

გოდერძი ღვინეფაძე

ბეტონის, როგორც მარცვლოვანი კომპოზიციური მასალის,  
სტრუქტურული მექანიკის სტატისტიკური  
კანონზომიერებანი  
წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
თვე, წელი

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

## სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით გოდერძი ღვინეფაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: “ზეტონის, როგორც მარცვლოვანი კომპოზიციური მასალის, სტრუქტურული მექანიკის სტატისტიკური კანონზომიერებანი” და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი 2011 წელი

ხელმძღვანელები:

სრული პროფესორი

გელა ყიფიანი

სრული პროფესორი

დემურ დანელია

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2011 წელი

ავტორი: გოდერძი ღვინევაძე

დასახელება: ბეტონის, როგორც მარცვლოვანი კომპოზიციური მასალის, სტრუქტურული მექანიკის სტატისტიკური კანონზომიერებანი

ფაკულტეტი : სამშენებლო

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: თარიღი

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

---

ავტორის ხელმოწერა

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

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

## რეზიუმე

სამშენებლო მეცნიერებათა განვითარების ერთ-ერთ მთავარ მიმართულებად, თანამედროვე დროში, ითვლება გაანგარიშების შესრულების სრულყოფილი მეთოდის დამუშავება, რომელიც უზრუნველყოფს სამშენებლო კონსტრუქციების საიმედოობას და ეკონომიურობას. ეს, უპირველეს ყოვლისა, მიიღწევა მასალის დრეკადი და დეფორმირებადი თვისებების სრულად შესწავლის გზით. რაც განპირობებულია ძირითადად კონსტრუქციული კომპოზიტების მეტი კუთრი სიმტკიცითა და სიხისტით კლასიკურ კონსტრუქციულ მასალებთან შედარებით. მაგრამ ამ დადებით თვისებებთან ერთად მათ გააჩნიათ უარყოფითიც – დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის უფრო მკვეთრი რელაქსაციური ხასიათი.

ბეტონის, როგორც კომპოზიციური მასალის, ფიზიკური ბუნების შესწავლისას, საკმაოდ ეფექტურია გამოკვლევების სტატიკური მეთოდები. ეს აიხსნება იმით, რომ ნებისმიერი მყარი სხეული წარმოადგენს სტრუქტურული ელემენტების სტატისტიკურ ანსამბლს (მარცვალი, შეჭიდულობა).

ამ ელემენტების მექანიკური მახასიათებლები შემთხვევითი ხასიათისაა, აქედან გამომდინარე, სხეულის მექანიკური მახასიათებლები, რომელიც შედგება ზემოთ აღნიშნული ელემენტებისაგან, ასევე ემორჩილება ალბათობის კანონებს.

მასალის მექანიკური ქცევა დამოკიდებულია მის აგებულებაზე (სტრუქტურაზე), რომელიც შეიძლება სხვადასხვა დონეზე იყოს განხილული, დაწყებული ბირთვისა და ატომის აგებულებიდან, ხოლო შემდგომ მოლეკულურ, კრისტალურ, დისლოკაციურ დ. ა. შ. დონეზე. მასალის მექანიკური საქციელსა და მიკრო და მაკრო წარმოდგენების რაოდენობრივი შეკრების ერთობლივი ამოცანა, შესაძლებელია გადაწყვეტილ იქნეს პლასტიკურობისა და სიმტკიცის სტატიკური თეორიის შექმნით, რომელიც დაეფუძნება დეფორმაციებისა და რღვევის არაერთგვაროვანი განვითარების თანამედროვე ფიზიკურ მეხედულებებს, რაც გამოწვეულია თავად რეალური მასალის სტრუქტურული არაერთგვაროვნებით.

თანამედროვე თეორიების შექმნისას, ძირითადად ეყრდნობიან ალბათობის იდეებს. გაანგარიშების დეტერმინანტული მეთოდები წარმოადგენენ პირველ მიახლოებებს, მათი უზუსტობები სიმტკიცის კოეფიციენტების გამოყენებით იფარება.

ალბათური მეთოდები ეფუძნება ზოგიერთი პირობის შემთხვევით შემოსვლის აღრიცხვის სინამდვილეს ამა თუ იმ პროცესში. აკოლმოგოროვის მიხედვით არსებობს ასეთი შემთხვევის სამი სახე: პროცესის საწყისი პირობები, რომელიც მიმდინარეობს მკაცრად კანონზომიერად, ხოლო განმეორებისას შეიძლება იყოს შემთხვევითი; პროცესის ხანგრძლივობა დროში შემთხვევითია; პროცესის კანონზომიერი

მიმდინარეობა გართულებულია შემთხვევითი აღლვებულობით. ეყრდნობა, რა მეცნიერებას, ფართოდ იყენებს მათემატიკის ენას, თავისი სქემის აგებისას საწყის იდეალიზაციას. ხშირად თეორიული მსჯელობა იძენს ფორმალური სისტემების ხასიათს (აბსტრაქტული მათემატიკური მოდელებისას), რომელთა ინტერპრეტაცია საკმაოდ რთულდება.

ფორმალური სისტემები წარმოადგენენ ამა თუ იმ სახის მოდელებს, სხვადასხვა სახის მოდელირების უნარით და მასალის ფართოდ აღქმით.

სიმტკიცის თეორიის მეთოდების გამოყენება ამ საკითხების შესწავლისას, მოითხოვს ინფორმაციის მოდელების გაზრდას, კერძოდ გამოყენებული მასალების შესახებ, რაც აუცილებელი პირობაა განსახილველი სისტემის საიმედოობისა და ხანგრძლივი ექსპლუატაციის პროგნოზირებისათვის. დღესდღეობით მიმდინარეობს მასალებზე ამგვარი ინფორმაციის დაგროვება.

ზოგიერთი სტატისტიკური (ექსპერიმენტალური) მონაცემების არქონა საკმაოდ საგრძნობია. მიუხედავად ამისა, არ ღირს თავის შეკავება თეორიის შექმნისაგან, სანამ არ იქნება ყველა ფაქტები შეგროვებული, რადგან ცნობილია, რომ არა მარტო თეორიისაკენ მიმავალი გზა შედგება ფაქტებისაგან, არამედ თეორიული კვლევაც წარმოადგენს ფაქტების აუცილებელ პირობას.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, თეორიული კვლევის შედეგები არ შეგვიძლია შევამოწმოთ ემპირიული მონაცემებით. ამა თუ იმ შედეგების შესამოწმებლად ასეთი მონაცემები შეიძლება ჯერჯერობით არ გვქონდეს, მაგრამ თეორიული გამოკვლევების მიზანია, არა მარტო ახსნას ემპირიული ფაქტები, არამედ გააკეთოს მომავლის პროგნოზები. ბოლო წლებში საგრძნობლად გაიზარდა ინტერესი სტატისტიკურად არაერთგვაროვანი სტრუქტურულად მყარი დეფორმადი სხეულის გარშემო. ეს კიდევ ერთხელ ხაზს უსვამს ფაქტს, რომ მხოლოდ სტრუქტურის ეფექტურად გამოყენება საშუალებას გვაძლევს სწორად მივუდგეთ მყარი სხეულის პლასტიკური დეფორმაციის აღწერას, აგრეთვე დაზიანების დაგროვების პროცესის რღვევის დროს. მაკროსკოპური მახასიათებლების გამოთვლა მიკროსტრუქტურების ცნობილი მახასიათებლების მიხედვით შემდგომში შეიძლება გამოყენებულ იქნეს რეალური სხეულის დეფორმაციისა და რღვევის თეორიის შექმნის დროს.

სხვა მხრივ, საანგარიშო მოდელის გართულებას მივყავართ განუსაზღვრელ მათემატიკურ სირთულეებამდე, ან გადაწყვეტამდე, რომელიც პრაქტიკულად გამოუსადეგარია.

თანამედროვე სიმტკიცის ფიზიკის შესწავლის პირობებში, პირველ რიგში განიხილება მყარი სხეულის არაერთგვაროვანი სტრუქტურის რეალური გავლენა, რომელიც აისახება დეფორმაციის პროცესში, მიკრომაბელების და სტრუქტურული დეფექტების გათვალისწინებით, რღვევის ჩანასახში.

მასალის არაერთგვაროვნების გამო დეფორმირების თეორია ვერ აღიწერება კლასიკურ შეხედულებებზე დაფუძნებული მყარი დეფორმირებადი სხეულის განტოლებით.

რადგანაც, ბეტონები წარმოადგენენ სტოხასტიკურ ანსამბლს კომპოზიტის სტრუქტურული ელემენტების შემთხვევითი მექანიკური თვისებებით, ამიტომ მათი მექანიკური თვისებები შეიძლება პროგნოზირებულ იქნეს ალბათური მეთოდებით შესაბამის სტრუქტურულ მოდელზე დაყრდნობით, რომელიც დღესდღეობით მეტად აქტუალურია.

შემუშავებულ მოდელებს აქვთ პრაქტიკული მნიშვნელობა ბეტონის, როგორც კომპოზიტის შედარებითი მახასიათებლების განსაზღვრისას. დატვირთვის გადანაწილების ეფექტის გათვალისწინებით შემუშავებულია ბეტონის „მაბვან-დეფორმაცია“ დამოკიდებულების აგების ხარისხიანი თეორია მისი სტრუქტურული ელემენტების მახასიათებლების და ერთგვაროვნების ხარისხის გათვალისწინებით, რომელიც საშუალებას იძლევა აღვწეროთ მახასიათებელი უბნები დიაგრამის აღმავალ და დაღმავალ განშტოებებზე.

მიღებულია ბეტონის გაჭიმვაზე სიმტკიცის ანალიზური დამოკიდებულებები მისი სტრუქტურული ელემენტების სტატისტიკურ გამოსახვის მახასიათებლებზე, სტრუქტურის სტერეომეტრული უწყვეტობის ხარისხზე და ნიმუშის ზომაზე.

**კვლევის მიზანია** ბეტონის ელემენტების სტრუქტურული მექანიკის შესწავლა, რომელიც ეფუძნება ბეტონის სიმტკიცის სტატისტიკურ კანონზომიერებებს, როდესაც იგი განიხილება როგორც მარცვლოვანი მყიფე კომპოზიციური მასალა.

**ნაშრომის მეცნიერული სიახლე** მდგომარეობს ბეტონის (როგორც მარცვლოვანი კომპოზიციური მასალის) მათემატიკური მოდელის შედგენაში, რათა პროგნოზირებადი იყოს სიმტკიცის და ერთგვაროვნების ფარდობითი მნიშვნელობები გაჭიმვისას, ღუნვისას და კუმშვისას მისი სტრუქტურული ელემენტების (მარცვალი, მატრიცა, შეჭიდულობა) სტატისტიკური მახასიათებლის მიხედვით.

**კვლევის პრაქტიკული ღირებულება** მდგომარეობს იმაში, რომ ამოცანის გადასაწყვეტად სტატისტიკური პრინციპებისა და მეთოდოლოგიის ემპირიული თანაფარდობების მაგივრად დამუშავებულია ანალიზური მიდგომა. მოცემული გარემოება გვამლევს საშუალებას გადავწყვიტოთ სხვადასხვა სახის ბეტონის სიმტკიცის საკითხი ერთნაირი მიდგომით. შესაძლებელი ხდება მათემატიკურ მოდელზე დაყრდნობით დამუშავდეს სტატისტიკური პრინციპები, როგორც პირდაპირი ამოცანის – ბეტონის სიმტკიცის ფარდობითი მახასიათებლების პროგნოზირებისათვის მისი სტრუქტურული ელემენტების სტატისტიკური მონაცემების მიხედვით. ასევე შებრუნებული ამოცანის – სტრუქტურული ელემენტების შერჩევა და სტატისტიკური შეფასება ბეტონების მისაღებად, რომელთა ფარდობითი სიმტკიცე მოცემულია (გაჭიმვაზე, კუმშვაზე, ღუნვაზე).

ძირითადი შედეგების საიმედოობა განპირობებულია თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევების დასაბუთებული მეთოდების გამოყენებით; აგრეთვე სხვადასხვა ავტორების მიერ მიღებული თეორიული და ექსპერიმენტალური გამოკვლევების შედეგებთან თანდამთხვევით.

## Abstract

As one of main directions in the development of Science of construction in modern time, is considered the development of calculation complete processing method, construction material which provides the reliability and economy of building structures. This, above all, is achieved by fully studied of the elastic and deformable properties of the material creep and environmental conditions significant influence on the machine components, structural elements and building durability, strength and stability. That is mainly provided due to more specific strength and stiffness of structural composite in comparison with classic structural materials. But with these positive features, they also have a negative – by the more drastic relaxed character of mode of deformation.

At study of the physical nature of concrete as a composite material, are quite effective static methods. This is explained by the fact that any solid body represents a statistical ensemble of structural elements (grains, binding).

These mechanical characteristics have random character, therefore the mechanical characteristics of body, which consists of the above mentioned elements, also obeys to the laws of probability.

Mechanical behavior of materials depends on its structure, which may be considered at different levels, starting with their nucleus and atom structure from and then on molecular, crystalline, dislocation etc. level. While mechanical behavior and micro and macro representations quantitative summand integrated task can be determined by the creation of static theory of plasticity and strength, which will be based on the modern physical views of various deformations and the rupture development that is caused by real material's structural heterogeneity.

At the creation of modern theories, mainly are grounded on the ideas of probability. Determinant methods of calculation represents the first approach, the errors are covered by the application of strength coefficients.

The probabilistic methods are based on reality of recording of random entering of certain conditions in this or other process. According to A. Kolmogorov are existing three ways of such case: the process of starting conditions, which are strictly natural and at iteration may be random, the process duration time is random, the process natural development is complicated due random disturbances. Based on the science, widely is used language of mathematics, at construction of its scheme on initial idealization. Theoretical discussion often assumes the character of formal systems (abstract mathematical models), whose interpretation is rather complicated.

The formal systems represents of certain types of models, with different kinds of modeling capabilities and the wide perception of the material.

The application of the strength theory methods at study of this issues, demands increasing of information models, in particular about the applied materials, which is considered as necessary condition for system reliability and long life operation forecasting. Nowadays is carried out the accumulation of such information on materials.

Some of the statistical (experimental) is quite obvious in the absence of data. However, does not cost deterrence from creation of theory, before all the facts will not be collected because it is known that not only the road leading to the theory consists of the facts, but also the theoretical study of the facts is a necessary condition.



Therefore, we can not check the results of theoretical investigations by the empirical data. If we check the results of such data may not have yet, but theoretical studies aim not only to explain empirical facts, but also to make future predictions. In recent years, statistically significantly increased interest in about the various structurally solid deformable body. This once again underlines the fact that the only structures effectively application gives the possibility to correct approach of solid body plastic deformation. Description, as well as the damage process accumulation during the rupture, calculation of macroscopic characteristics by well-known microscopic characteristics in future can be used in creation of the theory of real body deformation and rupture. In physical metallurgy, which is close to concrete technology, there was a new approach to quantitative physical metallurgy - statistical physical metallurgy. In this field the processing of experiments results on the first step plays auxiliary in the total statistical physical metallurgy problem solving, and the problem is that the properties of microstructures composition and their inter-location in space, to calculate the technical properties of the material and numerically determine their behavior characteristics at the action of external forces.

In other respects, the design model complications leads to unlimited mathematical difficulties or to solution, that is practically unusable.

At the study of strength of physics in the modern conditions, first of all is considered the real impact of solid body heterogeneous structure that arises at deformation process. Micro-stresses and structural defects will be taken into account at rupture beginning.

The theory of deformation, due the material heterogeneity may not be described by theory of deformable solid body, which is based on classical views.

As, concrete represents the stochastic ensemble by random mechanical properties of composite's structural elements, so their mechanical properties can be predicted by based on probabilistic methods on according structural model, as very **topical** today.

The developed models have practical importance for definition comparative characteristics of concrete, as composite's. By taking into account the effect of load distribution has been developed concrete "stress – deformation" relation construction quality theory with consideration of structural elements characteristics and the uniformity of quality that gives the possibility to describe specific areas on the ascending and descending branches of diagram.

The analytical dependencies on concrete strength on tension on characteristics of its statical expression of structural elements, on degree of structure stereometric continuity and sample size are obtained.

**The object of study** is to research the concrete elements structural mechanics, which is based on the strength of concrete statistical regularities, when it is considered as a fragile granular composite material.

**The scientific novelty of work** lies in drawing up the concrete (as composite granular material mathematical models in order to be predictable the strength and uniformity relative values at tension, bending and compression of its structural elements (grains, matrix, binding) according to the statistical characteristics.

**The practical value of research** lies in the fact that for the tasks solution instead of statistical principles and methodology of empirical process is developed analytic approach. This fact allows us to solve various kinds of concrete strength issues by the same approach. On the basis mathematical model is possible to develop

the statistical principles, as a direct task – prediction of relative characteristics of concrete strength according of the structural elements statistical data. As well as inverted task- selection of structural elements and statistical evaluation for concrete receiving that relative strength is given (on tension, compression, bending).

The **reliability of basic results** is provided by application of theoretical and experimental studies, also by coincidence of results of obtained by various authors the theoretical and experimental studies.

## შინაარსი

შესავალი .....	14
1. ლიტერატურის მიმოხილვა .....	20
1.1. პრობლემის მდგომარეობა .....	20
1.1.1 ბეტონის სიმტკიცის თეორიის განვითარება .....	20
1.1.2. სტრუქტურული მოდელირების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები .....	25
1.2. ბეტონის რღვევის მათემატიკური მოდელირება .....	28
1.3. კომპოზიციური მასალების სტრუქტურული მექანიკა .....	31
1.4. ამოცანის დასმა და კვლევის მიზანი .....	45
2. შედეგები და მათი განსჯა .....	47
2.1. კონსტრუქციული პოლიმერული კომპოზიციური მასალების დეფორმირების კანონები მათი რეოლოგიური თვისებების გათვალისწინებით .....	47
2.1.1. კონსტრუქციული პლასტიკების რეოლოგიური მოდელები .....	48
2.1.1.1. სამელემენტური მოდელი .....	49
2.1.1.2. სხვა რეოლოგიური მოდელები .....	51
2.1.1.3. კონსტრუქციული პლასტიკების გაუმჯობესებული რეოლოგიური მოდელი .....	53
2.1.1.4. ხუთელემენტური რეოლოგიური მოდელები .....	55
2.1.2. მემკვიდრეობის თეორია .....	64
2.2. გაჭიმვაზე ბეტონის სტატისტიკური სიმტკიცის სტრუქტურული ანალიზი .....	66
2.2.1. ბეტონის, როგორც კომპოზიციური მასალის სტრუქტურული ელემენტების შესახებ .....	67
2.2.2. ბეტონის მდგრადობა წრფივი ცოცვადობის პირობებში .....	78
2.2.3. ღეროვანი კომბინირებული სისტემების გაანგარიშება ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციების გათვალისწინებით .....	87
2.2.4 სტრუქტურული ელემენტების დეფორმაციის მოდულების გავლენა ბეტონის სიმტკიცეზე .....	91
2.2.4.1. მატრიცისა და მარცვლის განივი დეფორმაციის კოეფიციენტების განსხვავების გავლენა .....	93
2.2.4.2. ზოგიერთი აპროქსიმირებადი გამოსახულება .....	95
2.3. რღვევის ეფექტის გათვალისწინება .....	99
2.3.1. მყარ სხეულებში გამოწვეული ძაბვების კონცენტრაცია .....	105
2.3.2. სიმტკიცე გაჭიმვაზე ღუნვისას .....	109
2.3.3. ბეტონის თეორიული სიმტკიცის შეფასება არადეფექტური სტრუქტურის შემთხვევაში .....	116
დასკვნა .....	121
გამოყენებული ლიტერატურა .....	123

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. ა. დესოვის მიერ 10×10×10 ბეტონის ნიმუშების გამოცდების შედეგები .....	25
ცხრილი 2. მინატექსტოლიტ $T_1$ -ის სრული დეფორმაციის დროში განვითარების ექსპერიმენტული მონაცემები .....	61
ცხრილი 3. მინატექსტოლიტ ЭТФ-BM-78 არმირება 45°-ით კუმშვისას .....	62
ცხრილი 4. მაქსიმალური ფარდობითი ცდომილება ( $\Delta_{max}$ ) ექსპერიმენტული მონაცემების მიმართ .....	64

## ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. “ტიპური სხეულის” რეოლოგიური მოდელის ცოცვადობა და აღდგენა .....	49
ნახ. 2. ორ- და სამეღემენტიანი მოდელები შიგა ხახუნით .....	52
ნახ. 3. უბან-უბან წრფივად დეფორმირებადი კონსტრუქციული პლასტიკების ხუთეღემენტიანი მოდელი (ა) .....	55
ნახ. 4. კონსტრუქციული პლასტიკების ხუთეღემენტიანი მოდელი (ბ) .....	58
ნახ. 5. მინატექსტოლიტ $\Xi T\Phi$ -BM-78 არმირების მთავარი მიმართულებიდან $45^\circ$ -ით კუმშვის სრული დეფორმაციის დროში განვითარების მრუდები .....	62
ნახ. 6. „შეჭიდულობის” მცნების ფორმულირება .....	72
ნახ. 7. ვაიბულას განაწილების პრაქტიკული მნიშვნელობის გამოსაკვლევი პარამეტრების მოქმედი სიდიდეები .....	75
ნახ. 8. მონოტონურად ზრდადი და კლებადი მტყუნებათა საშიშროება .....	77
ნახ. 9. მოკლევადიანი დატვირთვებისას $\sigma - \varepsilon$ დამოკიდებულება .....	79
ნახ. 10. ურთიერთქმედების $X_i$ ძალის აღძვრა .....	88
ნახ. 11. ბეტონის ფუნქციონალური სქემა .....	92
ნახ. 12. დამოკიდებულება ერთგვაროვნების კოეფიციენტსა და $\alpha$ -ს შორის .....	104
ნახ. 12, ა. დამოკიდებულება ( $K_\sigma$ ) სიმტკიცის ფარდობითი მნიშვნელობებსა და ( $K_\varepsilon$ ) დეფორმატიულობას შორის დაზიანების პროცესის დროს .....	104
ნახ. 12, ბ. დამოკიდებულება „ძაბვა-დეფორმაციას” შორის სიმტკიცის ვარიაციის სხვადასხვა კოეფიციენტების დროს ( $1-V(R)=0$ ; $2-V(R)=5$ ; $3-V(R)=8$ ; $4-V(R)=14\%$ ) .....	105
ნახ. 13. $R_{\delta, \text{დ}}/R_\delta$ შეფარდების დამოკიდებულება ბეტონის ერთგვაროვნებაზე .....	114
ნახ. 13. ა. $R_{\delta, \text{დ}}^{(1)}/R_{\delta, \text{დ}}^{(2)}$ შეფარდების დამოკიდებულება ბეტონის ერთგვაროვნებაზე .....	115
ნახ. 13. ბ. $R_h^{(1)}/R_{\ell/6}^{(2)}$ შეფარდების დამოკიდებულება ბეტონის ერთგვაროვნებაზე .....	116
ნახ. 14. ა-რეგულარული ჩაწყობა; ბ - მდგრადობის დაკარგვის სახე გაჭიმვისას; გ - მდგრადობის დაკარგვის სახე არაცენტრალური დატვირთვისას; დ- მდგრადობის დაკარგვის სახე ძვრის დროს .....	120

## მადლიერება

ავტორი დიდი მადლობელია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სრული პროფესორების, სამეცნიერო ხელმძღვანელების, საინჟინრო და ეროვნული აკადემიის ნამდვილი წევრის დემურ დანელიას და ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორის, საქართველოს მეცნიერებათა და ტექნიკის დარგის სახელმწიფო პრემიის ლაურეატის გელა ყიფიანის იმ კონსულტაციების, ყურადღებისა და პრაქტიკული დახმარებისათვის, რასაც მუდმივად გრძნობდა სადისერტაციო ნაშრომზე მუშაობის პერიოდში.

## შესავალი

ბეტონის, როგორც კომპოზიციური მასალის, ფიზიკური ბუნების შესწავლისას, საკმაოდ ეფექტურია გამოკვლევების სტატისტიკური მეთოდები. ეს აიხსნება იმით, რომ ნებისმიერი მყარი სხეული წარმოადგენს სტრუქტურული ელემენტების სტატისტიკურ ანსამბლს (მარცვალი, შეჭიდულობა).

ამ ელემენტების მექანიკური მახასიათებლები შემთხვევითი ხასიათისაა, აქედან გამომდინარე, სხეულის მექანიკური მახასიათებლები, რომელიც შედგება ზემოთ აღნიშნული ელემენტებისაგან, ასევე ემორჩილება ალბათობის კანონებს.

მასალის მექანიკური ქცევა დამოკიდებულია მის აგებულებაზე (სტრუქტურაზე), რომელიც შეიძლება სხვადასხვა დონეზე იყოს განხილული, დაწყებული ბირთვისა და ატომის აგებულებიდან, ხოლო შემდგომ მოლეკულურ, კრისტალურ, დისლოკაციურ და ა.შ. დონეზე. მასალის მექანიკურ ქცევასა და მიკრო და მაკრო წარმოდგენების რაოდენობრივი შეკრების ერთობლივი ამოცანა, შესაძლებელია გადაწყვეტილ იქნეს პლასტიკურობისა და სიმტკიცის სტატისტიკური თეორიის შექმნით, რომელიც დაეფუძნება რეალური მასალის სტრუქტურული არაერთგვაროვნებით გამოწვეული დეფორმაციებისა და რღვევის არაერთგვაროვანი განვითარების თანამედროვე ფიზიკურ შეხედულებებს [109].

თანამედროვე თეორიების შექმნისას, ძირითადად ეყრდნობიან ალბათობის იდეებს. გაანგარიშების დეტერმინანტული მეთოდები წარმოადგენენ პირველ მიახლოებებს, მათი უზუსტობები სიმტკიცის კოეფიციენტების გამოყენებით იფარება. როგორც აღნიშნულია [26]-ში პრაქტიკულად ეს ხერხი არ არის დამაჯერებელი და მოკლებულია მეცნიერულ საფუძვლებს. ნორმატიულ გაანგარიშებებში, დეტერმინანტულ (არა სტატისტიკური) მეთოდებს მიეკუთვნებათ წამყვანი როლი, ხოლო სტატისტიკური მეთოდები გამოიყენება, როგორც კვლევის დამხმარე

საშუალებები. რაც შეეხება რეალურ სხეულს დეფორმაციისა და სიმტკიცის თეორიას, აქ ალბათურ – სტატისტიკური მეთოდი უფრო ადეკვატური საშუალებაა კვლევისათვის.

ალბათური მეთოდები ეფუძნება ზოგიერთი პირობების შემთხვევით შემოსვლის აღრიცხვის სინამდვილეს ამა თუ იმ პროცესში. ა. კოლმოგოროვის მიხედვით არსებობს ასეთი შემთხვევის სამი ხერხი: პროცესის საწყისი პირობები, რომელიც მიმდინარეობს მკაცრად კანონზომიერად, ხოლო განმეორებისას შეიძლება იყოს შემთხვევითი; პროცესის ხანგრძლივობა დროში შემთხვევითია; პროცესის კანონზომიერი მიმდინარეობა გართულებულია შემთხვევითი აღელვებულობით. [86] ეყრდნობა, რა მეცნიერებას, ფართოდ იყენებს მათემატიკის ენას, თავისი სქემის აგებისას საწყის იდეალიზაციას. ხშირად თეორიული მსჯელობა იძენს ფორმალური სისტემების ხასიათს (აბსტრაქტული მათემატიკური მოდელებისას), რომელთა ინტერპრეტაცია საკმაოდ რთულდება.

ფორმალური სისტემები წარმოადგენენ ამა თუ იმ სახის მოდელებს, სხვადასხვა სახის მოდელირების უნარით და მასალის ფართოდ აღქმით.

ფორმალიზაცია წინ უნდა უსწრებდეს პროცესების შინაარსიან გამოკვლევას. ჩვენ შეგვიძლია დავაკვირდეთ თუ „ფორმალიზაციის საჭიროება როგორ უსწრებს ამა თუ იმ პროცესის შინაარსის შესწავლას“. [105] თანამედროვე გაგებით მეცნიერული თეორია უნდა იყოს ფორმალიზებული.

სიმტკიცის თეორიის მეთოდების გამოყენება ამ საკითხების შესწავლისას, მოითხოვს ინფორმაციის მოდელების გაზრდას, კერძოდ გამოყენებული მასალების შესახებ, რაც აუცილებელი პირობაა განსახილველი სისტემის საიმედოობისა და ხანგრძლივი ექსპლუატაციის პროგნოზირებისათვის. დღესდღეობით მიმდინარეობს მასალებზე ამგვარი ინფორმაციის დაგროვება.



ზოგიერთი სტატისტიკური (ექსპერიმენტალური) მონაცემების არქონა საკმაოდ საგრძნობია. მიუხედავად ამისა, არ ღირს თავის შეკავება თეორიის შექმნისაგან, სანამ არ იქნება ყველა ფაქტები შეგროვებული, რადგან ცნობილია, რომ არა მარტო თეორიისაკენ მიმავალი გზა შედგება ფაქტებისაგან, არამედ თეორიული კვლევაც წარმოადგენს ფაქტების აუცილებელ პირობას.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, თეორიული კვლევის შედეგები არ შეგვიძლია შევამოწმოთ ემპირიული მონაცემებით. ამა თუ იმ შედეგების შესამოწმებლად ასეთი მონაცემები შეიძლება ჯერჯერობით არ გვქონდეს, მაგრამ თეორიული გამოკვლევების მიზანია, არა მარტო ახსნას ემპირიული ფაქტები, არამედ გააკეთოს მომავლის პროგნოზები. ბოლო წლებში საგრძნობლად გაიზარდა ინტერესი სტატისტიკურად არაერთგვაროვანი სტრუქტურულად მყარი დეფორმადი სხეულის გარშემო. ეს კიდევ ერთხელ ხაზს უსვამს ფაქტს, რომ მხოლოდ სტრუქტურის ეფექტურად გამოყენება საშუალებას გვაძლევს სწორად მივუდგეთ მყარი სხეულის პლასტიკურ დეფორმაციის აღწერას, აგრეთვე დაზიანების დაგროვების პროცესის რღვევის დროს, მაკროსკოპური მახასიათებლების გამოთვლა მიკროსტრუქტურების ცნობილი მახასიათებლების მიხედვით შემდგომში შეიძლება გამოყენებულ იქნეს რეალური სხეულის დეფორმაციისა და რღვევის თეორიის შექმნაში [27]. ლითონმცოდნეობაში, რომელიც ახლოსაა ბეტონმცოდნეობასთან, შეინიშნება ახალი მიდგომა რაოდენობრივი ლითონმცოდნეობის-სტატისტიკური ლითონმცოდნეობა. ამ სფეროში ცდების შედეგების დამუშავება პირველ ეტაპზე თამაშობს დამხმარე როლს ლითონმცოდნეობის მთლიანი პრობლემის სტატისტიკურ გადაწყვეტაში – განისაზღვროს მიკროსტრუქტურის შემადგენლობის მოცემული თვისებები და მათი ურთიერთგანლაგება სივრცეში, გამოვთვალოთ მასალის ტექნიკური თვისებები და რიცხობრივად

განვსაზღვროთ მისი ქცევის თავისებურებები გარე ძალების მოქმედების დროს [24].

ბლოკში პოლიმერული ჯაჭვებისა და პოლიმერების მექანიკური თვისებების შესწავლისას ფართოდ გამოიყენება ალბათური მეთოდები [9]. ვითვალისწინებთ, რა სტრუქტურულ და ტექნოლოგიურ არაერთგვაროვნებას კომპოზიტისა, რომელიც დაარმირებულია ბოჭკოებით, მისი სიმტკიცის ანალიზიც აგრეთვე ეფუძნება რღვევის ალბათურ კრიტერიუმებს [163]. ალბათური მეთოდები ფართოდ გამოიყენება გრუნტების მექანიკაში [79], დისპერსულ გარემოში [40], ინტენსიურად ვითარდება მასალების დაღლილობის სტატისტიკური თეორია [162] და სხვა.

ცნობილია, რომ ბოლო წლებში მათემატიკური მეთოდები ფართოდ გამოიყენება ბეტონების ტექნოლოგიაში. ბეტონის სიმტკიცის შესწავლის საკითხში ეს ნაკლებად იგრძნობა. მიუხედავად ამისა, საიმედოობის თეორია, როგორც შემდეგ გამოჩნდება, მოგვცემს საშუალებას გადავწყვიტოთ ბეტონის სიმტკიცის საკითხები მისი სტრუქტურული არაერთგვაროვნების გათვალისწინებით. ბეტონის სიმტკიცის თეორიისადმი ასეთი მიდგომა საშუალებას მოგვცემს გავითვალისწინოთ ბევრი რეალური თვისებები ამ კომპოზიციური მასალისა [ჩერეპანოვი].

უნდა აღინიშნოს [100], სტატისტიკური მიდგომის შესაძლებლობები პრაქტიკულად შემოუსაზღვრავია, მიღებული შედეგების სიზუსტე დამოკიდებულია იმაზე, თუ მიღებული მოდელი რამდენად ასახავს რეალური სხეულის თვისებებს და ითვალისწინებს მისი რღვევის კინეტიკას.

სხვა მხრივ, საანგარიშო მოდელის გართულებას მივყავართ განუსაზღვრელ მათემატიკურ სირთულეებამდე ან გადაწყვეტამდე, რომელიც პრაქტიკულად გამოუსადეგარია.

სიმტკიცის ფიზიკის თანამედროვე შესწავლის პირობებში, პირველ რიგში განიხილება მყარი სხეულის არაერთგვაროვანი სტრუქტურის

რეალური გავლენა, რომელიც აღიძვრება დეფორმაციის პროცესში. მიკრომაბზვების და სტრუქტურული დეფექტების გათვალისწინება რღვევის ჩანასახში [111].

დეფორმირების თეორია, მასალის არაერთგვაროვნების გამო არ შეიძლება აღიწეროს მყარი დეფორმირებადი სხეულის თეორიით, რომელიც ეფუძნება კლასიკურ შეხედულებებს.

კერძოდ, ამ ეფექტებს მიეკუთვნება შემდეგი [106]:

1. სიდიდეების დამოკიდებულება, სხეულის მექანიკური მახასიათებლები გაშუალდებულ სივრცეში, სტრუქტურული არაერთგვაროვნების მახასიათებელი პარამეტრები. სტრუქტურის არაერთგვაროვნების გავლენა მყარ სხეულზე მკვეთრად გამოხატული დიკრისტალიკური მასალით, განსაკუთრებით ორფაზიანი და სამფაზიანი სტრუქტურის მქონე, სხვადასხვა დისპერსიულ გარემოში და ა.შ. განსაკუთრებული დამოკიდებულება აღინიშნება სტრუქტურულ მგრძობიარობაზე თვისებებისადმი (პლასტიურობა, დაღლილობა, მყიფე რღვევა).
2. მექანიკური მახასიათებლების გაზრდა (დისპერსია), რომელიც ისაზღვრება იდენტურ ნიმუშებზე მაკროსკოპიური ექსპერიმენტის დროს. ექსპერიმენტული მონაცემების ყველაზე დიდი გაზრდა შეინიშნება უხემდისპერსიულ ძლიერ გამოსაცდელ არაერთგვაროვან არეებში.
3. მასშტაბური ეფექტი განპირობებული მასალის სტრუქტურული არაერთგვაროვნებით, განსაკუთრებით დისპერსიით და გაშუალდების მასშტაბით.
4. დეფორმაციის (მაბვის) გრადიენტების გავლენა და მაბვის კონცენტრაციისა დაღლილობაზე, მყიფე რღვევა და პლასტიკური დეფორმაციის დასაწყისი. აგრეთვე სხვა ეფექტები.

რადგანაც, ბეტონები წარმოადგენენ სტოხასტიკურ ანსამბლს კომპოზიტის სტრუქტურული ელემენტების შემთხვევითი მექანიკური თვისებებით, ამიტომ მათი მექანიკური თვისებები შეიძლება

პროგნოზირებულ იქნეს ალბათური მეთოდებით, შესაბამის სტრუქტურულ მოდელზე დაყრდნობით.

აღნიშვნის ღირსია ის, რომ მთელ რიგ საკითხებში მოცემულია თეორიული (ანალიტიკური) გამოსახულებები ამა თუ იმ ემპირიული დამოკიდებულებების მაგივრად. ბეტონთმცოდნეობაში ცნობილია ემპირიული ფორმულების მნიშვნელობა ზოგიერთი კონკრეტული ამოცანის ამოსახსნელად, მაგრამ აღნიშვნის ღირსია, რომ ისინი რა თქმა უნდა არ გამოირჩევიან უნივერსალობით, როგორც ყველა სხვა ემპირიული ფორმულები. აღწერილი მოვლენის ფიზიკური არსი ხშირად გაურკვეველია. დიდი მნიშვნელობა აქვს დაკვირვების შედეგების სტატისტიკურ დამუშავებას, სხვადასხვა ტიპის კორელაციური კავშირების გამოძებნას. მაგრამ შეუდარებლად რთულ და მნიშვნელოვან ნაწილს წარმოადგენს მათემატიკური მოდელის შედგენა, რომელიც საშუალებას იძლევა ავხსნათ დაკვირვებადი მოვლენები. ეს კი ნამდვილად აქტუალურს ხდის პრობლემის გადაწყვეტას.

**კვლევის მიზანია** ბეტონის ელემენტების სტრუქტურული მექანიკის შესწავლა, რომელიც ეფუძნება ბეტონის სიმტკიცის სტატისტიკურ კანონზომიერებებს, როდესაც იგი განიხილება როგორც მარცვლოვანი მყიფე კომპოზიციური მასალა.

**ნაშრომის მეცნიერული სიახლე** მდგომარეობს ბეტონის (როგორც მარცვლოვანი კომპოზიციური მასალის) მათემატიკური მოდელის შედგენაში, რათა პროგნოზირებადი იყოს სიმტკიცის და ერთგვაროვნების ფარდობითი მნიშვნელობები გაჭიმვისას, ღუნვისას და კუმშვისას მისი სტრუქტურული ელემენტების (მარცვალი, მატრიცა, შეჭიდულობა) სტატისტიკური მახასიათებლის მიხედვით.

**კვლევის პრაქტიკული ღირებულება** მდგომარეობს იმაში, რომ ამოცანის გადასაწყვეტად სტატისტიკური პრინციპებისა და მეთოდოლოგიის ემპირიული თანაფარდობების მაგივრად დამუშავებულია ანალიზური მიდგომა. მოცემული გარემოება გვაძლევს

საშუალებას გადავწყვიტოთ სხვადასხვა სახის ბეტონის სიმტკიცის საკითხი ერთნაირი მიდგომით. შესაძლებელი ხდება მათემატიკურ მოდელზე დაყრდნობით დამუშავდეს სტატისტიკური პრინციპები, როგორც პირდაპირი ამოცანის – ბეტონის სიმტკიცის ფარდობითი მახასიათებლების პროგნოზირებისათვის მისი სტრუქტურული ელემენტების სტატისტიკური მონაცემების მიხედვით. ასევე შებრუნებული ამოცანის – სტრუქტურული ელემენტების შერჩევა და სტატისტიკური შეფასება ბეტონების მისაღებად, რომელთა ფარდობითი სიმტკიცე მოცემულია (გაჭიმვაზე, კუმშვაზე, ღუნვაზე).

**ძირითადი შედეგების საიმედოობა** განპირობებულია თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების დასაბუთებული მეთოდების გამოყენებით; აგრეთვე სხვადასხვა ავტორების მიერ მიღებული თეორიული და ექსპერიმენტული გამოკვლევების შედეგებთან თანდამთხვევით.

# 1. ლიტერატურის მიმოხილვა

## 1.1. პრობლემის მდგომარეობა

ამ თავში განხილული იქნება ბეტონის სიმტკიცის თეორიისადმი მიძღვნილი ნაშრომები, რომლებიც ეფუძნებიან სტრუქტურულ მოდელებს და ამყარებენ ანალიზურ დამოკიდებულებებს გამოსაკვლევ პარამეტრებს შორის, ამიტომ ასეთი სპეციფიკური ამოცანები, როგორცაა კავშირი ბეტონის სიმტკიცესა და მის წყალცემენტის ფარდობას შორის, სიმტკიცის სხვადასხვა ხარისხობრივი შეფასებები, რეოლოგიური მოდელები და სხვა არ იქნება განხილული.

### 1.1.1. ბეტონის სიმტკიცის თეორიის განვითარება

ბეტონის სიმტკიცის თეორიები მუშავდებოდა და მუშავდება ძირითადად თანამედროვე მეცნიერების – ფიზიკის, ქიმიის, მექანიკის, ფიზიკურ-ქიმიური მექანიკის და სხვა დარგებთან ერთად. თუმცა ეს კავშირი ყოველთვის არ იყო მჭიდრო. ეს თვალშისაცემია განსაკუთრებით ბეტონთმცოდნეობაში, რაც ნათლად გამოიხატება კვლევების ემპირიულ ხასიათში.

ახლა კი გადავიდეთ საკითხის არსის განხილვაზე. თავის დროზე ბ. სკრამტაევი მიიჩნევდა, რომ ბეტონის შესასწავლად გამოყენებულ ყოფილიყო სიმტკიცის I, II და III თეორიები და მივიდა იმ დასკვნამდე, რომ ბეტონის სიმტკიცის თეორიის შესაქმნელად საჭიროა გავითვალისწინოთ ერთდროულად რამდენიმე მდგომარეობა [168]. ბეტონის რღვევის ჰიპოთეზისა და ჭრის წინააღმდეგ გამოვიდა ნ.კ. სვეჩინი, რომელიც მიიჩნევდა რომ რღვევას შეიძლება ადგილი ჰქონოდა მხოლოდ დიდი გვერდითი დაწნევის შემთხვევაში [157].

ბეტონის სიმტკიცის განზოგადოებულმა თეორიამ გამოიწვია რიგი დისკუსიებისა. (მაგალითად: ი. შტაერმანი [203]).

შემოგვაქვს რა ჰიპოთეზა, რომ ნიმუშების ფაქტიური რღვევისას შესრულებული მუშაობა, მიკრობზარების განვითარების დროს ექვივალენტურია მუშაობის, რომელიც აუცილებელია შესრულდეს მოწყვეტის წინააღმდეგობის დასაძლევად, ნიმუშის განივი კვეთის მიმართულებით. ო. ბერგი [20] გვთავაზობს სიმტკიცის შემდეგ განტოლებას (მარტივი დატვირთვის დროს საშუალო ძაბვა  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ )

$$\frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}}{R_{\text{პრ}}} = 1 + kn_3, \quad (1)$$

სადაც  $R_{\text{პრ}}$ –ბეტონის პრიზმული სიმტკიცეა;  $n_3 = \frac{\sigma_3}{R_{\delta}}$  რღვევაზე წინამდებარე დატვირთვების გავლენის გაუთვალისწინებლობის კოეფიციენტი (  $R_{\delta}$ –სიმტკიცეა გაჭიმვის დროს).

მიღებული განტოლებები იძლევა დამაკმაყოფილებელ მსგავსებას ექსპერიმენტულ შედეგებთან.

ნაშრომ [201]-ში ბეტონის სიმტკიცის განტოლებები წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$\tau_{\text{ოქტ}}^{\alpha} + a\sigma_{\text{ოქტ}}^{\beta} \leq b \quad (2)$$

სადაც  $\tau_{\text{ოქტ}}$ ,  $\sigma_{\text{ოქტ}}$  – შესაბამისად მხები და ნორმალური ოქტაედრული ძაბვებია;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $a$ ,  $b$  –მასალის მუდმივები, რომლებიც განისაზღვრებიან ცდების საფუძველზე სხვადასხვა დამაბული მდგომარეობის დროს.

გ. გენიევი და ვ. კისსიუკი ბეტონის სიმტკიცის პირობას წარმოადგენენ შემდეგი ფორმით [46]:

$$3I_2 = [R_{\text{კუბ}} R_{\delta} + (R_{\text{კუბ}} - R_{\delta}) I_1] = \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{3T_{\text{ფ3}}}{R_{\text{კუბ}} R_{\delta}} \right) \left[ 1 - \frac{I_3}{2} \left( \frac{I_2}{3} \right)^{-\frac{3}{2}} \right] \right\} \quad (3)$$

სადაც  $R_{\text{კუბ}}$  – სიმტკიცის ზღვარია ერთღერძა კუმშვის დროს.  $R_{\delta}$ –კი გაჭიმვისას,  $T_{\text{ფ3}}$  – სიმტკიცის ზ ღვარი სუფთა ძვრის დროს,  $I_1$  – ძაბვის ტენზორის პირველი ინვარიანტი,  $I_2$  – ძაბვის დევიატორის მეორე ინვარიანტი,  $I_3$  – ძაბვის დევიატორის მესამე ინვარიანტი.

ნაშრომ [107]-ში ბეტონის სიმტკიცის პირობები ჩაიწერება, როგორც ძაბვის სამი ინვარიანტისა და მასალის მექანიკური პარამეტრების ფუნქცია

$$\phi(I_1, I_2, I_3, \varphi) = 0; \quad \varphi = \frac{2(3x - n)}{3x + n}. \quad (4)$$

$\varphi$  პარამეტრი, ითვალისწინებს სიმტკიცეზე მასალის მექანიკური და სტრუქტურულ-ტექნოლოგიური ფაქტორების გავლენას რთული დამაბული მდგომარეობის დროს.  $x$  არის სიმყიფის პარამეტრი, რომელიც რიცხობრივად ღერძული გაჭიმვის და კუმშვის დროს ბეტონის სიმტკიცის ზღვრის ტოლია.  $n$ -სტრუქტურულ-ტექნოლოგიური პარამეტრია, რომელიც მძიმე (მკვრივი) ბეტონისათვის 2-ის ტოლია.

ნ. დავიდენკოვ – ი. ფრიდმანის სიმტკიცის თეორია I და II სიმტკიცის თეორიის სინთეზის გზით ახდენს მასალის სიმტკიცის ამოცანის გადაწყვეტას.

ი. გოლდენბლატის და ვ. კოპნოვის მიერ დამუშავებულ იქნა კონსტრუქციული მასალების სიმტკიცისა და პლასტიკურობის თეორიული კრიტერიუმები, რომლებიც გამომდინარეობს უშუალოდ რღვევის პროცესიდან [52]. ცნობლია ა. მალმესტერის სიმტკიცის კრიტერიუმები [110].

გადავდივართ რა ზემოთმოყვანილი სიმტკიცის თეორიების განხილვაზე, უნდა აღინიშნოს, რომ ისინი ვერ ხსნიან დამოკიდებულებას მასალის ფიზიკურ-მექანიკურ მაჩვენებლებსა და სტრუქტურულ თავისებურებებს შორის. მათი მიზანია სპეციფიური ამოცანების გადაწყვეტა. ქვევით მოგვყავს რიგი თეორიებისა, სადაც გათვალისწინებული იქნება ბეტონის სტრუქტურული პარამეტრები.

თავის დროზე ბ. სკრამტაევი [168] გვთავაზობდა გაგვესაზღვრა მრღვევი მკუმშავი დატვირთვა ბეტონისათვის ხსნარისა და შრეების სიმტკიციდან ძვრაზე მათი ფართობების ფარდობიდან გამომდინარე.

ი. კორნილოვიჩი რეკომენდაციას იძლეოდა გაგვესაზღვრა ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე რღვევის ხასიათიდან გამომდინარე, შემდეგი სამი პირობის გათვალისწინებით [91]. ცემენტის ქვისა და



შემდგომების ბეტონის რღვევის შემთხვევაში (მსუბუქი ბეტონი)  $R=f_1R_{\text{ცმ}}+f_2R_3$  ცემენტის ქვისა და შეჭიდების შემთხვევაში  $R=f_1R_{\text{ცმ}}+f_3R_{\text{ცმ}}$ . ცემენტის ქვის რღვევის შემთხვევაში  $R=R_{\text{ცმ}}/\varphi$ , სადაც  $R_{\text{ცმ}}$ ,  $R_3$  ცემენტის ქვისა და შემავსებლის სიმტკიცეა;  $f$  – ნორმალზე დაპროექტებული შესაბამისი ფართობები,  $\varphi$  – რღვევის ზედაპირის ლუნვადი ხასიათის კოეფიციენტი.

აღსანიშნავია, რომ რ. ფერე დულაბისა და ბეტონის სიმტკიცის განსაზღვრისას ითვალისწინებდა მათ სტრუქტურულ თვისებებს [178].

ა.ი. შეიკინის სტრუქტურული თეორიის თანახმად ცემენტის ქვის სიმტკიცის ზღვარი განისაზღვრებოდა ფორმულით [198]

$$R = F_{\text{შრ}} E_{\text{შრ}} \left( \varepsilon_0 + \frac{\sigma_x}{E_{\text{შრ}}} \right) \quad (5)$$

სადაც  $\varepsilon_0$  – კრისტალური შერწყმის ზღვრული დეფორმაციაა,  $\sigma_x$  – შენაზარდში საკუთრი მკუმშავი ძაბვებია,  $F_{\text{შრ}}, E_{\text{შრ}}$  შესაბამისად მისი ფართობი და დრეკადობის მოდული.

ზ. წილოსანის მიხედვით [185] საკმაოდ დიდი დატვირთვის დროს კრისტალური შენაზარდის ცალკეულ რგოლებში წინააღმდეგობა ირღვევა. ხდება ბზარების გაჩენა, რომელთა რაოდენობა და ზომები დროთა განმავლობაში იზრდება.

ი.ა. რაბიევის მიხედვით ხელოვნური კონგლომერატის სიმტკიცისა და შემკრავი მასალის კავშირის ხასიათი გამოისახება შემდეგნაირად [153]:

$$R = \frac{k R^*}{x^n} \quad (6)$$

სადაც  $R$  – მასალის სიმტკიცეა გარკვეულ ტემპერატურაზე,  $R^*$  – შემკრავის ოპტიმალური შემადგენლობის სიმტკიცეა,  $x$  – კომპონენტის გასაშუალოებული სიგანე.  $n$  – კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია ხსნარის მარცვლოვანი კომპონენტების ბუნებაზე და ხასიათზე.

ი. ახვერდოვის [14] ნაშრომში ბეტონის სიმტკიცე ფოროვან შემავსებელზე განისაზღვრება ფორმულით:

$$R_b = R_{G.ჰ.} \left( 1 - \frac{a_3}{k} \frac{R_{G.ჰ.} - R_3}{R_{G.ჰ.}} \cdot \frac{E_{G.ჰ.} - E_a}{E_{G.ჰ.}} \right) \quad (7)$$

სოლო ბეტონებისთვის მკვრივი შემავსებლით,

$$R_b = R_{G.ჰ.} \left( 1 - \frac{a_3}{k} \frac{R_{G.ჰ.}}{R_{G.ჰ.} + R_3} \cdot \frac{E_{G.ჰ.}}{E_{G.ჰ.} + E_a} \right) \quad (8)$$

სადაც  $R_{G.ჰ.}$  – ცემენტის ქვის სიმტკიცეა,  $R_3$  – შემავსებლის სიმტკიცეა,  $E_{ჰ.}$ ,  $E_a$  – ცემენტის ქვისა და შემავსებლის დრეკადობის მოდულია,  $k$  – კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს სტრუქტურულ არაერთგვაროვნებას საკონტაქტო ზონებში.  $a_3$  – შემავსებლის მოცულობითი კონცენტრაციაა.

ნაშრომ [49]-ში მსხვილფორიანი ბეტონის სიმტკიცე განისაზღვრება ფორმულით:

$$R_b = c_1 R_{ა.გ.} \cdot \frac{F_a}{F} \quad (9)$$

სადაც  $c_1$  – პროპორციულობის კოეფიციენტია და ტოლია 1.5 (განსაზღვრულია ექსპერიმენტით)  $R_{ა.გ.}$  – შემავსებლის სიმტკიცეა გაჭიმვაზე,  $F_a$ ,  $F$  – შესაბამისად შემავსებლისა და ბეტონის ფართობებია.

ჩვეულებრივი ბეტონის სიმტკიცე განისაზღვრება ფორმულით

$$R_b = \frac{c R_{ა.ბ.ბ.}}{E_a/E_{ბ.ბ.} - 1} \left( \frac{F_{ბ.ბ.}}{F} - \frac{F_a E_a}{F E_{ბ.ბ.}} \right), \quad (10)$$

სადაც

$$c = 3.7 \left( 1 + 0.67 \frac{R_{ბ.ბ.ბ.}}{R_{ა.გ.}} \right) \quad (11)$$

სადაც  $E_a$ ,  $E_{ბ.ბ.}$  – შემავსებლისა და ხსნარის დრეკადობის მოდულია,  $R_{ბ.ბ.ბ.}$  – ხსნარის სიმტკიცეა გაჭიმვაზე,  $F_{ბ.ბ.}$  – ხსნარის ფართია.

იმ შემთხვევაში, როდესაც ბეტონი ირღვევა ხსნარის შემადგენლობით (შემავსებელი მარცვლების გარეშე) ბეტონის სიმტკიცე განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$R_b = R_{ბ.ბ.ბ.} \left( \frac{F_{ბ.ბ.}}{F} - \frac{F_a E_a}{F E_{ბ.ბ.}} \right). \quad (12)$$

ი. შტაერმანის [204] ნაშრომში განხილულია მრავალფრაქციული შემავსებლების გათვალისწინების საკითხი.

ნაშრომ [216]-ში შემოთავაზებულია განისაზღვროს ბეტონის სიმტკიცე გაჭიმვაზე, როგორც ორი სიდიდის ჯამი: ხსნარის სიმტკიცე გაჭიმვაზე და შემავსებლის შეჭიდულობის სიმტკიცე ხსნართან. ამასთან ერთად თითოეული სიდიდე მრავლდება თავის შესაბამის ფართზე.

კუმშვისას ბეტონის სიმტკიცის მიკროსტრუქტურულ თეორიაში, რომელიც დამუშავებულია ა.ე. დესოვის მიერ [65, 66], აღინიშნება, რომ ბეტონის ელემენტში ერთდერძა კუმშვისას, წარმოიქმნება გრძივი მიმართულების ბზარები გამოწვეული ელემენტარული ფილების შიდა არამდგრადობით. ამ არამდგრადობას მიყვავართ ორთოტროპული მასალების განივ გაჭიმვამდე. შემდეგ მითითებულია, რომ ბეტონის რღვევა კუმშვისას შეიძლება მოხდეს შემავსებლის გახლეჩით, ცემენტის ქვასა და შემავსებელს შორის შეჭიდულობის და ცემენტის ქვის ან დუღაბის გაჭიმვით, რომელიც მოთავსებულია შემავსებელს შორის.

ა. დესოვი განიხილავს შემავსებლების კუბისებურ ჩალაგებას. ბეტონის ყველა შემადგენლობა არის ერთგვაროვანი. ბეტონის სიმტკიცე კუმშვისას განისაზღვრება ფორმულით:

$$R_{კუმშ} = A R_{გამხ}^{შემ} + * R_{*}^{ბაშ} + B R_{გ} + R_{ბღ}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{(D+d)^3} (a+b)k; \quad B = \frac{(a+b)}{(D+d)^3} d^2 \quad (13)$$

$$* = \frac{\pi}{2} \frac{D^2}{(D+d)^3} (a+b)(1-k); \quad R_{ბღ} = \frac{c_1 f(B/*, D, n)}{t^2 (e^{c_2/t} - 1)}$$

აქ  $D$  – შემავსებლის დიამეტრია,  $d$  – შემავსებლებს შორის მანძილი;  $a, b$  – ბეტონის ელემენტის განივკვეთის ზომებია,  $k$  – რღვევის სქემაში მონაწილეობის წილი.  $R_{ბღ}$  – სტრუქტურული ძაბვები;  $t$  – დრო;  $c_1 c_2$  – კოეფიციენტები.

### 1.1.2. სტრუქტურული მოდელირების თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები

ცხრ. 1-ში მოყვანილია ა. დესოვის მიერ 10×10×10 ბეტონის ნიმუშების გამოცდების შედეგები. განხილულია ოთხი მთის მასივი. მათი ექსპერიმენტული და თეორიული შედეგების შედარების ცხრილი აღებულია [65]-დან. შემდგომში ის ჩვენს მიერ იქნება გამოყენებული.

ცხრილი 1

ა. დესოვის მიერ 10×10×10 ბეტონის ნიმუშების გამოცდების შედეგები

მთის მასივი	გახლეჩის წინააღმდეგობა კგძ/სმ <sup>2</sup>	ცემენტის ქვასთან შეჭიდულობა კგძ/სმ <sup>2</sup>	ხსნარის გაჭიმვა კგძ/სმ <sup>2</sup>	კგძ/სმ <sup>2</sup> სიმტკიცის ზღ. კუმშ. ს.	
				ექსპერიმენტულად	თეორიულად
ქვიშნარი	37.3	15.0 (1.50)	26.2	221 (22.1)	220.8 (22.08)
ლიპორიტი	(3.73)	20.0 (2.00)	(2.62)	268 (26.8)	267.4 (26.74)
გრანიტი I	99.0	15.0 (1.50)	26.2	222 (22.2)	207.8 (20.78)
გრანიტი II	(9.90)	11.0 (1.10)	(2.62)	214 (21.4)	170.8 (17.08)
	70.0		26.2		
	(7.00)		(2.62)		
	19.0		26.2		
	(1.90)		(2.62)		

ექსპერიმენტული და თეორიული შედეგების დამთხვევა კარგია, გარდა ბეტონისა, რომლის შემავსებელია გრანიტი II, რომელსაც შედარებით დაბალი გახლეჩის წინააღმდეგობა აქვს.

აღნიშნული ბეტონის სიმტკიცის მიკროსტრუქტურულ თეორიაში, ერთდერბა გაჭიმვის შემთხვევაში, გამოთქმულია სიმტკიცის ფენომენალური ჰიპოთეზა. ვინაიდან ავტორის ცდებმა ბზარმდეგობაზე აჩვენა, რომ როცა სიმტკიცე გაჭიმვის დროს 5კგძ/სმ<sup>2</sup>-ზე მეტია, ნიმუშის რღვევა პრაქტიკულად ერთი და იგივე ფარდობითი დეფორმაციით ხდება.

ანალოგიური შეფასებები გვხვდება მთელ რიგ სამუშაოებში, მაგალითად [227] –ში სიმტკიცე კუმშვისას შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ფორმულით:

$$\beta_{\delta} = c_1 v_{\delta} \frac{E_{\delta\delta}}{E_{\delta\delta} v_{\delta}} \beta_{\delta\delta} + c_2 v_k E_{\delta} \varepsilon_{\delta} \frac{E_{\delta\delta}}{E_{\delta\delta} + E_{\delta}} + c_3 v_{\delta} E_{\delta} \varepsilon_{\delta} \frac{\tau_{\delta\delta}}{E_{\delta\delta}} \quad (14)$$

სადაც  $\beta_{\gamma}$  – ბეტონის სიმტკიცეა კუმშვისას,  $V_{\alpha}, V_{\beta}$  – შესაბამისად მატრიცისა და შემავსებლის ფარდობითი წილია,  $\nu_m$  – მატრიცის (ხსნარის) განივი გაფართოების კოეფიციენტი,  $E_{\alpha}$  – მატრიცის დეფორმაციის მოდულია კუმშვისას პროგრესირებადი ბზარის მწვერვალებთან.  $E_{\beta}$  – იგივე გაჭიმვისას;  $\beta_{\gamma\alpha}$  – მატრიცის გაჭიმვის სიმტკიცე,  $E_{\beta}$  – დეფორმაციის მოდული კუმშვისას,  $\epsilon_{\beta}$  – ბეტონის ფარდობითი დეფორმაცია რღვევისას,  $\tau_{\beta}$  – შემავსებლისა და მატრიცის შეჭიდულობის სიმტკიცე.  $c_1 c_2 c_3$  – მუდმივებია.

ბეტონის სიმტკიცის თეორიის განხილვა მოცემულია ა. დესოვის მიერ [64]-ში. ავტორი ბეტონის სიმტკიცის ყველა თეორიას ყოფს (ანაწილებს) 4 ჯგუფად: ფენომენოლოგიური, სტატისტიკური, სტრუქტურული და მოლეკულური. ავტორი აღნიშნავს სტრუქტურული მიდგომის დიდ ნაყოფიერებას ჩვენ გვეჩვენება პერსპექტიულად ბეტონის სიმტკიცის თეორიაში სტრუქტურული და სტატისტიკური მიდგომის სინთეზი, რაც წარმოადგენს ნაშრომის მიზანს.

უნდა აღინიშნოს, რომ არ არის გამორკვეული ნივთიერების მიკროსტრუქტურა, შეუძლებელია საერთო თეორია ნივთიერების მიკროთვისებების შესახებ [193]. ატომური კავშირები ბეტონში განიხილება მთელი რიგ ნამუშევრებში. მაგ: [96,211], მაგრამ არსებობს აზრი [109], მასალა დეფორმაციისა და რღვევის პერიოდში ბირთვულ დონეზე, როგორც წესი არ თამაშობენ არსებით როლს და ამიტომ ამ მოვლენათა შესახებ თეორიების არსებობას არ აქვს არსებითი მნიშვნელობა.

თეორიული დებულებები ითვალისწინებენ, რომ ბეტონის წინააღმდეგობა გაგლეჯაზე თამაშობს ძირითად როლს ერთდერძა კუმშვის და გაჭიმვის დროს. რიგი მასალებისათვის ნიმუშის გაჭიმვისას რღვევა მოჩვენებითი ძერის საშუალებით შეიძლება მოხდეს, რომლებსაც შედარებით მცირე ყელი აქვთ რღვევამდე. ამ შემთხვევაში მხები ძაბვების გარდა რღვევის სიბრტყეში წარმოიშვება ნორმალური ძაბვები, რომლებიც მოქმედებენ ბზარის სიბრტყის პერპენდიკულარულად [109].

როგორც ცნობილია, მინიკრისტალების პლასტიკური დეფორმაცია განპირობებულია შედარებით მცირე ცოცვადობის ფართობით, რომლებიც ემთხვევიან ატომების შედარებით მჭიდრო ჩალაგებას.

პლასტიკური პირობების გათვალისწინებით სიმტკიცისა და დეფორმაციის საკითხებში მოცემულია [81]-ში. ნაშრომ [158]-ში აღნიშნულია, რომ სიმტკიცის თეორიის მასალის სხვადასხვა სახისთვის განხილვას მივყავართ სიმტკიცის ყველა თეორიის უარყოფასთან. ავტორები გვთავაზობენ მასალების დაყოფას კლასების მიხედვით. და შემდეგ ამ კლასებისათვის სიმტკიცის თეორიების დამუშავებას; მყიფე მასალებისთვის სიმყიფის კოეფიციენტი  $\sigma_{გაჭ}/\sigma_{კუმ}$ , ხოლო პლასტიკური მასალებისათვის-სიმტკიცის  $m$  მაჩვენებელით (განტოლებიდან  $\sigma = Ae^m$ ). აღსანიშნავია, რომ კლასებად დაყოფა შეიძლება არა მხოლოდ ამ ნიშნების მიხედვით; კლასებად დაყოფა შეიძლება მოხდეს მასალის სტრუქტურული ხასიათის მიხედვითაც. ამ შემთხვევაში მარცვლოვანი კომპოზიციური მასალები შეადგენენ ცალკე კლასს.

ბეტონის თეორიის შესასწავლად ავტორებს ხშირად უწევთ სხვადასხვა სახის მათემატიკური მოდელების გამოყენება.

## 1.2. ბეტონის რღვევის მათემატიკური მოდელირება

მექანიკური ქცევის სირთულიდან გამომდინარე, მიუხედავად აუცილებელი ემპირიული მონაცემებისა საკმაოდ რთულია ერთიანი მოდელის შექმნა, რომელიც გაითვალისწინებდა მომენტალურ დრეკად დეფორმაციას, ჰისტერეზისს, ცოცვადობას და სხვა. [144]-ში განხილული მსგავსი მოდელი უზარმაზარი იქნებოდა რათა გადაეწყვიტა ძაბვებისა და დეფორმაციების პრაქტიკული ამოცანები. ამიტომ უფრო ეფექტურია ვიხელმძღვანელოთ შედარებით მარტივი მოდელებით, რომლებიც განიხილავენ მხოლოდ იმ მექანიკურ თვისებებს, რომლებიც არსებითია ამოცანის განხილვისას. ეს კი აუცილებელია, რადგან რაც უფრო ფართო

მასშტაბით დაისმება ამოცანა, მით უფრო რთულია მათემატიკური მოდელის აგება და თეორიული შედეგების მიახლოება ექსპერიმენტულთან [98]. რამოდენიმე ცნობილი მოდელი, მაგალითად ჰუკის დრეკადი სხეული და ნიუტონის ბლანტი სითხე, წარმოადგენენ მათემატიკურ აბსტრაქციას, მოკლებულნი არიან ფიზიკურ რეალობას, მაგრამ ამავე დროს ეს მოდელები სასარგებლო არიან რეალური ფიზიკური თვისებების შესასწავლად.

სასურველია თავი ავარიდოთ მოდელების ექსტრაპოლაციას იმ მოვლენებზე, რომლებზეც ის გათვლილი არ არის. აღსანიშნავია ის ფაქტი, რომ თუკი მიღებულია მათემატიკური მოდელის მკაცრი გადაწყვეტა, ფიზიკური ამოცანის გადაწყვეტა მაინც იქნება მიახლოებითი, რადგან მოდელის შექმნის დროს გათვალისწინებული იყო არა ყველა ფაქტორები, არამედ ძირითადი ფაქტორები.

გ. გორჩაკოვის, ვ. მოსკვინის და ს. შესტოპეროვის მიხედვით ბეტონის აგებულება შეიძლება განვსაზღვროთ ისეთი ტერმინით, როგორცაა მაკროსტრუქტურა (ან ტექსტურა), რომელიც ახასიათებს ბეტონს როგორც ხელოვნურ კონგლომერატს. ცემენტის ქვის ბეტონში მოცულობითი კონცენტრაციის რიცხვითი შეფასება და ისეთი მიდგომა როგორც მიკროსტრუქტურაა გულისხმობს რიცხობრივ და ხარისხობრივ ახალწარმონაქმნს, ფოროგნების სიდიდეს და ფორების ხასიათს ცემენტის ქვაში და შემესვებში, აგრეთვე მათ შორის არსებული საკონტაქტო ზონას [58].

ნაშრომ [59]-ში ი. გრუმკო თანამშრომლებთან ერთად ბეტონში არჩევს სამი სახის სტრუქტურას – მიკროსტრუქტურას (ცემენტის ქვა), მეზოსტრუქტურას (ხსნარი), მაკროსტრუქტურას (ბეტონი); ნაშრომ [93,141] კ. კრასილნიკოვმა და მისმა თანამშრომლებმა ბეტონს უწოდეს „კონგლომერატი კონგლომერატში.“ სტრუქტურების ჩამოყალიბების საკითხს ეთმობა მეტი ყურადღება ო. მჭედლოვ-პეტროსიანის ნაშრომებში [122,123]. სტრუქტურების ისეთი ჩამოყალიბება კანონზომიერებებში,

როგორცაა კომპონენტების ჩალაგების სტერეომეტრული ფაქტორები, საერთოა, როგორც მძიმე, ისე მსუბუქი ბეტონებისათვის.

უნდა განვასხვავოთ ორი ძირითადი ტიპის სტრუქტურული არაერთგვაროვნება. სტერეომეტრული დაკავშირებულია ბეტონში შემავლობის არათანაბარ განაწილებასთან და არაერთგვაროვნება დაკავშირებული სტრუქტურული ელემენტების სხვადასხვა ფიზიკურ-მექანიკურ მაჩვენებლებთან. არაერთგვაროვნების ნიშნად შეიძლება განხილულ იყოს სტრუქტურის სხვადასხვა დეფექტები [26], პირველადი მარცვლების საწყისი და დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა [159] და სხვა.

ბეტონის სტრუქტურის სხვადასხვა დეფექტები აღწერილია სხვადასხვა ნაშრომებში [41, 43, 47, 57, 199].

არაერთგვაროვანი გარემოს ტიპის ბეტონი შეიძლება ხასიათდებოდეს წრფივი არაერთგვაროვანი სიდიდით [44]. ბეტონის შედარებით ერთგვაროვანი კონგლომერანტული სტრუქტურა შეიძლება შეფასებული იყოს ცემენტის ქვისა და შემვსების შეერთების ხასიათით [76].

არის აგრეთვე წინადადება [28] ბეტონის ერთგვაროვნების შეფასების კრიტერიუმად გამოყენებული იყოს ცემენტის ქვის და შემვსების დეფორმაციისა და სიმტკიცის თანაფარდობა:

$$\frac{E_{შვმ}}{\omega E_{ცქ}} > \frac{R_{შვმ}}{\varphi R_{ცქ}} \quad (15)$$

სადაც  $\omega$  – კოეფიციენტი, რომელიც, ითვალისწინებს ცემენტის ქვის შესაბამისი მახასიათებლის ცვლილებას შემვსების მარცვლოვანი სტრუქტურიდან გამომდინარე.

ი. ბაჟენოვის თანახმად სტრუქტურის კოეფიციენტი  $A_1$  – ტოლია ბეტონის სიმტკიცის  $R_b$  და შედარებით სუსტი სიმტკიცის ელემენტის ფარდობისა, რომელიც ახასიათებს ბეტონის ხარისხს ბეტონის რეალურ სტრუქტურიდან გამომდინარე და იცვლება შემდეგ საზღვრებში [15]



$$\frac{F_b}{F_d} = A_{\min} \leq A \leq A_{\max} = f \left( \frac{R_c}{R_c}; \frac{F_b}{F_b}; k \right) \quad (16)$$

სადაც  $F, R$  – შესაბამისად ბეტონის, ხსნარის და ცემენტის ფართი და სიმტკიცე;  $k$  – ძაბვის კონცენტრაციის გათვალისწინებების კოეფიციენტი.

ა. არაკელიანის [10] ნაშრომში ბეტონის სტრუქტურა განხილულია ხსნარისა და ქვისმაგვარი შემადგენლობის ურთიერთგანლაგების პირობიდან გამომდინარე, რაც საშუალებას გვაძლევს საფუძვლიანად მივუდგეთ მის რიცხვით შეფასებას.

მუშაობის პირობებიდან გამომდინარე არ არსებობს სტრუქტურული სხეული, რომელიც უზრუნველყოფს სიმტკიცის მაქსიმალურ და მინიმალურ მნიშვნელობებს. რიგ შემთხვევებში დიდი სიმტკიცის მასალის მისაღებად საჭიროა ერთნაირი სტრუქტურის შექმნა, სხვა შემთხვევაში ოპტიმალური სტრუქტურა სხვა სახისაა.

ჯერ კიდევ ფერე მიუთითებდა, რომ ოპტიკური სიმტკიცე გაჭიმვა და კუმშვის შემთხვევაში მიიღწეოდა სხვადასხვა მარცვლოვანი შემკვების გამოყენების შემთხვევაში [176].

როგორც ცნობილია, მასალები არის იზოტროპული და კვაზიიზოტროპული, თუ ყველაზე მცირე მოცულობის ელემენტი შეიცავს ყველანაირი ორიენტაციის ანიზოტროპულ ელემენტებს [149]. ბეტონში კი, რიგ შემთხვევებში, მთელი მასალის ანიზოტროპია ასე თუ ისე მკვეთრად არის გამოხატული. თუმცა კი ბევრ პრაქტიკულ ამოცანებში ბეტონი შეიძლება განხილულ იყოს როგორც კვაზიიზოტროპული. თვით ანიზოტროპია შეიძლება იყოს დაწყებითი და მეორადი (დეფორმაციული) [115].

ბ. სიმონოვის მიხედვით ბეტონში ყველა მიმართულებით ერთნაირი თვისებების შექმნა ბეტონთმცოდნეობის ძირითადი ამოცანაა [166]. ზოგიერთ სპეციალურ შემთხვევებში შემკვები მარცვლების სეგრეგაციამ და სეპარაციამ შეიძლება მოგვცეს სასურველი ეფექტი [77, 103, 164].

ე. რეინიუსის მიერ ბეტონის მოდელი შემოთავაზებული იყო მყარი ბურთულების სახით, რომლებიც ქვისმაგვარი კავშირებით იყო შეერთებული. მოდელი ითვალისწინებს, რომ ასეთი სისტემის დეფორმაციისას კავშირების მუდმივ მოწყვეტას აქვს ადგილი [225]. მოყვანილი მოდელის განზოგადოებას იძლევა ა. ბეიკერი, ბზარების გაჩენის გათვალისწინებით, რომლებიც ორიენტირებულია მკუმშავის ძალის გასწვრივ [213,214]. ორიენტირებული ბზარების გაჩენა უნდა განვიხილოთ როგორც ბოჭკოვანი სტრუქტურის ზღვრული მდგომარეობა ბოჭკოების საზღვრების ნულოვანი წინააღმდეგობით [115]

ა. პოლაკის [142] ნაშრომში განიხილება ფოროვანი სხეულის მოდელი, რომელიც წარმოადგენს სხვადასხვა დიამეტრის მკვრივი ბურთულების ერთობლიობას, მჭიდრო კონტაქტებით. ამგვარი სხეულების რადიუსების განაწილების ფუნქციის შემოტანით, ავტორი ადგენს გარემოს გეომეტრიულ პარამეტრებს, რომლებსაც იყენებს ფოროვანი სხეულების სიმტკიცის თეორიის საკითხების შესასწავლად.

როგორც ო. ბერგი [20] შენიშნავს, აღნიშნულ თეორიულ გამოკვლევებში მოცემულია საერთო ხარისხობრივი წარმოდგენები ბეტონის ტიპის მასალებზე და მათი სარგებლობა გამოიხატება რღვევის მექანიზმის წარმადობაში კუმშვის დროს. მათში საინტერესოა კვლევის გზები კ. პირადოვის, ა. პირადოვის, გ. იოსებაშვილი და ლ.კახიანის [138] ნაშრომში მოცემულია მყარი ტანის სიმტკიცის თეორიის ახალი მიმართულება. რღვევის მექანიკის საფუძვლები, ბეტონის და რკინაბეტონის ელემენტების გაანგარიშების მეთოდი ზიდვის უნარის, ბზარმდეგობისა და დეფორმაციულობის მიხედვით. განხილულია ბეტონისა და რკინაბეტონის ძირითადი მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდები.

### 1.3. კომპოზიციური მასალების სტრუქტურული მექანიკა

ი. ივანოვის ნაშრომში [76] აღწერილია მსუბუქი ბეტონის სტრუქტურული ელემენტის თეორიული მოდელი. შემვსების ჩაწყობა განხილულია როგორც კუბის მსგავსი ფორმის ნაწილების ერთობლიობა აღწერილი ბურთისებრი სფეროთი. ეს მოდელი საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ კუბის მსგავსი ფორმის ნაწილების თანაფარდობა, რომლის დროსაც ხორციელდება ყველაზე მკვრივი ჩაწყობა.

ი. ახვერდოვის თანახმად ბეტონის სტრუქტურა წარმოდგენილია შემვსები მარცვლების სისტემის სახით, რომლებითაც მოარშინებულია ცემენტის ქვის გარსები [12,13]. ი. ახვერდოვისა და მისი თანამშრომლების ნაშრომ [14]-ში მოყვანილია ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური მოდელის თეორიის განვითარება.

ცნობილია აგრეთვე, ბეტონის მოდელები: სფერული შემვსებებით, სხვადასხვა ზომის უკუმშვადი ბურთულებით [214], რომლებსაც შეუძლიათ გადაადგილება ერთმანეთის ზედაპირზე გარკვეული ხახუნის მეშვეობით [219]. ისინი ემორჩილებიან გარკვეულ სტატისტიკურ განაწილებას [172] ან გათვალისწინებულია არა გადაბმის, არამედ შემკვრელის იზოტროპული თვისება [217]. აგრეთვე ბეტონის მოდელირება ხდება ცალკეული ანიზოტროპული ელემენტებით [229] და ა.შ.

გარკვეულ შემთხვევებში სხეული წარმოდგენილია ღეროვანი სისტემის სახით, მაგალითად [69, 151] და სხვა. გადავიდეთ ახლა პრობლემის განხილვის სტატისტიკურ ასპექტებზე. ი.მ. ბეჟანოვის თანახმად, ბეტონის სიმტკიცის თეორიამ უნდა გაითვალისწინოს არა მარტო მასალის სტრუქტურა, არამედ სტატისტიკური კანონზომიერებები, რადგანაც ბეტონის რღვევა არის ინტეგრალური მოვლენა და რა თქმა უნდა, შედეგი შეიძლება შეიცვალოს სტრუქტურული დეფექტების შეხამების, გამოცდის ცდომილებების და სხვათა გამო. ამასთან ერთად, ესა თუ ის შესაძლო ალბათობა სტატისტიკის კანონია [15]. ნევილი

თვლიდა, რომ „ბეტონის სიმტკიცე არის სტატისტიკური ალბათობის პრობლემა” [126].

ი. ახვერდოვის თანახმად [13], ბეტონის შესახებ მეცნიერება, რომელიც ემიჯნება მყარი ტანის ფიზიკას, ამოცანაა აღწეროს და ახსნას ცემენტის ქვის სტრუქტურულ შემადგენელი ნაწილაკების ურთიერთქმედება, როგორც მისი გამაგრების, ისე დეფორმირების სტადიაზე გარე ძალების მოქმედების ველში.

ამგვარად, ადგილი აქვს ანალოგიას სტატისტიკურ მექანიკასთან, რომლის ამოცანაა ნივთიერების მაკროსკოპული თვისებების შესწავლა გამომდინარე მისი მიკროსკოპული სტრუქტურიდან და მათი შემადგენელი მიკროელემენტების ურთიერთობის კანონებიდან [193].

მაშასადამე, სტატისტიკური მოდელი წარმოადგენს ბეტონის სტრუქტურის აღწერის ადეკვატურ საშუალებას, როგორც მიუთითებს ვ.ვ. ბოლოტინი, სტოქასტიკური მოდელების გამოყენების საფუძველს წარმოადგენს ის, რომ ყველა რეალურ მასალას გააჩნია შემთხვევითი სტრუქტურა [30].

ცნობილია, რომ ბუნების ფუნდამენტალური კანონები ატარებენ სტატისტიკურ ხასიათს [184]. სიმტკიცის შესახებ მეცნიერების ფუნდამენტალური პრობლემაა [26] მყარი სხეულის დეფორმაციისა და რღვევის სტატისტიკური თეორიის აგება.

მყარი დეფორმაციული ტანის მექანიკაში სტატისტიკური მეთოდების განხილვაა მოცემული [26, 30, 106] ნაშრომებში კერძოდ, დიდი განვითარება ჰპოვეს გამოკვლევებმა სტრუქტურულად-არაერთგვაროვან არეში [29, 30, 79, 100, 106, 124, 133, 180, 183] კომპოზიციური მასალების სტრუქტურულ მექანიკაში [27, 35, 135, 145, 163, 195], სიმტკიცის სტატისტიკური თეორიის დამუშავებაში [2, 11, 24, 26, 160, 175, 223, 228, 231] და სხვა.

გ. ჩერეპანოვის [195] ნაშრომში თანამედროვე დონეზე ჩამოყალიბებულია კომპოზიტების რღვევის პრინციპული საკითხები,

ბზარების განვითარების და შეფერხების კანონზომიერებანი, დრეკადი სხეულების არმირება სინგულარული ელემენტებით, კომპოზიციური მასალის ოპტიმალური პროექტირება. განხილულია ბოჭკოვანი და მრავალფეროვანი მასალები, აგრეთვე კონსტრუქციების სინგულარულ-არმირებული ელემენტები.

კომპოზიტების შესახებ საერთაშორისო ოთხტომეული ცნობარიდან ნარჩევი სტატიების კრებულში წარმოდგენილია ორიგინალური და მიმოხილვითი ნაშრომები არმირებისა და რღვევის თეორიებში, ექსპერიმენტალური მექანიკის ცდების თეორიები, ელემენტების გათვლა და კონსტრუქციები. ავტორთა შორის – ცნობილი ამერიკელი სპეციალისტები არიან: კ. გერაკოვიჩი, კ. კედვარდი, მ. ხაიერი და სხვა. კრებულში სპეციალურად ჩართულია მიმოხილვა ახალი შედეგებისა, როგორც საზღვარგარეთული, ისე ყოფილი საბჭოთა ავტორებისა.

ბ. მიხაილოვის და გ. ყიფიანის [116] ნაშრომებში განხილულია ჭრილების მქონე სამფენოვანი ფირფიტების სიმტკიცის დარღვევა. ჭრილებს შეიძლება ჰქონდეს ადგილი ერთ ან რამოდენიმე, შიდა ან გარეთა ფენებს შორის ზღვარში ან შეიძლება იყოს გამჭოლი. აგრეთვე ჩამოყალიბებულია საკითხები სამფენა კომპოზიციური მასალებისაგან წახნაგოვანი ფირფიტების მდგრადობის შესახებ.

სხვადასხვა კომპოზიტების სტატისტიკური პარამეტრები, ამა თუ იმ ხარისხით ითვალისწინებენ სტრუქტურების დეფექტებს, კომპონენტების მახასიათებლების სტატისტიკურ განშლას, დაზიანებებისა და მიკრობზარების შემთხვევით დაგროვებას.

მიკროერთგვაროვანი გარემოს თეორიის ისეთი ამოცანები, როგორცაა შემთხვევითი მიკრორელიეფური და შემთხვევითი ჩართვების გავლენა ძაბვითა კონცენტრაციაზე, მიეკუთვნება ერთ კლასს. ამ ამოცანებში შემთხვევითი ელემენტი შემოდის გეომეტრიული და ფიზიკური თვისებების გავლენით [28].  $n$ -ელემენტებისგან შემდგარი რღვევას სტოქასტიკური აღწერის მეთოდში ვ. ბოლოტინს შემოყავს  $n$ -

განზომილებიანი შემთხვევითი პროცესი [30]; შემთხვევის ველის თეორიის მეთოდებზე დაყრდნობით იხსნება რიგი ამოცანებისა [28].

ვ. ლომაკინის [106] მიერ, სხვადასხვა სტატისტიკური ამოცანები მყარი დეფორმადი ტენის მექანიკისა, წყდება შემთხვევითი ველის თეორიაზე დაყრდნობით. სტრუქტურულად არაერთგვაროვანი სხეულის პროცესის შესწავლაში შემთხვევითი ველის თეორიის მეთოდების გამოყენება საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ სპეციფიური მექანიკური ეფექტების თეორიული ანალიზი. ეს გარემოება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რადგან მასალების სტრუქტურული არაერთგვაროვნება, რომელიც ახასიათებს რეალურ სხეულებს, მნიშვნელოვნად მოქმედებს მათი დეფორმაციისა და რღვევის პროცესებზე.

მყიფე რღვევის თეორიაში (ვ. ვაიზული, ი. ფრენკელი, ტ. კონტოროვი) პირველ მიახლოებაში უგულებელყოფენ პირველადი ელემენტების ურთიერთქმედებას და თვლიან, რომ სხეულის სიმტკიცე განისაზღვრება შედარებით სუსტი ელემენტის სიმტკიცით [88, 89, 90, 231].

ამ თეორიის ძირითადი არსი შემდეგია: რეალურ სხეულს სხვადასხვა ხარისხის დიდი რაოდენობის დეფექტები გააჩნია. ისინი ემორჩილებიან სტატისტიკური განაწილების წესს. რაც უფრო დიდია სხეული, მით მეტია ალბათობა დაბალი სიმტკიცის პირველადი ელემენტის შეხვედრისა და შესაბამისად სხეულის სიმტკიცის შემცირებისა. ამავდროულად სიმტკიცის მახასიათებლები ხდება სტაბილური. ტერმინ „დეფექტის“ ქვეშ, იგულისხმება არა მხოლოდ ბზარები, არამედ უწყვეტობის დარღვევის ფაქტორები. ისეთები, როგორცაა არათანაბრობები, სიმკვრივის ფლუქტუაცია და სხვა არაერთგვაროვნებები. „დეფექტის“ არსი დამოკიდებულია იმაზე, თუ რა დონეზე შეისწავლება სხეული. მყარი სხეულის ქიმიაში დეფექტების კატეგორიას მიეკუთვნება ელექტრონები. სიმტკიცის სტატისტიკური თეორიები არ ითვალისწინებენ მასალის უწყვეტობას. ვაიზულას ფორმულის თანახმად ალბათური სიმტკიცე განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\sigma = \frac{A}{V^{1/\alpha}} \quad (17)$$

სადაც  $A$  – მუდმივაა, რომელიც დამოკიდებულია მასალაზე და ნიმუშის დამაბული მდგომარეობის ხასიათზე (გაჭიმვა, ღუნვა, სხვა),  $\alpha$  – მასალის კონსტანტაა, რომელიც ითვალისწინებს დეფექტების განაწილების ხასიათს,  $V$  – ნიმუშის მუშა ნაწილის მოცულობაა.

არსებობს ვაიბულას ფორმულის რიგი განზოგადოებები. მოცემული სიმტკიცის სტატისტიკური თეორიები არაერთხელ გაკრიტიკდა {იხილეთ [26, 160]}, ჩვენ მათზე არ შევჩერდებით. განვიხილოთ მხოლოდ ვაიბულას თეორია, ვ. ბოლოტინის [26] მიერ შემოთავაზებული.

ერთგვაროვანი გაჭიმვის დროს მასალის ზღვრული  $\bar{R}$  სიმტკიცის მათემატიკური ლოდინი იქნება შემდეგი:

$$\bar{R} = \int_{s_o}^{\infty} R p_v(R) dR \quad (18)$$

ან

$$\bar{R} = s_o + s_c \left( \frac{v_o}{v} \right)^{1/\alpha} \Gamma \left( 1 + 1/\alpha \right) \quad (19)$$

სადაც  $\Gamma_{(x)}$  – ეილერის გამა ფუნქციაა.

$$\Gamma_{(x)} = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (20)$$

მისი მნიშვნელობები ტაბულირებულია მათემატიკურ ცნობარებში. აქ  $P_v$  – სიმტკიცის ზღვრული განაწილების ალბათობის სიმკვრივეა,  $s_o$  – სიმტკიცის მინიმალური მნიშვნელობა,  $s_c$  – კონსტანტაა,  $v_o$  – „ეტალონური მოცულობა” (მაგ: სტანდარტული ნიმუშის მოცულობა).

არაერთგვაროვანი დამაბული მდგომარეობისათვის

$$\bar{R} = s_o + \int_0^{\infty} \exp \left[ - \frac{g(R)}{v_o} \right] dR, \quad (21)$$

სადაც

$$g(R) = \int \left[ \frac{Rf(x, y, z) - s_o}{s_c} \right] dV, \quad Rf(x, y, z) > s_o.$$

იმ შემთხვევაში, როცა მინიმალური სიმტკიცე  $s_0=0$ , ზოლო ფორმულა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\bar{R} = S_0 \left( \frac{V_0}{V_*} \right)^{1/\alpha} \Gamma(1 + 1/\alpha) \quad (22)$$

აქ  $V_*$ -ს აქვს „მოყვანილი მოცულობის“ აზრი. მყიფე რღვევის შემთხვევაში სიმტკიცის ცვალებადობა ხასიათდება ცვალებადობის (ვარიაციის)  $W_R$  კოეფიციენტით. ერთგვაროვანი დაძაბული მდგომარეობის შემთხვევაში

$$W_R = \frac{S_c \left( \frac{V_o}{V} \right)^{1/\alpha} \sqrt{\Gamma(1 + 2/\alpha) - \Gamma^2(1 + 1/\alpha)}}{S_0 + S_c \left( \frac{V_o}{V} \right)^{1/\alpha} \Gamma(1 + 1/\alpha)} \quad (23)$$

როცა  $S_0 = 0$ , ფორმულა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$W_R = \sqrt{\frac{\Gamma(1 + 2/\alpha)}{\Gamma^2(1 + 1/\alpha)}} - 1. \quad (24)$$

მაშასადამე, ამ თეორიის თანახმად, ერთგვაროვანი დაძაბულობის დროს, როდესაც ელემენტის მინიმალური სიმტკიცე ნულის ტოლია, ცვალებადობის კოეფიციენტი არ არის დამოკიდებული ნიმუშის მოცულობაზე და მთლიანად განისაზღვრება  $\alpha$  მაჩვენებლით.

მყიფე რღვევის თეორიის შემდგომი განზოგადოება ითვალისწინებს სხეულის გარე და შიგა ეფექტებს. კვლევის სტატისტიკურმა მეთოდებმა დიდი განვითარება ჰპოვა გ. მუხამის, ა. კაკუშამის [3] და ა. რჟანიცინის [150-151] შრომებში.

ლ. სედრაქიანის [159, 160] მიხედვით სიმტკიცის ალბათური განაწილების სიმკვრივე განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$p(R) = \frac{c_1 c_2}{R_{\max} - R_{\min}} \left[ 1 - \left( \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right)^{c_1} \right]^{c_2 - 1} \cdot \left( \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right)^{c_1 - 1} \quad (25)$$

სადაც  $R_{\max}, R_{\min}$  – შესაბამისად სიმტკიცის ზედა და ქვედა მნიშვნელობებია,  $R$  სიმტკიცის მაჩვენებელია, რომლის ალბათური



განაწილების სიმკვრივეც განისაზღვრება,  $c_1c_2$  – მოც. მასალის სიმტკიცეა. [206] ნაშრომში ფორმულირებულია სხვადასხვა დაძაბული მდგომარეობის ეკვივალენტურობა, რომლის არსი არის შემდეგი: იდეალურად მყიფე სხეულის ერთგვაროვანი დაძაბული მდგომარეობა სტატისტიკურად თანაბრად საშიშია, თუკი ტოლფარდობითი რიცხვია შესაბამისი მათემატიკური ლოდინი [39].

დეტერმინირებული (არაშემთხვევითი) თვისებების მქონე მოდელებს უწოდებენ კლასიკურს სტატისტიკურისაგან განსხვავებით. ისინი გამოიყენებიან ისეთი ცნებების შემოტანაში, როგორცაა ძაბვის ტენზორი, დეფორმაცია, დრეკადობის მუდმივები. თუმცა ეს აპარატი არ იძლევა მრავალფაზიანი მასალის (რომლებსაც აქვთ შემთხვევითი დეფექტები) სტრუქტურის აღწერის საშუალებას. მოდელი, რომელიც წარმოადგენს კლასიკურ გარემოს, ითვლება ერთგვაროვნად, თუკი მისი ფიზიკური თვისებები არ არის დამოკიდებული კოორდინატებზე. არაერთგვაროვანი გარემო ანალოგიური თვისებისაა, თუკი ის სტატისტიკურად ერთგვაროვანია.

ბეტონის არაერთგვაროვნების გათვალისწინებით, ვ. მიხაილოვმა „შემოგვთავაზა ბეტონის სტრუქტურის“ ე.წ. „სტრუქტურით“ დახასიათება – ბეტონის ფიზიკურ-მათემატიკური პარამეტრების მაჩვენებლების ერთობლიობა ემორჩილება სტატისტიკურ კანონზომიერებებს [119]. ნაშრომ [130]-ში ბეტონი განიხილება, როგორც სტატისტიკური ერთობლიობა, რომლის წევრებიც წარმოადგენენ ცალკეული ნაწილებისგან შედუღებულ რგოლებს. განაწილების ნორმალური კანონის დროს სიმტკიცის ყველაზე სუსტი რგოლი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$R_{\min} = R_o - \alpha \Delta R \quad (26)$$

აქ  $R_{\min}$  – სუსტი რგოლია,  $R_o$  – საშუალო რგოლების სიმტკიცეა,  $\Delta R$  – საშუალო კვადრატული გადახრა,  $\alpha$  – რგოლების რაოდენობაზე დამოკიდებული კოეფიციენტი.

ამგვარად, ამ თეორიაში მიღებულია განაწილების ნორმალური კანონი და ითვალისწინებს მხოლოდ მარცვლების შედუღაბებს, ე.ი. თავად მარცვლების სიმტკიცეს, კერძოდ, არ განიხილება მცნება „რგოლი“ არ არის დაკავშირებული უშუალოდ მასალის სტრუქტურასთან დ. ა.შ.

ცნობილია ბეტონის გაჭიმული ელემენტის მოდელი, რომელიც წარმოადგენს მიმდევრობით შეერთებულ რგოლებს, სადაც რგოლის რღვევა ექვივალენტურია მისი შემადგენელი ყველა ღერაკების რღვევისა. ელემენტის დაშლა ხდება მაშინაც კი, როცა მწყობრიდან გამოდის თუნდაც ერთი რგოლი. ზღვრული დეფორმაცია ღერაკისა, რომლის მიღწევამდე მასალა ექვემდებარება ჰუკის კანონს, განისაზღვრება ვაიბულას მყიფე სიმტკიცის თეორიით. ბეტონის სტრუქტურულ მახასიათებლებთან ელემენტების მოდელის კავშირი ამ თეორიაში არ განიხილება [53].

ნ. კრილოვის [96] ნაშრომში ბეტონის სტატისტიკური სიმტკიცის განხილვისას შემოღებულია კავშირების სიმტკიცესთან განაწილების  $N(R)$  ფუნქცია. სტატისტიკური სიმტკიცე განისაზღვრება ფორმულით

$$R_{CT} N(R) = \int_{R_{st}}^{R_0} N(R) dR. \quad (27)$$

ეს სიმტკიცე ნაკლებია,  $R(N)$  მრუდის შესაბამის მაქსიმუმზე. განაწილება მიღებულია სიმეტრიულად და საერთო სახით ტოლად

$$N(R) = a \cdot 2^n \left( \frac{R}{R_o} - \frac{R^2}{R_o^2} \right)^{n/2} \quad (28)$$

სადაც  $a, R_o$  – კონსტანტებია,  $n$  – მრუდის ფორმის მაჩვენებელია, [220]-ში მოყვანილია სიმტკიცის სტატისტიკური თეორია კუმშვის შემთხვევაში, როდესაც შემვსების დრეკადობის მოდული გაცილებით მეტია ცემენტის ქვის დრეკადობის მოდულზე. თეორია გამომდინარეობს “სუსტი რგოლების” კონცენტრაციიდან. ელემენტებად განიხილება მარცვლები, რომლებიც რღვევაში იღებენ მონაწილეობას (ვაიბულას მიხედვით,

სიმტკიცის განაწილება). ავტორის თანახმად გამოდის, რომ ნიმუშის ზომის გაზრდასთან ერთად მისი სიმტკიცე არ იცვლება, ხოლო შედეგებს შორის განსხვავება იზრდება. ეს კი ეწინააღმდეგება ექსპერიმენტულ მონაცემებს. საინტერესოა, მაგრამ საკამათოა, ავტორის აზრი მასალის ერთგვაროვნების (ვაიბულას განაწილებისას) დაკავშირება წყალცემენტის ან ბეტონის ფორიანობასთან.

როდესაც ვიხილავთ ბეტონის მოდელის, როგორც მარცვლების ერთობლიობას, რომლებიც დაკავშირებულია კონტაქტებით, ხასიათდება სივრცეში ორიენტაციით, სიმტკიცით და მასალის საერთო დაზიანებაში მონაწილეობით. [101] ნაშრომში ფორმულირებულია რღვევის ერთეული პირობები:

$$\tau^* + \mu \sigma^* \geq \xi_\tau, \quad (29)$$

სადაც  $\tau^*$  – კონტაქტში მხები ძაბვის აბსოლუტური მნიშვნელობაა,  $\sigma^*$  – საცდელი კონტაქტის ნორმალური ძაბვის ალგებრული მნიშვნელობაა,  $\mu$  – ხახუნის კოეფიციენტი,  $\xi_\tau$  – ხახუნის ზღვრული ძალაა, ნულოვანი ნორმალური წნევის დროს.

უჯრედოვანი ბეტონის მაკროსტრუქტურის და სიმტკიცის შესწავლა ეფუძნება ექსპერიმენტული მონაცემებით მიღებულ ემპირიულ ფორმულას:

$$R = A \left( \frac{1}{C^*} \right)^{1/2} \quad (30)$$

სადაც  $R$  – უჯრედოვანი ბეტონის სიმტკიცეა,  $C^*$  – ფორების განაწილების ვარიაციის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ფორების საშუალო ზომას და მათი განაწილების სიმკვრივეს მასალის მოელ პერიმეტრში და მოცულობაში,  $A$  – ემპირიული კოეფიციენტი.

ბეტონის არაერთგვაროვნების გავლენა სიმტკიცეზე სვეტში, პანელში და სხვ. განხილულია ს. სემენცოვის [161] ნაშრომში. ავტორი განიხილავს ასეთი სხეულების სივრცულ მოდელს, რომელიც შედგება „აგურების“ ტიპის ელემენტარული მოცულობებით.

სტატისტიკური ამორჩევის თეორიის გამოყენებით, ავტორი იღებს სხვადასხვა ამოხსნებს, რომლებიც დამოკიდებულია პირველადი ელემენტების განხილვის მიმდევრობაზე და მოდელის ფორმაზე.

მასალის არერთგვაროვნების განსაზღვრის სხვადასხვა მეთოდები მოყვანილია მ.ი. ხიგეროვიჩის და ა. მერკინის [182] ნაშრომებში.

ბეტონის, ისე როგორც ნებისმიერი სხვა მასალის რღვევა შეიძლება შესწავლილ იქნეს სხვადასხვა დონეზე. ასე მაგალითად, რღვევის ელემენტალური აქტი ფიზიკურად შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ატომთშორის კავშირის დარღვევა [96, 109].

ცემენტის ქვის დეფორმირებისა და რღვევის მექანიზმი ი.ნ. ახვერდოვის თანახმად განისაზღვრება კრისტალოჰიდრატებში ურთიერთქმედების ძალის ცვლილებით, რომლებსაც ახასიათებს დრეკად ბლანტი თვისებები. საბოლოო სტადია ხასიათდება მიკრობზარების წარმოქმნით და მასალის მყიფე რღვევით [13].

[232] -ში შემოთავაზებულია, ბეტონის რღვევის პროცესი დაიყოს რამოდენიმე ეტაპად. პირველი ეტაპი – ცემენტ-ქვიშოვანი ხსნარის მარცვლოვან შემკვებებს შორის ელასტიურ-პლასტიკური დეფორმაცია მიკრობზარების გაჩენის გარეშე (ეს ეტაპი ერთნაირია მსუბუქ და მძიმე ბეტონებისათვის). მეორე ეტაპზე, ჩვეულებრივ მძიმე ბეტონების შემკვების შეჭიდულობის ზონებში ჩნდება მიკრობზარები. შემდეგ, მესამე ეტაპზე – ხდება მიკრობზარების განვითარება შემკვების მარცვლის განივი ძვრის გამო. გარე მკუმშავი დატვირთვების მიმართულებით ბზარები აღწევენ სხეულში და ქმნიან ძელისებრ სტრუქტურებს. ბოლო, მეოთხე ეტაპი ხასიათდება ბეტონის სრული რღვევით, ცალკეული ძელების გატეხვის გზით.

აგრეთვე არსებობს ექსპერიმენტული მონაცემები [221], რომლებშიც ჩანს, რომ რღვევა იწყება, როგორც შემკვების და შემკვრელის მექანიკური თვისებების დიდი განსხვავებით, ისე მათი გაყოფის საზღვრების მცირე განსხვავებით. ამასთან დიდი დეფორმაცია შეიმჩნევა შემკვრელის ფენებში ახლოს განლაგებული შემკვები ელემენტებით.

[22]-ში განიხილება ბეტონის ორკომპონენტიანი მოდელი (ხსნარს + მსხვილი შემკვები მარცვლები), ავტორები მივიდნენ დასკვნამდე, რომ მაღალი მარკის მძიმე ბეტონებში დიდი ალბათობით შესაძლებელია მოველოდეთ მიკრობზარების ჩამოყალიბებას, რომელიც იწყება ცემენტის ხსნარსა და შემავსებელს შორის კავშირის დარღვევით,

ხოლო მცირე სიმტკიცის ბეტონში თავიდან ყალიბდება გრძივი მიკრობზარები ცემენტის ხსნარში მსხვილ შემკვებს შორის.. მყარი სხეულის რღვევის შემდეგ ხდება მისი ნაწილებად დაყოფა, რაც დაკავშირებულია ახალი ზედაპირების ჩამოყალიბებასთან. თვით პროცესი ი. რაბოტნოვის [145] მიხედვით შეიძლება აღწერილი იყოს როგორც ბზარების ზრდა.

მასალების ფიზიკური და მექანიკური თვისებები [24]-ის თანახმად, შეიძლება კლასიფიცირებულ იქნას იმ ობიექტურობის მასშტაბების მიხედვით, რომლებზეც ხდება მათი ექსპერიმენტული განსაზღვრა: I გვარს (მაკროსკოპიური), II გვარს (მიკროსკოპიური) და III გვარს (სუბმიკროსკოპიური). I გვარის თვისებებს შეისწავლიან ნიმუშებზე, რომელთა ზომები დიდია შემადგენელი სტრუქტურების ზომებზე – ესენია დრეკადობის მოდული, სიმტკიცის ზღვარი, ზღვრული დეფორმაციები და ა.შ. II გვარის თვისებები მიეკუთვნება სტრუქტურის შემადგენლობას – მარცვლებს, კომპონენტებს და სხვა. მაგალითისათვის ეს არის მარცვლის დრეკადობის მოდული. III გვარის თვისებებს შეისწავლიან ობიექტებზე, რომელთა ზომები შედარებით მცირეა შემადგენელი სტრუქტურების ზომებთან, შესაბამისად, მყარი სხეულის რღვევა შეიძლება დაიყოს სამ ძირითად სტადიად: სუბმიკროსკოპული, როდესაც დაზიანებები მარცვლის ზომებთან შედარებით მცირეა; მიკროსკოპული, როდესაც დაზიანებები იმავე რიგისაა, რაც ელემენტების მიკროსტრუქტურები; მაკროსკოპული, როდესაც ჩნდება მარცვლების ზომის მაკროსკოპული ბზარები.

სიმტკიცის თეორიებიდან შედარებით უფრო შესწავლილია მყიფე მასალების სიმტკიცე. იდეალურად მყიფე მასალის სიმტკიცე რვაჯერ აღემატება მის სიმტკიცეს გაჭიმვაზე [109].

ცნობილია, რომ პლასტიკური და მყიფე კრისტალების მკვეთრი გამიჯვნა შეუძლებელია. ერთი და იგივე სხეულში შეიძლება იყოს სიმყიფეც და პლასტიურობაც. დეფორმაციის ხასიათზე მოქმედებს ისეთი ფაქტორები, როგორცაა ტემპერატურა, დაძაბული მდგომარეობის ტიპი, დეფორმაციის სისწრაფე, გარემომცველი არე. თითქმის ყველა მასალაში, რომლებსაც აქვთ პრაქტიკული მნიშვნელობა, მათ შორის ბეტონებშიც რღვევას წინ უძღვის პლასტიკური დრეკადობა [146]. თუმცა

მეიფე მასალების რღვევის თეორიის შედეგები მისაღებია მასალების ფართო კლასისათვის.

მეიფე რღვევის თეორიის კრიტერიუმების შედგენისას, მეიფე ეწოდება სხეულს, რომელიც ირღვევა ბზარების გაჩენის შემდეგ [92]. აქედან გამომდინარე ბეტონი უნდა განვიხილოთ ამ თეორიის ჩარჩოებში.

ბზარი წარმოადგენს ნაპრალების გადაადგილების ზედაპირს და მისი ზომები შეიძლება შეიცვალოს სხეულზე მოქმედი დატვირთვით. ბზარის გაზრდის პირობა ატარებს რღვევის ფორმალური კრიტერიუმის სახელს. რღვევის უმარტივესი მოდელი ემყარება იდეალური მყარი სხეულის კონცეფციას, სადაც მასალა უწყვეტი მდგომარეობიდან გადადის დარღვეულ მდგომარეობამდე მხოლოდ ბზარების კიდებამდე, ხოლო არე, როდესაც მასალა შუალედურ მდგომარეობაშია, არ არსებობს.

რღვევის ყველაზე მეტად გავრცელებული კრიტერიუმი არის გრიფიტის ენერგეტიკული კრიტერიუმი. ის ეფუძნება იმის იდეას, რომ ერთეული ზედაპირის დასარღვევად საჭიროა დაიხარჯოს გარკვეული ენერგია.

გრიფიტსი გამოთქვამდა აზრს, რომ სხეულის ტექნიკური სიმტკიცე მცირეა თეორიულთან, რადგან მასალის შიგნით ისევე, როგორც მის ზედაპირზე, არსებობს მრავალი ბზარები – ძაბვის კონცენტრატორები. როდესაც ძაბვა ბზარის წვეროში აღწევს თეორიულ სიმტკიცეზე მეტს ბზარი იზრდება, რასაც მივყავართ ნიმუშის რღვევამდე. მრღვევი ძაბვა განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{2\alpha E}{\pi c}} \quad (31)$$

სადაც  $\alpha$  – ზედაპირული ძაბვაა ანუ ზედაპირული ენერგია, მეიფე სხეულებისათვის  $10^3$  ერგ/სმ (16/მ) [109];  $c$  – ბზარის ნახევარსიგრძეა. ცნობილია გ. ბერენბლატის [17] ლეონოვ-პანასიუკის [94] და სხვათა კრიტერიუმები, რომელიც იდეალურად მეიფე სხეულის მოდელს ეფუძნება სხვადასხვა ბზარის ნაპირებს შორის სხვადასხვა ძალების შემოყვანას.

მყარი სხეულების სიმტკიცის მარაგში მიკრობზარების მნიშვნელოვანი როლი ექსპერიმენტულად დადგინდა სუფრის მარილის კრისტალიზაციის იოფეს კლასიკურ ცდებში.

ბზართწარმოქმნის საკითხს აგრეთვე იმიტომ აქვს გამონაკლისი მნიშვნელობა, რომ კონსტრუქციული მასალების ძირითად ნაკლს, როგორც ცნობილია, წარმოადგენს არა სიმტკიცისა და სიხისტის ნაკლებობა, არამედ სიბლანტის არასაკმარისობა, ე.ი. ბზარების წარმოქმნისადმი არასაკმარისი მედეგობა.

ახლანდელ დროში ჩამოყალიბდა (ყალიბდება) მექანიკის ახალი სფერო – დიდი რაოდენობის ბზარების მქონე სხეულთა მექანიკა [152]. მასში დიდი რაოდენობის ბზარების მქონე სხეულთა ამოცანები განიხილება როგორც სხეულთა მექანიკური ქცევის ზღვრული შემთხვევა, შედგენილი განსხვავებული თვისებების მქონე მრავალი ელემენტისაგან. ამ თეორიის დაზიანებულობის ტენზორი, რომლის კავშირი დაძაბულობისა და დეფორმაციის ტენზორთან დგინდება ფენომენოლოგიურად, ან განიხილება ბზარი აშკარად შემოდის როგორც ზედაპირის გახლეჩვა.

რადგანაც ბეტონში, მაშინაც კი, როცა ის არ არის დატვირთული, არსებობს მიკრობზარები, არ შეიძლება ჩაითვალოს, რომ დაძაბულობასა და დეფორმაციას შორის არსებობს მკაცრი ურთიერთდამოკიდებულება [215].

ო. ბერგი მიუთითებს ცემენტის ქვის სტრუქტურის არაერთგვაროვნებაზე და წყლის აპკების არსებობა ქმნის დამასუსტებელ კავშირებს, რომელთა შემდგომ იწყება ბეტონის სტრუქტურის აფუება და შლა. ახალი რღვევის კერის წარმოქმნას ასევე მიყვარათ მიკრობზარებამდე და საბოლოო რღვევამდე [21].

რღვევის პროცესი განიხილება როგორც ბეტონის კვების არასწორი ფორმის პრიზმებად დამყოფი მიკრობზარების განვითარების პროცესი, რომლებიც თავის მხრივ ირღვევა მდგრადობის დაკარგვის შედეგად, ასევე რღვევით, გამოწვეული ღუნვის, კუმშვის და ძვრის ერთდროული მოქმედებით, როდესაც განივკვეთში მოქმედებენ მხები ძაბვები. განივი დეფორმაციების კოეფიციენტის ცვალებადობათა

კანონზომიერებანი უფლებას გვაძლევს ვიმსჯელოთ ბზართწარმოქმნის პროცესებზე [21, 97].

ბზარების წარმოქმნის მექანიზმი განხილულია ს. ალექსანდროვის [8], ბ. კრილოვის [95], ს. მირონოვის და ლ. მალინინის [117], ვ. მოსკოვინის [120], ვ. სტოლნიკოვის [173], პ. წულუკიძის [192], ს. შესტოპეროვის [200] და სხვათა ნამუშევრებში.

შეკუმშულ ბეტონში ბზართა განვითარების პროცესების რაოდენობრივ აღწერას მიეძღვნა ნაშრომი [74], ბეტონის რღვევა შეიძლება დახასიათებულ იქნას, კერძოდ, ახლადწარმოქმნილ ბზართა ჯამურ სიდიდედ [59], მათ კრიტიკულ სიმკვრივედ და სხვა. მისაღებ ჰიპოთეზათა ხასიათზე დამოკიდებულებით [51] ნაშრომში მყარი სხეულის რღვევა განიხილება, როგორც სხეულში ე.წ. „დესტრუქციული ბირთვის“ წარმოქმნის და განვითარების ტოპოკინეტიკური პროცესი. ეს უკანასკნელი ავტორის მიერ გაიგივებულია მასალაში მოქმედი ძაბვების ზემოქმედების დროს განვითარებულ დეფექტთან.

არსებობს აგრეთვე მყარი სხეულების მყიფე რღვევის ფონონური კონცეფცია [18]; ბოლო დროს ფართო განვითარება ჰპოვა აგრეთვე სიმტკიცის დისლოკაციურმა თეორიამ [109]. სიმტკიცის ფლუკტუაციური თეორიის მიხედვით მასალაში დაბალ ტემპერატურაზე ნაწილაკთაშორისი რღვევა ხდება მხოლოდ ნიმუშებზე მოქმედი გარე ძაბვების ზემოქმედებისას, როცა ნიმუშის რღვევა მაღალ ტემპერატურაზე გამოწვეულია როგორც შიდამექანიკური ძალების ერთდროული მოქმედებისას, ასევე ატომების და მოლეკულების თბური რღვევებისას.

ს. ჟურკოვის ნაშრომებში ექსპერიმენტულ ნაშრომთა საფუძველზე შემოთავაზებულია ფორმულა, მასალათა სიმტკიცის დროებითი დამოკიდებულებების გამომხატავი [71]:

$$\tau = c_e (U - \alpha \sigma) K / T \quad (32)$$

სადაც  $\tau$  – რღვევის დრო ანუ ნიმუშის არსებობის ხანგრძლივობა,  $\sigma$  – ძაბვა რღვევის მომენტში,  $c_e$ ,  $\alpha$  – მუდმივი სიდიდეებია,  $U$  – პროცესის აქტივირების ენერგია,  $k$  – ბოლცმანის მუდმივაა,  $T$  – ტემპერატურა.

ფორმულის მონაცემები ჭეშმარიტია, როცა მყარი სხეულის რღვევა ხდება გარემო პირობების ზემოქმედების არარსებობის დროს.



ი. გოლდენბლატი თერმოდინამიკურ პრინციპებს იყენებს დეფორმაციული პროცესების ანალიზისათვის. ა. ილიუშინი და ლ. სედოვი თერმოდინამიკურ პრინციპებს იყენებენ დეფორმირების პროცესების ანალიზისათვის თერმო-შედეგება-სიმტკიცის და სხვა საკითხებში.

საკმარისად საერთო პრობლემაა ფიზიკურ-მექანიკური მოდელების აგება, რომლებიც ითვალისწინებენ მექანიკურ და ფიზიკურ-ქიმიურ ასპექტებს. არასტაბილური სტრუქტურები ფიზიკურ-ქიმიურ გარდაქმნებით ასეთივე სიზუსტით ჯერჯერობით არ აღიწერება.

#### 1.4. ამოცანის დასმა და კვლევის მიზანი

მოცემული მიმოხილვის გათვალისწინებით, არსებულ ლიტერატურაში, არასაკმარისად არის გაშუქებული სიმტკიცის თეორიის, სტრუქტურული მოდელირების და ბეტონის რღვევის კრიტერიუმები. ამის გამო შეგვიძლია ჩამოვაყალიბოთ პრობლემის კვლევის მიზანი:

- ბეტონის სიმტკიცის და დეფორმულობის შედარებითი მნიშვნელობების პროგნოზირება. გაჭიმვაზე და ღუნვაზე და მის ელემენტების სტატისტიკური მახასიათებლებზე;
- ბეტონის სიმტკიცის მასშტაბური ეფექტების რაოდენობრივი თეორია;
- ბეტონის პრიზმულ და კუბურ შეფარდებათა რაოდენობრივი სიმტკიცის თეორია;
- კომპოზიტის სტრუქტურული ელემენტების ოპტიმალური შეფარდება;
- ველის შიდა დამაბულობის რაოდენობრივი თეორიის საკითხები;
- ბეტონის კუმშვაზე სიმტკიცის გაჭიმვაზე სიმტკიცესთან შეფარდების რაოდენობრივი თეორია.

ამ თავის მოკლედ რეზიუმირებისას, საჭიროა ავღნიშნოთ, რომ ბეტონის სიმტკიცის თეორია უნდა ეყრდნობოდეს მასალის რეალურ სტრუქტურულ თავისებურებებს. სიმტკიცის სტატისტიკური ბუნების გათვალისწინებით, გამოკვლევათა სტატისტიკური მეთოდები საშუალებას

იძლევა, ხარისხიანად და რაოდენობრივად აღიწეროს მასალის არაერთგვაროვნებით გამოწვეული დეფექტების მთელი რიგი საკითხები.

სტატისტიკური კანონზომიერების დადგენისას ბეტონის ერთგვაროვნების და სიმტკიცის ფორმირება იძლევა ამ მასალის მახასიათებლების პროგნოზირების საშუალებას.

ბეტონის ერთგვაროვნებისა და სიმტკიცის ფორმირების სტატისტიკური კანონზომიერების გამოვლინება (გახსნა, გადაშლა) საშუალებას იძლევა ამოვხსნათ ამ მასალის მახასიათებლების პროგნოზირების ამოცანები.

## 2. შედეგები და მათი განსჯა

### 2.1. კონსტრუქციული პოლიმერული კომპოზიციური მასალების დეფორმირების კანონები მათი რეოლოგიური თვისებების გათვალისწინებით

კონსტრუქციებისა და ნაგებობების სიმტკიცეზე და დეფორმირებაზე გაანგარიშების არსებულ მეთოდებში ძირითადად გამოყენებულია კონსტრუქციის მასალის დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის მარტივი სქემა – წრფივი დამოკიდებულება ძაბვასა და დეფორმაციას შორის (ჰუკის კანონი).

ამასთან, კონსტრუქციის დამაბული (დეფორმირებული) მდგომარეობის მთელი სურათი სრულიად ნათელი ხდება, თუ ცნობილია დეფორმაციები (ძაბვები) კონსტრუქციის ნებისმიერ წერტილში ე.ი. მთავარი ამოცანა დაიყვანება მოცემული გარე ძალების მოქმედებისას კონსტრუქციაში ძაბვებისა და დეფორმაციების განაწილების სურათზე.

კონსტრუქციული მასალების პლასტიკურ არეში მუშაობისას ძაბვასა და დეფორმაციას შორის წრფივი დამოკიდებულება ირღვევა, მაგრამ აქაც არ ხდება დროის ფაქტორის ზემოქმედების გათვალისწინება და დამაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობა განიხილება როგორც სტაციონარული.

როგორც ცნობილია, კონსტრუქციული პლასტიკების უმეტესობა “კლასიკური” მასალებისგან განსხვავებით მეტად მგრძნობიარეა დროის ფაქტორის მიმართ, ამიტომ პლასტიკებისაგან დამზადებული კონსტრუქციები დროში განვითარებული დიდი ცოცვადობის გამო ექსპლუატაციისათვის დაუშვებელ დეფორმაციებს იღებს და იმ შემთხვევაში, თუ ძაბვა ხანგრძლივი სიმტკიცის ქვედა ზღვარს აღემატება – დაირღვევა [8, 11, 16, 17].

პლასტიკების მექანიკას სამწუხაროდ არ შეუძლია დაეყრდნოს ფიზიკიდან გადმოღებულ დეფორმირების აღმწერ განტოლებებს. ფიზიკურ თეორიებს შეუძლია მხოლოდ ცოცვადობის მოვლენის

თვისობრივი (ხარისხოვანი) ახსნა; დროში დეფორმაციების განვითარების მოვლენის რაოდენობრივი აღწერა კი საკმაოდ რთული არის. ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, ძაბვასა და დეფორმაციას შორის დროში დამოკიდებულების, ანუ ცოცვადი სხეულის მდგომარეობის მექანიკური განტოლებების შედგენა შესაძლებელია ცდის მონაცემების მათემატიკური დამუშავების საფუძველზე.

### 2.1.1. კონსტრუქციული პლასტიკების რეოლოგიური მოდელები

მასალების მექანიკური თვისებების დროში ცვლილების აღწერისათვის ფართოდ გამოიყენება რეოლოგიური მოდელები.

ბოლო ასი წლის განმავლობაში წარმოდგენილი იქნა სხვადასხვა მოდელები: მაქსველის, კელვინ-ფოიჰტის, ბინგამის, შვედოვის, იშლინსკის, პოტინგ-ტომსონის, ბიურგერის, ტრაუნტონ-რენკინის და სხვ. [3, 8, 11, 20, 21, 23, 35, 38, 43].

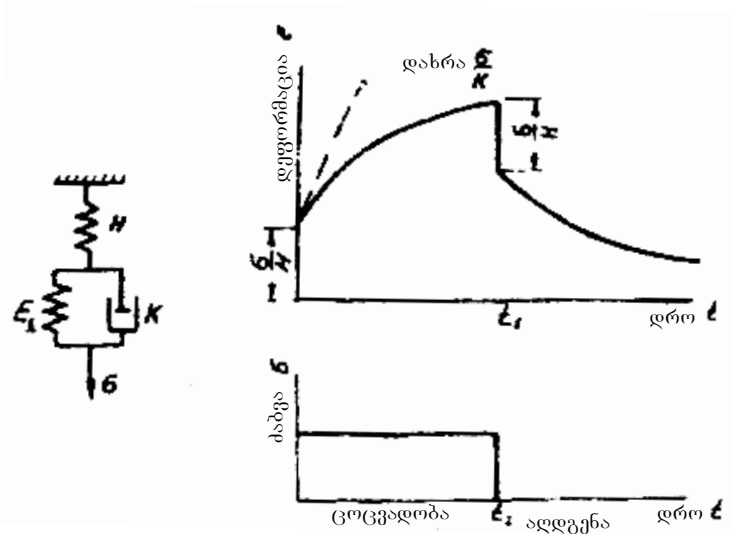
რეოლოგიური მოდელების შერჩევის მეთოდის მთლიანად ეფუძნება დატვირთვის ქვეშ მყოფი მასალის დროში ქცევის ექსპერიმენტულ შესწავლას. უნდა აღინიშნოს, რომ მოდელების გამოყენებისას არ შეიძლება მოდელების ელემენტების გაიგივება მოლეკულური დეფორმირების სხვადასხვა მექანიზმებთან. მოდელს შეუძლია მხოლოდ ძალის მოდებისას მასალებში დროში განვითარებული დეფორმაციების რაოდენობრივი აღწერა.

კონსტრუქციული პლასტიკების რეოლოგიური მოდელები ელემენტარული დრეკადი და ბლანტი ელემენტებისგან შედგება; დრეკადი ელემენტი ემორჩილება ჰუკის კანონს ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , სადაც  $E$  – დრეკადობის მოდულია), ხოლო ბლანტი ელემენტი ნიუტონის კანონს – ძაბვა დეფორმაციის სიჩქარის პროპორციულია ( $\sigma = k \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$ , სადაც  $k$  – სიბლანტის კოეფიციენტი).

პირველად რეოლოგიური მოდელი მინაში ძაბვითა რელაქსაციის აღწერისათვის გამოიყენა მაქსველმა, მაგრამ არც მაქსველის და არც კელვინ-ფოიჭტის მოდელები არ ასახავენ დატვირთვის ქვეშ მყოფი კონსტრუქციული პლასტიკების ქცევის რეალურ სურათს, ამიტომ მათ აქ არ განვიხილავთ.

### 2.1.1.1. სამელემენტური მოდელი

იშლინსკის ან მაქსველ-ტომსონის “ტიპური სხეულის” რეოლოგიური მოდელი შედგება პარალელურად შეერთებული დრეკადი (დრეკადობის მოდულით –  $E_1$ ) და იდეალურად ბლანტი (სიბლანტის კოეფიციენტით  $k$ ) ელემენტებისა და მათთან თანმიმდევრულად მიერთებული დრეკადი ელემენტისაგან, დრეკადობის მოდულით –  $H$ . ნახ. 1-ზე მოცემულია რეოლოგიური მოდელის სქემა [19].



ნახ. 1. „ტიპური სხეულის“ რეოლოგიური მოდელის ცოცვადობა და აღდგენა

„ტიპური სხეულის“ მოდელის დეფორმირების კანონი საკმაოდ უნივერსალურია, მარტივია გამოყენებისათვის და საკმაოდ სრულყოფილად აღწერს დატვირთვის ქვეშ მყოფი დრეკადი ჯგუფის კონსტრუქციული პლასტიკების ქცევას.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sigma_{\varepsilon_1} + \sigma_k = \sigma_H, \text{ სადაც } \sigma_k = k \cdot \frac{d\varepsilon_k}{dt} \\ \varepsilon = \varepsilon_{E_1} + \varepsilon_H, \quad \text{სადაც } \varepsilon_{E_1} = \frac{\sigma_{E_1}}{E_1}, \varepsilon_H = \frac{\sigma}{H}; \\ \varepsilon_{E_1} = \varepsilon_k, \quad \text{საიდანაც } \frac{d\varepsilon_{E_1}}{dt} = \frac{d\varepsilon_k}{dt}. \end{array} \right. \quad (33)$$

მოდელის სრული დეფორმაციის სიჩქარის განტოლებიდან სისტემის ელემენტების დეფორმაციებისა და ძაბვების გამორიცხვით მივიღებთ შემდეგს:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{d\varepsilon_{E_1}}{dt} + \frac{d\varepsilon_H}{dt} = \frac{\sigma_k}{k} + \frac{1}{H} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\sigma - \sigma_{E_1}}{k} + \frac{1}{H} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\sigma - E_1 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_H)}{k} + \frac{1}{H} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = \\ &= \frac{\sigma - E_1 \left( \varepsilon - \frac{\sigma}{H} \right)}{k} + \frac{1}{H} \cdot \frac{d\sigma}{dt}. \end{aligned}$$

საბოლოოდ მიიღება შემდეგი განტოლება:

$$H \cdot n \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + E \cdot \varepsilon = \sigma + n \cdot \frac{d\sigma}{dt}. \quad (34)$$

სადაც  $n = \frac{k}{H + E_1}$  - რელაქსაციის დროის კოეფიციენტი,  $E = \frac{H \cdot E_1}{H + E_1}$  -

ხანგრძლივი დრეკადობის (მკვეთი) მოდულია,  $H$  და  $E_1$  - ელემენტების მყისიერი დრეკადობის მოდულებია.

ნელი დეფორმირების პროცესებში განტოლებაში (34) შეიძლება  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  და  $\frac{d\sigma}{dt}$  სიდიდეების უგულებელყოფა  $\varepsilon$  და  $\sigma$  სიდიდეებთან შედარებით, შედეგად მიიღება ჰუკის კანონი ხანგრძლივი დრეკადობის მოდულით, ძალიან სწრაფი დეფორმირების პროცესებში, პირიქით შესაძლებელია  $\varepsilon$  და  $\sigma$  სიდიდეების უგულებელყოფა  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  და  $\frac{d\sigma}{dt}$  სიდიდეებთან შედარებით. შედეგად ისევ მიიღება ჰუკის კანონი, მაგრამ უკვე მყისიერი დრეკადობის მოდულით.

1 დროში მუდმივი ძაბვის მოქმედებისას (ცოცვალობა) განტოლებიდან (34), მისი ინტეგრების შემდეგ და საწყისი პირობის

$\left( t = 0, \varepsilon = \frac{\sigma}{H} \right)$  გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} - \sigma \cdot \left( \frac{1}{H} - \frac{1}{H} \right) \cdot e^{-\frac{E}{H \cdot n} \cdot t}. \quad (35)$$

როგორც ვხედავთ, გამოსახულება (35) შემოსაზღვრულია ანუ  $\varepsilon(t \rightarrow \infty) \rightarrow \frac{\sigma}{E}$ , რაც შეესაბამება რეალობას კონსტრუქციული პლასტიკების დრეკადი დეფორმაციების არეში.

კელვინ-ფოიპტის მოდელის განტოლებისგან განსხვავებით განტოლება (33), როგორც ვხედავთ, მისი ამონახსნიდან (35) ცოცვადობის შემთხვევაში გვაძლევს საწყის დეფორმაციას -  $\frac{\sigma}{H}$ .

„ტიპური სხეულის“ მოდელი აღწერს აგრეთვე უკუცოცვადობის მოვლენასაც. თუ განტვირთვის მომენტში  $t = t_0$ , დეფორმაცია უდრის  $\varepsilon_0$ , მაშინ მივიღებთ:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{E}{H \cdot n}(t_0 - t)} = \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{E - T}{n \cdot H}}, \quad (36)$$

სადაც  $T = t - t_0$  - დროა განტვირთვის შემდეგ.

განტვირთვის შემდეგ დროის განმავლობაში დეფორმაცია მისწრაფის ნულისაკენ.

**2. დატვირთვის დროში თანაბარი ზრდისას** (სადაც  $V$ -ძაბვების ზრდის მუდმივი სიჩქარე) (33) განტოლების ზოგადი ამონახსნი იქნება:

$$\varepsilon = C \cdot e^{-\frac{Et}{H \cdot n}} + \frac{V \cdot t}{E} + \frac{V \cdot n}{E} - \frac{V \cdot n}{E^2} \cdot H, \quad (37)$$

საიდანაც საწყისი პირობის -  $\varepsilon(t=0) = 0$  გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$C = -\frac{V \cdot n}{E} + \frac{V \cdot n}{E^2} \cdot H.$$

საბოლოოდ კერძო ამონახსნი იქნება:

$$\varepsilon = \frac{V \cdot n}{E} \cdot \left( 1 - \frac{H}{E} \right) \cdot \left( e^{-\frac{Et}{H \cdot n}} \right) + \frac{V}{E} \cdot t. \quad (38)$$

**3. დეფორმაციის მუდმივობის შემთხვევაში**  $\varepsilon = const = \varepsilon_0$  (ძაბვების რელაქსაცია) განტოლებიდან (33) მივიღებთ:

$$\sigma + n \cdot \frac{d\sigma}{dt} = E \cdot \varepsilon_0. \quad (39)$$

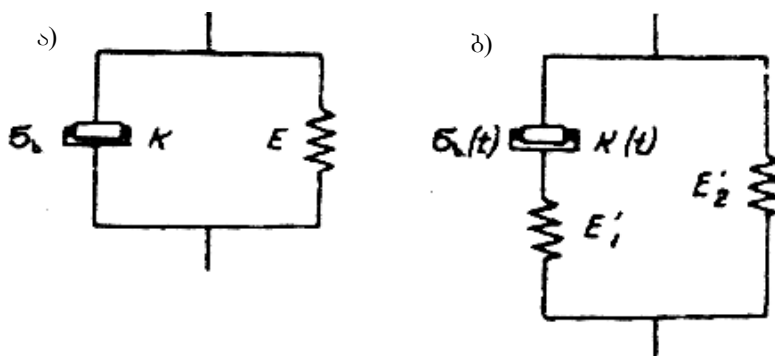
ამ განტოლების ამოხსნისას საწყისი პირობის -  $\sigma(t=0) = \sigma_0$  გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 + (\sigma_0 - E \cdot \varepsilon_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (40)$$

მაქსველის მოდელის განტოლებისაგან განსხვავებით ძაბვა, როცა  $t \rightarrow \infty$  რელაქსირდება არა ნულამდე, არამედ მუდმივ მნიშვნელობამდე  $\sigma = E \cdot \varepsilon_0$ .

### 2.1.1.2. სხვა რეოლოგიური მოდელები

კელვინ-ფოიჰტის მოდელი, როცა  $\sigma = const$ , ვგაძლევს ცოცვადობის დეფორმაციას მარტივი ექსპონენტის სახით, სადაც განტვირთვის შემდეგ ცოცვადობით გამოწვეული დეფორმაციები მთლიანად ქრება. ამ მოდელში ცოცვადობა იწყება ნებისმიერი ძაბვის მოქმედებისას, რაც ზოგჯერ არ სრულდება. ო. კორფიმ და ა. სკუდრამ ამ შეზღუდვის მოშორებისათვის კელვინ-ფოიჰტის მოდელში შეიტანეს დემპფერი შიგა ხახუნით [29], სადაც დეფორმაციის განვითარება დაიწყება მხოლოდ როცა  $\sigma > \sigma_b$ . აქ  $\sigma_b$  პირობითად ახასიათებს შიგა ხახუნის სიდიდეს (ნახ. 2).



ნახ. 2. ორ- და სამეგლემენტიანი მოდელები შიგა ხახუნით

რეოლოგიური განტოლება ამ შემთხვევაში მიიღებს სახეს:

$$\sigma = \sigma_b + E \cdot \varepsilon + k \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (41)$$

ცოცვადობის შემთხვევაში  $\sigma = const$  (41) განტოლების ამოხსნისას და საწყისი პირობის ( $t=0, \varepsilon=0$ ) გათვალისწინებით გვექნება

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_b}{E} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{E}{k}t} \right), \quad (42)$$



სადაც  $\varepsilon(t \rightarrow \infty) \rightarrow \frac{\sigma - \sigma_b}{E}$ , ე.ი. ცოცვადობის მრუდი გადის პლატოზე.

თუ დროის მომენტში  $t = \tau$  დეფორმაცია უდრის  $\varepsilon_0$ -ს, მაშინ  $\tau$  მომენტში განტვირთვისას დეფორმაცია შემცირდება კანონით:

$$\varepsilon = \left( \varepsilon_0 - \frac{\sigma_b}{E} \right) \cdot e^{\frac{E}{k}(t-\tau)} + \frac{\sigma_b}{E}, \quad (43)$$

სადაც  $\varepsilon(t \rightarrow \infty) \rightarrow \frac{\sigma_b}{E}$ , ე.ი. დეფორმაცია არ რელაქსირდება ნულამდე.

როგორც ცნობილია, კონსტრუქციული პლასტიკების უმეტესობა „ცოცავს“ ნებისმიერი ძაბვისას, ამიტომ ბოლოს მოყვანილი მოდელების გამოყენება იშვიათია.

ერთი მიმართულებით არმირებული მინაპლასტიკების დეფორმირების აღწერისათვის ა. სკუდრამ შემოგვთავაზა შემდეგი რეოლოგიური მოდელი [42]: პოლიმერული შემკვრელი აღიწერება მაქსველ-ტომსონის სამედემენტისანი მოდელით, ხოლო მინაბოჭკო ითვლება იდეალურად დრეკად სხეულად და აღიწერება ზამბარით. მაქსველ-ტომსონის მოდელი და ზამბარა შეერთებულია პარალელურად. ამ მოდელის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$n_{\text{ა}}(H_{\text{ა}} + \mu \cdot H_{\text{ბ}}) \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\sigma - \sigma_b}{E} (H_{\text{ა}} + \mu \cdot H_{\text{ბ}}) \cdot \varepsilon = \frac{1}{F_{\text{ა}}} \left( N + n_{\text{ა}} \frac{dN}{dt} \right), \quad (44)$$

სადაც  $n_{\text{ა}}$  – პოლიმერული შემკვრელის რელაქსაციის დროის კოეფიციენტი;  $F_{\text{ა}}$  და  $F_{\text{ბ}}$  – შესაბამისად შემკვრელისა და ბოჭკოს განივი კვეთის ფართობებია;  $H_{\text{ა}}$  და  $E_{\text{ა}}$  – შესაბამისად შემკვრელის მყისიერი და ხანგრძლივი დრეკადობის მოდულებია;  $H_{\text{ბ}}$  – ბოჭკოების დრეკადობის მოდულია;  $\varepsilon$  და  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  – პლასტიკის დეფორმაცია და მისი ცვლილების სიჩქარეა;  $N$  და  $\frac{dN}{dt}$  – შესაბამისად მოდებული დატვირთვა და მისი ცვლილების სიჩქარეა;  $\mu = \frac{F_{\text{ბ}}}{F_{\text{ა}} + F_{\text{ბ}}}$  – არმირების კოეფიციენტი.

თანაბარი სიმტკიცის ბოჭკოვანი პლასტიკებისათვის მოდელს ემატება ზამბარები, რომლებიც განლაგებულია განივი მიმართულებით.

### 2.1.1.3. კონსტრუქციული პლასტიკების გაუმჯობესებული რეოლოგიური მოდელი

ზემოთ მოყვანილ რეოლოგიურ მოდელებში მიღებულია წრფივი დამოკიდებულება ძაბვასა და დეფორმაციას შორის, მაგრამ მაღალი ძაბვებისას, ძაბვასა და დეფორმაციას შორის დამოკიდებულება შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს წრფისაგან. ამ შემთხვევაში ზემოთმოყვანილი განტოლებების გამოყენება შეუძლებელი ხდება.

ძაბვასა და დეფორმაციას შორის არაწრფივი დამოკიდებულება განსაკუთრებით ძლიერად იჩენს თავს პლასტიკური ჯგუფის კონსტრუქციულ პლასტიკებში.

ჯამური მყისიერი დეფორმაცია კონსტრუქციული პლასტიკებისათვის, რომლებისთვისაც  $\sigma_{რღ} \gg \sigma_{ბ.ს.ზღ}$  შედგება სამი კომპონენტისაგან:

- ა) მყისიერი დრეკადი დეფორმაცია;
- ბ) მყისიერი დრეკად-ბლანტი ცოცვადობის დეფორმაცია;
- გ) მყისიერი პლასტიკური დეფორმაცია.

დეფორმაციის ბოლო ორი კომპონენტის არარსებობის შემთხვევაში მასალა აღიწერება ჰუკის კანონით ან სხვა არაწრფივი კანონით, რომელიც მდორე არაწრფივობას იძლევა,

დეფორმაციის კომპონენტების განცალკევება მასალის მოკლევადიანი დეფორმირების მრუდების ანალიზისას წარმოადგენს გარკვეულ სირთულეს. ამიტომ მხებ მოდულთან  $\left( H_{აბ.} = \frac{d\sigma}{dt} \right)$  ერთად გამოიყენება მკვეთი მოდულიც  $\left( H_{აბ.} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \right)$ . ორივე მოდული ფიქსირებული დეფორმირების სიჩქარისას დამოკიდებულია ძაბვაზე.

ამასთან, არაწრფივად დეფორმირებადი კონსტრუქციული პლასტიკების რეოლოგიური მოდელების შექმნისას მიზანშეწონილია ორი წინაპირობის გათვალისწინება:

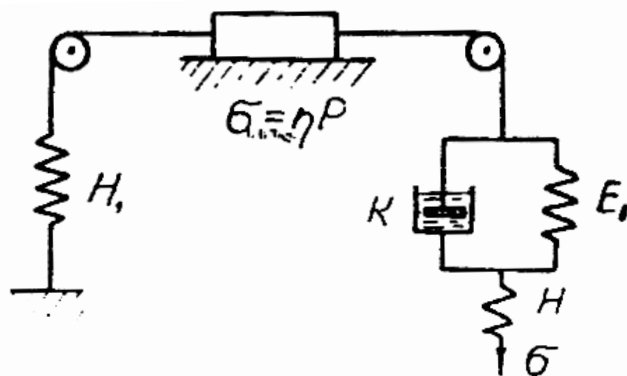
1) თავისუფალი დრეკადი ელემენტი დეფორმირდება არაწრფივი კანონით. ამ შემთხვევაში წინასწარ მოცემულია თავისუფალი დრეკადი ელემენტის მოდულსა და ძაბვას შორის დამოკიდებულება;

2) თავისუფალი დრეკადი ელემენტი დეფორმირდება წრფივი კანონით ანუ აღწერს მხოლოდ დეფორმაციის პირველ კომპონენტს (განისაზღვრება დრეკადობის მხები მოდულით). დეფორმაციის სხვა კომპონენტები (დრეკად-ბლანტი და პლასტიკური) გათვალისწინებულია მოდელის სხვა ელემენტებით.

პირველი წინაპირობის საფუძველზე შექმნილი რეოლოგიური მოდელები გვამლევენ დეფორმირების არაწრფივ კანონს, სადაც მასალის მყისიერი დრეკადობის მოდული მდორედ იცვლება ძაბვაზე დამოკიდებულებით. მეორე წინაპირობის საფუძველზე შექმნილი რეოლოგიური მოდელები გვამლევენ ნაწყვეტ-წრფივ დეფორმირების კანონს. ამ მოდელებს უწოდებენ უბან-უბან წრფივი კანონებით დეფორმირებადი სხეულების მოდელებს.

#### 2.1.1.4. ხუთელემენტიანი რეოლოგიური მოდელები

ნახ. 3 მოყვანილია ხუთელემენტიანი გაუმჯობესებული რეოლოგიური მოდელი (ა), რომელიც კარგად აღწერს კონსტრუქციული პლასტიკების ქცევას დატვირთვის ქვეშ [18].



ნახ. 3. უბან-უბან წრფივად დეფორმირებადი კონსტრუქციული პლასტიკების ხუთელემენტიანი მოდელი (ა)

მოდელი შედგება პარალელურად შეერთებული ა. იშლინსკის „ტიპური სხეულის“, მამუხრუჭებელი ტვირთისა და დრეკადი ( $H_1$ ) ელემენტისაგან.

ძაბვების  $\sigma \leq \sigma_{\text{ბ.ბ.ზრ}}$  მამუხრუჭებელი ტვირთი და დრეკადი ელემენტი  $H_1$ , მოდელის მუშაობაში არ მონაწილეობენ. მოდელი აღწერს მასალის ქცევას დრეკადი დეფორმაციების არეში, როგორც ა.იშლინსკის სამელემენტოანი მოდელი.

ძაბვებისას  $\sigma > \sigma_{\text{ბ.ბ.ზრ}}$  მოდელის მუშაობაში ირთვება დრეკადი ელემენტი  $H_1$ , ხდება მამუხრუჭებელი ტვირთის შეუქცევადი გადაადგილება (ჩნდება პლასტიკური დეფორმაცია). მოდელი ასახავს მასალის ქცევას პლასტიკური დეფორმირების არეში.

მყისიერი დატვირთვისას (როცა  $\sigma > \sigma_{\text{ბ.ბ.ზრ}}$ ), დრეკადი ელემენტი  $H_1$  დამუხრუჭებულ ტვირთს აძლევს გადაადგილების შესაძლებლობას. ჩნდება მყისიერი პლასტიკური დეფორმაცია. ამ ელემენტის დრეკადობის მოდულს  $H_1$ -ს მყისიერი პლასტიკური დეფორმირების მოდული ვუწოდოთ.

ძაბვებისას  $\sigma > \sigma_{\text{ბ.ბ.ზრ}}$  მოდელის ჯამური მყისიერი დეფორმაცია შედგება მყისიერი დრეკადი და მყისიერი პლასტიკური დეფორმაციებისაგან  $\left( \varepsilon_{\text{მყ}} = \frac{\sigma}{H} + \frac{\sigma - \sigma_{\text{ბ.ბ.ზრ}}}{H_1} \right)$ , რაც იწვევს მოდელის მყისიერი დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობის შემცირებას. ამასთან, ამ მოდელში მასალა პლასტიკური დეფორმაციების არეში დეფორმირება წრფივად, მაგრამ შემცირებული დრეკადობის მოდულით.

მოდელის მუშაობის განხილვისას პლასტიკური დეფორმირების არეში ( $\sigma > \sigma_{\text{ბ.ბ.ზრ}}$ ) მივიღებთ განტოლებათა შემდეგ სისტემას:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_{E_1} + \sigma_k, \text{სადაც } \sigma_{E_1} = \sigma - \sigma_k = \varepsilon_{E_1} \cdot E_1, \sigma_k = k \cdot \frac{d\varepsilon_k}{dt}, \sigma_H = \varepsilon_H \cdot H; \\ \sigma_{H_1} = \sigma - \sigma_{\text{ბ.ბ.ზრ}} = \varepsilon_{H_1} \cdot H_1; \\ \varepsilon = \varepsilon_H + \varepsilon_{E_1} + \varepsilon_{H_1}, \text{სადაც } \varepsilon_H = \frac{\sigma}{H}, \varepsilon_{E_1} = \frac{\sigma - \sigma_k}{E_1}, \varepsilon_{H_1} = \frac{\sigma - \sigma_{\text{ბ.ბ.ზრ}}}{H_1}; \\ \varepsilon_{E_1} = \varepsilon_k. \end{cases} \quad (45)$$

ელემენტების დეფორმაციების შეჯამებით და ცალკეული ელემენტების ძაბვებისა და დეფორმაციების გამორიცხვით, მივიღებთ

უბან-უბან წრფივად დეფორმირებადი სხეულის დეფორმირების კანონს პლასტიკური დეფორმირების არეში ( $\sigma > \sigma_{b.b.ზღ}$ ):

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{n \cdot H} \cdot \varepsilon = \frac{H + H_1}{H \cdot H_1} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{H_1 + E}{n \cdot H \cdot H_1} \cdot \frac{E}{n \cdot H \cdot H_1} \cdot \sigma - \sigma \leq \sigma_{b.b.ზღ}. \quad (46)$$

სადაც  $E = \frac{H \cdot E_1}{H + E_1}$  – ხანგრძლივი დრეკადობის მოდულია;

$$n = \frac{k}{H + E_1} - \text{რელაქსაციის დროის კოეფიციენტი.}$$

დრეკადი დეფორმირების არეში ( $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზღ}$ ) ხუთეულმენტიანი მოდულის დეფორმირების კანონი შეესაბამება „ტიპური სხეულის“ დეფორმირების კანონს (34), რომელიც მიიღება (34)-დან, როცა  $H_1 \Rightarrow \infty$ .

როგორც ვხედავთ, დეფორმაციის მრუდის აპროქსიმაციისას წრფივი დამოკიდებულებებით (34) და (46), როცა  $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზღ}$  სრულდება დეფორმაციების, ძაბვებისა და მათი სიჩქარეების უწყვეტობის პირობა.

1) ცოცვადობის შემთხვევაში  $\sigma = const$  განტოლება (46) მიიღებს სახეს:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{H \cdot n} \cdot \varepsilon = \frac{H_1 \cdot \sigma + E(\sigma - \sigma_{b.b.ზღ})}{n \cdot H \cdot H_1}. \quad (47)$$

განტოლების (47) ზოგადი ამონახსნი საწყისი პირობის  $\left( t = 0, \varepsilon(0) = \frac{\sigma}{H} + \frac{\sigma - \sigma_{b.b.ზღ}}{H_1} \right)$  გათვალისწინებით, ანუ უბან-უბან წრფივად დეფორმირებადი სხეულის ცოცვადობის განტოლება პლასტიკური დეფორმირების არეში ( $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზღ}$ ) იქნება:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma - \sigma_{b.b.ზღ}}{H_1} - \left( \frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma}{H} \right) \cdot e^{\frac{E}{n \cdot H} t}. \quad (48)$$

როგორც ჩანს, გამოსახულება (48) შემოსახდურულია

$$\varepsilon(t \rightarrow \infty) \rightarrow \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma - \sigma_{b.b.ზღ}}{H_1}.$$

გამოსახულებიდან (48) შეიძლება მივიღოთ „ტიპური სხეულის“ ცოცვადობის განტოლება (35), როგორც უბან-უბან წრფივად

დეფორმირებული სხეულის ცოცვადობის კანონი დრეკადი დეფორმირების არეში ( $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზრ}$ ).

(35), (48) გამოსახულებების ანალიზმა აჩვენა, რომ დეფორმაციის მრუდის აპროქსიმაციისას დამოკიდებულებებში (35) და (46), როცა  $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზრ}$ , სრულდება დეფორმაციებისა და მათი დროში სიჩქარეების უწყვეტობის პირობა.

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{H_1 + H}{n(H + H_1)} \cdot \sigma = \frac{E(\sigma_{b.b.ზრ} + H_1 \cdot \varepsilon)}{n(H + H_1)}. \quad (49)$$

უბან-უბან წრფივად დეფორმირებული სხეულის დაბვათა რელაქსაციის კანონი პლასტიკური დეფორმირების არეში ( $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზრ}$ ) იქნება:

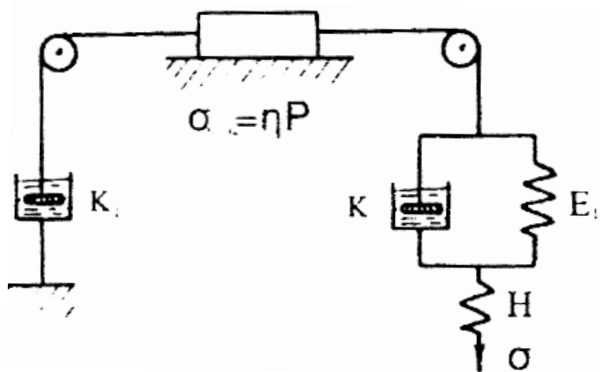
$$\sigma = \frac{E \cdot (\sigma_{b.b.ზრ} + H_1 \varepsilon)}{H_1 + E} + \left( \sigma + \frac{E \cdot (\sigma_{b.b.ზრ} + H_1 \varepsilon)}{H_1 + E} \right) e^{-\frac{H_1 + E}{n(H + H_1)} t}. \quad (50)$$

დაბვების რელაქსაციის კანონი დეფორმირების არეში ( $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზრ}$ ):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + (\sigma_0 - E\varepsilon) e^{-\frac{t}{\tau}},$$

სადაც, როცა  $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზრ}$  სრულდება უწყვეტობის პირობა.

ნახ. 4-ზე მოყვანილია ხუთელემენტური გამუჯობესებული რეოლოგიური მოდელი (ბ). მოდელი შედგება პარალელურად შეერთებული ა. იშლინსკის „ტიპური სხეულის“, მამუხრუჭებელი ტვირთისა და ბლანტი ( $k_1$ ) ელემენტისაგან [13].



ნახ. 4. კონსტრუქციული პლასტიკების ხუთელემენტური მოდელი (ბ)

დაბვებისა  $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზრ}$  მამუხრუჭებელი ტვირთი და ბლანტი ელემენტი, სიბლანტის კოეფიციენტით –  $k_1$  მოდელის მუშაობაში არ მონაწილეობდნენ,

და მოდელი აღწერს მასალის ქცევას დრეკადი დეფორმაციების არეში, როგორც ა. იშლინსკის სამედეგმენტისანი მოდელი.

ძაბვებისას  $\sigma \leq \sigma_{b.b.ზღ}$  მოდელის მუშაობაში ირთვება ბლანტი ელემენტი. განვსაზღვროთ ამ მოდელის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის განტოლება. მაშასადამე, შევადგინოთ განტოლებათა შემდეგი სისტემა:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sigma_H = \sigma_{E_1} + \sigma_k = \sigma_{b.b.ზღ} + \sigma_{k_1}; \\ \varepsilon = \varepsilon_H + \varepsilon_k + \varepsilon_{k_1}; \\ \varepsilon_k = \varepsilon_{E_1}; \\ \varepsilon_H = \frac{\sigma}{H}; \\ \varepsilon_{E_1} = \frac{\sigma - \sigma_k}{E_1}; \\ \frac{d\varepsilon_k}{dt} = \frac{\sigma - \sigma_{E_1}}{k}; \\ \frac{d\varepsilon_{k_1}}{dt} = \frac{\sigma - \sigma_{b.b.ზღ}}{k_1}. \end{array} \right. \quad (51)$$

სრული (ჯამური) დეფორმაციის მეორე რიგის წარმოებული გამოვსახოთ შემადგენელი ელემენტების მეორე რიგის წარმოებულების ჯამის სახით და სისტემის (51) განტოლებების გამოყენებით გამოვრიცხოთ მოდელის შემადგენელი ელემენტების ძაბვები და დეფორმაციები:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} &= \frac{d^2\varepsilon_H}{dt^2} + \frac{d^2\varepsilon_k}{dt^2} + \frac{d^2\varepsilon_{k_1}}{dt^2} = \frac{1}{H} \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{d((\sigma - \sigma_{E_1})/k)}{dt} + \frac{d((\sigma - \sigma_{b.b.ზღ})/k_1)}{dt} = \\ &= \frac{1}{H} \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{1}{k} \cdot \frac{d(\sigma - E_1 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_H - \varepsilon_{k_1}))}{dt} + \frac{1}{k} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{H} \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \\ &\frac{1}{H} \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{k \cdot H + k_1 \cdot H + k_1 \cdot E_1}{k \cdot k_1 \cdot H} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{k \cdot k_1} (\sigma - \sigma_{np}) - \frac{E_1}{k} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}. \end{aligned}$$

შედგად, მივიღებთ მოდელის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის შემდეგ განტოლებას:

$$\frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \frac{E}{n \cdot H} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{H} \cdot \frac{d^2\sigma}{dt^2} + \frac{n + n_1}{n \cdot n_1 \cdot H} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E}{n \cdot n_1 \cdot H^2} (\sigma - \sigma_{b.b.ზღ}), \quad (52)$$

სადაც  $E = \frac{H \cdot E_1}{H + E_1}$  - დრეკადობის ხანგრძლივი მოდულია;  $n = \frac{k}{H + E_1}$  -

რელაქსაციის მცირე დროის კოეფიციენტი;  $n_1 = \frac{k_1}{H}$  - რელაქსაციის დიდი დროის კოეფიციენტი.

განვიხილოთ ცოცვადობის შემთხვევა -  $\sigma = const$ , მაშინ განტოლება (52) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{H}{n \cdot H} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{E \cdot (\sigma - \sigma_{b.b.ზღ.})}{n \cdot n_1 \cdot H^2}. \quad (53)$$

ამ განტოლების ზოგადი ამონახსნი იქნება:

$$\varepsilon(t) = C_1 + C_2 \cdot e^{-\frac{E}{n \cdot H} t} + \frac{\sigma - \sigma_{b.b.ზღ.}}{n_1 \cdot H^2} \cdot t, \quad (54)$$

სადაც  $C_1$  და  $C_2$  - ნებისმიერი საინტეგრირაციო მუდმივებია.

საწყისი პირობის  $\left( t = 0, \varepsilon = \frac{\sigma}{H} \right)$  გათვალისწინებით (54)-დან გვექნება:

$$C_1 + C_2 = \frac{\sigma}{H}. \quad (55)$$

$C_1$  და  $C_2$  მუდმივების ცალსახა განსაზღვრისათვის გამოვიყენოთ ცოცვადობის შემდეგი თვისება: ჩამდგარი ცოცვადობის უბანზე ცოცვადობის მრუდი წრფელ გარდაიქმნება, ე.ი. თუ  $t \rightarrow t_{s.f.}$ , მაშინ  $C_2 \cdot e^{-\frac{E}{n \cdot H} t} \rightarrow 0$ , სადაც  $t_{s.f.}$  - ძაბვითა გარკვეულ დიაპაზონში არაჩამდგარი ცოცვადობის უბნის ხანგრძლივობაა.

ზემოაღნიშნული თვისების საფუძველზე შემოვიღოთ შემდეგი პირობა:

$$\varepsilon(t = t_{s.f.}) = \frac{\sigma}{E_{s.f.}}, \quad (56)$$

სადაც  $E_{s.f.}$  - ხანგრძლივი (მკვეთი) დრეკადობის მოდულის მინიმალური მნიშვნელობაა არაჩამდგარი ცოცვადობის უბანზე, როცა  $t = t_{s.f.}$ .

ბოლო პირობის (56) გამოყენებით (54) განტოლებიდან მივიღებთ:

$$\frac{\sigma}{E_{s.f.}} = C_1 + \frac{\sigma - \sigma_{b.b.ზღ.}}{n_1 \cdot H} \cdot t_{s.f.} \Rightarrow C_1 = \frac{\sigma}{E_{s.f.}} + \frac{\sigma - \sigma_{b.b.ზღ.}}{n_1 \cdot H} \cdot t_{s.f.}$$



ხოლო (55) გათვალისწინებით გვექნება:

$$C_2 = \frac{\sigma}{H} - C_1 = \frac{\sigma}{H} - \frac{\sigma}{E_{\text{ს.ფ}}} + \frac{\sigma - \sigma_{\text{ბ.ბ.ზღ.}}}{n_1 \cdot H} \cdot t_{\text{ს.ფ.}}$$

მიღებული მუდმივების (54) განტოლებაში ჩასმით მივიღებთ:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_{\text{ს.ფ}}} - \left( \frac{\sigma}{E_{\text{ს.ფ}}} + \frac{\sigma}{H} - \frac{\sigma - \sigma_{\text{ბ.ბ.ზღ.}}}{n_1 \cdot H} \cdot t_{\text{ს.ფ.}} \right) \cdot e^{-\frac{E}{n \cdot H} t} + \frac{\sigma - \sigma_{\text{ბ.ბ.ზღ.}}}{n_1 \cdot H} \cdot (t - t_{\text{ს.ფ.}}). \quad (57)$$

ცოცვალობის განტოლება (57) შემოუსაზღვრელია დროში, ანუ  $\varepsilon(t \rightarrow \infty) \rightarrow \infty$ .

კონსტრუქციული პლასტიკების (კპ) სრული დეფორმაციის განვითარების ექსპერიმენტული მონაცემების განტოლებით (57) აპროქსიმაციის სიზუსტის დასადგენად განტოლება (57) წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$\varepsilon(t) = A + B \cdot e^{-Ct} + D \cdot t, \quad (58)$$

სადაც  $A$ ,  $B$ ,  $C$  და  $D$  – მუდმივებია, რომლებიც განისაზღვრება მასალის ცოცვალობის ექსპერიმენტული მონაცემების საშუალებით,  $B = A - \varepsilon(t=0)$ .

(58) გამოსახულებით აღვწეროთ მინატექსტოლიტ  $T_1$ -ის სრული დეფორმაციის დროში განვითარების შემდეგი ექსპერიმენტული მონაცემები (ცხრ. 2):

ცხრილი 2

მინატექსტოლიტ  $T_1$ -ის სრული დეფორმაციის დროში განვითარების ექსპერიმენტული მონაცემები

$\sigma$ , კგ/მმ <sup>2</sup>	$\varepsilon(t) \times 10^3$					$T=20^\circ\text{C}$				
	0 სთ	5 სთ	10 სთ	20 სთ	40 სთ	60 სთ	80 სთ	100 სთ	200 სთ	300 სთ
27	13,17	13,38	13,45	13,53	13,62	13,7	13,74	13,77	13,92	14,07

მინატექსტოლიტ  $T_1$ -ის არაჩამდგარი ცოცვალობის (ანუ დეფორმაციის სიჩქარის მკვეთრი ცვალებადობის) უბნის ხანგრძლივობა, როცა  $\sigma = 0,6 \cdot \sigma_{\text{ღრ}} = 27$  კგ/მმ<sup>2</sup> –  $t_{\text{ს.ფ.}} = 100$  საათია.  $A$ ,  $B$  და  $D$  მუდმივების განსაზღვრისათვის დროის მომენტებისათვის  $t=100$  სთ და  $t=300$  სთ შევადგინოთ განტოლებათა შემდეგი სისტემა:

$$\begin{cases} A + 100 \cdot D = 0,01377; \\ A + 300 \cdot D = 0,01407. \end{cases}$$

სისტემის ამოხსნით მივიღებთ:

$$A = 0,01362; D = 0,0000015; B = A - \varepsilon(t=0) = 0,01362 - 0,01317 = 0,00045.$$

$C$  მუდმივის განსაზღვრისათვის გამოვიყენოთ დროის საწყის მომენტთან უახლოესი მონაცემები ანუ. როცა  $t = 5$  სთ:

$$0,01362 - 0,00045 \cdot e^{-5C} + 0,0000075 = 0,01338.$$

ბოლო განტოლების ამოხსნის მივიღებთ:  $C = 0,119567$ .

შედგავდ, მიიღება სრული დეფორმაციის განვითარების შემდეგი კანონი:

$$\varepsilon(t) = 0,01362 - 0,00045 \cdot e^{-0,1195674-t} + 0,0000015 \cdot t.$$

მაქსიმალური ფარდობითი ცდომილება მიღებული სრული დეფორმაციის განვითარების კანონსა და ექსპერიმენტულ მონაცემებს შორის არ აღემატება 0,583%.

ძაბვათა გარკვეულ დიაპაზონში კპ-ის სრული დეფორმაციის განვითარების ექსპერიმენტული მონაცემების განტოლებით (57) აპროქსიმაციის სიზუსტის დასადგენად განტოლება (57) წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$\varepsilon(\sigma) = A \cdot \sigma - B \cdot e^{-C\sigma} + D \cdot (\sigma \leq \sigma_{b.b.წრ}) \cdot (t - t_{ა.წ}), \quad (59)$$

სადაც  $A, B, C$  და  $D$  – მუდმივებია, რომლებიც განისაზღვრება მასალის ცოცვადობის ექსპერიმენტული მონაცემების საშუალებით,  $B = A \cdot \sigma - \varepsilon(t=0, \sigma) - D \cdot (\sigma \leq \sigma_{b.b.წრ}) \cdot t_{ა.წ}$ .

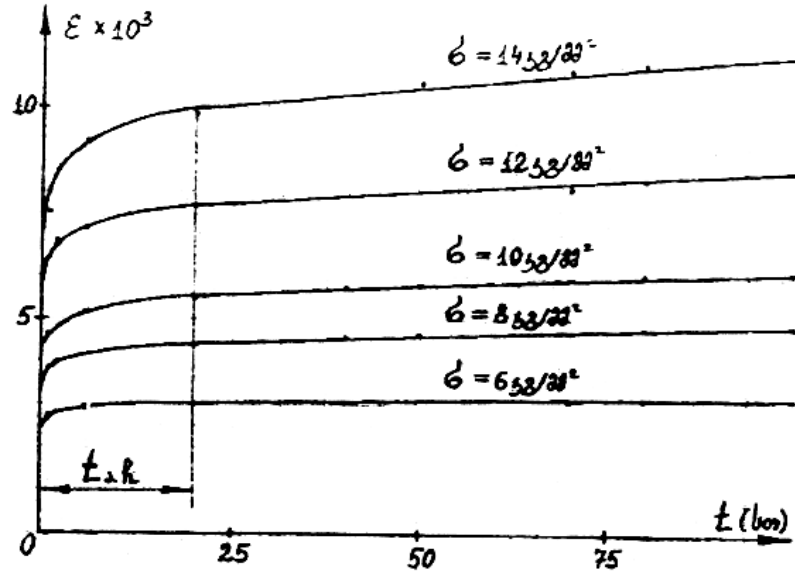
გამოსახულებით (59) აღვწეროთ მინატექსტოლიტ  $\Xi T \Phi$ -BM-78 არმირების მთავარი მიმართულებიდან  $45^\circ$ -ით კუმშვისას სრული დეფორმაციის დროში განვითარება (ცხრ. 3)

ცხრილი 3

მინატექსტოლიტ  $\Xi T \Phi$ -BM-78 არმირება  $45^\circ$ -ით კუმშვისას

$\sigma$ , კგ.მმ <sup>2</sup>	$\varepsilon(t) \times 10^3$									
	$T=20^\circ C$									
	0 სთ	1 სთ	2 სთ	6 სთ	20 სთ	40 სთ	50 სთ	70 სთ	80 სთ	100 სთ
8	3,4	3,86	4,0	4,22	4,4	4,6	5,65	4,7	4,8	4,85
10	4,2	4,63	4,95	5,19	5,48	5,76	5,85	6,02	6,05	6,07

მინატექსტოლიტ  $\text{ЭТФ-BM-78}$  არმირების მთავარი მიმართულებიდან  $45^\circ$ -ით კუმშვისას ხანგრძლივი სიმტკიცის ქვედა ზღვარი (ნახ. 5) -  $\sigma_{\text{ხ.ხ.ზრ}} = 6 \text{ კგ/მმ}^2$ .



ნახ. 5. მინატექსტოლიტ  $\text{ЭТФ-BM-78}$  არმირების მთავარი მიმართულებიდან  $45^\circ$ -ით კუმშვის სრული დეფორმაციის დროში განვითარების მრუდები

მინატექსტოლიტ  $\text{ЭТФ-BM-78}$ -ის არაჩამდგარი ცოცვადობის ხანგრძლივობა ძაბვათა დიაპაზონში  $\sigma = 8-10 \text{ კგ/სმ}^2 - t_{\text{ა.რ.}} = 20 \text{ სთ.}$

$A$ ,  $B$  და  $D$  მუდმივების დასადგენად გამოვიყენოთ საშუალო კვადრატა მეთოდი [28]. მომენტისათვის  $t = 20 \text{ სთ}$  და  $t = 100 \text{ სთ}$  ექსპერიმენტული მონაცემების გამოყენებით (59)-დან მივიღებთ განტოლებათა შემდეგ სისტემას:

$$\begin{cases} 8 \cdot A = 0,0044; \\ 10 \cdot \Phi = 0,00548 \\ 8 \cdot A + 150 \cdot B = 0,00485; \\ 10 \cdot A + 320 \cdot B = 0,00607; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 18 \cdot A = 0,00988; \\ 18 \cdot A + 480 \cdot D = 0,01092. \end{cases}$$

საშუალო კვადრატა მეთოდით ამ განტოლებათა სისტემის ამოხსნისას მივიღებთ:

$$A = 0,000548888; \quad D = 0,000002166.$$

C მუდმივის განსაზღვრისათვის გამოვიყენოთ მიღებული A, D მნიშვნელობები და დროის საწყის მომენტთან უახლოესი ექსპერიმენტული მონაცემები, ანუ  $t = 1$  საათისათვის. მაშინ (59)-დან მივიღებთ

$$0,0041391104 - 0,000904464 \cdot e^{-C} - 0,000082308 = 0,00386.$$

$$0,0054889 - 0,0011156 \cdot e^{-C} - 0,000164616 = 0,004163.$$

ბოლო განტოლების შეჯამებით და მიღებული განტოლების ამოხსნით მივიღებთ:

$$C = 0,569420317.$$

შედგავდ, ძაბვათა დიაპაზონისათვის  $\sigma = 8-10$  კგ/მმ<sup>2</sup> მივიღებთ სრული დეფორმაციის განვითარების შემდეგი კანონი:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t, \sigma) = & 5,4889 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma - (5,4889 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma - \varepsilon(t=0, \sigma) - 4,332 \cdot 10^{-5} \cdot (\sigma - 6)) \times \\ & \times e^{-0,569420317t} + 2,166 \cdot 10 \cdot (\sigma - 6)(t - 20). \end{aligned}$$

მიღებული კანონით გამოთვლილი სრული დეფორმაციების მნიშვნელობა და მისი მაქსიმალური ფარდობითი ცდომილება ( $\Delta_{\max}$ ) ექსპერიმენტული მონაცემების მიმართ წარმოდგენილია შემდეგ ცხრილ 4-ში.

როგორც ვხედავთ, ბოლო მოდელის ცოცვალობის განტოლება (57) საკმაოდ ზუსტად აღწერს ცოცვალობის ექსპერიმენტულ მონაცემებს ძაბვებისას, რომლებიც აღემატება მასალის ხანგრძლივი სიმტკიცის ზღვარს ანუ პლასტიკური ცოცვალობის არეში.

ცხრილი 4

მაქსიმალური ფარდობითი ცდომილება ( $\Delta_{\max}$ ) ექსპერიმენტული მონაცემების მიმართ

$\sigma$ , კგ/მმ <sup>2</sup>	$\varepsilon(\sigma, t) \times 10^3$									
	0 სთ	$\Delta_{\max}$ %	1 სთ	$\Delta_{\max}$ %	2 სთ	$\Delta_{\max}$ %	6 სთ	$\Delta_{\max}$ %	20 სთ	$\Delta_{\max}$ %
8	3,4	0	3,797	1,66	4,024	4,59	4,3	1,9	4,391	0,2
10	4,2	0	4,693	1,36	4,975	0,52	5,33	2,72	5,489	0,164
$\sigma$ , კგ/მმ <sup>2</sup>	$\varepsilon(\sigma, t) \times 10^3$									
	40 სთ	$\Delta_{\max}$ %	50 სთ	$\Delta_{\max}$ %	70 სთ	$\Delta_{\max}$ %	80 სთ	$\Delta_{\max}$ %	100 სთ	$\Delta_{\max}$ %
8	4,478	2,73	4,521	2,85	4,608	2,0	4,651	3,2	4,738	2,37
10	5,662	1,73	5,75	1,76	5,922	1,65	6,009	0,69	6,182	1,85

## 2.1.2. მემკვიდრეობის თეორია

მემკვიდრეობის თეორიის საფუძველს წარმოადგენს ბოლცმანის დატვირთვების სუპერპოზიციის პრინციპი, სადაც გათვალისწინებულია  $\tau$  მომენტში მოდებული დატვირთვების (ძაბვების) ზეგავლენა  $t$  მომენტში განვითარებულ დეფორმაციებზე.

ამ თეორიის მიხედვით დეფორმაციების აღწერისათვის, ძაბვისა და დეფორმაციას შორის დამოკიდებულების წრფივობის შემთხვევაში გამოიყენება ბოლცმან-ვოლტერრას განტოლება [25]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{H} + \frac{1}{H} \cdot \int_0^t K(t-\tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau, \quad (60)$$

სადაც ძაბვასა და დეფორმაციას შორის დამოკიდებულების არაწრფივობის შემთხვევაში გამოიყენება უფრო ზოგადი ი. რაბოტნოვის განტოლება [33, 34, 36]:

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau, \quad (61)$$

სადაც  $\varphi(\varepsilon)$  – მხოლოდ დეფორმაციების ფუნქციაა, რომელიც აღწერს მასალის გაჭიმვის დიაგრამას;  $\sigma(\tau)$  – ზოგად შემთხვევაში დროში ცვალებადი ძაბვა;  $K(t-\tau)$  – ინტეგრალური (52) განტოლების გული, რომელიც განსაზღვრავს დროის  $t$  მომენტში დეფორმაციაზე ერთეულოვანი ძაბვის ზეგავლენას, რომელიც მოქმედებდა წინა  $\tau$  მომენტში დროის ერთეულის განმავლობაში.

განტოლების (61) გამოყენების ძირითად სირთულეს წარმოადგენს გულის  $K(t-\tau)$  შერჩევა. თუ განტოლებაში (61) გული აიღება ექსპონენციალური ფუნქციების ჯამის სახით, მაშინ განტოლება (61) შეესაბამება წრფივ მუდმივკოეფიციენტებიან დიფერენციალურ განტოლებას. მაგრამ, როგორც ექსპერიმენტებიდან გამომდინარეობს, ცოცვალობის მრუდები ცუდად აღიწერება განტოლებით ექსპონენციალური გულით.

1) ცოცვადობის შემთხვევაში  $\sigma = const = \sigma_c$  (61) მიიღებს სახეს:

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma_c \left( 1 + \int_0^t K(\tau) d\tau \right) = \sigma_c \cdot (1 + G(t)), \quad (62)$$

სადაც  $G(t)$  – ცოცვადობის ფუნქციაა.

კარგ შესაბამისობას ექსპერიმენტების შედეგებთან აძლევს შემდეგ გამოსახულებას:

$$G(t) = a \cdot t^b, \quad (63)$$

საიდანაც გვექნება:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_c}{H} (1 + a \cdot t^b), \quad (64)$$

სადაც  $a$  და  $b$  – მხოლოდ ტემპერატურაზე დამოკიდებული მუდმივებია,  $H$  – დრეკადობის მოდულია.

მაშასადამე, ინტეგრალური განტოლების გული შეიძლება მიღებული იქნას ექსპერიმენტულად მიღებული მარტივი ცოცვადობის ფუნქციიდან, ე.ი. (63) გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$K(t - \tau) = a \cdot b(t - \tau)^{b-1}. \quad (65)$$

მემკვიდრეობის თეორია კარგად აღწერს აგრეთვე უკუცოცვადობის (61) განტოლების ამოხსნისას ძაბვის მიმართ მივიღებთ:

$$\sigma(t) = \varphi(\varepsilon) - \int_0^t T(t - \tau) \cdot \varphi(\varepsilon) d\tau, \quad (66)$$

სადაც  $K(t - \tau)$  წარმოადგენს (61) განტოლების რეზოლვენტას.

მარტივი რელაქსაციის შემთხვევისათვის  $\varepsilon = const$  განტოლებიდან (66) მივიღებთ:

$$\sigma(t) = \varphi(\varepsilon) \cdot (1 - R(t)), \quad (67)$$

ხოლო

$$R(t) = \int_0^t T(t - \tau) d\tau, \quad (68)$$

(68)-ის დიფერენცირების შემდეგ მივიღებთ:

$$\frac{dR(t)}{dt} = T(t). \quad (69)$$

მაშასადამე, ცოცვადობაზე ექსპერიმენტის საშუალებით  $G(t)$  ფუნქციის განსაზღვრის შემდეგ შესაძლოა  $K(t-\tau)$  გულის განსაზღვრა განტოლებით (65), ხოლო შემდეგ ინტეგრალური განტოლების რეზოლვენტის დადგენისას, ფორმულით (68) შესაძლებელია რელაქსაციის ფუნქციის პოვნა.

ინტეგრალური განტოლების (61) რეზოლვენტად შეიძლება ი.რაბოტნოვის გულის (65) გამოყენება, რომელიც საკმაოდ დამაკმაყოფილებლად აღწერს მოკლევადიან პერიოდში (100 სთ-მდე) მახვების რელაქსაციის პროცესს კონსტრუქციულ პლასტიკებში [11].

(67)-ში (65)-ის ჩასმით მივიღებთ:

$$\frac{\sigma_0}{H} - \sigma(t) = \int_0^t a \cdot b \cdot (t-\tau)^{b-1} \cdot \sigma(\tau) d\tau. \quad (70)$$

განტოლების (70) დროით დიფერენცირებისას, მივიღებთ:

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} + a \cdot b \cdot t^{b-1} \sigma(t) = 0. \quad (71)$$

განტოლების (71) ამონახსნი იქნება:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-a \cdot t^b}. \quad (72)$$

როგორც ვხედავთ, განტოლებიდან (72), როცა  $t \rightarrow \infty$  მაზვა მცირდება ნულამდე, რაც არ შეესაბამება რეალურ სურათს.

## 2.2. გაჭიმვაზე ბეტონის სტატისტიკური სიმტკიცის სტრუქტურული ანალიზი

განვიხილავთ, რა ბეტონს, როგორც მარცვლოვანი სტრუქტურის კომპოზიციური მასალას თავიდან შევჩერდებით კომპოზიციური მასალების ზოგიერთ საერთო პრინციპებზე.

ხელოვნურ მასალებს, რომელიც შედგება ორი ან რამდენიმე კომპონენტისაგან, რომელთაც სხვადასხვა ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები გააჩნიათ, ეწოდებათ კომპოზიტური მასალები (კომპოზიტები). კომპონენტები შეიძლება იყვეს მყიფეები, პლასტიკურები, დრეკადები,

დრეკად-ბლანტები, მაღალელასტიურები და გაზისმაგვარები. შესაბამისი კომპონენტების შერჩევა, საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ ახალი მასალები, რომლებშიც მაღალი სიმტკიცე და სიხისტე შეხამებულია რიგ დადებით თვისებებთან (მცირე მოცულობითი წონა, აგრესიული გარემოსადმი მდგრადობა და სხვა). კომპოზიცია უნდა ფლობდეს ისეთ თვისებებს რომელიც არ გააჩნია მის კომპონენტებს ცალ-ცალკე (სინერგეტიკული ეფექტი) [170].

თანამედროვე ხელოვნური მასალების პრინციპი, როგორც ცნობილია აღებულია ბუნებისაგან; ცხოველთა მრავალსახეობა და მცენარეული ქსოვილები, კომპოზიციური სტრუქტურის თავისებურებებია.

მივალწიოთ მაღალ სიმტკიცეს, ამ სიტყვის საინჟინრო აზრით ნიშნავს, ერთდროულად უზრუნველყოთ პლასტიკური დეფორმაციის და მყიფე რღვევის მაღალი წინაღობა. ცნობილია, რომ მასალის სიმტკიცის მაჩვენებლის ძლიერი გაზრდა იწვევს მათი პლასტიკურობის დაკლებას და პირიქით. როგორც ვნახეთ წინა 2.1 – 2.1.1-2.1.2 რეოლოგიის დროს სხვადასხვა მასალებისაგან შემდგარი კომპოზიციური მასალების შექმნის პრინციპი არის შესაბამისი კომპონენტების მაჩვენებლების ვარირება.

### **2.2.1. ბეტონის, როგორც კომპოზიციური მასალის სტრუქტურული ელემენტების შესახებ**

თანამედროვე კომპოზიციური მასალები იყოფა სამ ძირითად კლასად: დისპერსულად-განმტკიცებული, ნაწილაკებით განმტკიცებული და ბოჭკოებით არმირებული [170].

ნაწილაკებით განმტკიცებულ კომპოზიციებში, დატვირთვა ნაწილდება მატრიცასა და ნაწილაკებს შორის, ამასთან ნაწილაკების მოცულობითი წილი 25%. ნაწილაკების განივი და საშუალო თავისუფალი გზა მატრიცაში ერთ მიკრონზე მეტია. ასეთ კომპოზიციებს განეკუთვნება ლითონის სხვადასხვა შენაერთები, ლითონ-კერამიკული



შენაერთები და სხვა. მყიფე კომპოზიციებში ნაწილაკების როლი მდგომარეობს მატრიცის შეზღუდვაში და სიმტკიცის უზრუნველყოფაში.

კომპოზიციების სიმტკიცე იზრდება მატრიცის მოცულობითი კონცენტრაციის და ნაწილაკებს შორის საშუალო თავისუფალი გზის შემცირების პროპორციულად. რის შედეგადაც მყიფე კომპოზიციებში სიმტკიცე იწყებს კლებას. პლასტიკურ კომპოზიციებში სიმტკიცე არ არის დამოკიდებული მატრიცის მოცულობით წილზე.

მატრიცა, თავისი მნიშვნელობით ნაწილაკებით განმტკიცებულ კომპოზიციურ მასალებში თამაშობს შუალედურ როლს კომპოზიტების ორ სხვადასხვა კლასს - დისპერსულ განმტკიცებულსა და ბოჭკოვან არმირებულს შორის. დისპერსიულ-განმტკიცებულ მასალებში მატრიცა არის ძირითადი კომპონენტი, რომელიც იღებს დატვირთვას. ბოჭკოებით არმირებულ მასალებში მისი ფუნქციაა გადასცეს დატვირთვა ბოჭკოებს, ხოლო ნაწილაკებით განმტკიცებულ მასალებში დატვირთვა ნაწილდება მატრიცასა და ნაწილაკებს შორის. ნაწილაკები მაშინ იწყებენ განმამტკიცებელ მოქმედებას, როდესაც ისინი მექანიკური შევიწროების მოქმედებით მატრიცის დეფორმაციას ზღუდავენ. მატრიცის შევიწროების ეფექტის მაჩვენებელია კომპოზიციის დრეკადობის მოდულის გადახრა მეტ მხარეს, ვიდრე კომპონენტებში ძაბვების ტოლობის პირობიდან გამოთვლილი.

დამაკავშირებელი მასალების როლში, რომლებიც ასრულებენ მატრიცის როლს გამოიყენება ცემენტები, პოლიმერები, ლითონები და სხვა, რომელთა მექანიკური თვისებები განისაზღვრება ჩვეულებრივი გამოცდებით. კომპოზიტების სიმტკიცე განისაზღვრება არა მარტო შემაკავშირებელი მასალებით, არამედ არსებითი მნიშვნელობა აქვს მასალის შემაკავშირებელ სიმტკიცეს არმირებულ ელემენტთან (ადჰეზია). სტრუქტურის დეფექტების გავლენა ადჰეზიაზე ჯერჯერობით არ არის საკმარისად შესწავლილი.

კომპოზიტის სიმტკიცის პროგნოზირება, კომპონენტების ცნობილი მექანიკური თვისებების მიხედვით საკმაოდ რთული ამოცანაა დრეკადი მაჩვენებლებისგან განსხვავებით, რადგან ამ შემთხვევაში არსებით გავლენას ახდენს სხვადასხვა ეფექტები, მარცვლის და ბოჭკოს დონეზე.

კომპოზიციური მასალების თეორიაში მითითებულია, რომ მთავარია, არა სიმტკიცის რაოდენობრივი დადგენა არამედ შესაბამისი კომპონენტების შერჩევის კრიტერიუმის განსაზღვრა უკეთესი თვისებების კომპოზიტის მისაღებად.

ნაშრომ [30]-ის თანახმად, შეიძლება დაისახოს ორი გზა, კომპოზიტების მექანიკის ასაგებად. პირველი გზა-ფენომენოლოგიური, რომელიც გვთავაზობს უკვე ცნობილ დრეკადობის თეორიის, ცოცვადობის თეორიის და სხვა განტოლებების გამოყენებას. მექანიკური მახასიათებლები ამ შემთხვევაში განისაზღვრება კომპოზიტების ნიმუშების ლაბორატორიული გამოცდით. მეორე გზა ეყრდნობა სტრუქტურულ მოსაზრებებს, რომლის თანახმადაც კომპოზიტების მექანიკური თვისებები უნდა დავუკავშიროთ კომპონენტების ფიზიკურ თვისებებს, მარმირებელი ელემენტების ზომებს და სხვა სტრუქტურულ პარამეტრებს. ეს გზა ბუნებრივად აკავშირებს დრეკადობის, ცოცვადობის და სიმტკიცის საკითხებს. საშუალებას იძლევა ვიწინასწარმეტყველოთ კომპოზიციების მექანიკური თვისებებიდან გამომდინარე და გადავწყვიტოთ კომპოზიციური მასალების ოპტიმალური პროექტირების საკითხი.

კომპოზიციურ მასალებში, მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს სტოქასტიკურ კომპოზიტებს. ყოველგვარი კომპოზიტის პრაქტიკული თვისება შემთხვევითია, რადგან კომპოზიტებშიც (ერთმიმართულებიანი ბოჭკოვანი მასალა, ფენოვანი კომპოზიტი და ა.შ.) კი შეიმჩნევა თვისებების გაბნევა, რომელიც დაკავშირებულია მარმირებელი ელემენტის მცირე გამრუდებასთან, ადჰეზიასთან, ადგილობრივ დაზიანებებთან და სხვა. მასალების სხვა კლასი, სპეციალურად დაპროექტებულია სტოქასტიკურად.

მათი მიზანია კვაზიიზოტროპული და კვაზიერთგვაროვანი მასალის მიღება. ამ კლასს მიეკუთვნება ბეტონებიც [30].

სხვადასხვა კომპოზიტების სიმტკიცის თეორიის დამუშავებისას, შეიძლება შევზღუდოთ “კომპოზიციური მასალის” გაგება. ჩვენ გვინტერესებს ისეთი კომპოზიციური მასალები, სადაც შეგვიძლია ვისარგებლოთ მარცვლის, მატრიცის და მათი შეჭიდულობის სხვადასხვა მახასიათებლებით. მრავალფაზიანი მასალის სიმტკიცე განისაზღვრება, როგორც სტრუქტურული ელემენტების თვისებებით, ისე მათი ურთიერთქმედებით. მრავალფაზიანი მასალების დეფორმირების პროცესში შეიძლება გამოვლინდეს რღვევის სხვადასხვა ტიპი, დამოკიდებული იმაზე თუ რომელი ურთიერთქმედებაა უპირატესი: ადჰეზიური, ავტოჰეზიური თუ კოჰეზიური [3].

ბეტონის, როგორც მარცვლოვანი სტრუქტურის მქონე კომპოზიციური მასალის განხილვისას პირველ რიგში დგება მისი მახასიათებლების პროგნოზირება, მისი სტრუქტურული ელემენტების მახასიათებლებიდან გამომდინარე, რომელთა როლში გამოდის მატრიცა, შემვსების მარცვალი და მათი შეჭიდულობა. პირველი ორი სტრუქტურული ელემენტის შესწავლას აქვს მრავალწლიანი გამოცდილება, რასაც ვერ ვიტყვით შემვსების ცემენტის ქვასთან შეჭიდულობის საკითხზე. ა. ნევილი თვლის მას მნიშვნელოვან ფაქტორად [126]. ამ საკითხების მიმოხილვა მოცემულია [53, 218, 230]. საკონტაქტო ზემოქმედების საკითხებს დიდი მნიშვნელობა ენიჭება დისპერსულ სტრუქტურებში [207, 209].

ზევით აღნიშნული სტრუქტურული ელემენტები (მატრიცა, მარცვალი, შეჭიდულობა) განაპირობებენ ბეტონის რღვევის ხასიათს [15, 21, 37, 53, 54, 65, 117, 120, 140, 200, 208] ბეტონის მთელ რიგ შემოთავაზებულ მოდელებში [12, 22, 49, 65, 93, 142, 210, 211, 217, 225] გათვალისწინებულია ამ მასალის კომპოზიციური ხასიათი. ბეტონის, როგორც კომპოზიციური მასალის განხილვისას მისი მახასიათებლები

დამოკიდებულია სტრუქტურული ელემენტების მახასიათებლებზე. გასათვალისწინებელია, რომ ცემენტის ქვის თვისებები, რომლებიც მყარდება თავისუფალ მდგომარეობაში არ ემთხვევა ცემენტის ქვის თვისებებს, რომლებიც მყარდება შემდგომთან კონტაქტის პირობებში. სხეულში ბეტონის მოჭიმვის პირობებში შემდგომი ასევე იძენს ახალ თვისებებს.

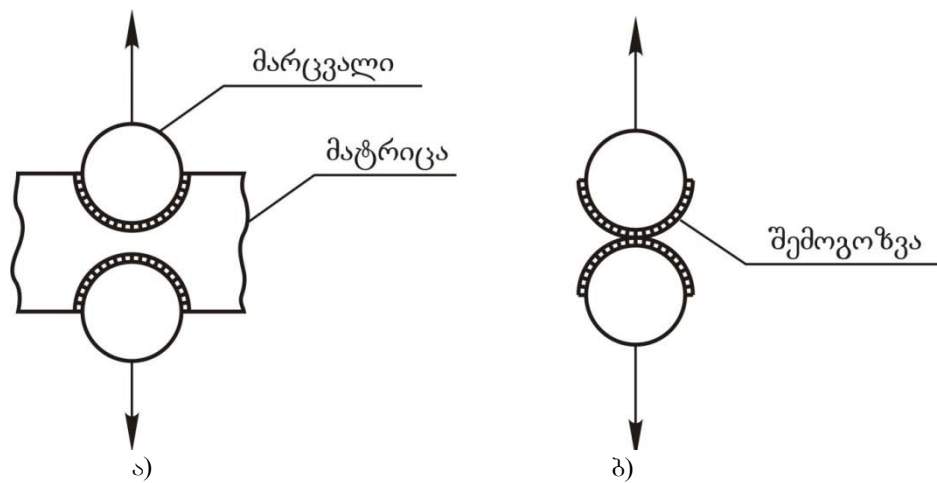
ცემენტის ქვისა და შემდგომის შეჭიდულობის შესწავლისას საჭიროა გავითვალისწინოთ, რომ ბეტონის სხეულში ეს მახასიათებლები არ არის ტოლფასი, სხვადასხვა სახის მოდელური გამოცდებისას. თუმცა თანამედროვე გამოკვლევებში ხშირად ვერ ხერხდება ფიზიკური სიდიდეების გაზომვა, მხოლოდ სტატისტიკური ანალიზი გვაძლევს საშუალებას, გავაკეთოთ საიმედო დასკვნები ბევრ მოვლენაზე [184].

ცემენტის ქვასა და შემდგომს შორის კავშირები ხასიათდება სხვადასხვანაირად. მაგალითად [218]-ში განხილულია კავშირების სამი სახე: ა) მექანიკური შეჭიდულობა, შემდგომის ზედაპირის უსწორმასწორების ხარჯზე; ბ) ცემენტის ქვის მესრის და შემავსებლის იონური კავშირი; გ) კაპილარული კავშირი, განპირობებული თხევადი ფაზის არსებობით ცემენტის ქვასა და შემდგომის საზღვარზე.

ნაშრომ [114]-ში საკონტაქტო ზონად იწოდება მიკრომოცულობა, პირობითად შემოსაზღვრული ორი კონცენტრული ზედაპირით, რომელიც გადის შემდგომ მარცვალში და ცემენტის ქვის მოცულობაში ისეთ მანძილზე, სადაც პრაქტიკულად არ აისახება თანხები ფაზების გავლენა. ამგვარად, საკონტაქტო ზონა შედგება ცემენტის ქვის და შემდგომი მარცვლის საკონტაქტო ფენისაგან და მათი გამყოფი ზედაპირისაგან. მიდგომის ასეთ ჩარჩოებში, ჩვენს მიერ დამუშავებულ ბეტონის სიმტკიცის თეორიაში, მესამე სტრუქტურულ ელემენტს შეიძლება ვუწოდოთ “საკონტაქტო ზონის სიმტკიცე“. საკონტაქტო ზონა აქვს ყველა კომპოზიციურ მასალას, მათში სტრუქტურულ ელემენტად განხილულია “არმირებადი ელემენტი ან შემდგომი” (ბოჭკო, ნაწილაკი,

მარცვალი და სხვა), მათი “მატრიცა” და “შეჭიდულობა” [216]. არსებობს აგრეთვე “საკონტაქტო ბადის ცნება” [196] და სხვა. ხსნარი (ან ცემენტის ქვა) ბეტონში მიდის როგორც მარცვლების “შემოგოზვა”, რომელიც უზრუნველყოფს “შეჭიდულობის” ელემენტს, ასევე ავსებს მარცვლებს შორის სიცარიელებს.

“შეჭიდულობის” ელემენტის რაოდენობრივი შეფასება შეიძლება მოხდეს ნახ. 6 სქემის მიხედვით.



ნახ. 6. „შეჭიდულობის“ ცნების ფორმულირება

ა) ჩვეულებრივი ბეტონი; ბ) მსხვილფორიანი ბეტონი („შემოგოზვა“, რომელიც უზრუნველყოფს „შეჭიდულობის“ ელემენტს; მატრიცას, ე.ი. დუღაბს მარცვლებს შორის სივრცეში, როცა ასეთი არ არსებობს).

აღსანიშნავია, რომ მოლეკულური კონტაქტის რღვევა მყარ

სხეულებში ფაზათაშორის საზღვარზე ნაკლებად რეალურია (25).

საკონტაქტო ზონის სიმტკიცეს დიდი მნიშვნელობა აქვს ბეტონის დინამიკური სიმტკიცისათვის [15], ამტანუნარიანობისათვის და

ხანმედეგობისათვის [200], ცვეთმედეგობისათვის [54] და სხვა.

გახურებისადმი მედეგია ბეტონები, რომელთა საკონტაქტო ფენა მტკიცეა [127]. შემავსებლისა და ხსნარის კონტაქტის გავლენა ბეტონის დეფორმაციულობაზე აღნიშნულია ექსპერიმენტულ გამოკვლევებში [187].

კონტაქტში მოწყვეტაზე სიმტკიცეს შეუძლია განსაზღვროს ბეტონის სიმტკიცის  $1/3$ , ხოლო, თუ გავითვალისწინებთ სრულ შეკავშირებას, მაშინ ბეტონის სიმტკიცის  $2/3$  [53].

ექსპერიმენტულ გამოკვლევათა ფართო მიმოხილვა შემდგომის ნარევთან შეჭიდების საკითხზე მოყვანილია [53]-ში; სადაც აღნიშნულია, რომ კონტაქტში სიმტკიცე მოწყვეტაზე არის ცემენტის ქვის სიმტკიცის 0,33-0,67 საზღვრებში. მასთან, ის დამოკიდებულია შემდგომის მინერალურ-პეტროგრაფიულ ხასიათზე. აგრეთვე აღნიშნულია, რომ შემდგომის სიდიდის ზრდასთან 5-10 მმ-დან 20, 40, 60, 75 მმ-მდე სიმტკიცის მაჩვენებელი კონტაქტის მოწყვეტაზე ეცემა შესაბამისად 0.82; 0.49; 0.18 და 0.11 ნაწილამდე, რაც არის შეკლების შედეგი, რომლის როლი მარცვლის ზომის გაზრდასთან ერთად იზრდება. [53]-ში აღწერილ ერთ-ერთ ექსპერიმენტში სიმტკიცემ მოგლეჯაზე კონტაქტში შეადგინა 16-27 კგ/სმ<sup>2</sup> (1.6-2.7 მპა), როდესაც  $f/c=0.36-0.265$ . ამასთან, ცემენტის ქვის სიმტკიცემ, გაჭიმვაზე შეადგინა 37-40 კგ/სმ<sup>2</sup> (3.7-4.0 მპა), ხოლო ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე იყო 670-900 კნ/სმ<sup>2</sup> (67-90მპა). შედარებისათვის მივუთითებთ, რომ ეპოქსიდო ფირისათვის შეჭიდულობა შუშასთან შეადგენს 140-280 კნ/სმ<sup>2</sup> (14-28 მპა) [170].

შემდგომის ზედაპირის ხაოიანობის მომატებით ბეტონის სიმტკიცე, მარკით 200-300 იზრდება 30%-ით, ხოლო მაღალი მარკის ბეტონის 50%-მდე [53].

$V$  მოცულობის შემდგომის მთლიანი ზედაპირის  $F$  ფართობი, შეიძლება განისაზღვროს ისე, როგორც [53]-ში.  $F=F_0 \cdot K_{\text{ფ}} \cdot K_{\text{რ}}$ , სადაც  $F_0-V$  მოცულობის სხეულის მინიმალური ზედაპირია,  $K_{\text{ფ}} = 1.27-1.55$  საწყისი შემდგომის ფორმის კოეფიციენტი,  $K_{\text{რ}}=1.18-1.4$  ზედაპირის რელიეფის კოეფიციენტი.

სხვადასხვა შემდგომის ექსპერიმენტული მონაცემები, სიმტკიცურ და დეფორმაციულ თვისებებზე მოცემულია [53]-ში. შემდგომის დრეკადობის მოდულის და მათი ცემენტის ქვასთან შეჭიდულობის სიმტკიცე მოცემულია [132]-ში. ქვის სხვადასხვა მასალების სიმტკიცის მონაცემები რღვევაზე, დრეკადობის მოდული და პუასონის კოეფიციენტი მსუბუქი ბეტონებისათვის განხილულია [108,167] ნაშრომებში.

მძიმე ბეტონებში, მსხვილი შემვსების როლი ნაკლებად შესამჩნევია ვიდრე მსუბუქ ბეტონებში. ასე მაგალითად, [134]-ში ქანის სიმტკიცის შეცვლით  $700-2700$  კგ/სმ<sup>2</sup> (70-270 მპა); მძიმე ბეტონის სიმტკიცე იცვლება  $180-205$  კგ/სმ<sup>2</sup> (18–20.5 მპა) საზღვრებში, ამასთან  $f/c=0.58$ . მსუბუქი ბეტონის სიმტკიცეზე შემვსების მნიშვნელოვანი გავლენა აღნიშნულია ყველა ნაშრომში. შემვსების, მატრიცის და ადჰეზიის მახასიათებლებს დიდი ყურადღება ექცევა ნახევრადდისპერსულ არეებში [34].

ბეტონის მათემატიკური მოდელის შექმნა, საშუალებას მოგვცემს რაოდენობრივად შევაფასოთ ბეტონის ამა თუ იმ სტრუქტურული ელემენტის წვლილი მის სიმტკიცეში. ეს კი საშუალებას მოგვცემს, მივიღოთ ბეტონი წინასწარ მოცემული თვისებებით. აღსანიშნავია, რომ საიმედოობის თეორიაში სისტემების სინთეზის ამოცანა არ შემოიფარგლება წინასწარი მოცემული სისტემის სინთეზით (სტრუქტურული და ფუნქციონალური), უფრო ფართო სპექტრში სისტემების სინთეზი განიხილება, როგორც წინასწარ მოცემული სისტემების სინთეზი შემთხვევით ცვალებად გარემოში [129].

ცნობილია [105], რომ ზოგიერთი მათემატიკური მოდელები დამოუკიდებელია კონკრეტული მასალისაგან, რადგან მათი შინაარსის ფორმალურობა გამოხატავს იმ საერთოს, რაც დამახასიათებელია კონკრეტული თეორიული არეებისათვის. ასეთ არეებს ფლობს საიმედოობის თეორია.

განვიხილოთ საიმედოობის თეორიის ძირითადი დებულებები [50, 156]-ის მიხედვით; ეს დებულებები ხშირად იქნება გამოყენებული წინამდებარე ნაშრომში. საიმედოობის თეორიის საკითხების ფართო განხილვისთვის გამოიყენება ალბათობის თეორიის და მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდები. ცნობილია, განაწილების ნორმალური კანონის გამოყენება მასალის სიმტკიცის თვისებების აღსაწერად. მართლაც, რიგ შემთხვევებში ამ კანონის სიმარტივის გამო მისი გამოყენება შეიძლება

იყოს გამართლებული. ის იძლევა დამაკმაყოფილებელ სიზუსტეს ექსპერიმენტულ მონაცემებთან, მაგრამ განაწილების ნორმალური კანონის თანახმად, მოსალოდნელია შემთხვევითი სიდიდეების გამოვლენა უარყოფითი მნიშვნელობით. ამის გარდა, განაწილების მრუდს აქვს სიმეტრიული ხასიათი. ეს ორი ფაქტორი პრინციპში არ ეთანხმება მყარი სხეულის რიგი მექანიკური მახასიათებლების ფიზიკურ არსს, ამიტომ ხანდახან შემოაქვთ ზოგიერთი ხელოვნური ხერხები ამ ნაკლოვანებების აღმოსაფხვრელად. მაგრამ აღნიშნული განაწილების მთავარი ნაკლოვანება არის ის, რომ იგი არ ჩანს ბუნებრივი სახით მყარი ტანის სიმტკიცის თეორიაში. ამ ღირებულებით გამოირჩევა ვაიბულას [26] განაწილება.

ვაიბულას განაწილების ფუნქცია:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{როცა } x < 0 \\ 1 - 1^{-\lambda x^\alpha} & \text{როცა } x > 0 \end{cases} \quad (73)$$

სადაც  $\lambda$ ,  $\alpha$  – დადებითი პარამეტრებია; მათი არსი საიმედობის თეორიაში ახსნილი იქნება ქვემოთ.

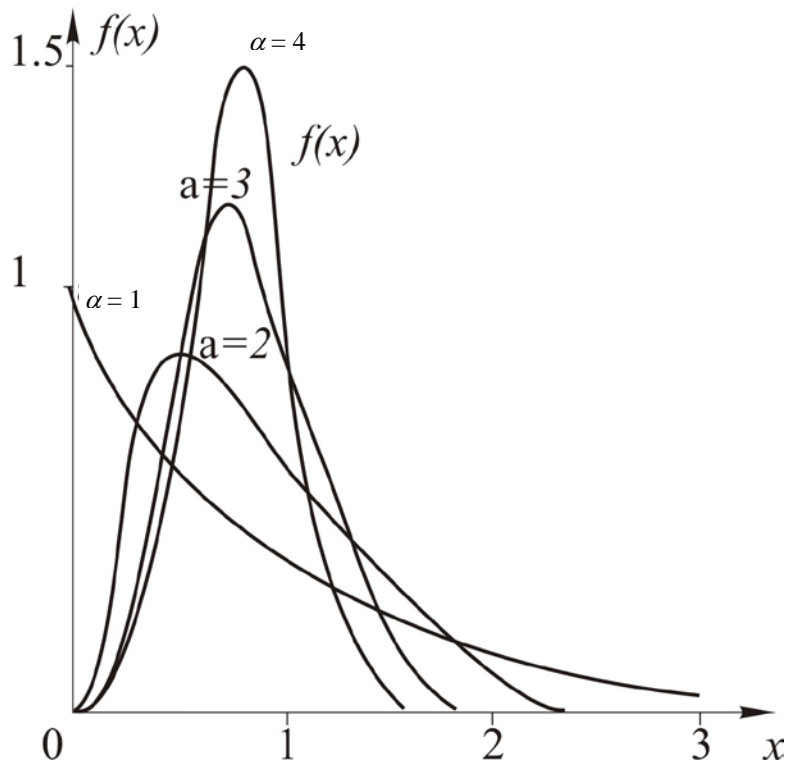
ვაიბულას განაწილების სიმკვრივე:

$$f(x) = \alpha \lambda x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}. \quad (74)$$

ნახ. 7-ზე ნაჩვენებია მისი სიმკვრივის განაწილების გრაფიკი, როგორც ნახაზიდან ჩანს, რაც უფრო დიდია  $\alpha$  პარამეტრი, მით უფრო ვიწროა განაწილება.

ვაიბულას ტიპის სიმტკიცის განაწილების ამსახველ ფორმულებში სიმტკიცის ზღვრის ზედა მნიშვნელობა უსასრულობის ტოლია. ეს დებულება ფიზიკურად უშინაარსოა, რადგან არ არის შემოსაზღვრული განაწილების გამოყენება, ვინაიდან შემთხვევითი ელემენტების სასაზღვრო მნიშვნელობები, არეგლამენტირებენ ფიზიკურად არსებით სიმტკიცის სიდიდეს.





ნახ. 7. ვაიბულას განაწილების პრაქტიკული მნიშვნელობის გამოსაკვლევი პარამეტრების მოქმედი სიდიდეები

ვაიბულას განაწილების პრაქტიკული მნიშვნელობა განისაზღვრება იმით, რომ გამოსაკვლევი პარამეტრი არის მინიმუმი დიდი რაოდენობით მოქმედ სიდიდეებს შორის.

როგორც, ზემოთ იყო აღნიშნული, მასალის სიმტკიცის სტატისტიკური ბუნების (კერძოდ, ბეტონის) გათვალისწინებით, საიმედოობის თეორიის სტატისტიკური მეთოდები არის მოსახერხებელი ინსტრუმენტი ჩვენთვის საინტერესო საკითხების გადასაწყვეტად. ნაკეთობის საიმედოობაში იგულისხმება, ნაკეთობის შესაძლებლობა შეინარჩუნოს ხარისხი ექსპლუატაციის გარკვეულ პირობებში. საიმედოობის თეორიის ერთ-ერთი ძირითადი ცნებაა მტყუნება. მტყუნება, ეწოდება ნაკეთობის თვისების ისეთ მთლიან ან ნაწილობრივ დაკარგვას, რომლის დროსაც მნიშვნელოვნად მცირდება ან საერთოდ იკარგება მზიდუნარიანობა. ზოგიერთ შემთხვევაში ეს ცნება ზუსტად არის განსაზღვრული, სხვა შემთხვევაში-ფარდობითად, მაგრამ იძლევა სხვადასხვა რიცხვითი მახასიათებლების საიმედოობის შემოტანის

საშუალებას, რომელთა მიხედვით შეიძლება შევადაროთ სხვადასხვა ტიპის ნაკეთობები.

მტყუნება გამოწვეულია დაძველებით, ხმარებით, დაღლილობით და ა.შ. აგრეთვე ნაკეთობის ხარისხის განმსაზღვრელი პარამეტრების მოულოდნელი, მკვეთრი ცვლილებით.

მტყუნების ტიპიდან გამომდინარე, სისტემების საიმედოობა, შეიძლება განხილულ იყოს სხვადასხვა ასპექტში. მიზეზები, რომლებმაც გამოიწვიეს მტყუნება დაკავშირებულია მასალაში მიმდინარე გარკვეულ ფიზიკურ და ფიზიკურ-მექანიკურ პროცესებთან. პროცესების მიმდინარეობა დაკავშირებულია არა მარტო „შინაგან“ პირობებზე, არამედ ელემენტის მუშაობის პირობაზეც. მტყუნების ფიზიკის შესწავლას დღესაც დიდი ყურადღება ექცევა; ასევე დიდი ყურადღება ექცევა საიმედოობის ეკონომიურ საკითხებს [26, 50, 171].

[106]-ში მტყუნებაში იგულისხმება, სხეულის ნებისმიერი ელემენტარული მოცულობის გადასვლა ზღვრულ მდგომარეობაში. სავარაუდოა, რომ ელემენტის ზღვრულ მდგომარეობაში გადასვლა განისაზღვრება მისი დაძაბული მდგომარეობით. ამ სახის მტყუნება შეესაბამება რომელიღაც წერტილის გარშემო შესამჩნევი ნარჩენი დეფორმაციის წარმოქმნას, პლასტიკურ მასალებში და პირველი სახის რღვევის დაწყებას მყიფე მასალებში.

საიმედოობის თეორიაში, სიტყვა „ელემენტი“ გაგებულია არა მარტო განუყოფელი სისტემის ნაწილად, არამედ ნებისმიერ მოწყობილობად, დეტალად და სხვ. რომელთა საიმედოობა ამ შემთხვევაში შეისწავლება მისი შემადგენელი ნაწილების საიმედოობისაგან დამოუკიდებლად.

განვიხილოთ ელემენტი, რომელიც  $t=0$  მომენტში იწყებს მუშაობას, ხოლო, როცა  $t=\tau$  მომენტში ელემენტი გვიმტყუნებს. მაშინ ამბობენ, რომ  $\tau$  (შემთხვევითი სიდიდე) არის ელემენტის სიცოცხლის ხანგრძლივობა განაწილების კანონით.

$$Q(t) = P\{\tau < t\} \quad (75)$$

ფუნქცია  $Q(t)$  არის ელემენტის მტყუნების ალბათობა  $t$  მომენტამდე. არსებობს მოსაზრება, რომ ფუნქცია  $Q(t)$  უწყვეტია და

არსებობს მტყუნების ალბათობის უწყვეტი სიმკვრივე (იწარმოება  $t$ -თი).

$Q(t)$  ფუნქციასთან ერთად ხშირად იხმარება სხვა ფუნქცია

$$P(t) = 1 - Q(t) = P\{\tau > t\} \quad (76)$$

ე.ი. ელემენტის უტყუარი მუშაობის ალბათობა  $t$  დროში. ეს ფუნქცია ხშირად იწოდება საიმედობის ფუნქციად. მისი მაგალითი მოყვანილია ნახ. 8, ა-ზე  $P(0) = 1$  და  $P(t) \rightarrow 0$ , როცა  $t \rightarrow \infty$ .

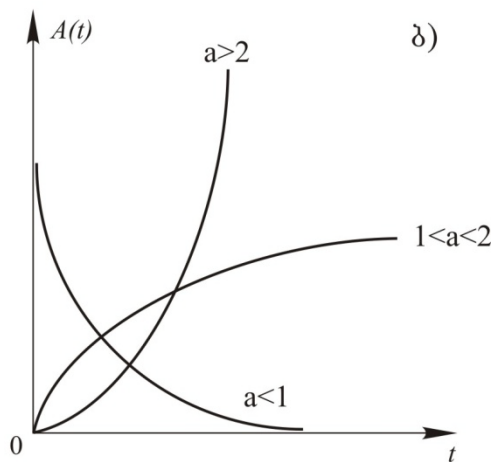
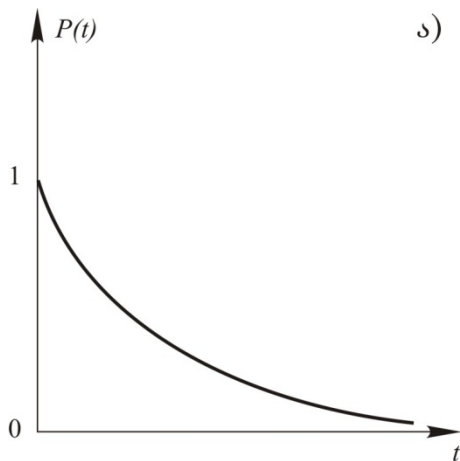
აღსანიშნავია, რომ  $t$  აქაც და შემდგომაც არ არის აუცილებელი იყოს ფიზიკური დრო, ის შეიძლება იყოს ნებისნირი სხვა შესაბამისი პარამეტრი, რომელიც შეესაბამება გამოსაკვლევ მოვლენას. ვაიბულას კანონისათვის საიმედობის ფუნქციას აქვს შემდეგი სახე:

$$P(t) = e^{-\lambda t^\alpha}. \quad (77)$$

მტყუნების საშიშროება:

$$\lambda(t) = \alpha \lambda t^{\alpha-1}. \quad (78)$$

როცა  $\alpha > 1$  მტყუნების საშიშროება მონოტონურად იზრდება ნულიდან, როცა  $\alpha < 1$  მტყუნების საშიშროება მონოტონურად იკლებს და არ არის შემოსაზღვრული როცა  $t = 0$  (ნახ. 8, ბ)



**ნახ. 8. მონოტონურად ზრდადი და კლებადი მტყუნებათა საშიშროება**

მტყუნების საშიშროება  $\lambda(t)$  არის იმისი ალბათობა, რომ ელემენტი, რომელმაც იმუშავა  $t$  მომენტამდე, გვიმტყუნებს დროის ბოლო ერთეულზე (თუკი ეს ერთეული ცოტაა). მტყუნების სტატისტიკური საშიშროება ტოლია დროის ერთეულში მომხდარი მტყუნების რიცხვისა.

$\alpha$  და  $\lambda$  პარამეტრების რიცხვითი მნიშვნელობების განსაზღვრის პრაქტიკული მეთოდიკა, ვაიბულას განაწილებაში ექსპერიმენტული მნიშვნელობებით რიგი სტატისტიკური მაჩვენებლებით, ამ შემთხვევაში სიმტკიცით, მოყვანილია [202]-ში. მოწყობილობა, კომპლექსი და ა.შ. რომლებიც შედგება ნაწილებისაგან, რომელთა საიმედოობა მოცემულია, საიმედოობის თეორიაში ატარებენ სისტემის სახელს.

ამბობენ, რომ სისტემის  $n$  ელემენტი შეერთებულია მიმდევრობით საიმედოობის თვალსაზრისით, თუკი ნებისმიერი ელემენტის მტყუნება იწვევს მთელი სისტემის მტყუნებას.

თუკი სისტემის მტყუნება დგება მაშინ, როცა გვიმტყუნებს სისტემაში შემავალი ყველა ელემენტი, მაშინ ამბობენ, რომ ელემენტები სისტემაში პარალელურად არიან შეერთებულნი.

საერთო შემთხვევაში, სისტემების საიმედოობის გამოკვლევისას შემოდის მტყუნების ჯგუფის მცნება ე.ი. იმ ელემენტების ერთობლიობა, რომელთა მტყუნება იწვევს მთელი სისტემის მტყუნებას, მაშინ როცა ამ ერთობლიობის ერთი ნაწილის მტყუნება არ იწვევს მთელი სისტემის მტყუნებას.

### 2.2.2. ბეტონის მდგრადობა წრფივი ცოცვადობის პირობებში

ხანგრძლივი დატვირთვის მოქმედებისას ბეტონის ელემენტებში განიხილება მონოტონურად ზრდადი დაძაბულობის შემთხვევა შემდეგი ფორმულით [100].

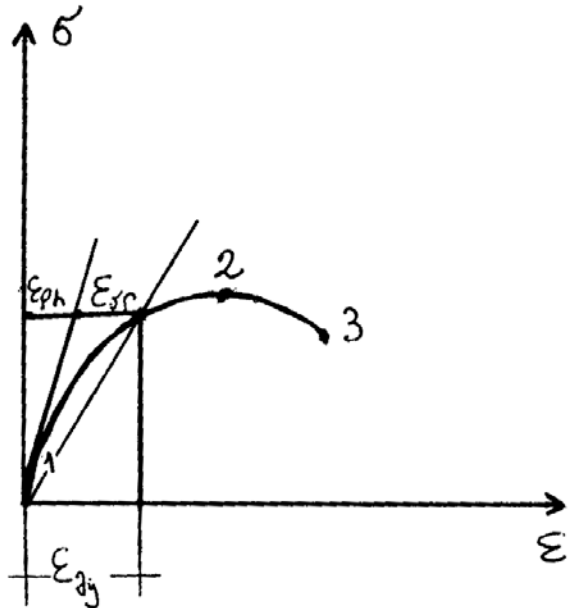
$$\varepsilon(t) = \sigma(\tau_1)\delta(t, \tau_1) + \int_{\tau_1}^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \delta(t, \tau) d\tau, \quad (79)$$

სადაც

$$\delta(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} + c(t, \tau) \quad (80)$$

სრული, ერთეულოვანი ფარდობითი დეფორმაციაა;  $c(t, \tau)$  - ცოცვადობის ზღვარია.

ცოცვადობის ყველა თეორიის საფუძველზე შემოტანილი მყისიერად – დრეკადი ტანის მოდელი, რომელიც ბეტონის დეფორმაციას მოკლევადიანი დატვირთვების დროს, ასევე დაძაბულობასა და დეფორმაციას შორის კავშირი ჩაითვლება წრფივად. მაგრამ, ექსპერიმენტულმა კვლევებმა [8] აჩვენა, რომ მოკლევადიანი დატვირთვებისას  $\sigma - \varepsilon$  დამოკიდებულება მნიშვნელოვნად განსხვავდება (ნახ. 9).



ნახ. 9. მოკლევადიანი დატვირთვებისას  $\sigma - \epsilon$  დამოკიდებულება

(80) განტოლების მარჯვენა ნაწილის პირველი წევრი, შეიძლება გავიგოთ არა როგორც მყისიერად-დრეკადი დეფორმაცია  $\epsilon_{pl}$ , არამედ როგორც მყისიერი დეფორმაცია  $\epsilon_v$ .  $(\sigma - \epsilon_v)$ -ს არაწრფივი დამოკიდებულებისას  $\delta(t, \tau)$  დამატებით გახდება  $\sigma$  ფუნქცია, (80) განტოლების პირველ და მეორე წევრებში იგი პრინციპში აპროქსიმირდება განსხვავებული გამოსახულებებით. პირველ წევრში  $\delta(\sigma, t, \tau)$  უკავშირდება ძა ბვასა და დეფორმაციას, საიდანაც იგი მკ მოდელი შეიძლება ასე გამოვსახოთ [8]

$$\delta_1(\sigma, t, \tau) = \frac{1}{E_v[\sigma(\tau), \tau]} + c_1(t, \tau). \tag{81}$$

მეორე წევრში  $\delta(\sigma, t, \tau)$  გამოისახება ძაბვის და დეფორმაციის ჯამით:

$$\delta(\sigma, t, \tau) = \frac{1}{E_{\sigma\epsilon}[\sigma(\tau), \tau]} + c_1(t, \tau) \tag{82}$$

(81) და (82) ფორმულებში  $E_v[\sigma(\tau), \tau]$  და  $E_{\sigma\epsilon}[\sigma(\tau), \tau]$  მკვეთი და მხები მოდულებია, რომლებიც განსაზღვრული არიან დიაგრამიდან  $\sigma - \epsilon$  ბეტონის მოკლევადიან კუმშვისას  $\tau$  დროის მომენტში.

$\sigma - \varepsilon$  დიაგრამის არაწრფივობის შესწავლით (79) განტოლება (81) და (82) დამოკიდებულებების გათვალისწინებით წარმოდგება შემდეგი სახით:

$$\varepsilon(t) = \sigma(\tau_1)\delta(\sigma, t, \tau_1) + \int_{\tau_1}^t \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} \sigma(\sigma, t, \tau_1) d\tau + A(t),$$

$$A(t) = \sigma(\tau_1)\delta_1(\sigma, t, \tau_1) - \sigma(\tau_1)\delta(\sigma, t, \tau_1). \quad (83)$$

არაწრფივი ცოცვადობის არისთვის ჩაიწერება ასეთი სახით [28]

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_v[\sigma(t), t]} - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{1}{E_k[\sigma(\tau), \tau]} \right\} d\tau - \int_{\tau_1}^t f[\sigma(\tau)] \frac{\partial(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau + A(t). \quad (84)$$

შემდგომ შემოდის პლასტიკურობის და ცოცვადობის შერეული განტოლებები, რომლებიც მიიღებიან დრეკად-ცოცვადობის ტანის, მემკვიდრეობითი დრეკადობის და დაძველების თეორიების ბაზაზე. ამ თეორიების ჰიპოთეზები გამოიყენება განტოლებათა გამოყვანისას, მყისიერი დეფორმაციის არაწრფივობის გათვლა წარმოდგება შესაბამისად (84) გამოსახულებით.

დრეკად-ცოცვადი ტანის თეორიის ჰიპოთეზები ჩაიწერება ასეთი სახით

$$C(t, \tau) = \tilde{\varphi}(\tau)[1 - \ell^{-j(t-\tau)}]; \quad C_1(t, \tau) = \tilde{\varphi}_1(\tau)[1 - \ell^{-j_1(t-\tau)}]. \quad (85)$$

(84) ტოლობა (85) დამოკიდებულებების გათვალისწინებით შეიძლება წარმოვადგინოთ ასეთი სახით

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_v[\sigma(t), t]} - \int_{\tau_1}^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{1}{E_v[\sigma(\tau), \tau]} \right\} - \int_{\tau_1}^t f[\sigma(\tau)] \dot{\varphi}(\tau) d\tau + \int_{\tau_1}^t \dot{f}[\sigma(\tau)] [\dot{\varphi}(\tau) + j\tilde{\varphi}(\tau)] e^{-j(t-\tau)} d\tau + A_1(t). \quad (86)$$

$$A_1(t) = \frac{\sigma(\tau_1)}{E_v[\sigma(\tau_1), \tau_1]} - \frac{\sigma(\tau_1)}{E_v[\sigma(\tau_1), \tau_1]} + f[\sigma(\tau_1)] [C_1(t, \tau_1) - C(t, \tau_1)]. \quad (87)$$

(86) ფორმულით  $t$ -თი ორჯერ გადიფერენციალებით პლასტიკურობის და ცოცვადობის შერეულ განტოლებებს დრეკად-ცოცვადი ტანის თეორიის ბაზაზე ექნება შემდეგი სახე.

$$\ddot{\sigma}(t) + \dot{\sigma}(t) \left\{ j - \frac{\dot{E}_v[\sigma(t), t]}{E_v[\sigma(t), t]} \right\} + jE_v[\sigma(t), t] \tilde{\varphi}(t) \dot{f}[\sigma(t)] = \quad (88)$$

$$= E_v[\sigma(t), t] \left\{ \ddot{\varepsilon}(t) - \dot{A}_1 + j[\dot{\varepsilon}(t) + \dot{A}_1(t)] \right\}$$

მემკვიდრეობითი ცოცვადობის თეორიის ჰიპოთეზების გამოყენება როცა  $E(t) = E_0 = const$ , მაშინ  $E_v[\sigma(t), t] = E_v[\sigma(t)]$  და  $E_v[\sigma(t), t] = E_v[\sigma(t)]$ . მყისიერი დეფორმაციის არაწრფივობის გათვალისწინებით, მემკვიდრეობითი ცოცვადობის თეორიის განტოლებები ჩაიწერება ასეთი ფორმით

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_v[\sigma(t)]} - \int_0^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{1}{E_v[\sigma(\tau)]} \right\} d\tau - \quad (89)$$

$$- \int_0^t f[\sigma(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ C_0 [1 - \ell^{j(t-\tau)}] \right\} d\tau + A_2(t);$$

$$A_2(t) = \frac{\sigma(o)}{E_v[\sigma(o)]} - \frac{\sigma(o)}{E_v[\sigma(o)]} + f[\sigma(o)] \left\{ C_0' [1 - \ell^{-jt}] - C_0 [1 - \ell^{-jt}] \right\}. \quad (90)$$

(90) განტოლების  $t$ -თი გადიფერენციალებით მივიღებთ

$$\sigma(t) + jC_0 E_v[\sigma(t)] f[\sigma(t)] = E_v[\sigma(t)] [\dot{\varepsilon}(t) - \dot{A}_2(t)]. \quad (91)$$

დაძველების თეორიის გამოყენებით ცოცვადობის ზღვარი წარმოდგება სახით

$$C(\sigma, t, \tau) = \frac{\varphi(t) - \varphi(\tau)}{E_v[\sigma(o), o]}; \quad C_1(\sigma, t, \tau) = \frac{\varphi_1(t) - \varphi_1(\tau)}{E_v[\sigma(o), o]}. \quad (92)$$

ასეთ შემთხვევაში დაძველების თეორიის ძირითადი განტოლებები (92)-ის გათვალისწინებით შეიძლება ასეთი სახით ჩაიწეროს

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_v[\sigma(t), t]} - \int_0^t \sigma(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{1}{E_v[\sigma(\tau), \tau]} d\tau - \quad (93)$$

$$- \int_0^t f[\sigma(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} \left\{ \frac{\varphi(t) - \varphi(\tau)}{E_v[\sigma(o), o]} \right\} d\tau + A_3(t);$$

$$A_3(t) = \frac{\sigma(o)}{E_v[\sigma(o), o]} - \frac{\sigma(o)}{E_v[\sigma(o), o]} + f[\sigma(o)] \left\{ \frac{\varphi_1(t)}{E_v[\sigma(o), o]} - \frac{\varphi(t)}{E_v[\sigma(o), o]} \right\} \quad (94)$$

(93) განტოლების  $t$  დროით გადიფერენციალებით მივიღებთ ძირითადი განტოლებებს დაძველების თეორიის ბაზაზე



$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_v[\sigma(t), t]} + \frac{f[\sigma(t)]}{E_v[\sigma(o), o]} \dot{\phi}(t) + \dot{A}_3(t). \quad (95)$$

თუ ჩავთვლით რომ  $\phi_1(t) = \phi(t)$ , მაშინ (95) მიიღებს სახეს:

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{\dot{\sigma}(t)}{E_v[\sigma(t), t]} + \left\{ \frac{f[\sigma(t)] - f[\sigma(o)]}{E_v[\sigma(o), o]} + \frac{f[\sigma(o)]}{E_v[\sigma(o), o]} \right\} \dot{\phi}(t). \quad (96)$$

პლასტიკურობის და ცოცვადობის შერეული განტოლებები ძველი და ძალზე ძველი ბეტონებისათვის, ასევე წრფივი ცოცვადობის არისთვის ნაშრომში მიღებულია, როგორც კერძოდ შემთხვევა შესაბამისი არაწრფივი განტოლებებიდან.

ბეტონის ხანგრძლივი კუმშვით გამოწვეული მექანიკური მდგომარეობის აღმწერი განტოლებები საშუალებას გვაძლევს შევისწავლოთ მყისიერი არაწრფივობა ცოცვადობის კლასიკური თეორიის ცნობილი მეთოდები პრობლემის გადასატრედად.

განვითარებულია მეთოდი რკინაბეტონის კოჭების ანგარიშისა და არაცენტრალური შეკუმშულ კოლონათა ხანმოკლე და ხანგრძლივ დატვირთვაზე გეომეტრიული და ფიზიკური (მყისიერი და ხანგრძლივი) არაწრფივობის გათვლისა და ბზარწარმოქმნისა. „ზუსტი“ მეთოდიკის საფუძველზე დამუშავებულია მიახლოებითი მეთოდი ზემოთ აღნიშნული ელემენტების გამოთვლისა ხანგრძლივი დატვირთვების მოქმედებისას, ბეტონის ფიზიკურ-მათემატიკური ხასიათი.

განხილულია რკინაბეტონის დეროვანი ელემენტი სწორკუთხოვანი განივი კვეთით და საყრდენი სახსრით ბოლოში. მიღებულია ვარაუდები რომლებიც გამოიყენება რკინაბეტონის თეორიაში. სამართლიანია ბრტყელი კვეთის ჰიპოთეზები; კუმშვისას, როცა ადგილი აქვს ღუნვას, დამოკიდებულება  $\sigma = \epsilon$  ნებისმიერი ბოჭკოსათვის მიჰყვება დიაგრამას.

განხილულია ყველაზე უფრო დაძაბული კვეთი ელემენტისა, დგება გამოსახულება მთავარი  $P_{\text{გზ}}$  ვექტორისათვის და მთავარი მომენტისათვის  $M_{\text{გზ}}$ . გარდაქმნილი ფორმულები  $P_{\text{გზ}}$ -სა და  $M_{\text{გზ}}$ -ის განსაზღვრისათვის მოყვანილია ნაშრომში [8].

ძაბვა, ყოველი საზღვრისათვის კუმშვის ზონის უბანზე განისაზღვრება მოკლევადიანი კუმშვის  $\sigma = \varepsilon$  დიაგრამის შესწავლით და ბრტყელი კვეთის ჰიპოთეზებით

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i); \quad i = 0, 1 \dots 4 \quad (97)$$

წონასწორობის განტოლებებს განხილული კვეთისთვის ძირითადად აქვს სახე:

– კოჭის გაანგარიშებისას

$$P = P_{\theta H} = 0; \quad M = M_{\theta H} \quad (98)$$

– არაცენტრალური კუმშვად სვეტის გაანგარიშებისას

$$P = P_{\theta H}; \quad P[\ell + (K\varepsilon_o + \theta)] = M_{\theta H} \quad (99)$$

სადაც  $P_{\theta H}$  გარე ძალაა;  $M_{\theta H}$  – გარე ძალის მომენტი;  $K$  – კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება ფუნქციის შესაბამისობაში, ელემენტის ღერძის გაღუნვით.

დიფერენცირება  $P_{\theta H}$  და  $M_{\theta H}$ -ის, ასევე (98) და (99) წონასწორობის განტოლების და (96) განტოლების გათვალისწინება ყოველი საზღვრისათვის კუმშვის ზონის უბანზე, მოგვცემს დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას აღნიშნულ ამოცანათა გადაწყვეტისათვის

$$\begin{cases} A_{11}\dot{\varepsilon}_o + A_{12}\dot{\varepsilon}_4 + \dots A_{1i+3}\dot{\sigma}_i = 0; \\ A_{21}\dot{\varepsilon}_o + A_{22}\dot{\varepsilon}_4 + \dots A_{2i+3}\dot{\sigma}_i = 0; \\ \text{-----} \\ A_{j1}\dot{\varepsilon}_o + A_{j2}\dot{\varepsilon}_4 + \dots A_{ji+3}\dot{\sigma}_i = 0. \end{cases} \quad (100)$$

$$C_j = \left\{ \frac{f[\sigma_i(t)] - f[\sigma_i(0)]}{E_{\nu}[\sigma_i(0), 0]} + \frac{f[\sigma_i(0)]}{E_{\nu}[\sigma_i(0), 0]} \right\} \phi(t). \quad (101)$$

სისტემა (100)-ის ფორმულებში მოცემული  $A_{nk}$  ( $n = 1, 2, \dots, 7; k = 1, 2, \dots, 7$ ) კოეფიციენტების განმსაზღვრელი ფორმულები მოყვანილია ნაშრომში [28].

(100) სისტემის ამოხსნა მნიშვნელობას აძლევს  $\varepsilon_o, \varepsilon_4$  და  $\sigma_i$  სიდიდეებს  $t$  დროის ნებისმიერ მომენტში.

არაგამომშრალი ელემენტის თვისებების ამომწურავი კრიტერიუმები მიიღება:

1) ძაბვა გაჭიმულ არმატურაში მიაღწევს დენადობის ზღვარს

$$\sigma_a(t) = \sigma_y(\sigma_{o,2}). \quad (102)$$

2) დეფორმაცია ბეტონის განაპირა შეკუმშული ბოჭკოებისათვის ხანგრძლივი მოქმედებისას მიაღწევს ზღვრულ მნიშვნელობას

$$\varepsilon_o(t) = \varepsilon_{DA}^{np}(t). \quad (103)$$

$\varepsilon_{DA}^{np}$ -ის განსაზღვრის ხერხი მოცემულია დისერტაციაში.

3. არაცენტრალურად გაჭიმული ღერძის მდგრადობის კარგვის კრიტერიუმი აღიწერება ამ სახით

$$\delta M = P \delta f = P \cdot K (\delta \varepsilon_o + \delta \theta); \quad \delta P = 0. \quad (104)$$

$P_{\text{გჰ}}$  და  $M_{\text{გჰ}}$ -თვის ჩაწერილი გამოსახულებებიდან, (99) ტოლობის გათვალისწინებით ვარიაციებში

$$\delta \sigma_i = E_k [\sigma_i(t_{kp}), t_{kp}] \delta \varepsilon_i, \quad i = 0, 1, \dots, 4, \quad (105)$$

მივიღებთ:

$$\begin{cases} A_{11} \delta \varepsilon_o + A_{12} \delta \varepsilon_4 + \dots A_{1i+3} \delta \sigma_i = 0; \\ A_{21} \delta \varepsilon_o + A_{22} \delta \varepsilon_4 + \dots A_{2i+3} \delta \sigma_i = 0; \\ \text{-----} \\ A_{j1} \delta \varepsilon_o + A_{j2} \delta \varepsilon_4 + \dots A_{ji+3} \delta \sigma_i = 0 \end{cases} \quad (106)$$

$$i = 0, 1, \dots, 4; \quad j = 3, 4, \dots, 7.$$

(106) სისტემის ნულთან ტოლობა გვაძლევს მდგრადობის კარგვის პირობას

$$\Phi [t_{kp}, \varepsilon_o(t_{kp}), \varepsilon_u(t_{kp}), \sigma_i(t_{kp}), f(t_{kp})] = 0. \quad (107)$$

რკინაბეტონის კოჭები და არაცენტრალურად გაჭიმული სვეტის გაანგარიშების მეთოდის უტყუარობა შემოწმებულია თეორიულად და ექსპერიმენტულად ი. ულიცკოვოს და სხვათა, გ. ვიშნევიცკოს და ტიგნატენკოს, ი. პროკოპოვიჩის და ი. ტემნოვის, კ. ტალის და ი. ჩისტიაკოვის მიერ.

რიცხვითი ექსპერიმენტის საფუძველზე „ზუსტი“ მეთოდიკა განავითარებს მიახლოებითი გათვლის ხერხს რკინაბეტონის კოჭისა და კოლონების ცოცვადობის დროს, ჩატარებულმა რიცხვითმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ ეკვივალენტური მოდული  $E_{tr}(t)$  განისაზღვრება მრუდე ელემენტის ბზარებთან ახლოს და იგი

არსებობს ცოცვადობის და ეკვივალენტური სიმრუდის პირობებში, ხოლო დრეკადი ელემენტი ბზარების გარეშე.

$$E_{tr}(t) = \frac{M \cdot Z_c(t)}{\varepsilon_o(t) \cdot I_{np}}, \quad (108)$$

დამოკიდებულია  $\eta$  დატვირთვაზე, არმირების პროცენტზე  $\mu$  %, ბეტონის კუმშვის სიმტკიცეზე  $R_b$  და არმატურის დენადობის ზღვარზე  $\sigma_y$  ( $\sigma_{0,2}$ ), ე.ი.

$$E_{tr}(t) = f(\eta, \mu, R_b, \sigma_y). \quad (109)$$

ეკვივალენტური მოდულის  $E_{vr}(t)$  აპროქსიმაციისათვის და ბეტონის ფარდობითი დონისათვის კუმშვად ზონაში  $\bar{Z}_c(t)$  მიიღება შემდეგი დამოკიდებულებანი

$$E_{tr}(t) = E_s (A_1 + B_1 \ell^{-\alpha_1 t})^2, \text{ MПа}; \quad (110)$$

$$\bar{Z}_c(t) = E_{tr}(t) \cdot 10^{-4} (A_2 - B_2 \ell^{-\alpha_2 t})^2 / h_o. \quad (111)$$

დისერტაციაში მოყვანილია  $A_1, B_1, A_2$  და  $B_2$  სიდიდეები პარამეტრების შემდეგი  $\eta=0,1; 0,4; 0,5; 0,75; 0,9; \mu=1,2,3; R_b=10, 20, 30, 40\text{MПа};$  მნიშვნელობებისათვის:  $d_1$  და  $d_2$  კოეფიციენტები, განსაზღვრული  $\eta$ -თან დამოკიდებულებაში ასევე მოყვანილია დისერტაციაში.

განვიხილოთ სტატიკურად ურკვევი რკინაბეტონის ჩარჩოები სწორკუთხოვანი განივი კვეთით, რომელიც იმყოფება ხანმოკლე ან ხანგრძლივი დატვირთვის ქვეშ.

ჩარჩოების ანგარიში წარმოდგენილია ინერციის მეთოდით, ეკვივალენტური მოდულის  $E_{\text{eq}}$  დახმარებით. ეკვივალენტური მოდულის  $E_{\text{eq}}$  გამოყენებს საშუალებას გვაძლევს შევცვალოთ რეალური ჩარჩო ეკვივალენტური დრეკადით და, სტატიკურად ურკვევი დეროვანი კონსტრუქციების ანგარიშისას გამოვიყენოთ სამშენებლო მექანიკის ცნობილი მეთოდები. შესწავლება რკინაბეტონის კონსტრუქციების ძირითადი თავისებურებანი: ბზარების არსებობა გაჭიმულ ზონაში, ბეტონის და არმატურის არადრეკადი დეფორმაცია.

ხანმოკლე ან ხანგრძლივი დატვირთვის ზემოქმედებაზე ჩარჩოების ანგარიში იწყება ჩარჩოს ელემენტის კვეთის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის პარამეტრების განსაზღვრით  $G$  გარე დატვირთვის სიდიდისათვის, ამისათვის განხილული სისტემის ყოველი

ელემენტი იყოფა  $m$  ნაწილად. ყოველი ნაწილის ფარგლებში  $E_{jj}$  ჩაითვლება მუდმივად მოცემული ინერციისათვის და განისაზღვრება მომენტის მნიშვნელობით შუა  $j$ -ური ნაწილისათვის ( $j=1, \dots, m$ ). ნაწილების რაოდენობა  $m$  დამოკიდებულია მომენტის ეპიურების თვისებებზე და ანგარიშის სიზუსტეზე. ანგარიში შესრულებულია შემდეგი თანმიმდევრობით:

1) მიღებული  $E_{tr}^j = E_e = const$ , დრეკადი სისტემების ანგარიშიდან განისაზღვრება ზედმეტი უცნობი  $X_k$  მნიშვნელობა, შინაგანი ძალები და მომენტები, ასევე ნაწილების ღუნვა შუა კვეთში;

2) დრეკადი ანგარიშის შედეგების გამოყენებით, წარმოებს თითოეული ნაწილის ანგარიში გეომეტრიული და ფიზიკური არაწრფივობის და ბზარწარმოშობის გათვალისწინებით. ანალოგიურად კოჭისა და არაცენტრალური კუმშვადი კოლონის ანგარიშისას.

ანგარიშის შედეგები განისაზღვრება  $E_{jj}^j$  და ანგარიში მეორდება. იტერაციული პროცესი მთავრდება მაშინ, როცა კონტროლირებადი პარამეტრების სიდიდე აღმოჩნდება გამოთვლის მოცემული სიზუსტის ზღვარში

$$K_{k(n)} - K_{k(n-1)} \leq \delta, \quad (112)$$

სადაც  $K_{k(n)}$  და  $K_{k(n-1)}$  -კონტროლირებადი პარამეტრების მნიშვნელობებია  $n$  და  $n-1$ -ზე იტერაციაზე.

ჩარჩოს ელემენტების  $m_1$  და  $m_2$  ნაწილებად დანაწილებისას ანგარიშის სიზუსტის ნიშანი წარმოდგენილია შედარებით

$$\frac{K_{k(n)}^{m_1} - K_{k(n)}^{m_2}}{K_{k(n)}^{m_2}} \leq \delta_m; \quad m_2 > m_1, \quad (113)$$

სადაც  $K_{k(n)}^{m_1}$  და  $K_{k(n)}^{m_2}$  -კონტროლირებადი პარამეტრის მნიშვნელობებია უკანასკნელ იტერაციაზე  $\delta_m$ -გამოთვლის სიზუსტის მნიშვნელობა.

### 2.2.3. ღეროვანი კომბინირებული სისტემების გაანგარიშება ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციების გათვალისწინებით

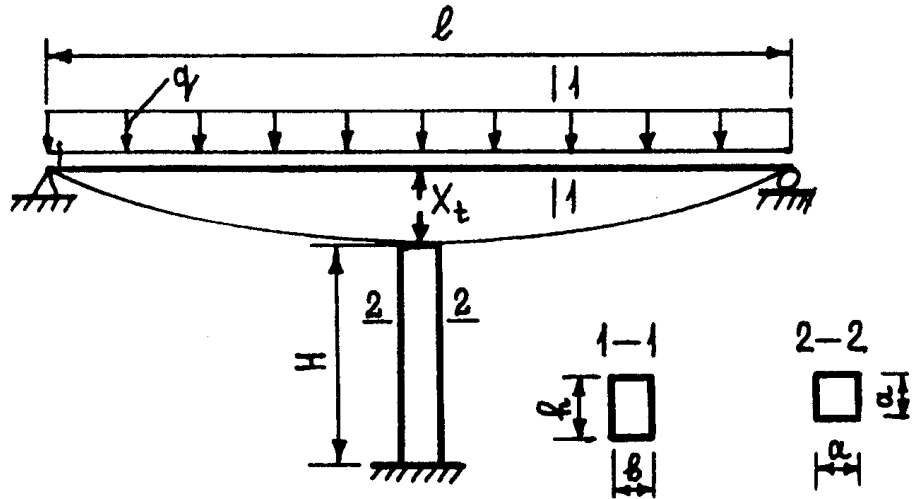
ცნობილია, რომ ღეროვანი ელემენტების შეუღლების გზით მიიღება ე.წ. კომბინირებული სისტემები. ეს ელემენტები აღნიშნულ სისტემებში შერწყმულნი არიან ერთმანეთთან კავშირების საშუალებით, რაც ქმნის სტატიკურად ურკვევ სისტემას. განვიხილოთ უმარტივესი, ე.ი. ერთჯერ სტატიკურად ურკვევი ღეროვანი კომბინირებული სისტემა და გავიანგარიშოთ იგი ცოცვადობის დეფორმაციის დაძველების თეორიის თეორიის გამოყენებით.

ვთქვათ გვაქვს სტატიკურად რკვევადი რკინაბეტონის კოჭი, რომელიც დატვირთეთ თანაბრადგანაწილებული დატვირთვით და შემდეგ ძალის შუაში შევუყენეთ რკინატონის დგარი. ამ დროს ( $t = 0$  მომენტისათვის) ურთიერთქმედების ძალა კოჭსა და დგარს შორის არ არსებობს. გარკვეული დროის გასვლის შემდეგ კოჭში ცოცვადობის დეფორმაციების განვითარების გამო დგარისა და კოჭის შეხების წერტილში აღიძვრება ურთიერთქმედების ძალა, რომელიც, რასაკვირველია, იქნება დროის ფუნქცია. აღვნიშნოთ იგი  $X_t$ -ით (ნახ. 10).

კოჭის მაქსიმალური გადაადგილება (ჩაღუნვა) დატვირთვის მოქმედების შედეგად (როდესაც  $t > 0$  აღვნიშნოთ  $\Delta_t^{ch(1)}$ -ით, ხოლო დგარის გადაადგილება (დამოკლება)  $X_t$  ძალის მოქმედების შედეგად აღვნიშნოთ  $\Delta_t^{ch(2)}$ -ით. ვინაიდან ეს დეფორმაციები დროში ცვალებადია (კერძოდ, როდესაც  $t = 0$ , ისინი არ არსებობენ), შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ დროის ნებისმიერი მომენტისათვის ამ გადაადგილებათა ცვლილებები ერთმანეთის ტოლი უნდა იყოს, ანუ

$$d\Delta_t^{ch(1)} = d\Delta_t^{ch(2)}. \quad (114)$$

თუ გამოვიყენებთ დაძველების თეორიის (113) განტოლებას, (114) ჩაიწერება ძალთა მეთოდის კანონიკური განტოლება დიფერენციალური განტოლების სახით:



ნახ. 10. ურთიერთქმედების  $X_i$  ძალის აღმგრა

$$-\delta^{(1)}dX_i - \delta^{(1)}X_i \cdot d\varphi_i^{(1)} + \Delta^{(1)}d\varphi_i^{(1)} = \delta^{(2)}dX_i + \delta^{(2)}X_i \cdot d\varphi_i^{(2)}$$

ანუ

$$(\delta^{(1)} + \delta^{(2)})dX_i + (\delta^{(1)}d\varphi_i^{(1)} + \delta^{(2)}d\varphi_i^{(2)})X_i = \Delta^{(1)}d\varphi_i^{(1)}, \quad (115)$$

სადაც  $\delta^{(1)}$  და  $\delta^{(2)}$  დრეკადი გადაადგილებებია შესაბამისად კოჭში და დგარში, რომლებიც გამოწვეულია  $X = 1$  შეყურსული ძალით;  $\Delta^{(1)}$  არის დრეკადი გადაადგილება კოჭში, რომელიც გამოწვეულია მასზე მოქმედი თანაბარგადაწილებული დატვირთვით.

ვინაიდან (112)-ში შემავალი  $\beta$  კოეფიციენტი ჩვეულებრივი ბეტონისათვის მერყეობს ძალიან მცირე საზღვრებში, შეგვიძლია მივიღოთ, რომ ისინი ერთიდაიგივეა, როგორც კოჭისათვის. ასევე დგარისათვის. ამიტომ

$$\frac{\varphi_i^{(2)}}{\varphi_i^{(1)}} = \frac{d\varphi_i^{(2)}}{d\varphi_i^{(1)}} = \frac{\varphi_k^{(2)}}{\varphi_k^{(1)}} = k = const. \quad (116)$$

ამ უკანასკნელის გათვალისწინებით და (115)-ის გაყოფით  $d\varphi_i^{(-)}$ -ზე მიიღება

$$(\delta^{(1)} + \delta^{(2)})\frac{dX_i}{d\varphi_i^{(1)}} + (\delta^{(1)} + k\delta^{(2)})X_i = \Delta^{(1)}. \quad (117)$$

ტოლობა (117) არის პირველი რიგის წრფივი დიფერენციალური განტოლება მუდმივი კოეფიციენტებით და მუდმივი თავისუფალი წევრით, ასეთი განტოლების ზოგადი ამოხსნა არის

$$X_t = X_o e^{\frac{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}}{\delta^{(1)} + \delta^{(2)}} \varphi_t^{(1)}} + \frac{\Delta^{(1)}}{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}} \left( 1 - e^{\frac{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}}{\delta^{(1)} + \delta^{(2)}} \varphi_t^{(1)}} \right), \quad (118)$$

$X_o$  არის ურთიერთქმედების ძალა, როდესაც  $t=0$ . ამიტომ (118) მიიღებს სახეს:

$$X_t = \frac{\Delta^{(1)}}{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}} \left( 1 - e^{\frac{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}}{\delta^{(1)} + \delta^{(2)}} \varphi_t^{(1)}} \right). \quad (119)$$

თუ ჩვენ გვინდა განვსაზღვროთ  $X_t$ -ს საბოლოო მნიშვნელობა.

ე.ი. როდესაც  $X_{t \rightarrow \infty} = X_k$ , (119)-ის თანახმად გვექნება

$$X_k = \frac{\Delta^{(1)}}{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}} \left( 1 - e^{\frac{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}}{\delta^{(1)} + \delta^{(2)}} \varphi_k^{(1)}} \right). \quad (120)$$

$X_k$ -ს განსაზღვრის შემდეგ კოჭში გამოითვლება თანაბრადგანაწილებული დატვირთვისა და ამ ძალის ერთობლივი მოქმედებით გამოწვეული მაქსიმალური მღუნავი და მაქსიმალური ძაბვა. დგარში მკუმშავი ძაბვა, რომელიც  $t=0$  მომენტისათვის არ არსებობდა, განისაზღვრება  $X_k$  ძალის მოქმედების გათვალისწინებით. ეს  $\sigma_k^{(1)}$  და  $\sigma_k^{(2)}$  ძაბვები იქნებიან ცოცვადობის დეფორმაციების გათვალისწინებით მიღებული სიდიდეები.

**რიცხვითი მაგალითი.** ვთქვათ ნახ. 10-ზე წარმოდგენილია ერთჯერ სტატიკურად ურკვევი სისტემის პარამეტრებია:  $\ell = 10$  მ;  $b = 0,2$  მ;  $h = 1$  მ;  $H = 3$  მ;  $a = 0,2$  მ;  $q = 0,2$  კნ/სმ;  $\varphi_k^{(1)} = 1$ ;  $\varphi_k^{(2)} = 2$ ;  $E^{(1)} = E^{(2)} = 2 \cdot 10^3$  კნ/სმ<sup>2</sup>

მასალათა გამძლეობის კურსიდან ცნობილია, რომ სტატიკურად რკვევადი კოჭის მაქსიმალური ჩაღუნვა თანაბრადგანაწილებული დატვირთვის მოქმედების შემთხვევაში არის

$$\Delta^{(1)} = \frac{5}{384} \frac{q\ell^4}{EJ} = \frac{5}{384} \frac{0,2 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^3 \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{12}} = 0,78 \text{ სმ};$$

ხოლო  $X_t = 1$  კნ ძალისაგან კოჭის მაქსიმალური ჩაღუნვა

$$\delta^{(1)} = \frac{\ell^3}{48 \cdot EJ} = \frac{(10^3)^3}{18 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{20 \cdot 10^6}{12}} = 0,00625 \text{ სმ};$$

$X_t = 1$  კნ ძალისაგან დგარის სიგრძის შემცირება



$$\delta^{(2)} = \frac{H}{EA} = \frac{300}{2 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 20} = 0,00038 \text{ სმ};$$

$$\delta^{(1)} + \delta^{(2)} = 0,00625 + 0,00038 = 0,00663 \text{ სმ};$$

$$k = \frac{\varphi_k^{(2)}}{\varphi_k^{(1)}} = \frac{2}{1} = 2;$$

$$\delta^{(1)} + k\delta^{(2)} = 0,00625 + 2 \cdot 0,00038 = 0,00701 \text{ ს},$$

(161)-ის თანახმად

$$X_k = \frac{\Delta^{(1)}}{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}} \left( 1 - e^{\frac{\delta^{(1)} + k\delta^{(2)}}{\delta^{(1)} + \delta^{(2)}} \varphi_l^{(1)}} \right) = \frac{0,78}{0,00701} \left( 1 - e^{\frac{0,00701}{0,00663} \cdot 1} \right) = 111,27(1 - e^{-1,06});$$

ცხრილიდან (იხ. დანართი ცხრილი 1) ვიღებთ

$$e^{-1,06} = \frac{1}{e^{1,06}} = \frac{1}{2,8864} = 0,3465$$

ამიტომ

$$X_k = 111,27(1 - 0,3465) = 111,27 \cdot 0,6535 = 72,7 \text{ კნ.}$$

ახლა გამოვთვალოთ კოჭის მაქსიმალური მღუნავი მომენტი, რომელიც თანაბრადგანაწილებული დატვირთვის მოქმედებისაგანაა გამოწვეული:

$$M_{\max}^q = \frac{q\ell^2}{8} = \frac{0,2(10^3)^2}{8} = 25000 \text{ კნ.სმ.}$$

ხოლო კოჭის მაქსიმალური მღუნავი მომენტი, რომელსაც იწვევს  $X_k$  ძალა, იქნება

$$M_{\max}^q = X_k \cdot \frac{\ell}{4} = 72,7 \cdot \frac{1000}{4} = 18175 \text{ კნ.სმ.}$$

ფაქტიური მაქსიმალური მომენტი კოჭში იქნება:

$$M_k = M_{\max}^q - M_{\max}^x = 25000 - 18175 = 6825 \text{ კნ.სმ.}$$

მაქსიმალური ძაბვა ცოცვადობის დეფორმაციების გათვალისწინების გარეშე იქნება

$$\sigma_{0\max}^{(1)} = \frac{M_{\max}^q}{W} = \frac{25000}{\frac{20 \cdot 100^2}{6}} = 0,75 \text{ კნ/სმ}^2;$$

ხოლო ცოცვადობის დეფორმაციების გათვალისწინებით

$$\sigma_{k\max}^{(1)} = \frac{M_k}{W} = \frac{6825}{\frac{20 \cdot 100^2}{6}} = 0,205 \text{ კნ/სმ}^2.$$

დგარში დროის  $t = 0$  მომენტისათვის დაბვა ნულის ტოლია. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციები აღძრავენ  $X_k$  მკუმშავ ძალას და დაბვა დგარში იქნება:

$$\sigma_{k \max}^{(2)} = \frac{X_k}{A} = \frac{72,7}{20 \cdot 20} = 0,182 \text{ კნ/სმ}^2;$$

ე.ი. ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციებმა გამოიწვევს დაბვის განაწილება კოჭიდან დგარზე.

#### 2.2.4. სტრუქტურული ელემენტების დეფორმაციის მოდულების გავლენა ბეტონის სიმტკიცეზე

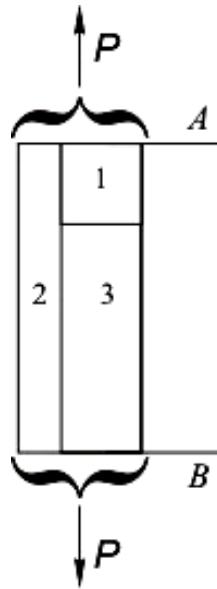
როგორც ცნობილია, ბეტონის სიმტკიცეზე გავლენა აქვს მისი კომპონენტების დეფორმაციის მოდულებს. ეს საკითხი განვიხილოთ ბეტონის გაჭიმვაზე მუშაობის გამარტივებული სქემით (ნახ. 11). ეს სქემა წარმოადგენს სამ ელემენტს, ორი მათგანი ( 1 და 3) შეერთებულია მიმდევრობით, ხოლო ერთი ( 2) პარალელურად. მათზე 1 ელემენტი თავისი ფუნქციონალური თვისებებით წარმოადგენს შემვსების ხსნართან “შეჭიდების” ელემენტს, 2 ელემენტი-”ხსნარს” და 3 ელემენტი-”შემვსებს”. სქემა ფუნქციონირებს ანუ სიბრტყიდან გადასცემს დატვირთვას სიბრტყეს შემდეგი სახით: ყველა სამი ელემენტის მუშაობისას გვაქვს მძიმე და მსუბუქი ბეტონების შემთხვევა. როდესაც 1 და 3 ელემენტების მზიდი უნარიანობა ნულის ტოლია და მუშაობს მხოლოდ 2 ელემენტი, სქემას შეუძლია გადასცეს დატვირთვა სიბრტყიდან სიბრტყეს. ეს არის უჯრედოვანი ბეტონის შემთხვევა (შემვსების და შეჭიდულობის სიმტკიცე ნულის ტოლია, მაგრამ ბეტონი “მუშაობს”) 2 ელემენტის მზიდუნარიანობა ნულთან ტოლობის შემთხვევაში (ე.ი. შემვსების მარცვლებს შორის ხსნარის არქონა) მუშაობენ 1 და 3 ელემენტები ანუ გადასცემენ დატვირთვას სიბრტყიდან  $B$  სიბრტყეს. ეს არის მსხვილფოროვანი ბეტონი. ელემენტების შესაბამის სხვა ვარიანტებში სქემები არ მუშაობენ. მაგალითად თუკი მუშაობს მხოლოდ 3 ელემენტი (“შემვსები”)

დატვირთვა არ გადაეცემა  $A$  სიბრტყიდან  $B$  სიბრტყეს. ეს ის შემთხვევაა, როდესაც გვაქვს მხოლოდ შემვსები მარცვლების ნარევი ხსნარის გარეშე და მარცვლების ზედაპირი არ არის შეგოზილი ხსნარით, რაც იძლევა მარცვლების შეჭიდვის საშუალებას (ე.ი. ასეთი ბეტონი იშლება) ყველა სტრუქტურული ელემენტების (ნახ. 11) ერთობლივი მუშაობის პირობიდან ვიღებთ შემდეგ გამოსახულებას:

$$P_1 = P_3 = PK_1 = PK_3$$

$$P_2 = PK_2$$

სადაც  $P_1$ ,  $P_2$  და  $P_3$  – ძალებია, რომლებიც გადაეცემა სტრუქტურულ ელემენტებს საერთო გამჭიმავი  $P$  დატვირთვისაგან.  $K_1$ ,  $K_2$  და  $K_3$  აქვს შემდეგი მნიშვნელობები



ნახ. 11. ბეტონის ფუნქციონალური სქემა

$$K_2 = \frac{E_2}{\frac{E_1 E_3}{E_3 v_1 + E_1 v_3} \cdot \frac{v_1 v_3}{v_2} + E_2};$$

$$K_1 = K_3 = \frac{\frac{E_1 E_3}{E_3 V_1 + E_1 V_3} \frac{V_1 V_3}{V_2}}{\frac{E_1 E_3}{E_3 V_1 + E_1 V_3} \frac{V_1 V_3}{V_2} + E_2}, \quad (121)$$

სადაც  $E$  და  $V$  - 1, 2 და 3 ელემენტების შესაბამისად „საკონტაქტო ფენის“ „ხსნარის“ და „შემესების“ დრეკადობის მოდულები და მოცულობებია

იმისთვის, რომ გავითვალისწინოთ დრეკადობის მოდულების გავლენა ბეტონის გაჭიმვაზე სიმტკიცის ფორმულაში, მეთოდურად მოსახერხებელია (119) ფორმულა მივიღოთ ისე, რომ ელემენტების ყველაზე ოპტიმალური მზიდი უნარიანობა თითქოს კორექტირებული იყოს დატვირთვის საკუთარი ნაწილის აღქმით. ე.ი.  $K_1, K_2$  და  $K_3$ . მაშინ (120) ფორმულა ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$\sigma = \frac{\left( \frac{\sqrt{2}R_1K_1R_3K_3}{[(R_1K_1)^\alpha + (R_3K_3)^\alpha]^{1/\alpha}} T + R_2K_2N \right) 2m^2}{F}. \quad (121)$$

$R_1$  ელემენტების მრღვევი დატვირთვებიდან მათ სიმტკიცეზე  $\sigma_i$  ( $i=1,2,3$ ) გადასვლისას შეიძლება ვისარგებლოთ ფორმულით  $\sigma_i=R_i/F_i$ , სადაც  $F_i$  - შესაბამისი სტრუქტურული ელემენტის მუშა ზედაპირია. როგორც ადრე იყო აღნიშნული ინდექსი „1“ - ეკუთვნის „შეჭიდულობის“ ელემენტს, „2“ - მატრიცა - „ხსნარს“ და ინდექსი „3“ - „მარცვალს“.

### 2.2.3.1. მატრიცისა და მარცვლის განივი დეფორმაციის კოეფიციენტების განსხვავების გავლენა

კომპოზიციურ მასალებში შემესების და მატრიცას ურთიერთქმედება ხასიათდება უგანზომილებო პარამეტრებით - მათი დრეკადობის მოდულების ფართობით, პუასონის კოეფიციენტებით და სიმტკიცითი თვისებებით. [170,182] ამ შემთხვევაში ჩვენ გვინტერესებს ბეტონის ღერძული გაჭიმვისას აღძრული განივი ძაბვები.

ბოჭკოვან კომპოზიციურ მასალებში მათი სრული ჩაწყობისას მატრიცაა - ბოჭკოს საზღვარზე რადიალური ძაბვა  $\sigma_r$  განისაზღვრება ფორმულით [182]

$$\sigma_r \cong \frac{\bar{\sigma}_m |v_m - v_f|}{(1 + v_f) + (1 - v_m - 2v_f)^{E_i/E_m}}, \quad (122)$$

სადაც  $\bar{\sigma}_m$  მატრიცაში დერძული ძაბვაა;  $E, \nu$ - შესაბამისად დრეკადობის მოდულები და პუასონის კოეფიციენტებია („ $m$ “-ინდექსით - მატრიცები, „ $f$ “ ინდექსით - ბოჭკოები). პუასონის კოეფიციენტების ტოლობისას ეს ძაბვები აღარ არიან.

ბეტონისთვის, მისი სტრუქტურული უჯრედიდან გამომდინარე (ნახ. 11 ა) გამოთვლები გამარტივებულია და მითითებული განივი ძაბვები გაყოფის საზღვარზე ბეტონის დერძული გაჭიმვისას ტოლი იქნებიან

$$\sigma_g \cong |\varepsilon_2 - \varepsilon_3| E_1 = \sigma_g \left| \frac{\mu_2}{E_2} - \frac{\mu_3}{E_3} \right| E_1, \quad (123)$$

სადაც  $\varepsilon_2$  განივი დეფორმაციებია მატრიცაში-ხსნარში;  $\varepsilon_3$ -განვ. დეფორმაციებია შემვსებში;  $\mu_2, \mu_3$  - ხსნარისა და შემვსების პუასონის კოეფიციენტებია,  $E_2, E_3$  შესაბამისად მათი დეფორმაციის მოდულები.  $E_1$  „შეჭიდულობის“ ელემენტის დეფორმაციის მოდულია.  $\sigma_g$  ბეტონის სიკვრივეა გაჭიმვაზე.

განვიხილოთ უმარტივესი შემთხვევა, როდესაც კომპოზიციის სიმტკიცე განისაზღვრება მარცვლისა და მატრიცის შეჭიდულობით. მაშინ ბეტონის სიმტკიცე გაჭიმვაზე (123) ფორმულის თანახმად იქნება

$$\sigma_g \cong \frac{\sqrt{2} \sigma_1 s T \cdot 2m^2 - \sqrt{2} \left| \frac{\mu_2}{E_2} - \frac{\mu_3}{E_3} \right| \cdot E_1 s T \cdot \frac{4m-4}{2m^2}}{F}, \quad (124)$$

ასე რომ  $\sigma_r$  ძაბვები ცუდ შემთხვევაში მიისწრაფიან მოგლიჯონ მარცვალი მატრიცას. მრიცხველის მეორე წევრი შედგება გამოსახულებისაგან  $(4m-4)/2m^2$  ე.ი. პერიმეტრზე პარალელურად შეერთებული „სვეტების“ რაოდენობის თანაფარდობა მათ საერთო რაოდენობასთან. გარე „სვეტების“ გათვალისწინება აუცილებელია იმ გარემოებიდან გამომდინარე, რომ სწორედ მათში გამოჩნდება მოჭიდულობის ეფექტის დასუსტება  $\mu$  -ს განსხვავებიდან გამომდინარე. შიგა „სვეტებში“ ეს ეფექტი ქრება მოცულობითი მოჭიმვის გამო.

(124) ფორმულიდან მივიღებთ

$$\sigma_g \cong \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma_1 \cdot s \cdot T \cdot 2m^2}{F + \sqrt{2} \left| \frac{\mu_2}{E_2} - \frac{\mu_3}{E_3} \right| \cdot E_1 \cdot s \cdot T \cdot \frac{4m-4}{2m^2}}, \quad (125)$$

(125) ფორმულის მნიშვნელი შეიძლება განვიხილოთ როგორც ნიმუშის ფართი და შევიყვანოთ იგი (125) ფორმულის მნიშვნელში.

თუკი  $\mu_2=0.18$ ,  $\mu_3=0.20$   $E_1=1.7 \cdot 10$  კგ/სმ<sup>2</sup>  $E_2=1.5 \cdot 10$  კგ/სმ<sup>2</sup>,  $E_3=4 \cdot 10$  კგ/სმ<sup>2</sup>.  $a=20$ სმ,  $d=2$ სმ და  $T=1$  (125) ფორმულის თანახმად მივიღებთ, რომ ბეტონის სიმტკიცე მოცემული განივი ძაბვების გათვალისწინებით გამოწვეული მარცვლისა და მატრიცის განივი დეფორმაციების განსხვავებით დაიკლებს 4%-ით.

### 2.2.3.2. ზოგიერთი აპროქსიმირებადი გამოსახულება

(113) და (114) ფორმულებიდან  $T$ ,  $A$ ,  $N$  პარამეტრები საჭიროა გამოვთვალოთ ეგმ-ზე. პრაქტიკულ ინტერესს წარმოადგენს მათი აპროქსიმაცია, უფრო მარტივი ფორმულებით. ასეთი ფორმულა  $T$ -სთვის ადრე იყო მოყვანილი სხვა პარამეტრებისთვის ქვევით იქნება მოყვანილი.

(113) ფორმულიდან მეორე შესაკრები შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$R_2 N = R_2 A - M, \quad (N \leq 1)$$

სადაც  $A$ -ს და  $M$ -ს ექნება შემდეგი მნიშვნელობა

$$M = \sum_{i=1}^{2m^2} C_{2m^2}^i \sum_{r=1}^{ni} C_{ni}^r \sum_{j=0}^{ni-r} C_{ni-r}^j \cdot 2^{(ni-r-j)} \sum_{t=0}^{2r} (-1)^{i+j+t} \cdot C_{2r}^t \cdot \Phi$$

$$A \Sigma = \sum_{i=1}^{2m^2} C_{2m^2}^i (-1)^{i+1} \cdot (ni)^{-1/\alpha}$$

$$\Phi = \left[ v \frac{R_1^\alpha + R_3^\alpha}{R_1^\alpha R_3^\alpha} + \frac{r}{R_2^\alpha} \right]^{-\frac{1}{\alpha}}. \quad (126)$$

$$v = 2(ni-r) + 2j + 2t, \quad (v \neq 0)$$

$A$  პარამეტრიც აგრეთვე შეიძლება იყოს გამოთვლილი მიახლოებითი ემპირიული ფორმულით, გამოყვანილი გრაფიკის

მიხედვით, რომელიც შეესაბამება -ს ზუსტ მნიშვნელობებს. გრაფიკი აგებულია კომპიუტერზე გაანგარიშებების შემდეგ:

$$A \cong (1.4)^{1/\alpha} \cdot T^2 \quad A = \begin{cases} 1, \text{თუ } \alpha \rightarrow \infty \\ 0, \text{თუ } m = n \rightarrow \infty \end{cases} \quad (127)$$

მაშინ (113) ფორმულა იწერება შემდეგნაირად

$$\langle R \rangle = \frac{R_1 R_3}{(R_1^\alpha + R_3^\alpha)^{1/\alpha}} \cdot T + R_2 A - M, \quad (128)$$

აღნიშნოთ [იხ. ფორმულა (113)]

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \frac{R_1 R_3}{(R_1^\alpha + R_3^\alpha)^{1/\alpha}} = \min(R_1, R_3), \quad (129)$$

ე.ი. სისტემის ელემენტების „შეჭიდულის-შემესები“ მზიდი უნარიანობა მიისწრაფვის მინიმუმისკენ და დამოკიდებულია მათ ერთგვაროვნებაზე  $\alpha$ .

სტრუქტურული ელემენტების მზიდუნარიანობა განისაზღვრება შემდეგნაირად

$$\begin{aligned} R_1 &\cong \sigma_1 \frac{K' \pi d^2}{2}; \\ R_2 &\cong \sigma_2 K'' d^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right); \\ R_3 &\cong \sigma_3 \frac{K'' \pi d^2}{4}. \end{aligned} \quad (130)$$

სადაც  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  და  $\sigma_3$  შესაბამისად, შეჭიდულობის ხსნარის გაჭიმვის შემესების გაგლეჯის (კგ/სმ) სიმტკიცის ზღვარია.

$K$  კოეფიციენტს შემდგომ გამოთვლებში 1-ის ტოლად ჩავთვლით. ნიმუშის სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე  $\sigma$  (113) და (119) ფორმულების გამოყენებით გამოისახება შემდეგნაირად

$$\sigma = \left[ \frac{\sqrt{2} R_1 R_3}{(R_1^\alpha + R_3^\alpha)^{1/\alpha}} \cdot T + R_2 A - M \right] \frac{\left(\frac{a}{d} - 1\right)^2}{a^2}, \quad (131)$$

სადაც  $(a/d-1)^2/a$  სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედების რიცხვია 17, რომელიც მოთავსებულია ნიმუშის კვეთის ერთეულ ფართზე კომპოზიციის რეგულარული სტრუქტურისა და „არასწორი“ ფორმის

შემდგომისათვის უჯრედების რაოდენობა სხვადასხვა ზომის ნიმუშის ერთეულ ფართზე შეიძლება ჩავთვალოთ მუდმივად და განვსაზღვროთ შემდეგნაირად

$$\lim_{a \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{a}{d} - 1\right)^2}{a^2} = \frac{1}{d^2}. \quad (132)$$

$M$  პარამეტრი ჩავწერთ ემპირიული ფორმულით, რადგან ის დამოკიდებულია ცვლადების დიდ რაოდენობაზე  $m, n, \alpha, R_1, R_2, R_3$ -ზე მისთვის შეიძლება მივუთითოთ ზღვრული მნიშვნელობა  $M \rightarrow 0$  თუკი  $R_1$  ან  $R_2$  ან  $R_3$  მიისწრაფვიან ნულისაკენ. კერძო შემთხვევაში, როცა

$$\min(R_1 R_3) = R_2 = R_+$$

$M$  პარამეტრი აღიწერება ემპირიული ფორმულით

$$M \cong R + (1,2)^{1/\alpha} T^3. \quad (133)$$

იმისთვის რომ არ მივმართოთ ეგმ-ს ყოველ წუთში  $M$ -ის განსასაზღვრავად შეიძლება ვისმართო ასეთი ხერხი. ერთ შემთხვევაში მივიღოთ  $R_2 = 0$  და განვსაზღვროთ  $\langle R \rangle$  (იხ. ფორმულა (128) როგორც

$$\langle R' \rangle = \frac{R_1 R_3}{(R_1^\alpha + R_3^\alpha)^{1/\alpha}} \cdot T, \quad (134)$$

მეორე შემთხვევაში მივიღოთ  $M = 0$  და ფორმულა (128) გადაიწერება შემდეგი სახით

$$\langle R'' \rangle = \frac{R_1 R_3}{(R_1^\alpha + R_3^\alpha)^{1/\alpha}} T + R_2 A. \quad (135)$$

$\langle R' \rangle$  და  $\langle R'' \rangle$  ერთიმეორეში წარმოადგენენ „ჩანგალს“, რომელიც დაფარავს  $\langle R' \rangle$ -ის მნიშვნელობას. შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ როდესაც  $\alpha \rightarrow \infty$  მაშინ  $M \rightarrow \min(R_1 R_2 R_3)$ -სკენ და

$$\langle R \rangle \rightarrow \max[R_2, \min(R_1, R_3)]. \quad (136)$$

თუმცა საანგარიშო სიმტკიცის მომატება არ მოხდება. ეს ადვილი დასაბუთებია საერთო სტრუქტურული სქემიდან. ნახ. 4 ბ. ნამდვილად, როცა  $\alpha \rightarrow \infty$  დაუშვათ  $R_2 = \max(R_1, R_2, R_3)$ ; მე-2 ელემენტი არის ყველა უჯრედში და შესაბამისად პარალელურად მიერთებულ სვეტებში ამ ელემენტს ექნება  $2m^2$ . აქედან გამომდინარე როცა გაანგარიშებაში



შეგვეყვას ნიმუშის საწყისი ფართი ფორმულა (131)-ში დარჩება მამრაველი  $2m^2/F=(a/d-1)^{2/a^2}$ .

1 და 3 ელემენტის სიმტკიცე არაოპტიმალური შერჩევის შემთხვევაში მიდის „მარაგში“ თუკი (131) ფორმულაში R-ის მაგივრად ჩავსვათ შესაბამის  $\sigma$ -ებს (130) ფორმულიდან, (129)-ის გათვალისწინებით მივიღებთ

$$\sigma \cong 1.11 \frac{\sigma_1 \sigma_3}{[\sigma_1^\alpha + (0.5\sigma_3)^\alpha]^{1/\alpha}} \cdot T + 0.215\sigma_2 A - \frac{M}{d^2}. \quad (137)$$

შესაბამისად „ჩანგალი“  $\sigma$ -სთვის იქნება

$$\sigma' \cong 1.11 \frac{\sigma_1 \sigma_3}{[\sigma_1^\alpha + (0.5\sigma_3)^\alpha]^{1/\alpha}} T, \quad (138)$$

$$\sigma'' \cong 1.11 \frac{\sigma_1 \sigma_3}{[\sigma_1^\alpha + (0.5\sigma_3)^\alpha]^{1/\alpha}} T + 0.215\sigma_2 A.$$

ამ ფორმულებში კოეფიციენტი 0.5 როცა  $\sigma_3$  არის ელემენტის „შეჭიდულობის“ და „შემესები“ მუშა ფართობების შეფარდება. ე.ი. წრის ფართობი ნახევარსფეროსთან მოცემული მოდელისათვის საერთო შემთხვევაში მის მაგივრად იქნება გამოსახულება  $2F_\Sigma/S_\Sigma$ , სადაც  $S_\Sigma$  შემესები ზედაპირების საერთო ფართობია,  $F_\Sigma$  მათი მუშა კვთების საერთო ფართობია.

$\sigma_1 \sigma_3$  -ის  $\pi/4$  კოეფიციენტი არის შემესების ფარდობითი შემადგენლობა  $v_3$ .

კოეფიციენტი  $0.215=(1- \pi/4)$   $\sigma_2$ -ისთვის არის ხსნარის ფარდობითი შემადგენლობა მოცემულ მოდელში. ზოგად შემთხვევაში ის იქნება  $v_2$ .

შემესების სტოქასტიკური ჩალაგებისას აზრს კარგავს კოეფიციენტი  $\sqrt{2}$  (137) ფორმულის მრიცხველში. ანუ  $\sqrt{2} \pi/4=1,11$  გამოსახულებაში.

ამიტომ ზოგადი შემთხვევისათვის (133) მიიღებს სახეს

$$\sigma \cong \frac{\sigma_1 \sigma_3 v_3}{\left[ \sigma_1^\alpha + \left( \frac{2F_\Sigma}{S_\Sigma} \sigma_3 \right)^\alpha \right]^{1/\alpha}} T + \sigma_2 v_2 A - \frac{M}{d^2}. \quad (139)$$

შესაბამისად „ჩანგლისათვის“

$$\sigma' \cong \frac{\sigma_1 \sigma_3 v_3}{\left[ \sigma_1^\alpha + \left( \frac{2F_\Sigma}{S_\Sigma} \sigma_3 \right)^\alpha \right]^{1/\alpha}} \cdot T, \quad (140)$$

$$\sigma'' \cong \frac{\sigma_1 \sigma_3 v_3}{\left[ \sigma_1^\alpha + \left( \frac{2F_\Sigma}{S_\Sigma} \sigma_3 \right)^\alpha \right]^{1/\alpha}} \cdot T + \sigma_2 v_2 A.$$

სტრუქტურული ელემენტების დრეკადობის მოდულების გათვალისწინებას კვლავ მივყავართ  $K_1, K_2$  და  $K_3$  კოეფიციენტებთან, რომლებიც ისახდვრება (121) ფორმულებით და ისმება (140) ფორმულებში როგორც  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ -ის შესაბამისი მამრავლები ე.ი. (140) ფორმულის ანალოგიურად.  $M$  კი (125) ფორმულის ანალოგიურად გაითვალისწინება. (140) ტიპის ფორმულები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს არა მხოლოდ  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha$  შემთხვევისათვის, არამედ მაშინაც როდესაც მხოლოდ  $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha$  და  $\alpha_2 \neq \alpha$  რადგან  $T$  და  $A$  პარამეტრები მათში შედიან ცალ-ცალკე.

### 2.3. რღვევის ეფექტის გათვალისწინება

სიმტკიცის სტატისტიკური თეორიები რომლებიც "სუსტი რგოლის" კონცეფციაზეა დაფუძნებული, სტრუქტურული ელემენტების მიმდევრობითი შეერთებისას ვერ ითვალისწინებენ დამაბულობის ველსა და დაზიანების ეფექტს შორის შებრუნებულ კავშირს. აღნიშნული ეფექტი შეიძლება გავითვალისწინოთ მოდელში, რომელიც აგრეთვე შეიცავს სტრუქტურული ელემენტების პარალელურ შეერთებებს დამოკიდებული მტყუნებებით. დამოკიდებული მტყუნების მქონე ერთნაირი ელემენტების შეერთებისათვის სისტემის სიცოცხლის საშუალო დრო ექსპონენციალური კანონის დროს გამოითვლება ფორმულით [50]

$$T_0 = \int_0^\infty p(t) dt \frac{1}{n\lambda_n} + \frac{1}{(n-1)\lambda_{n-1}} + \dots + \frac{1}{\lambda_1}, \quad (141)$$

$\lambda_n$  არის ელემენტების მტყუნების საშიშროება, როდესაც მათ ამუშავებს  $n$  ცალი.  $\lambda_{n-1}$  არის ელემენტების მტყუნების საშიშროების მნიშვნელობა, როდესაც მათ ამუშავებს  $n-1$  ცალი და ა.შ.

$\lambda$  განსაზღვრა მოითხოვს მრავალ გამოცდებს, თეორიულად მისი განსაზღვრა გართულებულია [26].

დატვირთვის გადანაწილების ეფექტის გასათვალისწინებლად შემოთავაზებულია განსხვავებული სქემები [96, 159, 171]. ნაშრომ [130]-ში ამ მიზნებისათვის გამოიყენება ასორბციური ფორმულა ვაიბულას ამორჩევითი სიმტკიცის  $\rho$ -ს ცვლილების დიაპაზონის შესაფასებლად. ( $n$  ღეროების დიდი რაოდენობისას და სიმტკიცის მინიმალური მნიშვნელობისას  $R_0=0$ )

$$\rho \sim \left( \frac{n \ln n}{1 - 1/\alpha} \right)^{1/\alpha}. \quad (142)$$

როგორც ავტორი აღნიშნავს „როდესაც  $\rho < 2$  დაწყებული ჯაჭვური რღვევის გაჩერების ალბათობა შედარებით მცირეა“ და გაანგარიშება შეიძლება ვაწარმოთ დატვირთვების გადანაწილების ეფექტის გაუთვალისწინებლად. ასეთივე ვითარებაა შედარებით მაღალი  $R_0 \neq 0$  სთვისაც. ზოგად შემთხვევებში დატვირთვების გადანაწილების ამოცანები იხსნება რიცხვითი მეთოდებით [56]. [21, 232]-ში აღწერილი შეკუმშული ბეტონის რღვევის მექანიზმის თანახმად ბოლო ეტაპზე რღვევა მიმდინარეობს ცალკეული ძელების დამსხვრევით, რომლებიც გამოყოფილი არიან ვერტიკალური ბზარებით. ამასთან დაკავშირებით ინტერესს იწვევს მსგავსი ძელებისმაგვარი სტრუქტურის მზიდუნარიანობის სტატისტიკური ანალიზი.

განვიხილოთ პარალელურღეროვანი სისტემების მზიდუნარიანობა დატვირთვის ქვეშ მყოფი ღეროების რაოდენობის გათვალისწინებით. (მასალის ერთგვაროვნების გათვალისწინებით) ჩავთვალოთ რომ ღეროების (ან ძელების) რაოდენობა საკმაოდ დიდია და მათი საიმედობის ფუნქცია ეთანხმება ვაიბულას კანონს. ამ შემთხვევაში საიმედობა  $P(R) = \exp(-\lambda R^\alpha)$  გაიაზრეს, როგორც მოცემული დატვირთვის ქვეშ მყოფი ღეროების რაოდენობის შეფარდება მათ საერთო რაოდენობასთან. თუკი სისტემის ერთი ღეროს საშუალო

მზიდუნარიანობას აღვნიშნავთ  $R$  მაშინ მთელის სისტემის მზიდუნარიანობა შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი პირობიდან

$$P = \bar{R} \cdot n \cdot \exp \left[ - \frac{\Gamma^\alpha \left( \frac{1}{\alpha} + 1 \right)}{\bar{R}^\alpha} \cdot R^\alpha \right], \quad (143)$$

სადაც  $\lambda = \frac{\Gamma^\alpha \left( \frac{1}{\alpha} + 1 \right)}{\bar{R}^\alpha}$  იხ. ფორმულა (93)

აღვნიშნოთ  $R$  ნორმით ნორმატიული დატვირთვა ერთ ღეროზე ( $R_{\text{ნორმ}}=P/n$ ); იმ შემთხვევაში, როცა  $R_{\text{ნორმ}}=\bar{R}$  ანუ ღეროს საშუალო სიმტკიცე იწურება (143) -იდან მივიღებთ

$$R_{\text{ნორმ}} = \bar{R} \cdot e^{-\Gamma^\alpha \left( \frac{1}{\alpha} + 1 \right)} = \bar{R} \cdot K_{\text{ერთგ}}, \quad (144)$$

სადაც მეორე მამრავლი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ერთგვაროვნების კოეფიციენტი. მისი ცვლილების გრაფიკი დამოკიდებულია მასალის ერთგვაროვნებაზე. მოყვანილია ნახ. 12 როცა  $\alpha \rightarrow \infty$  მასალა აბსოლუტურად ერთგვაროვანია.

ღეროების სხვადასხვა სიხისტის დატვირთვა მათზე უნდა განაწილდეს ამ გარემოების გათვალისწინებით.

დამოკიდებული მტყუნებით სისტემის უშუალო აღწერა ითვალისწინებს დატვირთვის გადანაწილების ეფექტს, როდესაც ერთი ელემენტის მწყობრიდან გამოყვანას მიყვართ სხვა ელემენტებზე დატვირთვის მომატებამდე. ზოგიერთ ავტორს [96, 159] ბეტონში გადანაწილების ეფექტი დაჰყავთ ღეროების პარალელურად შეერთებული სისტემის მოცემულ ეფექტამდე, სხვები [99] ბეტონის სხეულს ყოფენ მიმდევრობით შეერთებულ მოცულობებად დამოკიდებული მტყუნებით. (მოცულობის შიგნით მტყუნება დამოკიდებულია). ეს მაგალითები იძლევა ხარისხობრივად მისაღებ სურათს, მხოლოდ ვერ უკავშირებენ განხილულ ეფექტს ბეტონის რეალურ სტრუქტურულ ელემენტებს. შევეცადოთ მოვლენის ხარისხობრივი შესწავლისას გავითვალისწინოთ ბოლოს აღნიშნული. ბეტონის მიღებული სქემის შესაბამისად განვიხილავთ  $2m^2$ -ს

სტრუქტურული „სვეტების“ მონაცვლეობით მუშაობას. სადაც  $i$  ნამტყუნი სვეტების რაოდენობაა ( $I=1,2,\dots,2m^2-1$ ) თითოეულ შემთხვევაში განვიხილავთ "სვეტების" მინიმალურ მზიდუნარიანობას მოცემული  $2m^2-i$  სისტემაში. (ე.ი. მათგან შევადგენთ მიმდევრობით შეერთებას) და ეს მნიშვნელობა გავამრავლოთ უმტყუნო "სვეტების" რაოდენობაზე. მივიღებთ მთელი კომპოზიტის მზიდუნარიანობის მნიშვნელობას  $2m^2-1$ . მაქსიმალური მნიშვნელობა არის საძიებელი სიდიდე. მთლიანობაში სისტემის მზიდუნარიანობის დამოკიდებულების მრუდი არამტყუნი „სვეტების“ რაოდენობასთან ხარისხოვნად აღწერს კომპოზიტის რღვევის კინეტიკას ( $i$  პარამეტრი ახასიათებს დაზიანების პროცესს) ამგვარად „სვეტების“ სისტემის მზიდუნარიანობა  $2m^2-i$  მდგომარეობაში განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$R_{2m^2-i} \cong (2m^2 - i) \int_0^\infty e^{-\lambda_{2m^2-i} R} K^{\alpha_{2m^2-i}} dR \quad (145)$$

ითვლება, რომ ბეტონის ნიმუშის ზომები საკმაოდ დიდია, ხოლო სისტემის მაქსიმალური მზიდი უნარი მიიღწევა ადრე, ვიდრე მინიმალური სიმტკიცის შესაბამისი მნიშვნელობა, რომელიც მკვეთრად განსხვავდება ნულისგან. (და იგი გაცილებით მცირეა მოცემულ დიაპაზონში  $R_{2m^2-i}$ ). სისტემის ყოველი წინა მდგომარეობიდან შემდეგ მდგომარეობაში გადასვლა ხასიათდება  $i$  დარჩენილი ელემენტების „სვეტების“ ერთგვაროვნების მახასიათებლების გაზრდით, რადგან ყოველ ჯერზე ხდება სუსტის მტყუნება, როდესაც რჩება ერთი „სვეტი“ განხილული, როგორც ელემენტი გადაგვარებული სისტემის ერთგვაროვნება აბსოლუტურია.  $2m^2$ -ს და  $n$ -ის დიდი მნიშვნელობისას შეიძლება მივიღოთ

$$\alpha_{2m^2-1} = \left( \frac{2m^2-1}{2m^2-1-i} \right)^k d_0$$

სადაც  $d_0$ - სტრუქტურული უჯრედის ერთგვაროვნების მახასიათებელია,  $K$ -ფორმის დამოკიდებულების კოეფიციენტი. ამგვარად,  $i$ -ს გაზრდით იზრდება სისტემის ერთგვაროვნების მაჩვენებელი, მეორეს მხრივ იზრდება დარჩენილი ელემენტების  $\lambda$  მტყუნების საშიშროება. სიმარტივისათვის განვიხილოთ შემთხვევა როცა ამ ორი

ურთიერთსაწინააღმდეგო პროცესს მივყავართ „სვეტების“ საშუალო მზიდუნარიანობის მუდმივობამდე,  $R_{sv}$  რომელიც განისაზღვრება განტოლებით:

$$R_{sv} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha_{2m^2-i}} - 1\right)}{\lambda_{2m^2-i}^{1/\alpha_{2m^2-i}}},$$

მაშინ (142)-დან მივიღებთ

$$R_{2m^2-i} \cong R_{sv} \cdot (2m^2 - i)^{\frac{(2m^2-1)(\alpha_0-1)+i}{\alpha_0(2m^2-1)}}. \quad (146)$$

იმის გათვალისწინებით, რომ ელემენტი „სვეტი“ წარმოადგენს  $n$  სტუქტურული უჯრედების მიმდევრობით შეერთებას, (146) -დან მივიღებთ

$$R_{2m^2-i} \cong R_0(n)^{-\frac{1}{\alpha_0}} \cdot (2m^2 - i)^{\frac{(2m^2-1)(\alpha_0-1)+i}{\alpha_0(2m^2-1)}}, \quad (147)$$

სადაც  $R_0$  - სტრუქტურული უჯრედის მზიდუნარიანობაა,  $\alpha_0$ -ის მაღალი მნიშვნელობისთვის პირობით  $R_0 \cong \max[\min(R_1, R_3), R_2]$  იხ.ფორმულა (146) მიახლოებით განისაზღვრება სისტემის მაქსიმალური მზიდუნარიანობა პირობიდან  $\partial R_{2m^2-i} / \partial i = 0$  სისტემის ფარდობით დეფორმირებადობა.  $2m^2-1$  მდგომარეობაში შეესაბამება „სვეტის“ ანალოგიურ მნიშვნელობას სისტემის  $2m^2-1$  მინიმალური მზიდუნარიანობისათვის ე.ი. შემთხვევა (145) გამოსახულებაში მოყვანილ ინტეგრალს, როცა  $R$  იცვლება  $\varepsilon$ -ით.

$$\varepsilon_{2m^2-i} \cong \varepsilon_0(n)^{-\frac{1}{\alpha_0}} \cdot (2m^2 - i)^{\frac{2m^2-1-i}{\alpha_0(2m^2-1)}}, \quad (148)$$

სადაც  $\varepsilon_0$ -ფარდობითი დეფორმაციულობის მაქსიმალური მნიშვნელობაა, როცა უჯრედის მზიდუნარიანობაა  $R_0$ .

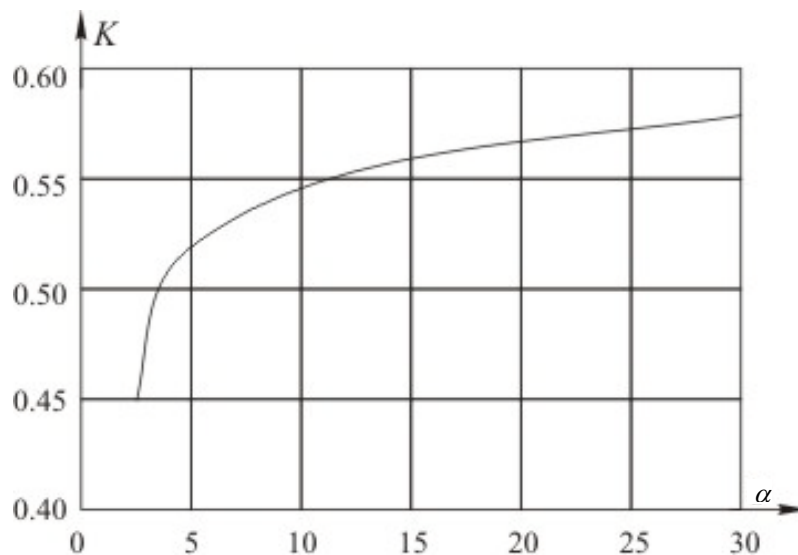
$R$  და  $\varepsilon$  ერთგვაროვნების მახასიათებლები პირველ მიახლოებაში ტოლად არის მიღებული. ადვილი შესამჩნევია, რომ  $\varepsilon$  -ის მაქსიმალურ მნიშვნელობას შეესაბამება  $i=2m^2-1$ , ხოლო მინიმალურს  $i=0$ .

ნახ. 12, ა-ზე მოყვანილია  $\sigma/\sigma_0$  და  $\varepsilon/\varepsilon_0$  -თან მნიშვნელობები  $i$ -სთან დამოკიდებულებაში, როდესაც გადავდივართ მზიდუნარიანობიდან სიმტკიცეზე. ამასთან ერთის ტოლად მიღებულია ( $K_\sigma$  და  $K_\varepsilon$ ) მოცემული დამოკიდებულების მნიშვნელობა როცა  $i=0$ . ნახ. 12, ბ-ზე ამ ორი გრაფიკით აგებულია „ძაბვა-დეფორმაციის“ დამოკიდებულება დამავალი

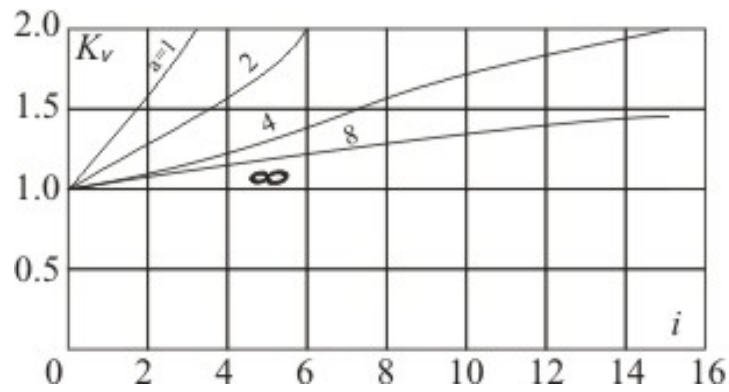
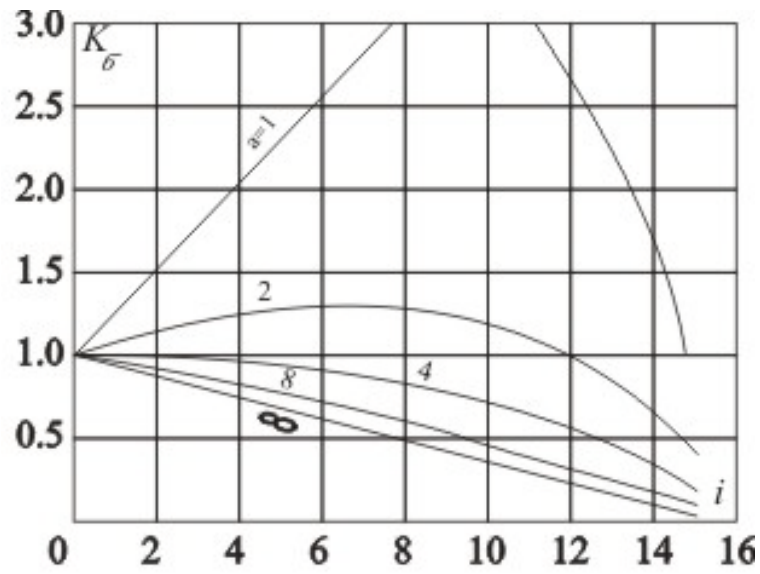
შტოთი. იგი შედგენილია ნიმუშებისათვის  $10 \times 10 \times 30$  სმ,  $d=2$ სმ და ბეტონის ნიმუშის სიმტკიცის კოეფიციენტების ვარიაციით  $\nu(R) = 0; 5; 8$  და  $14\%$ , შესაბამისად  $\alpha = \infty; 8; 4$  და  $2$ -ს. იხილეთ ფორმულა (3.4) ან (3.6).

მიღებულია, რომ სტრუქტურული ელემენტი ემორჩილება ჰუკის კანონს, მიუხედავად იმისა, როგორც ნახ 12, ბ-დან ჩანს მთლიანობაში ბეტონი როგორც კომპოზიტი ამ კანონს არ ემორჩილება. იმ შემთხვევაში, როცა სტრუქტურული ელემენტი გამოავლენს „ძაბვა დეფორმაციას“ დიაგრამის გამრუდებას, შესაბამის გადახრებს ელემენტისათვის შეუძლიათ პირველი მიახლოებით აიჯამონ ბეტონის დეფორმაციის მაჩვენებელთან ყველა შესაბამის წერტილში. (იხ. ნახ 12, ბ, 1' და 2' მრუდები).

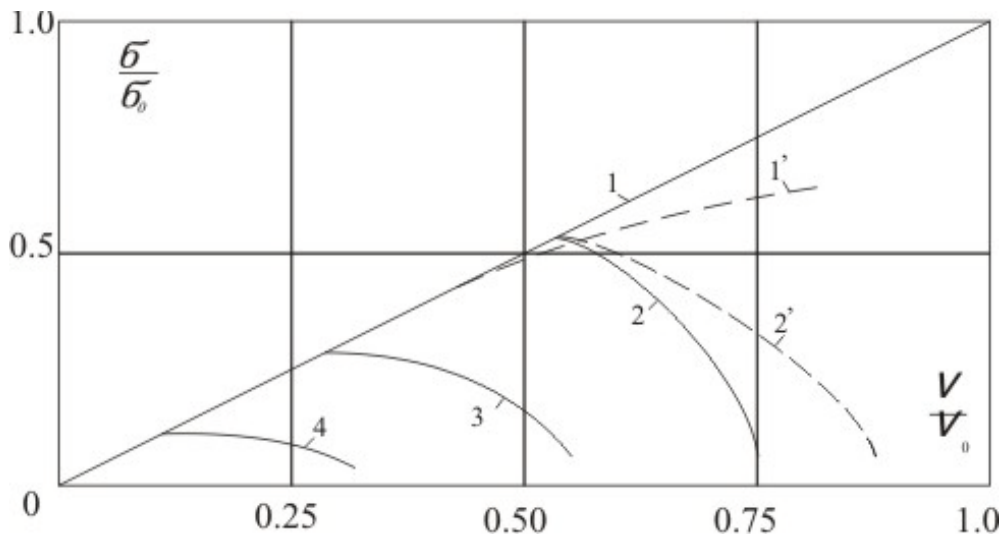
როგორც 12, ა ნახაზიდან ჩანს მცირე ერთგვაროვნებისათვის გვაქვს ექსტრემუმი  $K_{\sigma} = f(i)$  მრუდზე. 12, ბ ნახაზის თანახმად „ძაბვა-დეფორმაციის“ დამოკიდებულებები ერთგვაროვნების შემცირებით სიმტკიცის და ზღვრული დეფორმაციის აბსოლუტური მაჩვენებლები მცირდება, სწორხაზოვანი მონაკვეთი აღმავალ შტოზე აგრეთვე მცირდება, ხოლო დაღმავალ შტო ხდება უფრო დამრეცი.



ნახ. 12. დამოკიდებულება ერთგვაროვნების კოეფიციენტსა და  $\alpha$ -ს შორის



ნახ. 12. ა დამოკიდებულება ( $K_{\sigma}$ ) სიმტკიცის ფარდობითი მნიშვნელობებსა და ( $K_v$ ) დეფორმატიულობას შორის დაზიანების პროცენტის დროს



ნახ. 12, ბ. დამოკიდებულება „ძაბვა-დეფორმაცია“ შორის სიმტკიცის ვარიაციის სხვადასხვა კოეფიციენტების დროს ( $1-V(R)=0$ ;  $2-V(R)=5$ ;  $3-V(R)=8$ ;  $4-V(R)=14\%$ ).



ამგვარად, მოცემული მიდგომა საშუალებას გვაძლევს რაოდენობრივად აღვწეროთ „ძაბვა-დეფორმაციის“ დამოკიდებულება ბეტონისათვის, როგორც კომპოზიტისთვის და დავაკავშიროთ. იგი ნიმუშის ზომებთან სტრუქტურულ მახასიათებლებთან და ერთგვაროვნებასთან. საანგარიშო სქემის შემდგომი სრულყოფა უნდა მიმდინარეობდეს სტრუქტურული ელემენტების მტყუნობის დამოკიდებულების ხასიათის დაზუსტება, ინერციის ძალების და ა.შ.

### 2.3.1. მყარ სხეულებში გამოწვეული ძაბვების კონცენტრაცია

მყარ სხეულებში ძაბვების კონცენტრაციის საკითხი არის ერთ-ერთი ფუნდამენტალური მასალათმცოდნეობაში. როგორც ადრე აღვნიშნეთ ესენია ფლუქტუაციური თეორიები, გრაფთა თეორია სხვადასხვა მოდიფიკაციებით და სხვა. ყველა ისინი ითვალისწინებენ სხეულის მოცულობაში და მის ზედაპირზე ბზარების ტიპის და სხვა დეფექტებით გამოწვეულ ძაბვების კონცენტრაციებს.

ძაბვების ან დეფორმაციების კონცენტრაციებს ადგილი აქვთ სხეულში სხვადასხვა სახის ჩართვების გამო [22, 64, 136], სვეტებთან [64, 154] და სხვა. [144]ის თანახმად ძაბვების კონცენტრაციის გავლენა უმნიშვნელო თუკი ისინი იწვევენ ლოკალურ პლასტიკურ დეფორმაციებს მანამ, სანამ დგება დადლილობის პრობლემა, როცა აუცილებელია ნარჩენი ძაბვებისა და დრეკადი ძაბვების რეალური განაწილების ცოდნა.

მაღალი სიმტკიცის მქონე ბეტონის მიღების ერთ-ერთ გზად ითვლება შესაბამისი კომპონენტების შერჩევა, რომელიც უზრუნველყოფს ძაბვების კონცენტრაციის დაწევას შემავსებელი მარცვლის ზედაპირზე, რაც საშუალებას გვაძლევს ბზარწარმოქმნის დაწყება გადავწიოთ დიდი დატვირთვების არეში. ამ დროს ძირითად როლს თამაშობს შემდგომი და ცემენტის ქვის დრეკადობის მოდულის თანაფარდობა, შემდგომის

სიდიდე, ფორმა და გრანულომეტრული შემადგენლობა და აგრეთვე მარცვლებს შორის მანძილი [232].

ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა [232] ცხადყო, რომ ძაბვების კონცენტრაცია იზრდება მარცვლის ზომის გაზრდასთან და მისი სფეროს ფორმისაგან განსხვავებულობის გაზრდით. თუმცა მარცვლის ფორმა ძაბვების კონცენტრაციაზე ნაკლებად მოქმედებს, ვიდრე მათ შორის დაშორება. ძაბვების კონცენტრაციის დასაწევად რადიკალურ ზომად ითვლება შემვსების ცემენტის ქვის დრეკადობის მოდულების გათანაბრება.

მცირე არაერთგვაროვნებების ახლოს, რომლებიც ძალიან ახლოს არიან განლაგებული დიდ არაერთგვაროვნებებთან, ლოკალური ძაბვები როგორც ამას დრეკადობის თეორიის ანალიზი გვიჩვენებს შეიძლება 9-ჯერ გაიზარდოს მოქმედ საშუალო ძაბვასთან შედარებით [64]. შლიფებში ცემენტის ქვით გარემოცული მარცვალი [96] ექსპერიმენტულმა გამოკვლევამ გვიჩვენა, რომ სტრუქტურული ელემენტების გაყოფის საზღვარზე არსებული ძაბვების კონცენტრაცია 17-ჯერ აღემატება შესაბამისად ცემენტის ქვის საშუალო დეფორმაციის შესაბამის ძაბვებს. [53,64]-ის თანახმად ძაბვების კონცენტრაციის კოეფიციენტი ცემენტის ქვის გაჭიმვისას კაპილარულ და შიდაგელურ სიცარიელებში მერყეობს 1.4 დან - 2.9-მდე.

აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ მასალის სიმტკიცეზე მოქმედებს სხვადასხვა სახის სტრუქტურული შიგა ძაბვები. ბეტონში შიგა ძაბვები აღძრული ჰიდრატაციული გამყარებისას, ცვლიან ბეტონის დეფორმაციულ შესაძლებლობას და ქმნიან დისპერსულად განაწილებული მიკრობზარების განვითარების პირობებს, ამცირებენ ბეტონის სიმტკიცეს. [24]-ში აღნიშნულია, რომ საკუთარი სტრუქტურული ძაბვების ველი უნდა შეესაბამებოდეს გარე დატვირთვისაგან გამოწვეულ ძაბვების ველს. ცემენტის ქვის ჯდომამ შემვსებ მარცვლებში შეიძლება გამოიწვიოს ძაბვა  $100\text{კგ/სმ}^2$ , თუმცა ეს ძაბვები რელაქსაციის

გათვალისწინებით 1.5-6-ჯერ მცირეა, ვიდრე რელაქსაციის გარეშე გამოთვლილი [66]. სტრუქტურული ძაბვები დამოკიდებულია შემდგომის ჩალაგებაზე. ისინი შეკლების დეფორმაციის გამო შემდგომის რომბული სისტემით განლაგებისას მეტია, ვიდრე კუბური სისტემით განლაგებისას [65, 66]. დიდია შეკლების დეფორმაციის როლი ხანგრძლივი ერთდერძა გაჭიმვისას [110] ა.ე. დესოვის [65] მიერ შემოთავაზებულ ბეტონის სიმტკიცის მაკროსტრუქტურულ თეორიაში კუმშვისას, განვითარების სურათი და სტრუქტურული ძაბვების რელაქსაციები გამოსახება (113) ფორმულაზე დამოკიდებულებით. ამოცანის განზოგადებული გადაწყვეტა მოყვანილია ე.მ. მოსკვისის [120] ნაშრომში.

ცნობილია [115], რომ ნარჩენ ძაბვებად იწოდება ისეთი ძაბვები, რომლებიც არსებობენ მასალაში ძაბვების ან შიგა ტემპერატურის შეუცვლელად. ნარჩენი ძაბვები მასალაში შეიძლება წარმოიქმნას ქიმიური პროცესებისას მოცულობითი ცვლილების გამო.

უნდა მივუთითოთ თერმოსტრუქტურულ ძაბვებზე, რომელიც დამოკიდებულია ტემპერატურის გრადიენტზე და შემადგენელი სტრუქტურების ხაზობრივი ტემპერატურული გაფართოვების სხვადასხვა კოეფიციენტებზე. ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკურ მოდელზე დაფუძნებით მარცვლის გარშემო ძაბვების განაწილების შესახებ ექსპერიმენტული გამოკვლევები ჩატარებულია ნაშრომ [14]-ში.

რიგ პრაქტიკულ შემთხვევებში განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ზედაპირების უსწორმასწორობას, რომელთაც შემთხვევით ხასიათი აქვთ გამოწვეული ძაბვების კონცენტრატების ამოცანებს. ამ გამოკვლევების მნიშვნელობა კი ის არის, რომ ზოგიერთი სხეულის რღვევა ზედაპირულ ფენებში იწყება.

ვ.ა. ლომაკინს ნაშრომ [106]-ში მოჰყავს შემთხვევითი უსწორმასწორობით ზედაპირთან ახლოს ძაბვების კონცენტრაციის ამოცანის გადაწყვეტა. მოცემულ შემთხვევაში ჩვენ გვინტერესებს ძაბვების კონცენტრაცია, რომელიც გამოწვეულია ბეტონის

სტრუქტურული ელემენტების (“შეჭიდება”, “მატრიცა”, “მარცვალი”) არაერთგვაროვნებით და ამ ელემენტების არათანაბარი განაწილებით ბეტონის სხეულში. სტრუქტურული ელემენტების არაერთგვაროვნებით გამოწვეული ძაბვების კონცენტრაციის კოეფიციენტი შეიძლება განისაზღვროს [106]-ის გათვალისწინებით.

$$K'=1+TV_K \quad (149)$$

სადაც  $T$ -გაყრის განაწილების პარამეტრია, რომელიც დამოკიდებულია  $P$  მიღებულ უზრუნველყოფაზე.

ძაბვების კონცენტრაცია, გამოწვეული სამი სტრუქტურული ელემენტის არათანაბარი განაწილებით შეიძლება იოლად იქნეს გამოთვლილი, თუკი კომპოზიტის სხეულში მარცვლის თანაბარი განაწილების ვარიაციის კოეფიციენტს გავუტოლებთ ძაბვის ვარიაციის კოეფიციენტს  $V_P$ , რომელიც გამოწვეულია აღნიშნული არათანაბრობით. მაშინ ძაბვების კონცენტრაციის კოეფიციენტი, გამოწვეული ბეტონის ტანში სტრუქტურული ელემენტების არათანაბარი განაწილებით განისაზღვრება შემდეგნაირად

$$K''=1+TV_P \quad (150)$$

ძაბვების კონცენტრაციის საშუალო კოეფიციენტი, რომელიც გამოწვეულია ბეტონის სხეულში სტრუქტურული ელემენტების, როგორც არაერთგვაროვნებით, ისე მათი განაწილების არაერთგვაროვნებით განისაზღვრება შემდეგნაირად

$$K_c = \sqrt{(K')^2 + (K'')^2} \quad (151)$$

თუკი მივიღებთ რომ  $p=0.997$  ე.ი.  $t=3$ , მაშინ ჩვენი შემთხვევისათვის, როცა  $V_k=0.153$  და საშუალო მნიშვნელობა  $V_P=0.5$ , (151) ფორმულით მივიღებთ რომ  $K_c = \sqrt{1.45^2 + 2.5^2} = 2.9$  კონცენტრაციის საერთო ეფექტი, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული გარდა  $K'$  და  $K''$  ეფექტებისა დამოკიდებულია მრავალ სხვა ფაქტორებზე. (151) ფორმულის დანიშნულება კი ის არის, რომ რაოდენობრივად აჩვენოს ძაბვების კონცენტრაციებით გამოწვეული სტრუქტურული ელემენტების

არათანაბარი განაწილებით  $K''$  შეუძლია უფრო დიდი წვლილი შეიტანოს, ვიდრე ძაბვების კონცენტრაციით გამოწვეულს სტრუქტურული ელემენტების მექანიკური ხასიათის განსხვავებით  $K'$  ამიტომ ძაბვების კონცენტრაციის შემცირებით ერთ-ერთ რადიკალურ ღონისძიებად შეიძლება ჩაითვალოს მარცვლების სტოქასტიკური ჩალაგების “გამოსწორება” მათი რეგულარული ჩალაგებისკენ და სტრუქტურის სტერეომეტრული მაჩვენებლების გამოსწორება.

### 2.3.2. სიმტკიცე გაჭიმვაზე ღუნვისას

სხვადასხვა ავტორების ექსპერიმენტული მონაცემების შედეგების სტატისტიკურმა დამუშავებამ საშუალება მოგვცა დაგვედგინა ბეტონის სიმტკიცის კორელაციური დამოკიდებულება კუმშვაზე და გაჭიმვაზე ღუნვისას.

$$R_{\text{ბ.ღ.}} = 0.8R_{\text{კუმ.}} \quad (152)$$

უნდა აღვნიშნოთ, რომ ექსპერიმენტული მონაცემების წერტილები რეგრესიის მრუდიდან გადაისრება +40 და -50%-ით ყველა მარკის ბეტონისათვის „100“ და „1000“-ის დიაპაზონში საშუალო მნიშვნელობა ტოლია  $R_{\text{ბ.ღ.}}/R_{\text{კ.}} = 1.6$

[189]-ის თანახმად ბეტონის სიმტკიცე გაჭიმვაზე ღუნვისას შეიძლება განისაზღვროს ემპირიული ფორმულით

$$R_{\text{გაჭ.}} = \frac{R_{\text{ცემ.}} \sqrt{II}}{9.5 + 0.005 \sum Vd_{\text{საშ}}}, \quad (153)$$

სადაც  $R_{\text{ცემ.}}$  - ცემენტის სიმტკიცეა გაჭიმვაზე, II-ცემენტის ხარჯია  $1\text{მ}^3$  ბეტონზე,  $\sum Vd_{\text{საშ}}$  - შემესების სიმსხოს მახასიათებელია. სიმტკიცის მაჩვენებლის გაჭიმვაზე ღუნვისას  $R_{\text{ბ.ღ.}}$  თანაფარდობა ღერძულ გაჭიმვასთან  $R_{\text{კ.}}$  ჩვეულებრივ ბეტონებში საკმაოდ დიდ დიაპაზონში ირხევა [21,188].

$$K_{\text{გ.}} = \frac{R_{\text{ბ.ღ.}}}{R_{\text{კ.}}} = 1.5 \div 3.0. \quad (154)$$

ბეტონის სიმტკიცის გაზრდას გაჭიმვაზე ღუნვისას ზოგიერთი ავტორები უკავშირებენ ბეტონის რღვევამდე პლასტიკურ გაჭიმვას [174] რ.ლემიტმა თეორიულად ახსნა ბეტონის სიმტკიცის გაზრდა გაჭიმვაზე ღუნვისას, რომელიც ეფუძნება პოტენციალური ენერჯის შედარებას, რომელიც გროვდება გაჭიმვისას და ღუნვისას [181] განვიხილავთ რა ბეტონის სიმტკიცის ზრდას გაჭიმვაზე ღუნვისას ერთდერძა გაჭიმვასთან შედარებით ა. ნევილი მიუთითებს იმ გარემოებას, რომ პირდაპირი გაჭიმვისას მთელი მოცულობა გამჭიმავი ძაბვის გავლენის ქვეშ იმყოფება და ამ შემთხვევაში სუსტი რგოლის არსებობის ალბათობა სტრუქტურაში მაღალია [126]. ბეტონის მუშა მოცულობაში სუსტი ელემენტის მოხვედრის ალბათობა მის ღუნვაზე ორი ტვირთით გამოცდისას მაღალია, ვიდრე ერთი ტვირთით, ამიტომაც ბეტონის სიმტკიცე პირველ შემთხვევაში მცირეა.

[188] თანახმად  $R_{g,d}/R_g$  ფარდობის მნიშვნელოვანი რხევა გამოწვეულია ცდების დადგმის ნაკლოვანებით და მასშტაბური ფაქტორის იგნორირებით.

ო.ი. ბერგი მიუთითებს, რომ [21] ღუნვისას ბეტონის გაჭიმვაზე მუშაობის რღვევას წინ უსწრებს მიკრონაპრალების განვითარების ინტენსიური პროცესი და მოწყვეტაზე წინააღმდეგობა ნიმუშის რომელიმე ნაწილზე გადაილახება. თუმცა, დეფორმაციის არაერთგვაროვნების გათვალისწინებისას მიაღწევს არა მარტო მოწყვეტაზე წინააღმდეგობის ადგილობრივი გადალახვის, არამედ მისი კვეთაზე განვითარება რასაც თან ახლავს დატვირთვის გაძლიერება. ბეტონის შრომისუნარიანობის გათვალისწინებით გაჭიმვაზე ნაპრალებთან (ნაპრალოვან) მდგომარეობაში. კ.ა. მალცოვმა წამოაყენა ჰოპოთეზა ბეტონის ნაპრალის მწვერვალზე სიმტკიცის მომატების შესახებ ცრუ დაძაბული მდგომარეობის წარმოშობის ხარჯზე [111]. მასშტაბური ეფექტი გამოვლინდება ღუნვაზე ცდებისას. ა.ე. დესოვის და ა.ნ. ვახრუშევის მონაცემებით [63], თუ მივიღებთ 1-ს მრღვევ დატვირთვად  $10 \times 10$  სმ კვეთის ძელისათვის, მაშინ  $15 \times 15$  სმ კვეთის ძელისათვის იგი შეადგენს 0.95-ს,  $20 \times 20$  სმ კვეთის ძელისთვის კი შესაბამისად 0.90 (ძელის სიმაღლის შეფარდება მალთან) კ.ნევილის ექსპერიმენტებში ძელის კვეთის მატებასთან  $7.6 \times 10.2$ -დან  $25.4 \times 25.4$  სმ-მდე

სიმტკიცის ვარიაციების კოეფიციენტი ღუნვისას შემცირდა ორჯერ, მიახლოებით 4%-დან 2%-მდე. ანევილის სხვა ექსპერიმენტებში ბეტონის სიმტკიცის ვარიაციების კოეფიციენტი პირდაპირი გაჭიმვისას და ღუნვისას იყო თითქმის ერთნაირი (შესაბამისად 7-დან 6%) [126] ვეიბულის სტატისტიკური თეორიისას [26]

$$R_{\text{გ.ღ.}} = R_{\text{გ.}} (2\alpha + 2)^{1/\alpha}, \quad (155)$$

სადაც  $R_{\text{გ.ღ.}}$ ,  $R_{\text{გ.}}$ -შესაბამისად არის პრიზმატული ღეროს სიმტკიცე გაჭიმვაზე სუფთა ღუნვისას და სიმტკიცე ერთგვაროვანი გაჭიმვისას, - მასალის ერთგვაროვნების მახასიათებელი ცნობილი კონსტანტაა.

[87], [128]-ში დამუშავებულია არაერთგვაროვანი სხეულის ღუნვასთან დაკავშირებული საკითხები. ნეიტრალური ღერძის მდებარეობის გათვალისწინების აუცილებლობის შემთხვევაში შეიძლება გამოვიყენოთ შესაბამისი მეთოდოლოგია, რომელიც მოყვანილია [55]-ში. ჩვენ გადავწყვიტავთ ღუნვის ამოცანას ბეტონის, როგორც კომპოზიციური ხასიათის მასალის გათვალისწინებით, რომელიც ემორჩილება სტატისტიკურ კანონზომიერებებს.

თავიდან განვიხილოთ უმარტივესი შემთხვევა, როდესაც ბეტონის ტიპის მარცვლოვანი კომპოზიციური მასალის სიმტკიცე განისაზღვრება მარცვლების ერთმანეთთან შეჭიდულობით და შეჭიდულობის სიმტკიცის საიმედოება შეესაბამება ვაიბულას კანონს:  $p(R) = \exp(-\lambda R^\alpha)$  ასეთი კომპოზიტის ღუნვისას გაჭიმვაზე სიმტკიცის პროგნოზირება შეიძლება დავიყვანოთ მისი ღერძულ გაჭიმვაზე სიმტკიცის ამოცანამდე. ღუნვისას პრიზმატული ნიმუშის რღვევის შემთხვევაში განსახილველი სისტემა მტყუნობამდე ბევრჯერ შეიცვლის თავის მდგომარეობას -  $\Delta x$  ფენების მწყობრიდან გამოსვლით, დაწყებული გარეთათი. ასეთი სისტემებისათვის მართებულია ფორმულა [50]

$$P(R) = \exp\left[-\sum_x \lambda_x P_x R^\alpha\right], \quad (156)$$

სადაც  $P(R)$  სისტემის უმტყუნო მუშაობის ალბათობაა;  $\lambda_x$  - სისტემის  $x$  მდგომარეობაში დაღატის საშიშროებაა;  $P_x$  - იმის ალბათობაა, რომ ალაღბებულ ადებულ მომენტში სისტემა იმყოფება  $x$  მდგომარეობაში.

ჯამი  $\lambda_0 = \sum_x \lambda_x / P_x$  განიხილება როგორც სისტემის დაღატის საშუალო საშიშროება.

$$\lambda_0 = \sum_{x=0}^{a/2} \lambda_x P_x \cong \sum_{x=0}^{a/2} \lambda \left( \frac{X}{a/2} \right)^{r_0} \frac{\Delta X}{a}. \quad (157)$$

$r_0$  -  $\lambda_x$ -ის  $x$ -ზე დამოკიდებულების ფორმის კოეფიციენტი [147] კერძოდ, როცა  $r=0$   $\lambda_x$ -ის სიმაღლეში განაწილების ეპიურა სწორკუთხოვანია, როცა  $r_0 = \lambda$  სამკუთხაა. გადავალთ რა (157) გამოსახულებაში ინტეგრალზე მივიღებთ

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{2r_0 + 2}. \quad (158)$$

ახლა შეიძლება განვიხილოთ ნიმუში ელემენტების მტყუნების მუდმივი საშიშროებით, რომელიც ტოლია  $\lambda_0$ -ის  $x$  შრის სიმაღლის დამოუკიდებლად ე.ი. დერძული კუმშვის შემთხვევაში  $\rho R = \exp(-\lambda R^a)$ . სტრუქტურის ელემენტარული უჯრედის საიმედოობის ფუნქცია ჩაიწერება ( $R$ ) ინდექსის გამოტოვებით რადგან  $2P^2 - P^4$  [იხ. ფორმულა (13)], ხოლო ნიმუშის საშუალო სიმტკიცე დუნვისას (154) ფორმულით, რადგან

$$R_{\text{ბ.დ.}} \cong \int_0^\infty \left\{ 1 - \left[ 1 - (2p^2 - p^4)^n \right]^{2m^2} \right\} dR, \quad (159)$$

სადაც  $n$  მიმდევრობით შეერთებული უჯრედების რიცხვია. როცა (კომპოზიტის გეომეტრია რეგულარულია)  $2m^2$ -მიმდევრობით შეერთებული უჯრედების ჯაჭვების რიცხვია

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{h}{d} - 1 \right); \quad 2m^2 = \left( \frac{a}{d} - 1 \right),$$

სადაც  $d$  - კომპოზიტის მარცვლის საშუალო დიამეტრია,  $a$  და  $h$  ნიმუშის ზომები.

ამოგხსნით რა (159) და შევადარებთ (156) ფორმულას მივიღებთ რომ

$$R_{\text{ბ.დ.}} = R_{\text{ბ.}} (2r_0 + 2)^{1/\alpha} \quad (160)$$



სადაც  $P_3$  მოცემული ნიმუშის სიმტკიცეა სუფთა გაჭიმვაზე, როცა  $r_0=\alpha$  (160) ფორმულიდან მივიღებთ კომპოზიტებისთვის ვაიბულას გადაწყვეტის კერძო შემთხვევას ჩვენ არ გამოვიყენებთ მიახლოებით პირობებს (157) მაშინ  $R_{3,ღ}$ . უნდა განგვესაზღვრა ფორმულით

$$R_{3,ღ} = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{x=1}^m \left[ 1 - \left( 2e^{-\lambda_x R^\alpha} - e^{-4\lambda_x R^\alpha} \right)^n \right] \right\} dx. \quad (161)$$

ამ შემთხვევაში ამოხსნა ძალიან გაძნელებულია.

აღვნიშნოთ რომ  $\lambda_0$ -ის ასეთივე მნიშვნელობა, როგორც ფორმულა (158)-შია. შეიძლება მივიღოთ ეპიურის ფართობის ნიმუშის სიგრძეზე განაწილებისას ღუნვისას უარყოფის საშიშროების ასეთივე ფართობის ეპიურის  $\lambda_0$  უარყოფის საშიშროებასთან გატოლებით

$$\int_0^{\alpha/2} \lambda \left( \frac{x}{\alpha/2} \right)^{r_0} dx = \int_0^{\alpha} \lambda_0 dx. \quad (162)$$

(162) გამოსახულება ამგვარად წარმოადგენს  $\lambda_0$ -ის გრაფიკულ ინტერპრეტაციას.

შედარებით უფრო საერთო შემთხვევისთვის, როცა მარცვლოვანი კომპოზიტის სიკვრივე განისაზღვრება არა მარტო მარცვალთა შეჭიდულობით, არამედ მარცვალთა სტატიკური მახასიათებლებით, მატრიცებით და მათი შეჭიდულობით, შუალედური წყობის მოყვანის გარეშე გამოსახულება ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$R_{g,R} = K \int_0^{\infty} \exp \left[ - \left( \frac{\lambda_1}{2\alpha_1 + 2} vR^{\alpha_1} + \frac{\lambda_2}{2\alpha_2 + 2} rR^{\alpha_2} + \frac{\lambda_3}{2\alpha_3 + 2} vR^{\alpha_3} \right) \right] dR. \quad (163)$$

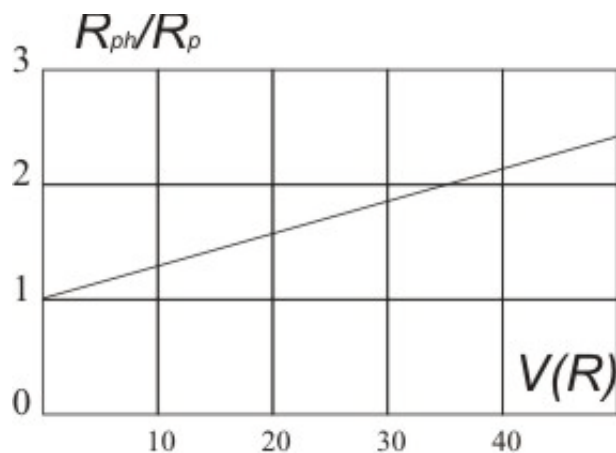
აქ  $\lambda_1, \alpha_1; \lambda_2, \alpha_2; \lambda_3, \alpha_3$  - შესაბამისად, პარამეტრებია ელემენტების გაჭიმვაზე სიმტკიცის განმსაზღვრელი - „მარცვალი“, „მატრიცა“ და „შეჭიდულობა“. მნიშვნელობა  $k, v, r$  მოყვანილია (33) ფორმულაში.

სტოქასტიკური სტრუქტურებისთვის წინამდებარე ფორმულები რჩებიან ისეთივენი, მაგრამ პარამეტრები  $n$  და  $2m^2$  მრავლდება  $\exp V_3$  სადაც  $V_3$  კოეფიციენტი კომპოზიტის სხეულში მარცვალთა განაწილების ვარიაციის კოეფიციენტია, ე.ი. ისევე როგორც ამ თავის 3.8-შია განხილული გაჭიმვის შემთხვევაში.

ნახ. 13-ზე მოყვანილია გრაფიკი სიმტკიცის ერთგვაროვნებაზე  $R_{3,ღ}/R_3$  თანაფარდობის დამოკიდებულება სიმტკიცის ერთგვაროვნებაზე

(160) ფორმულის თანახმად, როცა  $R_0=\alpha$ .  $\alpha$ -ს მნიშვნელობები როგორც ადრე, გამოთვლილია სიმტკიცის ვარიაციების  $V(R)$  კოეფიციენტის შესაბამისი მნიშვნელობებით, %, როცა  $R_{min}=0$ . როგორც ნახ. 13-ზე ჩანს ბეტონის სტრუქტურის ერთგვაროვნების ხარისხის ზრდასთან ერთად  $R_{g,l}/R_g$  ეცემა  $\lambda$ -ის ფარგლებში. საერთო შემთხვევაში კი ამ სურათზე მოყვანილ ცვლილებათა დიაპაზონი  $R_{g,l}/R_g$  მოიცავს ზემოთმოყვანილ ექსპერიმენტალურად განსაზღვრულ მითითებული სიმტკიცის ურთიერთობათა დიაპაზონს. ეს ხსნის ერთ-ერთ მთავარ მიზეზს  $R_{g,l}/R_g$  შეფარდების არამუდმივობისა ბეტონის სტრუქტურის ერთგვაროვნების სხვადასხვა ხარისხის დროს ამა თუ იმ ექსპერიმენტებში და იძლევა რაოდენობრივ შეფასებას ამ მოვლენის გარშემო.

ნახ. 13-ის მიხედვით შეფარდება  $R_{g,l}/R_g = 1,7$ -ს (ან 1,6-ს) შეესაბამება სიმტკიცის ვარიაციების კოეფიციენტი 25% (ან 21%).



ნახ. 13.  $R_{g,l}/R_g$  შეფარდების დამოკიდებულება ბეტონის ერთგვაროვნებაზე

ისე როგორც  $R_{g,l}$  განსხვავდება  $R_g$ -მუდმივ მამრავლზე, [იხ. ფორმულა (160)], კოეფიციენტი ვარიაციისა ღუნვაზე უნდა იყოს ტოლი კოეფიციენტისა ვარიაცია ბეტონის სიმტკიცისა ღერძულ გაჭიმვაზე. რა თქმა უნდა პრაქტიკულად ეს ტოლობა შეიძლება დამახინჯდეს მასალის ანიზოტროპიის ძლიერი გამოხატულების ან სხვა არასტატისტიკური არათანამშრომლობის მიზეზები.

მასშტაბური ეფექტები სიმტკიცისა ღუნვაზე, ანალოგიურად შეესაბამება იმავე გაჭიმვაზე გამოცდილი ნიმუშების მასშტაბურ ეფექტებს, ეს შეესაბამება ზემოთ მოყვანილ ღუნვაზე მასშტაბურ

ეფექტებს ა.ე. დესოვის და ა.ნ. ვახრუშევის ექსპერიმენტებიდან, როცა ვადარებთ მათ მნიშვნელობებს გაჭიმვაზე მასშტაბური ეფექტების მნიშვნელობებთან ცხრილ 4-ში

როცა  $V(R) = 17\%$ -ს.

დასასრულს აღვნიშნავთ, რომ ნახ. 13-ზე გრაფიკი შეიძლება იყოს გამოყენებული შებრუნებული ამოცანის ამოხსნისას, კერძოდ კი,  $R_{g,R}/R_g$  ექსპერიმენტით განისაზღვრება სიმტკიცის ვარიაციების კოეფიციენტი  $V(R)$ . ამ მიზნებისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ  $R_{g,R}/R_g$ , მაგრამ  $R_{g,R}/R_g$  გადათვლით (160) ფორმულით გამოიყვანება.

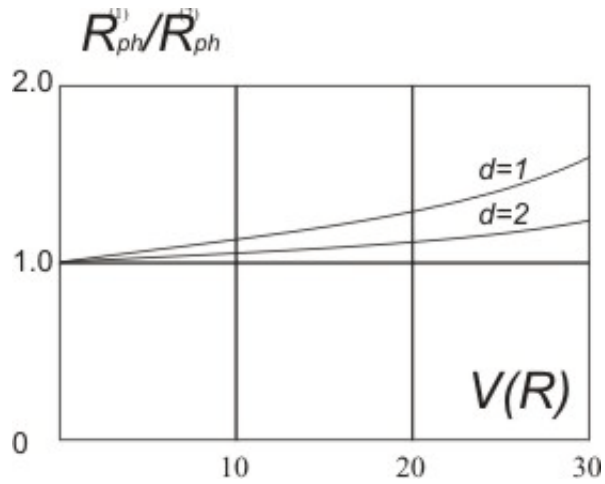
(130) ფორმულის თანახმად და (155) ფორმულის გათვალისწინებით ბეტონის სიმტკიცის მაჩვენებელთან შესაბამისობა ძელების ღუნვაზე გამოთვლისას ერთი და ორი ტვირთისთვის შესაბამისად განისაზღვრება ფორმულით

$$R_{g,R}^{(1)}/R_{g,R}^{(2)} = e^{0,134(n-1)/\alpha}. \quad (164)$$

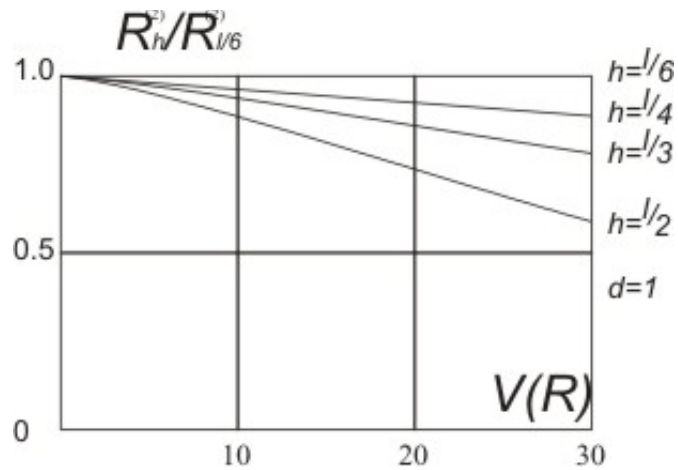
აქ  $n$  სტრუქტურული რგოლების თანმიმდევრობით შეერთების რიცხვია (164) ფორმულის მიხედვით, რომელშიც  $\lambda$  ამ შემთხვევაში არის დაშორება ორ ტვირთს შორის; ერთიანი რიცხვი მიმდევრობით შეერთებული სტრუქტურული რგოლებისა 1 ტვირთით ცდის სქემის მიხედვით.

ნახ. 13, ა-ზე მოყვანილი მნიშვნელობები  $R_{g,R}/R_g$  და  $V(P)$  დამოკიდებულება  $20 \times 20$  სმ კვეთის ძელისთვის, 60 სმ-ით არის  $d=1$  და 2სმ.

2 ტვირთს შორის მანძილი შესაბამისად 1/6, 1/4, 1/3 და 1/2 მალა  $l$ -დან ექსპერიმენტული კოეფიციენტი - 1.0; 0.95; 0.87 და 0.75 [188]. თეორიული შეფასება ყალიბდება როგორც  $R_{g,R}/R_g$  იხ. ნახ. 14, ბ.



ნახ. 13. ა.  $R_{g,R}^{(1)}/R_{g,R}^{(2)}$  შეფარდების დამოკიდებულება ბეტონის ერთგვაროვნებაზე.



ნახ. 13 ბ.  $R_h^{(2)}/R_{l/6}^{(1)}$  შეფარდების დამოკიდებულება ბეტონის ერთგვაროვნებაზე

როგორც ჩანს ამ გრაფიკებიდან, დამუშავება მიდგომა იძლევა საშუალებას ექსპერიმენტული მონაცემები ავსხნათ და შევაფასოთ, კერძოდ, ბეტონის ერთგვაროვნების კონკრეტული ხარისხიდან გამომდინარე.

### 2.3.3. ბეტონის თეორიული სიმტკიცის შეფასება არადეფექტური სტრუქტურის შემთხვევაში

ინტერესს იწვევს ბეტონის სიმტკიცის თეორიული შეფასება, მისი არადეფექტური სტრუქტურის შემთხვევაში.

შეჭიდების ძალების იდეალური შეფასება [25, 109] მიღებული ატომთა შორის ძალის ცვლილების კანონის გამოყენებით, რაც გვაძლევს ჩვეულებრივ სიდიდეს, რომელიც იცვლება 0.03-დან 0.17-მდე. ქვედა ზღვარი პრაქტიკულად მიღწეულია რკინის ძაბვისმაგვარ კრისტალებში. სიმტკიცე გაგლეჯაზე ჩვეულებრივ მასალებში გაცილებით მცირეა. როგორც ჩვენ ვნახეთ ეს შეუსაბამობა აიხსნება სტრუქტურის დეფექტებით. უდეფექტო ცემენტის ქვის თეორიული სიმტკიცე მოლეკულური შეჭიდების პირობიდან გამომდინარე, შეადგენს 105.000მპა-ს [18].

კუმშავი მრღვევი დატვირთვა იდეალურად მყარი სხეულებისათვის თეორიულად უსასრულობის ტოლია, რადგან ელემენტარული ნაწილაკების მიახლოებისას მათ შორის ურთიერთქმედების ძალები იზრდება უსასრულობამდე. რაც შეეხება კომპოზიციურ მასალებს, მათი თეორიული სიმტკიცე კუმშვაზე არადეფექტური სტრუქტურისას, შეიძლება განისაზღვროს სხვა მოსაზრებებიდან.

ზოგიერთი სხეულის რღვევის მექანიზმი კუმშვისას განისაზღვრება სტრუქტურის მდგრადობის დაკარგვით. ყოველივე ეს მახასიათებელია როგორც კრისტალებისთვის ისე სტრუქტურირებული პოლიკრისტალებისთვისაც [115]. ეს მექანიზმი განსხვავებულად ნათლად ჩანს ბოჭკოვან კომპოზიციურ მასალებში.

ბ. როზენმა [152] განიხილა ბოჭკოვანი კომპოზიციური მასალის ორგანოზომილებიანი ანალიტიკური მოდელი, რომელშიც პარალელური ბოჭკოები განლაგებულია ერთმანეთისგან ერთი და იგივე მანძილზე. ითვლება, რომ კომპოზიცია ირღვევა ბოჭკოების მდგრადობის დაკარგვით. ამასთან შესაძლებელია ორი შემთხვევა. პირველ შემთხვევაში, ყველა ბოჭკოები კარგავენ მდგრადობას, იღუნებიან ტალღის ერთი და იგივე სიგრძით, მაგრამ მეზობელ ბოჭკოებში გაღუნვა არ ემთხვევა ფაზაში. ამ შემთხვევაში, უმეტეს დეფორმაციად

ითვლება მატრიცის გაჭიმვა, რის გამოც ავტორი ამ სახის მდგრადობის დაკარგვას უწოდებს გაჭიმვას. მეორე შემთხვევაში, ყველა ბოჭკოები კარგავენ მდგრადობას, ილუნებიან ერთნაირი ტალღის სიგრძით და ღუნვა მეზობელ ბოჭკოებში ფაზით ემთხვევა. მატრიცა დეფორმირდება ძირითადად ძვრით, ამიტომ მდგრადობის დაკარგვას ასეთ სახეს უწოდებენ ძვრითს.

თეორიული და ექსპერიმენტული მონაცემების შედარებისას, არადრეკადი ქცევის გათვალისწინებისთვის გამოყენებული იქნა ცვალებადი მოდული, მითუმეტეს საანგარიშო მნიშვნელობები მიიღება მაღალი.

გადავიდეთ არადეფექტურ ბეტონზე, რომელშიც სტრუქტურული ელემენტებს შორის შეჭიდება იდეალურია, რომელიც მიღებულია ატომებს შორის ძალის ცვლილებების კანონებიდან.

განვიხილოთ ერთნაირი დიამეტრის სფეროების კუბისებური ჩალაგება. (ნახ. 14, ა). გავითვალისწინოთ, რომ საყრდენი ხახუნის არარსებობისას ნიმუში ირღვევა ვერტიკალური ბზარების წარმოქმნით, განვიხილოთ ღეროს სიმტკიცის დაკარგვა, რომლებიც შედგენილია სფეროებისგან  $AA_1$  ღერძით (ნახ 14, ბ ბზარი დაშტრიხულია) ასეთი ბზარების წარმოქმნას შეესაბამება ღეროს ნახევარტალღით ღუნვის შემთხვევას; რომლებიც ფაზით არ ემთხვევიან. დიდი რაოდენობით ნახევარტალღის წარმოქმნას ამ შემთხვევაში ეწინააღმდეგება მჭიდროდ ჩალაგების ხასიათი.

მოცემული ამოცანა არის გარემოში შედგენილი მდგრადობის დაკარგვის ამოცანა. საერთო გადაწყვეტა ჩაიწერება როგორც [72],

$$\frac{E_3}{2} \int_0^l I(x'')^2 dy = \frac{P_k}{2} \int_0^l (x')^2 dy - \frac{E_p}{2} \int_0^l x'^2 dy \quad (165)$$

სადაც  $E_3$  – შედგენილი ღეროს მასალის დეფორმაციის მოდულია,  $E_b$  – მატრიცის დეფორმაციის მოდულია,  $P_3$  კრიტიკული ძალაა,  $I$  – ღეროს ცვლადი ინერციის მომენტია,  $x$  – ღეროს ჩალუნვაა,  $l$  – ღეროს სიგრძეა ( $E_s > E_x$ ).

ღეროს გაღუნული ღერძის განტოლება მიღებულია პარაბოლით:

$$x = \frac{4f}{l} y - \frac{4f}{l^2} y^2 \quad (166)$$

სადაც  $f$  – ჩაღუნვაა  $l/2$  წერტილში.

ღეროს ცვლადი სისქე  $D_y$  მიახლოებით აღწეროთ სინუსოიდით:

$$D_y = D \sin \frac{\pi}{D} y \quad (167)$$

მაშინ ინერციის მომენტს ექნება შემდეგი სახე:

$$I = \frac{\pi D_y^4}{64} = \frac{\pi}{64} D^4 \sin^4 \frac{\pi}{D} y. \quad (168)$$

(165) და (166) ჩასმით (168) ფორმულაში და იმის გათვალისწინებით, რომ კუმშვის კრიტიკული ძაბვა  $\sigma_{კუმ} = P_{კრ}/D^2$  მივიღებთ

$$\sigma_{კუმ} = 0.22 \frac{D^2}{l^2} E_s + 0.10 \frac{l^2}{D^2} E_p. \quad (169)$$

$\sigma_{კუმ}$  მინიმალურ მნიშვნელობებს მივიღებთ პირობიდან:

$$\frac{d\sigma_{კუმ}}{d_k} = 0; \quad K = \left( \frac{D}{l} \right)^2.$$

$\sigma_{კუმ}$  მინიმუმი შეესაბამება წერტილს

$$\frac{l}{D} = 1.22 \sqrt{\frac{E_s}{E_x}}. \quad (170)$$

მაგალითად, როდესაც  $E_s = 5 \cdot 10^5$  კგ/სმ<sup>2</sup> და  $E_x = 210^5$  კგ/სმ<sup>2</sup> მივიღებთ  $l = 1.53 D$ , რაც შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ მდგრადობის ადგილობრივი დაკარგვით (ერთი-ორი სფეროს ამოვარდნა სვეტიდან).

(170) → (169) მივიღებთ მინიმალურ მნიშვნელობას

$$\sigma_{კუმ} \cong 0.30 \sqrt{E_s E_x}. \quad (171)$$

(171) ფორმულის დაზუსტება შეიძლება იმ გარემოების გათვალისწინებით, რომ აქ  $E_s$  და  $E_x$  მნიშვნელობები შეესაბამება შემგსების და ხსნარის დრეკად-პლასტიკურ მოდელს, შეიძლება მიახლოებით განვსაზღვროთ შემდეგი გამოსახულებებით [80]

$$E_{d,p} = (1 - \lambda) \quad (173)$$

სადაც  $\lambda=0.5\div 0.8$  მასალის პლასტიკურობის კოეფიციენტი,  $E$ -დეფორმაციის საწყისი მოდული.

საშუალოდ მივიღებთ, რომ  $\lambda=0.65$ . საბოლოოდ (172)-დან მივიღებთ:

$$\sigma_{\text{კუმ}} \cong 0.1 \sqrt{E_g E_x}, \quad (173)$$

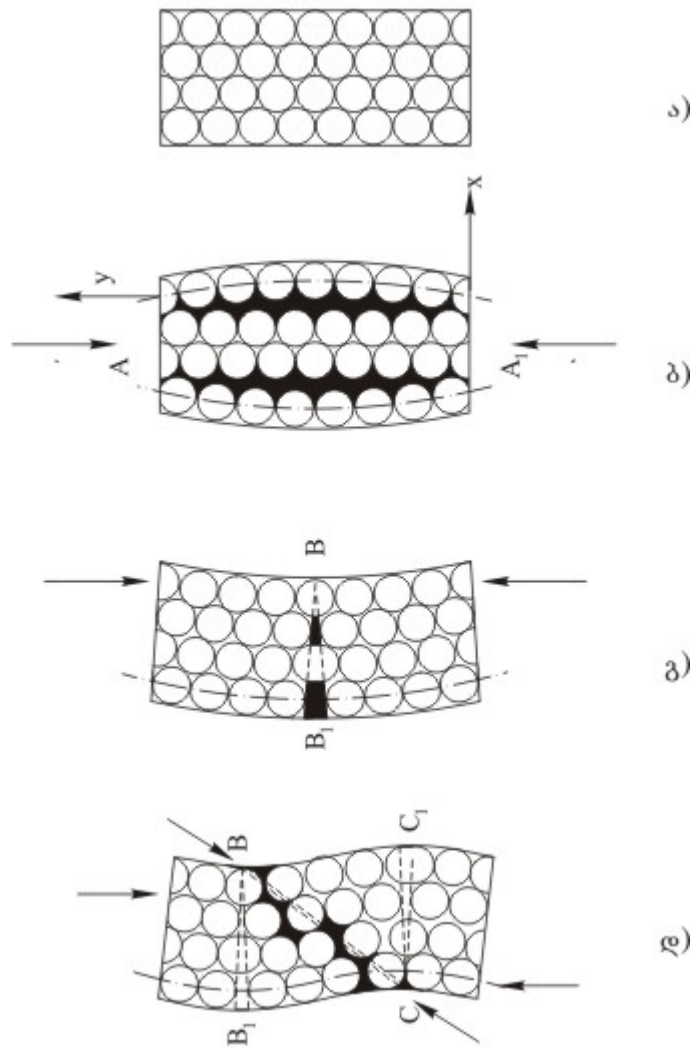
სადაც  $E_g$  და  $E_x$ -დრეკადობის საწყისი მოდულია.

მაგალითად, როცა  $E_g = 5 \cdot 10^5$  კგ/სმ<sup>2</sup> და  $E_x = 2 \cdot 10^5$  კგ/სმ<sup>2</sup> მივიღებთ, რომ უდევექტო ბეტონის თეორიული სიმტკიცე მისი რღვევის გამომწვევი მიზეზია.

სტრუქტურული ელემენტების მდგრადობის დაკარგვის შემთხვევაში ტოლი იქნება 30. 000 კგ/სმ<sup>2</sup>.

შემესები სვეტების მდგრადობის დაკარგვისას ერთი ნახევარტალღით, რომლებიც ფაზით ემთხვევა (ნახ 14. ბ), მაგისტრალურ ბზარს ექნება ჰორიზონტალური მიმართულება  $BB_1$ . ორი ნახევარტალღის შემთხვევაში, როდესაც ფაზები ემთხვევა (ნახ. 14, გ) შეიძლება ჩამოყალიბდეს ორი  $B_1$  და  $C_1C$  ბზარები, რომლებიც შემდეგში იხურებიან ან არ ყალიბდებიან ბეტონის გაჭიმვისგან დამოკიდებულებებით  $B_1$  და  $C_1$  წერტილებში. შემდეგ დატვირთვა ნიმუშის ცენტრალური წერტილებიდან გადაეცემა  $B$  და  $C$  წერტილებს და ეს ნაწილი იხლიჩება  $C$  მიმართულებით (ბზარია კუთხით, რღვევის “ძვრითი” ხასიათი).





ნახ. 14. ა-რეგულარული ჩაწყობა; ბ - მდგრადობის დაკარგვის სახე გაჭიმვისას; გ- მდგრადობის დაკარგვის სახე არაცენტრალური დატვირთვისას; დ- მდგრადობის დაკარგვის სახე ძერის დროს.

სხვადასხვა ჩალაგებისათვის რღვევის ხასიათი კუმშვისას შეიძლება იყოს სხვანაირი, ზოგიერთი მათგანი განხილული იყო მოცემული თავის დასაწყისში.

### 3. დასკვნა

ჩატარებულ გამოკვლევათა შედეგები საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. ბეტონის მექანიკასთან სტრუქტურული მიდგომა, როგორც მარცვლოვან კომპოზიტიურ მასალასთან, საშუალებას იძლევა საიმედოობის თეორიის მეთოდებით შევიმუშავოთ მისი მათემატიკური მოდელები. შესაძლებელი ხდება საკითხებისადმი თეორიულ რაოდენობრივი მიდგომა, რომლებიც, ჩვეულებრივ, ბეტონთმცოდნეობაში ემპირიულად იხსნება. მარცვლოვანი კომპოზიტების სტრუქტურულ მექანიკაში მიზანშეწონილია მათი სტრუქტურული ელემენტების – მარცვლის, მატრიცის და შეჭიდულობის სტატისტიკური მახასიათებლები ოპტიმალურად ვცვალოთ. ასეთი მიდგომისას შესაძლებელია ერთეული პოზიციებიდან გადავწყვიტოთ სხვადასხვა სახის ბეტონის სიმტკიცის და რღვევის თეორიები.
2. შემუშავებულ მოდელებს აქვთ პრაქტიკული მნიშვნელობა ბეტონის, როგორც კომპოზიტის შედარებითი მახასიათებლების განსაზღვრისას. დატვირთვის გადანაწილების ეფექტის გათვალისწინებით შემუშავებულია ბეტონის „მაბვან-დეფორმაცია“ დამოკიდებულების აგების სხვა სახის თეორია მისი სტრუქტურული ელემენტების მახასიათებლების და ერთგვაროვნების ხარისხის გათვალისწინებით, რომელიც საშუალებას იძლევა აღვწეროთ დამახასიათებელი უბნები დიაგრამის აღმავალ და დაღმავალ განშტოებებზე.
3. მიღებულია ბეტონის გაჭიმვაზე სიმტკიცის ანალიზური დამოკიდებულებები მისი სტრუქტურული ელემენტების სტატისტიკურ გამოსახვის მახასიათებლებზე, სტრუქტურის სტერეომეტრიული უწყვეტობის ხარისხზე და ნიმუშის ზომაზე. სტრუქტურული ელემენტების სტატისტიკურ მახასიათებლებს წარმოადგენს: სიმტკიცეები, დეფორმაციის მოდულები და ერთგვაროვანი მარცვლის

მახასიათებლები; მატრიცები და შეჭიდულობები; მარცვლის ზომები და მარცვლის მასალის ტანში ერთგვაროვანი განაწილების ვარიაციების კოეფიციენტები; მატრიცის და მარცვლის განივი დეფორმაციის კოეფიციენტები.

4. ბეტონის ღუნვისას გაჭიმვაზე სიმტკიცის ამოცანა ამოიხსნება ბეტონის ერთგვაროვნების გათვალისწინებით.
5. ნაჩვენებია, რომ სისტემის მწყობრიდან გამოსვლის შუალედური საშიშროების მცნების ხმარებისას, ეს ამოცანა დადის ღერძული გაჭიმვის ამოცანამდე. მიღებულია ღუნვისას ბეტონის სიმტკიცის თანაფარდობები გაჭიმვისას სიმტკიცესთან და დამოკიდებულია ბეტონის ერთგვაროვნებასთან, რომლებიც გვიჩვენებენ, რომ ბეტონის სიმტკიცის ვარიაციების კოეფიციენტების კლებისას ეს შეფარდება იკლებს.
6. ზოგად შემთხვევაში ჩამოყალიბებულია დამოკიდებულება ბეტონის დრეკადობის მოდულსა და მარცვლის, მატრიცის და მათი შეჭიდულობის დრეკადობის მოდულის სტატისტიკურ მახასიათებლებს შორის.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. დ. დანელია, ზ. ანთელიძე, გ. ღვინევაძე. ადგილობრივი მასალებისგან ნაშენები კაშხლის დამაბული მდგომარეობის გამოკვლევა დინამიკური დატვირთვების დროს. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. „საერთაშორისო სიმპოზიუმი თხელკედლიანი სივრცითი სისტემების პრობლემებზე“. თბილისი, 2001.
2. ა. საყვარელიძე, ი. გიორგაძე. ბეტონის შეკვლების პროცესების აღმწერი უნივერსალური მოდელების შექმნა. მშენებლობა 2(17). თბილისი 2010. გვ. 103-106.
3. გ. მუხაძე, ა. კაკუშაძე, მარაგის კოეფიციენტის განსაზღვრა მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდებით. „ტექნიკა და შრომა“, თბილისი, 1954.
4. ა. პირადოვი, კ. პირადოვი, ლ. კახიანი, გ. იოსებაშვილი, ბეტონის და რკინაბეტონის რღვევის მექანიკის საფუძვლები, „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 1998, -71გვ.
5. ა. ტატიშვილი, ვ. სერინგულიანი, ე. მიულმანი. მსუბუქი ბეტონები საქართველოს ბუნებრივ და ხელოვნურ შემავსებლებზე. „საბჭოთა საქართველო“, თბილისი, 1963.
6. გ. ღვინევაძე. სტრუქტურული ელემენტების დეფორმაციის მოდულის გავლენა ბეტონის სიმტკიცეზე. პერიოდული სამეცნიერო ჟურნალი – „ინტელექტი“. თბილისი, 2001.
7. გ. ღვინევაძე. მატრიცისა და მარცვლის განივი დეფორმაციის კოეფიციენტთა სხვაობის გავლენა ბეტონის სიმტკიცეზე. პერიოდული სამეცნიერო ჟურნალი – „ინტელექტი“. თბილისი, 2001.
8. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия (с учетом ползучести). Стройиздат, М., 1966.
9. Алмазов А.Б., Павлоцкий И.П., Вероятностные методы в теории полимеров, „Наука“, 1971.
10. Аракелян А.А., Рафаелов А.К. К вопросу прочности при растяжении легкого бетона на природных заполнителях Армянской ССР. Тр10 коорд.совещ.по гидротехн., „Энергия“,Л.,1972.
11. Афанасьев Н.Н. Статистическая теория усталостной прочности металлов. Изд. АН УССР,1963.
12. Механизм деформирования и разрушения бетона в свете новых исследований по структурообразованию цементного камня. Мат. VI конф. по бетону и железоб. Белорусск.НТО Стройиндустрии, Рига,1966.
13. Ахвердов И.Н. К теории упрочнения и деформирования структуры цементного камня и микробетона по В.К.Юнгу. Матер.УП Всес.конф.по бетону и Железобет.,изд. „Полымя“, Минск, 1972.
14. Ахвердов И.Н., Смольский А.Е., Скочеляс В.В. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. „Наука и техника“, Минск,1973.

15. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. Стройиздат, М., 1970.
16. Баженов Ю.М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций. Госстройиздат, М., 1963.
17. Баренблатт Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. „Прикладная математика и техническая физика”, № 4, 1961.
18. Бартенев Г.М., Разумовская И.В. Фононная концепция хрупкого разрушения твердых тел. „Физико-химическая механика материалов”, 5, №1, 1969.
19. Бахтияров Е.И., Лисов А.А., Луговской П.Н. Исследование неоднородности распределения напряжений в бетоне на фотоэлектронной установке. „Бетон и железобетон” №2, 1970.
20. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. Госстройиздат, М., 1962.
21. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. Стройиздат, М., 1971.
22. Берг О.Я., Хубова Н.Г., Щербаков Е.Н. Разрушение контакта между заполнителем и раствором при сжатии бетона. Изв. вузов, „Стр. и арх.”, №8, 1972.
23. Бинерман Д.Я. О вероятности адгезионного разрыва. „Механика полимеров”, №3, 1973.
24. Богачев И.Н., Вайнштейн А.А., Волков С.Д. Введение в статистическое металловедение. „Металлургия”, М., 1972.
25. Бокштейн С., Светлов И. Предисловие к кн. „Волокнистые композиционные материалы” (пер. с англ.), „Мир”, М., 1967.
26. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. Стройиздат, М., 1965.
27. Болотин В.В., Москаленко В.Н. К расчету макроскопических постоянных сильно изотропных композитных материалов. „Механика твердого тела”, №3, 1969.
28. Болотин В.В. Применение теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Стройиздат, М., 1971.
29. Болотин В.В. Некоторые математические и экспериментальные модели процессов разрушения. „Проблемы прочности”, №2, 1971.
30. Болотин В.В., Гольднблат И.И., Смирнов А.Ф. Строительная механика (современное состояние и перспективы развития), М., 1972.
31. Будештский Р.И. К статистической оценке однородности структуры бетона. Автореф. канд. дисс., ТНИСГЭИ, Тбилиси, 1965.
32. Будештский Р.И., Геворкян Г.Х. Применение теории случайных функций к контролю качества бетона. Тр. ИСМиС АН ГССР „Бетон и железобетон”, Ш, 1969.
33. Бусленко Н.М. Математическое моделирование производственных процессов. „Наука”, М., 1964.
34. Бялер И.Я., Круглицкий В.В., Батюк В.И. О теоретических основах прочности связанных структурированных полидисперсных композиций. ДАН СССР, 209, №2, 1973.
35. Ван Фо Фы Г.А. Модель неоднородного тела и задача прогноза свойств композиционного материала. В кн. „Проблемы механики твердого деформируемого тела”, Судостроение, Л., 1970.

36. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. „Наука”, М.,1964.
37. Вербецкий Г.П. Обоснование новых рекомендаций по нормированию величин допускаемого раскрытия трещин в бетоне и ж.б., Матер.VI конф. по бетону и железобетону, Груз. НТО Стройиндустрии,Рига,1966.
38. Вепхвадзе Н.А., Зедгинидзе И.Г. Математическое описание прочности бетонов. „Тр.Пробл.лаборат.атоматиз. и вычисл. техн. Груз.политехн. ин-та” , №4, 1974.
39. Витвицкий П.М. Прочность микронеоднородных хрупких тел со статическим распределением дефектов типа трещин. „Физико-химическая механика материалов”, Л., №4, 1968.
40. Волярович М.П., Авдеев М.Н.,Медведев А.А. О статистическом законе распределения предела прочности структурных связей дисперсных систем и высокомолекулярных соединений. „Колл.журнал”,т.35, №1, 1973.
41. Волженский А.В., Чистов Ю.Д. О процессах твердения цемента и их влияние на микроструктуру и некоторые физические и механические свойства образующегося камня. ЦП НТО Стройиндустрии, сб.1, Стройиздат, М.,1966.
42. Волков С.Д. Статистическая теория прочности. Машгиз, М., 1960.
43. Воробьев В.А. Строительные материалы. „Высшая школа”, М., 1973.
44. Воробьев В.А. Радиационная дефектоскопия бетонных и железобетонных конструкций. Стройиздат, М., 1972.
45. Гвинепадзе Г.А. Структурная теория масштабных эффектов прочности. Международный научный журнал „Проблемы прикладной механики”, Тбилиси, „Мерани-3”, 2001.
46. Гениев Г.А., Киссюк В.Н. К вопросу обобщения теории прочности бетона. „Бетон и железобетон”, №2, 1965.
47. Гершберг О.А. Проблемы технологии бетона при использовании малоподвижных бетонных смесей. Матер.VI ко ф. по бетону и железобетону, НТО Стройиндустрии, сб.1, Стройиздат, М., 1966.
48. Герштель Г.Б. Некоторые вопросы теории напряженно-армированного состояния и прочности бетона. В кн. „Технология бетона и жел.бет.констр”, НИИСК, „Будивельник”, Киев, 1972.
49. Гладышев Б.М. Структурные модели бетона и влияние физико-механических свойств заролнителей на прочность бетона, Вестн. Льв. ПИ, №35, 1969.
50. Гнеденко В.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. „Наука” , М., 1965.
51. Гойхман Б.Д. Об уравнениях временной зависимости прочности твердых тел. „Проблемы прочности”, №8, 1972.
52. Гольденлатт И.И., Копнов В.А. Критерий прочности анизотропных материалов. Изв. АН СССР, Механика, №6, 1965.
53. Гордон С.С, Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях. Стройиздат, М., 1969.
54. Горенбейн В.Я. Износостойкость облицовок гидротехнических сооружений. „Энергия”, М., 1967.
55. Горнов В.И Исследование сопротивления бетонных элементов на изгиб. „Бетон и железобетон”, №1, 1972.
56. Городецкий А.С. Определение вероятности разрушения стержневых систем. Матер. III Всесоюзн. конф. „Проблемы надежности в стр. Механике” (тез.докл.), М., 1971.

57. Горохов В.В. Дкфекты структуры гидротехнического бетона. „Энергия”, М.-Л., 1965.
58. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. Брест: БПН. -217с.
59. Грушко И.М., Глущенко Н.Ф., Ильин А.Г. Структура и прочность дорожного цементного бетона. Изд.ХГУ, Харьков, 1965.
60. Грушко И.М. О физических основах прочности бетона на растяжение. В кн. „Вопросы теории и технологии железобетона”, ХИСИ, Харьков,1972.
61. Давиденков Н.Н. Динамические испытания металлов. ОНТИ, 1936.
62. Давиденков Н.Н. О влиянии размеров образцов на их механические свойства. "Заводская лаборатория", №3, 1960.
63. Десов А.Е. Вахрушева А.Н. Методы испытания бетона на растяжение раскалыванием и на растяжение при изгибе. В кн. "Технология и свойства тяжелых бетонов", Госстройиздат, М., 1962.
64. Десов А.Е. Некоторые вопросы структуры, прочности и деформации бетонов. В кн. "Структура, прочность и деформации бетонов". Стройиздат, М., 1966.
65. Десов А.Е. Макроструктурная гипотеза прочности бетона при сжатии и результаты ее экспериментальной проверки. "Бетон и железобетон", №7, 1972.
66. Десов А.Е. Высокопрочный бетон. В кн.ю "Технология бетона и желю бетю констр.". НИИСК, изд. "Будивельник". Киев, 1972.
67. Джикаева Г.А., Хвингия М.С. Влияние возраста на аглокерамзитобетона. Тр.ИСМиС АН ГССР, "Бетон и железобетон", V, Тбилиси, 1972.
68. Дзюба Б.Д. Влияние размеров бетонных образцов на величину прочности с учетом их структуры. В кн. "Техн.бетона и ж.б.констр". НИИСК, "Будивельник", Киев, 1972.
69. Дмитриев Л.Г. Возможные расчетные стержневые модели некоторых непрерывных механике". Стройиздат, М., 1966.
70. Дунин-Барковский И.В., Смирнов Н.В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике (общая чьясть), ГИТЛ, М., 1959.
71. Журков С.Н. Проблема прочности твердых тел. Вестник АН ГССР, № III, 1957.
72. Завриев К.С., Карцивадзе Г.Н. Устойчивость и динамика сооружений. "Цодна", Тбилиси, 1959.
73. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. М:Высшая школа, 1991,-285с.
74. Зедгинидзе И.Г. Математическое планирование эсперимента для исследования и оптимизации свойств смесей. Изд.АН ГССР, Тбилиси, 1971.
75. Зоделава Г.Л., Гогохия Н.Д. Влияние температурного и скоростного факторов на деформативные свойства конструкционных пластмасс. Матер. респ. совещ. "Инженерная механика полимеров и примен. пластмасс в промышл.", Тбилиси, 1969.
76. Иванов И.А., Кротов А.И., Тимофеев А.И. Исследование совместной работы пористого заполнителя и цементного камня при моделировании легких бетонов повышенной прочности. Матер. у I конф. по бетону и ж.б. НТО стройиндустрии, сб. I, Стройиздат, М., 1966.
77. Каландадзе В.Ш. Рациональный тип опор из сборного центрифугированного железобетона. "Бетон и железобетон", №3, 1963.

78. Калис И.А. Влияние структурной неоднородности материала на его прочность. В кн. "Иссл.по бетону и железобетону", УШ, Рига, 1965.
79. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Стройиздат, М., 1966.
80. Камейко В.А., Ломова Л.М. Исследование прочности и деформации центрально и внецентренно сжатых элементов из плотного силикатного бетона. В кн. "Прочность крупнопанельных и каменных конструкций", Стройиздат, Мю, 1972.
81. Карапетян К.С., Котикян Р.А. Прочность, деформативность и ползучесть бетона при растяжении кручением. "Бетон и железобетон", №7, 1972.
82. Квирикадзе О.П. Влияние размеров-кубов на прочностные характеристики бетонов. "Сабчота Сакартвело", Тбилиси, 1974.
83. Квицаридзе О.И., Сагателовва Е.С., Гвелесиани Л.О. О влиянии режима влажности среды на деформативность изгибаемых железобетонных элементов. "Бетон и железобетон", №12, 1965.
84. Киттель Ч. Элементарная физика твердого тела (пер. с англ.). "Наука", М., 1965.
85. Козуб Ю.И., Алексюк М.Н. Об оценке прочности композиционных материалов. "Проблемы прочности", №12, 1971.
86. Колмогоров А.Н. Предисл. к русск. перев. кн. Н.Арлея т К.Р. Буха. "Введение в теорию вероятностей и математическую статистику". М., 1951.
87. Колчин Г.Б. Изгиб стохастически неоднородных стержней. Матер. III Всес. конф. "Проблемы надежности в стр.механике" (тез.докл.), Стройиздат, М., 1971.
88. Конторова Т.А. Френкель Я.И. Статистическая теория хрупкой прочности реальных кристаллов. "Журнал технической физики", II, №3, 1941.
89. Конторова Т.А. Об одном из приложений статистической теории масштабного эффекта. "Журнал технической физики", 13, №6, 1943.
90. Конторова Т.А., Тимошенко О.А. Обобщение статистической теории прочности на случай неоднородного напряженного состояния. "Журнал технической физики", 19, №3, 1949.
91. Корнилович Ю.Е. Исследование прочности растворов и бетонов. Госстройиздат УССР, Киев, 1960.
92. Крстров Б.В., Никитин Л.В., Флитман Л.М. Механика хрупкого разрушения. "Механика твердого тела", №3, 1969.
93. Красильников К.Г., Подвальный А.М., Сегалов А.Е. О собственных деформациях пористых тел. "Колл.журнал", XXXV, №2, 1974.
94. Кроль И.С., Добровольский А.М., Марков А.И., Красновский Р.О. Исследование причин возникновения масштабного эффекта при испытании бетонных образцов (кубов) на сжатие, В кн. "Исследование в области механических измерений", тр. ВНИИФТРИ, вып. 8(38), 1971.
95. Крылов Б.А., Цителаури Г.И. Исследование твердения и некоторых свойств легких бетонов на искусственных пористых заполнителях при электропрогреве. Доел. на межд. конф. РИЛЕМ, М., 1964.
96. Крылов Н.А., Калашников В.А., Полищук А.М. Радиотехнические методы контроля качества железобетона. Стройиздат, Л,-М., 1966.
97. Кудзис А.П. Вадлуга Р.Р. Об определении минимальных величин меры надежности железобетонных элементов. Матер. III Всес.конф. "Проблемы надежности в стр.механике", Вильнюс, 1971.



98. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. "Наука", М., 1973.
99. Лабут А.П., Холмянский М.М. Растяжение бетона при одноосном напряженном состоянии. "Механика твердого тела", №4, 1966.
100. Лебедев А.А. Ковальчук В.И. Некоторые вопросы теории прочности структурно-неоднородных материалов. "Проблемы прочности", №8, 1970.
101. Левченко Н.Б., Харлаб В.Д. К теории прочности бетона и некоторых других структурно-неоднородных материалов. Тр.ЛИСИ, №68, 1971.
102. Лекишвили Г.Л. О влиянии масштаба на прочность ожатых элементов. Техн.инф.Госстроя СССР "Стр.и арх.", №25, 1965.
103. Лермит Р. Проблемы технологии бетона (пер. с франц.). Госстрой - издат. М., 1959.
104. Лещинский М.Ю., Скрамтаев Б.Г., Испытание прочности бетона. Стройиздат, М., 1973.
105. Логика научного исследования, "Наука", М., 1965.
106. Ломакин В.А. Статистические задачи механики твердых деформируемых тел. "Наука", М., 1970.
107. Лукша Л.К. Теория и расчет прочности бетона при сложных напряженных состояниях. Матер. УП Всес.конф.по бетону и ж.б. "Полымя", Минск, 1972.
108. Маилян В.Л. Бетон на карбонатных заполнителях. Рост.универс., 1967.
109. Макклиток Ф., Арагона А. Деформация и разрушение материалов (пер.с англ.). "Мир", М., 1970.
110. Малмейстер А.К. Геометрия теорий прочности. "Механика полимеров". №4, 1966.
111. Мальцов К.А. Физический смысл условного предела прочности бетона на растяжение при изгибе. "Бетон и железобетон", №9. 1958.
112. Механика новое в зарубежной науке, редакторы серии А.Ю. Шилинский, Г.Г.Черный . Прикладная механика композитов. сб.статей 1986-1988 гг. Пер. с англ. М. Мир, 1989 - 358 с.
113. Методика испытания бетонных образцов на сжатие. Сб.тр.под ред. Б.Г.Скрамтаева. ЦБТИ НИИОМТП, Госстройиздат, М., 1965.
114. Методы исследования цементного камня и бетона (под ред.З.М.Ларионовой). Стройиздат, М., 1970.
115. Микляев П.Г., Фридман Я.Б. Анизотропия механических свойств материалов. "Металлургия", М., 1969.
116. Михайлов Б.К., Кипиани Г.О. Деформированность и устойчивость пространственных пластинчатых систем с разрывными параметрами. Санкт-петербург СПб, 1996, -442с.
117. Миронов С.А., Малинина Л.А. Ускорение твердения бетона. Госстройиздат, М., 1964.
118. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений, ФМ, 1961.
119. Михайлов В.В. Элементы теории структуры бетона. Госстройиздат, М.-Л., 1941.
120. Москвин В.М. Коррозия бетона. Госархстройиздат, М., 1952.
121. Москвин В.М., Осетинский Ю.В., Подвальный А.М. Об определении структурных напряжений в бетоне при усадке и температурных воздействиях. "Стр.механика и расчет сооруж.", №5, 1974.

122. Мчедлов-Петросян О.П. Направленное структурообразование - научное основа технологии бетона. В кн. "Структура, прочность и деформация бетона." Стройиздат, М., 1966.
123. Мчедлов-Петросян О.П., Филатов Л.Г. Принцип управления структурообразованием цементного камня. Сб. "физ-хим. механика, почв, грунтов и стр.материалов", изд.АН Узб. ССР, Ташкент, 1966.
124. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Изд.АН Арм.ССР, Ереван, 1965.
125. Нгуен Динь Конг, Стулий Н.Г. О связи неоднородности бетона с неравномерностью деформаций. В кн. "Вопросы теории и технологии железобетона", ХИСИ, Харьков, 1972.
126. Невилл А.М. Свойства бетона (пер. с англ.). Стройиздат, М., 1972.
127. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. Стройиздат, М., 1972.
128. Немировский Ю.В., Резников Б.С. Упруго-пластический изгиб балок из двухкомпонентных материалов. "Проблемы прочности", №10, 1972.
129. Нечипоренко В.И. Структурный анализ и методы построения надежных систем. "Советское радио", М., 1968.
130. Никитин Н.В. Статистическая гипотеза прочности бетона. В кн. "Матер.к теории расчета констр. по предельн. сост.", вып. 2, Стройиздат, М., 1949.
131. Нилендер Ю.А. Поверхностная прочность бетона и ее связь с появлением трещин. Тр.Конф. по коррозии бетона, АН СССР, 1937.
132. Нисневич М.Л. Оптимизация требований к заполнителям для бетона. ТР.Внижебетон, вып.19,Стройиздат., М., 1972.
133. Новожилов В.В. О связи между напряжениями и упругими деформациями в поликристаллах. В кн. "Пробл.гидродинамики сплошной среды". "Наука", М.1969.
134. Осидзе В.И., Моница Н.Л. Исследование некоторых вопросов прочности и деформации бетона. ТР.ТНИСГЭИ, Тбилиси, 1964.
135. Панарин Н.Я., Львовский Е.Н. Исследование механических характеристик бетона экспериментально-статистическими методами. В сб.тр.КПИ "Стр.констр. и матер.", Кишинев, 1970.
136. Панасюк В.В., Бережницкий Л.Т., Труш И.И. Распределение напряжений около дефектов типа жестких остроугольных включений. "Проблема прочности", №7, 1972.
137. Парватов Г.Н. Исследование структурных свойств неоднородных зернистых материалов методы математического моделирования. Автореф.канд.дисс., Томский ПИ, Томск, 1972.
138. Пирадов К.А., Пирадов А.Б., Иосебашвили Г.З, Кахиани Л.А. Расчёт бетонных и железобетонных конструкцийна основе методов механики разрушения.Тбилиси, Мецниереба, 1999, -349с.
139. Пирадов А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона. Стройиздат, М., 1973.
140. Пирадов К.А. Теоретические и экспериментальные основы механики разрушения бетона и железобетона. Тбилиси, „Энергия”, 1998, -355с.
141. Пирадов К.А., Гузеев Е.А. Механика разрушения железобетона. –М.: новый век. 1998. -190с.
142. Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. Стройиздат, М., 1966.

143. Помазков В.В., Старновская Н.И. Микроструктура твердеющего цемента. В кн. "Иссл. по цем. и силик.бетонам", 2, Воронеж, 1968.
144. Прагев В. Конечные пластические деформации. В кн. "Реология" (пер. с англ.), ИЛ, М., 1962.
145. Работнов Ю.Н. О разрушении твердых тел. В кн. "Проблемы механики твердого деформируемого тела". Судпромгиз, Л., 1970.
146. "Разрушение", т.1 (пер. с англ. под ред. А.Ю.Ишлинского), "Мир", М., 1973.
147. Райкин А.Л. Вероятностные модели функционирования резервированных устройств, "Наука", М., 1971.
148. Регель В.Р., Лексовский А.М., Киреенко О.Ф. Исследование кинетики роста трещин в полимерах. "Проблемы прочности" №10, 1971.
149. Рейнер М. Феноменологическая макрореология. В кн. "Реология" (пер. с англ.), ИЛ, М., 1962.
150. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки.-М.: стройсдат, 1986, - 316с.
151. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. Госстройиздат, М., 1964.
152. Розен Б. Механика упрочнения композиций. В сб. "Волокнистые композиционные материалы" (пер. с англ.). "Мир", М., 1967.
153. Рыбьев И.А. Две важнейшие закономерности в свойствах материалов с конгломератным типом структуры. "Стр.материалы", №1, 1965.
154. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. "Наукова Думка", Киев, 1968.
155. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин. "Механика твердого тела", №4, 1973.
156. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. "Наука", И., 1969.
157. Свечин Н.В. Упруго-пластические свойства цементного камня. В кн. "Исследование по технологии бетона"., Стройиздат, М., 1950.
158. Седоков Л.М., Головенко В.С., Михайловский Э.М., Пахотин К.К. Исследование прочности конструкционных материалов при различных соотношениях главных напряжений. "Проблемы прочности" №7, 1972.
159. Седракян Л.Г. Элементы статистической теории деформирования и разрушения хрупких материалов. Ереван, 1968.
160. Седракян Л.Г. К статистической теории прочности. Ереван, 1958.
161. Семенцов С.А. Влияние нерегулярного неоднородности бетона в элементе (столбе, панели) на его прочность. В кн. "Прочность крупнопанельных каменных конструкций". Стройиздат, М., 1972.
162. Серенсон С.В., Когаев В.П. Стохастические процессы накоплений усталостных повреждений. "Машиноведение", 3, 1966.
163. Серенсон С.В. Стреляев В.С. Прогрессирующее разрушение пучков армирующих волокон, обладающих изменчивостью прочности. "Проблемы прочности", №10, 1970.
164. Сехниашвили Э.А., Саркисов Ю.С., Власов Л.С., Гоголадзе И.Г. Исследование прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых элементов из сепарированного (слоистого) перлитобетона с тяжелым заполнителем при кратковременном и длительном действии статической нагрузки. Матер.VI конф. по бетону и ж.б., Груз, НТО Стройиндустрии, Рига, 1966.

165. Сизов В.Н. Уточнение переводных коэффициентов при испытании образцов малых размеров. "Бетон и железобетон" №36 1973.
166. Симонов М.З. Особенности структурообразования и формирования свойств легкого бетона и учет их при проектировании состава. Матер.Всес.конф.по легким бетонам, Минск, 1970.
167. Симонов М.З. Основы технологии легких бетонов. Стройиздат, М., 1973.
168. Скрамтаев Б.Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси. ЦНИПС НКТП-ВИА РККА, 1936.
169. Совалов И.Г., Хаютин Ю.Г., Левых Э.Б., Рабинович П.М., Тиллес Р.С. Исследование влияния технологических факторов на однородность свойств бетона. Матер. VI конф. по бетону и железобетону. Стройиздат, М., 1966.
170. "Современные композиционные материалы", под. ред. Л.Браутмана и Р.Кроа (пер. с англ.), М., 1970.
171. Сотсков Б.С. Основы расчета и надежности и устройства автоматики и вычислительной техники, "Высшая школа", М., 1970.
172. Старосельский В.М., Чесноков С.А. К теории прочности бетона. Об.тр.ВНИТС, №37, 1970.
173. Стольников В.В., Литвинова Р.Е. Трещиностойность бетона "Энергия", М., 1972.
174. Столяров Я.В., Введение в теорию железобетона. Стройиздат-наркомстроя, М.-Л., 1946.
175. Тичи М., Ворличек М. Статистическая теория структур бетона (на чешск.яз.), Прага, 1972.
176. Твалчрелидзе А.К., Мосешвили Т.В. Упругие характеристик и прочность пряжи с дискретными параллельными волокнами. Строительство № 2(17). Тбилиси, 2010. с. 134-137.
177. Филин А.П. Проблемы использования современных вычислительных средств в строительной механике. Докл. на совещ.по примен. ЭЦБМ в стр.мех. Ленинград, 1963.
178. Финкель В.М. Физика разрушения (пер. с англ.). "Металлургия", М., 1970.
179. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Оборонгиз, 1952.
180. Фридман Я.Б. Диаграмма относительной структурной неоднородности материалов. ДАН СССР 106, "2", 1956.
181. Хашин Ц. Модули упругости неоднородных материалов. "Прикл. механика", тр.амер.общества ипж.-мех. (русс.пер.), "1", 1962.
182. Хигерович М.И., Меркин А.П. Физико-химические и физические методы исследования строительных материалов. "Высшая школа", М., 1968.
183. Хорошун Л.П. Некоторые вопросы корреляционной теории структурнонеоднородных упругих тел. "Механика полимеров", №3, 1966.
184. Худсон Д. Статистика для физиков (пер. с англ.). "Мир", М., 1970.
185. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. Изд.АН ГССР, Тбилиси, 1963.
186. Цилосани З.Н., Чоговадзе Д.В., Джугели Д.Д. Исследование процесса разрушения цементного камня. ИНТИП, Тбилиси, 1967.
187. Цилосани З.Н., Сакварелидзе А.В. Об одном неучитываемом факторе при исследовании механизма ползучести бетона. Сообщ.АН ГССР, 70, №2, 1973.
188. Цискрели Г.Д. Сопротивление растяжению неармированных и армированных бетонов. Госстройиздат, М., 1954.

189. Цискрели Г.Д., Джавахидзе А.Н. Влияние изменения крупности заполнителя на прочностные и деформативные характеристики бетона. Матер.У1 конф.по бетону и ж.б., Груз. НТО Стройиндустрии, Рига, 1966.
190. Цискрели Г.Д., Чкония Г.Ф., Лекишвили Г.Л. Основные технологические факторы однородности бетона и экспрессно-статистический метод контроля качества. Матер. У1 конф. по бетону и железобетону. Груз.НТО Стройиндустрии, Рига, 1966.
191. Цулукидзе П.П. К вопросу однородности бетона. "Гидротехническое строительство", №3, 1958.
192. Цулукидзе П.П., Микашвили Ю.Н. К вопросу механизма образования и роста микротрещин в бетоне при осевом растяжении. Сообщения АН ГССР, т.56, №3, 1969.
193. ЦЯНЬ СЮЭ-сень. Физическая механика (пер. с англ.). "Мир", М., 1965.
194. Чанкветадзе В.А., Чиковани Т.Д. Применение методов математической статистики при контроле качества бетона. "Бетон и железобетон", №6, 1966.
195. Черепанов Г.Н. О прочности композитов. "Прикладная механика и техническая физика", №2, 1967.
196. Черненко Д. Влияние контактной сетки на прочность бетона. "Строительные материалы", "2, 1957.
197. Чурадзе Т., Абашилце Г., Рехвиашвили Ю., Гордезиани З. Об использовании щелочно-земельных бетонов для предотвращения эндогенных пожаров // Горный журнал № 11, Москва, 2009. с. 41-43.
198. Чурадзе Т.К. Ресурсосберегающие конструкции в транспортных строительстве // ГТУ. № 4(415). Тбилиси, 1997. с. 52-54.
199. Чурадзе Т.К., Цвариани Т., Мисаблишвили Г. Об оценке коррозионного состояния арматуры в железобетонных конструкциях // Транспорт №4(20). Тбилиси. 2005. С. 52-57.
200. Чурадзе Т.К., Словинский Ю.В., Маисурадзе Б.М., Кавтарадзе И.М. Испытание железобетонной балки // Наука и техника в дорожной отрасли. № 3. Москва. 2004. С. 34-36.
201. Шардин Х. Исследование скорости разрушения. В сб."Атомный механизм разрушения" (пер. с англ.). Металлургиздат, М., 1963.
202. Шейкин А.Е. К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона. Тр.МИИТ, вып.69, М., 1946.
203. Шейкин А.Е. О структуре и трещиностойкости бетонов. "Бетон и железобетон", №10, 1972.
204. Шестопиров С.В. Долговечность бетона. Автотрансиздат, М., 1960.
205. Шкербелис К.К. К вопросу прочности бетона в условиях сложного напряженного состояния. В кн. "Иссл.по бет.и ж.б.", Ш, АН Латв.ССР, Рига, 1958.
206. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. "Советское радио", М., 1972.
207. Штаерман Ю.Я. Критические замечания к обобщенной теории прочности бетона. Тифлис, 1934.
208. Штаерман Ю.Я. Плотный бетон на многофракционном заполнителе. Изд."Сабчота Сакартвело", Тбилиси, 1967.
209. Шукайло В.Ф. К оценке надежности параллельных систем с общим нагружением. Матер, 3 Всес.конф. "Проблемы надежности в строит.механике", Вильнюс, 1971.

210. Шур Д.М. Статистический критерий прочности и пластичности материалов в условиях сложного напряженного состояния. "Проблемы прочности", №7, 1972.
211. Щукин Е.Д. Физико-химические исследования элементарных актов при контактных воздействиях. Матер.V Всес.конф. по физико-химической механике. Уфа, 1971.
212. Элбакидзе М.Г. Влияние напряженного состояния бетона на его водонепроницаемость, структуру и интенсивность влагообмена со средой. Матер. П респ.конф. по бетону и ж.б. (тез.докл.), Тбилиси, 1971.
213. Яхнин Е.Д. О связи прочности дисперсной структуры с силами взаимодействия между ее элементами. ДАН СССР, 178, №1, 1968.
214. AAGE I.P. On Failure in Concrete, "Acta Polytechn. Scand. Civ.Eng.Build.Contr. No66, 1970.
215. ВАСНЕ Н.Н. Orientation on International Conference on the Structure of Concrete and Behavior under Load. "Nord. Betong", 10, No 4, 1966.
216. ВАСНЕ Н.Н.. Model for Strength of Brittle Materials Built up of Particles Joined at Points of Contact. "J.Amer.Ceram.Soc". 53. No12. 1970.
217. BAKER A.L.L.. An Analysis of Deformation and Failure Characteristics of Concrete. "Mag. of Concr.Res", v.11, No33, 1959.
218. BAKER A.L.L., A Criterion of Concrete Failure, "Proc. Inst. Civ.Eng", 45, Febr., 1970.
219. BARNARD P.R., Researches into the Complete Stressstrain Curve for Concrete, "Mag.Concr.Res.", 16, No49, 1964.
220. Discussion on the Paper "Strains and Stress of Concrete at Initiation of Cracking and near Failure" by M.F/KAFLAN, "Journ. ACI", pr.60, No3, 1964.
221. ESSE F., GZELAK E., Relation entre la resistance du beton et la resistance des agregats, "Mater.et constr", 3, No13, 1970.
222. FARRAN I. Contribution mineralogique an l'etude de l'adherence entre les constituans hydrates des ciments et les materiaux ontrobés, "Rov.des materiaux de cosstr. et travaux publics", 41, No490, 1956.
223. GARDGER N.I., Triaxial Behavior of Concrete, "Journ.ACI", pr.66, No2, 1970.
224. HOBBS D.M., The Compressive Strength of Concrete: a Statistical Approach to Failure, "Mag. Concr. Res." 24, N80, 1970.
225. IOHOJU ASAMI, KATO KIYOSHI, Strain Distribution in Plain Concrete , "Met.Def. Acad," 7, No3, 1967.
226. MALHOTHA V.M., Effect of Specimen Size on Tensile Stength of Concrete. "J.Amer. Concr. Inst," Pr.67, No6, 1970.
227. MUEZEWSKI I., Une theorie statistique du corps fragile quasihomogen. "Apl.matematiky", t.4, No3, 1959.
228. NEVILL A.M., The Relation between Standard Deviation and mean Strength of Concrete Test Cubes, "Mag.Concr.Res", No32, 1959.
229. REINIUS E., A Theory of the Deformation and the Failure of Concrete, "Mag. of Concr.Res.", Nov., 1956.
230. RUSCH H., Der Einfluss der Streug bei der Betonkontroll, "Der Bauingenier", No 10, 1962.
231. SASSE H.R., Eine Strukturintierte Modell vorstellung zur Beshreibung der Betondruck festigkeit, "Betonstain - Zeitung" No3, 1971.
232. SEDLACEK I., Statisticka teorie unavy materialu, "Strojirestvi", sv. s, cis.11, 1955.

233. TAYLOR A.M., General Behaviour Theory for Cement Pastes, Mortars and Concretes, "Journ.ACI", No10, 1971.
234. WAGNER N.G. LEDBETTER W.B., Bond and Tensile Capacity of Lightweight Aggregates. "Journ. ACI", Pr.67, No12, 1970.
235. WEIBULL W., A Statistical Representation of Failures in Solids, "Trans.Roy.Inst.Tech"., Stockholm, No27, 1949.