღწერილია წინასწარ დამაბული ასაკრეფ-მონოლითური კონსტრუქციების დამაბული მდგომარეობის განსაზღვრის მეთოდიკა, რომელიც მუშაობს სტადია 1-ზე (ბზარების გარეშე გაჭიმულ ზონაში), ხანგრძლივი ცვალებადი საექსპლოატაციო დატვირთვიდან ბეტონის ცოცვადობის გათვალისწინებით, მისი ჯდენის და დრეკადობის მოდულის ცვლილებით, ვარაუდით, რომ კავშირი ბეტონის დამაბულობებს შორის და ჩაქრობის კოეფიციენტის შორის გამოიხატება რელაქსაციური მრუდებით. ასეთი მიახლოების დახმარებით დეფორმაციებს და დამაბულობებს შორის კავშირის ინტეგრალური განტოლებები შეიძლება ალგებრულ განტოლებებად გადავაქციოთ.

პრაქტიკულად კომბინირებული კონსტრუქციების და შედგენელი კვეთის თაღების გაანგარიშების მეთოდი მუდმივ დატვირთვაზე, ხანგრძლივი პროცესების წინასწარი განსაზღვრა, რომელიც ბეტონში მიმდინარეობს, დაბერების (დაძველების) მოდიფიცირებული თეორიის საფუძველზე, მოცემულია ნაშრომში. დატვირთვებს შორის კავშირების გამოყენებით და ცოცვადობის დახასიათებით რელაქსაციური მრუდების სახით აღწერილია იმავე შრომაში.

შრომაში /6/ განსაზღვრულია დაჭიმვის განსაზღვრის მეთოდი თხელკედლიან ღეროებში, რომლებსაც განივ კვეთებში ხისტი კონტური აქვთ.

შემდეგ შრომაში დამუშავებულია გაჭიმვის განსაზღვრის მეთოდი თხელკედლიან ღეროებში, რომლებსაც განივ კვეთში ხისტი კონტური აქვს,

რომლებიც ითვალისწინებენ ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციას. განსაზღვრულია ურთიერთქმედების ძალები კონსტრუქციებს და ფუძეებს შორის ბეტონისა და გრუნტის ცოცვადობის გათვალისწინებით. მიღებულია ცოცვადობის დაყვანილი მახასიათებლები დაძველების მოდიფიცირებული თეორიით არაერთგვაროვანი კვეთის კონსტრუქციების გაანგარიშებისას.

სტატიკურად ურკვევი რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდი, სადაც გათვალისწინებულია ბეტონის ცოცვადობა, აღწერილია /10/ ნაშრომში. ავტორმა გამოიყენეს მიახლოებითი დამოკიდებულებები, რომლებიც საშუალებას იძლევიან გავითვალოთ ღეროს კონსტრუქციები დახშული სახით.

ნაშრომში ასევე განხილულია ხიდების სტატისტიკურად ურკვევ კონსტრუქციებში ძირითადი უცნობების განსაზღვრის მიახლოებითი მეთოდიკა ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის გათვალისწინებით და დრეკად-მცოცავი ტანის მოდიფიცირებული თეორიის საფუძვლებით, სეზონური ცვლილებები ცოცვადობის დეფორმაციების განვითარების ინტენსივობაზე დამოკიდებულებით.

ვანტურ კონსტრუქციებში დაჭიმვის შეფასების მიახლოებითი მეთოდი, რომელიც გამოყენებულია დაბერების (დაძველების) მოდიფიცირებულ თეორიებში აღწერეს გ.ი. გვინჩიძემ და დ.ა. დოლიძემ. მოცემულია გაანგარიშების რიცხვითი მაგალითი მითითებული მეთოდიკით.

ი.დ. ლივშიცი ნაშრომში /13/ განსაზღვრავს ხანგრძლივ დეფორმაციებს სტატიკურად რკვევად რკინაბეტონის კონსტრუქციებში თავისუფლად არმირებული ელემენტებით. ბეტონის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა დაკავშირებულია ვოლტერის მეორე რიგის ინტეგრალურ განტოლებებთან, ხოლო არმატურისა - ჰუკის კანონთან. ამოცანა ამოიხსნება საერთო სახით: განტოლების ცენტრში და მის მარჯვენა ნაწილში დაიდება ერთადერთი შეზღუდვა - ისინი ეკუთვნის  $L_2$  კლასს.

ვ.ა. ზედგენიძემ ჩაატარა ექსპერიმენტალური გამოკვლევები ლუნვადი რკინაბეტონის კოჭებზე, წინასწარ დაძაბული არმატურებით, ხანგრძლივი დატვირთვის პირობებში.

სტატიკურად ურკვევ რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების ამოცანა ა.ა. ზეინის ნაშრომში /7/ ამოიხსნება ინტეგრალურ-ოპერატორული მდგომით. ძალის მეთოდის ინტეგრალური განტოლების სისტემა დგება ზოგიერთი ხაზობრივი სისტემის ალგებრული განტოლების შესაბამისად, რომლის კოეფიციენტები დამოკიდებული არიან პარამეტრებზე. დამტკიცებულია, რომ პრინციპული გადაწყვეტილება ცოცვადობის გათვალისწინებით შეიძლება მივიღოთ პარამეტრის მემკვიდრეობითი ოპერატორის შეცვლით ალგებრულ განტოლებში. განვითარებულია ვოლტერის ოპერატორის ფუნქციის აპროქსიმაციის მეთოდი, რომლებიც მოხერხებულია კომპიუტერების რეალიზაციისათვის. მეთოდის სიზუსტე ილუსტრირდება მაგალითით.

ა.ს. სააკიანს სტატიაში /6/ მოჰყავს ექსპერიმენტალურ-თეორიული გამოკვლევების შედეგები რკინაბეტონის მოდელების ცოცვადობაზე, მრავალსართულიან ნაგებობებში ჰორიზონტალური დატვირთვების დროს. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ექსპერიმენტული მრუდები საკმაოდ კარგად აპროქსიმირდებიან დრეკად-მცოცავი ტანის თეორიებით. დადგენილია, რომ ბეტონის ცოცვადობა დიდ გავლენას ახდენს დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე, ჩალუნვებზე, ბზარების ჩამოყალიბებაზე და გახსნაზე, ასევე შესაერთებელი ელემენტების დაბოლოებათა ურთიერთ განლაგებაზე.

ასაწყობი რკინაბეტონის კონსტრუქციებში დაძაბულობის განსაზღვრისათვის სტატიკურად ურკვევ კონსტრუქციებში ბეტონის ცოცვადობის გათვალისწინებით ვ.ვ. სიზონოვმა საფუძვლად მიიღო ერთგვაროვანი დრეკად-ცოცვადი სისტემების ხაზობრივი ერთგვაროვნების გაანგარიშების თეორია. ის იძლევა მიახლოებით ჩაკეტილ გადაწყვეტილებას ამ თეორიის ძირითად ინტეგრალურ განტოლების ამოხსნაზე.



ამავე თემებს მიუძღვნეს თავიანთი შრომები ცნობილმა ბულგარელმა მეცნიერებმა დ.ნ. პატროვმა და ვ.გ. ჩერნიგოროვმა.

გამოიყენეს რა ბლანტ-დრეკადი ტანის თეორია ცოცვადი ბეტონებისათვის, ავტორებმა გამოიყვანეს ვოლტერის ინტეგრალური განტოლების მეორე რიგი. წარმოდგენილია მათი გადაწყვეტილების რიცხობრივი მეთოდი, რომელიც რეალიზირებულია ალგებრული ენის პროგრამის სახით ფორტმან IV. დამუშავებული მეთოდის უტყუარობა მომწდება პრაქტიკული მაგალითის გადაწყვეტით.

მასლოვ-არუთინიანის /2/ დრეკად-მცოცავი სხეულის ხაზობრივი თეორიის საფუძველზე ამოცანა სტატიკურად რკვევად ხიდზე, რომელიც შეერთებულია ბეტონის ფილებით, დაყვანილია ვოლტერის მეორე რიგის ინტეგრალურ განტოლებამდე. ეს განტოლებები გადაწყვეტილია კვადრატულ განტოლებათა სისტემის ჩანაცვლებით.

ასეთ ცვლილებებს საფუძვლად უდევს ინტეგრალური ოპერატორების ჩართვა კვადრატულ განტოლებებში.

ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის გათვალისწინებით სტატიკურად რკვევად შედგენილი კოჭებში ძალთა გადანაწილების ამოცანის გადასაწყვეტად გამოყვანილია ვოლტერის მეორე რიგის ინტეგრალური განტოლებები. მოწოდებულია მათი გადაწყვეტის რიცხვითი მეთოდები, რომელიც დიდი სიზუსტით გამოირჩევა. მეთოდის საიმედოობა გამოცდილია კონკრეტულ მაგალითზე.

გამოყენებულია რა არუთინიან-ტროსტის დრეკად-მცოცავი ტანის თეორია, სტატიკურად განსაზღვრებადი შემადგენელი კოჭის დაძაბული მდგომარეობის გაანგარიშებით  $t$  დროში, ავტორებმა გამოიყვანეს ვოლტერის ინტეგრალური განტოლების მეორე სახეობა. აქაც, ისევე როგორც წინა შემთხვევაში, შემუშავებულია ცოცვადობის მემკვიდრეობითი ამოცანის ამოხსნის რიცხვითი მეთოდი.

$t=\infty$  დროში სტატიკურად რკვევადი კომბინირებული რკინაბეტონის კოჭის დაძაბული მდგომარეობის განსაზღვრისათვის ბლანტ-დრეკადი

ტანის თეორიის გამოყენებით გამოყენილია ვოლტერის ინტეგრალური განტოლებები. მოწოდებულია მემკვიდრეობითი ცოცვადობის ამოცანის გადაწყვეტის ციფრული მეთოდი, რომელიც მაღალი სიზუსტით გამოირჩევა.

დამუშავებულია ახალი პრაქტიკული მეთოდი სტატიკურად რკვევად კომბინირებული ერთიანი კოჭების დამაბული მდგომარეობის დროში გასაზღვრისათვის, სადაც გამოყენებულია ბლანტ-დრეკადი ტანის მასლოვ-არუთინიან-ტროსტის თეორია ბეტონის ცოცვადობაზე და ასევე ვოლტერის ინტეგრალური განტოლებები თეორიაც.

დ.ნ. პეტროვის, ვ.ნ. ჩერნოგოროვის და ჩ.ტ. დიმიტროვის შრომებში განხილულია კომბინირებული სამშენებლო ელემენტები, ფოლადის ორტესებრი კოჭები, რომელიც შეკავშირებულია მართკუთხედის ფორმის რკინაბეტონის ფილებით. როგორც ცნობილია ასეთი ტიპის მზიდი ელემენტების პროექტირების დროს გათვალისწინებული უნდა იყოს დამაბულობის გადანაწილება, რაც გამოწვეულია ბეტონის ჯდენით და ცოცვადობით. ბლანტ-დრეკადი ბეტონის თეორიის საფუძველზე მიღებულია ვოლტერის მეორე სახის ინტეგრალური განტოლება. მიღებული განტოლებების ამოსახსნელად გამოყენებულია მეთოდი, რომელიც ეფუძნება დროში დისკრეტიზაციას. აპროქსიმაციისათვის გამოყენებულია ტრაპეციის წესი. განხილულია მაგალითები სამშენებლო პრაქტიკიდან.

ვ.დ. ხარლაბი, ა.ვ. რომინი, ბ.ნ. კოგანი შრომაში წარმოგიდგენენ უბრალო, მიახლოებით მეთოდს ბეტონის წრფივი ცოცვადობის ანგარიშისათვის უჭრ ფოლად-რკინაბეტონის კოჭებისათვის, რომლებსაც ცვლადი კვეთი აქვთ. ეს მიდგომა უზრუნველყოფს გამოყენებულ იქნას ნებისმიერი ზომები. ბეტონის ცოცვადობისათვის მოყვანილია მზა ფორმულები, სადაც გათვალისწინებულია ბეტონის ცოცვადობა დამველების თეორიის მიხედვით, დრეკადი მემკვიდრეობითობის თეორია, დამველების მოდიფიცირებული თეორია და ბლანტ-მცოცავი ტანის თეორიის ვარიანტები.

მ. ტეზინმა გამოიკვლია ცოცვადობის გავლენით ძალების გადანაწილება ზესტატიკურად ურკვევ ხიდებში, რომლებიც წინასწარ დაძაბული რკინაბეტონისგანაა აგებული, იმის გათვალისწინებით, რომ მათი სტატიკური სქემა იცვლება ექსპლოატაციის პროცესში. დამუშავებულ მეთოდს მივყავართ ვოლტერის ინტეგრალურ განტოლებამდე. ავტორი მიუთითებს თუ რომელი ჰიპოთეზები იძლევიან იმის საშუალებას, რომ ეს ინტეგრალური განტოლებები დავიყვანოთ უბრალო წრფივამდე. მოცემულია შედეგების შედარება, რომლებიც მიღებულია ორი ჰიპოთეზეს საფუძველზე განსაკუთრებული შემთხვევისათვის.

დრეკად-მცოცავი ტანის თეორიაზე დაყრდნობით, რომელიც მიღებულია ბეტონის ქვევის აღსაწერად დროში, ვ. კრიუგერმა მიიღო დეფორმაციის და წინასწარ დაძაბული რკინაბეტონის ელემენტებში დეფორმაციის გაანგარიშებისათვის, როგორც მხოლოდ დაჭიმული არმატურის მოქმედებისათვის, ასევე მუდმივად მოქმედი მღუნავი მომენტის გათვალისწინებით.

დ. დჟევტიჩი და ზ. პრასკევიჩი აღწერენ წინასწარდაძაბულ რკინაბეტონის კოჭების ცოცვადობის გათვლის ორ მეთოდს, ზუსტს და მიახლოებითს. ისინი საშუალებას იძლევიან ნაპოვნი იქნას ჩაღუნვები, დეფორმაციები და დაძაბულობის გადანაწილება კონსტრუქციის კვეთებში. ორივე მეთოდი დაფუძნებულია დაძველების (დაბერების) თეორიაზე, რომელიც მოდიფიცირებულია ბეტონის შესახებ ევროპული კომიტეტის რეკომენდაციების შესაბამისად. შედარებით მარტივია მეთოდი, რომელშიც ავტორს გამოყენებული აქვს დეფორმაციისა და დაძაბულობას შორის ალგებრული დამოკიდებულება. ამ მეთოდის გამოყენებით ნაპოვნი იქნა ჩაღუნვები და დაძაბულობის რელაქსაცია ბლოკების დიდ რაოდენობაში. კერძოდ, ჩატარებულია გაანგარიშება და ექსპერიმენტი კოჭების სამი სერიისთვის არმირების სხვადასხვა კოეფიციენტებით. ორივე მეთოდმა მოგვცა შედეგი, რომელიც ახლოსაა ექსპერიმენტალურთან.

გ.ლ. ერგლანდის სტატიაში მოყვანილია ექსპერიმენტალური და თეორიული გამოკვლევების მონაცემები რკინაბეტონის კონსტრუქციების დეფორმაციების გამოკვლევებზე. ცოცვადობა ჩვეულებრივი ტემპერატურის პირობებში თეორიული აღწერის დროს წარმოდგენილია ორი კომპონენტით: ბლანტი დენადობის ტიპის შეუქცევადი დეფორმაციით და შექცევადი დეფორმაციით, რომელიც წარმოდგენილია შეყოვნებული დრეკადი კომპონენტით და რომელიც შედგება ჩვეულებრივი დრეკადი დეფორმაციის 20+30%, მაღალი ტემპერატურის პირობებში ცოცვადობა მოითხოვს დამატებით აღრიცხვას დეფორმაციის დამოკიდებულებაზე ტემპერატურასთან, მაშინ, როცა დეფორმაციის შექცევადი ნაწილი ტემპერატურაზე დამოკიდებული არ არის. ამ თეორიის შესამოწმებლად მისი შედეგების შედარება ხდებოდა ექსპერიმენტულ მონაცემებთან საყრდენი კოჭისათვის, შეკუმშულ-ჩაღუნული სვეტის ტანის, ორი და სამმალიანი უჭრი კოჭებით ატომური რეაქტორის დამცავ გარსსაცმზე, ცილინდრულ ჭურჭელზე, რომელიც ცივი წყლით და ცხელი ზეთით იყო სავსე და სხვა კონსტრუქციებზე.

როგორც გამოკვლევათა შედეგებმა აჩვენეს, ცოცვადობა და ტემპერატურა ახდენენ მნიშვნელოვან გავლენას ძალის გადანაწილებაზე სტატიკურად ურკვევ კონსტრუქციებში, რომელიც აუცილებლად გათვალისწინებული უნდა იყოს გაანგარიშებებში. ტემპერატურის ციკლური ცვალეზადობა იწვევს დამაბულობის და გადაადგილების მოკლევადიან ცვლილებას, რომელიც ემატება გრძელვადიან ცვლილებებს. კონსტრუქციული ელემენტების მოქნილობის გადიდებასთან ერთად ცოცვადობა დომინირებული როლის შესრულებას იწყებს. თეორიის თანხვედრა ექსპერიმენტულთან დამაკმაყოფილებელია, თუ დატვირთვა და ტემპერატურები ციკლური გზით უცვლელია. მრავალ შემთხვევაში ცოცვადობის დეფორმაციის გამოთვლა შეიძლება ერთნაბიჯიანი გზით დრეკადი სტადიების ანალოგიებზე დაყრდნობით.

ს.დ. დიგლერი გვათავაზობს წინასწარდაძაბული რკინაბეტონის ცოცვადობის ანგარიშის გამარტივებულ მეთოდს “დაძველების კოეფიციენტის” გამოყენებით, რომელიც კვაზიდრეკადი ანალიზის ჩარჩოებში დაძაბულობის და დეფორმაციების გამოთვლის საშუალებას იძლევა.

მეთოდის მთავარი ღირსება ისაა, რომ მისი დახმარებით შეიძლება გათვალისწინებულ იქნეს წინასწარდაძაბული არმატურის ადგილმდებარეობა რამდენიმე შრეში, ასევე გამოვთვალოთ კომბინირებული ასაკრეფ-მონოლითური კონსტრუქციები, დეტალურად განხილულია რამდენიმე საანგარიშო მაგალითი, რომლებიც რკინაბეტონის კოჭების პროექტირებისას, სადაც უჭრადობა მიიღწევა მონოლითურობის შექმნით. განხილულია აღწერილი პროცედურის შემდგომი შესაძლო განზოგადების პირობები უფრო რთული კონსტრუქციების, ან დატვირთვებისთვის.

ვ. ფიორემ და პუნგ ზენ ტაომ შრომაში ექსპერიმენტულად გამოიკვლიეს ბეტონის ცოცვადობის გამო დაძაბულობის გადანაწილების პირობები სტატიკურად ურკვევ წინასწარდაჭიმულ კოჭებში. აღწერილია სამმალიანი კოჭების მეთოდის განიკვეთის დატვირთვის სხვადასხვა ვარიანტისთვის და საყრდენი მოწყობილობის სიმაღლით სხვადასხვა დონეზე განლაგების პირობებში. ბეტონის გაზომილი დაძაბულობების გადაადგილებების და ლოკალური დეფორმაციებით გამოვლენილია, რომ კოჭის საყრდენი პირველადი განსხვავების ეფექტი სიმაღლის მიხედვით სწრაფად მცირდება პირდაპირი განივი დატვირთვების დროის ხანგრძლივობასთან ერთად. მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები შედარებულია ნორმატიული საანგარიშო პროცედურების გამოყენების შედეგებთან. მოცემულია დატვირთვების შეფასებები ბეტონის ცოცვადობის დროს მუდმივი დატვირთვის და ცვლადი ცოცვადობის პირობებში.

ვ. ლომკემ დაამუშავა რკინაბეტონის ფერმების დაპროექტების მეთოდის, სადაც გათვალისწინებულია კონსტრუქციის ელემენტების ცოცვადობა და ჯდენა, რომელშიც გათვალისწინებულია დატვირთვის და

მომენტების განსაზღვრა სვეტის ტანში დროის სხვადასხვა მონაკვეთში. ცოცვადობაზე გათვლები იწარმოება დაძველების თეორიის საფუძველზე. გადაწყვეტილია ცოცვადობის დიფერენციალური განტოლება. გაანგარიშების საფუძველზე დაპროექტებულია კონსტრუქციები ბეტონის და ფოლადის ელემენტებით.

ესპანელი მეცნიერის ლ. მურკიას გამოკვლევებში აღწერილია შეკუმშულ ღეროებში ცოცვადობის გაანგარიშების მეთოდები, განხილულია შიდა ძალოვანი ფაქტორების სასაზღვრო პირობების განსაზღვრის მეთოდები, რომლებიც მოქმედებენ ჩარჩოდან გამოყოფილი შეკუმშულ-მოხრილი სვეტის ტანის ელემენტებზე, დადგენილია შეკუმშული თხელ ღეროზე ზღვრული დატვირთვის პირობები ეფექტური მეორე რიგის გათვალისწინებით.

შრომაში აღწერილია ბეტონის ღეროს არაცენტრული შეკუმშვის პირობებში ცოცვადობის გავლენის პროცედურა მითითებულია მიახლოებითი საანგარიშო ფორმულის გამოყენების შეზღუდვებზე. წარმოდგენილია ახალი საანგარიშო ფორმულა, რომელიც აირეკლავს ექსცენტრისიტეტის დაგვიანება კუმშვადი დატვირთვის ხანგრძლივობასთან დამოკიდებულებაში და ბეტონის ცოცვადობის ცვლილებებთან.

მ. სპეცინსკი ძირითად ყურადღებას აქცევს გაღუნული რკინაბეტონის კოჭების ხანგრძლივი დატვირთვის პირობებში ცოცვადობის გაანგარიშების საკითხებს. ამისთვის გამოყენებულია როგორც წრფივი, ისე არაპირდაპირი განსაზღვრული ინტეგრალური ტიპის განტოლებები.

ვ.მ. ბონდარენკო და ა.კ. შაგინი სწავლობდნენ მრავალაკომპონენტურ კონსტრუქციების ცოცვადობას. მრავალაკომპონენტურობაში იგულისხმება კონსტრუქციები, რომლებშიც ერთდროულად სამუშაოსათვის რაციონალურადაა შეერთებული 3 და მეტი ელემენტი, რომლებიც იმ მასალითაა დამზადებული, რომლებსაც სხვადასხვა ფიზიკურ-მექანიკური, ან დეფორმაციულ-სიმტკიცეთა მახასიათებლები გააჩნიათ.

განხილულია ფუნქციები, რომლებიც მისაღებია ბეტონის ცოცვადობისთვის, მყიფე საარმატურე ფოლადი და მრავალკომპონენტური კონსტრუქციაში გამოყენებული სტეკლოპლასტიკატების ტიპები.

ბ.პ. მიხლინი, ვ.ე. პოპოვი და ვ.მ. ბონდარენკო გვთავაზობენ რკინაბეტონის ღეროებში დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის გაანგარიშების მეთოდიკას, რომელსაც სუფთა ნაკეცისადმი მიდრეკილება აქვს, ფიზიკური არაწრფივობის გათვალისწინებით და ბეტონის რეოლოგიური თვისებებით.

ს.ვ. ბონდარენკოს და ო.ბ. თუთბერიძის ნაშრომში განიხილება სამშენებლო კონსტრუქციების წინააღმდეგობის ამოცანები ცოცვადობის პირობებში. მოცემული ამოცანის მიზანია სამშენებლო კონსტრუქციების გაანგარიშების შესახებ ცვლადი სტატისტიკური სქემის პირობებში. წამოდგენილია გაანგარიშების ზუსტი და გამოყენებითი მეთოდები წრფივი და არაპირდაპირი დეფორმირების გათვალისწინებით.

დაჭიმული ფურცლოვანი სარტყელებით შედგენილი მდგენ ელემენტების მდგრადობა გამოკვლეულია ა.ს. ამახინის მიერ ხანგრძლივი დატვირთვის დროს მაღალი დატვირთვის პირობებში. როგორც კერძო შემთხვევა განიხილება წრფივი ცოცვადობის პირობებში შემადგენელი ელემენტის მდგრადობის ამოცანა. დამაბულობის და ბეტონის შეკუმშულ ზონაში დეფორმაციებს შორის დამოკიდებულება მიღებულია არაწრფივი ცოცვადობის განტოლების საფუძველზე.

ბზარნიანი რკინაბეტონის დეფორმაციის თეორიის ჩარჩოებში ა.ფ. იარომენკომ და ა.ი. მელნიკმა დაამუშავეს ისეთი მეთოდიკა, რომლითაც ისეთი კონსტრუქციები, როგორცაა კოჭი-კედელი ამოცანები ამოიხსნება ცოცვადობის თეორიით. ამ გათვლების დროს გათვალისწინებულია ბეტონის ცოცვადობის განსაკუთრებულობა ორღერძა დატვირთვის დროს, ცოცვადობის დეფორმაციის არაპირდაპირობა, ბეტონის სიმტკიცის გადიდება დროში და რკინაბეტონის სხვა განსაკუთრებული თავისებურებები სხვადასხვა სტადიაში, რომელიც ნგრევასთან ახლოსაა.

ე.ნ. შერბაკოვა /20,21/ და ვ.ლ. ხასინმა დაამუშავეს რკინაბეტონის ელემენტების გათვლის მათემატიკურად მკაცრი და ზუსტი მეთოდები, ბეტონის წრფივი ცოცვადობის გათვალისწინებით მიღებული ანალიტიკური გამოსახულებები საშუალებას იძლევა ამოცანის გადაწყვეტა დავიყვანოთ რკინაბეტონის ელემენტში ერთობლივი არმატურით (დამოუკიდებლად ცოცვადობის თეორიის წინაპირობიდან და ინტეგრალური განტოლების ბირთვის სახეობისა) დამაბულობის ჩაქრობის კოეფიციენტის აღრიცხვამდე.

მათივე სტატიაში მოცემულია რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების მეთოდიკა ხანგრძლივი დატვირთვისათვის დამაბულობის და დეფორმაციების არაპირდაპირი კავშირის გათვალისწინებით, რაც საშუალებას იძლევა რთული საინჟინრო საკითხები გადაიჭრას შედარებით მარტივი ალგებრული ოპერაციებით დახშული სახით (ფორმით). წარმოდგენილი მეთოდი ახდენს ადრე მიღებული მკაცრი მათემატიკური გადაწყვეტილებების განზოგადებას, რაც პასუხობს რკინაბეტონის კონსტრუქციების მუშაობის ფაქტიურ პირობებს.

ახლა გადავიდეთ იმ ნაშრომებზე, რომლებშიაც გათვალისწინებულია ცოცვადობის სავარაუდო ბუნება რკინაბეტონის კონსტრუქციების გაანგარიშების პირობებში (დროს).

ა.პ. შეიკინი და ბ.ი. პარაგაში გვთავაზობენ მასიურ დასახლებებში მსხვილპანელიანი კორპუსების სავარაუდო გაანგარიშებათა შედეგებს არათანაბარი დეფორმაციის დროს, ხანგრძლივი პროცესების გათვალისწინებით, რომლებიც მიმდინარეობენ გრუნტში (საძირკველში) და რკინაბეტონის კონსტრუქციებში. თავის ნაშრონში ა.პ. შენიკინმა დაამუშავა კოჭის და ფილების გათვლის ინჟინრული მეთოდი სტოხასტიკურ საფუძველზე.

საძირკვლის დეფორმაციის სავარაუდო ზედაპირი განისაზღვრება მისი სხვადასხვა მოდელის გათვალისწინებით. კოჭის და ფილების სავარაუდო გათვლა წარმოებს გეოლოგიური პროცესების გათვალისწინებით, რომლებიც



მიმდინარეობენ რკინაბეტონის კონსტრუქციებში გათვალისწინებული ბეტონის ცოცვალობაც.

რკინაბეტონის კონსტრუქციების (კერძოდ, რკინაბეტონის ხიდების) გაანგარიშების სავარაუდო მიდგომას (ბეტონის ცოცვალობის დეფორმაციის გათვალისწინებით) ეძღვნება ა.კ. ცეიტლინის შრომებში. ერთობლივ ნაშრომში (ა.ვ. კრილოვი) საწყისი მონაცემები, რომლებზედაც დამოკიდებულია კონსტრუქციების გათვლის საბოლოო შედეგები. განხილულია ალბათობის თვალსაზრისით, იმდენად, რამდენადაც მათზე მოქმედებს მთელი რიგი შემთხვევითი ფაქტორებისა. მოყვანილია ამ ტიპის ორი ამოცანის გადაწყვეტის მაგალითი. საწყისი მონაცემები აღებულია შემთხვევითი სიდიდეების სახით, რომლებიც განაწილების შესაბამისი კანონებითაა მოცემული, ხოლო გაანგარიშებათა შედეგები განისაზღვრება საიმედოობის მოთხოვნილი ხარისხით, ამოცანა მონტე-კარლოს მეთოდით ამოიხსნება.

პირველ ამოცანაში განისაზღვრება რკინაბეტონის კონსტრუქციის კვეთის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა, ბეტონის ცოცვალობის გათვალისწინებით. შედგენილია პროგრამა, რომლის ალგორითმი დამუშავებულია ნაშრომში. ძირითადი პროგრამისათვის საწყისი მონაცემი აღებულია, როგორც შემთხვევითი სიდიდეები, რომლებიც განისაზღვრებიან როგორც თანაბარზომიერები ან გადანაწილების ნორმალური კანონებით. გაანგარიშების შედეგად დგინდება ნორმალური ძაბვები, მოსახვევთა შედარებითი კუთხეები და კვეთის სიმძიმის ცენტრის შედარებითი გადაადგილებები. თითოეული ამ მახასიათებელიდან იანგარიშება საშუალო მაჩვენებელი, სტანდარტი, ასიმეტრია და ექსცესი. გაანგარიშების მონაცემთა შესაბამისად, ნაპოვნ მახასიათებლებს როგორც წესი გააჩნიათ ნორმალური გადანაწილება.

მეორე ამოცანაში განისაზღვრება წინასწარ დაძაბული კოჭოვანი კონსტრუქციების ჩალუნვები, შემდგარია პროგრამა ПГБ, რომლის აგების საერთო სქემა ანალოგიურია СУС პროგრამისა. გაანგარიშების შედეგად

განისაზღვრება კონსტრუქციების ჩალუნვები და კვეთის გრძივი გადაადგილება ზედა და ქვედა ფიბრის სიმძიმის ცენტრის დონეზე. ყოველი ამ პარამეტრისათვის განისაზღვრება საშუალო მაჩვენებელი და სტანდარტი.

რკინაბეტონის კვეთის დამაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე სხვადასხვა ფაქტორების გავლენის გამოკვლევისათვის ა.ვ. კრილოვმა ჩაატარა სამუშაოები სტატისტიკური გამოცდის მეთოდის გამოყენებით, რომლის ალგორითმში ჩართულია დეტერმინირებული ალგორითმი შეკუმშული კვეთის ანგარიშები. ამ დროს მიღებულია, რომ გაანგარიშების ძირითადი საწყისი პარამეტრები იცვლებიან ნორმალურად (მასალის დეფორმაციული მახასიათებლები, წინასწარი დამაბვის ძალები, მუდმივი დატვირთვები), “წაკვეთილი” ნორმალურად (დროებითი დატვირთვა) და თანაბრად (დაჯდომის და ცოცვადობის სიჩქარეები, დროებითი მახასიათებლები) განაწილების კანონებით. გაანგარიშების შედეგად განისაზღვრება დეფორმაციის და დამაბულობის სტატისტიკური პარამეტრები: საშუალო მაჩვენებლები საშუალო კვადრატული გადახრები, ასიმეტრიის და ექსცესის კოეფიციენტები. აიგება განაწილების პიროგრამები, რომლებიც შეფარდებულია თეორიულთან.

სტატისტიკური მოდელების გამოყენებითაა გამოკვლეული ტიპური უნიფიცირებული კვეთური კოჭები და ჩარჩო-საკიდი კონსტრუქცია, რომელიც აგებულია გადახურვითი აკრეფით. ამ დროს გამოიყენება რეალური ნაგებობისთვის უფრო მეტად სავარაუდო საწყისი პარამეტრები: ცოცვადობის საბოლოო მახასიათებლები, არმატურაში დამაბულობის მოდული, ვერტიკალური მუდმივი და დროებითი დატვირთვების ჩალუნვის მომენტები და ა.შ.

მიღებულია, რომ ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციული მახასიათებლების გაზნევა გადახურვითი აწყობის დროს გავლენას არ ახდენს კუთხური დეფორმაციების საბოლოო მნიშვნელობებზე, ხოლო სტაციონალური ხიდურების მონტაჟის დროს პირიქით, ეს გავლენა არსებითია.

ი. ფარკაშის ნაშრომში გამოკვლეულია რეალური კონსტრუქციების საიმედოება ნაპრალიანობის მიხედვით, კონსტრუქციულ-ტექნოლოგიურ ცვალებადობაზე დამოკიდებულებით, ისეთი, როგორცაა: ცოცვადობა და ბეტონის ჯდომა, არმატურის ხახუნით არხებში და სხვა. გაანგარიშების მეთოდოლოგიაში ცოცვადობა და ჯდენა განხილულია როგორც ნორმალური შემთხვევითი პროცესები. მაგალითებზე მიღებული შედეგების შემოწმება ხორციელდება მონტე-კარლოს მეთოდით.

გ.ო. მადსენი და ვ.რ. ბაზანტის ნაშრომებში გამოიყვანება უბრალო სავარაუდო მოდელები ცოცვადობაზე და ჯდომაზე ანგარიშებისათვის, რაც დაფუძნებულია შემთხვევითი პარამეტრების შემოღებაზე. მითითებული პარამეტრების იდენტიფიკაცია წარმოებს ცდების მონაცემების დამუშავების ბაზაზე; ამ დროს კონსტრუქციის ანგარიში შეიძლება ჩვეულებრივი დეტერმინისტული მეთოდებით. გაიანგარიშება უბრალო კოჭის გამონოლითურობის ეფექტი, მის ერთ გაუჭრელ კოჭად გადაქცევით, მოყვანილია რკინაბეტონის კოჭის წინასწარდაძაბვის დანაკარგების ანგარიში, ასევე კოლონის გამობერვის დეფორმაციის ანალიზი ცოცვადობის პირობებში.

ცდების შედეგების ანალიზის შესაბამისად ჩაწერის მოხერხებული მატრიკული ფორმა საშუალებას იძლევა საკმაოდ იოლად მივიღოთ კონსტრუქციებში ამა თუ იმ შინაგანი დაძაბულობის და გადაადგილების მომენტების ზუსტი შეფასება. ზოგიერთი შინაგანი დაძაბულობა, რომლებიც დეტერმინირებულ კონსტრუქციულ მოდელებში თითქმის ნულს უტოლდებიან, შემთხვევითი პარამეტრების გაფანტვის ხარჯზე შეიძლება მიაღწიონ მნიშვნელოვან სიდიდეს და დიდი გავლენა მოახდინონ კონსტრუქციების მუშაობაზე. მთელ რიგ სხვა შემთხვევებში საწყისი მონაცემების განუსაზღვრელობას არ მივყავართ ანგარიშის შედეგების მნიშვნელოვან გაფანტვამდე. ამას გარდა, მასალის და კონსტრუქციების თვისებების ცვალებადობა დამოკიდებულია დაკვირვების დროზე, ხოლო ვარიაციის კოეფიციენტი წარმოადგენს დროის ფუნქციას.

ა.გ. მალხასიანმა და ლ.ტ. მანანდიანმა დაამუშავეს კოჭის ნალუნის ამოცანის გადაწყვეტის სტატიკური მეთოდი. ამ კოჭის მასალას წრფივი ცოცვადობა გააჩნია. ითვლება, რომ კოჭის მასალის თვისებები დროში ინვარიანტულები არიან, ხოლო ცოცვადობის გული - გაუსური კვაზისტაციონალური დროის შემთხვევითი ფუნქციაა. მიღებულია კოჭის ჩაღუნვის მოცდის და დისპერსიის მათემატიკური გამოსახულება.

ზემოთმოყვანილი ნაშრომების ანალიზი აჩვენებს, მიუხედავად იმისა, რომ ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის მოვლენა რკინაბეტონის კონსტრუქციების ანგარიშებში განიხილება სხვადასხვა ასპექტში, ხოლო მრავალი სავარაუდოდ მათში არაა ამ ანგარიშებისათვის მნიშვნელოვანი ძალების შესაძლო გაბნევის საზღვრები განსაზღვრული, სტატიკურად ურკვევი რკინაბეტონის კონსტრუქციებში გაფანტვისაგან ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლებით.

## 1.2. ბეტონის ცოცვადობის თეორიები

ბეტონი წარმოადგენს დრეკად-პლასტიკურ-ბლანტ მასალას. ხანგრძლივი დატვირთვის შედეგად პლასტიკური დეფორმაციები განპირობებულია მისი ცოცვადობით, რომელიც არსებით გავლენას ახდენს მის სიმტკიცეზე, კონსტრუქციის და ნაგებობის მდგრადობაზე. ამ მოვლენის ფიზიკური არსის შესწავლას ეძღვნება ისეთი დიდი სპეციალისტების შრომები, როგორებიც არიან: ფრეისინე, ა.ე. შეიკინი, ი.ი ულიცკი, რ. ლორმანი, გ.დ. ვიშნევსკი, გ. რიუში, ს.ვ. ალექსანდროვსკი, კ.ს. კარაპეტიანი, ვ.ვ. მიხაილოვი, ზ.ნ. წილოსანი, რ. დევისი, ვიტმანი, ა. ნევილი და სხვები. ამ შრომებში განიმარტებიან ცოცვადობის თვისებების კანონები ცალკეული მხარეები, მაგრამ ისინი მთლიანად ვერ ხსნიან ამ მოვლენის არსს.

ცოცვადობის თეორია წარმოადგენს კონსტრუქციათა ანგარიშების ნამდვილი მუშაობის პირობებთან მიახლოების ერთ-ერთ ასპექტს და ადგენს დამოკიდებულებას დეფორმაციასა და დამაბულობას შორის დროის ფაქტორის გათვალისწინებით.

დ. მაქსველმა პირველად წარმოადგინა დეფორმაციის კანონი დროში დიფერენციალური განტოლების სახით, რომელიც ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება საინჟინრო პრაქტიკაში გამოვიყენოთ.

ბეტონის ცოცვადობის გავლენის აღწერა ბეტონის და რკინაბეტონის დამაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე გამოიყენება შემდეგი წრფივი თეორიები: **დრეკადი-მემკვიდრეობის თეორია** (ბლანტ-დრეკადი სხეული თეორია), **დაძველების თეორიის მოდიფიცირებული ვარიანტი** (ბლანტი-დრეკადი ტანის გამარტივებული თეორია) და **დაძველების მემკვიდრეობითობის თეორია** (ბლანტი-დრეკადი ტანის თეორია).

დრეკადი-მემკვიდრეობის თეორიას თეორიას /2/ საფუძვლად უდევს შემდეგი ძირითადი წინაპირობები:

1. ბეტონი განიხილება როგორც ერთგვაროვანი იზოტრიპული მასალა;

2. მყისიერ დეფორმაციას და დამაბულობას შორის არსებობს პირდაპირი დამოკიდებულება;

3. ცოცვადობის დეფორმაციას და დამაბულობებს შორისაც არსებობს წრფივი დამოკიდებულება;

4. დასაშვებია, რომ ცოცვადი დეფორმაციისთვის მოქმედებს დამატების პრინციპი: ჯამური დეფორმაცია ცვლადი დატვირთვის დროს შეიძლება მოიძებნოს როგორც ცოცვადობის დეფორმაციების ჯამის სახით, რომელიც მიიღება დამაბულობის დამატებით.

ამ დროს თვლიან, რომ ცოცვადობის დეფორმაცია, რომელიც გამოწვეულია დამაბულობის დამატებით, დამოკიდებულია ამ უკანასკნელის სიდიდეზე და ხანგრძლივობაზე.

დრეკადი მემკვიდრეობითობის თეორიის ძირითადი განტოლება შეიძლება ასე ჩაიწეროს:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma(t)}{E} - \frac{1}{E} \int_0^1 K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \quad (1.1)$$

სადაც  $t$ - დროის მომენტი, რომლისთვისაც განისაზღვრება დეფორმაცია;

$\tau$ –დატვირთვის მიღების დროის მომენტი;

$K(t-\tau)$  – თავისუფალი ფუნქციაა, რომელიც დამოკიდებულია ორი არგუმენტის  $\tau$  და  $t$ -ს სხვაობაზე.

მემკვიდრეობის პრინციპი პირველად აღწერა ბოლცმანმა, ხოლო დრეკადი მემკვიდრეობითობის თეორია შექმნა და განავითარა ვოლტერმა.

დრეკადი-მემკვიდრეობითობის თეორიამ შემდგომი განვითარება ჰპოვა ა.რ. რჟაცინის, ბ.ბ. ოგორკოვის, ი.ი. რაბოტნოვის, ა.კ. მალკისტერის, ს. გაუხარის და სხვათა შრომებში.

იუტნეიმ და ფ. დიშინგერმა ბეტონის ცოცვადობაზე ექსპერიმენტულ მონაცემებზე დაყრდნობით შექმნეს ბეტონის ცოცვადობის დაბერების გათვალისწინების თეორია, რომელსაც საფუძვლად უდევს ჰიპოთეზა იმაზე, რომ ბეტონის ნიმუშების ცოცვადობის დეფორმაციათა მრუდები, რომლებიც სხვადასხვა დროს არიან დატვირთულები, გარკვეული მომენტის შემდეგ თითქმის პარალელურები ხდებიან. ამიტომ დიშინგერმა

მიიღო დამატებითი ჰიპოთეზა ცოცვადობის დეფორმაციათა მრუდების პარალელურობის შესახებ. ამის გათვალისწინებით ბეტონის ცოცვადობის ზომები, რომელიც დატვირთულია ნებისმიერი  $t$  დროის მომენტში, შეიძლება მივიღოთ ბეტონის ნიმუშების ცოცვადობის ზომებიდან, რომელიც დატვირთულია  $t=0$  დროის მომენტში, ამ მონაკვეთის მრუდის იმ ადგილის ამოჭრით, რომელიც შეესაბამება  $0 - t$  დროის ინტერვალს, ანუ

$$c(t, \tau) = c(t) - c(\tau) \quad (1.2)$$

დამკვლევების თეორიის თანახმად /9,10,11/ დამოკიდებულება დამაბულობებსა და დეფორმაციებს შორის, როცა  $E=const$ , შემდეგი ძირითადი ფორმულით გამოიხატება:

$$\varepsilon_n(t) = \frac{\sigma_0}{1 + \varphi_1} + \int_0^1 \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \delta(1, \tau) d\tau \quad (1.3)$$

სადაც  $\varphi = \frac{\varepsilon_n(t)}{\varepsilon_0}$  – დახასიათებაა, ხოლო  $\varepsilon_n(t)$  – ცოცვადობის დეფორმაცია;  $\varepsilon_0$  – დრეკად-მომენტალური დეფორმაციის მნიშვნელობა დატვირთვის დაწყების მომენტისთვის

$$\delta(t, \tau) = \frac{1}{E} + \frac{1}{E} (\varphi_1 - \varphi_\tau) \quad (1.4)$$

დიშინგერის მიხედვით  $\varphi_1$  - სიდიდისათვის მიიღება დროის ცვალებადობის ექსპერიმენტალური კანონი

$$\varphi_1 = \varphi_k (1 - e^{-\beta}) \quad (1.5)$$

სადაც  $\varphi_k$  – ცვალებადობის უკანასკნელი (ბოლო) მახასიათებელია, ანუ სიდიდე

$t \rightarrow \infty$  - ის დროის;

$\beta$  – კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს მცოცავი დეფორმაციის მიმდინარეობის სიჩქარეს.

დაძველების (დაბერების) თეორია დამუშავებულია და განვითარებულია მრავალი მეცნიერის შრომებში (ს.ვ. ალექსანდროვსკი, ი.ი. რიულდე, ვ. დილგერი, ვ. ბაზოტი და დ. ჩერნი, ო.ი. ბერგი და ენ. ერბაკოვი, კარაპეტიანი და სხვა მრავალი).

გ.ვ. კიზირიას ნაშრომში ბეტონი ცოცვადობის გათვლა რეალიზდება დაძველების თეორიის გამოყენებით, რომლის მიხედვითაც ცოცვადობის დეფორმაცია გამოიხატება დამოკიდებულებით:

$$\propto \varepsilon_1 + \varepsilon_1 \alpha \varphi_1 \quad (1.6)$$

სადაც  $\varepsilon_1$  – დრეკადობის დეფორმაციაა;

$\varphi_1$  – ცოცვადობის ფუნქცია.

გადაადგილების ერთდროულობის პირობებში ბეტონის ცოცვადობის გათვალისწინება ავტორს უფლებას აძლევს მიიღოს წრფივი დიფერენციალური განტოლებების სისტემა.

დაძველების მოდიფიცირებული თეორია /4/, ანუ დრეკად-მცოცავი სხეულის გამარტივებული თეორია გარკვეული ხარისხით (სიდიდით) გამორიცხავს შეცდომებს, რომლებიც დაკავშირებული არიან ცოცვადობის მრუდების პარალელურობის ჰიპოთეზის მიღებასთან, და ამასთან შენარჩუნებულია გამოთვლების სიმარტივე, რომელიც დამახასიათებელია დაძველების (სიბერის) კლასიკურ თეორიასთან.

ეს თეორია განვითარებულია ე.ა. გოლიშევას და ა.ი. ბარაშიკოვის, ი.დ. დივშიცის, დ. დჟევტიჩის და ვ. პრასკოვოჩის და სხვათა შრომებში.

წარმოდგენილი “სახელმძღვანელოს” მეთოდს საფუძვლად უდევს დაბერების (დაძველების) მოდიფიცირებული თეორია, რომლის ბირთვი ასეთ სახეს ღებულობს:

$$1+E(t, \tau) = 1 + \varphi(t) - \varphi(\tau) + \theta_0 - m\varphi(t) \quad (1.7)$$

სადაც  $\theta$  – ბეტონის მყისიერად მიმდინარე ცოცვადობის დეფორმაციის საბოლოო დახასიათებაა.



ეს ფორმულა გარკვეული მიახლოებით გამოხატავს მასალის როგორც “დაძველებას” (“დაბერებას”), ასევე ცოცვადობის დეფორმაციის “მემკვიდრეობით” თვისებებს და დატვირთვის საწყის პერიოდში მათი განვითარების სწრაფად მიმდინარეობის ხასიათს.

მემკვიდრეობითი დაძველების თეორიაში გათვალისწინებულია როგორც დაძველების მოვლენა, ასევე დრეკადი მემკვიდრეობაც. ეს თეორია წარმოადგინეს და დაამუშავეს გ.ნ. მასლოვმა, ნ.ხ. არუთინიანმა და ა.ა. გვოზდევმა /2,5/ და შემგომში განავითარეს ი.ე. პროკოპოვიჩმა, ს.ვ. ალექსანდროვსკიმ, პ.ი. ვისილიევმა, ნ.ი. პანარინმა, ვ.მ. ბონდარენკომ, ა.პ. კუდზისმა, ა.ა. ზევიანმა, ა.ი. ფილიპოვმა და სხვა მეცნიერებმა.

დეფორმაციებს და დამაბულობებს შორის ძირითადი დამოკიდებულება ასე ჩაიწერება:

$$\varepsilon(t) = \sigma(\tau_1)\delta(t, \tau) + \int_{\tau_1}^1 \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \delta(t, \tau) d\tau \quad (1.8)$$

ან ცალკეულ ნაწილებად ინტეგრირების შემთხვევაში

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_0^1 \sigma(\tau) \frac{\partial \sigma(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (1.9)$$

ა.ა. გვოზდევის მიხედვით

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^1 \frac{\sigma(t)}{ER(\tau)} L(t, \tau) d\tau \quad (1.10)$$

სადაც  $K(t, \tau)$  – ადრე არსებული (მოქმედი) დამაბულობის გავლენის ფუნქციაა  $\varepsilon(\tau)$  დეფორმაციაზე.

ცოცვადობის საზომად ნ.ა. არუთინიანი ლებულობს:

$$c(t, \tau) = \theta(\tau)g(t - \tau) = \left(c_0 + \frac{A_1}{\tau}\right) [1 - e^{-y(t-\tau)}]$$

(1.11)

ხოლო ს.ნ. ალექსანდროვსკის /1/ მიხედვით სათანადო დამოკიდებულება ასეთ სახეს ღებულობს:

$$c(t, \tau) = \varphi(\tau) - F(t)(e^{yr} - A_c) - \Delta(\tau)e^{-a(r-\tau)}$$

(1.12)

რომელიც საუკეთესოდ აღწერს ექსპერიმენტალურ მონაცემებს.

ა.ბ. კვიადარასი და ა.ნ. კუდზინი ცოცვადობის საზომად გვთავაზობენ გამოსახულებას:

$$c^-(t, \tau) = c(r, \tau) + \frac{1}{E(\tau)} - \frac{1}{E(E, \tau)} \quad (1.13)$$

რომელიც უკეთესად გამოსახავს დრეკადობის მოდულის გავლენას დროში.

### 1.3. ბეტონის ცოცვადობის ალბათური ბუნება

რკინაბეტონის კონსტრუქციების პროექტირებისათვის და მშენებლობისათვის საჭიროა ბეტონის ხანგრძლივი დეფორმაციების მნიშვნელობათა ნორმირება მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტულ მონაცემთა სტატისტიკური დამუშავების შესაბამისად.

ე.ნ. ჩერბაკოვის, /20,21/ ი.ვ. პროკოპოვის, ო.ი. ბლოხის და მ.ნ. ზასტავას შრომებში მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდით უფრო საიმედოდაა დასაბუთებული აუცილებელი საანგარიშო მახასიათებლები და მოცემულია მათგან სავარაუდო გადახრათა მაქსიმუმები.

ცოცვადობის დეფორმაციებთან ალბათური მიდგომები მოცემულია ასევე ზ. ბაზონტის, უ. ჯორდანის, რ. ვესტლუნდის , ე. ცინლერის, ე.ბ. შერბაკოვის, ლ.ნ. მაკარენკოს და ნ.მ. ბიტკოს, მ. ჭანტურიას /17,18,19/ და სხვათა შრომებში.

ე.ნ. შერბაკოვის /20/ შრომებში მოცემულია ბეტონის მექანიკური მახასიათებლების პროგნოზირების მეთოდები, მათ შორის მისი ცოცვადობის (მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტალური მონაცემების სტატისტიკური გადამუშავების საფუძველზე).

ცოცვადობის ძირითადი პარამეტრების პროგნოზირებას ეძღვნება ი.პ. სამორინის, ი. ერიომინის, ო. ბლოხის, მ.მ. ზასტავის და სხვათა გამოკვლევებიც.

## 1.4. ხიდების გაანგარიშების მეთოდების ისტორიული მიმოხილვა

თანამედროვე ხიდების სახეობანი მეტად მრავალფეროვანია. მათი კლასიფიკაცია შეიძლება სხვადასხვა თვალსაზრისით მოხდეს. დანიშნულების მიხედვით ძირითად სახეობას რკინიგზის და ავტოსაგზაო ხიდები წარმოადგენს. მნიშვნელოვანია ხიდების კლასიფიკაცია მათ მიერ გადალახული დაბრკოლების სახის მიხედვით. უმეტეს შემთხვევაში ხიდები მდინარეებს კვეთენ. ასეთი ნაგებობა საკუთრივ ხიდს წარმოადგენს. მისი ზომების განმსაზღვრელი პირობაა მდინარის ხარჯის დაუბრკოლებელი გატარება. ხიდს, რომელიც ღრმა ხევს ან ხეობას გადახურავს, ვიადუკი ეწოდება. ხევში მომდინარე წყლის ნაკადი ამ შემთხვევაში ხიდის ზომაზე გავლენას აღარ ახდენს – ისინი ხევის კონფიგურაციით განისაზღვრება. ვიადუკები ხშირად გვხვდება მთიან რაიონებში. ზოგიერთ შემთხვევაში ხიდი კეთდება შემხვედრი გზის გადასაკვეთად. ასეთ ხიდს გზაგამტარი ეწოდება. არის ისეთი შემთხვევები, როდესაც გზას არავითარი საგანგებო დაბრკოლება არ ხვდება – ის შეიძლება ვაკისზე მოეწყოს; მაგრამ ეკონომიური მიზნით უფრო ხელსაყრელია ხიდის გაკეთება. ამ შემთხვევაში ხიდს ესტაკადა ეწოდება.

ხიდები უნდა განვასხვავოთ მათი მასალის მიხედვითაც. ზოგად შემთხვევაში ხიდის საყრდენებისა და მალის ნაშენების მასალა შეიძლება სხვადასხვა იყოს. ამიტომ მიღებულია ხიდების კლასიფიკაცია მათი მალის ნაშენის მასალის მიხედვით. ამ თვალსაზრისით გამოირჩევა ხის, ქვის, რკინაბეტონის და ლითონის ხიდები.

მეტად მნიშვნელოვანია ხიდების კლასიფიკაცია მათი სტატიკური სქემის მიხედვით. განმსაზღვრელ როლს აქ მალის ნაშენის სტატიკური სქემა თამაშობს. ამ თვალსაზრისით ძირითადი სახეობაა: კოჭური, თაღოვანი და კიდული (ვანტური) ხიდები.



ნახ.1. ჰემისჰოფის ხიდი მდ. რეინზე (შვეიცარია)

კოჭური ხიდის (ნახ.1) მალის ნაშენის მზიდი კონსტრუქცია თავისი სტატიკური სქემით წარმოადგენს კოჭს, ე.ი. ისეთ სისტემას, რომელიც შვეული დატვირთვების დროს მხოლოდ შვეულ რეაქციებს წარმოქმნის. იგი შეიძლება იყოს როგორც ჭრილი, ისე უჭრი ან კონსოლური-სახსროვანი.

თაღოვანი ხიდის მალის ნაშენის ძირითადი მზიდი კონსტრუქცია წარმოადგენს თაღს ან კამარას (ნახ.2). ეს გამბრჯენიანი კონსტრუქციაა: შვეული დატვირთვების მოქმედების დროს, გარდა შვეული რეაქციებისა, წარმოიშობა თარაზული რეაქცია – განმბრჯენი, მიმართული მალის შიგნით.



ნახ.2. თალოვანი ხიდი მდინარე რეინზე ქ. კონსტანცაში (გერმანია)

კიდული ხიდის ძირითადი მზიდი კონსტრუქციაა აგრეთვე გამბრჯენიანი სისტემა. ეს არის ჯაჭვი (ვანტი), რომელიც გაჭიმვაზე მუშაობს. შვეული დატვირთვების მოქმედება აქაც წარმოშობს თარაზულ რეაქციას – განმბრჯენს, მაგრამ თალოვანი ხიდებისაგან განსხვავებით, განმბრჯენი აქ მალიდან გარეთაა მიმართული (ნახ.3).



ნახ.3. კიდული ხიდი პოტუგალიაში

ნაგებობის მდგრადობის საკითხები ყოველთვის იყო მშენებლობის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პრობლემა. ახალი კონსტრუქციული ფორმების შექმნა, ახალი მასალების დანერგვა, გაანგარიშებისა და პროექტირების მეთოდების დახვეწა მუდამ მიმართულია ნაგებობის საექსპლოატაციო მახასიათებლის გაუმჯობესებისაკენ, მისი საიმედოობისა და ხანმედგობის ამაღლებისაკენ, ადამიანის უსაფრთხოების უზრუნველყოფისაკენ ნაგებობის ექსპლოატაციის ყველა სტადიაზე.

თუ გადავავლებთ თვალს ნაგებობების დაპროექტებისა და გაანგარიშების მეთოდების განვითარების ისტორიას, ვნახავთ, რომ ჯერ ყურადღება ექცეოდა კონსტრუქციების სიმტკიცის უზრუნველყოფის საკითხებს და მხოლოდ მოგვიანებით დადგა დღის წესრიგში მათი მდგრადობის პრობლემა, რაც დაკავშირებული იყო მასიური კონსტრუქციების სისტემურ ჩანაცვლებასთან მცირე განივკვეთის მქონე კონსტრუქციებით.

ამ პრობლემის გადაწყვეტაში დიდი წვლილი აქვს შეტანილი ლეონარდ ვილერს, რომელმაც დაამუშავა შეკუმშული ღეროს მდგრადობის

თეორია და დაადგინა კრიტიკული ძალის მნიშვნელობა, რომელიც ელემენტის მდგრადობის ერთ-ერთ მთავარ კრიტერიუმად ჩამოაყალიბა.

ახალი მასალების (ფოლადი, რკინაბეტონი) დანერგვამ მშენებლობის პრაქტიკაში შესაძლებელი გახადა დიდმალიანი კონსტრუქციების შექმნა. ეს განსაკუთრებით აშკარად დაეტყო ხიდების მშენებლობის მსოფლიო პრაქტიკას. მე-19 საუკუნის ბოლოსა და მე-20 საუკუნის დასაწყისში აიგო ისეთი ცნობილი გრანდიოზული ხდები როგორცაა ფორტის ხიდი შოტლანდიაში, ხიდი ვეროცანო-ნეროუზი აშშ-ში, კვებეკის ხიდი კანადაში და მრავალი სხვა /1/. ამ ობიექტების მშენებლობის პროცესში გამოიკვეთა კონსტრუქციების მდგრადობის მნიშვნელობა ნაგებობის სიმტკიცისა და საექსპლოატაციო საფრთხოების უზრუნველყოფისათვის.

დიდი მალეების მქონე ხიდების სიგრძემ, არახელსაყრელმა დინამიკურმა მახასიათებლებმა (დაბალი სიხშირეები და რხევების მიღვევის დეკრემენტის მცირე მნიშვნელობა), სიხისტის კოჭის განივკვეთის არახელსაყრელმა ფორმებმა საჭირო გახადა საინჟინრო ნაგებობების დაპროექტების ტრადიციული მეთოდების გადასინჯვა და წინა პლანზე წამოსწია საკითხები, რომლებსაც ადრე ნაკლები ყურადღება ექცეოდა.

საერთოდ ამ ტიპის ხიდებისათვის დატვირთვის ძირითად სახეს საკუთარ წონასთან (სტატიკა) ერთად წარმოდგენს დროებითი დინამიკური დატვირთვები: მოძრავი ტრანსპორტისა, ქარისა და სეისმური.

მოძრავი დატვირთვის ნაგებობაზე დინამიკური გავლენის გათვალისწინება ხდება სტატიკური დატვირთვის პირობითი ზრდით ე.წ. დინამიკურობის კოეფიციენტით, რომლის მნიშვნელობა დგინდება ექსპერიმენტული მონაცემების, ძირითადად ხიდების გამოცდით მიღებული სიდიდეების, სტატისტიკური დამუშავებით.

მსგავსი მიდგომით ხასიათდება ნაგებობის გაანგარიშება სეისმურ დატვირთვაზეც - სეისმური ძალების დინამიკური ზემოქმედება შეცვლილია კვაზისტატიკური ზემოქმედებით, თუმცა ბოლო პერიოდში აქტიურად



იყენებენ ნაგებობების გაანგარიშების მეთოდს რეალური სეისმოგრამების გამოყენებით.

თუ სეისმური და ტრანსპორტის დატვირთვის მნიშვნელობა აპრიორულად ცხადი იყო და მათ ზემოქმედებაზე ნაგებობის გაანგარიშებას თავიდანვე ექცეოდა საკმაო ყურადღება.

ჩვეულებრივი ნაგებობებისათვის ქარის დატვირთვა მეორეხარისხოვან როლს თამაშობს. ამიტომ ქარის გავლენას კონსტრუქციის სიმტკიცესა და საიმედოობაზე დიდი ყურადღება არ ექცეოდა. მხოლოდ 1940 წელს ამერიკის შეერთებულ შტატებში ტაკომას ხიდის ცნობილი ავარიის შემდეგ მიექცა სათანადო ყურადღება ხიდების და საზოგადოდ მოქნილი სისტემების მდგრადობისა და სიმტკიცის საკითხებს ქარის დატვირთვისათვის მიმართებაში.

ეს ხიდი, მთავარი მალით 854 მ. კარგად ეწინააღმდეგებოდა ძლიერი ქარის ზემოქმედებას, მაგრამ მეტად მგრძნობიარე აღმოჩნდა შედარებით სუსტი ქარების მიმართ, რითაც თავიდანვე მიიქცია მკვლევარების ყურადღება. ხიდის მალის ნაშენის H-ებრი კვეთის ნ. ბაუერსის მიერ ჩატარებულმა კვლევამ აეროდინამიურ მილში აჩვენა კონსტრუქციის დაბალი აეროდინამიკური მდგომარეობა. ამის გამო დაიწყო სათანადო ღონისძიებების შემუშავება ხიდის მდგომარეობის ასამაღლებლად, მაგრამ ბუნებამ არ დააცადა მკვლევარებს საქმის ბოლომდე მიყვანა, ხიდი დაინგრა და ამას მოჰყვა ავარიის მიზეზების ინტენსიური კვლევა, რაც გადაიზარდა მოქნილი სისტემების დამაკმაყოფილებელი ფიზიკური მოდელის ძიებაში და შესაბამისი მათემატიკური თეორიების შექმნაში ამ სახის სისტემების ქარის ნაკადით გარშემოდინების აღწერისათვის.

კიდული და ვანტური ხიდების, ზოგადად მოქნილი სისტემების კვლევის დარგში დღეს წამყვანი პოზიციები უჭირავთ ისეთ საკვლევ-სამეცნიერო ცენტრებს როგორებიცაა ნაციონალური ფიზიკური ლაბორატორია ტედინგტონში (დიდი ბრიტანეთი), ვაშინგტონის უნივერსიტეტის საკვლევ-სამეცნიერო ლაბორატორია (აშშ), ტოკიოს

უნივერსიტეტი (იაპონია), შტუტგარტის უნივერსიტეტი (გერმანია), ლონდონის ლაბორატორია (კანადა). ამ სამეცნიერო ცენტრებში აეროდინამიკის პრობლემებზე მუშაობდნენ რ. ფრეზერი, კ. სკრუტონი, ფ. ფარკუასონი, დ. შტაინმანი, ა. ხირაი, ფ. ლეონგარტი, კ. კაპელი, ა. დევენპორტი და სხვანი.

საქართველოში ანალოგიური კვლევები ეკუთვნით ა. რაზმაძეს, ი. მელაშვილს, ო. სულაბერიძეს და სხვებს.

დღეს ნაგებობების მდგრადობის კვლევისას და განსაკუთრებით მათი დაპროექტებისას ფართოდ გამოიყენება გაანგარიშების რიცხვითი მეთოდები, რაც შესაძლებელი გახდა კომპიუტერული ტექნიკის განვითარების საფუძველზე. ამასთან ერთად, ნაგებობის და მისი ცალკეული კონსტრუქციული ელემენტების მუშაობის ცხადი ადეკვატური სურათის მისაღებად, რაც განსაკუთრებით აქტუალურია ახალი კონსტრუქციების დამუშავებისა და შექმნის პროცესში, დიდ მნიშვნელობას ინარჩუნებს გაანგარიშების ანალიზური მეთოდების განვითარება.

დინამიკური გამოცდებისას განისაზღვრება რხევების სიხშირეები, ამპლიტუდები და მილევის ლოგარითმული დეკრემენტი. ჰაერის ნაკადის სიჩქარეს ზრდიან მოცემულ რეჟიმში კატასტროფული შედეგების დადგომამდე, ანუ ამა თუ იმ პარამეტრისთვის საზღვრავენ ქარის კრიტიკულ სიჩქარეს.

ვანტური სისტემის ხიდები უძველესი დროიდან გამოიყენება. ჩინეთში, სამხრეთ და ცენტრალურ აფრიკაში, კავკასიაში ამ ტიპის ხიდების მშენებლობის უძველესი ტრადიციები არსებობს. კიდული და ვანტური სისტემები, სადაც მზიდ ელემენტად ჯაჭვები გამოიყენებოდა, ფართოდ იყო გავრცელებული შუა საუკუნეების ევროპის საფორტიფიკაციო არქიტექტურაში.

თანამედროვე ტიპის ვანტური სისტემების განვითარება დაკავშირებულია მავთულიანი ბაგირების წარმოების მასიურ ხასიათთან, რაც შესაძლებელი გახდა ფოლადის მეტალურგიის განვითარებასთან

ერთად. მე-19 ს-ის პირველ ნახევარში და განსაკუთრებით მე-19 - მე-20 სს-ის მიჯნაზე ევროპასა და ამერიკაში აიგო მრავალი ინჟინრული და არქიტექტურული თვალსაზრისით შესანიშნავი ვანტური სისტემის ხიდი. ამ სისტემის ხიდების განვითარებაში მნიშვნელოვანია ჟისკლიარისა და ლაინეკუგელ ლე კოკის წვლილი, რომლებმაც შექმნეს ვანტური ხიდების თანამედროვე სისტემები და მათი გაანგარიშების საფუძვლები. საქართველოში თანამედროვე სისტემის ვანტური ხიდია (სიხისტის კოჭის გარეშე) პროფ. ე. კრილცოვის პროექტით 1928 წელს აშენებული ცნობილი ხიდი მდ. მაგანაზე (ნახ. 4).

ვანტური ხიდების მშენებლობის თანამედროვე პრაქტიკაში აღინიშნება შემდეგი ტენდენციები:

- იზრდება ხიდების მთავარი მალეების სიგრძე: ლითონის ხიდებისთვის 500 მ-მდე და რკინაბეტონის ხიდებისთვის 350-მდე;

- მცირდება სიხისტის კოჭების ფარდობითი სიმაღლე: ლითონის ხიდებისთვის  $l$ : 125-მდე და რკინაბეტონის ხიდებისთვის  $l$ : 500- მდე;

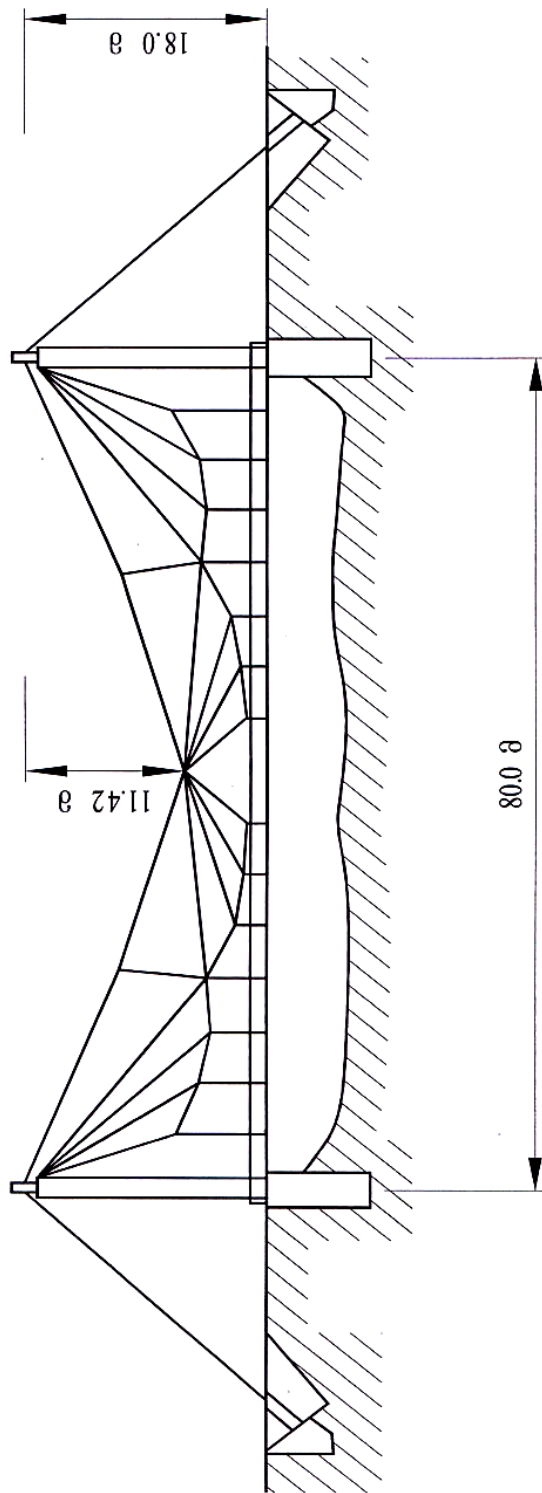
- სიხისტის კოჭების განივკვეთს აქვს ძირითადად აეროდინამიკური მოხაზულობა ჩაკეტილი კოლოფისებური კვეთის ან მალის ნაშენი განივი კვეთის ნაპირებში განლაგებული კოლოფისებრი კონსტრუქციების სახით;

- თანმიმდევრულად მცირდება პანელების ფარდობითი სიგრძე ვანტების რაოდენობის ზრდასთან ერთად, რაც დაკავშირებულია სიხისტის კოჭში მღუნავი მომენტების შემცირებისკენ სწრაფვასთან;

- აშკარად არის გამოხატული მისწრაფება ნაგებობის მასალატევადობის შემცირებისკენ, რაც იძლევა ხიდის მალის მნიშვნელოვანი ზრდის საშუალებას.

მოქნილი სისტემის ხიდების (კიდული და ვანტური ხიდები) კონსტრუქციების დაპროექტებისას ძირითადად ამოცანად იღებენ კონსტრუქციის სიმტკიცისა და სიხისტის უზრუნველყოფას დატვირთვის სტატიკური ზემოქმედებისას. დროებითი მოძრავი დატვირთვის ზემოქმედების დინამიკური ეფექტის გათვალისწინება ხდება სტატიკური

დატვირთვის პირობითი გაზრდით, ანუ დინამიკური კოეფიციენტის გამოყენებით.



ნახ. 1.2. ხიდი მდ. მაგანაზე ვანტური ფერმით

ნახ. 4. ხიდი მდ. მაგანაზე ვანტური ფერმით

საერთოდ კიდული და ვანტური ხიდების კონსტრუქციები ხასიათდებიან გეომეტრიული და სიხისტითი მახასიათებლების მრავალფეროვნებით.

თანამედროვე ვანტური ხიდები, როგორც წესი, უფრო მგრძობიარეა რხევების მიმართ, ვიდრე ადრინდელი კონსტრუქციები, რაც გამოწვეულია მალის ნაშენის საკუთარი წონის შედარებით შემცირებით, მოქნილობის გაზრდით, კონსტრუქციის მადემპფირებელი უნარის დაქვეითებით.

ვანტური ხიდების გაანგარიშება სტატიკურ და დინამიკურ დატვირთვებზე დაკავშირებულია მთელ რიგ მათემატიკურ სირთულეებთან. ამის გამო საკითხის გასამარტივებლად გაანგარიშების არსებული მეთოდები იყენებენ სხვადასხვა დაშვებებს. მათ შორის ძირითადი შემდეგია:

- ვანტურ ხიდის სიხისტის კოჭს წარმოვიდგენთ როგორც მრავალმალამ უჭრ კოჭს დრეკად საყრდენებზე;
- ვანტები რხევის პროცესში რჩება გაჭიმული, ანუ განიხილება სისტემის მცირე გადაადგილებები, რომელთა დროს ვანტი არ გამოდის მუშაობის მდგომარეობიდან;
- ვანტის მასა სავალი ნაწილისა და სიხისტის კოჭის მასასთან შედარებით უგულვებელყოფილია;
- კოჭის სიხისტე და მალის ნაშენის გრძივი მეტრის წონა ხიდის მთელ სიგრძეზე მუდმივი სიდიდეა;
- შუალედ ბურჯებზე პილონის დაყენების ადგილას სიხისტის კოჭი არ ითვისებს მდუნავ მომენტებს;
- რხევების მიღების გავლენა და პილონების ინერციის თარაზული ძალები უგულვებელყოფილია.

ამ დაშვების საფუძველზე საანგარიშო სქემა წარმოადგენს ბოლოებზე სახსრულად დაყრდნობილ და ვანტების მიმაგრების ადგილებში დრეკადი შუალედური საყრდენების მქონე კოჭს მალით *l*.

ყოველი შუალედური საყრდენის სიხისტე განისაზღვრება შესაბამისი ვანტის დეფორმაციულობით, დახრის კუთხით და პილონის თარაზული გადაადგილებით ვანტის ჩამაგრების დონეზე.

თუ სისტემა სიმეტრიულია შუა კვეთის მიმართ, ანგარიში მნიშვნელოვნად მარტივდება.

კიდევ ერთი დაშვება გაანგარიშების გამარტივების მიზნით იმაში მდგომარეობს, რომ რადგან კონსტრუქციული მოსაზრებებიდან და მღუნავი მომენტების რაციონალური განაწილების პირობიდან გამომდინარე პანელების სიგრძე ერთნაირი ინიშნება, დრეკადი საყრდენების სიხისტეებს შორის სხვაობა მცირეა და საკმაოდ კანონზომიერად მცირდება მალის შუისკენ. ამის შედეგად, როგორც ამას გაანგარიშებების პრაქტიკა აჩვენებს, ყველა დრეკადი საყრდენის სიხისტე შეიძლება მიღებულ იქნეს ერთნაირი და ტოლი

$$\Delta = \frac{\bar{\Delta}^{-2}}{\Delta_k} \quad (1.4)$$

სადაც  $\bar{\Delta}$  – სიხისტეების საშუალო არითმეტიკულია;

$\Delta_k$  – მალის შუასთან ყველაზე ახლოს განლაგებული საყრდენის სიხისტეა.

ვანტური სისტემების ხისტი ელემენტების გაანგარიშებისას ძირითადად საქმე გვაქვს შეკუმშულ და შეკუმშულ-გალუნულ ელემენტებთან. ამ გაანგარიშებებისას მთავარი ამოცანაა კრიტიკული მკუმშავი ძალის დადგენა, როგორც ელემენტის მდგრადობის განმსაზღვრელი პარამეტრისა, ეს კი თავის მხრივ, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მოქნილი სისტემების სიხისტის ელემენტების დინამიკურ მახასიათებლებზე.

ხიდების კონსტრუქციების აეროდინამიკური მდგრადობა განისაზღვრება მათი აეროდინამიკური თვისებებით ჰაერის ნაკადში, რაც თავის მხრივ, განპირობებულია კონსტრუქციის განიკვეთის ფორმით, მისი ორიენტაციით ჰაერის ნაკადის მიმართ, ნაგებობისა და მისი ცალკეული

ელემენტების დრეკადი, ინერციული და მადემპფირებელი მახასიათებლებით, ქარის სტრუქტურით და რიგი სხვა გარემოებებით.

რხევების პარამეტრების მართვის აეროდინამიკური მეთოდების ეფექტურობა განპირობებულია რხევების გამომწვევ აეროდინამიკური მიზეზებზე ზემოქმედების ხარისხით. ამიტომ რხევების პარამეტრების მართვის აეროდინამიკური მეთოდები ეფუძნება რიგ ცნობილ ეფექტებს: კონსტრუქციის გარშემო ჰაერის ნაკადის ცირკულაციის ხასიათის შეცვლა, კარმანის გრიგალების მოწყვეტის ფაზის ცვლილება ნაგებობის სიგრძეზე, ანუ აგრიგალების რეულარობის დარღვევა და სხვა. ყოველივე ამის მიღწევა ხდება ნაგებობისა და მისი კონსტრუქციებისთვის შესაბამისი გარსადენის ფორმის მიცემით, გამჭოლი კონსტრუქციების გამოყენებით, კონსტრუქციაზე გარსმდენების დაყენებით და სხვა მსგავსი ხერხებით.

თანამედროვე ხიდმშენებლობაში ფართო გამოყენებას ნახულობს გაუმჯობესებული გარსადენის ფორმის კოლოფისებრი განივკვეთის მალის ნაშენები (ნახ. 1.6). ექსპლუატაციაში მყოფი ხიდებისთვის, რომლებსაც აქვთ არაგარსადენის ფორმის განივი კვეთები, იყენებენ სხვადასხვა ფორმის გარსშემომდენებს (ნახ. 1.7)

დ.შტაინმანმა ყურადღება მიაქცია იმ გარემოებას, რომ სავალ ნაწილში განაჭერების მოწყობა, აგრეთვე სავალ ნაწილსა და სიხისტის კოჭს შორის ღიობის დატოვება მნიშვნელოვნად ზრდის ხიდის აეროდინამიკურ მდგრადობას.

## 1.5. რკინაბეტონის მრავალმალღიანი უჭრი ხიდის გაანგარიშება მასში განვითარებული ცოცვადობის დეფორმაციის ალბათური ბუნების გათვალისწინებით

კონსტრუქციის საიმედოობაზე გაანგარიშების ძირითად ამოცანას წარმოადგენს იმის ალბათობის განსაზღვრა, რომ მოცემული საექსპლოატაციო დროის განმავლობაში შენობის ან ნაგებობის ელემენტები არ აღმოჩნდნენ ზღვრულ მდგომარეობაში. რკინაბეტონის კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის განსაზღვრისას ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს ბეტონის დრეკადობის მოდული -  $E_b$ , რომელიც წარმოადგენს ექსპერიმენტულად მიღებულ სიდიდეს თავისი შესაძლო გადახრებით საშუალოდან. ამ სიდიდის განაწილების კანონის დადგენა წარმოადგენს კონსტრუქციის საიმედო მუშაობის ერთ-ერთ გარანტს. ასევე მნიშვნელოვანია კონსტრუქციებში ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებელი, რომელიც წარმოადგენს დრეკადობის მოდულის ნაწარმოებ სისდიდეს, და ამიტომაც წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს.

შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კონსტრუქციებში ცოცვადობის დეფორმაციისგან აღძრული ძალები იმდენად მნიშვნელოვანია რკინაბეტონის კონსტრუქციების საინჟინრო გაანგარიშებებში, რომ შესაძლო გადახრების საზღვრების დადგენა წარმოადგენს ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ამოცანას.

ჩემი მიზანია, განვსაზღვრო ბეტონის დრეკადობის მოდულის, ცოცვადობის დეფორმაციის ზომის და შედგენილ კვეთებში აღძრულ ძალვათა გადახრის საზღვრები. ძალვათა სიდიდეები წარმოადგენენ შემთხვევით სიდიდეებს. განხილულია შედგენილი კვეთის ორმალღიანი უჭრი კოჭი, რომლის სტატიკური სქემა იცვლება მოქმედი დატვირთვების მოდების შემდეგ. როგორც ზემოთ ავღნიშნე, მთავარ ფაქტორს წარმოადგენს ბეტონის ცოცვადობისგან გამოწვეული ძაბვათა რელაქსაცია.



უჭრი კონსტრუქცია იგება შემდეგი თანმიმდევრობით: წინასწარ დამზადებული კოჭები იდება საყრდენზე (საფუძველზე) (ნახ.10) რის შემდეგაც პირაპირებს შორის არე მონოლითდება ბეტონით. კონსტრუქციის განსაკუთრებულობა მდგომარეობს იმაში, რომ ხანგრძლივად მოქმედი დატვირთვა – კოჭის საკუთარი წონა – მოდებულია სხვა სტატისტიკურ სქემაზე – ჭრად სქემაზე, ხოლო ცოცვადობის დეფორმაციები ვითარდებიან სხვა უჭრ სქემაზე, ასევე მნიშვნელოვანია ის, რომ კონსტრუქციის ელემენტები შედგენილი კვეთისაა.

ასეთ შემთხვევაში ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად აღძრული მღუნავი მომენტი განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$M_{Mc} = M_{dr} (1 - e^{-\varphi n})$$

სადაც  $M_{Mc}$  - საყრდენი მომენტი, რომელიც ცოცვადობის დეფორმაციისგან ვითარდება.  $M_{dr}$  - მომენტის სიდიდეა, რომელიც აღიძვრებოდა უჭრ კონსტრუქციაში, თუ ხანგრძლივ დატვირთვას მოვდებდით უჭრ კონსტრუქციაზე, ე.ი. იმ სისტემაზე რომელშიც აღიძვრება ცოცვადობის დეფორმაციები.  $\varphi_n$  - ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ზღვრული მახასიათებელია.

დამკვეთულია ჰიპოთეზა, რომ მოცემული სტატისტიკური განაწილების რიგს შეიძლება მივუსადაგოთ ნორმალური (გაუსის) განაწილების კანონი, რომელიც მოწმდება პირსონის შესაბამისობის კრიტერიუმით. ამ მიზნით გამოთვლილია თეორიული ალბათობები  $P_i$ - ური მნიშვნელობათა მოხვედრისა და სტატისტიკური რიგის სიხშირესთან  $P_1^*$ - თან. ცხრილების დახმარებით და ფორმულების საშუალებით გამოთვლილია პირსონის განსხვავებულობა  $X^2=4.50$ , თავისუფლების ხარისხის რიცხვი  $r=9$ , ცხრილის საშუალებით ალბათობა იმისა, რომ მოცემული სიდიდე, რომელსაც გააჩნია განაწილება  $X^2$   $r=9$ -ით, გადააჭარბებს მოცემულ მნიშვნეობას  $X^2=4.50$ -ს  $P=0.81 > 0.1$ , რადგან ეს ალბათობა საკმაოდ დიდია, შეიძლება დავუშვათ, რომ მოცემულ სტატისტიკურ განაწილებას გააჩნია

თეორიული განაწილების ფუნქცია ნორმალური განაწილების კანონის სახით:

$$f_{M_x} = \frac{0.44}{1.11 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(M_x - 17.2)^2}{2 \cdot 1.11^2}\right)$$

სადაც 0.44 – ნორმალური განაწილების მრუდის (ბ) ჰისტოგრამასთან (5) მიახლოების კოეფიციენტი. ნორმალური განაწილების მრუდის (ბ) სტატისტიკური განაწილების რიგის ჰისტოგრამასთან (ა) ერთად, შეიძლება გამოვიყენოთ მოცემული ჰიპოთეზის კოლმოგოროვის შესაბამისობის კრიტერიუმით შესამოწმებლად.

შედგენილ კვეთებში ძაბვათა განსაზღვრისას ცოცვადობის გათვალისწინებით, უნდა გავიანგარიშოთ ეს სიდიდე ყველა მდგენელი ერთგვაროვანი ელემენტისათვის დროის ნებისმიერ მომენტში.

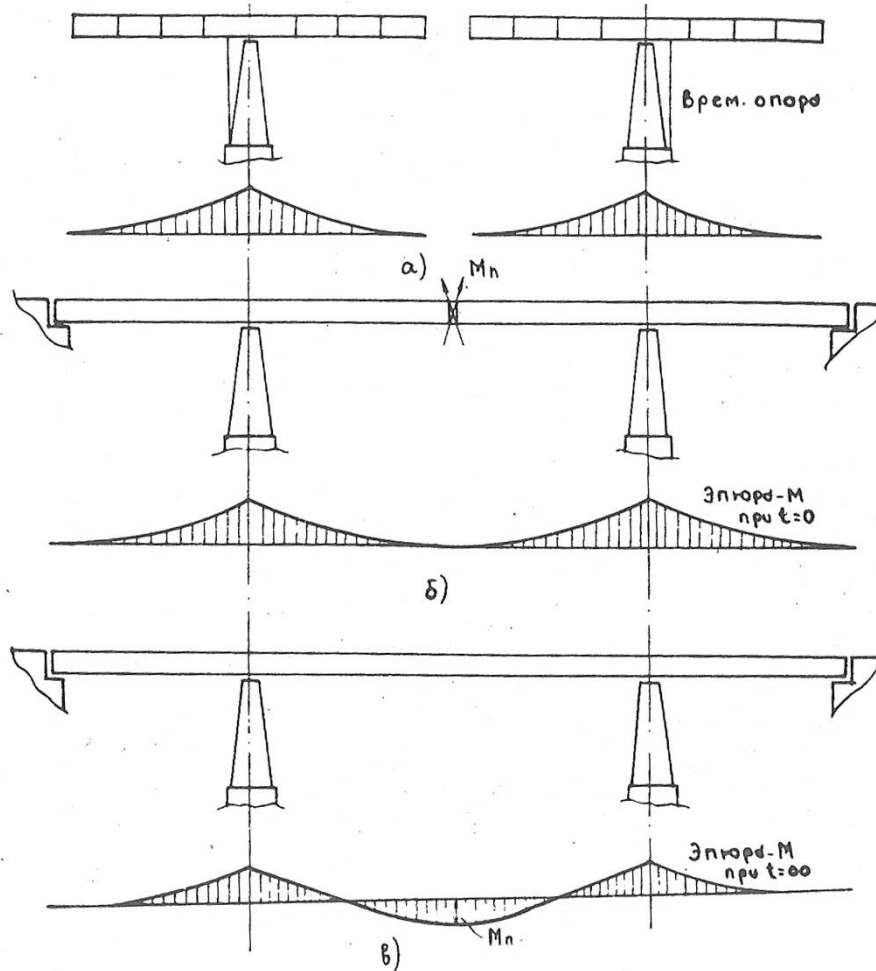
## 1.6. ძალგათა განსაზღვრა საავტომობილო ხიდში ცოცვადობის დეფორმაციის გათვალისწინებით

ზემოთ მოცემული მეთოდით გავიანგარიშეთ რკინაბეტონის უჭრი საავტომობილო ხიდის კონსტრუქცია, რომლის მასალებია 42X84X42 მ. რომელიც უნივერსალური ტექნოლოგიითა აგებული. ასეთი ხიდის (აწყობა) აგება მიმდინარეობს შემდეგი თანმიმდევრობით: ხიდის უჭრ კონსტრუქციაზე, რომელიც იგება დროებით საყრდენებზე კონსოლური სქემით, ხანგრძლივი დატვირთვა (კოჭის საკუთარი წონა) მოქმედებს ამ კონსოლური სქემის პირობებში (ნახ. 5)

კონსოლთა ცალკეული ნაწილების შეერთების მომენტში შუა მალის შუაში ძალები საკუთარი წონისგან შეერთების ადგილას ნულის ტოლია (ნახ. 5.ბ)

გამთლიანების განსკუთრებულობა იმაში მდგომარეობს, რომ კონსოლების პირაპირების დაბეტონებისას ფიქსირდება იგივე მობრუნების კუთხეები, რომელიც ჰქონდა პირაპირის ზედაპირს გამთლიანების მომენტში (ნახ. 5 ბ) კონსოლის მასალას, რომ არ ახასიათებდეს ცოცვადობის თვისება, მობრუნების კუთხეები არ შეიცვლებოდნენ. რადგანაც ბეტონს ახასიათებს ცოცვადობის თვისება, პირაპირების მობრუნების კუთხეები უნდა გაზრდილიყვნენ და უნდა გაზრდილიყო კონსოლის კიდის გადაადგილებაც, მაგრამ გამთლიანების პროცესი ხელს უშლის ამ კუთხეების გაზრდას და აგრეთვე გადაადგილების განვითარებასაც. კავშირის ადგილას ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად აღიძვრება ძალვა, რომლის განსაკუთრებულობა იმაში მდგომარეობს, რომ დამატებითი კავშირების მოდების მომენტში ისინი ნულის ტოლი არიან. ისინი აღიძვრებიან და იზრდებიან ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად, ე.ი. წარმოადგენენ დროში ცვალებად სიდიდეს. მღუნავი მომენტი, რომელიც აღიძვრება კონსოლთა შეერთების ადგილას, ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად გარკვეული დროის შემდეგ იმავე რიგისა იქნება,

როგორც მდუნავი მომენტი, რომელიც აღიძვრებოდა ჩვეულებრივი უჭრი სქემისას.



ნახაზი 5. საავტომობილო ხიდის სქემა

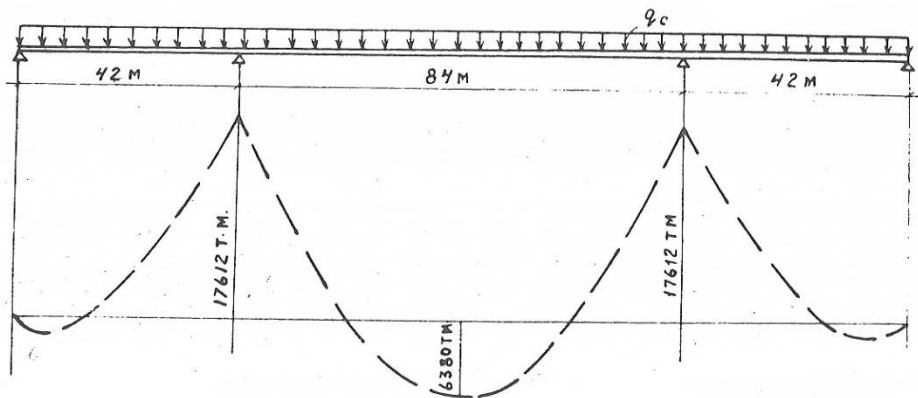
აღძრული მდუნავი მომენტი შეცვლის მოქმედ ძალებს კონსტრუქციის ყველა კუთხეში.

გარე სტატიკურად რკვევადი კონსტრუქციებისგან განსხვავებით, რომლებშიც დეფორმაციებს ცალკეულ კვეთებში შეუძლიათ გამოიწვიონ ძალვათა ცვლილება მხოლოდ ამ კვეთებში, სტატიკურად ურკვევ კონსტრუქციებში დეფორმაციის განვითარების ცალკეულ კვეთში მიყვარათ მთლიანი დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ცვლამდე.

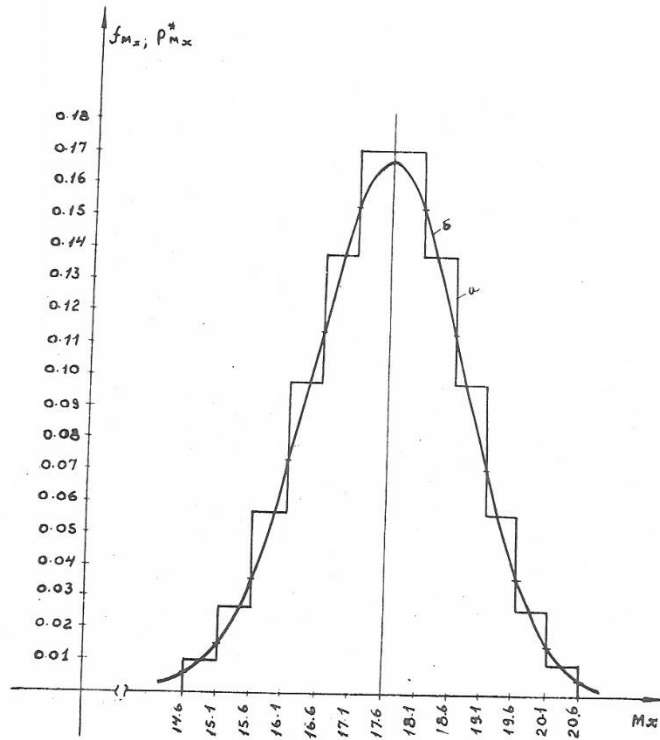
განგარიშება მოხდა კომპიუტერული პროგრამების დახმარებით. საანგარისო სქემა (ნახ 5. გ)-ს იდენტურია, როცა ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ზღვრული მახასიათებელი  $\varphi_n=2.0$  შესაბამისი მღუნავი მომენტი  $M = 17600$  ტ.მ. ნაჩვენებია (ნახ. 6)-ზე.

სტატისტიკური ექსპერიმენტის ჩასატარებლად ავიღე  $\varphi_n$ -ის მნიშვნელობათა მასივი  $n=2500$  (ცხრილი 18) და ამ მონაცემებით დავიანგარიშე შესაბამისი მომენტები ჯამური დატვირთვებისგან. რადგან საანგარიშო პროგრამა ითვალისწინებდა მრავალ ფაქტორს  $\varphi_n$ -სა და  $M_x$ -ს შორის დამოკიდებულება მივიღე თითქმის წრფივი.

მიღებულ იქნა  $M_x$ -ის შესაძლო მნიშვნელობათა მასივი, რომელიც რიგებად დაიყო, გავიანგარიშე მნიშვნელობათა რაოდენობა  $m_i^*$ , და სიხშირეები  $p_i^*$ , რომლის მოცემულ რიგს შეესაბამება. შევადგინე სტატისტიკური განაწილების რიგი, რომელიც ცხრილ 1-ში არის მოცემული. დანაყოფთა რაოდენობა  $k=12$  მოცემული სტატისტიკური რიგის ჰისტოგრამა ნაჩვენებია (ნახ. 7. ა)-ზე.



ნახაზი. 6. მღუნავი მომენტის ეპიურა



ნახაზი 7. საავტომობილო ხიდში აღძრული მღუნავი მომენტის ჰისტოგრამა და ნორმალური განაწილების მრუდი

ცხრილი №1 რეალურ ხიდში ბეტონის ცოცვადობის  
დეფორმაციებისგან აღძრული მომენტის მნიშვნელობათა  
სტატისტიკური განაწილების რიგი

$\mu_{n_2}$	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
$f_{n_2, \%}$	75	62,5	50	37,5	25	12,5	0	-12,5	-25	-37,5	-50	-62,5	-75
$M_x \cdot 10^6$	14,6	15,1	15,6	16,1	16,6	17,1	17,6	18,1	18,6	19,1	19,6	20,1	20,6
$M_x \cdot \%$	17	14	11	8	5	2	0	-2	-5	-8	-11	-14	-17
$m^*_{j_1}$	25	75	150	250	325	425	425	325	250	150	75	25	25
$p^*_{j_1}$	0,01	0,03	0,06	0,1	0,13	0,17	0,17	0,13	0,1	0,06	0,03	0,01	0,01

ცხრილი 1. რეალურ ხიდში ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციებისგან აღძრული მომენტის მნიშვნელობათა სტატისტიკური განაწილების რიგი

ცხრილი № 6 შედარებითი ცხრილი მომენტის მნიშვნელობებისათვის, რომლებიც აღიძვრებიან რეალურ ხიდში ცოცვადობის განვითარების დეფორმაციისგან

$M_x \cdot 10^6$	14,6	15,1	15,6	16,1	16,6	17,1	17,6	18,1	18,6	19,1	19,6	20,1
	15,1	15,6	16,1	16,6	17,1	17,6	18,1	18,6	19,1	19,6	20,1	20,6
$p_j^*$	0,01	0,03	0,06	0,1	0,13	0,17	0,17	0,13	0,1	0,06	0,03	0,01
$p_j$	0,01	0,027	0,057	0,098	0,138	0,171	0,171	0,138	0,098	0,057	0,027	0,01

ცხრილი № 7 რეალურ ხიდში ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციებისაგან აღძრული მომენტის მნიშვნელობათა ნორმალური განაწილების სიმკვრივები

$M_x \cdot 10^6$	14,6	15,1	15,6	16,1	16,6	17,1	17,6	18,1	18,6	19,1	19,6	20,1	20,6
$f_{m_x}$	0,005	0,015	0,036	0,071	0,114	0,153	0,168	0,153	0,114	0,071	0,036	0,015	0,005

ცხრილი 2. შედარებითი ცხრილი მომენტის მნიშვნელობებისთვის, რომლებიც აღიძვრებიან რეალურ ხიდში ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების პირობებში

ცხრილი 3. რეალურ ხიდში ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციისგან აღძრული მომენტის მნიშვნელობათა ნორმალური განაწილების სიმკვრივები



მოცემული მონაცემებისთვის გამოვიანგარიშეთ ალბათობის თეორიის ფორმულებით მათემატიკური ლოდინი  $m=17.6$  103, მეორე საწყისი მომენტი  $-a^*=311.05 \cdot 10^6$ . დისპერსია  $d=126 \cdot 10^6$ , სტანდარტი (საშუალო კვადრატული გადახრა)  $n=1.14 \cdot 10^3$ , ვარიაციის კოეფიციენტი  $\delta =0.065$ .

სტატისტიკური განაწილების ჰისტოგრამაში აშკარად ჩანს, რომ მოცემულ სტატისტიკურ განაწილებას შეესაბამება თეორიული განაწილების კანონი, ნორმალური განაწილების კანონის სახით. დავუშვებ ჰიპოთეზა ნორმალური კანონით განაწილების შესახებ აღძრული მდუნავი მომენტის შესაძლო მნიშვნელობებისთვის, რომელიც შევამოწმებ პირსონის შესაბამისობის კრიტერიუმით. ამ მიზნით გამოვიანგარიშეთ თეორიული ალბათობა  $p_i$  იმისა, რომ მოცემული ფორმულით (ნორმალური განაწილების კანონით) მიღებული მნიშვნელობები ნამდვილად მოხვდებიან  $i$ -ურ დანაყოფში (რიგში). ცხრილი 2-ის დახმარებით გამოვთვალეთ პირსონის კოეფიციენტი  $\chi^2 =4.35$ , თავისუფლების ხარისხის რიცხვი  $r=9$  და ალბათობის თეორიის გამოყენებით შევაფასეთ ალბათობა იმისა, რომ მოცემული სიდიდე, რომელსაც გააჩნია ეს  $\chi^2$  და  $r$ , აღემატება  $\chi^2$ -ს მოცემულ მნიშვნელობას  $\chi^2 = 4.53 - p=0.85 > 0.1$  რადგან ეს ალბათობა ძალზედ მაღალია მოცემულ სტატისტიკურ განაწილებაზე (ცხრილი 2) გააჩნია თეორიული ფუნქცია განაწილებისა, რომელსაც ნორმალური (გაუსის) განაწილების ფორმა აქვს:

$$\varphi_{mx} = 0.48 \exp/1; 14 \sqrt{2\pi}(-(M_x - 17.6)^2/ 2 \cdot 1.14^2) \quad (3.1)$$

სადაც 0.48 ნორმალური განაწილების მრუდის ჰისტოგრამასთან მიახლოების კოეფიციენტია. (ნახაზი 7.)

ნორმალური განაწილების კანონის სიმკვრივის მნიშვნელობები ყოველ საზღვარზე მოცემულია (ცხრილი 3-ში).

მოცემული ჰიპოთეზა მოწმდება კოლმოგოროვის შესაბამისობის კრიტერიუმით. მაქსიმალური მოდული განსხვავებისა ნორმალურ და სტატისტიკურ განაწილებას შორის  $D^*=0.02$ , კოლმოგოროვის რიცხვი

$\lambda=0.02\sqrt{2500}=1$  ცხრილებიდან ალბათობა  $P(1)=0.27>0.1$ , ამიტომ ჰოპოთეზა ნორმალური განაწილების კანონი გამოყენებადობის შესახებ დასაშვებია.

მიღებული შედეგებით შეიძლება დავასკვნა, რომ ბეტონის ცოცვადობის მახასიათებლის შედარებით დიდ შესაძლო გადახრებს შეესაბამება შედარებით ნაკლები გადახრები, ამავე დეფორმაციებით აღძრული მღუნავი მომენტის შესაძლო მნიშვნელობისა:  $\varphi=-75\%$ - დან  $75\%$ -მდე,  $M_x=-17\%$ -დან  $17\%$ -მდე. ასე რომ შესაძლო უზუსტობა ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის მნიშვნელობის შერჩევისას, საბოლოო შედეგებზე მნიშვნელოვნად არ მოქმედებს.

## 1.7. ბეტონის დრეკადობის მოდულის მათემატიკური მოდელი

კონსტრუქციის საიმედოობაზე გაანგარიშების ძირითად ამოცანას წარმოადგენს იმის ალბათობის განსაზღვრა, რომ მოცემული საექსპლუატაციო დროის განმავლობაში შენობის ან ნაგებობის ელემენტები არ აღმოჩნდნენ ზღვრულ მდგომარეობაში. რკინაბეტონის კონსტრუქციების დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის განსაზღვრისას ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს ბეტონის დრეკადობის მოდული -  $E_b$ , რომელიც წარმოადგენს ექსპერიმენტულად მიღებულ სიდიდეს თავისი შესაძლო გადახრებით საშუალოდან. ამ სიდიდის განაწილების კანონის დადგენა წარმოადგენს კონსტრუქციის საიმედო მუშაობის ერთ-ერთ გარანტს.

ბეტონის დრეკადობის მოდულის ალბათური მახასიათებლების დასადგენად ჩავატარე სტატისტიკური ექსპერიმენტი, რომლისთვისაც გამოვიყენე სხვადასხვა მეცნიერის მიერ /3,4,5 და სხვები/ ჩატარებული 150 ექსპერიმენტული მონაცემი. იმისათვის, რომ ეს მონაცემები გამოიყენებინა ჩემს ექსპერიმენტში, ავაგე ამ სიდიდისთვის მათემატიკური მოდელი, რომელშიც გათვალისწინებულია ყველა ის ძირითადი ფაქტორი, რომელიც გავლენას ახდენს ამ სიდიდეზე.

ამ 150 მონაცემით /3,4,5 და სხვები/ შევადგინე განტოლებათა სისტემების რამდენიმე განსხვავებული ვარიანტი. ასე გამოთვლილი კოეფიციენტების სხვადასხვა ვარიანტიდან უმცირეს კვადრატთა მეთოდით შეირჩა მათემატიკური მოდელის შესაბამისი კოეფიციენტები. ბეტონის დრეკადობის მოდულის -  $E_b$  - ის მათემატიკურ მოდელს აქვს შემდეგი სახე:

$$E_b^{\text{mod}} = 3,52 \times 10^5 \left( 0,5 \frac{450 + \tau}{450} + \frac{0,324 R_{pr}}{180} \right),$$

სადაც  $\tau$  - ბეტონის ნიმუშის ასაკია დატვირთვისას, დღე-ღამე;

450 – ექსპერიმენტებში გამოყენებული ბეტონის მაქსიმალური ასაკია, დღე-ღამე;

$R_{pr}$  - დატვირთვისას ბეტონის ნიმუშის პრიზმული სიმტკიცეა, კგ/სმ<sup>2</sup>;

180 – გამოყენებულ ექსპერიმენტებში მინიმალური პრიზმული სიმტკიცეა, კგ/სმ<sup>2</sup>;

0,5 და 0,324 – უმცირეს კვადრატთა მეთოდით მიღებული კოეფიციენტებია;

$3,52 \times 10^5$  - B35 კლასის ბეტონის ნორმატიული დრეკადობის მოდულია (СНИП 2.05.03-84).

ბეტონის დრეკადობის მოდულის მათემატიკური მოდელის საიმედოობის შესამოწმებლად ექსპერიმენტული და მათემატიკური მოდელით მიღებულ მნიშვნელობათა ფარდობის სიდიდებს –  $\eta = \frac{E_b^{exp}}{E_b^{mod}}$  -

ვყოფთ შესაბამის მნიშვნელობათა თანრიგებად და ვაგებთ სტატისტიკური განაწილების რიგს (ცხრილი 1).

ცხრილი 4.  $\eta$ -ს სტატისტიკური განაწილების რიგი

$\eta$	0,84	0,87	0,90	0,93	0,96	0,99	1,02	1,05	1,08	1,11
	0,87	0,90	0,93	0,96	0,99	1,02	1,05	1,08	1,11	1,14
$m_{i^*}$	3	7	14	23	28	28	23	14	7	3
$P_{i^*}$	0,020	0,047	0,093	0,153	0,187	0,187	0,153	0,093	0,047	0,020

ცხრილი 4-ში  $m_{i^*}$  -  $i$ -ურ რიგში მოსული რაოდენობა;

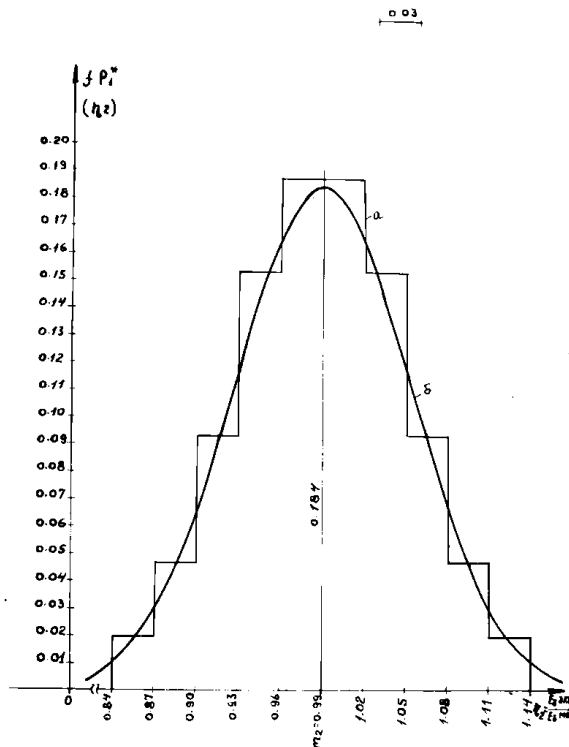
$$P_{i^*} - \text{შესაბამისი სიხშირეები} - P_{i^*} = \frac{m_{i^*}}{P_{i^*}}$$

ალბათობის თეორიის ცნობილი ფორმულების გამოყენებით გამოვთვალოთ: მათემატიკური ლოდინი:

$$m = \sum_{i=1}^k (X_i \cdot P_i^*) = 0,99;$$

სადაც  $X_i$  -  $i$ -ურ რიგში საშუალო მნიშვნელობა;

$P_i^*$  - მეორე საწყისი მომენტი:



ნახაზი. 8.  $\chi^2$  კისტოგრამა და თეორიული განაწილების მრუდი

$$\alpha_2^* = \sum_{i=1}^k (X_i^2 \cdot P_i^*) = 0,984;$$

სტატისტიკური რიგის დისპერსია  $D = \alpha_2^* - m^2 = 0,004$ ; საშუალო კვადრატული გადახრა (სტანდარტი)  $\sigma = \sqrt{D} = 0,063$ , ვარიაციის კოეფიციენტი  $\delta = \frac{\sigma}{m} = 0,058$ .

ამ სტატისტიკური რიცხვითი მახასიათებლების დახმარებით იგება თეორიული განაწილების კანონი, რომელიც მოცემული შემთხვევისთვის წარმოადგენს ნორმალური განაწილების კანონს. მას აქვს შემდეგი სახე:

$$f(\eta) = \frac{0,0299}{0,063\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\eta - 0,99)^2}{2 \cdot 0,063^2}\right),$$

სადაც 0,0299 – ნორმალური განაწილების კანონის მრუდის, სტატისტიკური რიგის ჰისტოგრამასთან მიახლოების კოეფიციენტი. ნორმალური განაწილების მრუდი და სტატისტიკური რიგის ჰისტოგრამა მოცემულია ნახაზ 8-ზე.

ნორმალური განაწილების კანონის მოცემულ სტატისტიკურ რიგთან მისადაგების სამართლიანობა მოწმდება პირსონის და კოლმოგოროვის შესაბამისობის კრიტერიუმებით /1/.

პირსონის მიხედვით განსხვავებულობის ზომა -  $\chi^2$ -ს გამოვალე შედარებითი ცხრილი 2-ის საშუალებით და მივიღე, რომ  $\chi^2 = 4,25$ ; თავისუფლების ხარისხი  $r = 7$ . ამ მონაცემებით ცხრილი 4-ით /12/-დან განისაზღვრება ალბათობა იმისა, თუ რამდენად სამართლიანია მოცემული ჰიპოთეზა;  $P = 0,85 > 0,1$ , რაც მიუთითებს ნორმალური განაწილების კანონის მოცემულ სტატისტიკურ რიგთან მისადაგებას.

სტატისტიკური და თეორიული განაწილების მაქსიმალური განსხვავების მოდული  $D^* = 0,035$ . კოლმოგოროვის რიცხვი  $\lambda = 0,429$ . ცხრილი 7.6.1 /22/-დან ამ ფუნქციების დამთხვევის ალბათობა  $P(0,429) = 0,987 > 0,1$ .

შესაბამისობის ორივე კრიტერიუმით მტკიცდება ნორმალური განაწილების მოცემულ სტატისტიკურ რიგთან შესაბამისობის ჰიპოთეზა.

## თავი 2. შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების გაანგარიშება

### 2.1. ლუნვაზე მომუშავე შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების ხანგძლივ დეფორმაციებზე გაანგარიშება

ბზარების გაჩენის გარეშე დრეკად სტადიაში მომუშავე ბეტონის კვეთებში ნორმალური ძაბვები განისაზღვრება შიდა ძაღვებზე დამოკიდებულებით:

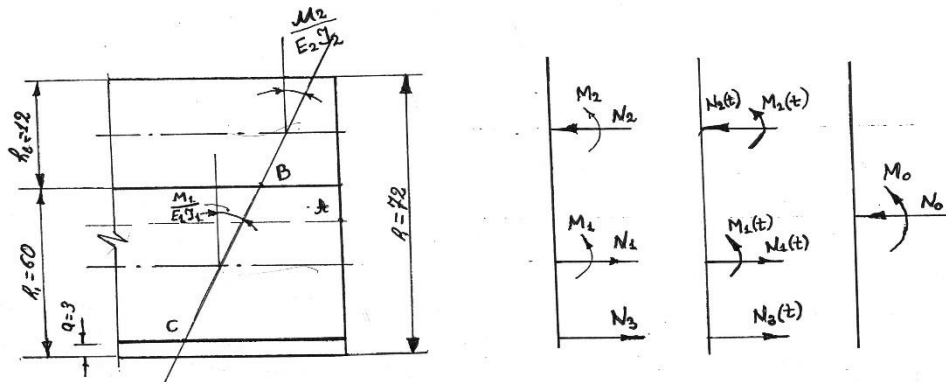
$$\sigma = N/A \pm M_y/I \quad (1)$$

კვეთების გეომეტრიულ მახასიათებლებს იღებენ იმაზე დამოკიდებულებით, თუ როგორი კვეთი განიცდის  $N$  – ნორმალური ძალის და  $M_y$  - მღუნავი მომენტის ზემოქმედებას. თუ ნორმალური ძალა და მღუნავი მომენტი მოდებულია უარმატურო ბეტონის კვეთზე, მაშინ  $A = A_b$  და  $I = I_b$ , სადაც  $A_b$  და  $I_b$  - ბეტონის განივკვეთის ფართობი და ინერციის მომენტია. თუ ამ კვეთში გვაქვს სხვადასხვა დრეკადობის მახასიათებლის მქონე ბეტონის კვეთები, გაერთიანებულნი ერთობლივი მუშაობისათვის, მაშინ  $A = A_r$  და  $I = I_r$  სადაც  $A_r$  და  $I_r$  - დაყვანილია (რედუცირებული) კვეთის ფართობი და ინერციის მომენტია.

შედგენილ კვეთებში ძაბვათა განსაზღვრისას, ცოცვადობის გათვალისწინებით, უნდა გავიანგარიშოთ ეს სიდიდე ყველა მდგენელი ერთგვაროვანი ელემენტისათვის დროის ნებისმიერ მომენტში.

ამ თავში ჩვენ განვიხილავთ ძაბვათა უშუალო გამოთვლის მეთოდს ცოცვადობის დეფორმაციების განვითარების გათვალისწინებით. მოცემული გვაქვს რკინაბეტონის კოჭი, რომელიც ერთობლივად მუშაობს რკინაბეტონის ფილასთან.

ამ დროს ყველა ერთგვაროვან ელემენტზე გარე ძაღვების ზემოქმედების შედეგად აღიძვრებიან შემდეგი ძაღვები:



ნახაზი 9. შედგენილი კვეთი

$M_1$  - მღუნავი მომენტი, რომელიც მოქმედებს კოჭის ბეტონის კვეთზე;

$M_{1(t)}$  - მღუნავი მომენტი, რომელიც მოქმედებს კოჭის ბეტონის კვეთზე, ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების გათვალისწინებით;

$N_1$  - ნორმალური ძალა, რომელიც მოდებულია კოჭის ბეტონის სიმძიმის ცენტრზე;

$N_{1(t)}$  - ნორმალური ძალა, რომელიც მოდებულია კოჭის ბეტონის სიმძიმის ცენტრზე, ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების გათვალისწინებით;

$M_2$  - მღუნავი მომენტი, რომელიც მოქმედებს ფილის ბეტონის კვეთზე;

$M_{2(t)}$  - მღუნავი მომენტი, რომელიც მოქმედებს ფილის ბეტონის კვეთზე, ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების გათვალისწინებით;

$N_2$  - ნორმალური ძალა, რომელიც მოდებულია ფილის ბეტონის სიმძიმის ცენტრზე;

$N_{2(t)}$  - ნორმალური ძალა, რომელიც მოდებულია ფილის ბეტონის სიმძიმის ცენტრზე, ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების გათვალისწინებით;

$N_3$  - ნორმალური ძალა, რომელიც მოდებულია არმატურის სიმძიმის ცენტრზე;

$N_{3(t)}$  - ნორმალური ძალა, რომელიც მოდებულია არმატურის სიმძიმის ცენტრზე, ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების გათვალისწინებით;



ამ შემთხვევისთვის ცოცვადობის მახასიათებელი: კოჭისთვის -  $\varphi_1 = 2$ , ხოლო ფილისთვის -  $\varphi_2 = 1$ ; ინერციის მომენტები:  $I_1 = 216000 \text{ სმ}^4$  და  $I_2 = 8640 \text{ სმ}^4$ ;

ბეტონის განივკვეთის ფართობი:  $A_1 = A_2 = 720 \text{ სმ}^2$ . კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ცოცვადობის დეფორმაციების განვითარებას დაძველების თეორიაში, გამოითვლება ფორმულით:

$$k_x = \varphi_m / (1 - e^{-\varphi_m}), \quad k_1 = 2.313 \quad \text{და} \quad k_2 = 1.582$$

წონასწორობის პირობები:

$$1. \quad \sum X = 0 \quad N_1(t) + N_3(t) = N_2(t) \quad (1)$$

$$2. \quad \sum M_A = 0 \quad M_1(t) + M_2(t) + N_2(t)(h_2/2|h_1 - h_{red}) + N_1(t)(h_{red} - N_3(t)(h_{red} - a)) = 0 \quad (2)$$

3. პირობა, რომ კოჭისა და ფილის მობრუნების კუთხეები ტოლია:

$$(M_1(t)/EI_1)k_1 = (M_2(t)/EI_2)k_2 \quad (3)$$

4. B წერტილის პირობა:

$$(N_2(t)EA_2)k_2 - ((M_2(t)EI_2)h_2/2)k_2 = ((M_1(t)/EI_1)h_1/2)k_1 - (N_1(t)/EA_1)k_1 \quad (4)$$

5. C წერტილის პირობა:

$$N_3(t)E_s A_s = (N_1(t)/EA_1)k_1 + ((M_1(t)/EI_1)(h_1/2 - a)k_1 \quad (5)$$

საბოლოო გამოთვლები გვაძლევს:

$$M_1(t) = -374517.76 \text{ კგ.სმ.} \quad (M_2(t) = -21722.03 \text{ კგ.სმ.}; \quad N_1(t) = -1991.9 \text{ კგ.}$$

$$N_2(t) = -36569.8 \text{ კგ.} \quad N_3(t) = -16652.9 \text{ კგ.}$$

$$\text{მაბვეები: } \sigma_{max} = (M_o/I_{red})h_{red} \quad \sigma_{min} = (M_o/I_{red})(72 - h_{red})$$

$$\sigma_{max} = 7.42 \text{ მპა.} \quad \sigma_{min} = -6.5 \text{ მპა.}$$

ზემოთ მოცემულ ფორმულებში მონაწილეობს  $k_x$  კოეფიციენტი, რომელიც წარმოადგენს ცოცვადობის დეფორმაციის მახასიათებელის -  $\varphi_n$ -ის ფუნქციას.

$\varphi_n$  თვითონ წარმოადგენს შემთხვევით სოდიდეს, რომელსაც გააჩნია შესაძლო შემთხვევითი გადახრები, რომლებიც გაუსის განაწილების კანონს ემორჩილებიან. აქედან გამომდინარე, ყველა აქ მოყვანილი სიდიდე წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს, როგორც  $\varphi_n$ - ზე დამოკიდებულნი. მოცემულ გამოთვლებში მივიყვან მხოლოდ  $k_x$  კოეფიციენტის შესაძლო გადახრებს და დავადგენ მისი თეორიული განაწილების კანონს.

ამ სტატისტიკური მონაცემების საფუძველზე იგება ალბათური (თეორიული) განაწილების კანონი  $k_x$ -კოეფიციენტის შესაძლო გადახრებისათვის, რომელსაც მოცემული შემთხვევისათვის აქვს ნორმალური განაწილების სახე:

$$f_{kx} = \left( \frac{0.23}{0.55\sqrt{2\pi}} \right) \exp\left(-\frac{(k_x - 2.36)^2}{2 \cdot 0.55^2}\right)$$

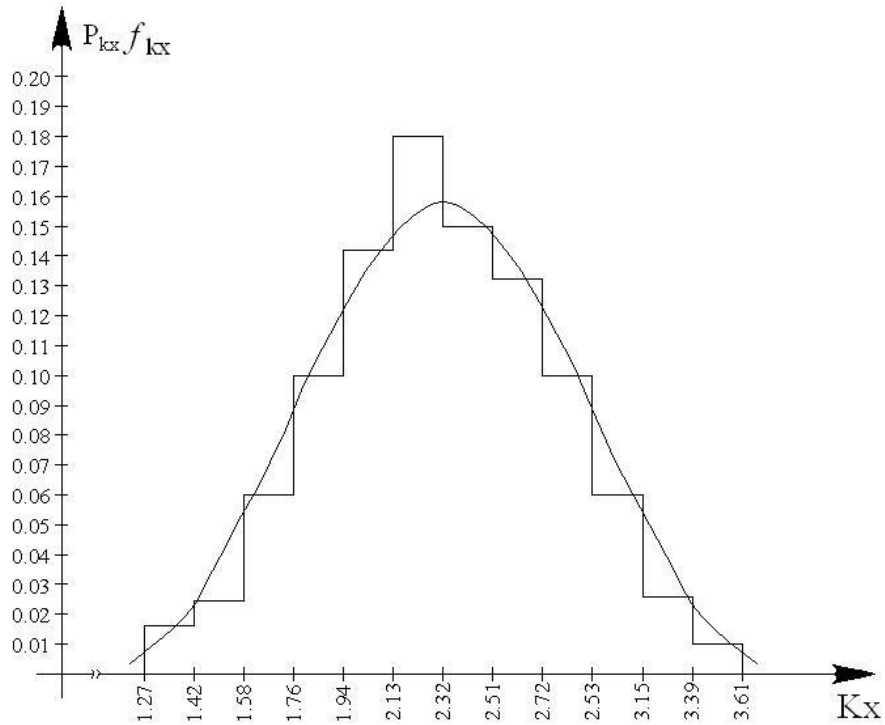
სადაც 0.23 ნორმალური განაწილების მრუდის (ნახ10.ბ) სტატისტიკური რიგის ჰისტოგრამასთან (ნახ. 10.ა) მიახლოების კოეფიციენტი.  $f_{kx}$ - ის მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილ 5-ში.

ცხრილი 5.  $k_x$ - ის შესაძლო გადახრათა ნორმალური განაწილების სიმკვრივები.

$k_x$	1.27	1.42	1.58	1.76	1.9	2.13	2.3	2.51	2.7	2.93	3.15	3.39	3.61
					4		2		2				
$f_{kx}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.17	0.1	0.13	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	3	6	9	2	5		6		9	6	2	1

სტატისტიკური განაწილების რიგისთვის ნორმალური კანონის შესაბამისობა შემოწმდა კოლმოგოროვის შესაბამისობის კრიტერიუმით.  $D=0.03$  განსხვავებულობის ზომას თეორიულ და სტატისტიკურ სიხშირებს შორის, როცა  $\lambda = 0.9$ , ცხრილი 7.6.1./2.- დან შეესაბამება ჰიპოთეზის სამართლიანობის ალბათობა  $P(0.9) - 0.4 > 0.1$ , რადგან ეს ალბათობა საკმაოდ დიდია, ნორმალური განაწილების კანონის მისადაგება მოცემული სტატისტიკური რიგისთვის სამართლიანია.

ცხადია,  $k_x$ - კოეფიციენტის შესაძლო გადახრები გამოიწვევს კვეთში აღძრულ ძაბვათა სიდიდეების ცვლილებას, რისი გამოკვლევაც მეტად მნიშვნელოვანია საბოლოოდ კონსტრუქციის საიმედო მუშაობისათვის.



ნახ. 10.  $k_x$ -კოეფიციენტის ჰისტოგრამა და თეორიული განაწილების მრუდი

## 2.2. რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში აღძრული ძალების სტატისტიკური ანალიზი

უკანასკნელი წლების განმავლობაში მსოფლიოში სამშენებლო ინდუსტრიამ მკვეთრი ნახტომით წაიწია წინ. აშშ-ში, აზიის რიგ ქვეყნებში, განსაკუთრებით ჩინეთში და არაბულ სახელმწიფოებში, ძალზედ სწრაფი ტემპით მიმდინარეობს ახალი ქალაქების მშენებლობა, სადაც ძირითადად მაღლივი შენობები შენდება. ამის ძირითადი მიზეზი ტერიტორიების სიმცირე და მოსახლეობის სიჭარბეა. ასეთი ტიპის შენობებში ძირითადად მსუბუქი კონსტრუქციები გამოიყენება.



ნახ. 11. მოძრავი მაღლივი შენობა ვან-კუვერში (კანადა)

ასეთი ტიპის შენობა-ნაგებობებში არქიტექტორთა და კონსტრუქტორთა ფანტაზიისა და შრომის შედეგად იქმნება ისეთი ტიპის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციები, რომლებშიც ერთობლივად მუშაობენ რკინაბეტონი და ფოლადი, ფოლადი და კომპოზიტი, სხვადასხვა მახასიათებლის მქონე (სხვადასხვა კლასის) ბეტონი. ასეთ პირობებში მნიშვნელოვანია ამ ტიპის კონსტრუქციების მუშაობის კვლევა როგორც

დრეკად, ისე პლასტიკურ სტადიაში. ზევით განხილული მქონდა შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების, კერძოდ რკინაბეტონის კოჭის, თეორიული კვლევა ხანგრძლივი დეფორმაციების განვითარების პირობებში.

ჩემი ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების მუშაობის კვლევა და ამის საფუძველზე საკუთარი წვლილის შეტანა მათი გაანგარიშების მეთოდებში.

მთელი რიგი ნაშრომების შესწავლის და განხილვის შემდეგ გამოიკვეთა ნაშრომი კვლევის მიმართულება, განმეხილა შედგენილი კვეთის კონსტრუქცია როგორც ერთი მთლიანი ტანი (რედუცირებული ფართი).

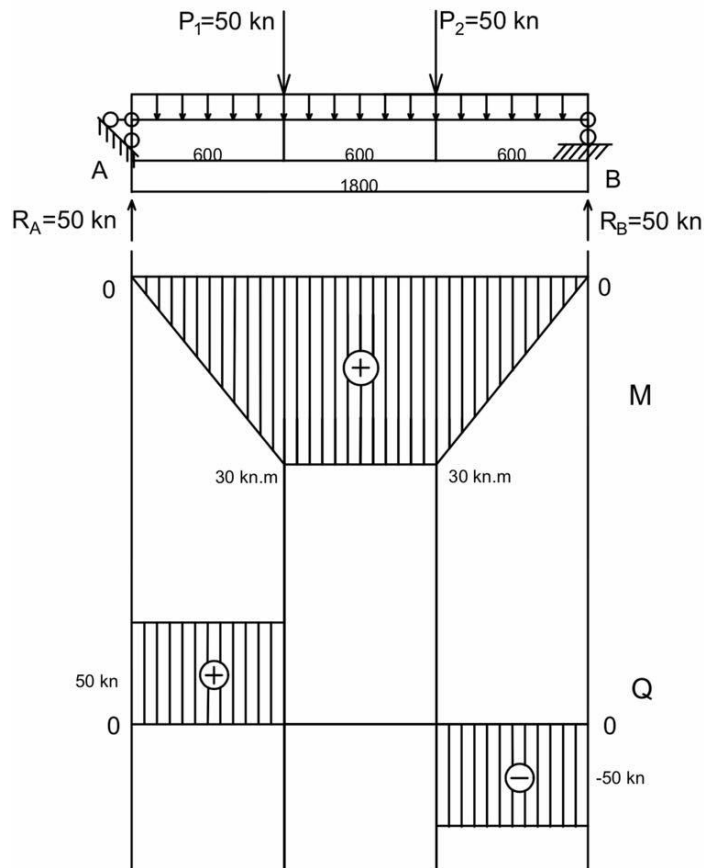
გამოკვლეულია შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კოჭში ცოცვადობის დეფორმაციის შედეგად განვითარებული მღუნავი მომენტის შესაძლო მნიშვნელობები. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად აღძრული მღუნავი მომენტი წარმოადგენს შემთხვევითი არგუმენტის ფუნქციას, ამიტომ თვითონაც შემთხვევითი სიდიდეა თავისი შესაძლო შემთხვევითი გადახრებით. მნიშვნელოვანია ამ გადახრათა გაფანტულობის ზღვრების დადგენა, რადგან შესაძლოა ისინი იმდენად დიდი აღმოჩნდნენ, რომ კონსტრუქციის მდგრადობის დაკარგვაც კი გამოიწვიონ. დასმული ამოცანის გადასაწყვეტად გაანგარიშებულ იქნა 2 მეტრის სიგრძის შედგენილი კვეთის კოჭი, რომელსაც ტესტბრი განიკვეთი აქვს; თარო, რომლის ზომებია 30X10X200 სმ, B20 კლასის ბეტონისგანა არის დამზადებული, ხოლო წიბო, ზომებით 10X20X200 სმ, დამზადდა - B15 კლასის ბეტონისგან. გაჭიმულ ზონა არმირებულია A-III კლასის 12 მმ დიამეტრის არმატურით. ნახ. 12-ზე და ნახ. 13-ზე მოცემულია შედგენილი კვეთის კოჭის საანგარიშო სქემა დატვირთვის სხვადასხვაგვარი მოდების პირობებში.

სამშენებლო მექანიკის ფორმულების გამოყენებით გამოვიანგარიშე მღუნავი მომენტი და განივი ძალა, რომელთა მნიშვნელობებმა შეადგინა, პირველ შემთხვევაში  $M_{max}=30$  კნ.მ  $Q_{max}=50$  კნ, ხოლო მეორე შემთხვევაში  $M_{max}=5,625$  კნ.მ  $Q_{max}=10$  კნ. ფორმულა, რომლითაც უნდა გამოითვალოს

ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის შედეგად აღძრული მლუნავი მომენტი განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$M_{Mc} = M_{dr} (1 - e^{-\varphi_n})$$

სადაც  $M_{Mc}$  - მლუნავი მომენტი, რომელიც ცოცვადობის დეფორმაციისგან ვითარდება.  $M_{dr}$  - მომენტის სიდიდეა, რომელიც აღიძვრება დრეკად სტადიაში.  $\varphi_n$ -ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ზღვრული მახასიათებელია, რომელიც წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს. ამიტომაც ეს სიდიდე (მლუნავი მომენტი) თვითონაც წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს. განსაზღვრულ იქნა ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრების შესაბამისი მნიშვნელობები მლუნავი მომენტისთვის.



ნახ.12. საანგარიშო სქემა

1. საყრდენი რეაქციების ანგარიში

$$M_B = R_A * 1.8 - 5 * 1.25 - 5 * 0.6 = 0$$

$$R_A = \frac{5 * 1.8}{1.8} = 5 \text{ ტ. დ. (50 კნ)}$$

$$R_B = 5 \text{ ტ. დ. (50 კნ)}$$

2. მღუნავი მომენტის და განივი ძალის ანგარიში

I უბანი, სასაზღვრო პირობა  $0 \leq X_1 \leq 0.6 \text{ მ}$

$$M_{x_1} = R_A * X_1 \quad X_1 = 0, \quad M_{x_1=0} = 5 * 0 = 0$$

$$Q_{x_1} = R_A = 5 \text{ ტ. დ. (50 კნ)} \quad X_1 = 0.6 \quad M_{x_1} = 5 * 0.6 = 3 \text{ ტ. დ. (30 კნ. მ)}$$

II უბანი, სასაზღვრო პირობა  $0 \leq X_2 \leq 0.6 \text{ მ}$

$$M_{x_2} = R_B * X_2 \quad X_2 = 0, \quad M_{x_2} = 5 * 0 = 0$$

$$Q_{x_2} = -R_B = -5 \text{ ტ. დ. (-50 კნ)} \quad X_2 = 0.6 \quad M_{x_2} = 5 * 0.6 = 3 \text{ ტ. დ. (30 კნ. მ)}$$

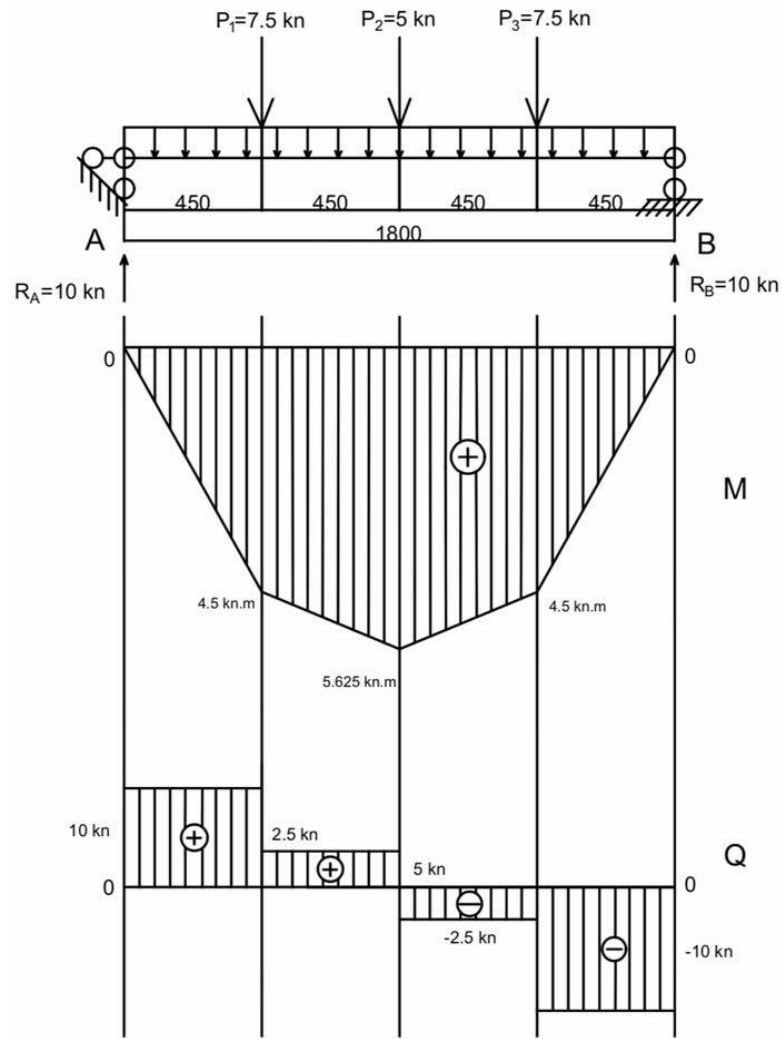
III უბანი, სასაზღვრო პირობა  $0.6 \leq X_3 \leq 1.2 \text{ მ}$

$$M_{x_3} = R_A * X_3 - 5 * (X_3 - 0.6)$$

$$Q_{x_3} = R_A - P = 5 - 5 = 0$$

$$M_{x_3=0.6} = 5 * 0.6 - 5 * (X_3 - 0.6) = 3 \text{ ტ. დ. (30 კნ. მ)}$$

$$M_{x_3=1.2} = 5 * 1.2 - 5 * (1.2 - 0.6) = 5 * 1.2 - 5 * 0.6 = 3 \text{ ტ. დ. (30 კნ. მ)}$$



ნახ. 13. საანგარიშო სქემა

1. საყრდენი რეაქციების ანგარიში

$$M_B = R_A * 1.8 - P_1 * 1.35 - P_2 * 0.9 - P_3 * 0.45 = 0$$

$$R_B = R_A = \frac{0.75 * 1.35 + 0.5 * 0.9 + 0.75 * 0.45}{1.8} = 1 \text{ ტ. დ. (10 კნ)}$$

2. მღუნავი მომენტის და განივი ძალის ანგარიში

I უბანი, სასაზღვრო პირობა  $0 \leq X_1 \leq 0.45$  მ

$$M_{x_1} = R_A * X_1 \quad Q_{x_1} = R_A = 1 \text{ ტ. დ. (10 კნ)}$$

$$X_1 = 0 \quad M_{x_1=0} = 1 * 0 = 0 \text{ კნ. მ (0 კნ. მ)}$$

$$X_1 = 0.45 \quad M_{x_1=0.45} = 1 * 0.45 = 0.45 \text{ ტ. დ. (4.5 კნ. მ)}$$



II უბანში,  $0.45 \leq X_2 \leq 0.9$  მ

$$Q_{x_2} = R_A - P_1 = 1 - 0.75 = 0.25 \text{ ტ. დ. (2,5 ჯბ)}$$

$$X_2 = 0.45$$

$$M_{x_2} = R_A * X_2 - P_1(X_2 - 0.45)$$

$$M_{x_2=0.45} = 1 * 0.45 - 0.75 * 0 = 0.45 \text{ ტ. დ. (4,5 ჯბ. მ)}$$

$$M_{x_2=0.9} = 1 * 0.9 - 0.75 * 0.45 = 0.5625 \text{ ტ. დ. (5,625 ჯბ. მ)}$$

III უბანში,  $0 \leq X_3 \leq 0.45$  მ

$$M_{x_3} = R_B * X_3 \quad Q_{x_3} = -R_B = -1 \text{ ტ. დ. (-10 ჯბ)}$$

$$M_{x_3=0} = 1 * 0 = 0 \text{ ტ. დ. (0 ჯბ. მ)}$$

$$M_{x_3=0.45} = 1 * 0.45 = 0.45 \text{ ტ. დ. (4,5 ჯბ. მ)}$$

IV უბანში,  $0.45 \leq X_4 \leq 0.9$  მ

$$M_{x_4} = R_B * X_4 - P_3 * (X_4 - 0.45) \quad Q_{x_4} = -R_B + P_3 = -1 + 0.75 = -0.25 \text{ ტ. დ. (-10 ჯბ)}$$

$$M_{x_4=0.45} = 1 * 0.45 - 0.75 * 0 = 0.45 \text{ ტ. დ. (4,5 ჯბ. მ)}$$

$$M_{x_4=0.9} = 1 * 0.9 - 0.75 * 0.45 = 0.5625 \text{ ტ. დ. (5,625 ჯბ. მ)}$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k})$$

$$\sigma_{\varnothing} = \sigma_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k})$$

$$M_{\varnothing} = 5.625$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-0.5}) = 5.625 * (1 - 0.6) = 2.25$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-0.75}) = 5.625 * (1 - 0.47) = 2.98$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-1}) = 5.625 * (1 - 0.37) = 3.50$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-1.25}) = 5.625 * (1 - 0.29) = 4.0$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-1.5}) = 5.625 * (1 - 0.2) = 4.5$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-1.75}) = 5.625 * (1 - 0.17) = 4.67$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-2}) = 5.625 * (1 - 0.135) = 4.87$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-2.25}) = 5.625 * (1 - 0.105) = 5.03$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-2.5}) = 5.625 * (1 - 0.08) = 5.175$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-2.75}) = 5.625 * (1 - 0.06) = 5.2875$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-3}) = 5.625 * (1 - 0.049787) = 5.345$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-3.25}) = 5.625 * (1 - 0.03877) = 5.407$$

$$M_{\varnothing} = M_{\varnothing} * (1 - e^{-\varphi k}) = 5.625 * (1 - e^{-3.5}) = 5.625 * (1 - 0.03) = 5.456$$

$$M = \left( \frac{2.25 + 2.98}{2} * 0.01 \right) + \left( \frac{2.98 + 3.50}{2} * 0.03 \right) + \left( \frac{3.50 + 4.0}{2} * 0.06 \right) +$$

$$+ \left( \frac{4.0 + 4.50}{2} * 0.1 \right) + \left( \frac{4.50 + 4.67}{2} * 0.13 \right) + \left( \frac{4.67 + 4.87}{2} * 0.17 \right) +$$

$$\begin{aligned}
& + \left( \frac{4.87 + 5.03}{2} * 0.17 \right) + \left( \frac{5.03 + 5.175}{2} * 0.13 \right) + \left( \frac{5.175 + 5.2875}{2} * 0.1 \right) + \\
& + \left( \frac{5.2875 + 5.345}{2} * 0.06 \right) + \left( \frac{5.345 + 5.407}{2} * 0.03 \right) + \left( \frac{5.407 + 5.456}{2} * 0.01 \right) = \\
& = 0.026 + 0.097 + 0.225 + 0.425 + 0.596 + 0.8109 + 0.8415 + 0.66 + 0.523 + \\
& + 0.32 + +0.16 + 0.05 = 4.7344
\end{aligned}$$

$$\sigma = \sqrt{
\begin{aligned}
& (4.7344 - 2.615)^2 * 0.01 + (4.7344 - 3.24)^2 * 0.03 + (4.7344 - 3.75)^2 * 0.06 + \\
& + (4.7344 - 4.25)^2 * 0.1 + (4.7344 - 4.585)^2 * 0.13 + (4.7344 - 4.77)^2 * 0.17 + \\
& + (4.7344 - 4.95)^2 * 0.17 + (4.7344 - 5.1)^2 * 0.13 + (4.7344 - 5.23)^2 * 0.1 + \\
& + (4.7344 - 5.31625)^2 * 0.06 + (4.7344 - 5.376)^2 * 0.03 + (4.7344 - 5.4315)^2 * \\
& * 0.01 = 0.0449 + 0.067 + 0.058 + 0.2346 + 0.0029 + 0.00021545 + 0.0079 + \\
& + 0.017376 + 0.024562 + 0.02 + 0.01235 + 0.00486 = 0.49466345
\end{aligned}
}$$

$$\sigma = \sqrt{0.49466345} = 0.7$$

$$\begin{aligned}
f_{(Mx)} &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * \\
& * 0.00350877 = 0.002
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{(Mx)} &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * \\
& * 0.01403509 = 0.008
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{(Mx)} &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * \\
& * 0.03157895 = 0.018
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{(Mx)} &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * \\
& * 0.07017544 = 0.04
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_{(Mx)} &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * \\
& * 0.10877193 = 0.062
\end{aligned}$$

$$f_{(Mx)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * 0.19298246 = 0.11$$

$$f_{(Mx)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * 0.30175439 = 0.172$$

$$f_{(Mx)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * 0.31578947 = 0.18$$

$$f_{(Mx)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * 0.26315789 = 0.15$$

$$f_{(Mx)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * 0.21052632 = 0.12$$

$$f_{(Mx)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * 0.1754386 = 0.1$$

$$f_{(Mx)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * 0.05263158 = 0.03$$

$$f_{(Mx)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}} = 0.57 * e^{-\frac{(x-m)^2}{0.98}} = 0.57 * 0.01403509 = 0.008$$

შევადგინე სტატისტიკური განაწილების რიგი (ცხრ.6) და დავადგინე თეორიული განაწილების ფუნქცია; გამოვთვალო ამ ფუნქციის მნიშვნელობები (ცხრ.7).

ცხრილი 6. მლუნავი მომენტის შესაძლო გადახრათა სტატისტიკური განაწილების რიგი

$M_{n_2}$	2.25	2.98	3.50	4.0	4.5	4.67	4.87	5.03	5.175	5.2875	5.345	5.407
	2.98	3.50	4.0	4.5	4.67	4.87	5.03	5.175	5.2875	5.345	5.407	5.456
$p_1^*$	0.01	0.03	0.06	0.1	0.13	0.17	0.17	0.13	0.1	0.06	0.03	0.01
$p_1$	0.01	0.026	0.058	0.096	0.114	0.17	0.17	0.14	0.096	0.053	0.026	0.01

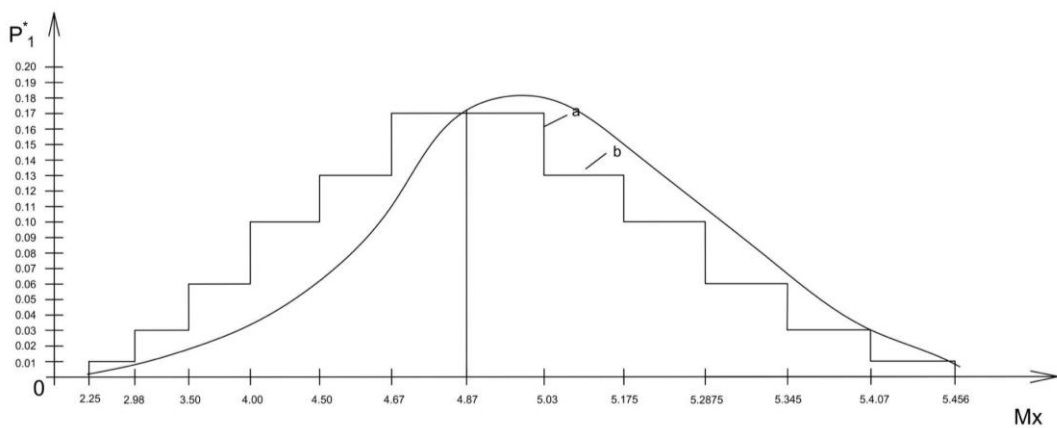
ცხრილი 7. მლუნავი მომენტის შესაძლო გადახრათა თეორიული განაწილების ფუნქციის მნიშვნელობები

$M_{n_2}$	2.25	2.98	3.50	4.0	4.5	4.67	4.87	5.03	5.175	5.2875	5.345	5.407	5.456
$f_{M_2}$	0.002	0.008	0.018	0.04	0.062	0.11	0.172	0.180	0.150	0.120	0.100	0.030	0.28

მლუნავი მომენტის შესაძლო გადახრების თეორიული განაწილების ფუნქციას აქვს შემდეგი სახე:

$$f_{(M_x)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0.7\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{2*0.7^2}}$$

სადაც 1 - თეორიული (ლოგისტიკური) განაწილების მრუდის სტატისტიკური განაწილების რიგის ჰისტოგრამასთან მიახლოების კოეფიციენტი (ნახ.14).



ნახ. 14. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციისგან განვითარებული მლუნავი მომენტის შესაძლო მნიშვნელობათა განაწილების გრაფიკები; ა) ჰისტოგრამა, ბ) ლოგისტიკური განაწილების მრუდი

შესაბამისობის ჰიპოთეზის სამართლიანობა შევამოწმეთ კოლმოგოროვის შესაბამისობის კრიტერიუმით. მაქსიმალური განსხვავების მოდული თეორიულ მრუდსა და სტატისტიკური განაწილების რიგის ჰისტოგრამას შორის  $D = 0,03$ . კოლმოგოროვის რიცხვი  $\lambda = 0,03\sqrt{900} = 0,09$ .  $\lambda$ -ს ასეთ მნიშვნელობას შესაბამისობის ცხრილებიდან შეესაბამება  $P(0,9) = 0,38 > 0,1$ ; ამიტომ ეს ჰიპოთეზა სამართლიანია.

ზემოთ მოცემული კვლევებიდან შეიძლება შემდეგი დასკვნების გაკეთება:

ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის დიდ შესაძლო გადახრებს შეესაბამება შედგენილი კვეთის კოჭში ამ დეფორმაციების შედეგად განვითარებული მლუნავი მომენტის და ძაბვის შედარებით მცირე შესაძლო გადახრები;

შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ცოცვადობის დეფორმაციის შედეგად განვითარებული ძაბვების შესაძლო გადახრების საზღვრები მერყეობს -45%-დან +50%-მდე, ხოლო ამ დეფორმაციებისგან განვითარებული ძაღვის (მლუნავი მომენტის) შესაძლო გადახრების საზღვრები მერყეობს -20%-დან +50%-მდე;

ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრების ვარიაციის კოეფიციენტი შედარებით დიდია - 26%, ვიდრე ამ დეფორმაციისგან აღძრული ძაბვის - 18%, ხოლო ძაღვისა - 17%;

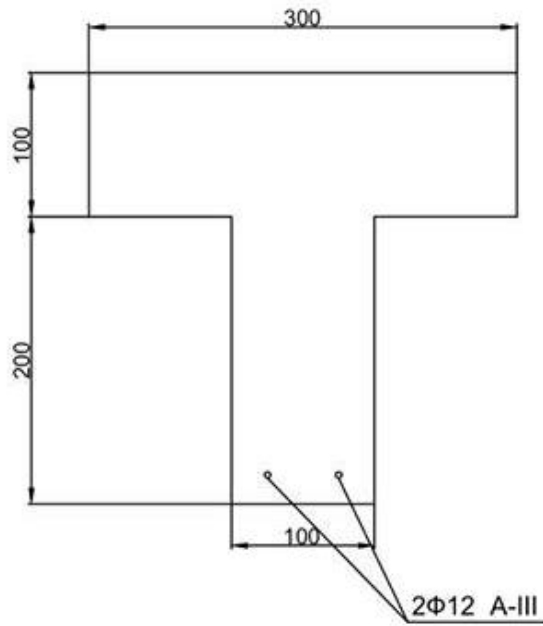
რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების საინჟინრო გაანგარიშებებში დასაშვებია გამოყენებულ იქნას ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრები -30%-დან +45%-მდე, რასაც შეესაბამება ძაბვის და ძაღვის შესაძლო გადახრები -10%-დან +10%-მდე.

### თავი 3. ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კოჭის ხანგრძლივი დატვირთვის ქვეშ მუშაობის ექსპერიმენტული კვლევა

ექსპერიმენტის ძირითად მიზანს წარმოადგენდა შედგენილი კვეთის ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე კოჭში განვითარებული ხანგრძლივი დეფორმაციების, კერძოდ, ცოცვადობის დეფორმაციის კვლევა, ხანგრძლივი დეფორმაციის განვითარების შედეგად აღძრული ძაღვების სიდიდის დადგენა, ასევე მათი გავლენა კონსტრუქციის მზიდუნარიანობაზე.

შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების გამოყენების არე სამშენებლო ინდუსტრიაში ძალზედ დიდია. მათ გაანგარიშებაში მეტად მნიშვნელოვანია დატვირთვის ხანგრძლივი მოქმედებისას განვითარებული ცოცვადობის დეფორმაციები. თეორიულად გავიანგარიშე ამ სიდიდის მნიშვნელობა ყველა მდგენელი ერთგვაროვანი ელემენტისათვის დროის ნებისმიერ მომენტში და ექსპერიმენტით უნდა დამტკიცებულიყო ამ გამოთვლების სამართლიანობა.

თეორიული გამოთვლების (თეორიული ექსპერიმენტის) გასამყარებლად, გადავწყვიტე პრაქტიკულად გამომეცადა ამ ტიპის კონსტრუქცია. ამისათვის საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო-სამეცნიერო ლაბორატორიაში დავამზადე შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის 2 მ. სიგრძის ტესტური განიკვეთის კოჭი (ნახ.15 და ნახ.16).



ნახ.15. შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კოჭი



ნახ. 16. შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კოჭი

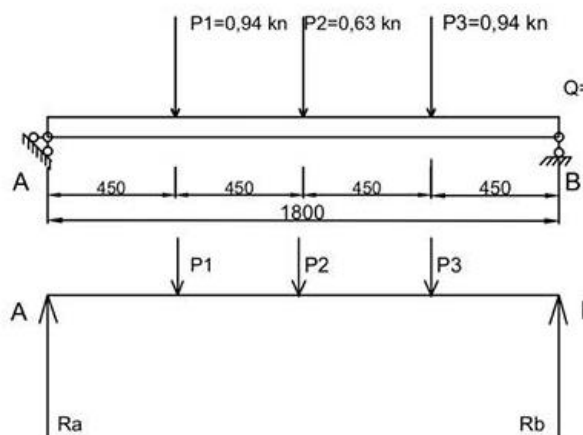
თარო, რომლის ზომებია 30X10X200 სმ, დამზადდა B20 კლასის ბეტონისგან, ხოლო წიბო, ზომებით 10X20X200 სმ, დამზადდა B15 კლასის ბეტონისგან. გაჭიმული ზონა არმირებულია A-III კლასის 12 მმ-იანი არმატურით. ცოცვადობის მახასიათებელი B20 კლასის ბეტონისთვის  $\varphi_1=3,1$ , ხოლო B15 კლასის ბეტონისთვის  $\varphi_2=2,8$ . ინერციის მომენტები:  $I_1=250000$  სმ<sup>4</sup> და  $I_2=6700$  სმ<sup>4</sup>; ბეტონის განივკვეთის ფართობი:  $A_1=300$  სმ<sup>2</sup>;  $A_2=200$  სმ<sup>2</sup>

კოჭი მომზადდა საექსპერიმენტოდ, კოჭი საყრდენებზე დაიდო დაბეტონებიდან 28 დღის შემდეგ 2016 წლის 25 მაისს, წაესვა წყალ-ცემენტის ხსნარის თხელი ფენა მცირე ფორების ამოსავსებად, 48 საათის შემდეგ გასუფთავდა ჯერ ე.წ. „შკურკით“, ხოლო შემდეგ აცეტონით. კოჭზე დაყენებულ იქნა 14 ცალი ინდიკატორი, 3 ჩალუნზომი, 26 ცალი 406 ომიანი ელექტროტენზომეტრი

ექსპერიმენტი დავიწყე 2016 წლის 28 მაისს. თავდაპირველად გადაწყვეტილი იყო კოჭი დატვირთულიყო თავისივე იდენტური კოჭით (ნახ.17). ასეთნაირად დატვირთული კოჭის საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ.18-ზე. მთელი ზაფხულის განმავლობაში დატვირთულ კოჭზე დაკვირვებამ არანაირი შედეგი არ აჩვენა.



ნახ.17. დატვირთვის სქემა



ნახ.18. კოჭის საანგარიშო სქემა



გადავწყვიტე შემეცვალა დატვირთვის ფორმა და ექსპერიმენტის თავდაპირველი არსი, ანუ კოჭი გამეტეხადა და დამედგინა ბზარწარმოქმნისა მომენტის და კრიტიკული ძალის ზუსტი ექსპერიმენტალური მნიშვნელობა, რათა შემდგომ ეტაპზე დაკვირვებისთვის იდენტური კოჭი დამეტვირთა ხანგრძლივად, კრიტიკული ძალის 20%-ის მნიშვნელობის დატვირთვით. წინასწარ გამოვიანგარიშე ამ ტიპის ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე კოჭი, გამოვთვალე კრიტიკული ძალა, რომელსაც კოჭის რღვევა უნდა გამოეწვია.

ექსპერიმენტის პირველ ეტაპზე უნდა დამედგინა სწრაფად (მყისიერად) განვითარებული ძალები და დეფორმაციები. დატვირთვის რა მნიშვნელობისთვის ჩნდებიან პირველი ბზარები, რომლებიც ზედაპირზე ჯერ კიდევ არ ჩანან და რა დატვირთვას გაუძლებდა საბოლოოდ კოჭი, რამდენად დაემთხვევა ეს შედეგი თეორიულად გამოთვლილ მნიშვნელობას. თეორიულად გამოვთვალე დამუშავებული მეთოდიკით ზღვრული ძალის მნიშვნელობა, რომელმაც 6,0 ტმ (60 კნ) შეადგინა.

ექსპერიმენტის დროს, დატვირთვის 6,4 ტმ (64 კნ) მნიშვნელობისთვის კოჭში გაჩნდა პირველი ბზარები (ნახ.23), ხოლო 10 ტმ (100 კნ) დატვირთვის მნიშვნელობისთვის (კრიტიკული ძალის მნიშვნელობა) კოჭის მთლიანობა დაირღვა ნახ. 24, 25, 26. ცხრილ 8-ში მოცემულია იმ ეტაპის ელექტროტენზომეტრის ანათვლები, ხოლო ნახ. 27-ზე შესაბამისი ძაბვა-დეფორმაციის გრაფიკები. კოჭი დამზადდა 2016 წლის 27 აპრილს, ხოლო სტატიკური გამოცდა მოხდა 172 დღის შემდეგ, 2016 წლის 16 ოქტომბერს.



ნახ.19. რკინაბეტონის შედგენილი კვების კოჭი



ნახ.20. რკინაბეტონის შედგენილი კვების კოჭი



ნახ.21. დატვირთული კოჭი



ნახ. 22. დაუტვირთავი კოჭი



ნახ. 23. ბზარწარმოქმნის მომენტი



ნახ. 24. კოჭის რღვევა



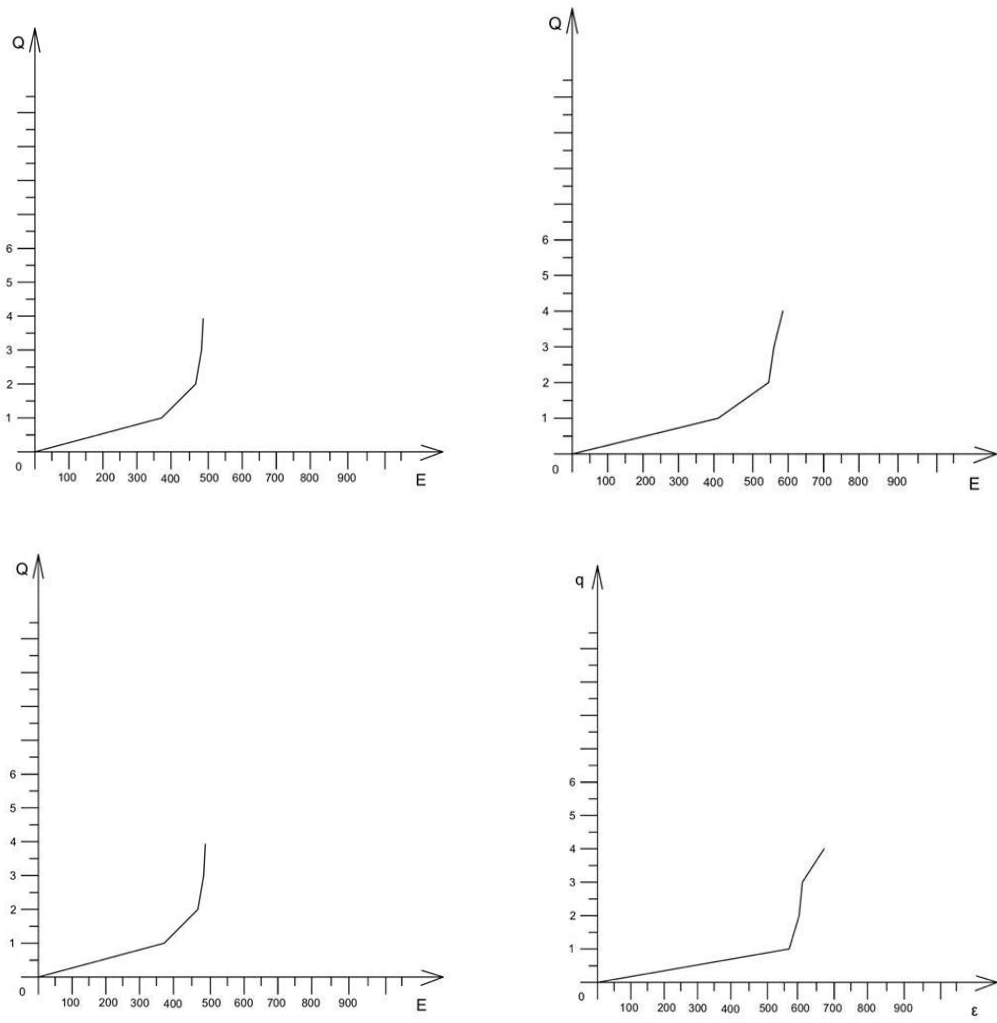
ნახ. 25. კოჭის რღვევა



ნახ. 26. კოჭის რღვევა

ცხრილი: 8 ელექტროტენზომეტრების ანათვლები

		ტენზომეტრების ანათვლები																
#	დატ.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0 ტ.	890	801	789	688	410	406	412	420	415	416	402	875	401	405	825	410	402
2	1 ტ.	929	870	817	700	425	471	555	575	485	520	495	880	417	420	851	425	435
3	2 ტ.	942	932	772	840	542	473	570	605	495	600	600	910	450	435	870	500	470
4	3 ტ.	950	990	780	710	543	490	570	609	500	720	630	940	465	460	875	553	471
5	4 ტ.	910	—	785	715	550	495	575	680	505	—	632	995	468	465	—	550	475



ნახ. 27. ძაბვა-დეფორმაციის გრაფიკები

ექსპერიმენტის პირველი ეტაპის (სტატიკური გამოცდის) შემდეგ დაუბრუნდი კვლევის ძირითად მიზანს, რომელიც მდგომარეობდა შემდეგში: შედგენილი კვეთის ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე კოჭში ხანგრძლივი დეფორმაციებისგან, კერძოდ, ცოცვადობის დეფორმაციისგან განვითარებული ძალების (მღუნავი მომენტის) კვლევა. ამისათვის ხანგრძლივი დატვირთვით დატვირთე კოჭი. თარო, რომლის ზომებია 30X10X200 სმ, დამზადდა B20 კლასის ბეტონისგან, ხოლო წიბო, ზომებით 10X20X200 სმ, დამზადდა B15 კლასის ბეტონისგან. გაჭიმულ ზონაში სამუშაოდ გამოვიყენე A-III კლასის არმატურა დიამეტრით 12 მმ. ცოცვადობის მახასიათებელი B20 კლასის ბეტონისთვის  $\varphi_1=3,1$ , ხოლო B15

კლასის ბეტონისთვის  $\varphi_2=2,8$ . ინერციის მომენტები:  $I_1=250000$  სმ<sup>4</sup> და  $I_2=6700$  სმ<sup>4</sup>; ბეტონის განივკვეთის ფართობი:  $A_1=300$  სმ<sup>2</sup>;  $A_2=200$  სმ<sup>2</sup>, ანუ ეს კონსტრუქცია ექსპერიმენტის პირველ ეტაპზე გამოცდილი (გატეხილი) კოჭის ანალოგიურია.

კოჭი დამზადდა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო-სამეცნიერო ლაბორატორიაში 2016 წლის 13 ივლისს, კოჭი ხანგრძლივი დატვირთვით დაიტვირთა დამზადებიდან 96 დღის შემდეგ 2016 წლის 17 ოქტომბერს. კოჭზე მოვდე კრიტიკული დატვირთვის 20%, 2,0 ტმ. (20 კნ). საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 13-ზე.

ექსპერიმენტის დაწყებიდან ხუთი თვის შემდეგ უკვე გამოიკვეთა ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების დინამიკა. მიღებული შედეგების თეორიული გაანგარიშების შედეგთან შედარებამ დამაკმაყოფილებელი შედეგი მოგვცა. ამ შედეგით და სხვა მეცნიერთა მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების სტატისტიკურმა დამუშავებამ გვიჩვენა, რომ ძაბვები, რომლებიც რედუცირებული კვეთისთვის არის გამოთვლილი, საკმაოდ ახლოს არის ძაბვების უშუალო დათვლის მეთოდით მიღებულ სიდიდესთან.



ნახ.28. დატვირთვის სქემა



ნახ.29. დატვირთვის სქემა



ნახ.30. დატვირთული კოჭი

ცხრილი 9. ინდიკატორების და ჩალუნმზომების ანათვლები

ცხრილი #																					
#	თარიღი	დაყოვნების დრო	საფეხური №	დატვირთვა (ტმ)					ინდიკატორები										ჩალუნზომები		
					M1	M2	M3	M4	i1	i2	i3	i4	i5	i1'	i2'	i3'	i4'	i5'	h1	h2	h3
					მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.	მმ.
1	25.10.2016.	0	1	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	05.11.2016.	11	2	2	0.01	0.03	0.005	0.005	0.00	0.09	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.005	0.00	0.00	0.00	0.00
3	17.11.2016.	12	3	2	0.01	0.03	0.005	0.005	0.00	0.09	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.005	0.00	0.00	0.00	0.00
4	26.11.2016.	9	4	2	0.01	0.03	0.005	0.005	0.00	0.09	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.005	0.00	0.00	0.00	0.00
5	04.12.2016.	8	5	2	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.09	0.00	0.01	0.03	0.05	0.01	0.035	0.005	0.00	0.00	0.00	0.00
6	11.12.2016.	7	6	2	0.03	0.05	0.02	0.02	0.02	0.09	0.00	0.01	0.03	0.06	0.01	0.04	0.005	0.005	0.00	0.00	0.00
7	18.12.2016.	7	7	2	0.04	0.06	0.03	0.03	0.025	0.09	0.00	0.01	0.035	0.07	0.01	0.04	0.01	0.005	0.00	0.00	0.00
8	25.12.2016.	7	8	2	0.045	0.065	0.035	0.04	0.025	0.09	0.00	0.01	0.035	0.07	0.01	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.015
9	31.12.2016.	6	9	2	0.05	0.07	0.04	0.05	0.03	0.095	0.005	0.01	0.04	0.07	0.015	0.045	0.01	0.01	0.005	0.005	0.02
10	10.01.2017.	10	10	2	0.06	0.08	0.05	0.06	0.04	0.1	0.01	0.02	0.05	0.075	0.02	0.05	0.01	0.01	0.005	0.01	0.02
11	17.01.2017.	7	11	2	0.07	0.085	0.06	0.07	0.06	0.1	0.01	0.02	0.05	0.075	0.02	0.05	0.01	0.01	0.005	0.01	0.02
12	24.01.2017.	7	12	2	0.08	0.09	0.07	0.085	0.06	0.1	0.01	0.02	0.05	0.08	0.025	0.055	0.015	0.01	0.005	0.01	0.02
13	30.01.2017.	6	13	2	0.09	0.1	0.08	0.1	0.07	0.15	0.015	0.03	0.06	0.1	0.03	0.06	0.02	0.01	0.005	0.015	0.025
14	08.02.2017.	8	14	2	0.1	0.15	0.095	0.1	0.075	0.2	0.02	0.03	0.06	0.15	0.035	0.065	0.025	0.015	0.01	0.015	0.025
15	13.02.2017.	5	15	2	0.015	0.015	0.015	0.015	0.08	0.2	0.02	0.035	0.07	0.2	0.04	0.07	0.03	0.02	0.01	0.015	0.025
16	20.02.2017.	8	16	2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.085	0.025	0.025	0.04	0.08	0.03	0.05	0.075	0.035	0.025	0.015	0.015	0.025



ცხრილი 10. B20 და B15 კლასის ბეტონის შემადგენლობა (მენიუ)

B20

ჩამონათვალი	სიმკვრივე	გრამები	ლიტრები	კილოები	შენიშვნა	
2	3	4	5	6	7	
წ/ც	0,551					
ცემენტი	3,1	390	125,80645	5,85	<del>7,85</del> 11,7	
წყალი	1	215	215	3,225	6,44	
ქვიშა	2,31	990	428,57143	14,85	9,27	
ლორღი	0,5+10	2,6	740	284,61538	11,1	22,3
პლასტი	1	3,9	3,9	0,0585	0,112	
სულ/ჯამი		2338,9	1057,8933	35,0835		

B15

ჩამონათვალი	სიმკვრივე	გრამები	ლიტრები	კილოები	შენიშვნა	
2	3	4	5	6	7	
წ/ც	0,6					
ცემენტი	3,1	350	112,90323	5,25	10,5	
წყალი	1	210	210	3,15	6,3	
ქვიშა	2,31	1015	439,39394	15,225	30,44	
ლორღი	0,5+10	2,6	760	292,30769	11,4	22,8
პლასტი	1	3,5	3,5	0,0525	0,10	
სულ/ჯამი		2338,5	1058,1049	35,0775		

## ძირითადი დასკვნები

1. შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ცოცვადობის დეფორმაციის შედეგად განვითარებული ძაბვების შესაძლო გადახრების საზღვრები მერყეობს -45%-დან +50%-მდე, ხოლო ამ დეფორმაციებისგან განვითარებული ძაღვის (მღუნავი მომენტის) შესაძლო გადახრების საზღვრები მერყეობს -20%-დან +50%-მდე;

2. ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრების ვარიაციის კოეფიციენტი შედარებით დიდია - 26%, ვიდრე ამ დეფორმაციისგან აღძრული ძაბვის - 18%, ხოლო ძაღვისა - 17%;

3. ძაღვები, რომლებიც აღიძვრებიან რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების შედეგად, წარმოდგენილია როგორც ფუნქცია ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლისა, რომელიც წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს და მნიშვნელოვნად მოქმედებს რკინაბეტონის შენობა-ნაგებობების დაძაბულ-დეფორმირებულ მდგომარეობაზე. მიღებულია, რომ ბეტონის ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო მნიშვნელობები ემორჩილებიან ნორმალური განაწილების კანონს. ამასთან 0,95-იანი გარანტიით ამ სიდიდის გადახრები მერყეობს  $\pm 45\%$ -ის ფარგლებში, ხოლო 0,84 გარანტიით -  $\pm 25\%$ -ის ფარგლებში.

4. შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კონსტრუქციებში ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრებს  $\pm 25\%$ -ის ფარგლებში, შეესაბამება მღუნავი მომენტის შესაძლო გადახრის მნიშვნელობა  $\pm 5\%$ -ის ფარგლებში.

5. რკინაბეტონის შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების საინჟინრო გაანგარიშებებში დასაშვებია გამოყენებულ იქნეს ცოცვადობის ზღვრული მახასიათებლის შესაძლო გადახრები -30%-დან +45%-მდე, რასაც შეესაბამება ძაბვის და ძაღვის შესაძლო გადახრები -10%-დან +10%-მდე.

6. შედგენილი კვეთის კონსტრუქციებში ხანგრძლივი დეფორმაციების შედეგად განვითარებული ძაბვების შესაძლო გადახრები 0,87 საიმედოობით ექვემდებარებიან ნორმალური (გაუსის) განაწილების კანონს.

7. შედგენილი კვეთის რკინაბეტონის კონსტრუქციებში ცოცვადობის დეფორმაციისგან განვითარებული მღუნავი მომენტის შესაძლო გადახრების თეორიული განაწილების კანონი ახლოს არის ლოგისტიკურ განაწილების კანონთან.

8. პრაქტიკულმა ექსპერიმენტმა დაწყებიდან ხუთი თვის შემდეგ უკვე გვიჩვენა, რომ ცოცვადობის დეფორმაციის განვითარების დინამიკა თეორიული გაანგარიშებით მიღებულ შედეგებთან დამაკმაყოფილებლად ახლოს არის. ამ შედეგმა და სხვა მეცნიერთა მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების სტატისტიკურმა ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ძაბვები და ძაღვები, რომლებიც რედუცირებული კვეთისთვის არის გამოთვლილი, საკმაოდ ახლოს არის მათი უშუალო დათვლის მეთოდით მიღებულ სიდიდესთან.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Александровский С. В. Багрий В.Я. Ползучесть бетона при ступе чатых знакопеременных периодических нагрузках. Бетон и железобетон. 1987. №12. С.30-33
2. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. - М. - Л. Гостехиздат. 1952. 324 с.
3. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетона. - М. Стройиздат. 1971. 208 с.
4. Гвинчидзе Г. И., Кизирия Г. В. Некоторые вопросы расчета конструкций с учетом деформаций ползучести бетона/Стат. И динам. Задачи строительных конструкций. Тбилиси 1981. С. 93-121
5. Гвоздев А. А. Ползучесть бетона и пути ее исследования/Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов. - М. Госстройиздат. 1955 С 98-91.
6. Саакян А.С.. Экспериментальное исследование ползучести бетона. Автореф. дисс. на соис. учен. степени д-ра техн. наук. Л. 1967. 52 с.
7. Зевин А.А. К расчету статически неопределимых железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона// Прикладная механика. - 1974. - 10, № 7. - с.93-98.
8. Карапетян К. С. О теоретических и экспериментальных исследованиях в области теории ползучести//Изв. АН АрмССР. Механика. 1976. Вып. XXIX №1. С.27-38
9. Кизирия Г. В. Расчет конструкции с учетом деформации ползучести бетона. Тбилиси. Мецниереба, 1969, 130 с.
10. Кизирия Г. В. Методика приближенного определения усилий в многократно статически неопределенных комбинированных конструкциях//сообщения АН ГССР.-1964. XXXV. №2. С.317-323.
11. Кизирия Г. В., Гвинчидзе Г. И. О новой модификации наследственной теории старения//сообщения АН ГССР.-1981. Т. 104. №1. С.117-120.

12. Кудзис А. П., Квядарас А. Б. Исследование ползучести центрифугированного полимерцементного бетона/Ползучесть и усадка бетона. М. Стойиздат. 1969. С. 25-36.
13. Лишиц Я. Д., Толокнов Ю. Н. К расчету железобетонных статически неопределимых конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона / Теория сооружений. Минск. Высшая школа. 1971. С. 153-163.
14. Чантурия М. Л. Расчет неразрезных бфлок с учетом вероятностной природы величины деформаций ползучести бетона / Строительство ГЭС в высокогорных условиях / Тезисы докладов. Цхвлтубо. 1986. С.119.
15. Чантурия М. Л. Усилия, возникшие в статически неопределимых конструкциях в результате ползучести бетона, как функции случайной величины скорости развития деформаций / XIII объединенная сессия научно-исследовательских институтов Закавказских республик по строительству. 3-6 ноября 1987 г. Тбилиси. 1987. С. 215-216.
16. Кизирия Г. В., Чантурия М. Л. Усилия, возникшие в статически неопределимых конструкциях в результате развития длительных деформаций, как функции случайной величины конечной характеристики ползучести бетона// Сообщения АН ГССР. 1988. Т. 130, №2. С. 385-388.
17. Чантурия М. Л. Определение усилий в комбинированных конструкциях с учетом вероятностной природы ползучести бетона / Качество и надежность строительных материалов и конструкций в сейсмическом строительстве. Тбилиси. 1988. С.84-84.
18. Чантурия М. Л. Модель ползучести композиционных материалов с учетом вероятностных аспектов / Повышение эффективности в строительстве и промышленности строительных материалов. Рига. 1988. С.101-103.
19. Чантурия М. Л. Анализ исследования величины изгибающего момента, как функции случайного аргумента при ползучести бетона / Качество и надежность строительных материалов и конструкций в сейсмическом строительстве. Тбилиси. 1990. С.77-77.
20. Щербаков Е. Н. О прогноз величин деформации ползучести и усадки тяжелого бетона в стадии проектирования конструкций // Труды ЦНИИС. 1969. Вып. 70. С.39-84.

21. Щербаков Е. Н. Аппроксимация и прогнозирование кривых ползучести бетона при постоянных напряжениях сжатия // Сб. Научных трудов ЦНИИС. “Проблемы ползучести и усадки бетона”. 1974. Вып. 77. С.68-78.
22. Вентцель Е.С. Теория вероятностей -М.: Наука, 1964, 576 с.
23. Boes A. Uber des Kriechen von Zementsteln, Mörtel und Beton. Aechen. 73. 186 P.
24. გ. ნოზაძე, მ. ჭანტურია. სტატისტიკურად ცვლადი საანგარიშო სქემის კონსტრუქციების საიმედოობაზე გაანგარიშების საფუძვლები. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "მშენებლობა", თბილისი, # 4 (23) 2011 (გვ. 39-42).
25. გ. ნოზაძე, მ. ჭანტურია. ღუნვაზე მომუშავე შედგენილი კვეთის კონსტრუქციების ხანგრძლივ დეფორმაციებზე გაანგარიშება. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "მშენებლობა", თბილისი, # 4 (39) 2015 (გვ. 87-89).
26. გ. ნოზაძე. ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე შედგენილი კვეთის კოჭის ექსპერიმენტული კვლევა. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "მშენებლობა", თბილისი, # 3 (42) 2016 (გვ.136-139).

დანართები



ნახ. 31. კოჭის დამზადების პროცესი

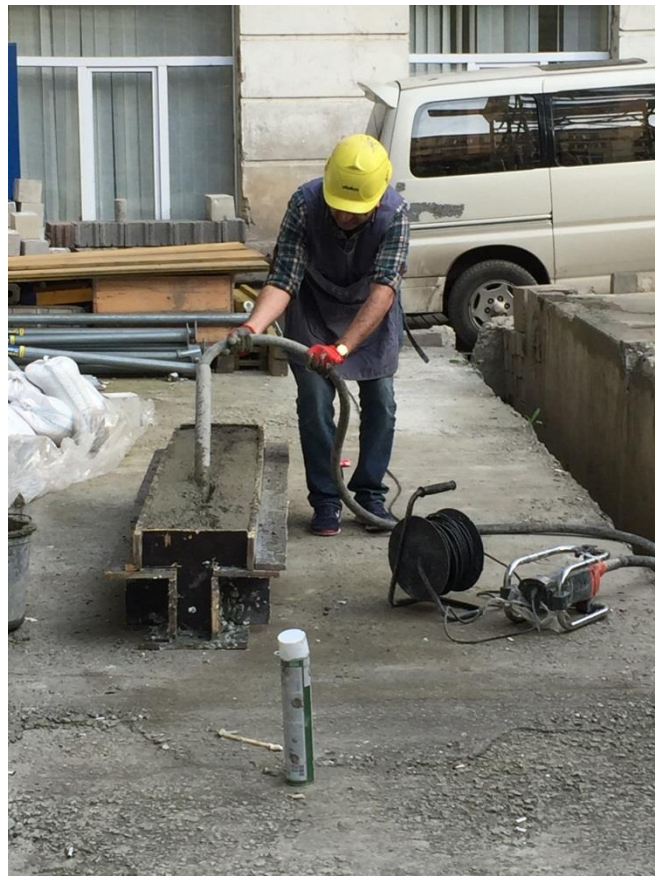


ნახ. 32. კოჭის დამზადების პროცესი

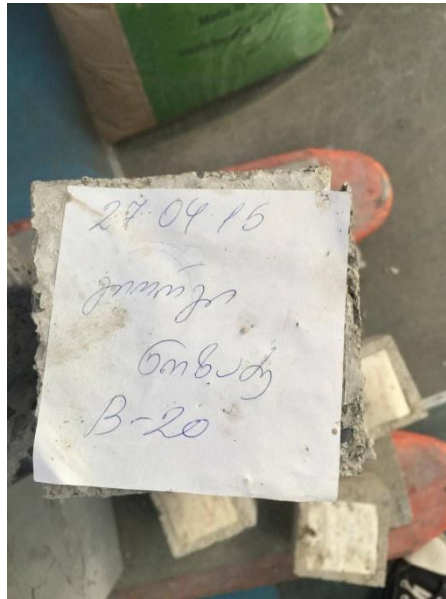




ნახ. 33. კოჭის დამზადების პროცესი



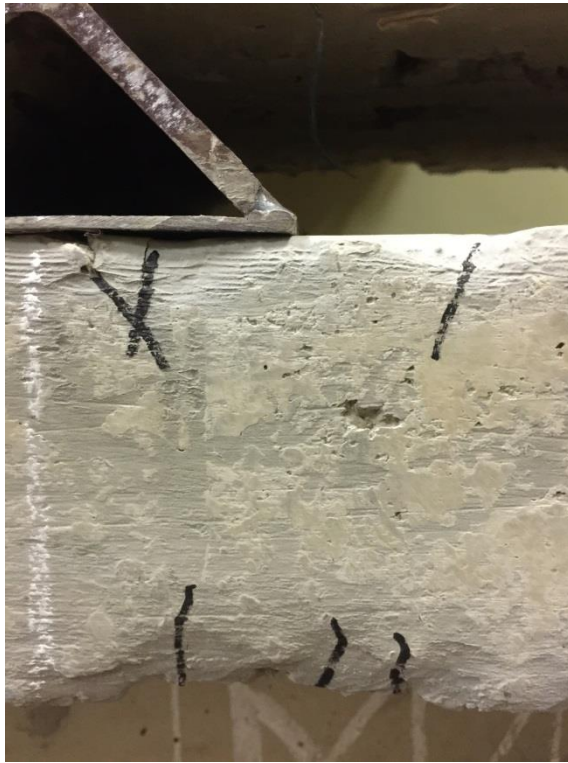
ნახ. 34. კოჭის დამზადების პროცესი (ვიბრირება)



ნახ. 35 ნიმუშების გამოცდა



ნახ. 36. ბეტონის სიმტკიცის მონაცემები



ნახ. 37. საყრდენის სქემა



ნახ. 38. საყრდენის სქემა



ნახ. 39. დატვირთვის სქემა



ნახ. 40. შედგენილი კვეთი



ნახ. 41. დატვირთვის სქემა



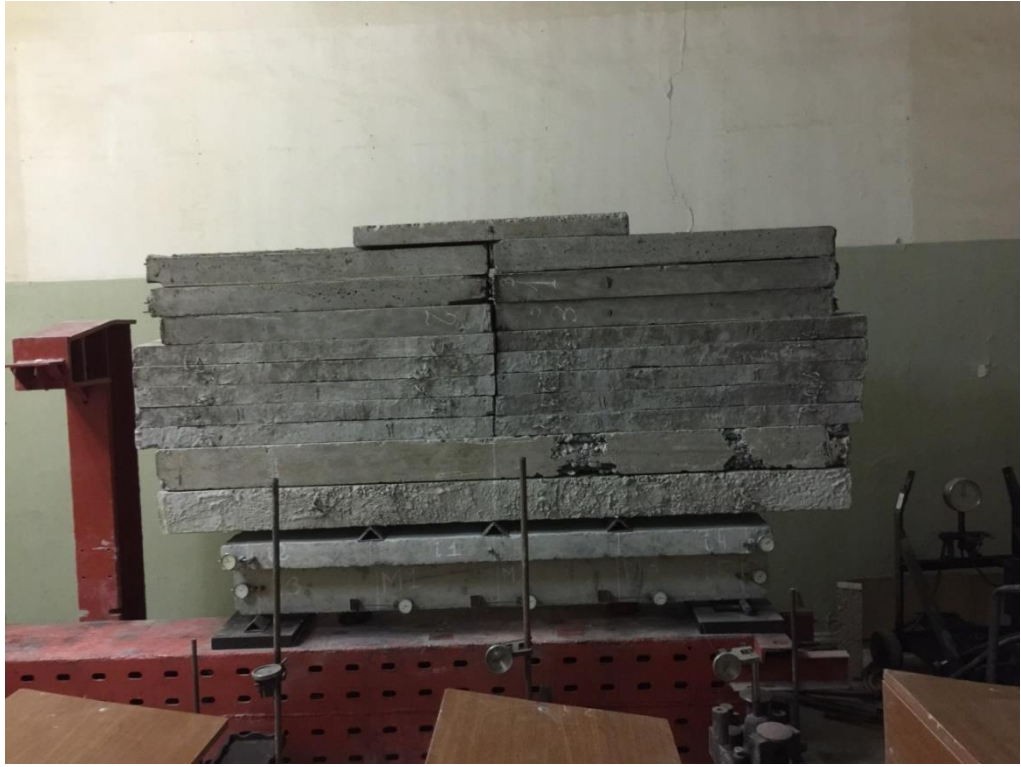
ნახ. 42. დატვირთვის მოქმედების სქემა



ნახ. 43. დატვირთვის სქემა



ნახ. 44. დატვირთვის სქემა



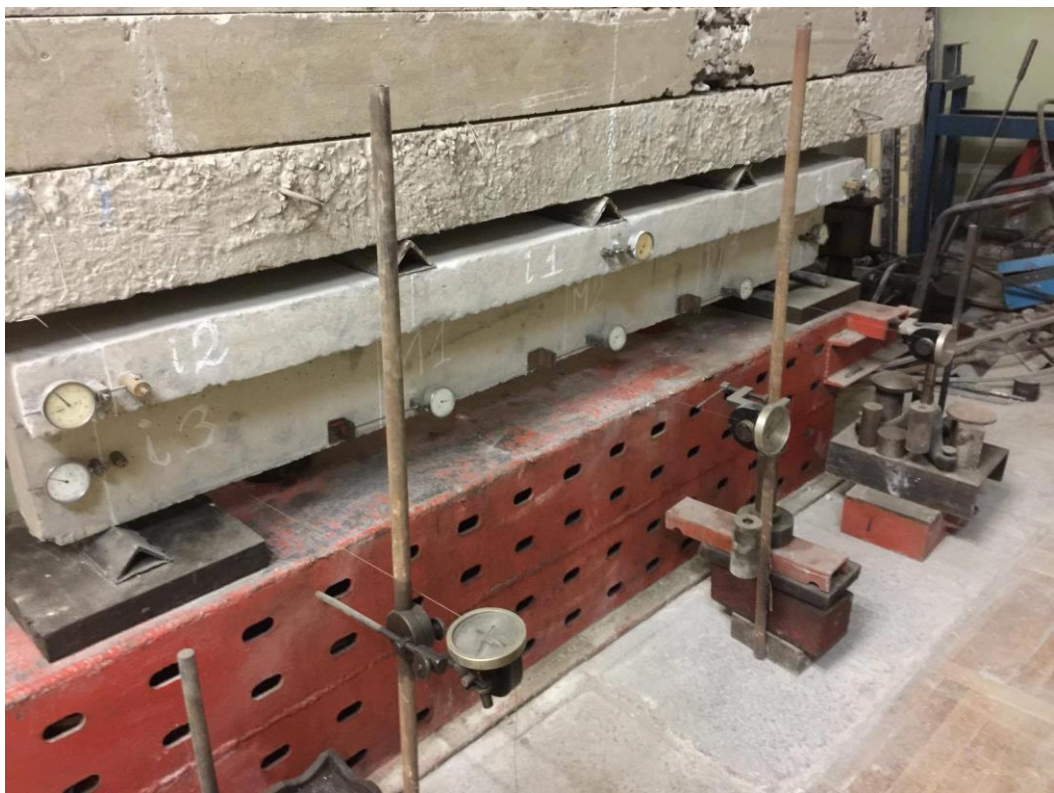
ნახ. 45. დატვირთვის სქემა



ნახ. 46. დატვირთვის სქემა



ნახ. 47. დატვირთვის სქემა



ნახ. 48. დატვირთვის სქემა