

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ნიკა ბოჭორიშვილი

ექსპერიმენტალურ-თეორიული კვლევა დანამატებიანი ბეტონის მუშაობისა დროში

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი 2019 წელი

საავტორო უფლება © 2019 წელი, ნიკა ბოჭორიშვილი

თბილისი

2019 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
სამშენებლო ფაკულტეტზე, სამოქალაქო და სამრეწველო მშენებლობის,
ტექნოლოგიის და საშენი მასალების დეპარტამენტში;
სსიპ შ. რუსთაველის საქართველოს ეროვნულ სამეცნიერო ფონდში;

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: პროფესორი, მერაბ ლორთქიფანიძე

რეცენზენტები: ტ.მ.დ. პროფესორი, თამაზ შილაკაძე

პროფესორი, გიორგი დალაქიშვილი

დაცვა შედგება 2019 წლის _____ ივლისს, _____ სთ-ზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის
სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი I, აუდიტორია 508,
მისამართი: თბილისი 0175, კოსტავას №68^ბ;

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატის -ფაკულტეტის ვებგვერდზე;

სადისერტაციო საბჭოს

სწავლული მდივანი:

პროფესორი, დ. ტაბატაძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ბოჭორიშვილი ნიკას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ექსპერიმენტალურ-თეორიული კვლევა დანამატებიანი ბეტონის მუშაობისა დროში“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში, მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი ____ __ 2019 წ.

ხელმძღვანელი: _____ პროფესორი, მერაბ ლორთქიფანიძე

რეცენზენტი: _____ ტ.მ.დ. აკადემიკოსი, თამაზ შილაკაძე

რეცენზენტი: _____ პროფესორი, გიორგი დალაქიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2019 წელი

ავტორი: ბოჭორიშვილი ნიკა

დასახელება: ექსპერიმენტალურ-თეორიული კვლევა დანამატებიანი ბეტონის მუშაობისა დროში

ფაკულტეტი: სამშენებლო

აკადემიური ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: _____ 2019 წელი

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი 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 დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

იმ ფონზე როცა საქართველოს სხვადასხვა რეგიონებში განხორციელების აქტიურ ფაზაშია ინფრასტრუქტურული პროექტების ფართო სპექტრი, აუცილებელი ხდება ქართულმა სამშენებლო ბაზარმა ფეხი აუწყოს ეპოქის განვითარებული ქვეყნების ტექნოლოგიებს. საქართველოს ეკონომიკური განვითარება და სიძლიერე მეტწილად დამოკიდებულია მიმდინარე რეგიონალურ-ინფრასტრუქტურული პროექტების, მაგალითად, ანაკლიის პორტის მშენებლობა, დასავლეთის ავტომაგისტრალის პროექტი და სხვათა მაღალტექნოლოგიურ შესრულებაზე. ისევე, როგორც ევროპის წამყვან ქვეყნებში, ჩვენს რეგიონშიც მშენებლობები მიმდინარეობს პროგრესული მონოლითური მეთოდებით, რომლის ტექნოლოგიაც დაფუძნებულია ბეტონში მოდიფიცირებული დანამატების გამოყენებაზე. ერთ-ერთი ყველაზე უფრო ეფექტური და პერსპექტიული მიმართულება თანამედროვე მშენებლობის ქიმიზაციის მიმართულებაში არის ორგანული და არაორგანული მოდიფიცირებული დანამატების შეყვანა ბეტონის ნარევიში. მცირე რაოდენობის დანამატების შეყვანა, დაახლოებით მეთედი და მესედი ცემენტის მასისა, არსებით გავლენას ახდენს ბეტონის ნარევის გაუმჯობესებაზე. არამარტო საცნობარო ლიტერატურაში, არამედ სამეცნიერო წყაროებშიც არ მოიძებნა ინფორმაცია დანამატიანი (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონების ფიზიკურ - მექანიკური თვისებების არსებულ კვლევაზე, როგორცაა, სიმტკიცე, დეფორმატიულობა და სხვა. ჩატარდა კვლევები აღნიშნული დანამატებით შედგენილ ბეტონებზე. შევისწავლეთ ასაკის გავლენა მათ სიმტკიცეზე და დეფორმატიულობაზე. ვაწარმოეთ თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევა დანამატიანი ბეტონების დროში მუშაობაზე, განსაკუთრებით მუდმივი და მრავალჯერადი სტატიკური დატვირთვების დროს. თეორიულად აღიწერა ბეტონის ცოცვადობა და დანამატების გავლენა მის სიდიდეზე. გარდა ამისა ევროკოდ -2 ის საფუძველზე შესწავლილი გვაქვს ჩვენს მიერ დამზადებული დანამატიანი ბეტონების ცოცვადობის კოეფიციენტი, და მათი სიმტკიცისა და დრეკადობის მოდულის ცვლილება დროში. ნაანგარიშები იქნა ცოცვადობის კოეფიციენტი სხვადასხვა ტენიან გარემოში, შემდეგ საექსპლოატაციო

პერიოდებზე $t=5, 10, 15 \dots 50$ წელიწადი. ჩატარებული ექსპერიმენტებით დადგინდა დანამატიანი ბეტონების ოპტიმალური შემადგენლობა და მიღებული შედეგების ანალიზის საფუძველზე ვიძლევიტ რეკომენდაციას ბეტონი შერეული დანამატების შემადგენლობით (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) გამოყენებული იქნას ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში. მიღებული შედეგების საიმედოობა დაფუძნებულია ექსპერიმენტალური სამუშაოების მსვლელობისას მაღალი სიზუსტის თანამედროვე გამზომი ხელსაწყოების გამოყენებაზე, გამზომი მოწყობილობების სიზუსტეზე და ექსპერიმენტალური მონაცემების დამუშავებაზე. დისერტაციის ექსპერიმენტალური ნაწილი შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის საწავლო სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიაში, რომელიც აღჭურვილია თანამედროვე გამზომი ხელსაწყო-დანადგარებით, რაც თავის მხრივ კვლევის მაღალი სიზუსტით შესრულების გარანტია.

Abstract

It becomes very important that Georgian construction market should keep being in a process of developing according to the developed countries technologies with the background of active phase implementation of wide range infrastructural projects in the various regions of Georgia. Georgia's economic development and strength largely depend on regional infrastructure projects, such as construction of Anaklia Port, Western Georgia Highway Project, and other high-technological performances. Just as in the leading European countries, constructions in our region are implemented due to progressive monolithic methods, and this technology is based on the modification of modified additives in the concrete. One of the most effective and promising directions of wide use of chemicals in the modern construction is the introduction of organic and inorganic modified additives in concrete mixture. The inputting of a small number of additives, about a tenth and a hundredth part of cement mass has a substantial effect on the improvement of concrete mixture. Not only in reference books, but also in scientific sources, there is not possible to find information about the current research of the physical and mechanical properties of concrete, such as hardness, deformativity, and etc. Studies have been conducted on the concrete compounds made with these additives. We have done investigation about the age impact on their hardness and deformity. We have conducted a theoretical and experimental researches on time resistance of supplementary concrete, especially during permanent and multiple static loads. Theoretically reinforced concrete livelihood and the supplementation of the supplements on its size. The calculations of the coincidence have been made to the following periods: $t = 5, 10, 15 \dots 50$ years - according to European standards. Based on the experiments carried out by the optimum composition of supplementary concrete and based on the analysis of the results, we recommend concrete mixed composition (microsilica, GRACE ZYLA® 420 M) to be used in hydro-technical construction. The reliability of the obtained results is based on the use of high-precision modern measuring devices, accuracy of measuring devices and processing experimental data during experimental work. The experimental part of the thesis is done at the Technical Scientific and Expert Laboratory of

the Georgian Technical University, equipped with modern measuring equipment, which in its turn guarantees the high accuracy of the research.

სარჩევი

შესავალი -----	18
1. ლიტერატურის მიმოხილვა -----	25
1.1 დანამატების ზოგადი მიმოხილვა -----	25
1.2 სამეცნიერო წყაროებში განხილული ბეტონის მუშაობა დროში -----	28
2. დანამატების შესწავლა-შერჩევა, ინერტული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა -----	35
2.1 GRACE ZYLA® 420 M -----	35
2.2 მიკროსილიკა -----	36
2.3 ინერტული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა -----	37
2.4 ჰიდრავლიკური შემკვრელი ნივთიერების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა -----	44
2.5 ბეტონის დამზადების ტექნოლოგიის შემუშავება და ოპტიმალური ნარევის მიღება -----	48
2.6 ექსპერიმენტული კვლევები მასით და მოცულობით წყალშთანთქმაზე დანამატის და საბაზო ბეტონებისთვის -----	68
2.7 წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა -----	70
3 დანამატის და საბაზო ბეტონის სტრუქტურული ცვლილებების საზღვრების დადგენა თავისუფალ და შეზღუდულ მდგომარეობაში კუმშვაზე -----	75
3.1 დანამატის და საბაზო ბეტონის განივი გაფართოების კოეფიციენტის მნიშვნელობის კვლევა-დადგენა -----	75
3.2 საბაზო და დანამატის ბეტონების σ, ε მუშაობა დროში ხანმოკლე დატვირთვისას -----	82

3.3 ბეტონის მდგომარეობის დიაგრამის დასაბუთება ექსპერიმენტით მისი თავისუფალი კუმშვისა და გაჭიმვის დროს -----	87
4 ქიმიური დანამატებით მოდიფიცირებული ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა -----	93
4.1 დანამატიანი და საბაზისო ბეტონების დეფორმაციები განმეორებითი სტატიკური დატვირთვების დროს -----	101
4.2 დანამატიანი და საბაზო ბეტონის მუშაობა რღვევამდე განმეორებადი სტატიკური დატვირთვების დროს -----	103
5. ბეტონის ცოცვადობა და ქიმიური დანამატების გავლენა მის სიდიდეზე -----	107
5.1 ბეტონის ცოცვადობა და მისი მექანიზმი -----	107
5.2 ბეტონის ცოცვადობის კოეფიციენტი და მისი ანგარიშის მეთოდოლოგია -----	108
5.3 საბაზო და დანამატებიანი ბეტონების ცოცვადობის კოეფიციენტების ანგარიში -----	110
5.4 საბაზო და დანამატებიანი ბეტონების კუმშვაზე საშუალო სიმტკიცის და დრეკადობის მოდულის ანგარიში ასაკის გათვალისწინებით -----	116
6. ძირითადი დასკვნები -----	120
გამოყენებული ლიტერატურა -----	122

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი №2.1 სუპერპლასტიფიკატორი GRACE ZYLA® 420 M შემადგენლობა -----	35
ცხრილი №2.3.1 ქვიშის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრა -----	37
ცხრილი №2.3.2 ღორღი-ხრემის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრა ----	40
ცხრილი №2.3.3 ღორღი-ხრემის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრა ----	43
ცხრილი №2.4.1 ცემენტის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრა -----	45
ცხრილი №2.5.1 1 მ ³ ბეტონის შემადგენლობის კალკულაცია -----	48
ცხრილი №2.5.2 საბაზო 1 მ ³ ბეტონის შემადგენლობის ანგარიში -----	49
ცხრილი №2.5.3 საბაზო ბეტონის სიმტკიცის განსაზღვრა ცენტრალური კუმშვის დროს -----	52
ცხრილი №2.5.4 დანამატიანი GRACE ZYLA® 420 M 1 მ ³ ბეტონის შემადგენლობის ანგარიში -----	54
ცხრილი №2.5.5 დანამატიანი GRACE ZYLA® 420 M ბეტონის სიმტკიცის განსაზღვრა ცენტრალური კუმშვის დროს -----	56
ცხრილი №2.5.6 დანამატიანი (მიკროსილიკა) 1 მ ³ ბეტონის შემადგენლობის ანგარიში -----	58
ცხრილი №2.5.7 დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის სიმტკიცის განსაზღვრა ცენტრალური კუმშვის დროს -----	60
ცხრილი №2.5.8 დანამატიანი (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) 1 მ ³ ბეტონის შემადგენლობის ანგარიში -----	62
ცხრილი №2.5.9 დანამატიანი (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის სიმტკიცის განსაზღვრა ცენტრალური კუმშვის დროს -----	64
ცხრილი №2.6.1 საბაზო და დანამატებიანი ბეტონის მასითი და მოცულობითი წყალშთანთქმა -----	69
ცხრილი №2.7.1 საბაზო ბეტონის წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა -----	73

ცხრილი №2.7.2 დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა -----	73
ცხრილი №2.7.3 დანამატიანი (მიკროსილიკა,) ბეტონის წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა -----	74
ცხრილი №2.7.4 დანამატიანი (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა -----	74

ნახაზების ნუსხა

ნახაზი №2.5.1 საბაზო ბეტონის სიმტკიცე სხვადასხვა ასაკში ცენტრალური კუმშვის დროს -----	53
ნახაზი №2.5.2 დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის სიმტკიცე სხვადასხვა ასაკში ცენტრალური კუმშვის დროს -----	57
ნახაზი №2.5.3 დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის სიმტკიცე სხვადასხვა ასაკში ცენტრალური კუმშვის დროს -----	61
ნახაზი №2.5.4 დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა) ბეტონის სიმტკიცე სხვადასხვა ასაკში ცენტრალური კუმშვის დროს -----	65
ნახაზი №2.5.5 ბეტონის სიმტკიცე ცენტრალური კუმშვის დროს VI თვე -----	66
ნახაზი №3.1.1 ბეტონის გამომშრალი პრიზმების σ ძაბვის, $\varepsilon_{გრძ}$, $\varepsilon_{გან}$ დეფორმაციების და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს -----	77
ნახაზი №3.1.2 ბეტონის ბუნებრივად მშრალი პრიზმების σ ძაბვის, $\varepsilon_{გრძ}$, $\varepsilon_{გან}$ დეფორმაციების და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს -----	77
ნახაზი №3.1.3 ბეტონის წყლითგაჟღენთილი პრიზმების σ ძაბვის, $\varepsilon_{გრძ}$, $\varepsilon_{გან}$ დეფორმაციებისა და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს -----	78

ნახაზი №3.1.4 დანამატიანი ბეტონისაგან დამზადებული გამომშრალი პრიზმების σ ძაბვის, $\varepsilon_{გრძ}$ $\varepsilon_{გან}$ დეფორმაციებისა და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს -----	79
ნახაზი №3.1.5 დანამატიანი ბეტონისაგან დამზადებული ბუნებრივად მშრალი პრიზმების σ ძაბვის, $\varepsilon_{გრძ}$ $\varepsilon_{გან}$ დეფორმაციებისა და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს -----	79
ნახაზი №3.1.6 დანამატიანი ბეტონისაგან დამზადებული წყლით გაჯენილი პრიზმების $\varepsilon_{გრძ}$ $\varepsilon_{გან}$ ძაბვა-დეფორმაციებისა და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს -----	80
ნახაზი №3.2.1 ბეტონის ზღვრული მახასიათებელი აგებული თეორიულად -----	86
ნახაზი №3.3.1 შეკუმშული ბეტონის ექსპერიმენტალური უნივერსალური გრაფიკი a) ერთ თვიანი, b) სამ თვიანი, c) ექვს თვიანი, d) ცხრა თვიანი -----	89
ნახაზი №3.3.2 ექსპერიმენტალური უნივერსალური გრაფიკი ბეტონის ცენტრალური გაჭიმვისას -----	90
ნახაზი №4.1 საბაზო ნიმუშის დეფორმაციის დიაგრამა -----	95
ნახაზი №4.2 დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის ნიმუშის დეფორმაციის დიაგრამა -----	96
ნახაზი №4.3 დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის ნიმუშის დეფორმაციის დიაგრამა -----	97

ნახაზი №4.4 დანამატისანი (GRACE ZYLA® 420 M + მიკროსილიკა) ბეტონის ნიმუშის დეფორმაციის დიაგრამა -----	98
ნახაზი №4.5 საბაზო და დანამატებიანი ბეტონის ნიმუშების დეფორმაციის დიაგრამა -----	99
ნახაზი №4.1.1 საბაზო და მიკროსილიკიანი ბეტონების დეფორმაციები განმეორებითი დატვირთვების დროს -----	101
ნახაზი №4.1.2 დანამატებიანი (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონების დეფორმაციები განმეორებითი დატვირთვების დროს -----	102
ნახაზი №4.2.1 საბაზო ბეტონის მუშაობა რღვევამდე განმეორებადი სტატიური დატვირთვების დროს -----	104
ნახაზი №4.2.2 დანამატისანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის მუშაობა რღვევამდე განმეორებადი სტატიური დატვირთვების დროს -----	105
ნახაზი №4.2.3 დანამატისანი (მიკროსილიკა) ბეტონის მუშაობა რღვევამდე განმეორებადი სტატიური დატვირთვების დროს -----	105
ნახაზი №4.2.4 შერეული (მიკროსილიკა+GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის მუშაობა რღვევამდე განმეორებადი სტატიური დატვირთვების დროს -----	105
ნახაზი №5.3.1 საბაზო ბეტონის (ბ-1) ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცვლილება დროში ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: RH=50% - მშრალი კლიმატი და RH=80% - ნესტიანი კლიმატი -----	113
ნახაზი №5.3.2 დანამატებიანი ბეტონის (ბ-2) ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცვლილება დროში ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: RH=50% - მშრალი კლიმატი და RH=80% - ნესტიანი კლიმატი -----	114
ნახაზი №5.3.3 დანამატებიანი ბეტონის (ბ-3) ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცვლილება დროში ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: RH=50% - მშრალი კლიმატი და RH=80% - ნესტიანი კლიმატი -----	115

ნახაზი №5.4.1 საბაზო (ბ-1), დანამატებიანი (ბ-2) და დანამატებიანი (ბ-3) ბეტონების
კუმშვაზე სიმტკიცის მნიშვნელობების ცვლილებები დროში -----118

ნახაზი №5.4.2 საბაზო (ბ-1), დანამატებიანი (ბ-2) და დანამატებიანი (ბ-3) ბეტონების
დრეკადობის მოდულების მნიშვნელობების ცვლილება დროში -----119

სურათების ნუსხა

სურათი №2.3.1-№2.3.2 ცემენტის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრა---	43
სურათი №2.4.1-№2.4.2 ცემენტის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრა ---	46
სურათი №2.4.3-№2.4.6 ცემენტის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების განსაზღვრა ---	47
სურათი №2.5.1÷№2.5.2 საბაზო 1 მ ³ ბეტონის შემაღენლობის ანგარიში -----	49
სურათი №2.5.3÷№2.5.7 საბაზო 1 მ ³ ბეტონის შემაღენლობის ანგარიში -----	50
სურათი №2.5.8÷№2.5.11 ბეტონის ნიმუშების გამოცდა ცენტრალური კუმშვისას ----	67
სურათი №2.7.1-№2.7.2 საბაზო და დანამატიანი ბეტონის ნიმუშების წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა -----	71
სურათი №2.7.3÷№2.7.5 საბაზო და დანამატიანი ბეტონის ნიმუშების წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა -----	72
სურათი №3.1-№3.2 დანამატიანი და საბაზო ბეტონის განივი გაფართოების კოეფიციენტის მნიშვნელობის კვლევა-დადგენა -----	76
სურათი №4.1÷№4.3 ქიმიური დანამატებით მოდიფიცირებული ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა -----	91
სურათი №4.4-№4.5 ქიმიური დანამატებით მოდიფიცირებული ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა -----	100
სურათი №4.2.1-№4.2.2 დანამატიანი და საბაზო ბეტონის მუშაობა რღვევამდე განმეორებადი სტატიური დატვირთვების დროს -----	106

შესავალი

დღევანდელი საქართველოს ეკონომიკური განვითარების ეტაპზე ჩვენ ვაწყდებით მრავალმხრივ და რთულ პრობლემებს საყოფაცხოვრებო და სამრეწველო მუშაობის ყველა დარგში. გამონაკლისს არ წარმოადგენს სამშენებლო სფეროც. იმ ფონზე, როდესაც საქართველოს სხვადასხვა რეგიონებში განხორციელების აქტიურ ფაზაშია ინფრასტრუქტურული პროექტების ფართო სპექტრი, აუცილებელი ხდება ქართულმა სამშენებლო ბაზარმა ფეხი აუწყოს ეპოქის განვითარებული ქვეყნების ტექნოლოგიებს. საქართველოს ეკონომიკური განვითარება და სიძლიერე მეტწილად დამოკიდებულია მიმდინარე რეგიონალურ-ინფრასტრუქტურული პროექტების, მაგალითად, ანაკლიის პორტის მშენებლობა, დასავლეთის ავტომაგისტრალის პროექტი, და სხვათა მაღალტექნოლოგიურ შესრულებაზე. ისევე, როგორც ევროპის წამყვან ქვეყნებში, ჩვენს რეგიონშიც მშენებლობები მიმდინარეობს პროგრესული მონოლითური მეთოდებით, რომლის ტექნოლოგიაც დაფუძნებულია ბეტონში მოდიფიცირებული დანამატების გამოყენებაზე. ერთ-ერთი ყველაზე უფრო ეფექტური და პერსპექტიული მიმართულება თანამედროვე მშენებლობის ქიმიზაციის მიმართულებაში არის ორგანული და არაორგანული მოდიფიცირებული დანამატების შეყვანა ბეტონის ნარევიში. მცირე რაოდენობის დანამატების შეყვანა, დაახლოებით მეათედი და მეასედი ცემენტის მასისა, არსებით გავლენას ახდენს ბეტონის ნარევის გაუმჯობესებაზე.

წარმოდგენილი სადისერტაცი ნაშრომის აქტუალობა განპირობებულია იმით რომ, დანამატიანი ბეტონები სულ უფრო ფართო გამოყენებას პოულობს სამშენებლო ინდუსტრიაში, ამავე დროს მათი სიმტკიცე და დეფორმატიულობის მახასიათებლები არ არის შესწავლილი სათანადო დონეზე. სწორედ ამ საკითხების შესწავლას ეძღვნება ჩვენს მიერ წარმოდგენილი ნაშრომი, კერძოდ მასში ექსპერიმენტალური კვლევების საფუძველზე შესწავლილია დანამატიანი ბეტონების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები. გარდა ამისა ევროკოდ 2-ის საფუძველზე შესწავლილი გვაქვს ჩვენს მიერ დამზადებული დანამატიანი ბეტონების ცოცვადობის კოეფიციენტი და

მათი სიმტკიცისა და დრეკადობის მოდულის ცვლილება დროში. როგორც არაერთხელ აღვნიშნეთ, ახალი თაობის ბეტონების ქიმიზაცია წარმოადგენს ახალ მიგნებას ბეტონმცოდნეობის საქმეში, ამის გამო საჭირო ხდება დანამატიანი ბეტონების კვლევა მისი კიდევ უფრო სიღრმისეულად შესწავლისათვის.

როგორც ცნობილია, ბეტონში დანამატების შეყვანით მალღდება მისი ტექნოლოგიური თვისებები. კერძოდ, შედიან რა ბეტონის სტრუქტურაში ახდენენ ჰეტეროგენური სისტემის დისპერსირებას. მათი დამატებით ბეტონი ხდება რეოპლასტიკური მინარევი, რომელიც ხასიათდება არაგანშრევადობით, დაბალი წყალცემენტის ფარდობით, მომატებული კოჰეზიით და სხვა. სწორედ ამით აიხსნება მსოფლიო ბეტონის მოცულობაში დანამატების გამოყენების ზრდა. რიგ ქვეყნებში პრაქტიკულად ყველა გამოშვებული ბეტონი მზადდება სხვადასხვა სახის დანამატების გამოყენებით. მრავალრიცხოვან დანამატებს შორის, რომელიც გამოიყენება ბეტონის ტექნოლოგიაში განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება პლასტიფიცირებულ დანამატებს, რომლებიც მნიშვნელოვნად 20-30 %-ით ამცირებს ბეტონის ნარევი წყლის რაოდენობის მოთხოვნას, მისი პლასტიურობის შენარჩუნებით.

ზედმეტი წყალი, რომელიც შეგვყავს ბეტონის ნარევი, რათა უზრუნველყოფილი იყოს საჭირო პლასტიურობა რჩება გამყარებულ ბეტონში, როგორც თავისუფალი, რომელიც იწვევს შესაბამისი რაოდენობის წყლით შევსებული ფორებისა და კაპილარების გაჩენას, ხოლო მისი ჰაერით გამოშრობისას უარყოფითად მოქმედებს გამყარებული ბეტონის ძირითად თვისებებზე, როგორცაა სიმტკიცე, სიმკვრივე, კოროზიამდეგობა და სხვა.

ცნობილია, რომ ადრე გამოყენებული პლასტიფიკატორები ძირითადად მრეწველობის ნარჩენები იყო (ნავთობგადამუშავებული ნარჩენები), რომლებსაც არასტაბილური შემადგენლობა აქვს და ბოლომდე ვერ უზრუნველყოფენ საჭირო მოსალოდნელ ეფექტებს, მათგან განსხვავებით სუპერპლასტიფიკატორები

წარმოადგენენ სპეციალურ პროდუქტებს მუდმივი შემადგენლობით მკაცრად ნორმირებული თვისებებით. სუპერპლასტიფიკატორებს შეუძლიათ მიღება მაღალი სიმტკიცის ბეტონების B45 კლასის და უფრო მეტის ჩვეულებრივი ცემენტის მარკა 400, 500, ფარდობითი ხარჯი საშ., 450 კგ-ის საფუძველზე. მაღალი მარკის ცემენტების შეცვლა შედარებით იაფი ცემენტით მასიური წარმოების რკინაბეტონის კონსტრუქციების ტექნოლოგიაში საბოლოო ჯამში საშუალებას მოგვცემს მნიშვნელოვნად შევამციროთ ეკონომიკური მაჩვენებლები.

ამგვარად, სამშენებლო წარმოების ქიმიზაცია წარმოადგენს ერთ-ერთ გზას სამშენებლო ტექნოლოგიების სრულყოფისათვის, რასაც შეუძლია კომპლექსურად გადაწყვიტოს თბოენერგეტიკული მატერიალური, შრომითი რეზერვების შემცირების ამოცანები.

სიახლე – არამარტო საცნობარო ლიტერატურაში, არამედ სამეცნიერო წყაროებშიც არ მოიძებნა ინფორმაცია დანამატიანი ბეტონების (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების ფართო სპექტრით არსებულ კვლევებზე, როგორცაა სიმტკიცე, დეფორმატიულობა, ცოცვადობა და სხვა. წარმოდგენილ ნაშრომში მრავალრიცხოვანი ექპერიმენტების საფუძველზე შესწავლილია და გაანალიზირებულია დანამატებიანი (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის მუშაობა დროში, როგორც ხანმოკლე, ასევე მუდმივი და მრავალჯერადი განმეორებითი დატვირთვების შემთხვევაში. ევროკოდი 2-ის საშუალებით თეორიულად გაანგარიშებულია ჩვენს მიერ დამზადებული დანამატიანი ბეტონების ცოცვადობის კოეფიციენტი და მათი სიმტკიცისა და დრეკადობის მოდულის ცვლილება დროში. **ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარე საკითხის შესწავლა მეტად აქტუალურია და წარმოადგენს სამეცნიერო სიახლეს.**

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს საქართველოს სამშენებლო სექტორში ყველაზე მოხმარებადი და ეკონომიკური თვალსაზრისით გამართლებული დანამატების

შესწავლა-გამოვლენას და აღნიშნული დანამატებით შედგენილი ბეტონების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევას, კერძოდ:

სადისერტაციო ნაშრომში ექსპერიმენტალურ-თეორიული კვლევების საფუძველზე დასმულია შემდეგი სახის ამოცანები:

1. საქართველოს სამშენებლო ბაზარზე არსებული ყველაზე მოთხოვნადი და რენტაბელური დანამატების დადგენა-შესწავლა;
2. შესწავლილი დანამატებით (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის დამზადების ტექნოლოგიის შემუშავება და ოპტიმალური ნარევის მიღება;
3. დანამატის ბეტონის სიმტკიცის, დეფორმატიულობის და ზღვრული დეფორმაციების კვლევა ხანმოკლე დატვირთვის დროს;
4. დანამატის ბეტონის სიმტკიცისა და დეფორმატიულობის შესწავლა მრავალჯერადი სტატიკური დატვირთვებისას;
5. რეკომენდაციების შემუშავება მაღალი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მქონე დანამატის ბეტონების გამოყენებაზე ჰიდროტექნიკურ, საგზაო და სხვა სპეციალური დანიშნულების მშენებლობებში;
6. აღნიშნული დანამატებით შედგენილი ბეტონის ცოცვადობის კოეფიციენტის თეორიული გაანგარიშება (ევროკოდი 2)-ის საშუალებით სხვადასხვა ტენიან გარემოში, აგრეთვე სიმტკიცისა და დრეკადობის მოდულის ცვლილება დროში.

მიღებული შედეგების საიმედოობა დაფუძნებულია ექსპერიმენტალური სამუშაოების მსვლელობისას მაღალი სიზუსტის თანამედროვე გამზომი ხელსაწყოების გამოყენებაზე, გამზომი მოწყობილობების სიზუსტეზე და ექსპერიმენტალური მონაცემების დამუშავებაზე. დისერტაციის ექსპერიმენტალური ნაწილი შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, სამშენებლო

ფაკულტეტის საწავლო სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიაში, რომელიც აღჭურვილია თანამედროვე გამზომი ხელსაწყო-დანადგარებით, რაც თავის მხრივ გარანტია კვლევის მაღალი სიზუსტით შესრულებისა.

მიღებული შედეგების პრაქტიკული გამოყენება შესაძლებელია საქართველოს სამშენებლო ინდუსტრიაში, კერძოდ, დანამატიანი ბეტონი ოპტიმალური შემადგენლობით, რეკომენდირებულია მშენებლობის სხვადასხვა მიმართულებაში, როგორცაა:

- სამოქალაქო მშენებლობები, მრავალბინიანი საცხოვრებელი სახლები, საძირკვლები;
- ჰიდროტექნიკური მშენებლობები - არხები და მიწისქვეშა ნაგებობები;
- საზღვაო სამდინარო მშენებლობები -პორტის მისადგომები;
- ხიდების, გვირაბების მშენებლობა;
- ხიმინჯების და შახტების მშენებლობა და სხვა.

ნაშრომის აპრობაცია და გამოქვეყნებული პუბლიკაციები ნაშრომის ცალკეული შედეგები მოხსენიებულ იქნა სადოქტორო პროგრამით გათვალისწინებულ სამ კოლოკვიუმზე, ხოლო ძირითადი შედეგები მოხსენიებული იქნა 21 მაისს ქ. ბერლინში (გერმანია) გამართულ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე. ნაშრომის მასალების მიხედვით გამოქვეყნებულია სტატიები, როგორც უცხოურ, ასევე ქართულენოვან მაღალრეიტინგულ რეფერირებად ჟურნალებში, კერძოდ:

1. M. Lordkipanidze, O. Giorgishvili, I. Salukvadze, N.Botchorishvili, A. Tatanashvili „Experimental and Theoretical Studies of the Peculiarities of Concrete Behavior in Time and the Concrete Limit Characteristics from the Standpoint of Creep Adsorption Theory“, 2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement based Materials and Structures - EAC2 12–14 September 2017, ULB-VUB, Brussels, Belgium;

2. M. Lordkipanidze, O. Giorgishvili, I. Salukvadze, N. Botchorishvili, A. Tatanashvili „Experimental and Theoretical Studies of the Peculiarities of Concrete Behavior in Time and

the Concrete Limit Characteristics from the Standpoint of Creep Adsorption Theory“, Global journal of Researches in Engineering, Civil and Structural Engineering, USA, Volume 18 Issue 1 Version 1.0 Year 2018;

3. M. Lordkipanidze, O. Giorgishvili, I. Salukvadze, N.Botchorishvili, A. Tatanashvili „Study of the Strength and Deformability of Compressed Concrete according to Creep Adsorption Theory“, Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, vol. 12, no.2, 2018;

4. N.Botchorishvili, . M. Lordkipanidze, , O. Giorgishvili, I. Salukvadze, A. Tatanashvili „Replacement and Reconstruction of Monument Status Damaged Buildings With Maximal Maintenance Of its Look. Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences (ბექდვაშია);

5. Н. БОЧОРИШВИЛИ. Повышение долговечности железобетонных конструкций на пористых заполнителях при введении химических добавок. სამეცნიერო-ტექნიკური რეფირებადი ჟურნალი ენერგია 1(89)/2019, 84 გვ;

6. ნ. ბოჭორიშვილი. ბეტონის ცოცვადობა და ქიმიური დანამატების გალენა მის სიდიდეზე. ნიუ უნივერსიტი (განათლების აკადემია) საერთაშორისო კონფერენცია „მცნიერების და განათლების თანამედროვე გამოწვევები და პერსპექტივები“. თბილისი, 2019 წ.

7. irc 2019 international research conference proceedings. may 21-22, 2019 berlin Germany . „Experimental and Theoretical Investigation of Slow Reversible Deformation of Concrete in Surface-Active Media“. Nika Botchorishvili, Olgha Giorgishvili.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავლის, ძირითადი ნაწილის, დასკვნების და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. წინამდებარე ნაშრომი შედგება 126 გვერდისაგან და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა მოიცავს 44 სამეცნიერო წყაროს.

ნაშრომის შინაარსი - პირველი თავი მოიცავს ლიტერატურულ მიმოხილვას.

მეორე თავში დადგენილია ბეტონის ოპტიმალური შემადგენელობა და შესწავლილია მისი კომპონენტების, კერძოდ ქვიშა, ლორღი-ხრემი, ცემენტი, დანამატები მიკროსილიკა და სუპერპლასტიფიკატორი GRACE ZYLA® 420 M, ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები.

მესამე თავში განხილულია დანამატიანი და საბაზო ბეტონის სტრუქტურული ცვლილებების საზღვრების დადგენა თავისუფალ და შეზღუდულ მდგომარეობაში განივი გაფართოების კოეფიციენტის საშუალებით კუმშვისას.

მეოთხე თავში წარმოდგენილია ქიმიური დანამატებით მოდიფიცირებული ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა, კერძოდ შესწავლილია დანამატიანი და საბაზო ბეტონის დეფორმაციები მუდმივი და განმეორებითი დატვირთვების დროს.

მეხუთე თავში ევროკოდი 2-ის გამოყენებით თეორიულად შესწავლილია ბეტონის ცოცვალობა და ქიმიური დანამატების გავლენა მის სიდიდეზე, ასევე სიმტკიცისა და დრეკადობის მოდულის ანგარიში ასაკის გათვალისწინებით.

მექვსე თავში წარმოდგენილია სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დასკვნები.

თავი 1 ლიტერატურის მიმოხილვა

1.1 დანამატების ზოგადი მიმოხილვა

სამშენებლო ინდუსტრიაში ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გასაუმჯობესებლად აქტიურად გამოიყენება სუპერპლასტიფიკატორები და ტექნოლოგიური წარმოშობის მაღალდისპერსიული დანამატები. დანამატ-მოდულიკატორების რაციონალური შერჩევა საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ ბეტონის ნარევის მაღალი რეოლოგიური მახასიათებლები და გაუმჯობესებული ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები.

გასული საუკუნის 60-იან წლებში სამშენებლო ბაზარზე აქტიურად გამოჩნდა სუპერპლასტიფიკატორები, რამაც ხელი შეუწყო ბეტონის ნარევის და მყარი ბეტონის თვისებების ასამაღლებლად დანამატ-მოდულიკატორების გამოყენებას. დანამატები, კერძოდ, პლასტიფიკატორები დიდ გავლენას ახდენენ ბეტონის სტრუქტურის ფორმირებაზე. საწყის ეტაპზე ისინი ცვლიან ცემენტის ცომის რეოლოგიურ თვისებებს, ამცირებენ წყალ-ცემენტის ფარდობას, რის გამოც მაღლდება ნარევის კრისტალიზაციური სისტემის პარამეტრები. შედგენილობის მიხედვით პლასტიფიკატორები შეიძლება დაიყოს შემდეგ ჯგუფებად:

- 1) ლიგნოსულფონატები - ტექნიკური მოდიფიცირებული;
- 2) სულფირებული მელამინ ფორმალდეჰიდური კონდენსატები;
- 3) სულფირებული ნაფტალინ-ფორმალდეჰიდური კონდენსატები;
- 4) პოლიმერები, რომლებიც შეიცავენ პოლიაკრილატებს, პოლისტიროლურ სულფონატებს.

ბეტონის წარმოების ახალი ტექნოლოგიები თანამედროვე მშენებლობაში ემყარება ისეთი პირობების შესწავლას, რომელიც მიმდინარეობს მიკრონაწილაკების დონეზე, ყურადღება ექცევა ქიმიური პროცესების მიმდინარეობის სისწრაფეს და ხარისხს გამყარებად ბეტონში, რისთვისაც გამოიყენება ახალი თაობის კომპლექსური მოდიფიცირებული დანამატები და ბეტონის შემადგენლობის შერჩევისა და

ოპტიმიზაციის უახლოესი მეთოდები, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ მაღალი საექსპლუატაციო თვისებების მქონე ბეტონები, რომლის წარმოების უახლოესი ტექნოლოგიები აქტიურად ინერგება მშენებლობაში და ბიზნესში. ახალი თაობის ბეტონი ითვლება უნივერსალურ სამშენებლო მასალად, რადგან იგი შესაძლებლობას იძლევა გამოყენებულ იქნას სხვადასხვა ტიპის მშენებლობაში. მაგალითად, როგორც ჰიდრიტექნიკურ ნაგებობებში, ისე სამოქალაქო მშენებლობაში.

უკანასკნელ პერიოდში პლასტიფიკატორებთან ერთად აქტიურად იყენებენ მაღალდისპერსულ დანამატებს, მაგალითად კაჟმიწა მტვრის მინარევებს, ნაცარს, წიდას, დღეისათვის ბეტონის ნარევის შემუშავებული შემადგენლობა იძლევა საშუალებას შემცირდეს წ/ც ფარდობა 0.3-0.25-მდე და მიღებული იქნას ბეტონების სიმტკიცე კუმშვაზე 140 მპა. მაღალი სიმტკიცის ბეტონების გამოყენებაში მიღებულმა გამოცდილებამ საშუალება მისცა ევროკავშირის ქვეყნებს შეექმნათ ნორმატიული ბაზა. მაღალი სიმტკიცის ბეტონების წარმოებაში (ევროპული სტანდარტი EN206) [5]. ტექნოლოგიური ნარჩენი (ნაცარი, წიდა და სხვა) შეიცავს ტოქსიკურ ელემენტებს, მას ასევე აქვს მაღალი რადიოაქტიურობა. სტანდარტი ГОСТ-30108-ის შემუშავების შემდგომ რადიოაქტიურობის პრობლემა პრაქტიკულად მოიხსნა, რადგან მასში მოცემულია ამ მაჩვენებლის შეფასების მეთოდები და კრიტერიუმები.

გასულ საუკუნეში ბეტონის წარმოებაში უდიდეს მიღწევად ითვლება ზედაპირულ-აქტიური ნივთიერებების და კომპლექსური მოდიფიკატორების გამოყენება. ბოლო წლებში აღინიშნება განსაკუთრებული ინტერესი ბეტონის მოდიფიკატორად სხვადასხვა ნარჩენების და თანამდევი სამრეწველო პროდუქტების: მინერალური სასუქების, ნავთობგადამუშავებული-, მეტალურგიული- და მრავალი სხვა ნარჩენების გამოყენებისა. უახლოეს პერსპექტივად უნდა იქცეს მაღალეფექტური რეგულატორების შექმნა, რომლებიც ბეტონის შეკვრას და გამყარებას შეუწყობს ხელს. დღეისათვის გამოყენებული ქლორიდის საფუძველზე დამზადებული გამყარების დამაჩქარებლებს აქვთ რიგი შეზღუდვები, რომლებიც დაკავშირებულია ბეტონის დამცავი თვისებების შემცირებასთან, არმატურასთან მიმართებით [6]. ბეტონის წარმოების ტექნიკა და ტექნოლოგია განუწყვეტლივ ვითარდება. განსაკუთრებული

ყურადღება დღესდღეობით ექცევა ნანოტექნოლოგიებს, რაც გულისხმობს კვლევებს ისეთი ნაწილაკების და სისტემების მონაწილეობით, რომელთა ზომები $1\div 100$ ნმ. ეს ნიშნავს, რომ ხდება მიკროსამყაროდან ნანოსამყაროში გადასვლა. დღეს მრავალ ქვეყანაში ტარდება თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევები ნანოსტრუქტურული, მოდიფიცირებული მასალების მიღების ტექნოლოგიური პროცესების დამუშავების და მათი ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გაუმჯობესების მიმართულებით. მაგალითად, ბეტონის ნარევი ფულეროიდული ნაწილაკებით გამდიდრებული მაპლასტიფიცირებელი დანამატის შეყვანა მკვეთრად აუმჯობესებს ბეტონის ნარევის რეოლოგიურ მახასიათებლებს და შესაბამისად ამცირებს ბეტონის სამუშაოების შრომით დანახარჯებს. უმჯობესდება ნარევის ხანგამძლეობა, სიმტკიცე, წყალმედვეობა და სხვა მახასიათებლები.

მსოფლიოს მასშტაბით უამრავი მკვლევარი მუშაობს სხვადასხვა სახის დანამატების შესწავლაზე ბეტონის ნანოსტრუქტურული, მოდიფიცირებული მასალების მიღების ტექნოლოგიური პროცესების დამუშავების და მათი ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გაუმჯობესების მიმართულებით.

დანამატების, როგორც პლასტიფიკატორის, ასევე მოდიფიკატორის ერთობლივ გამოყენებაზე საინტერესო კვლევები აქვთ ჩატარებული [6] ავტორებს, რომლებსაც შესწავლილი აქვთ ორი სახეობის დანამატებით შედგენილი ბეტონების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები. კვლევისათვის მათ გამოყენებული აქვთ რუსული წარმოების (ПКФ-70С) პლასტიფიკატორი და შეკვრის დამაჩქარებელი მაღალი დისპერული გერმანული კომპანია FUCHS - ის წარმოებული დანამატი (TENCEM 2). აღნიშნული კვლევით მიღებულია მაღალი სიმტკიცის ადვილადჩაწყობადი, სწრაფადმაცარებადი ბეტონის შემადგენლობა. ჩვეულებრივად ნორმალური ბეტონი განიხილება როგორც სამი კომპონენტისაგან შემდგარი სამშენებლო მასალა. ეს არის უმთავრესი შემკვრელი მასალა ცემენტი, შემვსებები და წყალი. საგულისხმოა რომ, მაღალი სიმტკიცის ბეტონი შედგება ხუთი კომპონენტისაგან - სადაც წინა სამ კომპონენტს ემატება: დანამატები: 1. მიკროკაჟმიწა მტვერი, ნაცარი, მეტალურგიული წიდა და მეტაკაოლინი, 2. პლასტიფიკატორები, რომლებიც საშუალებას იძლევიან წ/ც-ის

(წყალ/ცემენტის ფარდობის) შემცირების შემთხვევაშიც შეინარჩუნონ ბეტონის ნარევის საჭირო ძვრადობა. მაღალი სიმტკიცის ბეტონების წარმოებაში დიდი გამოყენება პოვა მიკროსილიკამ, რომელიც სიმტკიცის მატებასთან ერთად ხელს უწყობს ბეტონის ნარევის წყალშეუწევადობის ზრდას. ნორვეგიული წარმოების მოდიფიკატორი მიკროსილიკა შედგება ამორფული კაჟმიწის წვრილი ნაწილაკებისაგან, რომლის შემადგენლობის 98%-ს შეადგენს SiO_2 . მისი ნაყარი სიმკვრივე 120 ± 450 კგ/მ³-ია, ხოლო ჭეშმარიტი სიმკვრივე $2200-2300$ კგ/მ³ იგი 50-100 ჯერ წვრილია ცემენტის ნაწილაკებზე, რის გამოც აჩქარებს ჰიდრატაციის პროცესს.

ისევე, როგორც მთელს მსოფლიოში, მშენებლობები საქართველოშიც ძირითადად ხორციელდება პროგრესული მონოლითური მეთოდით, რომლის ტექნოლოგია დამყარებულია მაღალი დენადობის (პლასტიფიკატორით გათხევადებული) ე.წ. „სასაქონლო ბეტონების“ გამოყენებაზე. საქართველოში მშენებლობები ამჟამად ხორციელდება საშუალო კლასის, (C16/20-C45/55) ბეტონების გამოყენებით, რომელთა სიმტკიცე კუმშვაზე ცილინდრული ნიმუშებით არის 16-45 მპა, კუბური ნიმუშებით კი 20-55 მპა ფარგლებში. ამ მიმართულებით, ბეტონის სტრუქტურის ფორმირების პროცესების შესწავლასა და მეცნიერულ კვლევებში დიდი ღვაწლი მიუძღვით და გარკვეული შედეგები აქვთ მიღებული ქართველ მეცნიერებს: ზ. წილოსანს, ა. ყუბანეიშვილს, ვ. ბალავაძეს, ა. ნადირაძეს, შ. ბურჭულაძეს, ლ. ბოლქვაძეს, ა. ჩიქოვანს, ა. საკანდელიძეს, ა. საყვარელიძეს, რ. სხვიტარიძეს და სხვებს.

1.2 სამეცნიერო წყაროებში განხილული ბეტონის მუშაობა დროში

ბეტონის მიღვადაი დეფორმაციის (ცოცვადობის), ფენომენოლოგიური და ფიზიკური მოდელების კვლევის მიზნით, აუცილებელია მიკრობზარების წარმოქმნის (მისი დრეკადი დეფორმირების უბნის) საზღვრების დადგენა, რომელიც სხვა მყარი სხეულებისაგან განსხვავებით დროში იცვლის თავის ფიზიკურ-ქიმიურ

მაჩვენებლებს, ამ უბანში ბეტონის დეფორმაციას აქვს ხაზოვანი ხასიათი, ე.ი. გარე ძაბვები შესაბამისი ზღვრული დეფორმაციის პროპორციულია.

ხაზოვანი ცოცვადობა ვლინდება დაძაბული ბეტონის მიკრობზარებში წყლის ადსორბციის შედეგად და დეფორმაციის შეზღუდვისას მატულობს არა მარტო მისი სიმტკიცე, არამედ ბზარწარმოქმნის ზღვარიც.

ბეტონის სიმტკიცისა და დეფორმაციის საკითხი მჭიდროდაა დაკავშირებული დატვირთვის პროცესში მის სტრუქტურულ ცვლილებებთან, რომელთა დახასიათება შესაძლებელია რიგი პარამეტრებით. განივი დეფორმაციის კოეფიციენტების μ და $\mu_{\text{ხან}}$ (შესაბამისად ხანმოკლე და გრძელვადიანი დატვირთვებისას), ბეტონის სიმკვრივის ფარდობითი ცვლილების განმსაზღვრელი მოცულობითი ფარდობითი დეფორმაციით Q და სხვა [17]. ამ სამუშაოში შემოთავაზებული ბეტონის მდგომარეობის დიაგრამა რეალურად ასახავს მის მუშაობას. ამასთანავე, ის სრულად არ აშუქებს ბეტონში მიმდინარე პროცესებს და ზოგიერთ შემთხვევაში საჭიროებს კორექტირებას, მაგალითად, გამძლეობის ზღვრების, ბეტონის ხანგრძლივ წინაღობის და სხვა განსაზღვრისას [1, 2]. ამასთან დაკავშირებით დიდ ინტერესს წარმოადგენს ბეტონის ზღვრული მაჩვენებლების უნივერსალური გრაფიკი, რომლის მიხედვითაც შესაძლებელია მკაფიოდ განვსაზღვროთ ბეტონის სიმტკიცის ნამდვილი ზღვარი R , მისი შესაბამისი ზღვრული დეფორმაცია ϵ , გამძლეობის ზღვარი R_B და მისი შესაბამისი ცოცვადობის ზღვრული დეფორმაცია, ბეტონის დრეკადობის მოდული E და დროში მისი ცვალებადობის ხასიათი, გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდვის ეფექტის გავლენა მის ფიზიკურ-მექანიკურ მაჩვენებლებზე, დეფორმირების ხაზოვან და არახაზოვან უბანზე [3, 4, 5].

ყველა რეალური მყარი სხეული შეიცავს მრავალ არაერთგვაროვნებას და დეფექტს, მათ ნაპირებთან ძაბვების კონცენტრაციაა, რაც აიოლებს დეფორმაციასა და მის შემდგომ განვითარებას. გარე ძალების გაზრდის მიხედვით წყლის ადსორბაციის გავლენა, რომელიც გამოიხატება დაძაბული ბეტონის მიკრობზარებში

მისი განმხლეჩი მოქმედებით, კიდევ მეტად აიოლებს ბეტონის გაჭიმვის დეფორმაციას [6, 8, 9, 10, 11].

XX საუკუნის 30-იანი წლებიდან დაიწყო ბეტონის ცოცვადობის შესახებ მრავალმხრივი კვლევები, კერძოდ, ტენის გავლენის შესახებ მის დეფორმაციაზე [37-42]. ცნობილი ფრანგი მეცნიერი და ინჟინერი ფრეისინე, ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციას განიხილავდა როგორც მასში კაპილარული მოვლენების შედეგს [15]. ა. ა. გვოზდევი, რ. ლერეიტი, გლუკხინი და ისხაი [15] უშვებენ, რომ ბეტონის ცოცვადობა შესაძლოა იყოს მისგან წყლის თანდათანობითი გამოდენის შედეგი პროფესორ ა.ე. შეიკინის [15] მიხედვით ბეტონის ცოცვადობის ცნობილი თეორიის თანახმად ცოცვადობა არის ბეტონის გელური შემადგენლობის ბლანტი დინება მუდმივი დატვირთვის ქვეშ და წარმოადგენს მისი ცოცვადობის ძირითად მიზეზს. მაგრამ, ასეთი დინება უზრუნველყოფილია მხოლოდ წყლის არსებობით [32-34]. მრავალი სპეციალისტის ცდებით, დამტკიცებულია ბეტონის დეფორმირების მექანიზმის იდენტურობა მუდმივი და განმეორებითი დატვირთვისას. დადგენილია, რომ ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის ზრდა მიღევადია. [15, 16, 23, 24, 25]. პ.ა. რებინდერის მიერ ნაჩვენები იქნა, რომ ადსორბციული ფენები, შეღწეული დეფორმირებადი სხეულის მიკრობზარებში, იწვევს მის „ადსორბციულ გარბილებას“ არა მხოლოდ მიკრობზარების აქტიურად გაშლით, არამედ იმითაც, რომ ანელევენ პროცესს [8]. ბეტონის ცოცვადობის ბუნების ადსორბციული თეორიის მიხედვით, თუ დამაბულ ბეტონში გაძლიერებულია (მაგალითად არმირებით) მოლეკულურ-დრეკადი წინააღმდეგობა, ანუ ხდება დეფორმაციის შეზღუდვა, ცოცვადობა შესაბამისად მცირდება, რადგან ბეტონის გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდვისას (განხორციელებული არმირებით, ხახუნით ან სხვა მეთოდით) წყლის ადსორბციული გავლენა მასზე უმნიშვნელოა.

კერძოდ, ამით აიხსნება ის, რომ ბეტონი რკინაბეტონში ცოცავს უფრო ნაკლებად, რაც უფრო მეტია და დისპერსიულია არმატურა. ამითვე აიხსნება

არმოცემენტის ნაკლები წყალშელწევადობა შედარებით ნარევთან (წყალმარცვლოვნი ბეტონი), რომელზეც ის არის მომზადებული.

წყალშელწევადობა გამოწვეულია ბეტონში შეკლების მიკრობზარების წარმოქმნითა და გავრცობით ადსორბციული წყლის მოქმედების შედეგად, რომელიც გამოიხატება მის გამხლეჩ მოქმედებაში. არმოცემენტში დისპერსიული დაარმატურება ქმნის ხსნარის გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდვას, რაც წარმოშობს ისეთ დამატებით დრეკად წინააღმდეგობას, რომელიც აკავებს შეკლების მიკრობზარების წარმოშობას და ჩანასახშივე აღმოფხვრის მათში წყლის გამხლეჩი მოქმედების საშიშროებას.

წყალგაჯერებული ბეტონის გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდვა, კერძოდ, განხორციელებული არმირებით ან ხახუნით, მის სიმტკიცეს ზრდის უფრო მეტად, ვიდრე მშრალი ბეტონის [13, 14, 19]. გლუკლიხის და ისხაისგან განსხვავებით წილოსანმა აჩვენა არა მხოლოდ ის, რომ მშრალი ბეტონი არ ცოცავს, არამედ ისიც, რომ არ ცოცავს ბეტონი, რომელიც არაპოლარული გარემოთია გაჯერებული, კერძოდ გასუფთავებული ნავთით, და ცოცავს მით უფრო ინტენსიურად, რაც უფრო მაღალია სითხის პოლარობა, რომლითაც ის არის გაჯერებული. ეს აჩვენებს ზედაპირულა-აქტიური ნივთიერებების როლს, კერძოდ წყლის, ბეტონთან მიმართებაში, კერძოდ, ამ ნივთიერებების ადსორბციული გავლენის შესახებ დამაბული ბეტონის ახლადწარმოქმნილ ზედაპირულ მიკრობზარებზე. მაგრამ წილოსანი ბეტონის ცოცვადობის მთავარ მიზეზად თვლის არა წყლის გამხლეჩ მოქმედებას, არამედ შეუქცევადი მიკრობზარებისა და ფორების თანდათანობით წარმოქმნასა და გავრცობას. მის მიერ აღწერილი ექსპერიმენტები საშუალებას იძლევა ჩავთვალოთ, რომ ცოცვადობის ერთ-ერთი მთავარი მიზეზია მიკრობზარების თანდათანობითი წარმოქმნა და განვითარება. წილოსანი ასკვნის, რომ დახანებული ცემენტის ქვის ან ბეტონის დეფორმაციის განვითარებაში განმსაზღვრელი ფაქტორია კრისტალიზაციური სტრუქტურის მიკრობზარებისა და რღვევების თანდათანობითი წარმოქმნა და გავრცობა, რომელიც იოლდება გარემოს შექცევადი გავლენით.

თავისუფალ (შეუზღუდავ) ბეტონში ცოცვადობისას ხანგრძლივი წინაღობის ზღვარის და განმეორებითი დატვირთვისას გამძლეობის ზღვარის მიღწევამდე არ ხდება შეუქცევადი მიკრობზარებისა და რღვევების წარმოქმნა და გავრცობა წარმოიქმნება და ვრცელდება მხოლოდ შექცევადი მიკრობზარები. აღნიშნული ზღვრების მიღწევის შემდეგ ნამდვილად წარმოიქმნება შექცევადი მიკრობზარები და გადაიზრდება შეუქცევადში. შეუქცევადი მიკრობზარები გამორიცხავს ცოცვადობის დეფორმაციის ჩაქრობას და მიყავს იგი რღვევამდე. შექცევადი და შეუქცევადი მიკრობზარების წარმოქმნა და გავრცობა სრულიადაც არ არის მიზეზი, არამედ ბეტონის ცოცვადობის შედეგია, რომელიც გამოწვეულია მასში წყლის გამხლეჩი მოქმედებით. თუ ბეტონის ცოცვადობის ნამდვილ მიზეზს წარმოადგენს შეუქცევადი მიკრობზარებისა და რღვევების თანდათანობითი წარმოქმნა და გავრცობა, მაშინ ასეთ შემთხვევაში არ შეიძლება ცოცვადობის და ვიბროცოცვადობის დეფორმაციის ჩაქრობის მიზეზის ახსნა, რომლის შედეგად ბეტონი იწყებს დრეკად მუშაობას, ჰუკის კანონის მიხედვით.

მშრალი ბეტონი და სხვა ჰიდროფილური მასალები, რომელთა მიმართაც წყალი ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებებს წარმოადგენს, როგორც აღნიშნული იყო მშრალ მდგომარეობაში არ ცოცავენ, ხოლო ტენიან გარემოში იძლევიან ცოცვადობის დეფორმაციას. ისეთი მასალა, როგორც ფოლადია, ჩვეულებრივ პირობებში (ნორმალური ტემპერატურის დროს) თუ მასზე ზედაპირულად აქტიური ნივთიერება არ მოქმედებს, არ ცოცავს, არ იძლევა ცოცვადობის დეფორმაციას, მაგრამ თუ მასში შევიტანთ ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებას, კერძოდ წყალბადს, ის დაიწყებს ცოცვას მუდმივი დატვირთვისას.

ამგვარად მიიღება, რომ თუ დამაბულ მასალაში არის თავისუფალი ზედაპირულად აქტიური ნივთიერება (ან თუ ის არის გარემოში, რომელშიც მასალაა), მაშინ, როგორც აკადემიკოსმა რეზინდერმა და მისმა თანამშრომლებმა აჩვენეს მიკრობზარებში, უფრო სწორად მათ ახლად წარმოქმნილ ზედაპირებზე ახდენს ადსორბციულ გავლენას. ეს გავლენა ძირითადად გამოიხატება დამაბულ

მასალაში ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების გამხლეჩ მოქმედებაში. დაძაბულ ბეტონში ადსორბციული წყლის გავლენა გამოიხატება საბოლოოდ მასში მიკრობზარების თანდათანობით გახსნაში, ანუ ბეტონის დეფორმაციის ზრდით დროში, ე.ი. ცოცვადობის სახით. მართალია ეს მეტად თვალსაჩინოდ ვლინდება ცენტრალური გაჭიმვის დროს, მაგრამ ადგილი აქვს მასალის ნებისმიერი დაძაბულობის მდგომარეობაში, გარდა მისი ყოველმხრივი თანაბარი კუმშვისას.

ღერძული კუმშვისას ადგილი აქვს მიკრობზარების თანდათანობით გახსნას, რომელიც ორიენტირებულია პარალელურად მოქმედი შემკუმავი ძალისადმი, ე.ი. მიმდინარეობს განივი გაჭიმვა, რომელსაც საბოლოოდ მივყავართ გასწვრივი მიმართულებითაც მასალის ცოცვადობასთან.

მასალაში ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების ასეთი ადსორბციული გავლენის შედეგად იოლდება მათი დეფორმაცია, რაც საბოლოოდ ამცირებს სიმტკიცის ზღვარს, სწორედ ამაში მდგომარეობს არსებითად რეზინდერის ეფექტი.

ზემოაღნიშნული საკითხების შესწავლა უადრესად აქტუალურია. ეს თემა ამოუწურავია კვლევის თვალსაზრისით. ჩვენც ზემოთმოყვანილი ლიტერატურის მიმოხილვის საფუძველზე უნდა შევისწავლოთ, გავანალიზოთ და დავაზუსტოთ დანამატის ბეტონების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები: სიმტკიცე, დეფორმატიულობა, ცოცვადობა და ჯდენითი დეფორმაციები და მათი დანამატებით რეგულირების გზები.

სადისერტაციო ნაშრომში ექსპერიმენტულად და თეორიულად შესწავლილი იქნება ბეტონის მუშაობა დროში. კერძოდ, მისი ცოცვადობა მრავალჯერადი განმეორებითი დატვირთვების დროს, როგორც მიმოხილვიდან გამოჩნდა ამ საკითხის გარშემო მრავალი მოსაზრება და კვლევა ჩატარებული, მაგრამ შედარებით ნაკლებად არის შესწავლილი დანამატების გავლენა ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე, განსაკუთრებით კი მის მუშაობაზე დროში. აღნიშნულის შესწავლა მოგვცემს საშუალებას რკინაბეტონის კონსტრუქციების ბზარმედეგობაზე ანგარიშის

დროს მასში კოეფიციენტების დაზუსტების და ამით ეკონომიკური ეფექტების გამოვლინებას.

თავი 2. დანამატების შესწავლა-შერჩევა. ინერტული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა

2.1 GRACE ZYLA® 420 M

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დადგენილია ბაზარზე არსებული ყველაზე უფრო მოხმარებადი და რენტაბელური დანამატების სახეობები, კერძოდ, ჩვენს მიერ შემოთავაზებულია ორი სახეობის დანამატი, მიკროსილიკა და სუპერპლასტიფიკატორი GRACE ZYLA® 420 M. ეს უკანასკნელი არის წყლის რაოდენობის შემამცირებელი და ბეტონის სუპერპლასტიფიკატორული მინარევი, რომელიც აუმჯობესებს ბეტონის ვარგისიანობას და შესამჩნევად გაუმჯობესებული სიმტკიცის მიღებას ნაკლები წყლით. მისი საშუალებით შეგვიძლია მივიღოთ დაბალი წყალცემენტის ფარდობის შესაბამისი ძვრადობითა და პლასტიურობით, მაღალი სიმტკიცისა და გამძლეობის მქონე ბეტონი. იგი საშუალებას იძლევა გამოყენებულ იქნას გამძლე ნაგებობებისათვის მზა ბეტონების წარმოებაში და ასევე მობილური ბეტონების ქარხნებში, ხიდების მაღის ნაშენში, კოჭებში, სვეტებში, საძირკვლებში, ადვილადჩაწყობადი ბეტონის წარმოებაში, ჩვეულებრივ და სპეციალურ ბეტონებში და რკინაბეტონებში. მისი დანამატის ნორმა შეადგენს 500-1200 გრ, 100 კგ ცემენტზე. აღნიშნულ დანამატს აქტიურად მოიხმარენ დასავლეთის ავტომაგისტრალის მშენებლობის საქმეში, აგრეთვე ადგილობრივი ბაზარზე არსებული ბეტონის მწარმოებლები.

ცხრილი №2.1

მასალის ფუძე	ორგანული შემადგენლობები
ფორმა	ჰომოგენური, სითხე
ფერი	ყავისფერი
pH (@20 ° C):	7.0 ±1.5 (TS 6365 EN 1262)
მთლიანი ქლორიდის შემცველობა	<0,10 M.-% (TS 1116 EN ISO 1158)
წყლის ხსნადობის შემცველობა	<7,0 M.-% (TS EN 480-12)

შენახვის პირობები:	+5 ° C ტემპერატურის ზევით
რეკომენდირებული დოზა:	0,5 % – 1,2 % ცემენტის წონის მიხედვით
ვარგისიანობა	1 წელი პროდუქციის გამოშვების თარიღიდან

2.2 მიკროსილიკა

დანამატი მიკროსილიკა წარმოადგენს ძალიან წვრილ ბუმტისმაგვარ ამორფულ კაჟმიწის ნაწილაკებს, რომლის საშუალო ხვედრითი ზედაპირია 20 კვმ/გრ, გრანულომეტრიული ზომით 0,1 მიკრონი. მისი შემადგენლობის 98 %-ს წარმოადგენს SiO₂, ნაყარი მოცულობითი სიმკვრივე შეადგენს $\rho_{ნაყ}$ 120÷450 კგ/მ³, ჭეშმარიტი სიმკვრივე $\rho_{ჭეშ}$ 2,200÷2,300 გრ/სმ³. მისი ნაწილაკები 50÷100-ჯერ წვრილია ცემენტის ნაწილაკებთან შედარებით. აღნიშნული დანამატის მთავარი და ყველაზე აღსანიშნავი თვისებაა მისი უნიკალური შესაძლებლობა წარმოქმნას არაგადამუშავებადი კრისტალის ფორმაცია ბეტონის ფორმებსა და კაპილარებში და წარმოქმნას კრისტალური სტრუქტურა, რომელიც ლუქავს ბეტონს ყველანაირი წყლისა და სითხის შეღწევისაგან. აღნიშნული დანამატი ბეტონის სტრუქტურაში ტენიანობისა და წყლის მიგრაციის მეშვეობით ავსებს მის ფორებს და სიცარიელებს. რეაქციის შედეგად ვლდებულობთ ბეტონის სტრუქტურაში წარმოქმნილ არაგადამუშავებად დნობად კრისტალებს. ბეტონში წყლის შეღწევის შემთხვევაში სილიკას ნაწილაკები განაახლებენ კრისტალების ზრდას და ამოავსებენ ჩარჩენილ ფორებს.

შერჩეული დანამატი უნიკალური ქიმიური საშუალებაა სწრაფმყარებადი და მაღალი სიმტკიცის ბეტონების მისაღებად და აქტიურად გამოიყენება ანაკლიის ღრმაწყლოვანი პორტის მშენებლობის საქმეში და სხვა.

2.3. ინერტული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა

საკვლევი თემისთვის ინერტულ მასალად გამოყენებული იქნა მარნეულის კარიერზე მოპოვებული ბაზალტის შემავსებლები, ქვიშა (0-5 მმ) ფრაქციის და ღორღი-ხრეში (5-10 მმ; 10-20 მმ) ფრაქციის და შესწავლილი იქნა მათი ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები. ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ჩატარდა ქვიშის (0-5) გამოცდა: გოსტ 8735-88 „ქვიშა სამშენებლო სამუშაოებისათვის“, ხოლო ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ჩატარდა ღორღი-ხრეშის (5-10 მმ; 10-20 მმ) გამოცდა: გოსტ 8269.0-97 „ღორღი და ხრეში მთის მკვრივი ქანებისაგან სამშენებლო სამუშაოებისათვის“.

პროდუქტის დასახელება: ქვიშა სამშენებლო (0-5 მმ ფრაქციის)

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდა:

გოსტ8735-88 „ქვიშა სამშენებლო სამუშაოებისათვის“.

ცხრილი №2.3.1

1. მარცლოვანი შედგენილობა სისხოს მოდული და ჯგუფი

ნარჩენი საცერზე	საცრის ხვრეტის ზომები, მმ		<5	ჯამი
	10	5		
კერძო, გრ	0	20	1980	2000
კერძო, %	0	1	99	100

ნარჩენი საცერზე	საცრის ხვრეტის ზომები, მმ						ჯამი	სისხოს მოდული	ჯგუფი
	2.5	1.25	0.63	0.315	0.15	<0.15			
კერძო, გრ	190,5	160,3	219,0	264,3	113,9	52,0	1000	2,89	მსხვილი ქვიშა
კერძო, %	19,05	16,03	21,90	26,43	11,39	5,2	100		
სრული ნარჩენი %	19,05	35,08	56,98	83,41	94,8	100	---		

2. ჭეშმარიტი სიმკვრივე

სინჯის №	მასა, გრ				სიმკვრივე, ρ გრ/სმ³	
	პიკნომეტრი ქვიშით, m	ცარიელი პიკნომეტრი, m ₁	პიკნომეტრი დისტილირებული წყალი, m ₂	პიკნომეტრი დისტილირებული წყალი და ქვიშით, m ₃	სინჯის	საშუალო
1	66.5	36.5	136.7	155.2	2.6	2.6
2	66.5	36.5	136.6	155.3	2.6	

3. ნაყარი სიმკვრივე (მოცულობითი მასა)

სინჯის №	ჭურჭლის მოცულობა, V სმ³	მასა, გრ		სიმკვრივე, ρ გრ/სმ³	
		ჭურჭლის, m	ჭურჭელი მასალით, m ₁	სინჯის	საშუალო
1	1000	360.2	1937.7	1577.5	1573.1
2	1000	360.2	1928.9	1568.7	

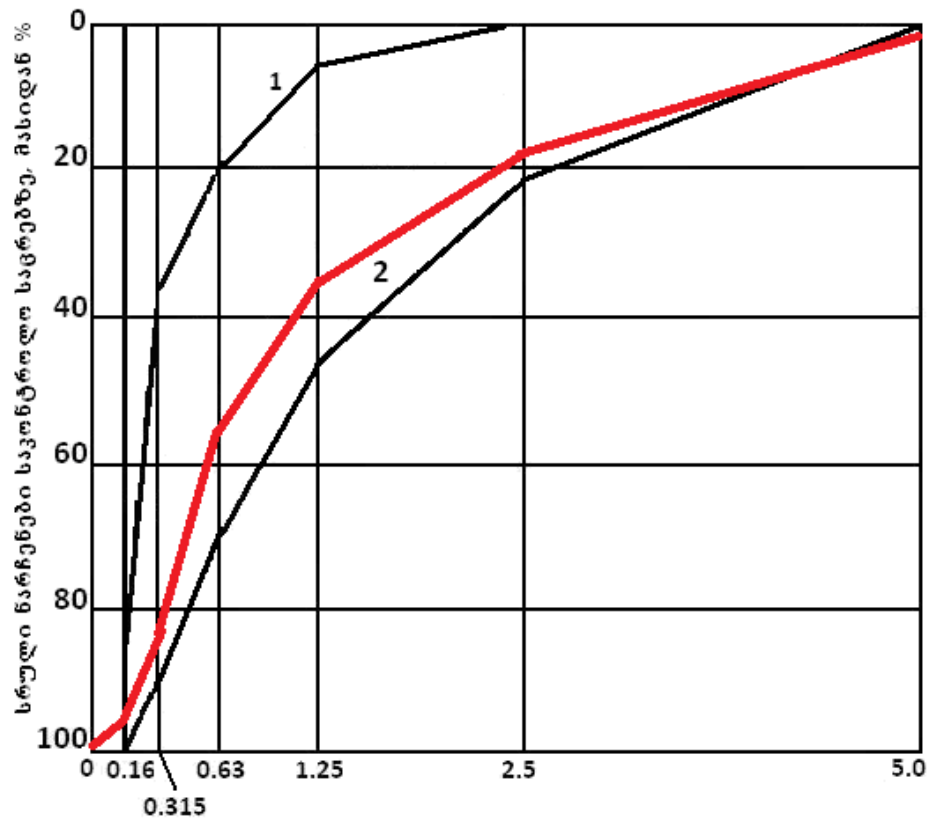
4. ცარიელობა

$$V_n = \left(1 - \frac{1573.1}{2.6 * 1000}\right) * 100\% = 39,49$$

5. ტენიანობა

სინჯის №	სინჯის მასა, გრ		ტენიანობა, W %	
	ტენიანი ქვიშის, M	მშრალი ქვიშის, M ₁	სინჯის	საშუალო
1	2131	1997.6	6.67	6.79
2	2112	1975.4	6.91	

გრანულომეტრიის გრაფიკი



პროდუქტის დასახელება: ლორღი და ხრეში სამშენებლო (5–10 მმ ფრაქციის)

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება,

რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდა: გოსტ 8269.0-97 „ლორღი და ხრეში მთის მკვრივი ქანებისაგან სამშენებლო სამუშაოებისათვის“.

ცხრილი №2.3.2

1. მარცლოვანი შედგენილობა (გრანულომეტრია)

ნარჩენი საცერზე	საცრის ხვრეტის ზომები, მმ				ჯამი
	20	10	5	<5	
კერძო, გრ	-	180	1810	10	2000
კერძო, %	-	9,0	90,5	0,5	100
სრული	-	9,0	99,5	100	-

2. ნაყარი სიმკვრივე (მოცულობითი მასა)

სინჯის №	ჭურჭლის მოცულობა, V სმ ³	მასა, გრ		სიმკვრივე, ρ _H კგ/მ ³	
		ჭურჭლის, m	ჭურჭელი მასაღით, m ₁	სინჯის	საშუალო
1	1000	360.2	1870.6	1510.4	1501.6
2	1000	360.2	1853.0	1492.8	

3. ჭეშმარიტი სიმკვრივე

სინჯის №	მასა, გრ				სიმკვრივე, ρ გრ/სმ ³	
	პიკნომეტრი ღორღით, m	ცარიელი პიკნომეტრი, m ₁	პიკნომეტრი დისტილირებული წყალი, m ₂	პიკნომეტრი დისტილირებული წყალი და ღორღით, m ₃	სინჯის	საშუალო
1	66.5	36.5	136.6	155.3	2.6	2.6
2	66.5	36.5	136.5	155.2	2.6	

4. საშუალო სიმკვრივის განსაზღვრა

№	მშრალი სინჯის წონა, m გრ	წყლით გაყდნითილი სინჯის მასა, გრ		სიმკვრივე, ρ _k გრ/სმ ³	
		ჰაერზე აწონით, m ₁	წყალში აწონით, m ₂	სინჯის	საშუალო
1	109.0	109.7	67.0	2.55	2.55
2	105.7	106.3	65.0	2.55	

5. ცარიელობა

$$V_{\sigma} = \left(1 - \frac{1501.6}{2,55 \cdot 1000}\right) * 100\% = 41.11$$

6. ფორიანობა

$$V_{\rho} = \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho}\right) 100\%$$

7. ტენიანობა

სინჯის №	სინჯის მასა, გრ		ტენიანობა, W %	
	ტენიანი ღორღის წონა, M	მშრალი ღორღის წონა, M_1	სინჯის	საშუალო
1	2320.0	2304.2	0.68	0.59
2	2315.1	2303.6	0.50	

პროდუქტის დასახელება: ლორღი და ხრეში სამშენებლო (10–20 მმ ფრაქციის)

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდა: გოსტ 8269.0-97 „ღორღი და ხრეში მთის მკვრივი ქანებისაგან სამშენებლო სამუშაოებისათვის“.

ცხრილი №2.3.3

1. მარცლოვანი შედგენილობა (გრანულომეტრია)

ნარჩენი საცერზე	საცრის ხვრეტის ზომები, მმ				ჯამი
	20	10	5	<5	
კერძო, გრ	75.7	2269.7	374.9	33.6	2753.9
კერძო, %	2.7	82.5	13.6	1.2	100
სრული	2.7	85.2	98.8	100	-

2. ნაყარი სიმკვრივე (მოცულობითი მასა)

სინჯის №	ჭურჭლის მოცულობა, V სმ ³	მასა, გრ		სიმკვრივე, ρ _H კგ/მ ³	
		ჭურჭლის, m	ჭურჭელი მასალით, m ₁	სინჯის	საშუალო
1	1000	360.2	1795.4	1435.2	1436.6
2	1000	360.2	1798.2	1438.0	

3. ჭეშმარიტი სიმკვრივე

სინჯის №	მასა, გრ				სიმკვრივე, ρ გრ/სმ ³	
	პიკნომეტრი ღორღით, m	ცარიელი პიკნომეტრი, m ₁	პიკნომეტრი დისტილირებული წყალი, m ₂	პიკნომეტრი დისტილირებული წყალი და ღორღით, m ₃	სინჯის	საშუალო
1	66.5	36.5	136.6	155.3	2.6	2.6
2	66.5	36.5	136.6	155.2	2.6	

4. საშუალო სიმკვრივის განსაზღვრა

№	მშრალი სინჯის წონა, m გრ	წყლით გაჟღენთილი სინჯის მასა, გრ		სიმკვრივე, ρ_k გრ/სმ ³	
		ჰაერზე აწონით, m_1	წყალში აწონით, m_2	სინჯის	საშუალო
2	141.1	141.3	88.3	2.6	

5. ცარიელობა

$$V_{\varnothing} = \left(1 - \frac{1436.6}{2.6 \cdot 1000}\right) * 100\% = 44.74$$

6. ფორიანობა

$$V_{\varnothing} = \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho}\right) 100\%$$

7. ტენიანობა

სინჯის №	სინჯის მასა, გრ		ტენიანობა, W %	
	ტენიანი ღორღის წონა, M	მშრალი ღორღის წონა, M_1	სინჯის	საშუალო
1	2766.0	2754.1	0.43	0.43
2	2763.0	2751.1	0.43	



სურათი №2.3.1



სურათი №2.3.2

2.4. ჰიდრავლიკური შემკვრელი ნივთიერების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა

საკვლევი თემისთვის გამოყენებული იქნა პორტლანდცემენტი CEM II 32.5. CEM II 32.5 პორტლანდცემენტი მზადდება ეკოლოგიურად სუფთა, აქტიური მინერალური (პუცოლანური) დანამატებით, რომლებიც გამყარების ხანგრძლივობის მატებასთან ერთად აუმჯობესებენ ცემენტისა და ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური მაჩვენებლებს. CEM II 32.5 პორტლანდცემენტი ყველაზე მეტად არის გავრცელებული და ფართოდ მოხმარების არეალი აქვს. სამშენებლო ნორმები და წესები ძირითადად ორიენტირებულია ზემოთ აღნიშნული ცემენტის გამოყენებაზე.

გამოიყენება C8/10-C25/30 კლასის ბეტონების, რკინაბეტონების, მათგან ასაწყობი და მონოლითური კონსტრუქციების დასამზადებლად, როგორებიცაა: სამშენებლო დულაბები; საგზაო-სამშენებლო კონსტრუქციები; საშუალო სიმაღლის ნაგებობები; ზღვის და მდინარეების სანაპირო დამცავი და მზლუდავი კონსტრუქციები; კაშხლები და არხები; ნარჩენების საწყობები. ჰიდრავლიკურ შემკვრელ ნივთიერებაზე ჩატარდა ფიზიკურ-მექანიკური ანალიზი. ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ჩატარდა ცემენტის გამოცდა: გოსტ 310.2-76 „ცემენტი. დაფქვის სიწმინდის განსაზღვრა“. გამოცდის მეთოდები“; გოსტ 310.3-76 „ცემენტი. ნორმალური ცომის, შეკვრის ვადების და თანაბარზომიერების განსაზღვრა“; გოსტ 310.4-81 „ცემენტი. სიმტკიცის განსაზღვრა ღუნვაზე და კუმშვაზე“.

პროდუქტის დასახელება: ცემენტის გამოცდა

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდა: გოსტ 310.2-76 „ცემენტი. დაფქვის სიწმინდის განსაზღვრა“. გამოცდის მეთოდები“; გოსტ 310.3-76 „ცემენტი. ნორმალური ცომის, შეკვრის ვადების და თანაბარზომიერების განსაზღვრა“; გოსტ 310.4-81 „ცემენტი. სიმტკიცის განსაზღვრა ღუნვაზე და კუმშვაზე“.

1. ცემენტის დაფქვის სიწმინდის განსაზღვრა (ნარჩენი საცერზე)

ნიმუში №	სინჯის მასა, გრ		ცემენტის დაფქვის სიწმინდე %	
	საწყისი, m გრ	საბოლოო №0.08 საცერში გასული, m ₁ გრ	სინჯის	საშუალო
1	50,0	47,0	6,0	6,1
2	50,0	46,9	6,2	

2. ცემენტის სიმკვრივის განსაზღვრა

ნიმუში №	სინჯის მასა, m გრ	სითხის მოცულობა, V სმ ³	სიმკვრივე, გრ/სმ ³
1	61.07	20	3.05
2	61.08	20	3.05

3. ცემენტის დულაბისაგან დამზადებული ნიმუშების გამოცდა ღუნვაზე და კუმშვაზე საწყისი მონაცემები

ნიმუში №	ნიმუშის რაოდენობა	ცემენტის ხარჯი, გრ	ქვიშის ხარჯი, გრ	წყლის ხარჯი, მლ	წყ/ც	განთხევის საშუალო დიამეტრი, მმ	ვიბრაცია, წთ	შენახვის პირობები	
								ჰიდრაგულიკურ საკეტებთან აბაზანაში, სთ	წყლიან აბაზანაში, დღე
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	500	1500	200	0.4	109	3	24	3; 28

გამოცდის შედეგები

№	დასახელება	ლუნვა 3 დღე		კუმშვა 3 დღე		ლუნვა 28 დღე		კუმშვა 28 დღე			
		ლუნვა	კუმშვა	ლუნვა	კუმშვა	ლუნვა	კუმშვა	ლუნვა	კუმშვა	ლუნვა	კუმშვა
1	ნიმუშის ზომები, სმ	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	სიმაღლე, h სმ										
	სიგანე, α სმ										
2	განივკვეთის ფართობი, S სმ ²	----	16	16	----	----	16	16	16	16	
3	მრღვევი დატვირთვა, PP კნ	4.4	25.51	23.90	6.2	6.4	53.30	54.24	55.84	55.36	
4	სიმტკიცის ზღვარი, მპა	----	16.0	14.9	----	----	33.3	33.9	34.9	34.6	
5	სიმტკიცის ზღვარი, კგ/სმ ²	51.48	163.04	151.83	72.54	74.88	339.32	345.44	355.63	352.57	
6	სიმტკიცის ზღვრის გასაშუალებული მნიშვნელობა (ლუნვაზე ორი, ხოლო კუმშვაზე ოთხი უდიდესი შედეგიდან) კგ/სმ ²	51.48	157.43		73.71		348.24				



სურათი №2.4.1



სურათი №2.4.2



სურათი №2.4.3



სურათი №2.4.4



სურათი №2.4.5



სურათი №2.4.6

2.5 ბეტონის დამზადების ტექნოლოგიის შემუშავება და ოპტიმალური ნარევის მიღება

ბეტონის (1 მ³) შედგენილობის კალკულაცია

ცხრილი №2.5.1

№	ცემენტი	ქვიშა (0-5)	ღორღი (5-10)	ღორღი (10-20)	GRACE ZYLA® 420 M	მიკროსილიკა
რაოდენობა 1 მ ³ (კგ)	415	995	238	476	2,075	12,45
მომსახურების ტარიფი	50 კგ-10 ლ	1 მ ³ -17 ლ	1 მ ³ -7 ლ	1 მ ³ -7 ლ	1 კგ-3 ლ	1 კგ-3.50 ლ
ფასი ლარში	82.00	11.00	1.35	3.20	6.22	43,57

1 მ³ საბაზო ბეტონის ღირებულებაა: 98.00 ლ;

1 მ³ დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის ღირებულებაა: 104.00 ლ;

1 მ³ დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის ღირებულებაა: 142.00 ლ;

1 მ³ დანამატებიანი (GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა) ბეტონის ღირებულებაა: 148.00 ლ.

ბეტონის დამზადების ტექნოლოგიის შემუშავებისათვის გამოყენებული იქნა ინერტული მასალების და ჰიდრავლიკური შემკვრელი ნივთიერებების ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები. შემუშავდა როგორც დანამატიანი, ასევე ჩველებრივი (საბაზო) ბეტონის ოპტიმალური შემადგენლობები. 1 მ³ ბეტონის რეცეპტებით დამზადდა როგორც საბაზო, აგრეთვე დანამატებიანი ბეტონის კუბური ფორმის ნიმუშები ზომით 15×15×15 სმ. ხოლო პრიზმული ნიმუშები 10×10×30 სმ.

საბაზო ბეტონის შედგენილობა 1 მ³ ბეტონისთვის

ცხრილი №2.5.2

ბეტონის ნარევის რეცეპტი	
ცემენტი კბ	415
წყალი, მლ	207.5
ქვიშა 0-5 მმ, კბ	995
ღორღი 5-10 მმ, კბ	238
ღორღი 10-20 მმ, კბ	476
მოცულობითი მასა, კგ/მ ³	2331.5
წყალცემენტის ფარდობა	0.50
ბეტონის ნარევის კონუსის ჯდენა, სმ	16

რეცეპტი დაანგარიშებულია მშრალ ინერტულ მასალებზე



სურათი №2.5.1



სურათი №2.5.2



სურათი №2.5.3



სურათი №2.5.4



სურათი №2.5.5



სურათი №2.5.6



სურათი №2.5.7

პროდუქტის დასახელება: საბაზო ბეტონის გამოცდა

ნიმუშის დაყალიბების თარიღი: 30.08.2017 წელი

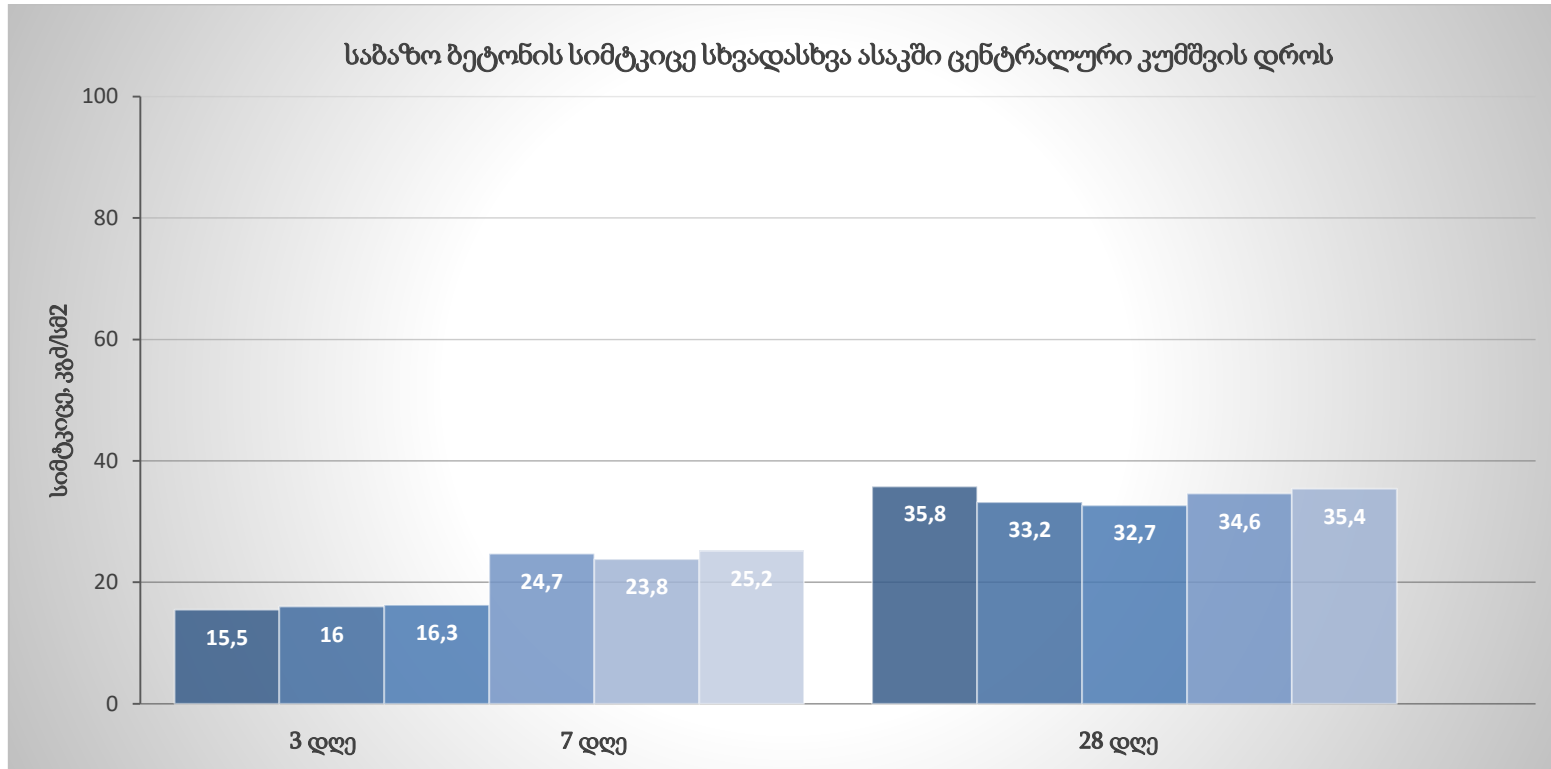
ნიმუშის დაყალიბების ადგილი: სსიპ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორია

გამოცდის ჩატარების თარიღი: 06.09.2017 წ ; 27.09.2017 წ

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდები: გოსტ 10180-2012 „ბეტონი. სიმტკიცის განსაზღვრის მეთოდები საკონტროლო ნიმუშებით“; გოსტ 26633-2015 „მძიმე და წვრილმარცვლოვანი ბეტონი“; გოსტ 12730.1-78 „ბეტონი. სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდები“; გოსტ 10181-2014 „ბეტონის ნარევი“.

გამოცდის შედეგები მოცემულია ნახაზზე №2.5.1

საბაზო ბეტონის საპროექტო კლასი B25 ($R_{28} = 32.7$ მპა)														
№	დამზადების თარიღი	ნიმუშის ნომერი	ასაკი დღე-ღამე	კონუსის ჯდენა, (სმ)	ზომები, $a \times b \times h$ სმ	ფართობი, S სმ ²	მოცულობა, V სმ ³	მასა, M გ	სიმკვრივე, ρ გრ/სმ ³	ნიმუშის სერიის საშუალო სიმკვრივე $\rho_{საშ.გრ/სმ^3}$	მრღვევი დატვირთვა, P კნ	სიმტკიცე, მპა	სიმტკიცე, კგ/სმ ²	ნიმუშის სერიის საშუალო სიმტკიცე მპა/კგ/სმ ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	30.08.2017	1	3	-	10×10×10	100	1000	2344	2,344	2,367	162,75	15,5	157,94	15,9/162,35
2	30.08.2017	2	3	-	10×10×10	100	1000	2493	2,493		168,1	16,0	163,04	
3	30.08.2017	3	3	-	10×10×10	100	1000	2266	2,266		171,15	16,3	166,09	
1	30.08.2017	1	7	-	10×10×10	100	1000	2336	2,336	2,297	259,83	24,7	251,69	24,56/250,33
2	30.08.2017	2	7	-	10×10×10	100	1000	2290	2,290		234,15	23,8	242,52	
3	30.08.2017	3	7	-	10×10×10	100	1000	2267	2,267		264,61	25,2	256,78	
1	30.08.2017	1	28	-	10×10×10	100	1000	2331	2,331	2,381	377,33	35,8	364,80	34,34/349,92
2	30.08.2017	2	28	-	10×10×10	100	1000	2338	2,338		349,79	33,2	338,30	
3	30.08.2017	3	28	-	10×10×10	100	1000	2372	2,372		343,35	32,7	333,21	
4	30.08.2017	4	28	-	10×10×10	100	1000	2493	2,493		363,33	34,6	352,57	
5	30.08.2017	5	28	-	10×10×10	100	1000	2372	2,372		371,89	35,4	360,72	



დანამატიანი ბეტონის შედგენილობა 1 მ³ ბეტონისთვის

ცხრილი №2.5.4

ბეტონის ნარევის რეცეპტი	
ცემენტი, კგ	415
წყალი, მლ	185
ქვიშა 0-5 მმ, კგ	995
ღორღი 5-10 მმ, კგ	238
ღორღი 10-20 მმ, კგ	476
GRACE ZYLA® 420 M ცემენტის მასის, 0.5%	2.07
მოცულობითი მასა, კგ/მ ³	2331.5
წყალცემენტის ფარდობა	0.44
ბეტონის ნარევის კონუსის ჯდენა, სმ	16

რეცეპტი დაანგარიშებულია მშრალ ინერტულ მასალებზე

პროდუქტის დასახელება: დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის გამოცდა

ნიმუშის დაყალიბების თარიღი: 31.08.2017 წელი

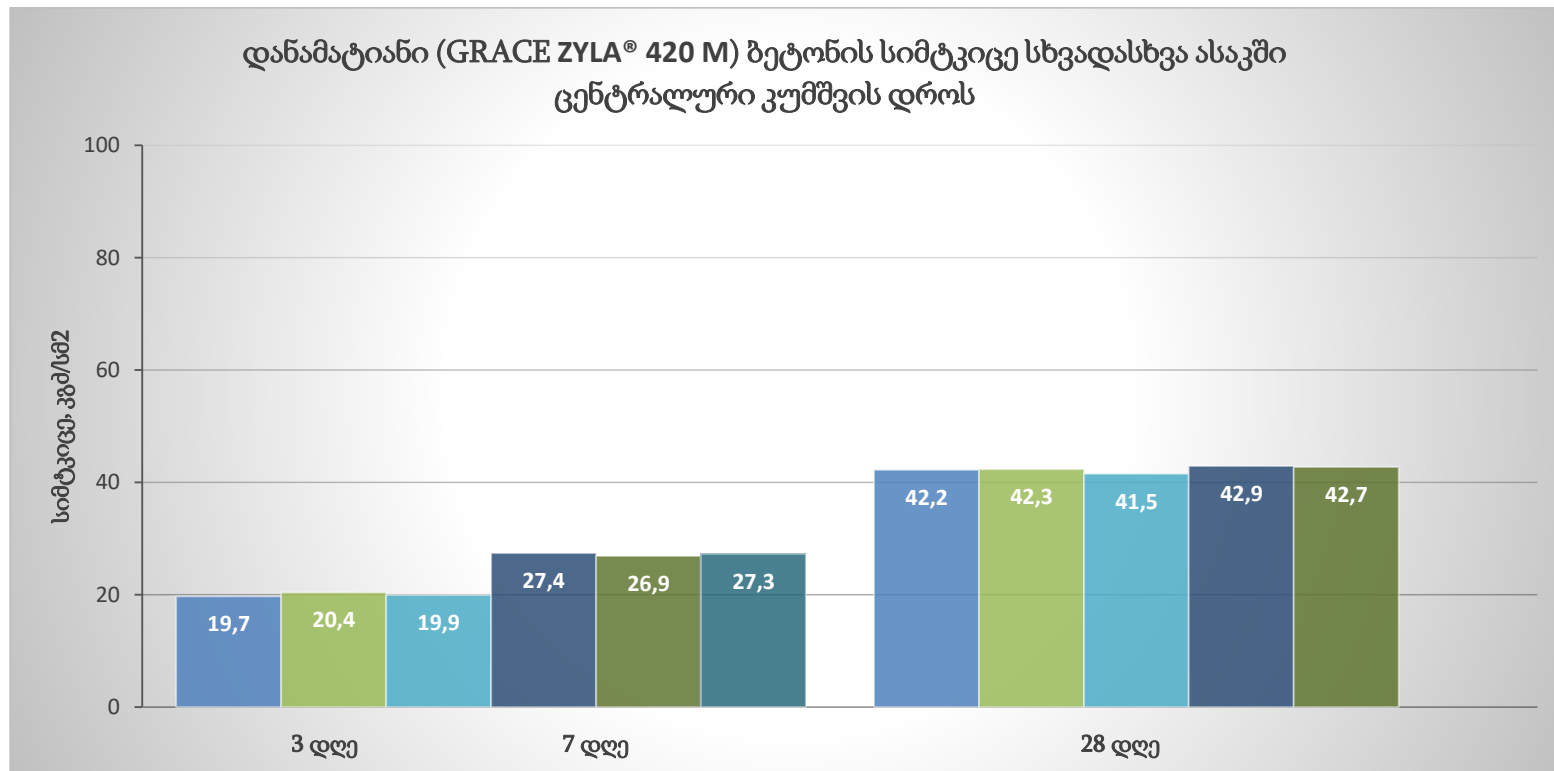
ნიმუშის დაყალიბების ადგილი: სსიპ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორია

გამოცდის ჩატარების თარიღი: 07.09.2017 წ ; 28.09.2017 წ

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდები: გოსტ 10180-2012 „ბეტონი. სიმტკიცის განსაზღვრის მეთოდები საკონტროლო ნიმუშებით“; გოსტ 26633-2015 „მძიმე და წვრილმარცვლოვანი ბეტონი“; გოსტ 12730.1-78 „ბეტონი. სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდები“; გოსტ 10181-2014 „ბეტონის ნარევი“.

გამოცდის შედეგები მოცემულია ნახაზზე №2.5.2

დანამატანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის საპროექტო კლასი B30 (R ₂₈ = 39.3 მპა)														
№	დამზადების თარიღი	ნიმუშის ნომერი	ასაკი დღე-ღამე	კონუსის ჯდება, (სმ)	ზომები, $a \times b \times h$ სმ	ფართობი, S სმ ²	მოცულობა, V სმ ³	მასა, M გ	სიმკვრივე, ρ გრ/სმ ³	ნიმუშის სერიის საშუალო სიმკვრივე $\rho_{საშ}$ გრ/სმ ³	მრღვევი დატვირთვა, P კნ	სიმტკიცე, მპა	სიმტკიცე, კგმ/სმ ²	ნიმუშის სერიის საშუალო სიმტკიცე მპა/კგმ.სმ ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	31.08.2017	1	3	-	10×10×10	100	1000	2323	2,323	2,403	206,85	19,7	200,74	20,0/203,79
2	31.08.2017	2	3	-	10×10×10	100	1000	2422	2,422		214,20	20,4	207,87	
3	31.08.2017	3	3	-	10×10×10	100	1000	2466	2,466		208,95	19,9	202,78	
1	31.08.2017	1	7	-	10×10×10	100	1000	2291	2,291	2,332	288,71	27,4	279,20	27,2/277,16
2	31.08.2017	2	7	-	10×10×10	100	1000	2346	2,346		282,45	26,9	274,11	
3	31.08.2017	3	7	-	10×10×10	100	1000	2361	2,361		286,67	27,3	278,18	
1	31.08.2017	1	28	-	10×10×10	100	1000	2285	2,285	2,360	444,00	42,2	430,01	42,32/431,23
2	31.08.2017	2	28	-	10×10×10	100	1000	2290	2,290		445,04	42,3	431,03	
3	31.08.2017	3	28	-	10×10×10	100	1000	2340	2,340		435,80	41,5	422,88	
4	31.08.2017	4	28	-	10×10×10	100	1000	2424	2,424		450,45	42,9	437,15	
5	31.08.2017	5	28	-	10×10×10	100	1000	2463	2,463		448,35	42,7	435,11	



დანამატიანი ბეტონის შედგენილობა 1 მ³ ბეტონისთვის

ცხრილი №2.5.6

ბეტონის ნარევის რეცეპტი	
ცემენტი კგ	415
წყალი, მლ	207.5
ქვიშა 0-5 მმ, კგ	995
ღორღი 5-10 მმ, კგ	238
ღორღი 10-20 მმ, კგ	476
მიკროსილიკა ცემენტის მასის 7 %	29.05
მოცულობითი მასა, კგ/მ ³	2331.5
წყალცემენტის ფარდობა	0.50
ბეტონის ნარევის კონუსის ჯდენა, სმ	9

რეცეპტი დაანგარიშებულია მშრალ ინერტულ მასალებზე

პროდუქტის დასახელება: დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის გამოცდა

ნიმუშის დაყალიბების თარიღი: 31.08.2017 წელი

ნიმუშის დაყალიბების ადგილი: სსიპ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორია

გამოცდის ჩატარების თარიღი: 07.09.2017 წ ; 28.09.2017 წ

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდები: გოსტ 10180-2012 „ბეტონი. სიმტკიცის განსაზღვრის მეთოდები საკონტროლო ნიმუშებით“; გოსტ 26633-2015 „მძიმე და წვრილმარცვლოვანი ბეტონი“; გოსტ 12730.1-78 „ბეტონი. სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდები“; გოსტ 10181-2014 „ბეტონის ნარევი“.

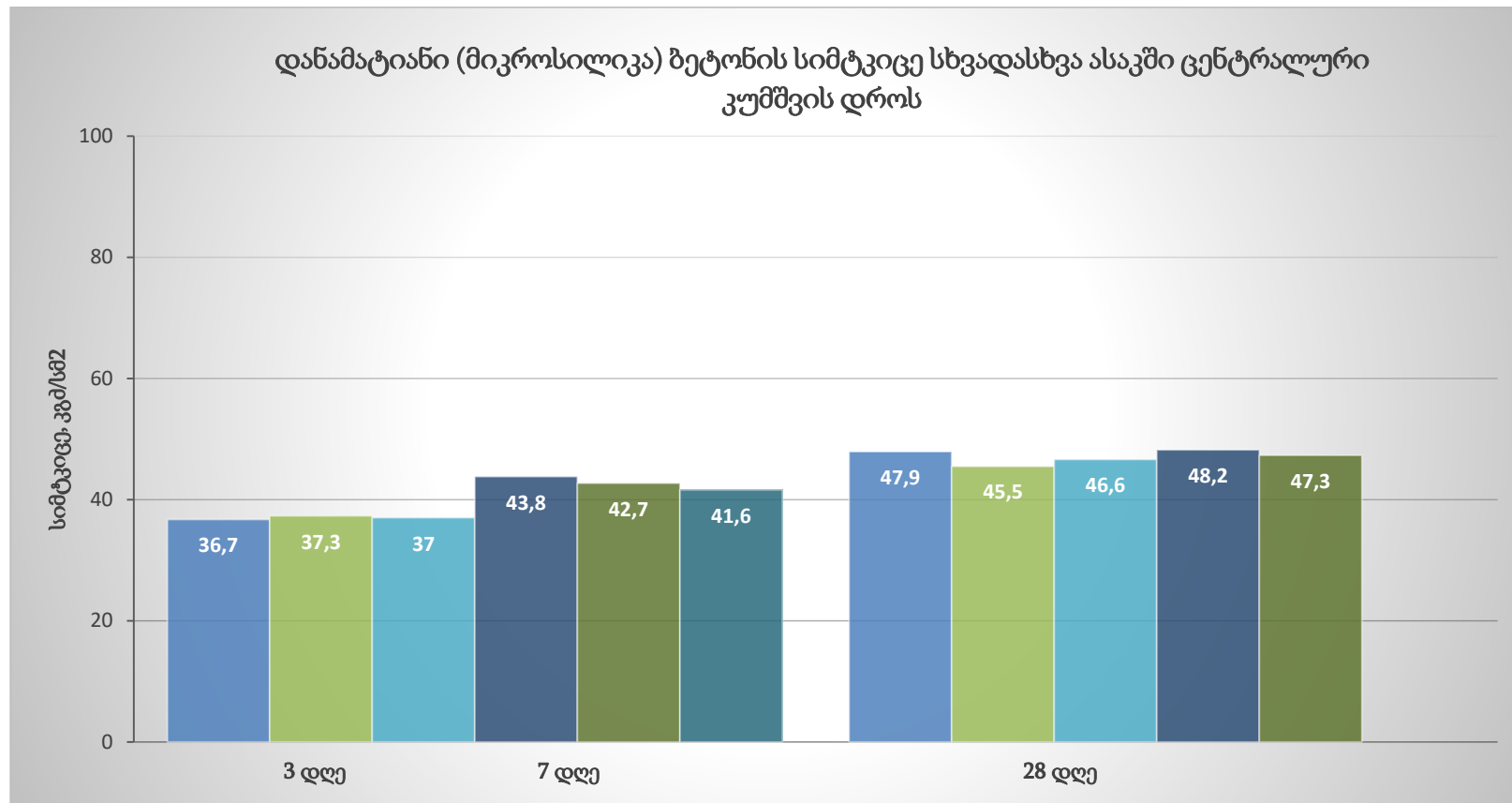
გამოცდის შედეგები მოცემულია ნახაზზე №2.5.3

ბეტონის სიმტკიცე კუმზვისას, კლასის დადგენა

ცხრილი №2.5.7

დანამატინი (მიკროსილიკა) ბეტონის საპროექტო კლასი B35 ($R_{28} = 45.8$ მპა)

№	დამზადების თარიღი	ნიმუშის ნომერი	ასაკი დღე-ღამე	კონუსის ჯგუფი, (სმ)	ზომები, $a \times b \times h$ სმ	ფართობი, S სმ ²	მოცულობა, V სმ ³	მასა, M გ	სიმკვრივე, ρ გრ/სმ ³	ნიმუშის სერის საშუალო სიმკვრივე $\rho_{საშ}$ გრ/სმ ³	მრღევი დატვირთვა, P კნ	სიმტკიცე, მპა	სიმტკიცე, კგ/სმ ²	ნიმუშის სერის საშუალო სიმტკიცე მპა/კგ/სმ ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	31.08.2017	1	3	-	10×10×10	100	1000	2411	2,411	2,369	385,35	36,7	373,97	37,0/377,02
2	31.08.2017	2	3	-	10×10×10	100	1000	2399	2,399		391,65	37,3	380,08	
3	31.08.2017	3	3	-	10×10×10	100	1000	2298	2,298		388,56	37,0	377,03	
1	31.08.2017	1	7	-	10×10×10	100	1000	2422	2,422	2,430	460,71	43,8	446,32	42,7/435,11
2	31.08.2017	2	7	-	10×10×10	100	1000	2436	2,436		448,35	42,7	435,11	
3	31.08.2017	3	7	-	10×10×10	100	1000	2433	2,433		436,80	41,6	423,90	
1	31.08.2017	1	28	-	10×10×10	100	1000	2366	2,366	2,410	504,38	47,9	488,10	47,1/479,94
2	31.08.2017	2	28	-	10×10×10	100	1000	2360	2,360		420,27	45,5	463,64	
3	31.08.2017	3	28	-	10×10×10	100	1000	2398	2,398		489,31	46,6	474,85	
4	31.08.2017	4	28	-	10×10×10	100	1000	2480	2,480		506,11	48,2	491,15	
5	31.08.2017	5	28	-	10×10×10	100	1000	2450	2,450		496,65	47,3	481,98	



შერეული (კომბინირებული) დანამატიანი ბეტონის შედგენილობა 1 მ³ ბეტონისთვის

ცხრილი №2.5.8

ბეტონის ნარევის რეცეპტი	
ცემენტი, კგ	415
წყალი, მლ	192
ქვიშა 0-5 მმ, კგ	995
ღორღი 5-10 მმ, კგ	238
ღორღი 10-20 მმ, კგ	476
GRACE ZYLA® 420 M ცემენტის მასის 0.5 %	2.07
მიკროსილიკა ცემენტის მასის 3 %	12.45
მოცულობითი მასა, კგ/მ ³	2331.5
წყალცემენტის ფარდობა	0.50
ბეტონის ნარევის კონუსის ჯდენა, სმ	16

რეცეპტი დაანგარიშებულია მშრალ ინერტულ მასალებზე

პროდუქტის დასახელება: დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა) ბეტონის გამოცდა

ნიმუშის დაყალიბების თარიღი: 31.08.2017 წელი

ნიმუშის დაყალიბების ადგილი: სსიპ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორია

გამოცდის ჩატარების თარიღი: 07.09.2017 წ ; 28.09.2017 წ

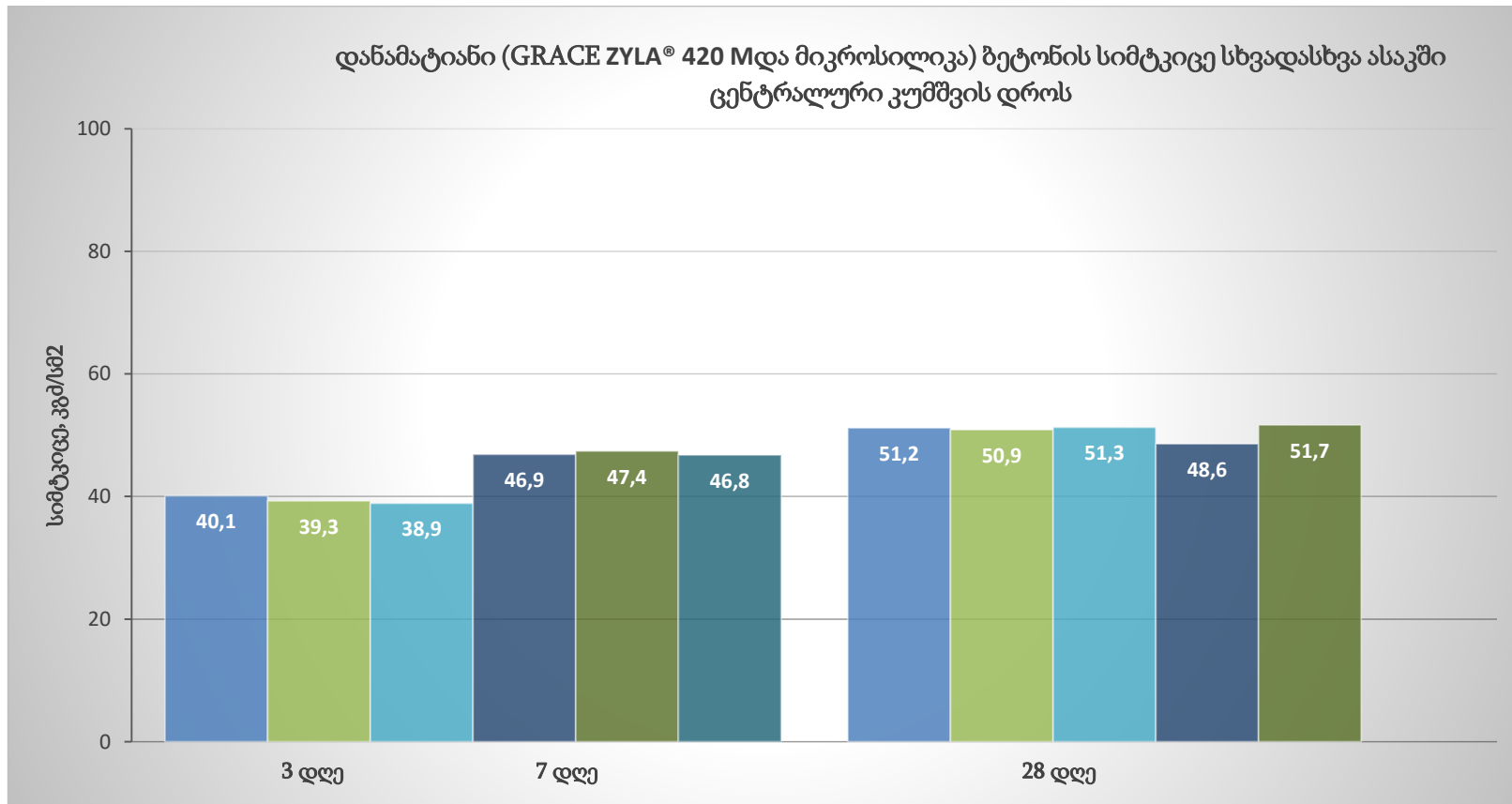
ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდები: გოსტ 10180-2012 „ბეტონი. სიმტკიცის განსაზღვრის მეთოდები საკონტროლო ნიმუშებით“; გოსტ 26633-2015 „მძიმე და წვრილმარცვლოვანი ბეტონი“; გოსტ 12730.1-78 „ბეტონი. სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდები“; გოსტ 10181-2014 „ბეტონის ნარევი“.

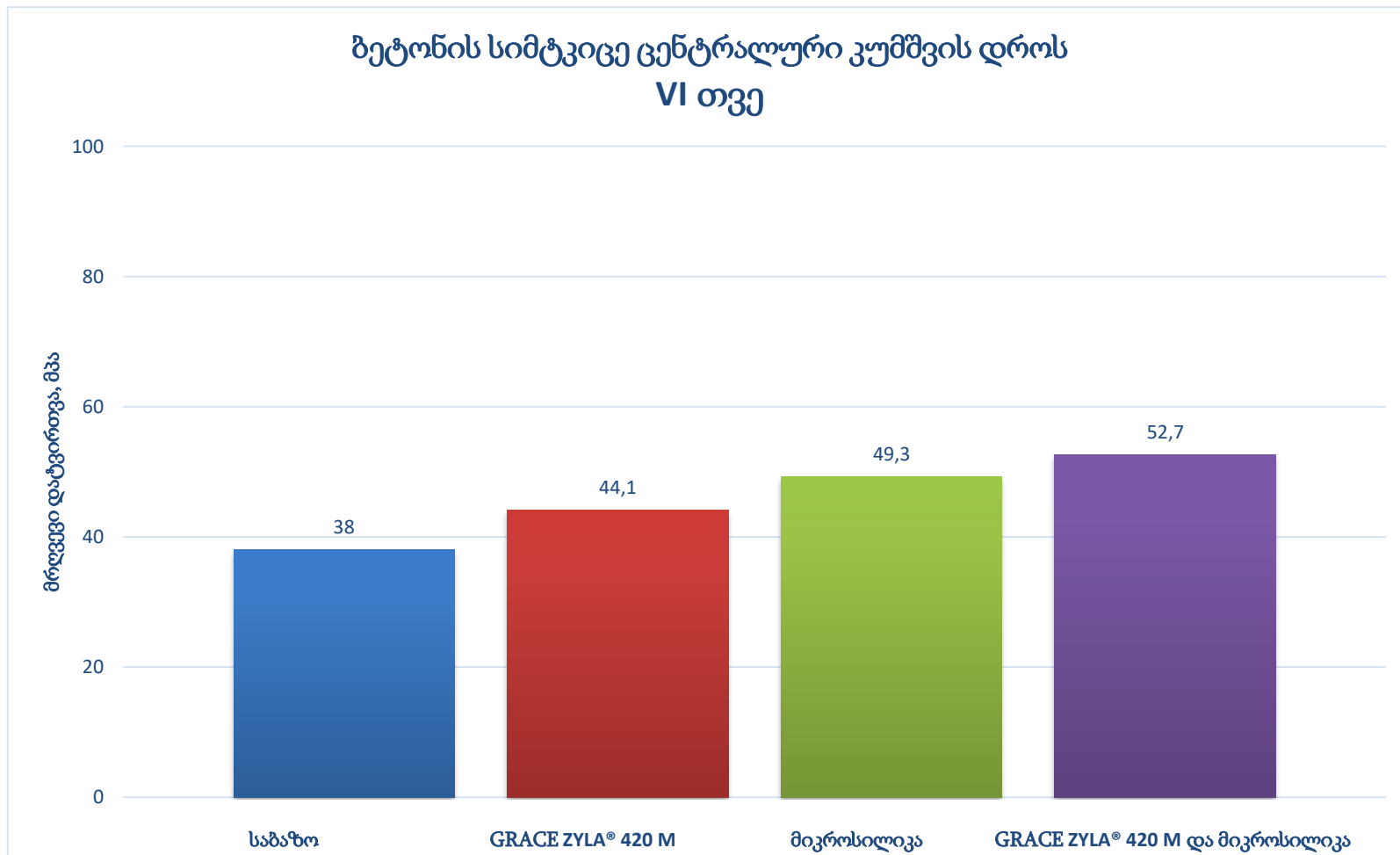
გამოცდის შედეგები მოცემულია ნახაზზე №2.5.4

ბეტონის სიმტკიცე კუმზვისას, კლასის დადგენა

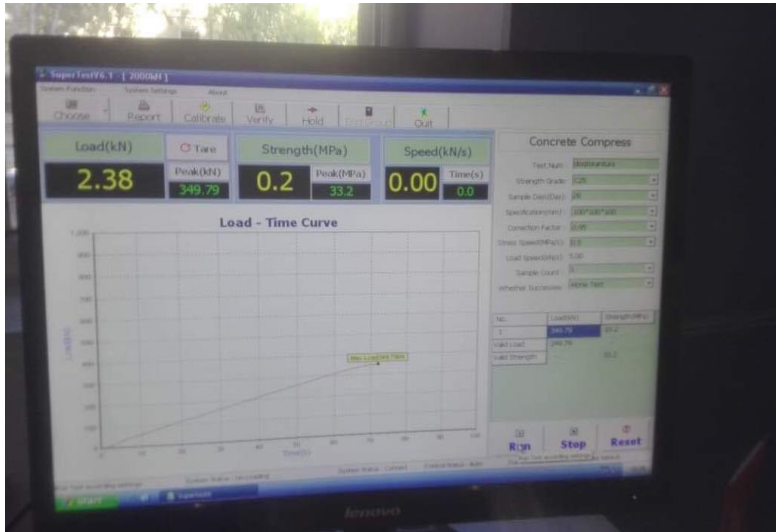
ცხრილი №2.5.9

დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა) ბეტონის საპროექტო კლასი B35 (R ₂₈ = 45.8 მპა)														
№	დამზადების თარიღი	ნიმუშის ნომერი	ასაკი დღე-ღამე	კონუსის ჯდენა, (სმ)	ზომები, $a \times b \times h$ სმ	ფართობი, S სმ ²	მოცულობა, V სმ ³	მასა, M გ	სიმკვრივე, ρ გრ/სმ ³	ნიმუშის სერის საშუალო სიმკვრივე ρ _{საშ} გრ/სმ ³	მრღვევი დატვირთვა, P _კ ნ	სიმტკიცე, მპა	სიმტკიცე, კგ/სმ ²	ნიმუშის სერის საშუალო სიმტკიცე მპა/კგ/სმ ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	30.08.2017	1	3	-	10×10×10	100	1000	2377	2,377	2,397	421,05	40,1	408,61	39,4/401,82
2	30.08.2017	2	3	-	10×10×10	100	1000	2424	2,424		412,65	39,3	400,46	
3	30.08.2017	3	3	-	10×10×10	100	1000	2392	2,392		408,45	38,9	396,39	
1	30.08.2017	1	7	-	10×10×10	100	1000	2423	2,423	2,423	492,45	46,9	477,91	47,03/479,26
2	30.08.2017	2	7	-	10×10×10	100	1000	2380	2,380		497,75	47,4	483,00	
3	30.08.2017	3	7	-	10×10×10	100	1000	2466	2,466		491,43	46,8	476,89	
1	30.08.2017	1	28	-	10×10×10	100	1000	2457	2,457	2,425	537,63	51,2	521,72	50,74/517,03
2	30.08.2017	2	28	-	10×10×10	100	1000	2431	2,431		534,45	50,9	518,67	
3	30.08.2017	3	28	-	10×10×10	100	1000	2466	2,466		538,67	51,3	522,74	
4	30.08.2017	4	28	-	10×10×10	100	1000	2390	2,390		510,33	48,6	495,23	
5	30.08.2017	5	28	-	10×10×10	100	1000	2385	2,385		542,85	51,7	526,82	

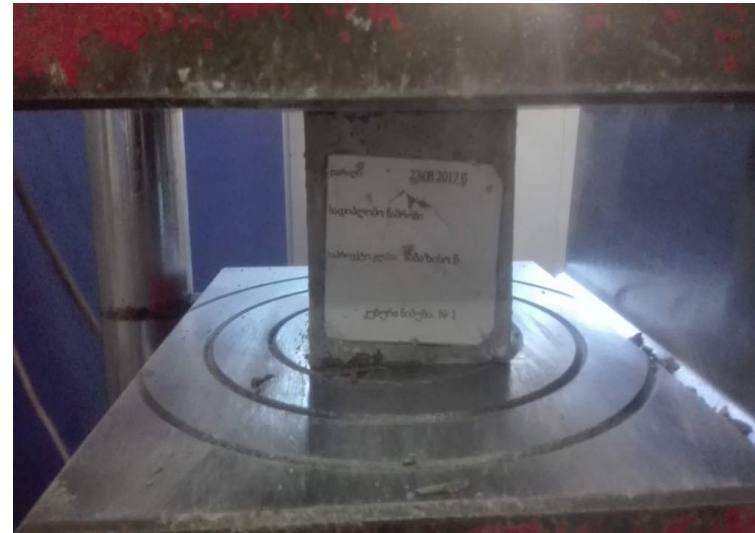




*შენიშვნა: წარმოდგენილია ბეტონის 3-3 ნიმუშის სიმტკიცის საშუალო არითმეტიკული მაჩვენებელი.



სურათი №2.5.8



სურათი №2.5.9



სურათი №2.5.10



სურათი №2.5.11

2.6 ექსპერიმენტული კვლევები მასით და მოცულობით წყალშთანთქმაზე დანამატიანი და საბაზო ბეტონებისთვის

საგამოცდო ლაბორატორიაში დამზადდა როგორც საბაზო, ასევე დანამატიანი ბეტონის ნიმუშები. დაყალიბებიდან მეორე დღეს მოხდა მათი განყალიბება და მოთავსება რეჟიმის კამერაში (STHSX-1), სადაც ტენიანობა შეადგენდა 95%-ს, ხოლო ტემპერატურა $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$. 28-ე დღეს დადგინდა 3-3 ნიმუშის (საბაზო და დანამატიანი) გეომეტრიული ზომა და წონა, ხოლო დანარჩენი 3-3 ნიმუში (საბაზო და დანამატიანი) 24 საათის განმავლობაში მოთავსებული იყო წყლის აუზში, სადაც წყლის ტემპერატურა შეადგენდა $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ -ს. შემდგომ მოხდა მათი ამოღება წყლიდან და გამშრალება სველი გაწურული ტილოთი. დადგინდა წყალგაჯერებული ნიმუშების გეომეტრიული ზომა და მასა. ამის შემდეგ განისაზღვრა ნიმუშების საშუალო მასითი და მოცულობითი წყალშთანთქმა პროცენტებში (ცხრილი №2.6.1):

პროდუქტის დასახელება: ბეტონის ნიმუშების გამოცდა წყალშთანთქმაზე

ნიმუშის დაყალიბების თარიღი: 04.10.2018 წ

ნიმუშის დაყალიბების ადგილი: სსიპ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორია.

გამოცდის ჩატარების თარიღი: 05.11.2018 წ

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება

გამოცდები: გოსტ 12730.1-78 „ბეტონი. სიმკვრივის განსაზღვრის მეთოდები“;

გოსტ 10181-2014 „ბეტონის ნარევი“; გოსტ 12730.3-78 „ბეტონი.

წყალშთანთქმის განსაზღვრა“.

შედეგები მოყვანილია ცხრილში №2.6.1.

საბაზო და დანამატებიანი ბეტონის მასითი და მოცულობითი წყალშთანთქმა

ცხრილი №2.6.1

№	ნიმუში	ნიმუშის ზომები $a \times b \times h$ სმ	ფართობი, S სმ ²	მოცულობა, V სმ ³	მშრალი ბეტონის სიმკვრივე	ნიმუშის წონა მშრალ მდგომარეობაში, გრ	ნიმუშის წონა წყლით გაჯერებულ მდგომარეობაში, გრ	მასითი წყალშთანთქმა %	საშუალო მასითი წყალშთანთქმა	მოცულობითი წყალშთანთქმა %	საშუალო მოცულობითი წყალშთანთქმა %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	საბაზო	10×10×30	100	3000	2,380	7141	7296	2,17	2,15	5,16	5,14
2		10×10×30	100	3000	2,399	7199	7357	2,19		5,25	
3		10×10×30	100	3000	2,403	7211	7362	2,09		5,02	
1	GRACE ZYLA® 420 M	10×10×30	100	3000	2,331	6994	7120	1,80	1,80	4,19	4,15
2		10×10×30	100	3000	2,299	6899	7026	1,84		4,23	
3		10×10×30	100	3000	2,265	6796	6917	1,78		4,03	
1	მიკრო სილიკა	10×10×30	100	3000	2,302	6906	7025	1,72	1,69	3,95	3,92
2		10×10×30	100	3000	2,324	6974	7091	1,67		3,88	
3		10×10×30	100	3000	2,328	6986	7105	1,70		3,95	
1	GRACE და მიკროსილიკა	10×10×30	100	3000	2,280	6840	6904	0,93	0,91	2,12	2,09
2		10×10×30	100	3000	2,265	6795	6859	0,94		2,12	
3		10×10×30	100	3000	2,331	6995	7057	0,88		2,05	

2.7 წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა

პროდუქტის დასახელება: საბაზო ბეტონის გამოცდა

ნიმუშის დაყალიბების თარიღი: 30.08.2018 წელი

ნიმუშის დაყალიბების ადგილი: სსიპ საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორია

გამოცდის ჩატარების თარიღი: 02.10.2018 წ

ნორმატიული დოკუმენტის დასახელება, რის მიხედვითაც ტარდება გამოცდები: გოსტ 12730.5-84 „ბეტონი.

წყალშეუღწევადობის განსაზღვრის მეთოდები“.საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და საექსპერტო ლაბორატორიაში განხორციელდა საბაზო და დანამატებიანი ბეტონის ნიმუშების გამოცდა წყალშეუღწევადობაზე. ნიმუშები აღებული იქნა წაკვეთილი კონუსის ფორმის ყალიბებში (ყალიბის ზედა შიდა დიამეტრი ტოლია 174.00 მმ-ის, ქვედა შიდა დიამეტრი 185.00 მმ-ის, სიმაღლე 170.00 მმ) წყალშეუღწევადობის პარამეტრების დასადგენად, სურათი №2.7.1.

დაყალიბებიდან 28-ე დღეს წაკვეთილი ფორმის ნიმუშები პარაფინით დამუშავების შემდეგ მოთავსებული იქნა სპეციალურ სტენდზე (STZHSJ-4) წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტის დასადგენად.

ერთდროულად სტენდზე მოთავსებული იქნა 4-4 ნიმუში. ნიმუშების ქვედა ზედაპირზე სპეციალური აპარატის საშუალებით განხორციელდა წყლის მიწოდება, საწყისი დაწნევით 0.1 მპა. დაწნევის მომატება ხდებოდა ავტომატურად 0.1 მპა ყოველ 8 საათის შემდეგ. წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტი განისაზღვრება ფორმულით: $W=10H-1$, სადაც H

შეესაბამება დაწნევას (ატმ), რომელზეც ფიქსირდება წყლის ამოჟონვა, ნიმუშის ზედა ზედაპირიდან, შედეგები იხ. ცხრილი №2.7.1÷№2.7.5.

ჩვენს შემთხვევაში საბაზო ბეტონის ნიმუშების ზედაპირზე წყლის ამოჟონვა დაფიქსირდა 0.6 მპა (6 ატმ) დაწნევისას. აქედან გამომდინარე მათი წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტი $W=6$. დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის ნიმუშების ზედაპირზე წყლის ამოჟონვა დაფიქსირდა 0.7 მპა (7 ატმ) დაწნევისას. აქედან გამომდინარე მათი წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტი $W=7$. დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის ნიმუშების ზედაპირზე წყლის ამოჟონვა დაფიქსირდა 0.9 მპა (9 ატმ) დაწნევისას. აქედან გამომდინარე მათი წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტი $W=9$. დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა) ბეტონის ნიმუშების ზედაპირზე წყლის ამოჟონვა დაფიქსირდა 1.2 მპა (12 ატმ) დაწნევისას. აქედან გამომდინარე მათი წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტი $W=12$.



სურათი №2.7.1



სურათი №2.7.2



სურათი №2.7.3



სურათი №2.7.4



სურათი №2.7.5

საბაზო ბეტონის ნიმუშების წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა

ცხრილი №2.7.1

ბეტონის საპროექტო მარკა W6

№	ნიმუშის სიმაღლე, hxd მმ	წყლის მაქსიმალური დაწნევა, მპა	დაწნევის ხანგრძლივობა წთ, სთ	წყალშეუღწევადობა, მმ
1	2	3	4	5
1	სიმაღლე 170.00 ზედა შიდა დიამეტრი 174.00 ქვედა შიდა დიამეტრი 185.00	0,700	8	1
2		0,700	8	2
3		0,700	8	0
4		0,700	8	0

დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის ნიმუშების წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა

ცხრილი №2.7.2

ბეტონის საპროექტო მარკა W7

№	ნიმუშის სიმაღლე, hxd მმ	წყლის მაქსიმალური დაწნევა, მპა	დაწნევის ხანგრძლივობა წთ, სთ	წყალშეუღწევადობა, მმ
1	2	3	4	5
1	სიმაღლე 170.00 ზედა შიდა დიამეტრი 174.00 ქვედა შიდა დიამეტრი 185.00	0,800	8	0
2		0,800	8	0
3		0,800	8	1
4		0,800	8	2

დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის ნიმუშების წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა

ცხრილი №2.7.3

ბეტონის საპროექტო მარკა W9				
№	ნიმუშის სიმაღლე, h×d მმ	წყლის მაქსიმალური დაწნევა, მპა	დაწნევის ხანგრძლივობა წთ, სთ	წყალშეუღწევადობა, მმ
1	2	3	4	5
1	სიმაღლე 170.00 ზედა შიდა დიამეტრი 174.00 ქვედა შიდა დიამეტრი 185.00	1,000	8	0
2		1,000	8	1
3		1,000	8	0
4		1,000	8	1

დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა) ბეტონის ნიმუშების წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა

ცხრილი №2.7.4

ბეტონის საპროექტო მარკა W12				
№	ნიმუშის სიმაღლე, h×d მმ	წყლის მაქსიმალური დაწნევა, მპა	დაწნევის ხანგრძლივობა წთ, სთ	წყალშეუღწევადობა, მმ
1	2	3	4	5
1	სიმაღლე 170.00 ზედა შიდა დიამეტრი 174.00 ქვედა შიდა დიამეტრი 185.00	1,300	8	2
2		1,300	8	1
3		1,300	8	0
4		1,300	8	0

**თავი 3. დანამატიანი და საბაზო ბეტონის სტრუქტურული
ცვლილებების საზღვრების დადგენა თავისუფალ და შეზღუდულ
მდგომარეობაში კუმშვაზე**

**3.1 დანამატიანი და საბაზო ბეტონის განივი გაფართოების კოეფიციენტის
მნიშვნელობის კვლევა-დადგენა**

ბეტონის მიკრობზარების წარმოქმნის მომენტის შესწავლის მიზნით დამზადდა და გამოიცადა ოთხი თვის ასაკში ცენტრალურ კუმშვაზე დანამატიანი და საბაზო ბეტონის პრიზმები ზომით 10×10×30 სმ მშრალ, ბუნებრივ და წყალგაჟღენთილ, გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდულ და შეუზღუდავ მდგომარეობაში. გამოცდა მიმდინარეობდა წნეხზე WA-1000. გრძივი დეფორმაციები იზომებოდა კომპარატორით 0.001 მმ სიზუსტით ბაზით 15 სმ, ხოლო განივი დეფორმაციები ტენზომეტრებით ბაზით 8 სმ. ხახუნს ვხსნიდით ნიმუშის ფერდებსა და წნეხის პლიტებს შორის დატანილი პარაფინის თხელი ფენით (სურათი №3.1.1-№3.1.2).

თავდაპირველად ბეტონის პრიზმებს მოვდეთ მყისიერი ძალა, ხოლო შემდეგ ნიმუშებს დატვირთვა ეძლეოდათ სხვადასხვა სიჩქარით. მიღებული შედეგების საფუძველზე ავაგეთ დატვირთვა-დეფორმაციების σ , ε გრაფიკები.

დამზადდა და გამოიცადა 3-3 ნიმუში საკონტროლო და დანამატიანი მშრალი, ბუნებრივი და წყალგაჟღენთილი ბეტონი ხახუნით შეზღუდულ ი და ასევე შესაბამისად თავისუფალ პირობებში. შედეგები ნაჩვენებია ნახაზებზე №3.1, №3.1.2, №3.1.3, №3.1.4, №3.1.5, №3.1.6, №3.1.7. აღსანიშნავია, რომ ნახაზებზე 1, 2, 3 - V_1 , V_2 , V_3 , სიჩქარეების შესაბამისი განივი დეფორმაციების მრუდებია, 1', 2', 3' გრძივი დეფორმაციების, ხოლო 1^{II}, 2^{II}, 3^{II} კი μ პუასონის კოეფიციენტი.

ნიმუშების ხანმოკლე დატვირთვისას გვაქვს სამი მონაკვეთი: პირველი ხასიათდება გამოყოფილი ენერგიის შენელებული ზრდით, აღნიშნული აიხსნება ყველაზე სუსტი ადგილების ლიკვიდაციით და საწყისი მიკრობზარების დამუხტვით. ამ მონაკვეთზე გამოიყოფა რღვევის ჯამური ენერგიის 5-8%, ხოლო

პუასონის კოეფიციენტის გრაფიკზე მას შეესაბამება საწყისი მონაკვეთი. მეორე - ხასიათდება მიკრობზარების წარმოქმნის სტაბილიზაციით და გამოყოფილი ენერგიის მუდმივობით (μ მუდმივია). მესამე მონაკვეთი ხასიათდება შთანთქმული ენერგიის დაქვეითებით, რაც აიხსნება მიკრობზარწარმოქმნის პროცესის ნაწილობრივი ჩაქრობით. ახალი მიკრობზარები არ წარმოიქმნება, შემდგომ ხდება მათი გაერთიანება და მაგისტრალურ ბზარებში გადაზრდის პროცესები - რღვევა, 60-70% რღვევის ჯამური ენერგიის გამოყოფა.

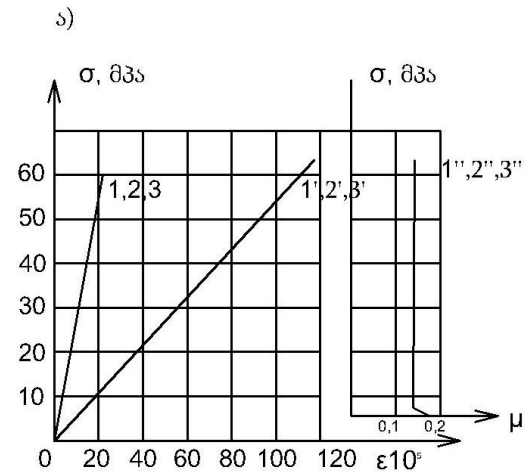
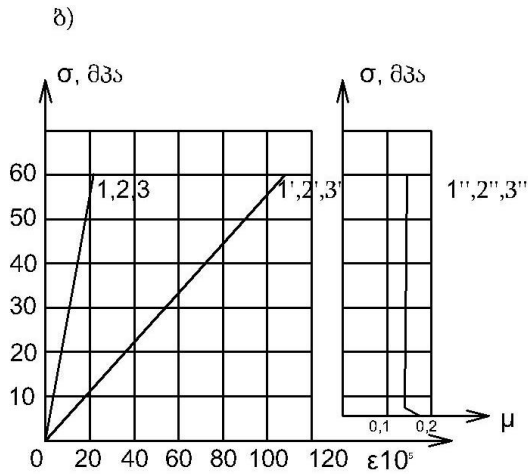
როგორც ექსპერიმენტის შედეგებიდან ჩანს (ნახ. №3.1.1) საკონტროლო მშრალი ბეტონის განივი და გრძივი დეფორმაციების σ, ε დამოკიდებულება პირდაპირპროპორციულია, მიუხედავად სხვადასხვა სიჩქარით მოდებული დატვირთვისა და პუასონის კოეფიციენტი მუდმივი სიდიდეა $\mu = 0,15$ რღვევამდე. ასეთივე სურათი გვაქვს მშრალი დანამტიანი ბეტონის შემთხვევაშიც, ოღონდ სიმტკიცე და მათი დრეკადობის მოდული 20 %-ით მეტია საკონტროლოზე (ნახ. №3.1.4).



სურათი №3.1

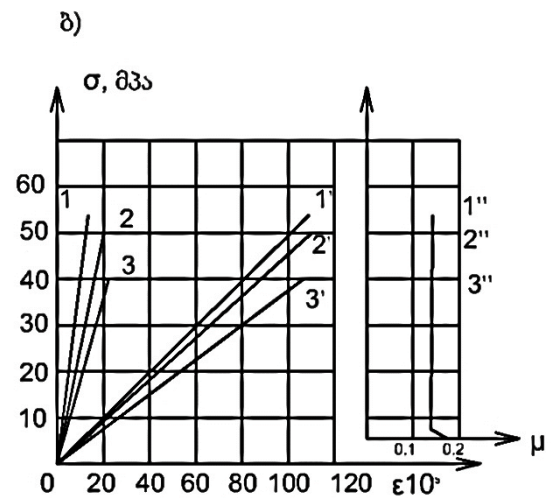
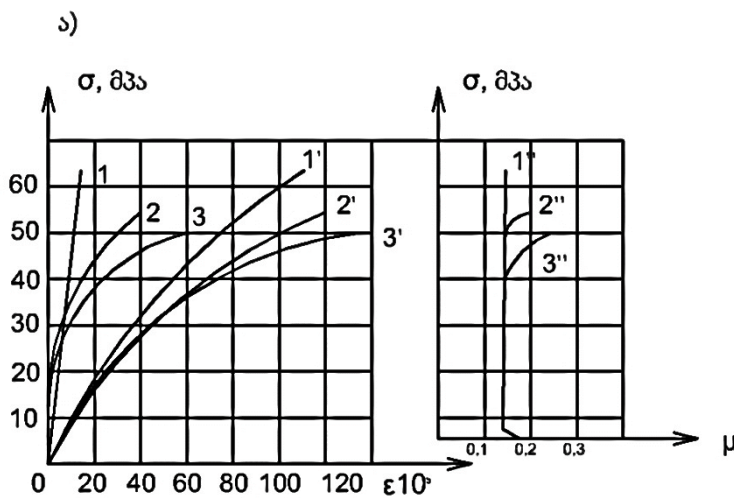


სურათი №3.2



ნახ. №3.1.1 ბეტონის გამომშრალი პრიზმების σ ძაბვის, $\varepsilon_{გრძ}$, $\varepsilon_{გან}$ დეფორმაციების და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს.

ბუნებრივ მდგომარეობაში მყოფ ბეტონზე (ნახ. №3.1.1) ა) მყისიერი დატვირთვისას σ ε დამოკიდებულება პირდაპირპროპორციულია და $\mu=constant$, მუდმივია რღვევამდე, როგორც შეზღუდულ, ასევე თავისუფალ მდგომარეობაში.



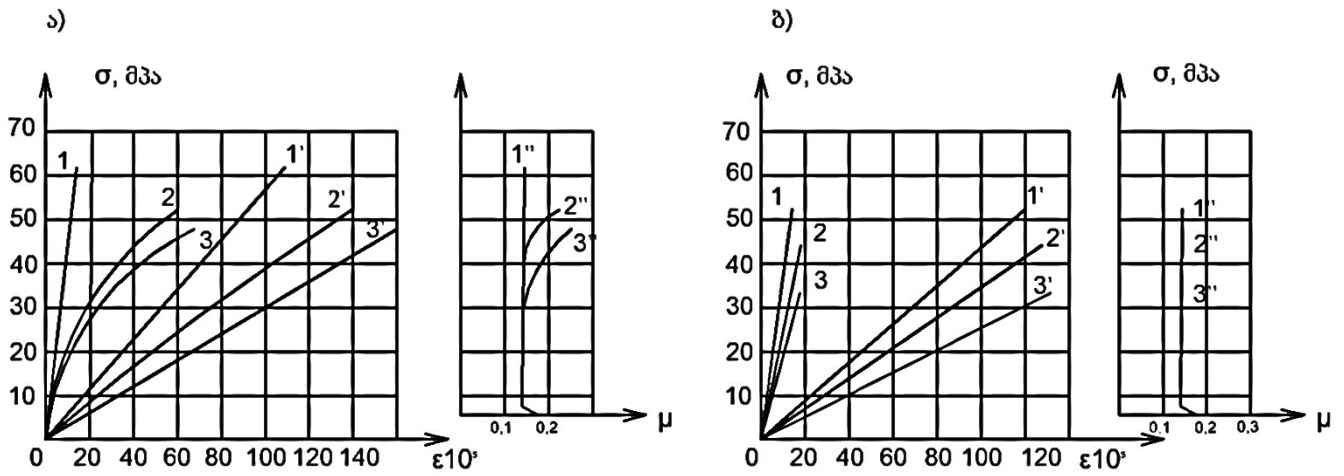
ნახ. №3.1.2 ბეტონის ბუნებრივად მშრალი პრიზმების σ ძაბვის, $\varepsilon_{გრძ}$, $\varepsilon_{გან}$ დეფორმაციების და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს.

შემდეგი ცდა ჩატარდა ნიმუშებზე ხახუნით და ხახუნის პარაფინით აცილების შემთხვევაში, სადაც დატვირთვის სიჩქარე შეადგენდა $V_1=15$ მპა/წმ და $V_2=0,005$ მპა/წმ.

ბუნებრივ მდგომარეობაში შეზღუდული ბეტონების ნიმუშებში დატვირთვის

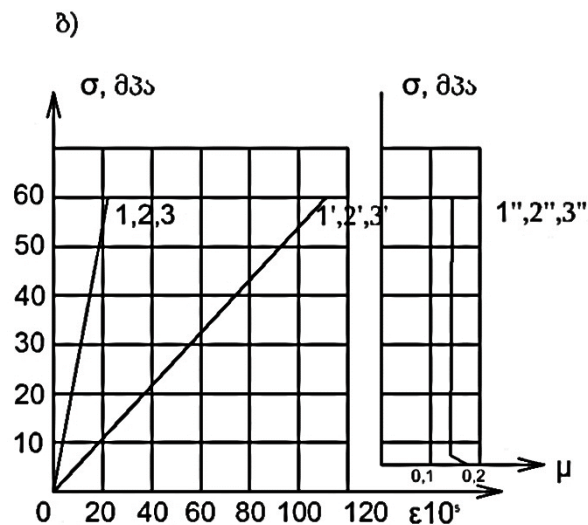
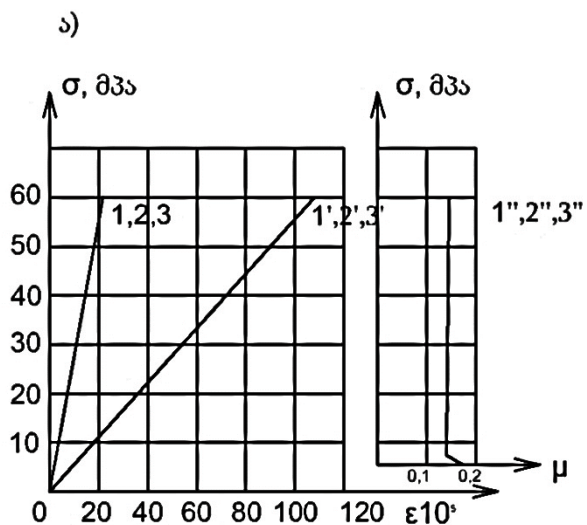
სიჩქარის ცვლილება იწვევს სიმტკიცის შემცირებას და შესაბამისად დიაგრამის გამრუდებას, ხოლო პუასონის კოეფიციენტის მუდმივობის დარღვევის მომენტიდან მისი სიდიდის ზრდას. გარკვეულ მომენტიდან μ -ს ზრდა მიუთითებს ბეტონში მიკრობზარების გაჩენას ანუ სტრუქტურულ ცვლილებებს.

წყალგაჟღენთილ მდგომარეობაში შეზღუდული ბეტონის სიმტკიცისა და დეფორმაციულობის ხასიათი და პუასონის კოეფიციენტის სიდიდე დაახლოებით ისეთივეა, როგორც ბუნებრივად მშრალ მდგომარეობაში მყოფი ბეტონის ნიმუშების გამოცდისას. მათი მაჩვენებლები დაახლოებით ერთმანეთის ტოლია.

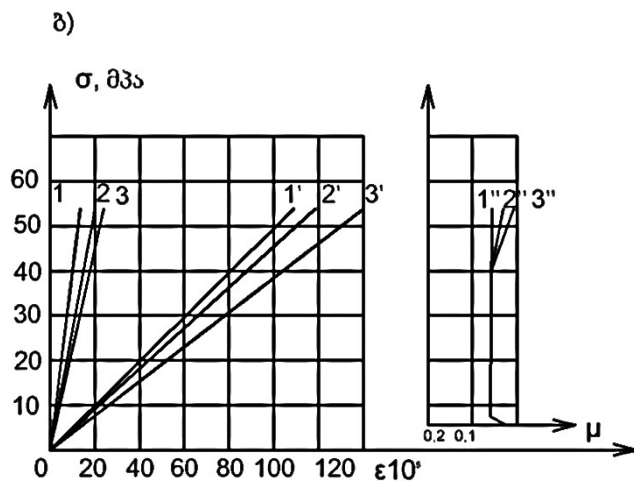
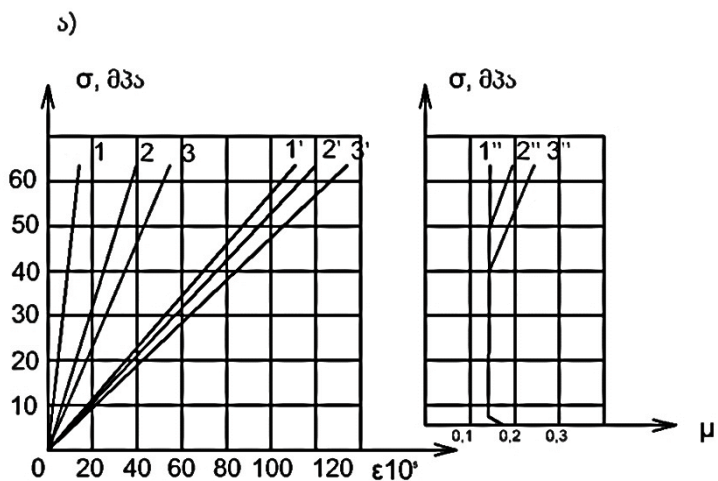


ნახ. №3.1.3 ბეტონის წყლითგაჟღენთილი პრიზმების σ ძაბვის, $\epsilon_{გრძ}$, $\epsilon_{გან}$ დეფორმაციებისა და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულებების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს.

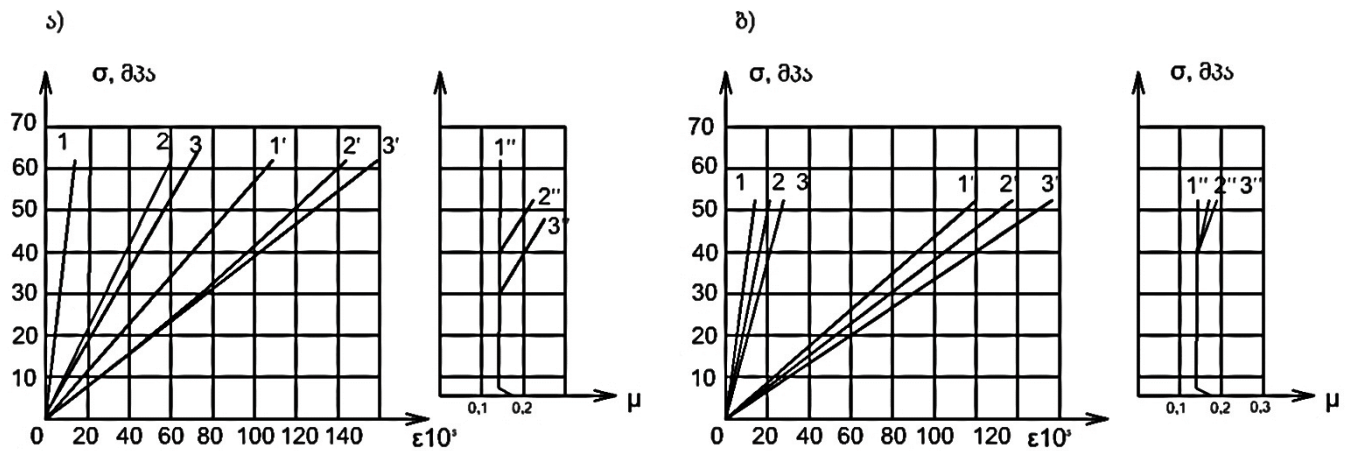
თავისუფალი, ხახუნის გარეშე ბეტონის სიმტკიცე, დეფორმაციულობა, პუასონის კოეფიციენტი მოცემულია ნახ. №3.1.3-ზე. მიღებული შედეგებიდან აღსანიშნავია ის, რომ პუასონის კოეფიციენტი მშრალ, ბუნებრივად მშრალ და წყალგაჟღენთილ მდგომარეობაში მუდმივი სიდიდეა და ტოლია $\mu = 0,16$, მრღვევი ძაბვა კი ტოლია შეზღუდული ბეტონის პუასონის კოეფიციენტის მუდმივობის დარღვევის შესაბამისი ძაბვის.



ნახ. №3.1.4 დანამატიანი ბეტონისაგან დამზადებული გამომშრალი პრიზმების σ ძაბვის, $\epsilon_{გრბ}$, $\epsilon_{გან}$ დეფორმაციებისა და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს.



ნახ. №3.1.5 დანამატიანი ბეტონისაგან დამზადებული ბუნებრივად მშრალი პრიზმების σ ძაბვის, $\epsilon_{გრბ}$, $\epsilon_{გან}$ დეფორმაციებისა და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულების. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს.



ნახ. №3.1.6 დანამატიანი ბეტონისაგან დამზადებული წყლითგაჟღენთილი პრიზმების $\epsilon_{გრძ}$ და $\epsilon_{გან}$ მახვი-დეფორმაციებისა და პუასონის μ კოეფიციენტის დამოკიდებულებს. მრუდები დატვირთვის სხვადასხვა სიჩქარის დროს ($V_1=15$ მპა/წმ, $V_2=0,2$ მპა/წმ, $V_3=0,005$ მპა/წმ). ა) ხახუნით; ბ) პარაფინით ხახუნის აცილების დროს.

ბუნებრივ მდგომარეობაში დანამატიანი ბეტონის მყისიერი დატვირთვისას σ , ϵ დამოკიდებულება პირდაპირპროპორციულია და $\mu = \text{constant}$, როგორც შეზღუდულ, ასევე თავისუფალ მდგომარეობაში. საკონტროლო ნიმუშებთან შედარებით კი მისი სიმტკიცე და ზღვრული დეფორმაცია დაახლოებით 20 %-ით მეტია.

შემდეგი ცდა ჩატარდა ხახუნით და ხახუნის გარეშე ნიმუშებზე, სადაც შეზღუდვის აცილება ხორციელდებოდა პრიზმის ზედა და ქვედა ფერდების პარაფინის თხელი ფენით დაფარვით, ხოლო დატვირთვის სიჩქარე შეადგენდა $V_1=15$ მპა/წმ და $V_2=0,005$ მპა/წმ.

დანამატიანი შეზღუდული ბეტონების ნიმუშებში იქნებთან ისინი მშრალ, ბუნებრივად მშრალ, თუ წყალგაჟღენთილ მდგომარეობაში, დატვირთვის სიჩქარის ცვლილება არ იწვევს სიმტკიცის შემცირებას და შესაბამისად დიაგრამის გამრუდებას, ხოლო პუასონის კოეფიციენტი მუდმივია მის რღვევამდე, რაც მიანიშნებს ბეტონის სტრუქტურის ერთგავროვნების მდგრადობაზე. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ დანამატების მოქმედების ხარჯზე, ანუ შექმნილი მასალის

ერთგვაროვნებით იზრდება ნიმუშის ფართი რომელზედაც მოქმედებს დატვირთვა. ე. ი შესაბამისად რღვევისთვის საჭიროა მეტი ძალა. ამიტომ, განსხვავება ხახუნით შეზღუდულ და შეუზღუდავ, ხახუნის გარეშე ნიმუშების სიმტკიცეებს შორის არის უმნიშვნელო სხვაობა, რაც შეიძლება მიეწეროს შედეგების გაზომვის საზღვრებს.

აღნიშნულ საკითხებზე მუშაობდნენ ისეთი მეცნიერები, როგორცაა ო. ბერგი, ვ. ბალავაძე. მინდა აღვნიშნო პროფესორ მ. ტურძელაძის ნაშრომი „სტრუქტურული ფაქტორების გავლენა ბეტონის დეფორმირებასა და რღვევაზე“.

ექსპერიმენტებში გამოყენებული იყო შერეული დანამატებიანი ბეტონი, რომელიც გამოირჩევა მაღალი თვისებებით სხვა დანამატიანი ბეტონისაგან.

როგორც ექსპერიმენტმა აჩვენა საბაზო ბეტონში სიმტკიცის კლება გამოწვეულია ცოცვადობით და დამოკიდებულია დატვირთვის სიჩქარის ცვლილებაზე. მშრალ ბეტონში ცოცვადობის დეფორმაცია პრაქტიკულად ნულის ტოლია, ამიტომ დამოკიდებულება ძაბვასა და დეფორმაციას შორის პირდაპირპროპორციულია, ხოლო პუასონის კოეფიციენტი მუდმივი სიდიდეა რღვევამდე. ბუნებრივ და წყალგაყენთილ მდგომარეობაში ბეტონის სიმტკიცე მცირდება მოდებული ძალის სიჩქარის შემცირებით. ხახუნის განივი დეფორმაციით შეზღუდულ ბეტონში მიკრობზარები ჩნდებიან, მაგრამ რღვევა არ ხდება, სანამ მოდებული ძალა არ გადალახავს ხახუნით გამოწვეული შეზღუდვის ძალის მოქმედებას.

დანამატიანი ბეტონის ცენტრალური კუმშვის დროს გამოცდით მიღებული შედეგები მოცემულია ნახაზებზე №3.1.1-№3.1.6, სადაც შეზღუდული მშრალი ბეტონის სიმტკიცეა $R_1=63$ მპა, ხოლო შეუზღუდავის ბეტონის - $R_1=49$ მპა. ეს სიდიდეები წარმოადგენენ 3-3 ნიმუშის საშუალო მნიშვნელობას. აღსანიშნავია, რომ განივი დეფორმაციის კოეფიციენტი μ ანუ პუასონის კოეფიციენტი, როგორც დანამატიანი, ასევე საბაზო ბეტონისთვის ერთმანეთის ტოლია $\mu_1 = \mu_2 = 0,18$.

ზემოთ მოყვანილ ნახაზზე ნაჩვენებია ბუნებრივ პირობებში მყოფი ბეტონის ნიმუშების კუმშვაზე მიღებული შედეგები. შეზღუდული ბეტონისათვის $R_1=61$ მპა-ს, $R_2=58$ მპა-ს, ხოლო $\mu = 0,17$. ნახ. 6-ზე შეზღუდული ნიმუშისათვის $R_1=60$ მპა-ს, შეუზღუდავი ნიმუშისათვის $R_2=58$ მპა-ს, ხოლო $\mu = 0,18$.

როგორც გრაფიკებიდან ჩანს, დანამტიანი შეზღუდული ბეტონების სიმტკიცე მშრალ, ბუნებრივ და წყალგაყენთილ მდგომარეობაში დაახლოებით ტოლია და 10%-ით მეტია დანამტიან შეუზღუდავი ბეტონების სიმტკიცეზე. შეუზღუდავი ბეტონის პუასონის კოეფიციენტებიც დაახლოებით უტოლდება ერთმანეთს. შედეგებიდან გამომდინარე ერთ-ერთ ძირითად დასკვნას წარმოადგენს ის, რომ პუასონის კოეფიციენტი შეზღუდულ და თავისუფალ ბეტონებში მუდმივი სიდიდეა. μ სიდიდის მუდმივობა გამოწვეულია იმით, რომ დანამტიან ბეტონში მიკრობზარების გაჩენასთან ერთად ხდება რღვევა, რაც დანამტიანი ბეტონის სტრუქტურის ერთგვაროვნების მანიშნებელია.

3.2 საბაზო და დანამტიანი ბეტონების σ, ε მუშაობა დროში

ხანმოკლე დატვირთვისას

ექსპერიმენტალურ-თეორიული კვლევების საფუძველზე ცოცვადობის ადსორბციული თეორიის პოზიციებიდან ნაშრომში ნაჩვენებია ბეტონის დროში მუშაობის თავისებურებანი და შემოთავაზებულია ბეტონის ზღვრული მახასიათებლების უნივერსალური გრაფიკი, მათ შორის: სიმტკიცის, დრეკადი დეფორმაციის, წრფივი ცოცვადობის და გამძლეობის ზღვრები.

დადგენილია, რომ სიმტკიცის ზღვარის სიდიდე R იცვლება დროში და დამოკიდებულია დატვირთვის მოდების სიჩქარეზე. იმ დროს, როდესაც დრეკადი დეფორმაციის ზღვარი მუდმივი სიდიდეა და არ არის დამოკიდებული ბეტონის ასაკზე და არც დატვირთვის სიჩქარეზე.

აღმოჩენილია ახალი მოვლენა, რომელიც მდგომარეობს იმაში, რომ მყარი სხეულები, რომლებიც იმყოფებიან ზედაპირულად აქტიურ გარემოში გარე ძაბვების მოქმედების ქვეშ აქვთ დეფორმაციის განვითარების დამახასიათებელი თვისება - არაწრფივი შექცევადი დეფორმაციის სტადია, რომელიც ზღვრული მნიშვნელობისას მიიღევა. თუ მოვხსნით ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებას, გარე ძაბვის მოქმედების შენარჩუნებით, მაშინ დეფორმაცია დაუბრუნდება იმ მნიშვნელობას, რომელიც არსებობდა დეფორმაციის დრეკად მდგომარეობაში.

ადსორბციული შრეების მოქმედება წარმოვიდგინოთ, როგორც წყლის ორმხრივი წნევით მიგრაცია მასალის მიკრობზარების ზედაპირზე, რომელზეც მოქმედებს აღნიშნული წნევა მის წვეროებში და განაგრძობს მოძრაობას, რითაც ხელს უწყობს (გარე პირობების მუდმივობის დროს) დეფორმაციის განვითარებას, ამ დაწნევის ეფექტი ეკვივალენტურია გარე F ძალის ზრდის $\Delta F = \sigma_0 - \sigma_s$ სიდიდით, რომელიც ცვლის ადსორბციული შრეების მოქმედებას და წარმოადგენს მის მექანიკურ ეკვივალენტს, როგორც დამატებითი ძაბვა.

ზღვრული მახასიათებლების კვლევა მიმდინარეობდა თავისუფალი, არაშეზღუდული არმირებით, ხახუნით ან სხვა საშუალებებით გაჭიმულ და შეკუმშულ ბეტონებზე.

ნახ. №3.2.1-ზე წარმოდგენილია თეორიული გრაფიკის სახით ექსპერიმენტით დადასტურებული გამოკვლევების შედეგები.

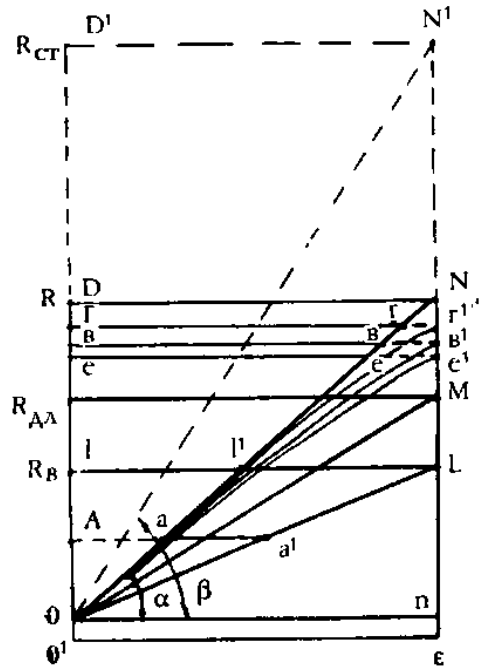
ბეტონის პრიზმას მოვდეთ გამჭიმავი, ან მკუმშავი ძაბვები მისი დეფორმაციების გაზომვით და მიღებული ძაბვა-დეფორმაციის მრუდი გამოვხატეთ σ, ε კოორდინატთა სისტემაში. O' საწყისი წერტილიდან დავაფიქსირეთ ბეტონის დეფორმირების საწყისი მომენტი O . მოვდეთ მყისიერი რღვევითი დატვირთვა, დავაფიქსირეთ დატვირთვის სიჩქარეები $V_{მყის}$ და V' , ანათვლებს ვიღებდით არა O' -დან არამედ O -დან, რადგან ბეტონი მუშაობას იწყებდა ამ წერილიდან. შევაერთეთ ON -თან, ODN სამკუთხედის ფართი

გამოხატავს მოცემული ასაკისა და შედგენილობის ბეტონის მუშაობის უნარის სიმტკიცის მახასიათებელს, სადაც OD შეესაბამება ბეტონის ნამდვილი სიმტკიცის ზღვარს R, რომელიც წარმოადგენს მაქსიმალურ ძაბვას მყისიერად მოდებულ მრღვევი ძალისაგან ბეტონის ელემენტის მუშა კვეთის ფართობზე. აქედან ბეტონის სიმტკიცე R წარმოდგენილი იქნება, როგორც განსაზღვრული სიმტკიცის მახასიათებელი, რომელიც დააფიქსირებს სიმტკიცის ზრდის დამოკიდებულებას ბეტონის გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდვის ხარისხთან, რადგან ბეტონის მყისიერი რღვევის მომენტში არ წარმოიქმნებიან და არ განვითარდებიან შეუქცევადი მიკრობზარები. სიმტკიცის ზღვარს R და მის შესაბამის ზღვრულ დეფორმაციას $\varepsilon_{\text{ზღ}}$ -ს აქვთ მხოლოდ მათთვის დამახასიათებელი თვისება. მოცემული ბეტონისათვის $\varepsilon_{\text{ზღ}}$ მუდმივია, არ არის დამოკიდებული ასაკზე. სწორედ $\varepsilon_{\text{ზღ}}$ დრეკადობის ფარგლებში განიხილება ბეტონის მუშა მახასიათებლები, ON გამოხატავს წრფივ დამოკიდებულებას σ -სა და ε -ს შორის, რომლის ტანგენსის კუთხის წრფე აბსცისთა ღერძთან წარმოადგენს მისი დრეკადობის მოდულს. ეს მიუთითებს შემდეგზე: 1. ბეტონი მუშაობს ჰუკის კანონის მიხედვით R-ის მიღწევამდე და დრეკადობის მოდული მუდმივი სიდიდეა - არ არის დამოკიდებული დამაბვის ხარისხზე. 2. ბეტონში შეუქცევადი მიკრობზარები წარმოიქმნებიან და განვითარდებიან მხოლოდ სიმტკიცის ზღვარის R მიღწევის შემდეგ. 3. დეფორმირების არეში არ არის მოლეკულათშორისი შეჭიდულობის შესუსტება ზედაპირულად აქტიურ გარემოში დრეკადი დეფორმაციის არეში. 4. R წარმოადგენს ბეტონის დრეკადი დეფორმაციის ზედა ზღვარს. 5. ბეტონის რღვევა ორნაირია: თუ ჯამური ძაბვა განტვირთვისა და დამატებითი ძაბვებისაგან მეტია ნამდვილ სიმტკიცის ზღვარზე R-ზე, მაშინ ცოცვადობა არამილევადია, თუკი ჯამური ძაბვა R-ის ტოლია, მაშინ ცოცვადობა მილევადია და რღვევა მოხდება მხოლოდ დატვირთვის გაზრდით.

ბეტონის რღვევის ფიზიკური არსი აღნიშნულ ორ შემთხვევაში შეიძლება აიხსნას შემდეგნაირად: N გავატაროთ ვერტიკალი აბსცისათა ღერძამდე,

მოცემული ბეტონისთვის ასაკის მიუხედავად აღნიშნული ვერტიკალი, რომელიც დროის განმავლობაში მიაღწევს N' -ს, სადაც $N'n'=R_{\alpha_3}$ დაძველებული ბეტონის სიმტკიცეა, შეიცავს ყველა ზღვრულ მაქსიმალურ დეფორმაციებს დატვირთვის ხასიათის მიუხედავად.

გაჭიმული ბეტონისგან განსხვავებით კუმშვის დროს ადგილი აქვს ბეტონის ფერდებისა და პრესის ფილებს შორის ხახუნს, რის გამოც იზღუდება გაჭიმვის დეფორმაცია, ამიტომ თუ ხახუნს მოვაცილებთ გამრუდების წერტილები OC' , OB' OD' , რომლებიც შეესაბამებიან ძაბვებს R_1 , R_2 , R_3 (ნახ. №3.2.1) ორივე ბეტონებზე განთავსდებიან ვერტიკალ Nn -ზე, ერთდროულად დააფიქსირებენ მაქსიმალურ ზღვრულ დეფორმაციის ბოლო წერტილებს (e', b', r') და ბეტონის რღვევის მომენტს. ამასთან, რაც მეტია ბეტონზე დატვირთვის სიჩქარე, ისინი მით უფრო მაღლა მდებარეობენ. თუ ბეტონის პრიზმაზე მოვდებთ მყისიერად აღნიშნულ დატვირთვებს გაღუნვის წერტილების შესაბამისად e' , b' , r' , მაშინ მყისიერად მივიღებთ ON წრფეზე წერტილებს e , b , r , რომლებიც აფიქსირებენ ზღვრულ დრეკად დეფორმაციებს, მაგრამ რღვევა არ ხდება, სანამ ამ წერტილებიდან დაწყებული ცოცვადობა არ მიაღწევს შესაბამის წერტილებს e' , b' , r' , ანუ სანამ ჯამური მაქსიმალური დეფორმაციები არ მიაღწევენ Nn ვერტიკალამდე და გახდებიან ტოლი DN დეფორმაციების და ისევე დრეკადი, როგორც უკანასკნელი. ამგვარად, ბეტონის რღვევა ხდება მხოლოდ სიმტკიცისა და ზღვრული დეფორმაციის მიღწევისას. ამას ადგილი აქვს ბეტონის მიღევადი ცოცვადობის პირობებში, ანუ სიმტკიცის ზღვრის მიღწევისას, მაშინვე მიმდინარეობს დამატებითი ძაბვა. ყველაფერი ეს მიგვანიშნებს იმას, რომ ბეტონი დრეკადი დეფორმირების არეში მუშაობს ჰუკის კანონით. მიღებული მრუდხაზოვანი დამოკიდებულებანი კი გამოწვეულია იმით, რომ აბსცისათა ღერძზე მოყვანილია არა დატვირთვით გამოწვეული დეფორმაციები, არამედ ჯამური, გამოწვეული წყლის გამხლეჩი მოქმედებით დამატებითი ძაბვებითაც, რომლებიც არ ჩანს ორდინატთა ღერძზე.



ნახ. №3.2.1 ბეტონის ზღვრული მახასიათებელი აგებული თეორიულად

აღნიშნულიდან გამომდინარე ცოცვადობის დეფორმაცია დროში მატულობს M წერტილის დონეზე და M წერტილის დონეზე ხდება მაქსიმალური და ზღვრული. თუ M წერტილის ზევით ცოცვადობის დეფორმაცია იყო არამილევადი, მაშინ ამ წერტილში ის მიილევა და მისგან ქვევით მცირდება დატვირთვის პროპორციულად OM წრფეზე.

უნდა აღინიშნოს, რომ ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაციის მექანიზმი განმეორებითი და მუდმივი დატვირთვების დროს მისი დროში დეფორმირების გათვალისწინებით, იდენტურია. ჩვენს მიერ განხორციელდა ექსპერიმენტები თავისუფალი, არაშეზღუდული ბეტონის გამძლეობის ზღვრის განსაზღვრისათვის.

აღსანიშნავია, რომ ბეტონის დროში მუშაობის თავისებურებანი და მისი ზღვრული მახასიათებლები მიღებული თეორიულად დასტურდება ექსპერიმენტით.

3.3 ბეტონის მდგომარეობის დიაგრამის დასაბუთება

ექსპერიმენტით მისი თავისუფალი კუმშვისა და გაჭიმვის დროს

მყარი ტანის წრფივი ცოცვადობის ბუნების ადსორბციული თეორიის პოზიციებიდან ექსპერიმენტით იყო გამოკვლეული სიმტკიცისა და დეფორმაციის მახასიათებლები თავისუფალი ღერძული კუმშვისა და ცენტრული გაჭიმვის დროს. ბეტონის ნიმუშები პრიზმები $10 \times 10 \times 30$ სმ და კუბიკები $10 \times 10 \times 10$ სმ მასალების ხარჯებით როგორც მოცემულია თავი. 1-ში.

ყველა შემთხვევაში დაფიქსირებული იყო სიმტკიცის, დრეკადობის მოდულის, გამძლეობის ზღვრის ზრდა დროში, ამავე დროს ზღვრული დრეკადი დეფორმაციები კი მუდმივი იყო. ბეტონის პრიზმები გამოიცდებოდა კუმშვაზე პრეს H-50. ხახუნს ნიმუშის ფერდებსა და პრესის პლიტებს შორის ვაცილებდით პარაფინით. გრძივი დეფორმაციები იზომებოდა პრიზმის ორ ურთიერთსაწინააღმდეგო მხარეს დამაგრებული გადამწოდების საშუალებით, ბაზით 50 მმ. ჩვენებები რეგისტრირდებოდა AND-ის მოწყობილობით, რომლის დანაყოფის ფასი 10^{-5} .

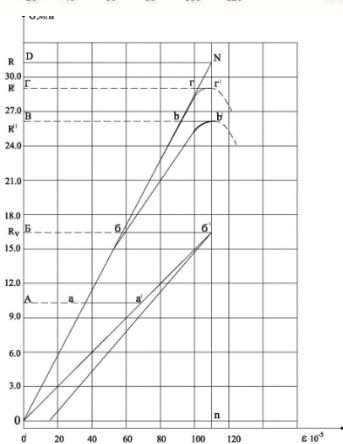
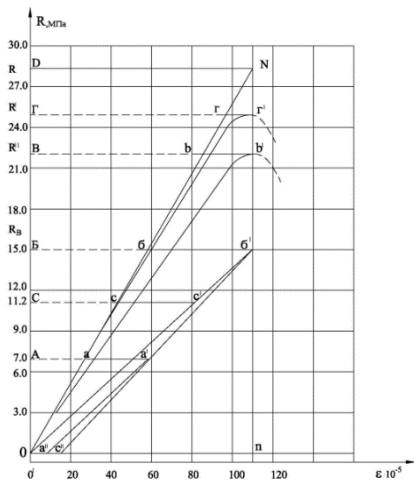
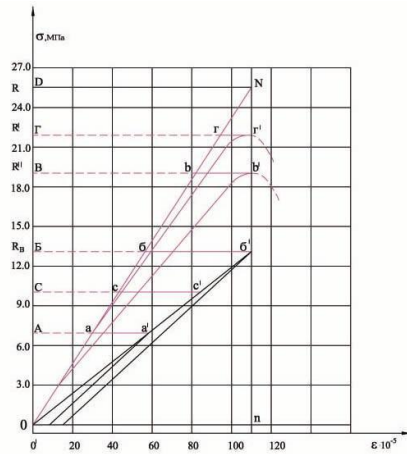
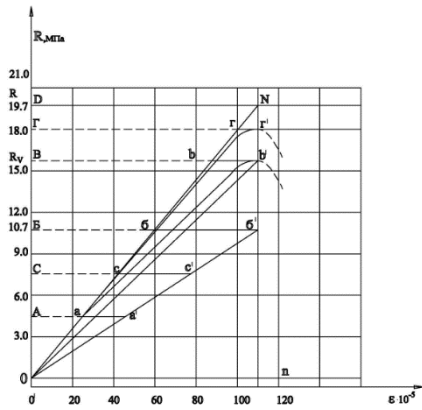
დადგინდა, რომ განსაზღვრულ დატვირთვამდე (ჩვენ შემთხვევაში 300 ნ) ბეტონი არ დეფორმირდებოდა. ცნობილია, რომ მყარი დრეკადი ტანები დატვირთვის მიყენებისთანავე განიცდიან დეფორმირებას. ბეტონი დრეკად-პლასტიური სხეულია და იწყებს დეფორმირებას მხოლოდ პლასტიური შემადგენლის ზღვრის გადალახვის შემდეგ. ეს მნიშვნელობა ჩვენს მიერ მიღებული იყო კოორდინატთა სისტემის σ, ϵ –ს საწყისად O წერტილში. შემდგომ ამისა, უზრუნველყავით მყისიერი მრღვევი ძალის მიწოდება 15 მპა/წმ სიჩქარით. ნიმუშის რღვევის მომენტში ფიქსირდებოდა მანომეტრის ჩვენებით რღვევა, ხოლო 2 AND ზღვრული დეფორმაცია. ორდინატთა ღერძზე გადაზომილი გვექონდა DN ბეტონის ზღვრული კუმშვითი დეფორმაციის მნიშვნელობა $\epsilon = 104 \cdot 10^{-5}$, N წერტილიდან გავატარეთ ვერტიკალი Nn აბსცისთა ღერძის გადაკვეთამდე. N

წერტილი შევაერთეთ კოორდინატთა სათავესთან O. ამგვარად, გამოცდის მონაცემებიდან გამომდინარე ბეტონის მხოლოდ ერთი ნიმუშის გამოცდით მივიღეთ ნამდვილი სიმტკიცის ზღვარი, მისი შესაბამისი ზღვრული დრეკადი დეფორმაცია $\varepsilon_{\text{ზღ}}$, მკვეთი ON, რომელიც გამოხატავს ბეტონის ძაბვისა და დეფორმაციის დამოკიდებულებას და რომლის კუთხის ტანგენსი აბსცისათა ღერძთან წარმოადგენს მისი დრეკადობის მოდულს. მნიშვნელოვანია ისიც, რომ ODN სამკუთხედის ფართობი წარმოადგენს ბეტონის მუშაობას მისი რღვევის დროს. ამის შემდეგ დავადგინეთ სიმტკიცის ზღვარი და მისი შესაბამისი ზღვრული დეფორმაცია ჩვეულებრივი სტანდარტით მიღებული დატვირთვის სიჩქარის დროს 0,2 მპა/წმ. აგებული იქნა ძაბვა-დეფორმაციის მრუდი, შედეგად სიმტკიცის ზღვარმა შეადგინა $R'=21,6$ მპა, ხოლო ზღვრულმა დეფორმაციამ $\varepsilon=108*10^{-5}$. დამახასიათებელია, რომ მრუდის ცვლილების წერტილი რღვევის მომენტში აღმოჩნდა Nn -ზე. ამის შემდეგ მოდებულ იქნა მრღვევი ძალა $R'=21,6$ მპა, შესაბამისმა ზღვრულმა დრეკად-დეფორმაციამ შეადგინა $\varepsilon=90*10^{-5}$, ხოლო ბოლო წერტილი აღმოჩნდა ბეტონის დრეკადობის მოდულის წრფეზე ($r\Gamma$). გრძელდებოდა რა დეფორმაცია დროში, ბოლო წერტილმა მიაღწია წერტილ Γ' , რომელიც რღვევის მომენტში აღმოჩნდა ვერტიკალ Nn -ზე.

ბეტონის ზღვრული მახასიათებლების ბუნების უფრო კარგად გაგებისთვის ჩატარდა კიდევ ერთი ცდა და ბეტონის ნიმუშებს ქონდათ მოდებული მკუმშავი მრღვევი ძალა მნიშვნელოვნად ნაკლები სიჩქარით $v=0,005$ მპა/წმ და აიგო ძაბვა-დეფორმაციის მრუდი. ზღვრულმა სიმტკიცემ შეადგინა $R'=21,6$ მპა, ხოლო ბოლო წერტილი ზღვრული დეფორმაციის $\varepsilon=110*10^{-5}$ დაემთხვა დიაგრამის მრუდის გამრუდების წერტილს და აღმოჩნდა თითქმის Nn ვერტიკალზე, რაც ნიშნავდა მაქსიმალურ მყისიერ დრეკად-დეფორმაციულ მნიშვნელობასთან თანხვედნას. მყისიერად მოდებული მრღვევი ძალის $R'=16,6$ მპა დრეკადი დეფორმაცია მივიდა დრეკადობის მოდულის წრფემდე და მთლიანი დეფორმაცია

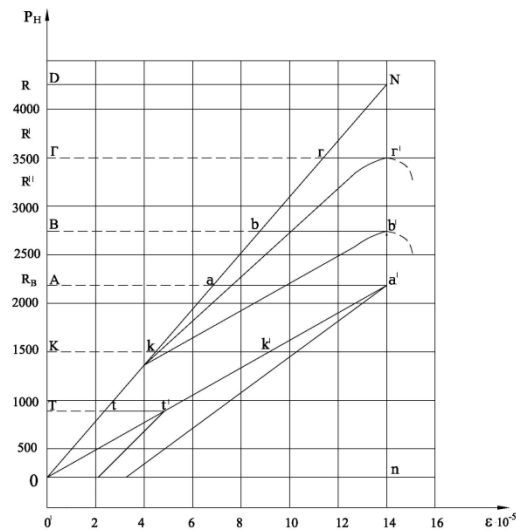
(დრეკადი+დეფორმაცია დროში) მიაღწია ვერტიკალ Nn-ს და დაემთხვა დიაგრამის გამრუდების წერტილს.

ნახ. №3.3.1-ზე მოცემული OBნრ' OCcc' მრუდები წარმოადგენენ ბეტონის გამძლეობის ზღვარს მრავალჯერადი განმეორებითი დატვირთვებისას.



ნახ. №3.3.1 შეკუმშული ბეტონის ექსპერიმენტალური უნივერსალური გრაფიკი a) ერთ თვიანი, b) სამ თვიანი, c) ექვს თვიანი, d) ცხრა თვიანი.

ბეტონის ზღვრული მახასიათებლების უნივერსალური გრაფიკების თეორიული საფუძვლები და მისი მუშაობის თავისებურებანი დასტურდება ცენტრალური გაჭიმვის დროსაც (ნახ. №3.3.2).



ნახ. №3.3.2 ექსპერიმენტალური უნივერსალური გრაფიკი ბეტონის ცენტრალური გაჭიმვისას

გრაფიკების ანალიზით შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი დასკვნები:

1. ბეტონის სტრუქტურული ცვლილების საზღვრებს წარმოადგენს: ნამდვილი ზღვრული სიმტკიცე, რომელიც წარმოადგენს მაქსიმალურ ძაბვას მიღებულს მყისიერად მოდებული მრღვევი ძალის ფარდობით ბეტონის ელემენტის მუშა ფართზე და მისი შესაბამისი ზღვრული დრეკადი დეფორმაცია.

2. ბეტონის სიმტკიცე იცვლება დროში და დამოკიდებულია დატვირთვის მოდების სიჩქარეზე, ხოლო ზღვრულ დეფორმაციას, რომელიც მთლიანად დრეკადია, აქვს მხოლოდ ერთი, მისთვის გამორჩეული თვისება: მოცემული შემადგენლობის ბეტონისა და შეზღუდვის ხარისხის მიუხედავად ის მუდმივია, არ არის დამოკიდებული ბეტონის ასაკზე და არც ბეტონის დატვირთვის სიჩქარეზე.

3. ბეტონის სიმტკიცის ცვლილების კანონზომიერებას დროში აქვს ისეთივე ხასიათი, როგორც მყისიერ დრეკადობის მოდულს, რადგან $\epsilon_{\text{ზღ}} = \text{constanta}$, რაც მტკიცდება ექსპერიმენტით.

4. ნებისმიერი რღვევა ხდება ბეტონის მიერ ნამდვილი სიმტკიცის და დრეკადი დეფორმაციის ზღვრის მიღწევისას. ამავე დროს სრულდება $\epsilon_{\text{ზღ}}$

სამკუთხედის ფართის ტოლი მუშაობა, მოდებული დატვირთვის სიჩქარის შემცირებით კლებულობს ბეტონის სიმტკიცეც R' . ექსპერიმენტებმა მშრალ, ბუნებრივად მშრალ და წყალგაჟღენთილ ბეტონებზე გვიჩვენა, რომ დამატებითი ძაბვა გამოწვეულია წყლის გამხლეჩი მოქმედებით. აღსანიშნავია, რომ „კალციუმის ჰიდროსილიკატებისა და პორტლანდცემენტზე დამზადებული მასალებისათვის სორბციული დატვირთვა ყველა მნიშვნელობისთვის, მაქსიმალურის ჩათვლით, მოქმედებს მექანიკურის მსგავსად“, ამიტომ ბეტონის რღვევა დროში ხდება გარე ძალისა, რომელიც გამოიხატება ტრაპეციის ფართობით $OBB'n$ და წყლის გამხლეჩი მოქმედებით გამოწვეული დამატებითი მუშაობით სამკუთხედის ფართობის $BB'N$, რაც ჯამში გვაძლევს სამკუთხედის ფართს ONn .

თავი 3.1-ში მიღებული შედეგები გვაძლევს შესაძლებლობას დავასკვნათ, რომ დანამატიანი ბეტონის სტრუქტურის ცვლილებების ზღვარი უახლოვდება მის სიმტკიცის ზღვარს. ამიტომ, შესაბამისად დანამატიან ბეტონს აქვს უფრო მაღალი გამძლეობისა და ხანგრძლივი წინაღობის ზღვარი. ბეტონის სტრუქტურული ცვლილებების სასაზღვრო პირობებს წარმოადგენენ:

- სიმტკიცის ნამდვილი ზღვარი R - მყისიერად მოდებული მრღვევი მაქსიმალური ძალის ფარდობა ბეტონის მუშა კვეთზე და მისი შესაბამისი ზღვრული დრეკადი დეფორმაცია $\epsilon_{ზღვრ}$.
- ბეტონის სიმტკიცე R დროში კლებულობს მოდებული ძალის სიჩქარის ცვლილების შესაბამისად, ხოლო ზღვრული დეფორმაცია $\epsilon_{ზღვრ}$ მოცემული შემადგენლობის ბეტონისათვის მუდმივი სიდიდეა, არ არის დამოკიდებული ბეტონის ასაკისა და ძალის მოდების სიჩქარეზე.
- ბეტონის სიმტკიცე დროში ემორჩილება იმავე კანონზომიერებას, რასაც მყისიერი დრეკადობის მოდული. (ხომ არ არის გამეორება)

ბუნებრივ და წყლით გაჟღენთილ მდგომარეობაში მყოფ ბეტონებზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა თვალნათლივ დაგვანახეს, რომ ბეტონის რღვევა გამოწვეულია მაქსიმალური ძაბვით, რომელიც ხორციელდება გარე ძაბვისა და

წყლის გამხლეჩი ძალით მიღებული დამატებითი ძაბვის ჯამური მოქმედებით. ბეტონი არაერთვაროვანი მასალაა, მასში მრავალი დეფექტია, მიკრობზარებია, რომელთა წვეროებზე იქმნება ძაბვების კონცენტრაცია, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს მის სიმტკიცეს. ამ პირობებში სიმტკიცის გაზრდის მიზნით საკმარისია ძაბვების კონცენტრაციის გავლენის შემცირება, ამის მიღწევა შესაძლებელია ბეტონის გამჭიმავი ძაბვების შეზღუდვით. თუ ამ პროცესს შევხედავთ ადსორბციული თეორიის პოზიციიდან, დავინახავთ, რომ გაჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდვა არა მარტო ამცირებს ძაბვების კონცენტრაციას ბეტონში, არამედ აგრეთვე ზღუდავს წყლის გამხლეჩ მოქმედებას - დამატებით ძაბვასაც, რასაც საბოლოო ჯამში მივყავართ ბეტონის სიმტკიცის მნიშვნელოვან მატებასთან. ექსპერიმენტებზე დაყრდნობით მიღებული შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ბეტონის საწყისი დრეკადობის მოდული ძალის მყისიერი მოქმედებისას ყველა განსახილველ შემთხვევაში იქნება ის მშრალ, ბუნებრივ, წყლით გაჟღენთილ მდგომარეობაში, ხახუნით, თუ ხახუნის ძალების გარეშე მუდმივი სიდიდეა. აღსანიშნავია, რომ დრეკადი დეფორმაციის ზღვრის მიღწევის შედეგად განსხვავებით თავისუფალი ბეტონისაგან, სადაც რღვევა ხდება მყიფედ, შეზღუდული ბეტონი არ ირღვევა, განაგრძობს მუშაობას, მიუხედავად იმისა, რომ მასში უკვე გაჩნდნენ და განვითარდნენ არაშექცევადი მიკრობზარები, თუმცა რომლებსაც საბოლოო ჯამში მივყავართ რღვევამდე.

განსაკუთრებით უნდა აღინიშნოს დანამატიანი ბეტონის მუშაობის თავისებურება, რაც მდგომარეობს იმაში, რომ დანამატები, განსაკუთრებით შერეული პლასტიფიკატორით და მიკროსილიკით ავსებენ რა ბზარებს და ფორებს, ზრდიან ფართობს, რომელზეც მოქმედებს დატვირთვა და გარდა ამისა შესაბამისად ამცირებენ ბზარების წვეროებში არსებულ ძაბვათა კონცენტრაციას, რაც საბოლოო ჯამში მის სიმტკიცეს, გამძლეობისა და ხანგრძლივი წინაღობის ზღვრის სიდიდეს ზრდის.

თავი 4. ქიმიური დანამატებით მოდიფიცირებული ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა

ბეტონი თავისი მახასიათებლების დიდი სპექტრით ხასიათდება, ამიტომ იგი გამოიყენება პრაქტიკულად მშენებლობის ნებისმიერ სფეროში. მიუხედავად ამისა, ბევრ შემთხვევაში ბეტონის კონსტრუქციები ვერ აკმაყოფილებენ წაყენებულ მოთხოვნებს გარემოს ნეგატიური მოქმედების გამო. იმისათვის, რომ გაიზარდოს ნარევის გარკვეული თვისებები იყენებენ ბეტონის დანამატებს.

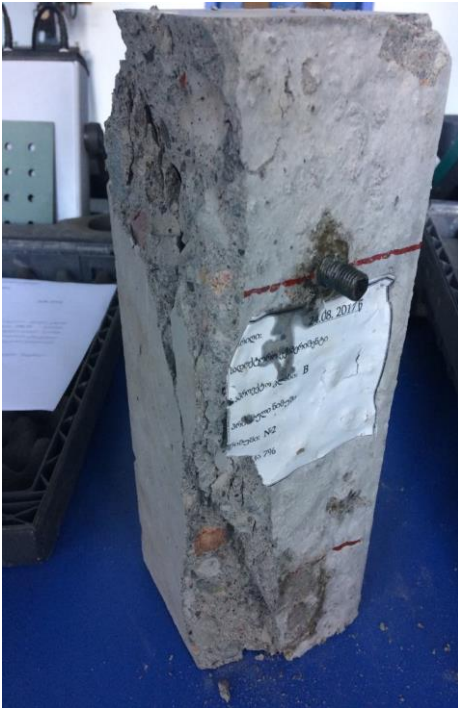
კვლევისათვის შერჩეულია დანამატები GRACE ZYLA® 420 M, სუპერპლასტიფიკატორი, მიკროსილიკა და მათი შერეული ნაერთი GRACE ZYLA® 420 M + მიკროსილიკა.

ნარევი ისინი მატულობენ მოცულობაში, ავსებენ ფორებსა და სიცარიელებს მისგან დევნიან ჰაერის ბუშტებს და ნარევი ხდება უფრო ძვრადი. ჩვენს მიერ გამოყენებული სუპერპლასტიფიკატორი GRACE ZYLA® 420 M სწორედ ასეთი მოქმედებით გამოირჩევა. არანაკლებ მნიშვნელოვანია მასთან ერთად მეორე ქიმიური დანამატის მიკროსილიკას გამოყენება. აღნიშნული დანამატები ბეტონის ფორებსა და კაპილარებში სიღრმეებში წარმოქმნიან არაგადამუშავებად კრისტალებს, რომელიც ლუქავს ბეტონს წყლისა და სითხის შეღწევისაგან.

ჩვენს მიერ დამზადებული და გამოცდილი იქნა ბეტონის ნიმუშები ქიმიური დანამატებით სუპერპლასტიფიკატორით (GRACE ZYLA® 420 M); მიკროსილიკით და შერეული (GRACE ZYLA® 420 M + მიკროსილიკა) და საკონტროლო საბაზისო. სულ დამზადდა 24 ცალი ბეტონის პრიზმა ზომით 10X10X30 სმ, რომელთაგან სამ-სამი პრიზმა თითოეული ვარიანტიდან გამოიცადა სიმტკიცეზე, ხოლო დანარჩენი სამი სიმტკიცესა და დეფორმატიულობაზე. 24 საათის შემდეგ მოხდა ნიმუშების განყალიბება და სპეციალურ სარეჟიმო კამერაში მოთავსება, სადაც ტენიანობა შეადგენდა 95%. 3 თვის ასაკში მოხდა მათი გამოცდა სიმტკიცეზე და დეფორმატიულობაზე.

გრძივი დეფორმაციები იზომებოდა პრიზმების ურთიერთსაწინააღმდეგო გვერდებზე დამაგრებული თანამედროვე ელექტრონული ინდიკატორებით დანაყოფის ფასით 0.001 მმ, ბაზით 15 სმ.

მიღებული შედეგები მოცემულია გრაფიკების სახით, სადაც აბსცისთა ღერძზე გადაზომილია ფარდობითი დეფორმაციები 10^{-5} , ხოლო ორდინატთა ღერძზე შესაბამისი ძაბვები δ .



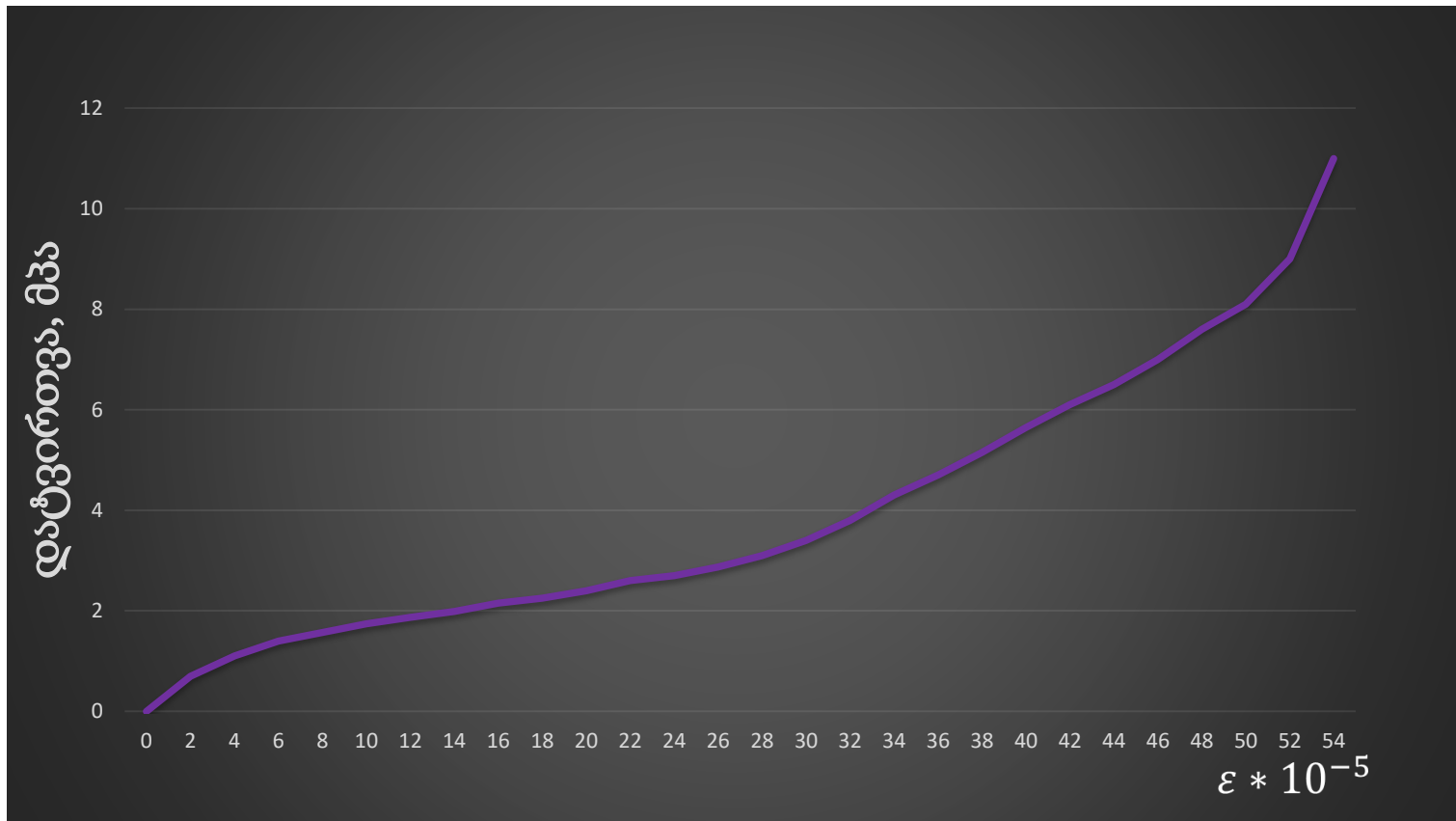
სურათი №4.1



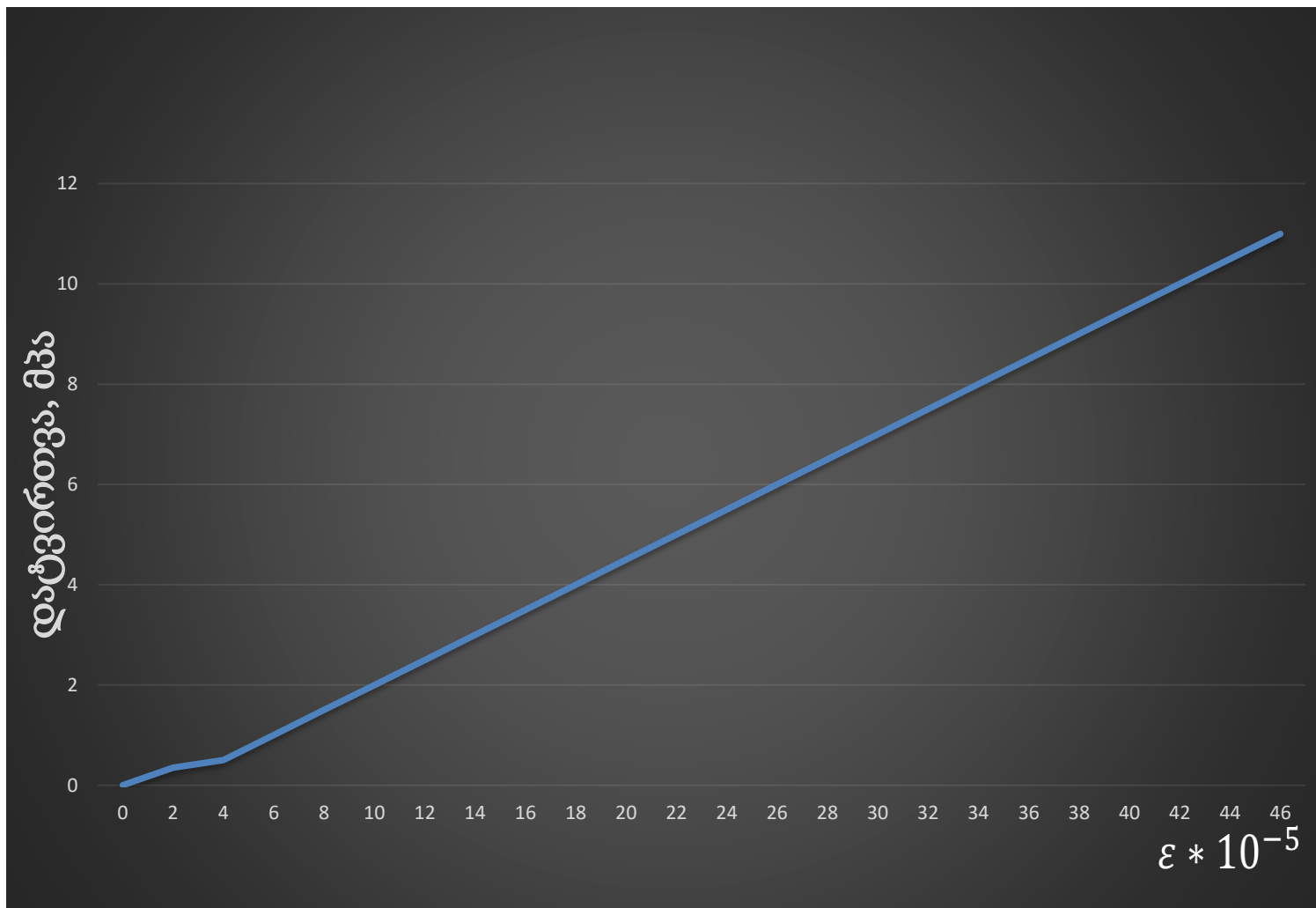
სურათი №4.2



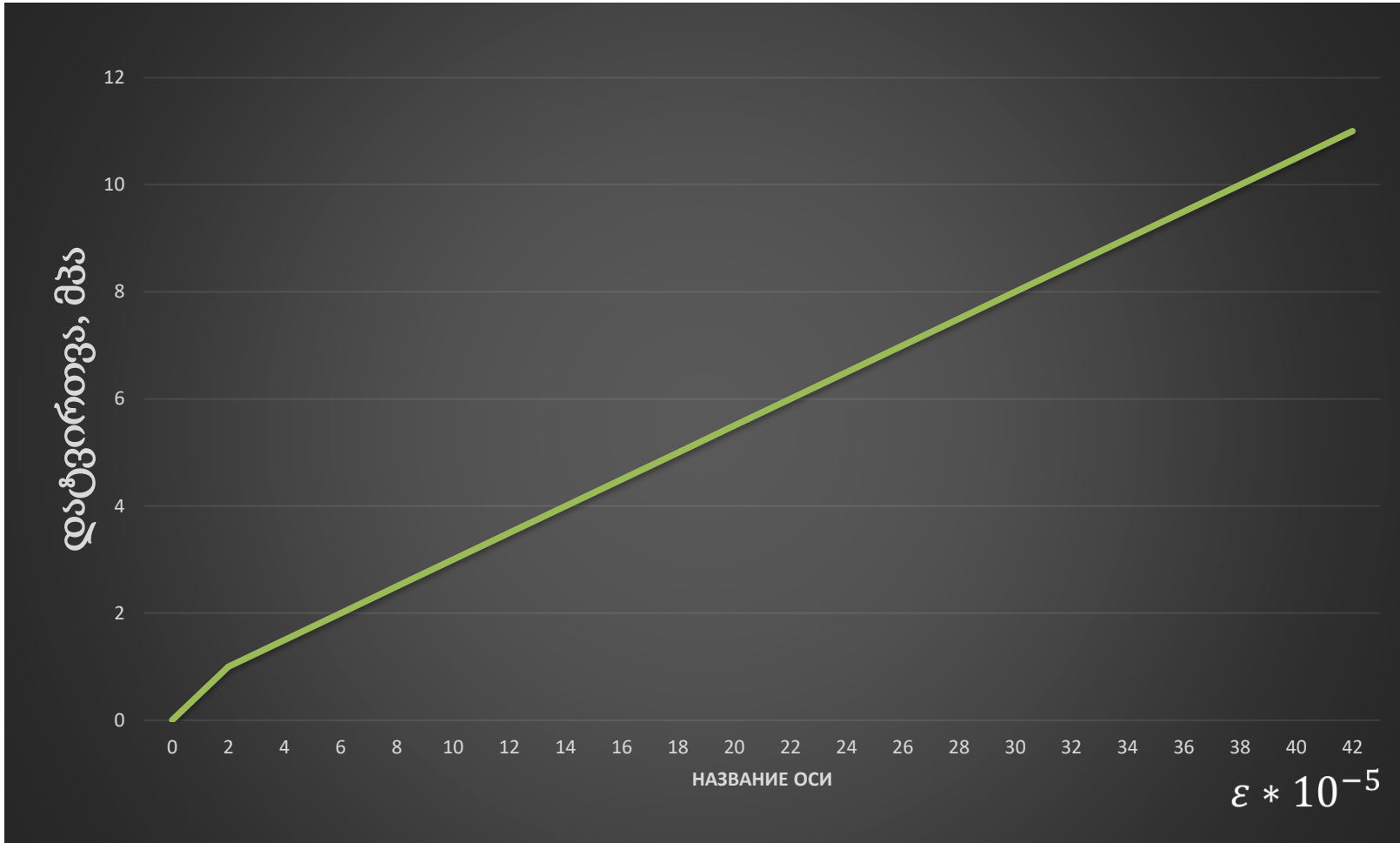
სურათი №4.3



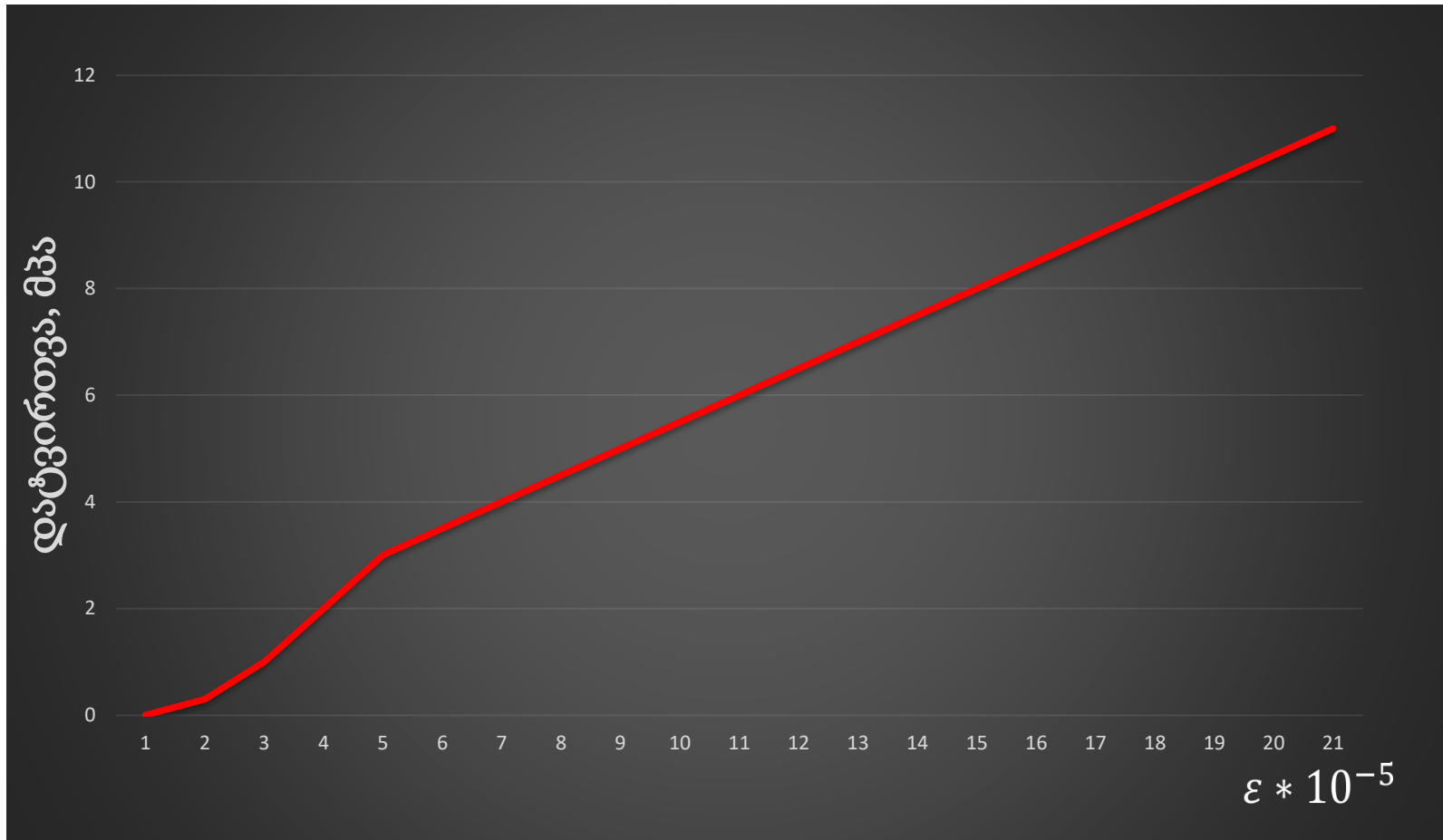
ნახაზი №4.1 საბაზო ნიმუშის დეფორმაციის დიაგრამა



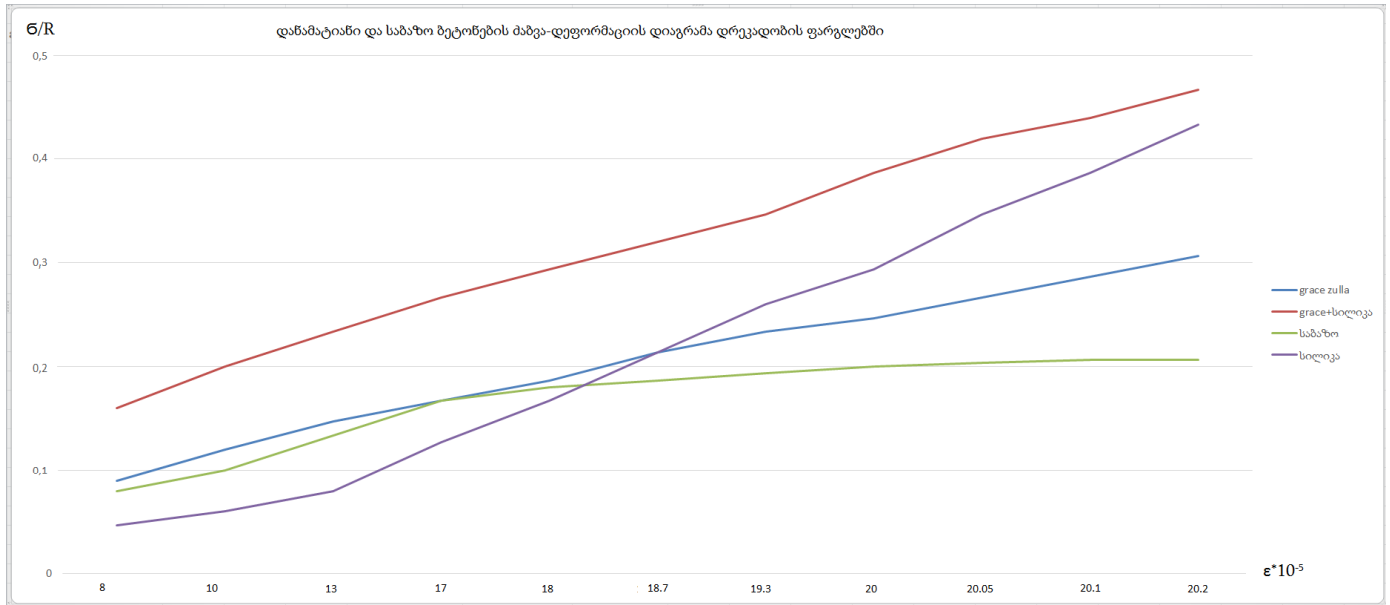
ნახაზი №4.2 დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის ნიმუშის დეფორმაციის დიაგრამა



ნახაზი №4.3 დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის ნიმუშის დეფორმაციის დიაგრამა



ნახაზი №4.4 დანამატთან (GRACE ZYLA® 420 M + მიკროსილიკა) ბეტონის ნიმუშის დეფორმაციის დიაგრამა



ნახაზი №4.5 საბაზო და დანამატებიანი ბეტონის ნიმუშების დეფორმაციის დიაგრამა

ხანმოკლე დატვირთვების დროს სიმტკიცემ შეადგინა საბაზოსთვის M350, მიკროსილიკით დანამატიანი ბეტონის შემთხვევაში M460; სუპერპლასტიფიკატორით- M410; ხოლო შერეულმა დანამატებით შედეგენილმა ბეტონმა - M490.

საბაზო და დანამატიანი ბეტონების ძაბვა-დეფორმაციაზე ჩატარებული გამოცდების შედეგები მოყვანილია ნახაზებზე №4.1÷№4.4. ნახ. №4.5-ზე ნაჩვენებია საერთო დიაგრამა. აბსცისთა ღერძზე გადაზომილია დეფორმაციები $\epsilon \cdot 10^{-5}$. ხოლო ორდინატთა ღერძზე შესაბამისი ძაბვები.

მიკროსილიკის დამატებით დამზადებული დანამატიანი ბეტონის ნიმუშის სიმტკიცის ზღვარმა კუმშვაზე შეადგინა 46 მპა-ს, რაც საბაზისო ბეტონზე 20% - ით მეტია. ეს იმის მანიშნებელია, რომ ამ შემთხვევაშიც ბეტონის სტრუქტურა ერთგვაროვანია და მისი ფორები შეივსო მიკროსილიკასა და წყლის ქიმიური რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი კრისტალებით. ამ დანამატის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს ის, რომ მისგან შედგენილი ბეტონის ნარევი სწრაფად მყარდება და ბეტონი ხდება მყიფე, ამ უარყოფითი ფაქტორის გათვალისწინებით ნარევის ძვრადობის გაზრდის მიზნით ჩვენს მიერ მოხდა მასზე სუპერპლასტიფიკატორის

დამატება. მიღებული შერეულდანამტიანი ბეტონი მაღალი ზღვრული დეფორმაციულობის და მაღალი სიმტკიცის აღმოჩნდა.

აქედან გამომდინარე, შესაძლებელია გაკეთდეს დასკვნა, ყველაზე ოპტიმალურ შედეგს იძლევა შერეული დანამატებით შედგენილი ბეტონის ნიმუშები, რომლებიც გამოირჩევიან მაღალი სიმტკიცითა და დრეკადობის მოდულით.

მნიშვნელოვანია, რომ ზღვრული დეფორმაციები ყველა შემთხვევაში დაახლოებით ერთმანეთის ტოლია და $\epsilon=160 \cdot 10^{-5}$.

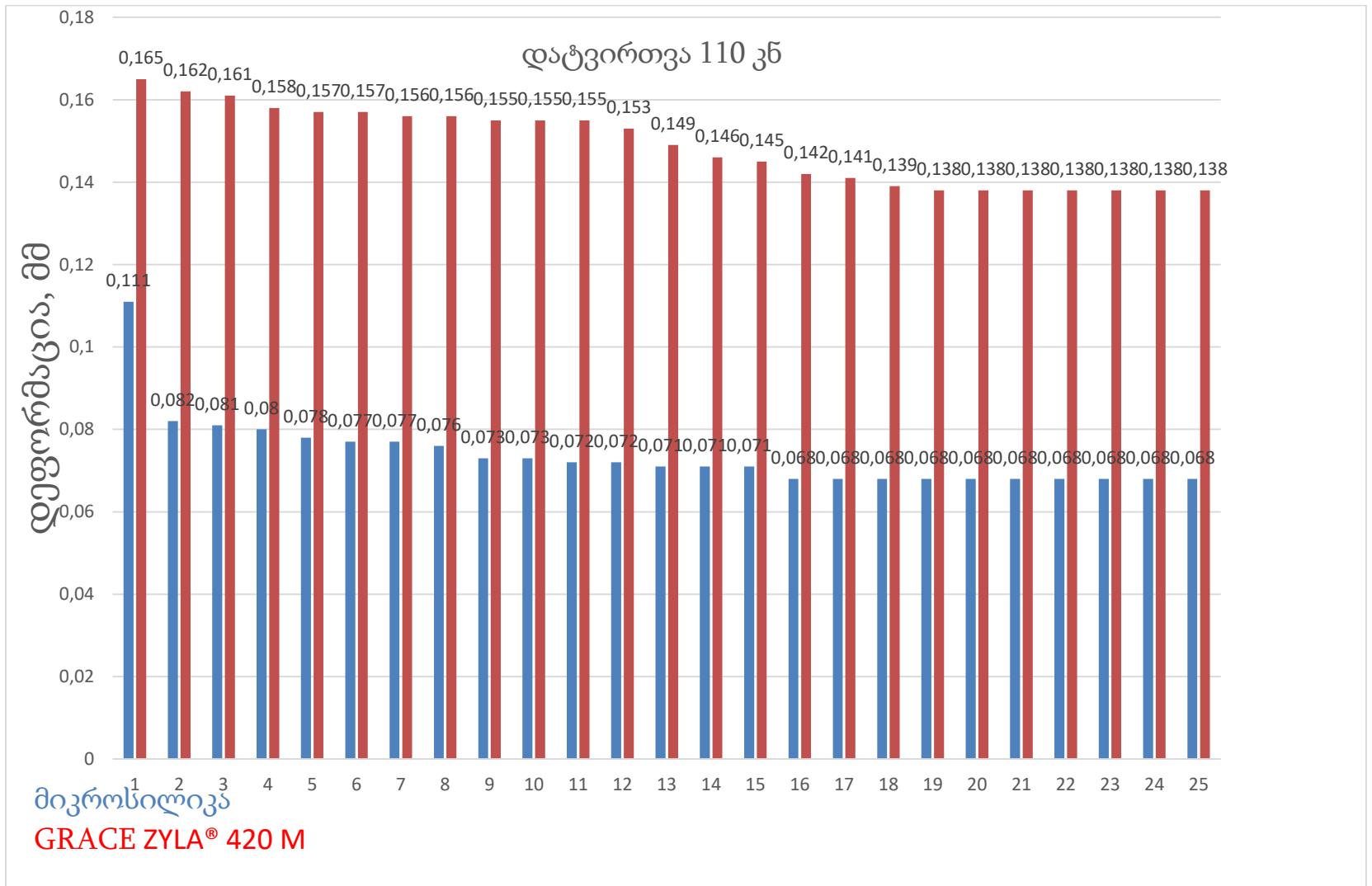
ნიმუშების გამოცდების შედეგებიდან ჩანს, რომ შერეული დანამატიანი ბეტონის სიმტკიცე და დრეკადობის მოდული მეტია დანარჩენი ბეტონების სიმტკიცესა და დრეკადობის მოდულებზე, თვით მრუდის ხასიათიც მიგვანიშნებს მისი სტრუქტურის ერთგვაროვნებაზე.



სურათი №4.4



სურათი №4.5



ნახაზი №4.1.2

განმეორებით დატვირთვებზე მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ნახაზებზე №4.1.2-№4.1.3. განმეორებითი სტატიკური დატვირთვების რაოდენობა იყო 20-დან 50-მდე, როგორც ნახაზებიდან ირკვევა, დანამატიანი მიკროსილიკას შემთხვევაში მაქსიმალური ნარჩენი დეფორმაცია შეადგენს 0,165 და მცირე სიდიდით კლების შემდეგ მე-15-ე დატვირთვა-განტვირთვის დროს მოხდა დეფორმაციის სტაბილიზირება და შემდეგი ციკლების დროს დეფორმაციის სიდიდე არ იცვლებოდა.

სუპერპლასტიფიკატორით (GRACE ZYLA® 420 M) დამზადებული ბეტონის დიაგრამა გვიჩვენებს, რომ დეფორმაციის ზრდა და ნარჩენი სიდიდე პირველი დატვირთვა-განტვირთვის დროს არის მიღევადი და მეორე ციკლიდან დეფორმაცია იკლებს, ხოლო მეთრე ციკლიდან ხდება მისი დეფორმაციის სტაბილიზაცია.

ბეტონი შერეული დანამატებით განმეორებითი დატვირთვების დროს, პირველივე დატვირთვა-განტვირთვისას დეფორმაცია და შემდეგ ციკლებზე მიღებული დეფორმაციები არის მუდმივი სიდიდე და არ იცვლება, ეს შედეგი მაჩვენებელია იმის, რომ შერეული დანამატებით (GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა) დამზადებული ბეტონი არის ერთგვაროვანი და მისი დრეკადობის მოდული მუდმივი სიდიდეა.

საბაზისო ბეტონის დიაგრამა წარმოადგენს ჩვეულებრივ ბეტონის დიაგრამას, საერთო დეფორმაციების ციკლიდან ციკლამდე ნარჩენი დეფორმაციების მიღევადად ზრდით.

4. 2 დანამატიანი და საბაზო ბეტონის მუშაობა რღვევამდე

განმეორებადი სტატიკური დატვირთვების დროს

ამის შემდეგ ჩატარდა ექსპერიმენტები დანამატიანი და საბაზო ბეტონის პრიზმებზე ზომით 10×10×30 სმ, ცენტრალურ კუმშვაზე მრავალჯერად განმეორებით სტატიკურ დატვირთვებზე. დატვირთვები ეძლეოდა საფეხურებრივად რღვევამდე. ბეტონის შემადგენლობა და მათი

გამოცდის მეთოდოლოგია წარმოებდა ისევე, როგორც მოცემულია წინა ექსპერიმენტში.

გამოიყვანა დანამატის ბეტონი: პირველ შემთხვევაში მიკროსილიკით, მეორე შემთხვევაში სუპერპლასტიფიკატორი GRACE ZYLA® 420 M, მესამე შემთხვევაში კომბინირებული და საკონტროლო საბაზო. ნიმუშები გამოიყვანა 6 თვის ასაკში. მიღებული შედეგები ნაჩვენებია ნახაზებზე №4.2.1÷№4.2.4. გრაფიკების ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია დავასკვნათ შემდეგი:

მიკროსილიკის დანამატით მიღებული ბეტონის მუშაობისას დროში საფეხურეობრივი დატვირთვით 0.2; 0.4; 0.6 0.8; შესაბამისად ვღებულობთ:

0.2R ხანმოკლე დატვირთვისას $\epsilon_{ხანმო} = 0.046$, ხოლო ცოცვადობის შემდეგ $\epsilon_{ცოცვა} = 0.096$;

0.4R -ის დროს $\epsilon_{ხანმო} = 0.154$; $\epsilon_{ცოცვა} = 0.158$;

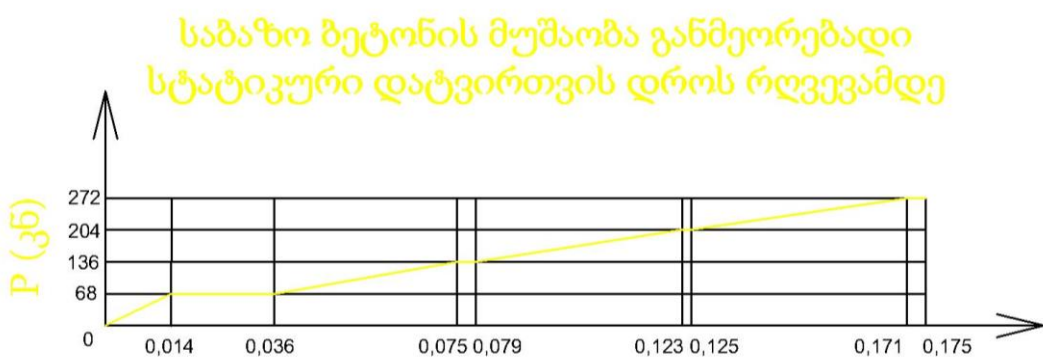
0.6R- ის დროს $\epsilon_{ხანმო} = 0.196$; $\epsilon_{ცოცვა} = 0.204$;

0.8R-ის დროს $\epsilon_{ხანმო} = 0.260$ განმეორებითი დატვირთვების შედეგად მოხდა ნიმუშის რღვევა.

თვისობრივად ასეთივე სურათი გვაქვს სუპერპლასტიფიკატორის ბეტონის ნიმუშის შემთხვევაშიც. რაც შეეხება შერეული დანამატების ბეტონის შედეგს, მისი საწყისი მოდული 0.2 R-სა და 0.4 R-ზე გაცილებით მეტია სხვა დანამატის ბეტონებზე, ხოლო ზღვრული დეფორმაცია დაახლოებით ერთმანეთის ტოლია და მნიშვნელოვნად აღემატება საბაზო ბეტონების ზღვრულ დეფორმაციებს.

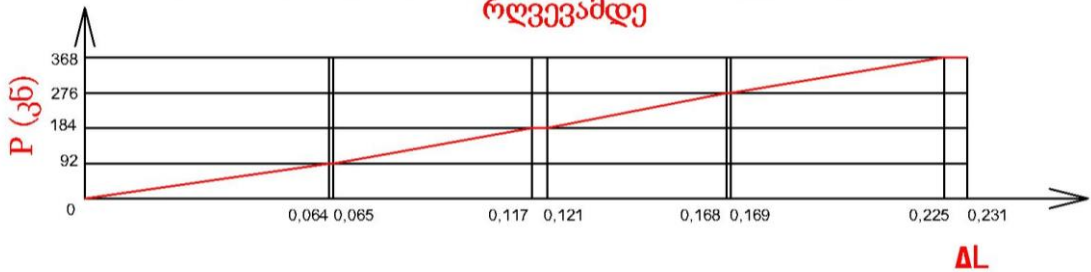
ზემოთ აღნიშნული მიუთითებს იმაზე, რომ შერეული დანამატებით შედგენილი (მიკროსილიკა+GRACE ZYLA® 420 M) ბეტონის მუშაობა დროში გაცილებით მაღალი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებით ხასიათდება, მრავალჯერადი განმეორებითი დატვირთვების შემთხვევაში, ამიტომ მისი გამოყენება შესაძლებელია სპეციალურ ნაგებობებში, კერძოდ ჰიდროტექნიკურ მშენებლობაში.

ნახაზი №4.2.1



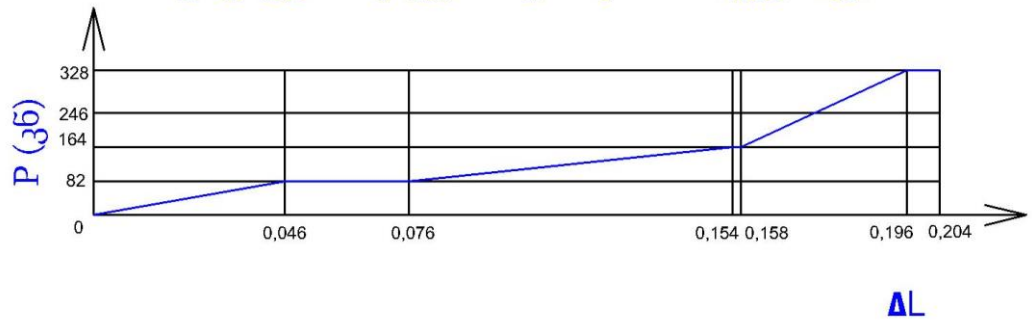
ნახაზი №4.2.2

სუპერპლასტიფიკატორი GRACE ZYLA® 420 M ბეტონის მუშაობა განმეორებადი სტატიკური დატვირთვის დროს რღვევამდე



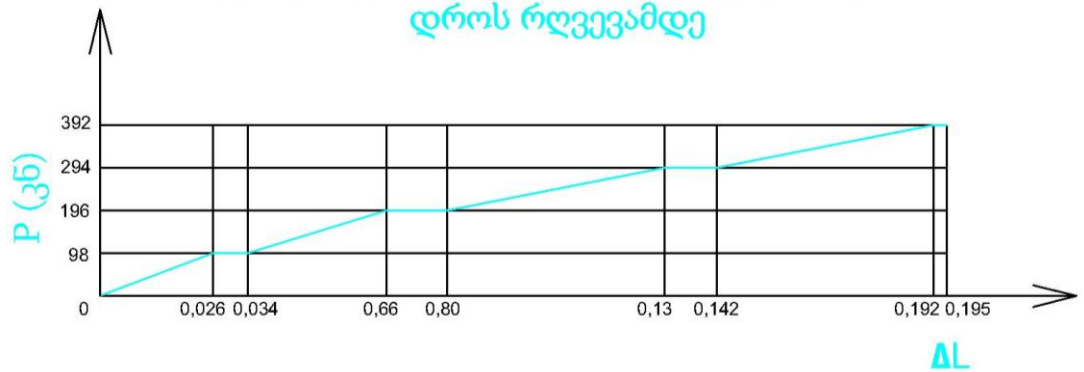
ნახაზი №4.2.3

მიკროსილიკიანი ბეტონის მუშაობა განმეორებადი სტატიკური დატვირთვის დროს რღვევამდე



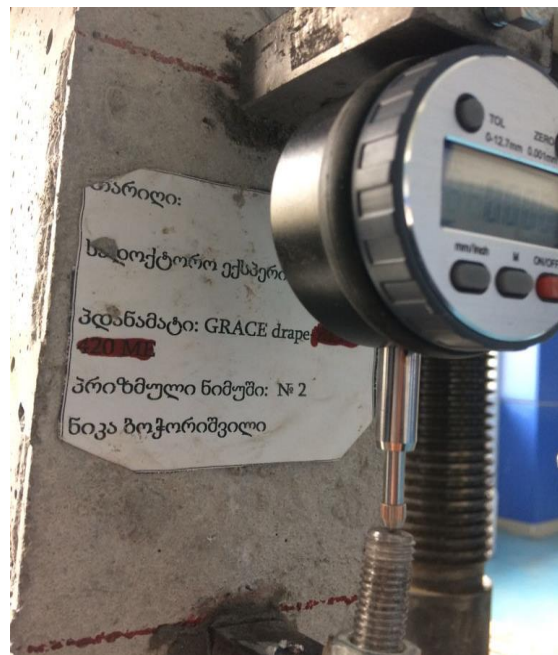
ნახაზი №4.2.4

შერეული ბეტონის მუშაობა განმეორებადი სტატიკური დატვირთვის დროს რღვევამდე





სურათი №4.2.1



სურათი №4.2.2

თავი 5. ბეტონის ცოცვადობა და ქიმიური დანამატების გავლენა მის სიდიდეზე

5.1 ბეტონის ცოცვადობა და მისი მექანიზმი

ბეტონის ცოცვადობა წარმოადგენს მის ფიზიკურ მახასიათებელს, რომელიც თავს იჩენს გრძელვადიანი დატვირთვების პირობებში. კერძოდ, ცოცვადობა არის ბეტონში დეფორმაციების გაზრდა მუდმივი დატვირთვის პირობებში. თავისი ბუნებით, ცოცვადობის დეფორმაციები მიღევადია, თუმცა შეუძლია გამოიწვიოს ძაბვების რელაქსაცია (შემსუბუქება) კონსტრუქციებში. ამის გამო, მათში მნიშვნელოვნად მცირდება ძაბვები, რაც, ზოგიერთ შემთხვევაში, შეიძლება დადებით მოვლენად ჩაითვალოს, თუმცა, რელაქსაციას შეიძლება ქონდეს უარყოფითი გავლენაც წინასწარდაძაბულ კონსტრუქციებში. კერძოდ, შეიძლება მოხდეს არმატურის წინასწარი გაჭიმვის სიდიდის არასასურველი კარგვები.

ცოცვადობის დეფორმაციებზე ძირითადად გავლენას ახდენს შემდეგი ფაქტორები:

- შემვსებები;
- წყალცემენტის ფარდობა;
- ბეტონის ასაკი;
- გარემოს ფარდობითი ტენიანობა.

შემვსებებს შეუძლია დადებითი როლი ითამაშონ ცოცვადობის სიდიდის შემცირებაში. კერძოდ, რაც უფრო მტკიცეა, ანუ რაც უფრო მეტია მათი დრეკადობის მოდული, მით უფრო ნაკლებია ცოცვადობა. გარდა ამისა, რაც უფრო მეტია შემავსებლების პროცენტული წილი ბეტონში, მით უფრო ნაკლებია ცოცვადობა.

რაც უფრო ნაკლებია **წყალცემენტის ფარდობა**, მით უფრო ნაკლებია ცოცვადობა და პირიქით.

რაც უფრო მეტია **ბეტონის ასაკი**, მით უფრო მცირეა ცოცვადობა, რადგან ცემენტის გელის ხარისხი, ასაკთან ერთად, მატულობს.

რაც უფრო მეტია გარემოს ფარდობითი ტენიანობა, რომელშიც მდებარეობს კონსტრუქცია, მით უფრო ნაკლებია ცოცვადობა და პირიქით.

გარდა ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორებისა, ცოცვადობაზე მოქმედებს ცემენტის კლასი, მისი დაფქვის სიწმინდე, ბეტონის ნარევის ძვრადობა, დატვირთვის დაწყების მომენტში ბეტონის ასაკი, გარემოს ტემპერატურა, ბეტონის ნაგებობის ფორმა და ზომები, დატვირთვის სიდიდე, არმატურის რაოდენობა და ა.შ.

5.2 ბეტონის ცოცვადობის კოეფიციენტი და მისი ანგარიშის მეთოდოლოგია

კვლევის მიზანს წარმოადგენდა ბეტონის ცოცვადობის სიდიდის (ცოცვადობის კოეფიციენტების) ანგარიში გარემოს ფარდობითი ტენიანობის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს.

ანგარიშები ეყრდნობა ევროპულ სტანდარტებს, კერძოდ, ევროკოდ 2-ს (ბეტონის ნაგებობების დაპროექტება - ნაწილი 1-1: ზოგადი წესები) [39]. ამ ნორმატიული დოკუმენტის მიხედვით, ცოცვადობის კოეფიციენტი $\varphi(t, t_0)$ შეიძლება გაანგარიშდეს შემდეგი გამოსახულების საშუალებით:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (5.2-1)$$

სადაც φ_0 არის პირობითი ცოცვადობის კოეფიციენტი:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (5.2-2)$$

φ_{RH} არის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ფარდობითი ტენიანობის გავლენას პირობით ცოცვადობის კოეფიციენტზე:

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1\sqrt[3]{h_0}}, \text{ როდესაც } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (5.2-3)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1\sqrt[3]{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2, \text{ როდესაც } f_{cm} > 35 \text{ MPa} \quad (5.2-4)$$

RH არის გარემოს ფარდობითი ტენიანობა %-ში.

$\beta(f_{cm})$ არის ფაქტორი, რომელიც ითვალისწინებს ბეტონის სიმტკიცის გავლენას პირობით ცოცვადობის კოეფიციენტზე:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (5.2-5)$$

f_{cm} არის 28 დღის ასაკის ბეტონის საშუალო სიმტკიცე კუმშვაზე მპა-ში

$\beta(t_0)$ არის ფაქტორი, რომელიც ითვალისწინებს ბეტონის ასაკის გავლენას პირობით ცოცვადობის კოეფიციენტზე:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1 + t_0^{0,20})} \quad (5.2-6)$$

h_0 არის კონსტრუქციის ელემენტის პირობითი ზომა მმ-ში:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} \quad (5.2-7)$$

სადაც A_c არის განიკვეთის ფართობი;

u - ატმოსფეროსთან კონტაქტის მქონე კონსტრუქციის ელემენტის პერიმეტრი;

$\beta_c(t, t_0)$ - კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს ცოცვადობის განვითარებას დროში დატვირთვის შემდეგ და შეიძლება გაანგარიშდეს შემდეგი გამოსახულების საშუალებით:

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0,3} \quad (5.2-8)$$

t - ბეტონის ასაკი (დღეებში) შეფასების მომენტში;

t_0 - ბეტონის ასაკი (დღეებში) დატვირთვის მომენტში;

$(t - t_0)$ - დატვირთვის ხანგრძლივობა (დღეებში);

β_H - კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია ფარდობით ტენიანობაზე (RH არის %-ში) და კონსტრუქციის ელემენტის პირობით ზომაზე (მმ):

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012 RH^{18}) \right] h_0 + 250 \leq 1500 \quad \text{როდესაც } f_{cm} \leq 35 \quad (5.2-9)$$

$$\beta_H = 1,5 \left[1 + (0,012 RH^{18}) \right] h_0 + 250 \alpha_3 \leq 1500 \alpha_3 \quad \text{როდესაც } f_{cm} \geq 35 \quad (5.2-10)$$

$\alpha_{1/2/3}$ - კოეფიციენტები, რომლებიც ითვალისწინებენ ბეტონის სიმტკიცის გავლენას:

$$\alpha_1 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} \quad \alpha_2 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} \quad \alpha_3 = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} \quad (5.2-11)$$

5.3 საბაზო და დანამატიანი ბეტონების ცოცვადობის კოეფიციენტების ანგარიში

ცოცვადობის კოეფიციენტების დადგენის ზემოთ აღწერილი მეთოდით, გაანგარიშებული იქნა სამი სხვადასხვა შემადგენლობის ბეტონი. ეს ის ბეტონებია, რომლებიც ჩვენს მიერ იქნა შერჩეული კვლევის მიზნით:

1. ბეტონი **ბ-1**: კლასიკური, ე.წ. საბაზო ბეტონი, რომელშიც არ არის გარეული რაიმე სახის ქიმიური დანამატი;
2. ბეტონი **ბ-2**: საბაზო ბეტონის შემადგენლობას დამატებული მიკროსილიკა 7%.
3. ბეტონი **ბ-3**: საბაზო ბეტონის შემადგენლობას დამატებული მიკროსილიკა 7% და პლასტიფიკატორი 0.5 %.

სამივე ბეტონი წარმოდგენილია კუმშვაზე გამოსაცდელი კლასიკური პრიზმული ნიმუშების სახით ზომებით: 10x10x30 სმ. მათ შემადგენლობაში გამოყენებული იქნა ბაზალტის შემავსებლები და CEM II 32.5 კლასის ცემენტი. უფრო დეტალურად მათი შემადგენლობის შერჩევის წინაპირობები და კომპონენტების პროპორციები აღწერილია პირველ თავში.

თავდაპირველად, სამივე ბეტონის ნიმუშები გამოცდილი იქნა წნეხზე გრძელვადიანი დატვირთვის პირობებში. შემდეგ ნიმუშები მიყვანილი იქნა რღვევამდე. ექსპერიმენტების შედეგად დადგინდა 28 დღის ასაკის ბეტონების სიმტკიცე კუმშვაზე:

$$f_{cm} = 34,2 \text{ მპა} - \text{ბეტონი ბ-1}$$

$$f_{cm} = 38,5 \text{ მპა} - \text{ბეტონი ბ-2}$$

$$f_{cm} = 46,4 \text{ მპა} - \text{ბეტონი ბ-3}$$

ცოცვადობის კოეფიციენტები ნაანგარიშები იქნა შემდეგ სავარაუდო საექსპლუატაციო პერიოდებზე: $t=5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45$ და 50 წელიწადი.

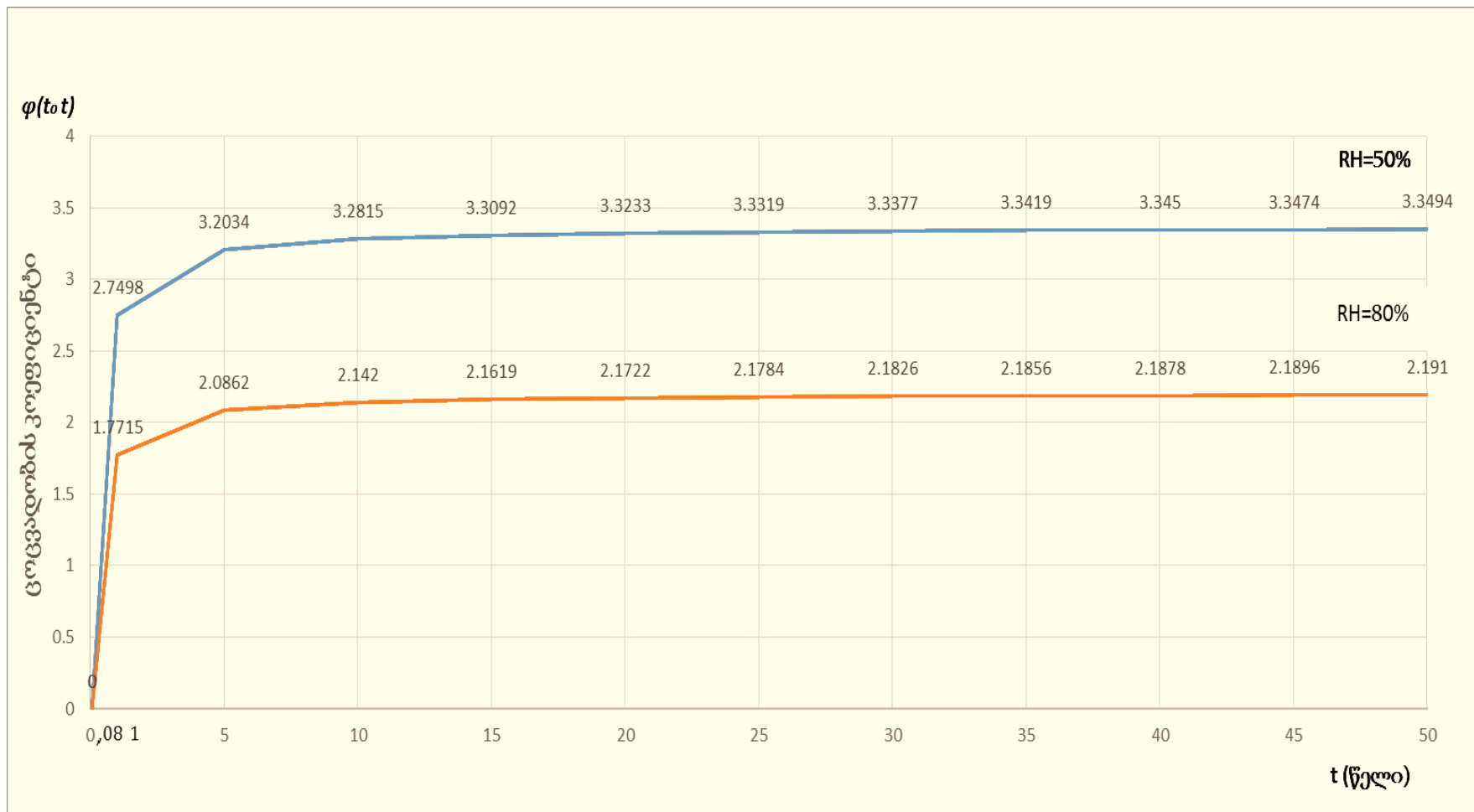
ანგარიშებში გათვალისწინებული იქნა გარემოს ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი ვარიანტი: მშრალი კლიმატი (RH = 50%) და ტენიანი კლიმატი (RH = 80%).

ანგარიშის შედეგები გრაფიკული ფორმით მოყვანილია ნახაზებზე №5.3.1; №5.3.2 და №5.3.3.

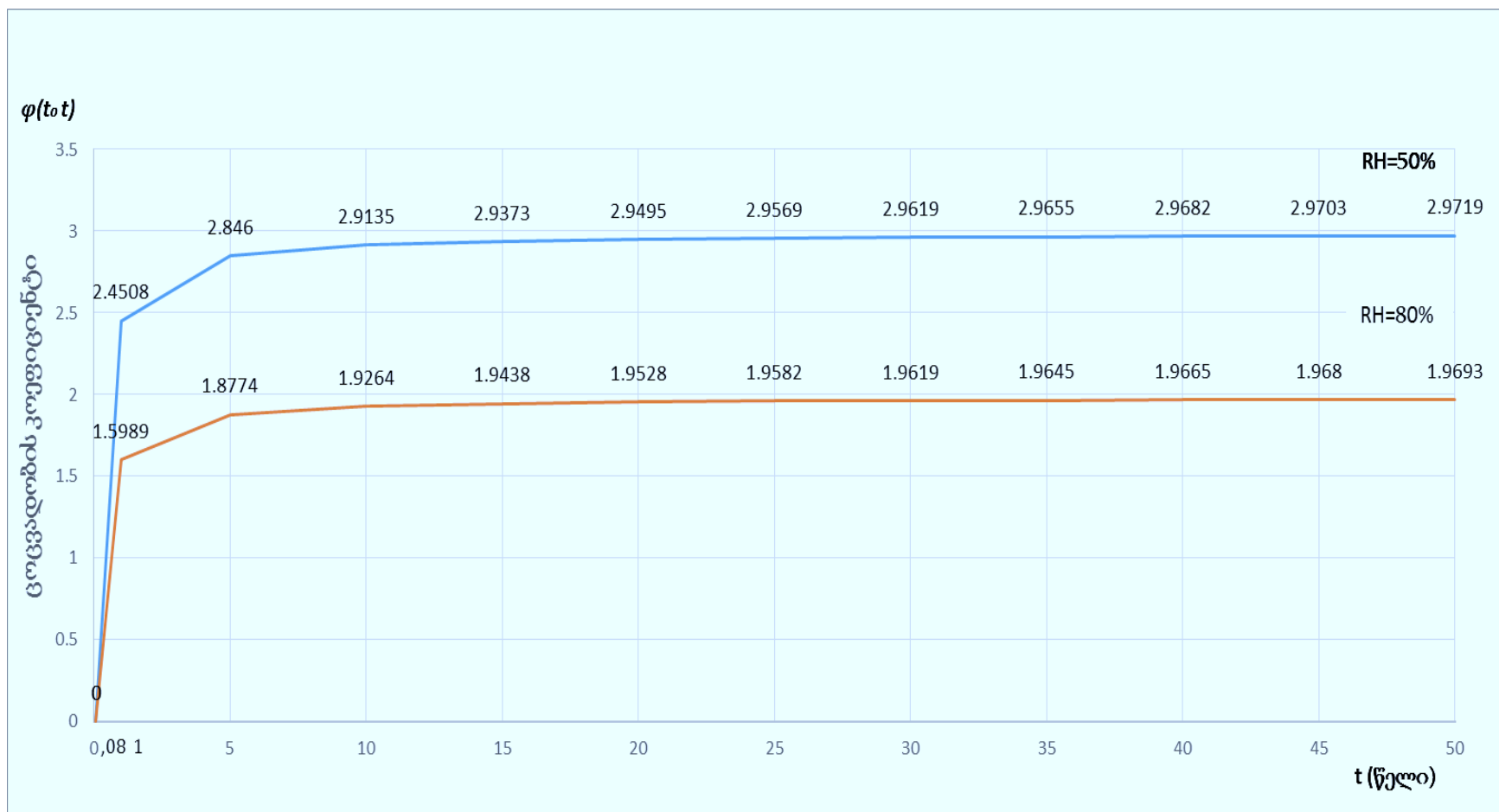
როგორც ანგარიშის შედეგებმა აჩვენა, ცოცვადობის პროცესი სამივე ტიპის ბეტონისათვის საერთო კანონზომიერებით ვითარდება. კერძოდ, ცოცვადობა მნიშვნელოვნად მცირდება დატვირთვის მოდებიდან დაახლოებით 10 წლის შემდეგ, ხოლო პრაქტიკულად წყდება 20 ÷ 25 წლის შემდეგ.

გარემოს ფარდობითი ტენიანობა RH მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ცოცვადობის კოეფიციენტის სიდიდეზე. მშრალი კლიმატის პირობებში (RH = 50%) ცოცვადობის კოეფიციენტები თითქმის 1,5 - ჯერ მეტია ტენიანი კლიმატის პირობებში (RH=80%) დაფიქსირებულ ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობებზე.

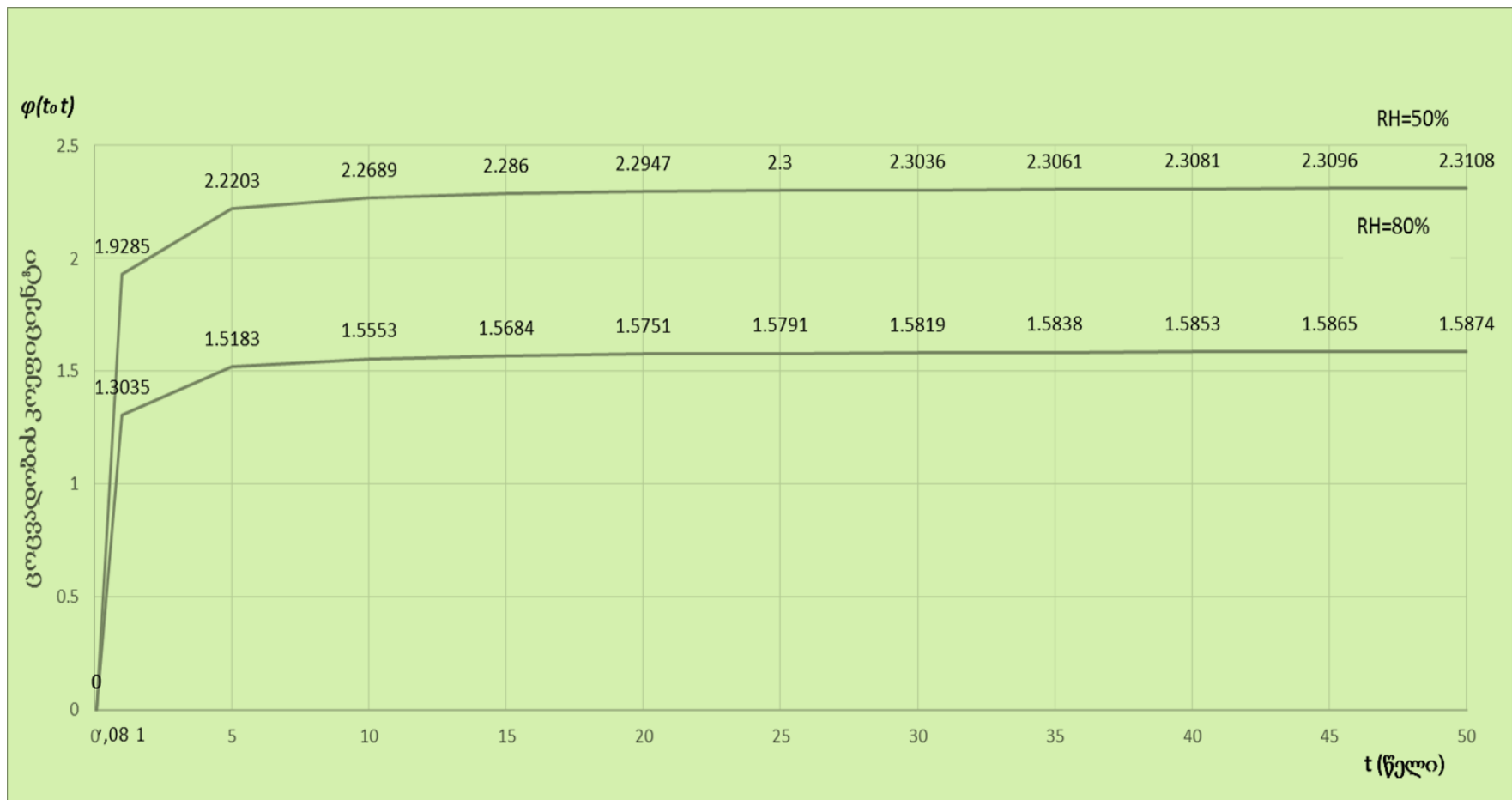
რაც უფრო მეტია ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე, მით უფრო ნაკლებია ცოცვადობის დეფორმაციები. მართო მიკროსილიკის დამატება (ბეტონი **ბ-2**) ცოცვადობის კოეფიციენტებს ამცირებს $1,1 \div 1,2$ - ჯერ საბაზო ბეტონთან (ბეტონი **ბ-1**) შედარებით (ნახ. №5.3.1-№5.3.2). მიკროსილიკისა და პლასტიფიკატორის ერთობლივი დამატება (ბეტონი **ბ-3**) ცოცვადობის კოეფიციენტებს ამცირებს თითქმის $1,6 \div 1,8$ - ჯერ (ნახ. №5.3.3).



ნახ. №5.3.1 საბაზო ბეტონის (ბ-1) ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცვლილება დროში ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: **RH=50%** - მშრალი კლიმატი და **RH=80%** - ტენიანი კლიმატი



ნახ. №5.3.2 დანამატებიანი ბეტონის (ბ-2) ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცვლილება დროში ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: **RH=50%** - მშრალი კლიმატი და **RH=80%** - ტენიანი კლიმატი



ნახ. №5.3.3 დანამატეზიანი ბეტონის (ბ-3) ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცვლილება დროში ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: **RH=50%** - მშრალი კლიმატი და **RH=80%** - ტენიანი კლიმატი

5.4 საბაზო და დანამატებიანი ბეტონების კუმშვაზე საშუალო სიმტკიცის და დრეკადობის მოდულის ანგარიში ასაკის გათვალისწინებით

როგორც ანგარიშებმა აჩვენა, ბეტონის ცოცვალობა, როგორც ფიზიკური მოვლენა, პირდაპირ კავშირშია ბეტონის ასაკთან. ასაკზე არის დამოკიდებული აგრეთვე ბეტონის სიმტკიცეც. ბეტონის ასაკობრივ სიმტკიცეს კუმშვაზე განსაზღვრავს ცემენტის ტიპი, ტემპერატურა და გამყარების პირობები. ევროკოდ-2-ს [39] თანახმად, სხვადასხვა ასაკის ბეტონის საშუალო სიმტკიცე კუმშვაზე $f_{cm}(t)$ შეიძლება გაანგარიშდეს შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (5.4-1)$$

სადაც

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (5.4-2)$$

$\beta_{cc}(t)$ არის ბეტონის t ასაკზე დამოკიდებული კოეფიციენტი;

f_{cm} - 28 დღის ბეტონის საშუალო სიმტკიცე კუმშვაზე;

t - ბეტონის ასაკი (დღეები);

s - ცემენტის კლასზე დამოკიდებული კოეფიციენტი:

= 0,20 - ცემენტებისთვის, რომელთა სიმტკიცის კლასებია CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R (კლასი R)

= 0,25 - ცემენტებისთვის, რომელთა სიმტკიცის კლასებია CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (კლასი N)

= 0,38 - ცემენტებისთვის, რომელთა სიმტკიცის კლასებია CEM 32,5 N (კლასი S).

ბუნებრივია, რომ სიმტკიცის გარდა, დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობებიც მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ასაკზე. [39]-ის თანახმად, ბეტონის დრეკადობის მოდულის მნიშვნელობების ცვლილება დროში შეიძლება შეფასდეს შემდეგი გამოსახულების საშუალებით:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} E_{cm} \quad (5.4.-3)$$

სადაც $E_{cm}(t)$ და $f_{cm}(t)$ ბეტონის დრეკადობის მოდულის და კუმშვაზე საშუალო სიმტკიცის მნიშვნელობები t ასაკში (დღეებში), ხოლო E_{cm} და f_{cm} - შესაბამისი სიდიდეები 28 დღის ასაკში.

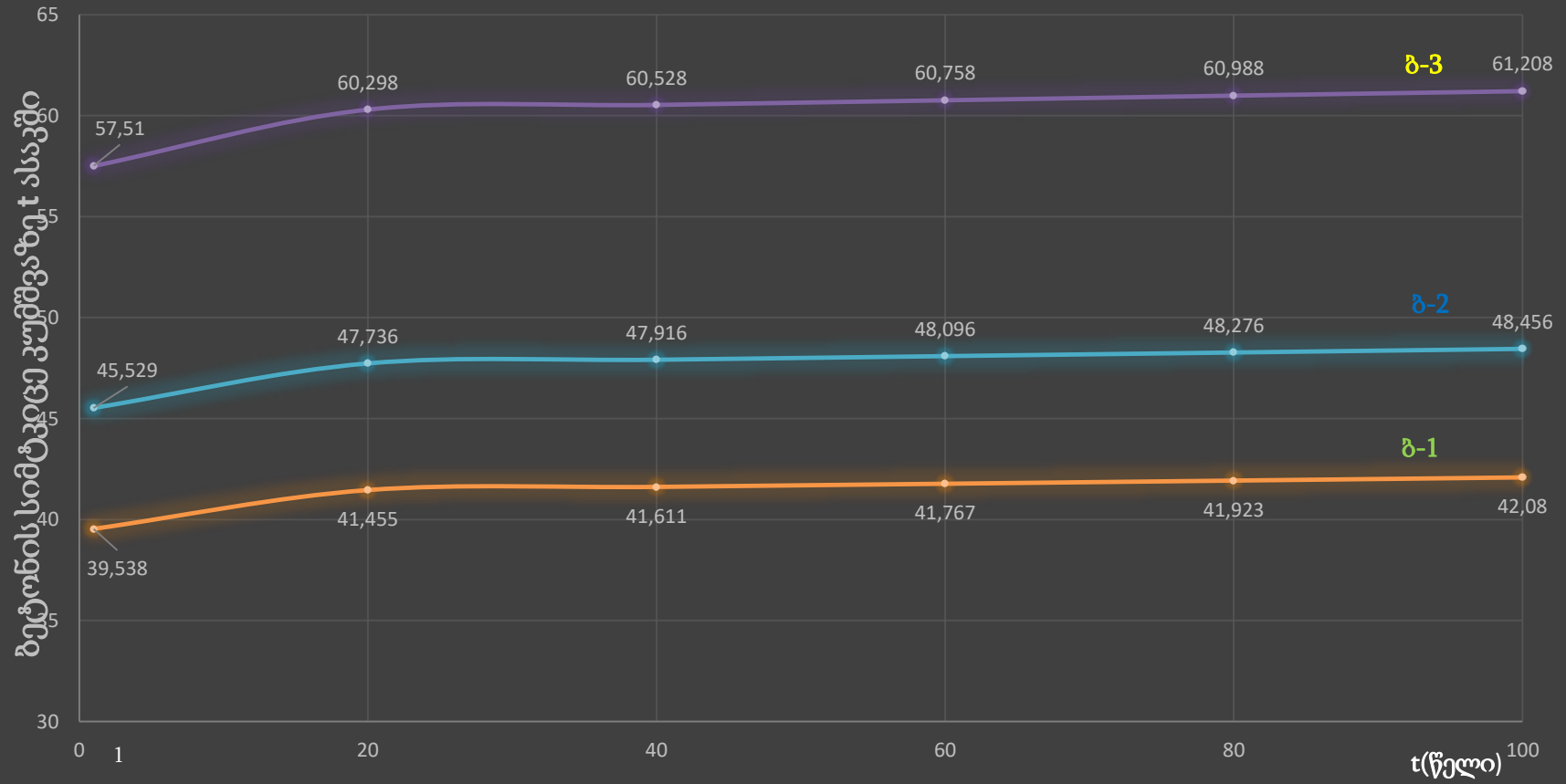
ისევე, როგორც ცოცვადობის კოეფიციენტების ანგარიშების დროს, სიმტკიცე და დრეკადობის მოდული გაანგარიშებული იქნა სამი სხვადასხვა შემადგენლობის ბეტონისათვის: **ბ-1**: კლასიკური, ე.წ. საბაზო ბეტონი, რომელშიც არ არის გარეული რაიმე სახის ქიმიური დანამატი ($f_{cm} = 34,2$ მპა); **ბ-2**: საბაზო ბეტონის შემადგენლობას დამატებული მიკროსილიკა ($f_{cm} = 38,5$ მპა) და **ბ-3**: საბაზო ბეტონის შემადგენლობას დამატებული მიკროსილიკა და პლასტიფიკატორი ($f_{cm} = 46,4$ მპა).

ანგარიშები ჩატარდა (1-12), (1-13) და (1-14) გამოსახულებების საფუძველზე შემდეგი სავარაუდო ასაკისათვის: $t = 1, 20, 40, 60, 80$ და 100 წელიწადი.

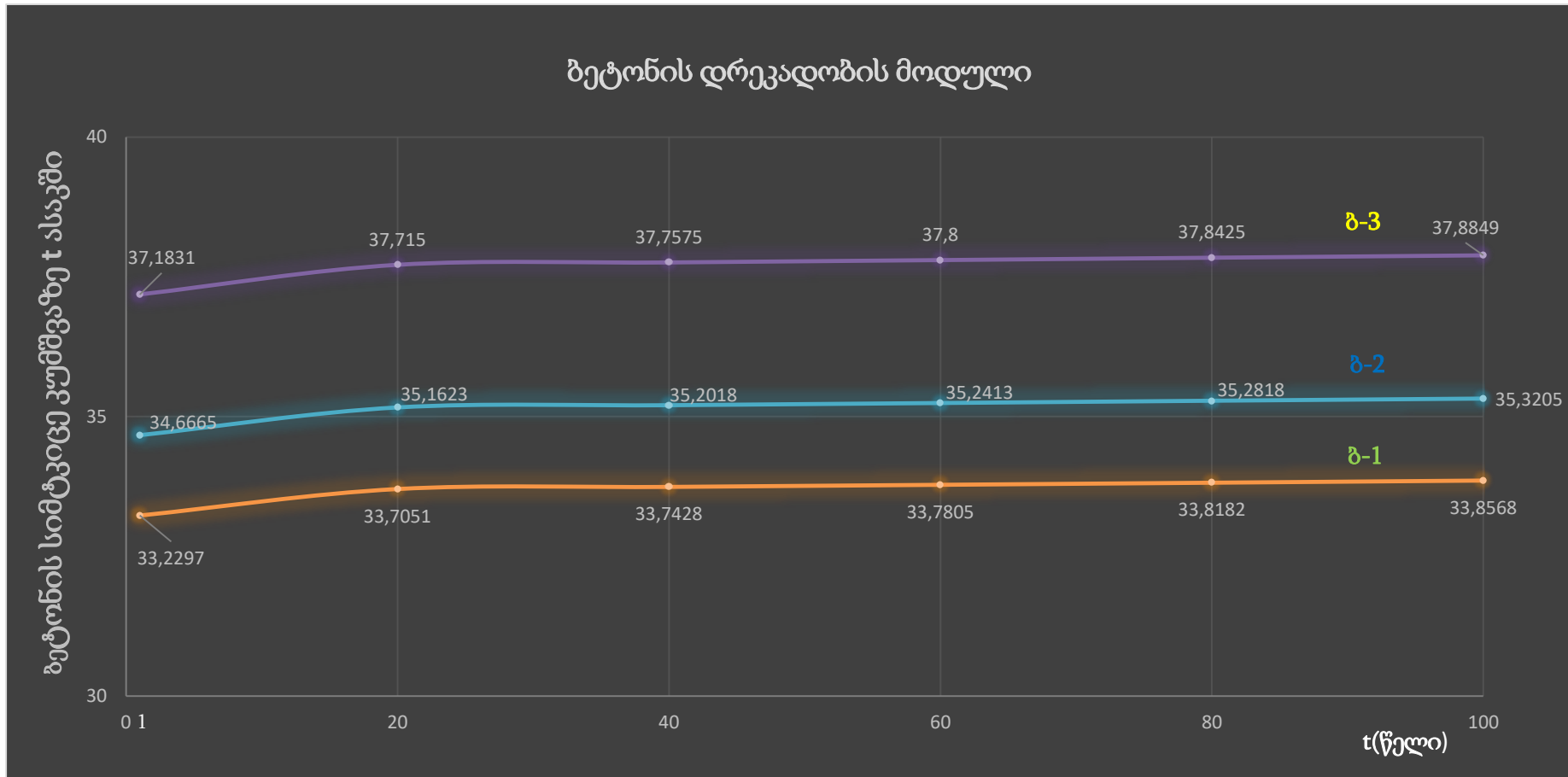
ანგარიშის შედეგები გრაფიკული ფორმით მოყვანილია ნახ. №5.5.1 და №5.5.2.

როგორც ანგარიშების შედეგებმა აჩვენა, ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე პრაქტიკულად ფორმირდება ჩამოსხმიდან დაახლოებით 10 წლის შემდეგ, თუმცა მისი განმტკიცების პროცესი უმნიშვნელოდ გრძელდება დაახლოებით 20 წლამდე. ეს ეხება როგორც კლასიკურ, ასევე დანამატებიან ბეტონებს. მაგალითად, საბაზო ბეტონის (**ბ-1**) სიმტკიცე პირველი 10 წლის განმავლობაში მატულობს დაახლოებით 21%-ით 28 დღის ბეტონის სიმტკიცესთან შედარებით. უნდა აღინიშნოს, რომ პირველი წლის განმავლობაში სიმტკიცე მატულობს დაახლოებით 16%-ით, ხოლო დანარჩენი 5% მოდის შემდეგ ცხრა წელიწადზე. დაახლოებით ანალოგიური პროპორციით მატულობს დანამატებიანი ბეტონების (**ბ-2** და **ბ-3**) სიმტკიცეც. დაახლოებით ანალოგიური სურათი იკვეთება დრეკადობის მოდულის ცვლილებასთან დაკავშირებით.

ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე



ნახ. №5.4.1 საბაზო (ბ-1), დანამატებიანი (ბ-2) და დანამატებიანი (ბ-3) ბეტონების კუმშვაზე სიმტკიცის მნიშვნელობების ცვლილებები დროში



ნახ. №5.4.2 საბაზო (ბ-1), დანამატებიანი (ბ-2) და დანამატებიანი (ბ-3) ბეტონების დრეკადობის მოდულების მნიშვნელობების ცვლილება დროში

თავი. 6 ძირითადი დასკვნები

1. გამოკვლეული იქნა ადგილობრივი ინერტული მასალებისა და ჰიდრავლიკური შემკვრელი ნივთიერების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები და საქართველოს ბაზარზე არსებული ყველაზე მოხმარებადი და რენტაბელური დანამატები (მიკროსილიკა, GRACE ZYLA® 420 M). შესწავლილია მათი გამოყენების არეალი. დადგენილია კვლევისათვის საჭირო როგორც დანამატიანი, ასევე საბაზო ბეტონის ოპტიმალური შედგენილობა;
2. ექსპერიმენტებით შესწავლილი იქნა თითოეული შედგენილობის ბეტონებისათვის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები. მათ შორის გამოირჩა მაღალი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებით შერეული დანამატებიანი ბეტონი, რომლის სიმტკიცემ ცენტრალურ კუმშვაზე 28 დღის ასაკში შეადგინა (50 მპა), მასითი წყალშთანთქმა **0,91 %**, მოცულობითი წყალშთანთქმა **2,09 %**, წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტი **w=12** (ატმ);
3. დადგენილია, რომ დანამატიან ბეტონში დრეკადობის მოდული 0.9R-მდე არის მუდმივი სიდიდე, რაც მასალის ერთგვაროვნების მაჩვენებელია. აღნიშნული გამოწვეულია დანამატების მოქმედების შედეგად ბეტონში არსებული ბზარების და ფორების შევსებით და მათში ძაბვების კონცენტრაციის შემცირებით;
4. დანამატიანი ბეტონების სტრუქტურული ცვლილებების საზღვრების დადგენით მივიღეთ, რომ დანამატიანი შეზღუდული ბეტონები იქნებიან მშრალ, ბუნებრივად მშრალ თუ წყალგაჟღენთილ მდგომარეობაში, დატვირთვის სიჩქარის ცვლილება არ იწვევს სიმტკიცის შემცირებას და შესაბამისად დიაგრამის გამრუდებას, ხოლო ჰუასონის კოეფიციენტი მუდმივი სიდიდეა მის რღვევამდე, რაც მიანიშნებს დანამატიანი ბეტონის სტრუქტურის მდგრადობაზე;
5. დადგენილია, რომ დანამატიან ბეტონებში განმეორებით და მუდმივ დატვირთვებზე გამოცდისას მისი დრეკადობის მოდული მუდმივი სიდიდეა;

6. დანამატიანი ბეტონების სიმტკიცის პარამეტრების კვლევისას დადგინდა, რომ დანამატებით შედგენილი ბეტონის ნარევით (განსაკუთრებით კომბინირებული) ვარიანტის შემთხვევაში ბეტონი სწრაფად აღწევს სიმტკიცის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, რაც თავის მხრივ გვაძლევს კონსტრუქციის ადრეულ ასაკში ექსპლოატაციაში გაშვების საშუალებას;
7. თეორიულად შესწავლილი და გამოვლენილია ქიმიური დანამატების გავლენა ცოცვადობის დეფორმაციაზე, ევრო ნორმების საფუძველზე მომზადებულია თეორიული ანგარიშები ჩვენს მიერ შემოთავაზებულ დანამატთან ბეტონებზე; ცოცვადობის პროცესი, როგორც საბაზო (ბ-1), ასევე დანამატებიანი ბეტონებისათვის (ბ-2 და ბ-3) საერთო კანონზომიერებით ვითარდება. კერძოდ, ცოცვადობა მნიშვნელოვნად მცირდება დატვირთვის მოდებიდან დაახლოებით 10 წლის შემდეგ. გარემოს ფარდობითი ტენიანობა RH მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ცოცვადობის კოეფიციენტის სიდიდეზე;
8. რეკომენდებულია შერეული დანამატებით შედგენილი ბეტონის (მიკროსილიკა+GRACE ZYLA® 420 M) გამოყენება ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებში და სხვა საპასუხისმგებლო კონსტრუქციებში, სადაც უზრუნველყოფილი უნდა იყოს კონსტრუქციის წყალშეუღწევადობა და მაღალი სიმტკიცე. ჩვენს მიერ შეთავაზებული იქნა რეკომენდაციის სახით აღნიშნული დანამატებიანი ბეტონის გამოყენების შესაძლებლობა ფოთის პორტის ნავმისადგომი საფარის მოწყობის საქმეში.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. ლ. კლიმაშვილი, დ. გურგენიძე, ა. ჩიქოვანი „ბეტონები, ტექნიკური მოთხოვნები, გამოცდის მეთოდები ევროპულ სამშენებლო ნორმებთან შესაბამისობით. თბილისი 2017;
2. ა. ჩიქოვანი; ბეტონის ტექნოლოგია. თბილისი, 2015;
3. მ. ტურმელაძე; ლ. ზუკატიშვილი „სტრუქტურული ფაქტორების გავლენა ბეტონის დეფორმირებასა და რღვევაზე“. თბილისი 2008;
4. Баженов Ю.М. Технология бетона. Москва. 1993;
5. ა. ქიშმიანი, რ.მ. შამსევი, ს.ვ. კალშინა, პერმის ეროვნული პოლიტექნიკური უნივერსიტეტი, პერმი, რუსეთი. „დანამატების გავლენა ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე“. 2012 წ.
6. В.А. Журавлев, Т.В. Мурашкина, Н.В. Гилязидинова. ХИМИЧЕСКАЯ ДОБАВКА К БЕТОНАМ НА ОСНОВЕ КАРБАМИДА. УДК 667.972.16;
7. National Concrete Pavement Technology Center Institute for Transportation Iowa State University;
8. <http://www.cptechcenter.org/>
9. Ребиндер П.А. Избранные труды. Физико-химическая механика. М. Наука. 1979;
10. Балавадзе В.К. Новое о прочности и деформативности бетона и железобетона. Тбилиси: Месნიერება. 1986;
11. Лордкиранидзе М.М. Прочностные и деформативные характеристики бетона с позиций адсорбционной теории о природе его ползучести//Бетон и железобетон. 1992. №12;
12. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат. 1970;
13. Циლოსани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси: Месნიერება. 1979;

14. Кирилов. А.П. Прочность бетона при динамических нагрузках //Бетон и железобетон. 1987. №2;
15. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железбетона. М.: Госстройиздат. 1961;
16. F. T. K. Au and X. T. Si, “Accurate time-dependent analysis of concrete bridges considering concrete creep, concrete shrinkage and cable relaxation,” Engineering Structures, vol. 33, no. 1, pp. 118–126, 2011. [View at Publisher](#) · [View at Google Scholar](#) · [View at Scopus](#);
17. M. A. Chiorino and C. Casalegno, “Evaluation of the structural response to the time-dependent behaviour of concrete: part 1—an internationally harmonized format,” Indian Concrete Journal, vol. 86, no. 12, pp. 25–36, 2012. [View at Google Scholar](#) · [View at Scopus](#);
18. M. F. Granata, P. Margiotta, and M. Arici, “Simplified procedure for evaluating the effects of creep and shrinkage on prestressed concrete girder bridges and the application on European and North American prediction models,” Journal of Bridge Engineering, ASCE, vol. 18, no. 12, pp. 1281–1297, 2013. [View at Publisher](#) · [View at Google Scholar](#);
19. P. Acker, Z. P. Bažant, J. C. Chern, C. Huet, and F. H. Wittman, “Measurement of time-dependent strains of concrete,” Materials and Structures, vol. 31, no. 8, pp. 507–512, 1998. [View at Publisher](#) · [View at Google Scholar](#);
20. ACI Committee 209, “Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete,” ACI 209R-92, ACI, Farmington Hills, Mich, USA, 2008. [View at Google Scholar](#);
21. A. Al-Manaseer and J.-P. Lam, “Statistical evaluation of shrinkage and creep models,” ACI Materials Journal, vol. 102, no. 3, pp. 170–176, 2005. [View at Google Scholar](#) · [View at Scopus](#);
22. Z. P. Bazant and J. C. Chern, “Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism,” Materials and Structures, vol. 18, no. 1, pp. 1–20, 1985. [View at Publisher](#) · [View at Google Scholar](#) · [View at Scopus](#);

23. Z. P. Bazant and S. Bawenja, “Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3,” *Materials and Structures*, vol. 28, no. 6, pp. 357–365, 1995. [View at Publisher](#) · [View at Google Scholar](#);
24. CEB, “Structural concrete—textbook on behavior, design and performance. Updated knowledge of the CEB/FIP model code 1990,” *fib Bulletin*, vol. 2, pp. 37–52, 1999. [View at Google Scholar](#);
25. N. J. Gardner and M. J. Lockman, “Design provisions for drying shrinkage and creep of normal strength concrete,” *ACI Materials Journal*, vol. 98, no. 2, pp. 159–167, 2001. [View at Google Scholar](#) · [View at Scopus](#);
26. R. I. Gilbert and G. Ranzi, *Time-Dependent Behavior of Concrete Structures*, Spon Press, 2010;
27. Z. P. Bažant and F. H. Wittmann, *Creep and Shrinkage in Concrete Structure*, John Wiley & Sons, 1982;
28. A. Ghali, R. Favre, and M. Elbadry, *Concrete Structures: Stresses and Deformations*, Chapman and Hall, 1986;
29. R. I. Gilbert, *Time Effects in Concrete Structures*, Elsevier Science Publishers, 1988;
30. M. Jirasek and Z. P. Bažant, *Inelastic Analysis of Structures*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2002;
31. H. Rusch, D. Jungwirth, and H. K. Hilsdorf, *Creep and Shrinkage Their Effect on the Behavior of Concrete Structures*, Springer, New York, NY, USA, 1983;
32. W. H. Glanville, “Studies in reinforced concrete—III, the creep or flow of concrete under load,” *Building Research Technical Paper 12*, Department of Scientific and Industrial Research, London, UK, 1930. [View at Google Scholar](#);
33. O. Faber, “Plastic yield, shrinkage and other problems of concrete and their effects on design,” in *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 225, part I, pp. 27–73, ICE, London, UK, 1927. [View at Google Scholar](#);
34. Z. P. Bažant, “Prediction of concrete creep effects using age adjusted effective modulus method,” *ACI Structural Journal*, vol. 69, no. 4, pp. 212–217, 1972. [View at Google Scholar](#);

35. Hatt, W. K., "Notes on the Effect of Time Element in Loading Reinforced Concrete Beams," Proc. ASTM 7 (1907) 421-433;
36. Zdenllk P. Bazant, "Theory of Creep and Shrinkage in 'Concrete Structures: A ·Precis of Recent Developments", Mechanics Today, Vol. 2, ed. by S. Nemat-Nasser, Pergamon Press, Chapt. I, pp. 1-93, IQ'15;
37. Aleksandrovskii, S. V., Analysis 0/ Plain and Reinlorced Concrete Structures for . Temperature and Moisture Eleel, (with Account 0/ Creep) (in Russian), Stroyizdat, Moscow (1966), 443 pp;
38. Gvozdev. A. A., "Creep of Concrele" (survey, in Russian). MeIc"anika Tverdogo Tela Proc. of the 2nd Nat. Conf. on Theor. and Appl. Mech. Acad Sci USSR M ' (1966) 117-152.
39. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standartization, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels, Ref. No. EN 1992-1-1 :2004: E;
40. M. Lordkipanidze, O. Giorgishvili, I. Salukvadze, N.Botchorishvili, A. Tatanashvili „Experimental and Theoretical Studies of the Peculiarities of Concrete Behavior in Time and the Concrete Limit Characteristics from the Standpoint of Creep Adsorption Theory“, 2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement based Materials and Structures - EAC2 12–14 September 2017, ULB-VUB, Brussels, Belgium;
41. M. Lordkipanidze, O. Giorgishvili, I. Salukvadze, N. Botchorishvili, A. Tatanashvili „Experimental and Theoretical Studies of the Peculiarities of Concrete Behavior in Time and the Concrete Limit Characteristics from the Standpoint of Creep Adsorption Theory“, Global journal of Researches in Engineering, Civil and Structural Engineering, USA, Volume 18 Issue 1 Version 1.0 Year 2018;
42. M. Lordkipanidze, O. Giorgishvili, I. Salukvadze, N.Botchorishvili, A. Tatanashvili „Study of the Strength and Deformability of Compressed Concrete according to Creep Adsorption Theory“, Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, vol. 12, no.2, 2018.

43. ს.N.Botchorishvili, . M. Lordkipanidze, , O. Giorgishvili, I. Salukvadze, A. Tatanashvili
„Replacement and Reconstruction of Monument Status Damaged Buildings With
Maximal Maintenance Of its Look. Bulletin of the Georgian National Academy of
Sciences (ბეჭდვასობა)
44. Н. БОЧОРИШВИЛИ. Повышение долговечности железобетонных конструкций на
пористых заполнителях при введении химических добавок.