

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ნიკა ბოჭორიშვილი

ექსპერიმენტალურ-თეორიული კვლევა დანამატებიანი ბეტონის მუშაობისა დროში

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა „მშენებლობა“ შიფრი 0406

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. აკადემიკოსი, თამაზ შილაკაძე

პროფესორი, გიორგი დალაქიშვილი

დაცვა შედგება 2019 წლის \_\_\_\_\_ ივლისს, \_\_\_\_\_ სთ-ზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის  
სადისერტაციო კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი I, აუდიტორია 508,  
მისამართი: თბილისი 0175, კოსტავას №68<sup>ბ</sup>;

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატის -ფაკულტეტის ვებგვერდზე;

სადისერტაციო საბჭოს

სწავლული მდივანი:

პროფესორი დ. ტაბატაძე

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

ჩვენს რეგიონში ისევე, როგორც ევროპის წამყვან ქვეყნებში, მშენებლობები მიმდინარეობს პროგრესული მონოლითური მეთოდებით, რომლის ტექნოლოგიაც დაფუძნებულია ბეტონში მოდიფიცირებული დანამატების გამოყენებაზე. 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. ერთ-ერთი ყველაზე უფრო ეფექტური და პერსპექტიული მიმართულება თანამედროვე მშენებლობის ქიმიზაციის მიმართულებაში არის ორგანული და არაორგანული მოდიფიცირებული დანამატების შეყვანა ბეტონის ნარევიში.

როგორც ცნობილია, ბეტონში დანამატების გამოყენებით მალღდება მისი ტექნოლოგიური თვისებები. კერძოდ, შედიან რა ბეტონის სტრუქტურაში ახდენენ ჰეტეროგენული 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 ფართოდ მოხმარება. 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 ამცირებენ ბეტონის ნარევიში წყლის რაოდენობის მოთხოვნას, მისი პლასტიურობის შენარჩუნებით

თემის აქტუალობა განპირობებულია იმით რომ, დანამატიანი ბეტონები სულ უფრო ფართო გამოყენებას პოულობს სამშენებლო ინდუსტრიაში, ამავე დროს მათი სიმტკიცე და დეფორმატიულობის მახასიათებლები არ არის სათანადო დონეზე შესწავლილი. სწორედ ამ საკითხების კვლევას 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.

სუპერპლასტიფიკატორები წარმოადგენენ სპეციალურ პროდუქტებს მუდმივი შემადგენლობით მკაცრად ნორმირებული თვისებებით. მათი გამოყენებით მიიღება B45 კლასის და უფრო მეტი მაღალი სიმტკიცის ბეტონები. 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.

თემის სახლე – 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 დანამატიანი (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. დანამატიანი ბეტონის სიმტკიცის, დეფორმატიულობის და ზღვრული დეფორმაციების კვლევა ხანმოკლე დატვირთვის დროს;
4. დანამატიანი ბეტონის სიმტკიცისა და დეფორმატიულობის შესწავლა მრავალჯერადი სტატიკური დატვირთვებისას;
5. რეკომენდაციების მომზადება მაღალი ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მქონე დანამატიანი 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 ძირითადი შედეგები სტატიის სახით გამოქვეყნებულია როგორც უცხოურ, ასევე ქართულენოვან

მაღალრეიტინგულ რეფერირებად 5 ჟურნალში, ხოლო მოხსენებული იქნა 2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე.

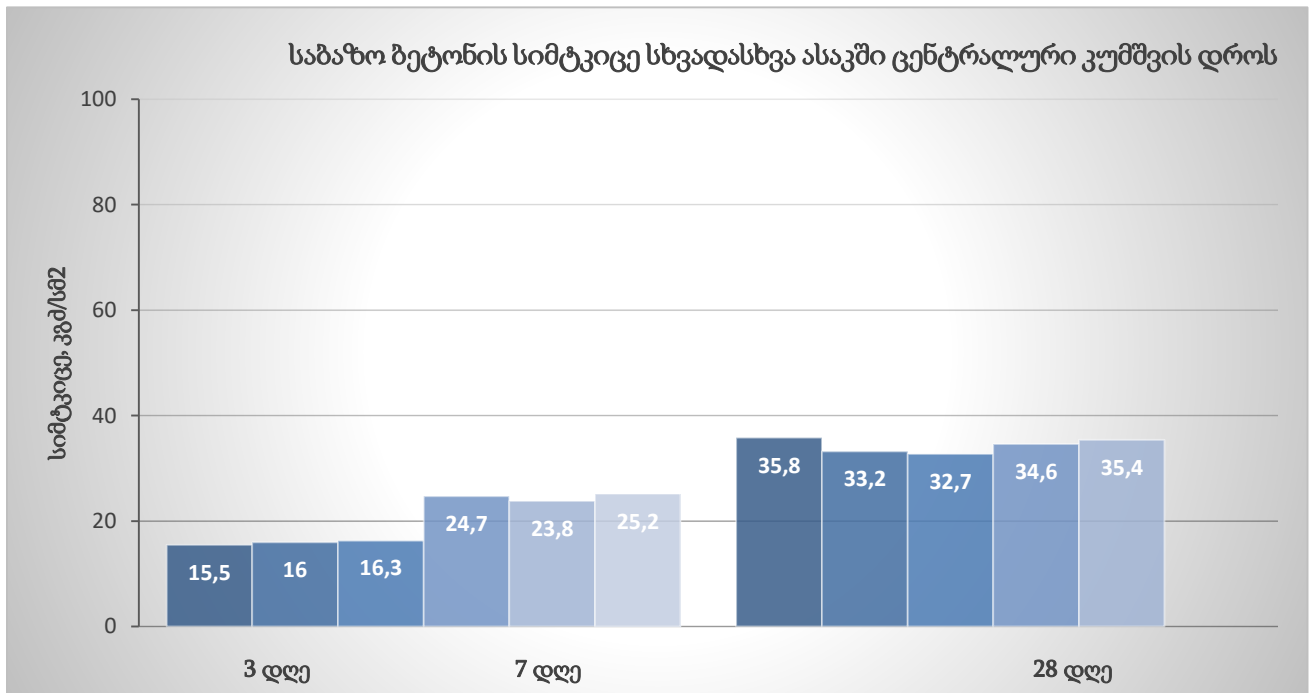
ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავლის, ძირითადი ნაწილის, დასკვნების და გამოყენებული ლიტერატურისაგან. წინამდებარე ნაშრომი შედგება 126 გვერდისგან და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა მოიცავს 44 სამეცნიერო წყაროს.

ნაშრომის შინაარსი - პირველი თავი მოიცავს ლიტერატურულ მიმოხილვას.

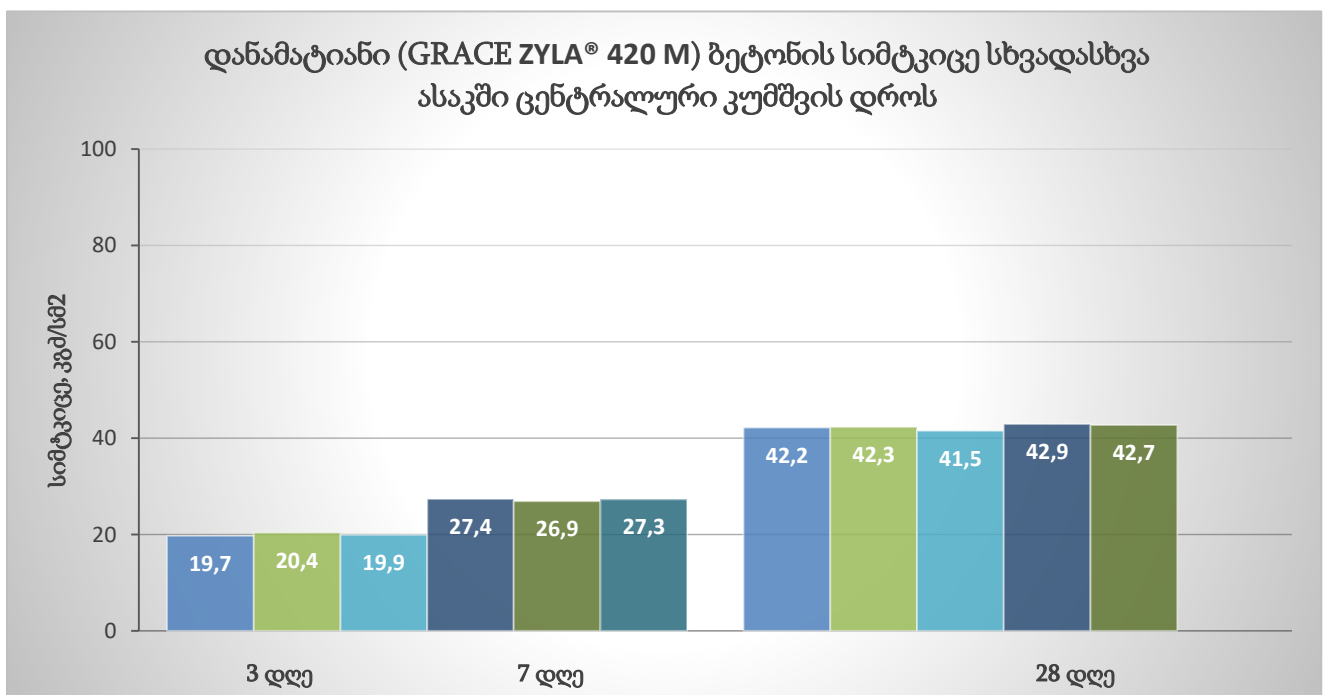
მეორე თავში დადგენილია ბეტონის ოპტიმალური შემადგენელობა და შესწავლილია მისი კომპონენტების, კერძოდ ქვიშა, ღორღი-ხრეში, ცემენტი, დანამატები მიკროსილიკა და სუპერპლასტიფიკატორი GRACE ZYLA® 420 M, ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები. შემოთავაზებულია ორი სახეობის დანამატი, მიკროსილიკა და სუპერპლასტიფიკატორი GRACE ZYLA® 420 M. ეს უკანასკნელი არის წყლის რაოდენობის შემამცირებელი მინარევი, რომელიც აუმჯობესებს ბეტონის ხარისხს და შესამჩნევად გაუმჯობესებული სიმტკიცის მიღებას ნაკლები წყლით. მისი საშუალებით შეგვიძლია მივიღოთ დაბალი წყალცემენტის ფარდობის, შესაბამისი ძვრადობითა და პლასტიურობით, მაღალი სიმტკიცისა და გამძლეობის მქონე ბეტონი.

დანამატი მიკროსილიკა წარმოადგენს ძალიან წვრილ ბუშტისმაგვარ ამორფულ კაჟმიწის ნაწილაკებს, რომლის საშუალო ხვედრითი ზედაპირია 20 კვმ/გრ, გრანულომეტრიული ზომით 0,1 მიკრონი. მისი შემადგენლობის 98 %ს წარმოადგენს SiO<sub>2</sub>. აღნიშნული დანამატის მთავარი და ყველაზე აღსანიშნავი თვისებაა მისი უნიკალური შესაძლებლობა წარმოქმნას არაგადამუშავებადი კრისტალის ფორმაცია ბეტონის ფორებასა და კაპილარებში და წარმოქმნას კრისტალური სტრუქტურა, რომელიც ლუქავს ბეტონს წყლისა და სითხის შეღწევისაგან.

ამავე თავში შესწავლილია შემკვრელი ნივთიერებისა და ინერტული მასალების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები, შემუშავებულია ბეტონის ნარევის ოპტიმალური შემადგენლობები. წარმოდგენილ ნახაზებზე №1, №2 , №3, №4 და №5 ნაჩვენებია სხვადასხვა ასაკის საბაზო და დანამატიანი ბეტონების სიმტკიცეები ცენტრალური კუმშვის დროს.



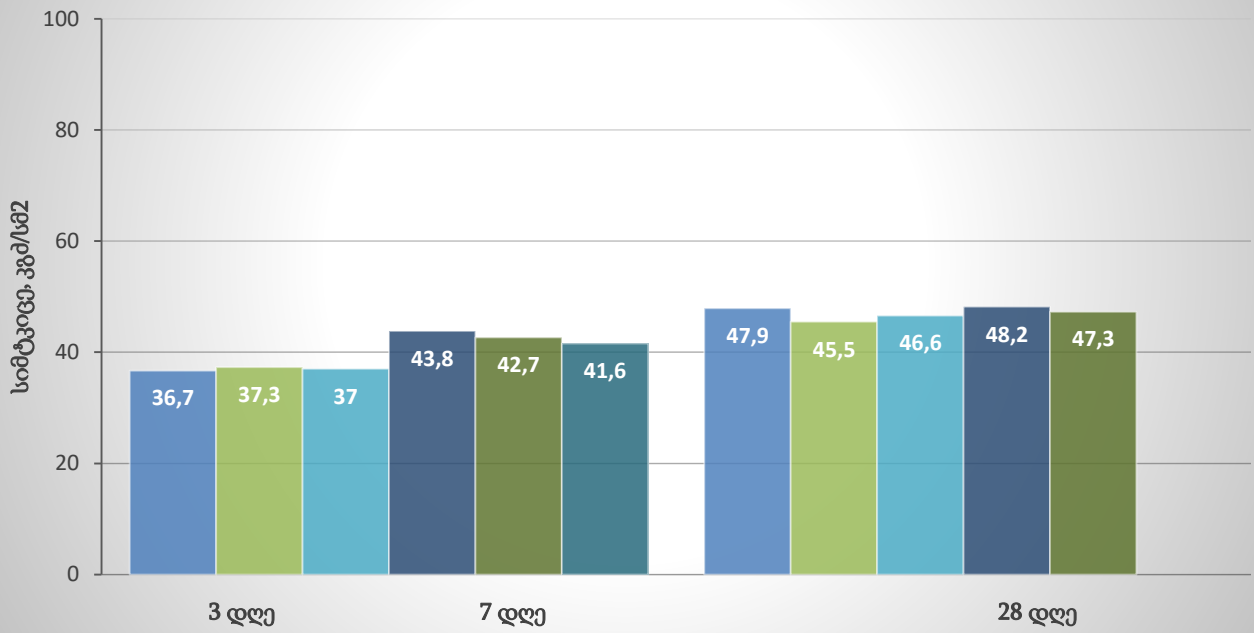
ნახაზი №1



ნახაზი №2

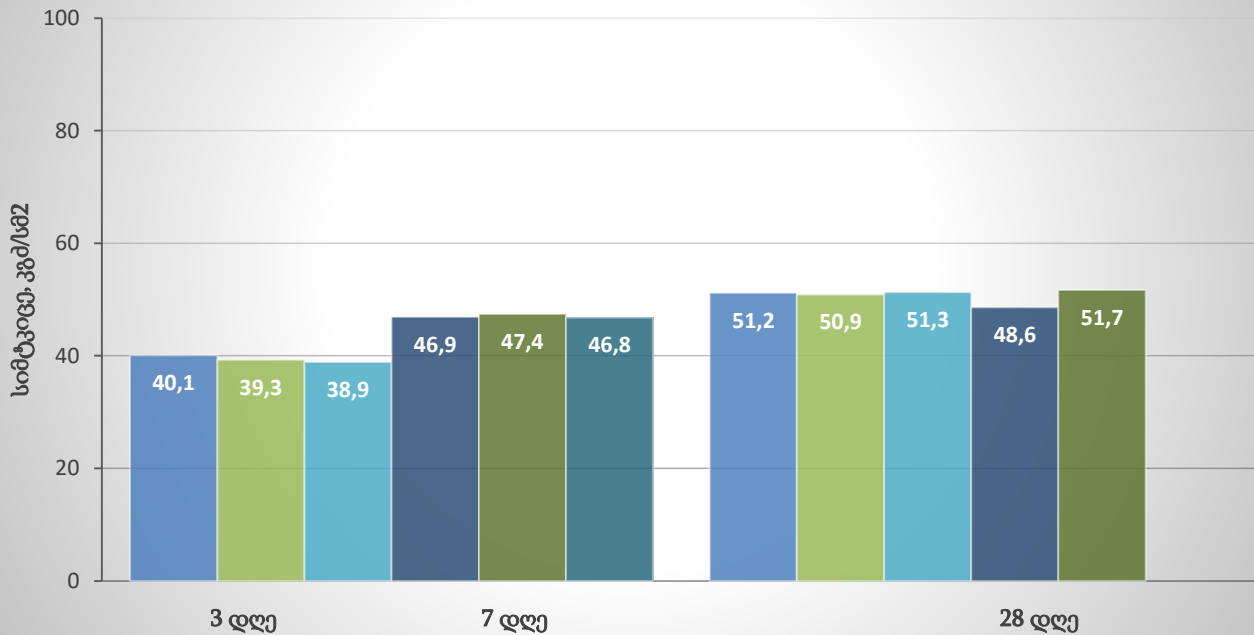


დანამატიანი (მიკროსილიკა) ბეტონის სიმტკიცე სხვადასხვა ასაკში ცენტრალური კუმშვის დროს



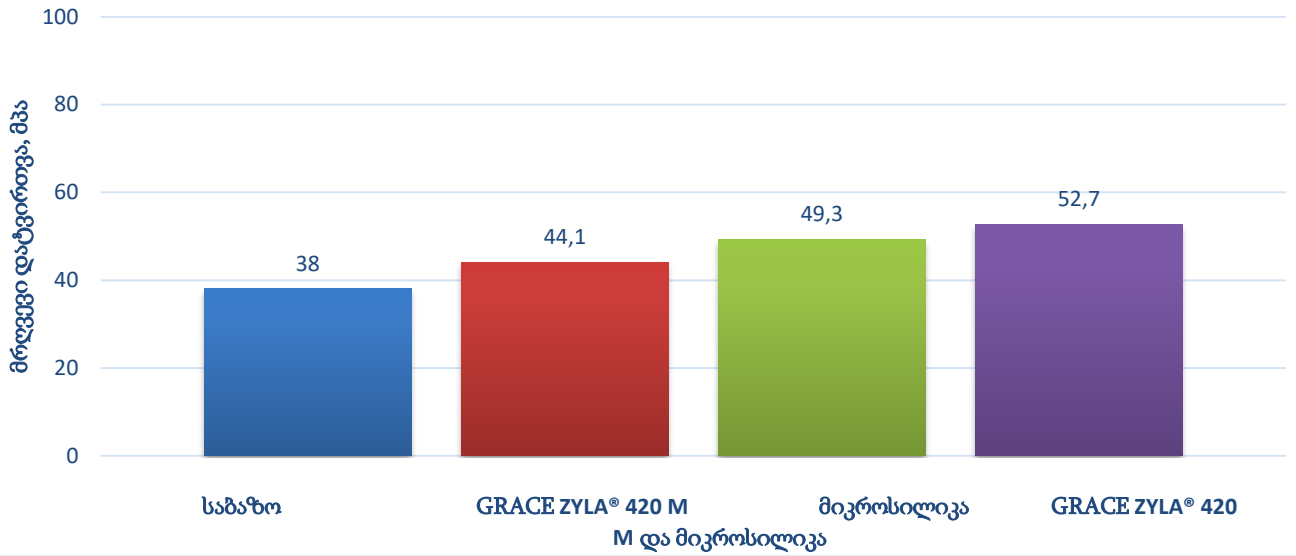
ნახაზი №3

დანამატიანი (GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა) ბეტონის სიმტკიცე სხვადასხვა ასაკში ცენტრალური კუმშვის დროს



ნახაზი №4

## ბეტონის სიმტკიცე ცენტრალური კუმშვის დროს VI თვე



ნახაზი №5

როგორც მიღებული შედეგებიდან ირკვევა დანამატიან ბეტონში განსაკუთრებით შერეული დანამატებით შედგენილი ბეტონის შემთხვევაში,საექსპლოატაციო სიმტკიცეს ღებულობს მე-7 დღეს,ხოლო შემდეგ მისი სიმტკიცის ზრდა უმნიშვნელოა,განსხვავებით საბაზისოსაგან სადაც ბეტონი საპროექტო სიმტკიცეს ღებულობს 28 დღის ასაკში.

აგრეთვე ჩატარდა ექსპერიმენტები აღნიშნული შემადგენლობის ბეტონების მასით და მოცულობით წყალშთანთქმაზე. ასევე განისაზღვრა მათი წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტი. მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილებზე №1 და №2.

### საბაზო და დანამატებიანი ბეტონების მასითი და მოცულობითი წყალშთანთქმის განსაზღვრა

ცხრილი №1

№	ნიმუში	საშუალო მასითი წყალშთანთქმა	საშუალო მოცულობითი წყალშთანთქმა %
1	საბაზო	2,15	5,14
2	GRACE ZYLA® 420 M	1,80	4,15
3	მიკროსილიკა	1,69	3,92
4	GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა	0,91	2,09

**საბაზო და დანამატებიანი ბეტონების ნიმუშების წყალშეუღწევადობის განსაზღვრა**

ცხრილი №2

№	ნიმუში	წყალშეუღწევადობის კოეფიციენტი
1	საბაზო	W6
2	GRACE ZYLA® 420 M	W7
3	მიკროსილიკა	W9
4	GRACE ZYLA® 420 M და მიკროსილიკა	W12

მესამე თავში დადგინდა დანამატიანი და საბაზო ბეტონის სტრუქტურული ცვლილებების საზღვრები თავისუფალ და შეზღუდულ მდგომარეობაში კუმშვაზე. ასევე განისაზღვრა განივი გაფართოების კოეფიციენტის მნიშვნელობა. 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.

თავდაპირველად ბეტონის პრიზმებს მოვდეთ მყისიერი ძალა, ხოლო შემდეგ ნიმუშებს დატვირთვა ეძლეოდათ სხვადასხვა სიჩქარით. მიღებული შედეგების საფუძველზე ავაგეთ დატვირთვა-დეფორმაციების  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  გრაფიკები.

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

ენერჯის 5-8%, ხოლო პუასონის კოეფიციენტის გრაფიკზე მას შეესაბამება საწყისი მონაკვეთი. მეორე - ხასიათდება მიკრობზარების წარმოქმნის სტაბილიზაციით და გამოყოფილი ენერჯის მუდმივობით ( $\mu$  მუდმივია). მესამე მონაკვეთი ხასიათდება შთანთქმული ენერჯის 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 ენერჯის გამოყოფა.

როგორც ექსპერიმენტის შედეგებიდან ჩანს საკონტროლო მშრალი ბეტონის განივი და გრძივი დეფორმაციების  $\sigma, \varepsilon$  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.

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  $\mu$ -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.

ბუნებრივ მდგომარეობაში დანამატიანი ბეტონის მყისიერი დატვირთვისას  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  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, იმავე პირობებით როგორც ზემოთ აღწერილ საბაზო ბეტონებში. დანამატიანი შეზღუდული ბეტონების ნიმუშებში იქნებიან ისინი მშრალ, ბუნებრივად მშრალ, თუ წყალგაჟღენთილ მდგომარეობაში, განსხვავებით საბაზო ბეტონისაგან დატვირთვის სიჩქარის ცვლილება არ იწვევს სიმტკიცის შემცირებას და შესაბამისად დიაგრამის გამრუდებას, და პუასონის კოეფიციენტი მუდმივია რღვევამდე, რაც მიანიშნებს ბეტონის სტრუქტურის ერთგავროვნებაზე რომელიც გამოწვეულია დანამატების მიერ ბეტონში არსებული ბზარებისა და ფორების შევსებით რაც იწვევს დანამატებიანი ბეტონის ნიმუშების ფართის გაზრდას, რომელზედაც მოქმედებს დატვირთვა. ე.ი შესაბამისად რღვევისთვის საჭიროა მეტი ძალა. ამიტომ, განსხვავება ხახუნით შეზღუდულ და შეუზღუდავ, ხახუნის გარეშე ნიმუშების სიმტკიცეებს შორის არის უმნიშვნელო .

აღნიშნულ საკითხებს იკვლევდნენ ისეთი მეცნიერები, როგორცაა ო. ბერგი, ვ. ბალავაძე. აღსანიშნავია ამ მიმართებით 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. განივი დეფორმაციის კოეფიციენტი  $\mu$  როგორც დანამატიანი, ასევე საბაზო ბეტონისთვის ერთმანეთის ტოლია  $\mu_1 = \mu_2 = 0,18$ .

- დანამტიანი შეზღუდული ბეტონების სიმტკიცე მშრალ, ბუნებრივ და წყალგაჟღენთილ მდგომარეობაში დაახლოებით ერთმანეთის ტოლია და მხოლოდ 10%-ით მეტია დანამტიან შეზღუდავი ბეტონების სიმტკიცეზე. შეზღუდავი ბეტონის პუასონის კოეფიციენტებიც დაახლოებით უტოლდება ერთმანეთს. შედეგებიდან გამომდინარე ერთ-ერთ ძირითად დასკვნას წარმოადგენს ის, რომ პუასონის კოეფიციენტი შეზღუდულ და თავისუფალ ბეტონებში მუდმივი სიდიდეა.  $\mu$  სიდიდის მუდმივობა გამოწვეულია იმით, რომ დანამტიან ბეტონში მიკრობზარების გაჩენასთან ერთად ხდება რღვევა, რაც დანამტიანი ბეტონის სტრუქტურის ერთგვაროვნების მახასიათებელია.

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

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 დეფორმატიულობაზე.

ხანმოკლე დატვირთვების დროს სიმტკიცემ შეადგინა: საბაზოსთვის M350; მიკროსილიკით დანამტიანი ბეტონის შემთხვევაში - M460; სუპერპლასტიფიკატორით - M410; ხოლო შერეულმა დანამატებით შედგენილმა ბეტონმა - M490. ეს იმის მანიშნებელია, რომ შერეული დანამტიანი ბეტონის სტრუქტურა ერთგვაროვანია და მისი ფორები შეივსო დანამატებისა და წყლის ქიმიური რეაქციის შედეგად წარმოქმნილი კრისტალებით. მიღებული შერეულდნამტიანი ბეტონი მაღალი ზღვრული დეფორმაციულობის და მაღალი სიმტკიცის აღმოჩნდა.

აქედან გამომდინარე, შესაძლებელია გაკეთდეს დასკვნა, ყველაზე ოპტიმალურ შედეგს იძლევა შერეული დანამატებით შედგენილი ბეტონი, რომელიც გამოირჩევა მაღალი სიმტკიცითა და დრეკადობის მოდულით.

ბეტონის დროში მუშაობის ერთ-ერთი ძირითად კვლევის საკითხს წარმოადგენს დეფორმაციების შესწავლა განმეორებითი სტატიკური დატვირთვების დროს. ცნობილია, რომ ბეტონის მუდმივი და განმეორებითი დატვირთვისას მუშაობის მექანიზმი იდენტურია. ჩვენს მიერ განმეორებით დატვირთვებზე გამოცდილი იქნა დანამატიანი და შესაბამისად საბაზო ბეტონი დრეკადობის არეში, სადაც დატვირთვა შეადგენდა 0,3R, ხოლო შემდგომ ცდებში განმეორებითი მრავალჯერადი დატვირთვები იზრდებოდნენ საფეხურეობრივად რღვევამდე.

განმეორებითი სტატიკური დატვირთვების რაოდენობა იყო 20-დან 50-მდე, დანამატიანი მიკროსილიკას შემთხვევაში მაქსიმალური ნარჩენი დეფორმაციამ შეადგინა 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 დიაგრამამ აჩვენა, რომ დეფორმაციის ზრდა და ნარჩენი სიდიდე პირველი დატვირთვა-განტვირთვის დროს არის მიღევადი და მეორე ციკლიდან დეფორმაცია იკლებს, ხოლო მეათე ციკლიდან ხდება მისი დეფორმაციის სტაბილიზაცია.

ბეტონი შერეული დანამატებით განმეორებითი დატვირთვების დროს, პირველივე დატვირთვა-განტვირთვისას დეფორმაცია ისევე, როგორც 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.





ამის შემდეგ ჩატარდა ექსპერიმენტები დანამატიანი და საბაზო ბეტონის პრიზმებზე ზომით 10×10×30 სმ, ცენტრალურ კუმშვაზე მრავალჯერად განმეორებით სტატიურ დატვირთვებზე. დატვირთვები ეძლეოდა საფეხურეობრივად რღვევამდე. ბეტონის შემადგენლობა და მათი გამოცდის მეთოდოლოგია წარმოებდა ისევე, როგორც მოცემულია წინა ექსპერიმენტში.

ექსპერიმენტების ანალიზის საფუძველზე შეგვიძლია დავასკვნათ შემდეგი:

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

0.2R ხანმოკლე დატვირთვისას  $\varepsilon_{\text{ხანმოკლე}}=0.046$ , ხოლო ცოცვადობის შემდეგ  $\varepsilon_{\text{ცოცვე}}=0.096$ ;

0.4R -ის დროს  $\varepsilon_{\text{ხანმოკლე}}=0.154$ ;  $\varepsilon_{\text{ცოცვე}}=0.158$ ;

0.6R- ის დროს  $\varepsilon_{\text{ხანმოკლე}}=0.196$ ;  $\varepsilon_{\text{ცოცვე}}=0.204$ ;

0.8R-ის დროს  $\varepsilon_{\text{ხანმოკლე}}=0.260$  განმეორებითი დატვირთვების შედეგად მოხდა ნიმუშის რღვევა.

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

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

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

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

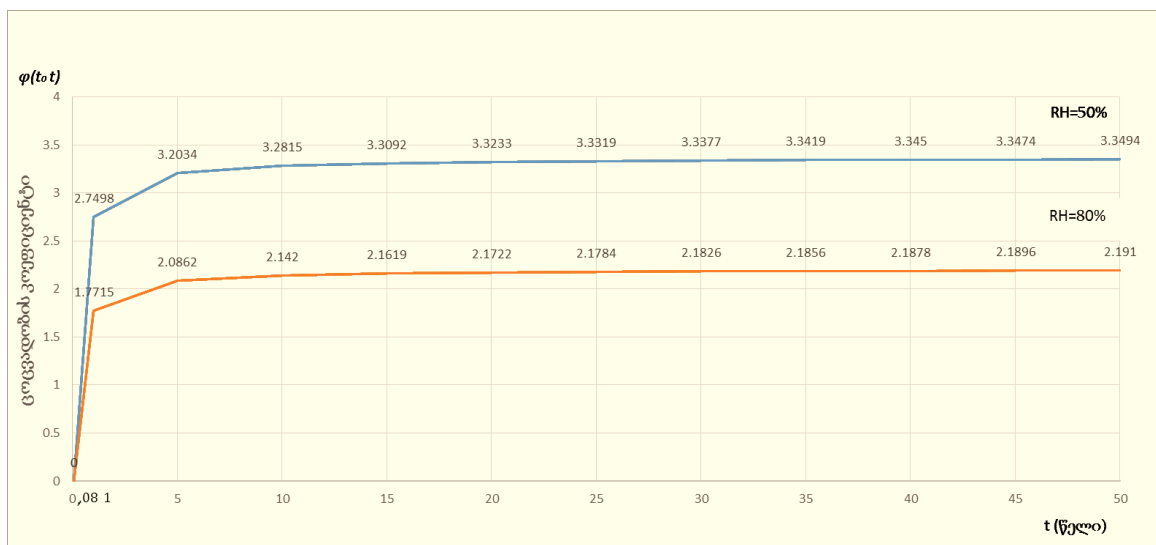
1. ბეტონი **ბ-1**: კლასიკური, ე.წ. საბაზო ბეტონი, რომელშიც არ არის გარეული რაიმე სახის ქიმიური დანამატი;
2. ბეტონი **ბ-2**: საბაზო ბეტონის შემადგენლობას დამატებული მიკროსილიკა 7%.

ბეტონი **ბ-3**: საბაზო ბეტონის შემადგენლობას დამატებული მიკროსილიკა 5% და პლასტიფიკატორი 0.5 %.

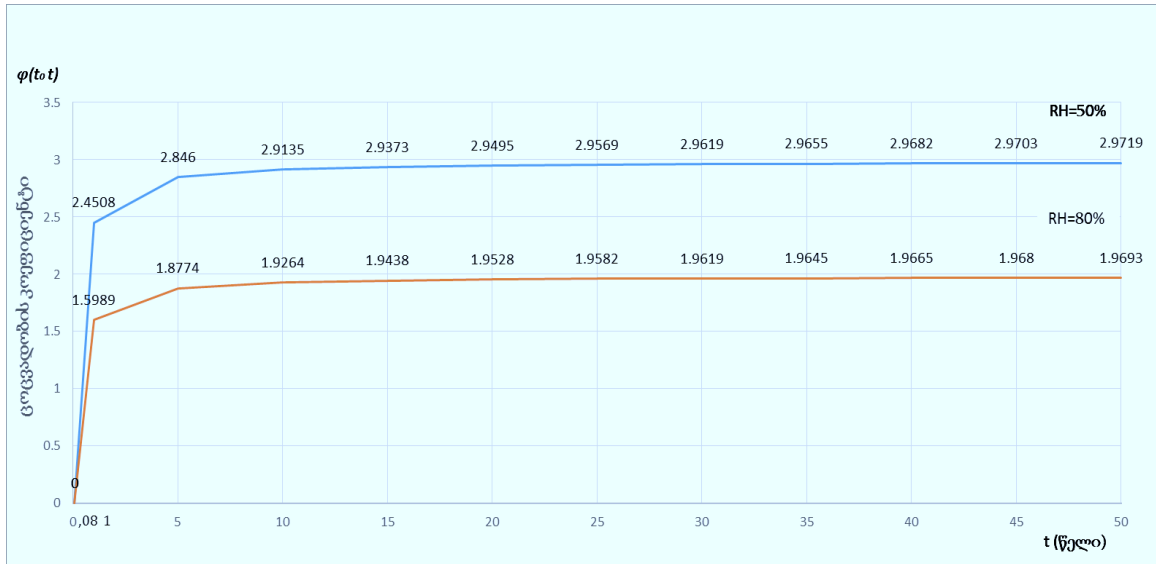
ცოცვადობის კოეფიციენტები ნაანგარიშები იქნა შემდეგ სავარაუდო საექსპლუატაციო პერიოდებზე:  $t=5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45$  და 50 წელიწადი.

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

ანგარიშის შედეგები გრაფიკული ფორმით მოყვანილია ქვემოთ წარმოდგენილ ნახაზებზე №8, №9 და №10.

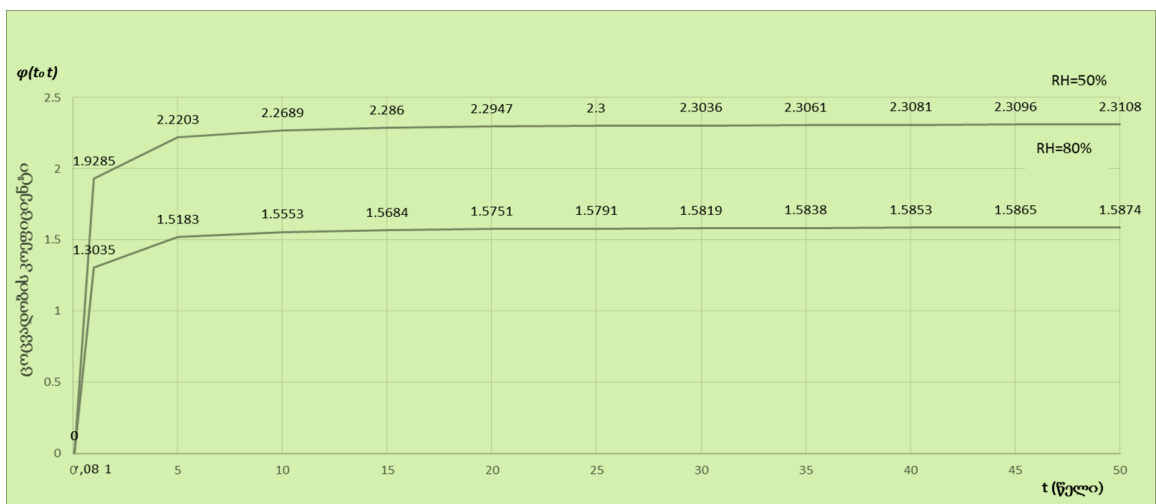


ნახაზი №8. საბაზო ბეტონის (ბ-1) ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცვლილება დროში ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: **RH=50%** - მშრალი კლიმატი და **RH=80%** - ტენიანი კლიმატი.



ნახაზი №9. 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.

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



ნახაზი №10. დანამატებიანი ბეტონის (ბ-3) ცოცვადობის კოეფიციენტების მნიშვნელობების ცვლილება დროში ფარდობითი ტენიანობის (RH) ორი სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: **RH=50%** - მშრალი კლიმატი და **RH=80%** - ტენიანი კლიმატი.

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.

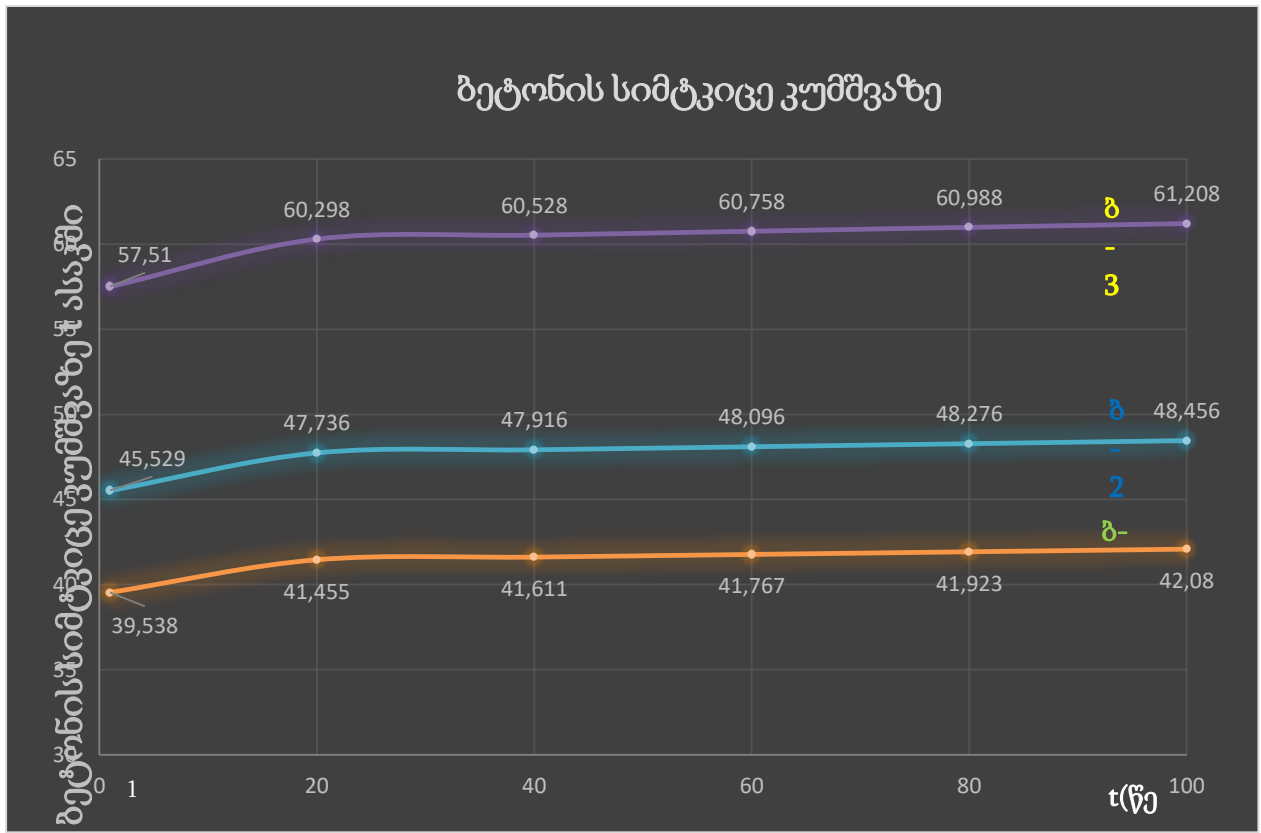
რაც უფრო მეტია ბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე, მით უფრო ნაკლებია ცოცვადობის დეფორმაციები.

როგორც ანგარიშებმა აჩვენა, ბეტონის ცოცვადობა, როგორც ფიზიკური მოვლენა, პირდაპირ კავშირშია ბეტონის ასაკთან. ასაკზე დამოკიდებულია ბეტონის სიმტკიცეც. ბეტონის ასაკობრივ სიმტკიცეს კუმშვაზე განსაზღვრავს ცემენტის ტიპი, ტემპერატურა და გამყარების პირობები.

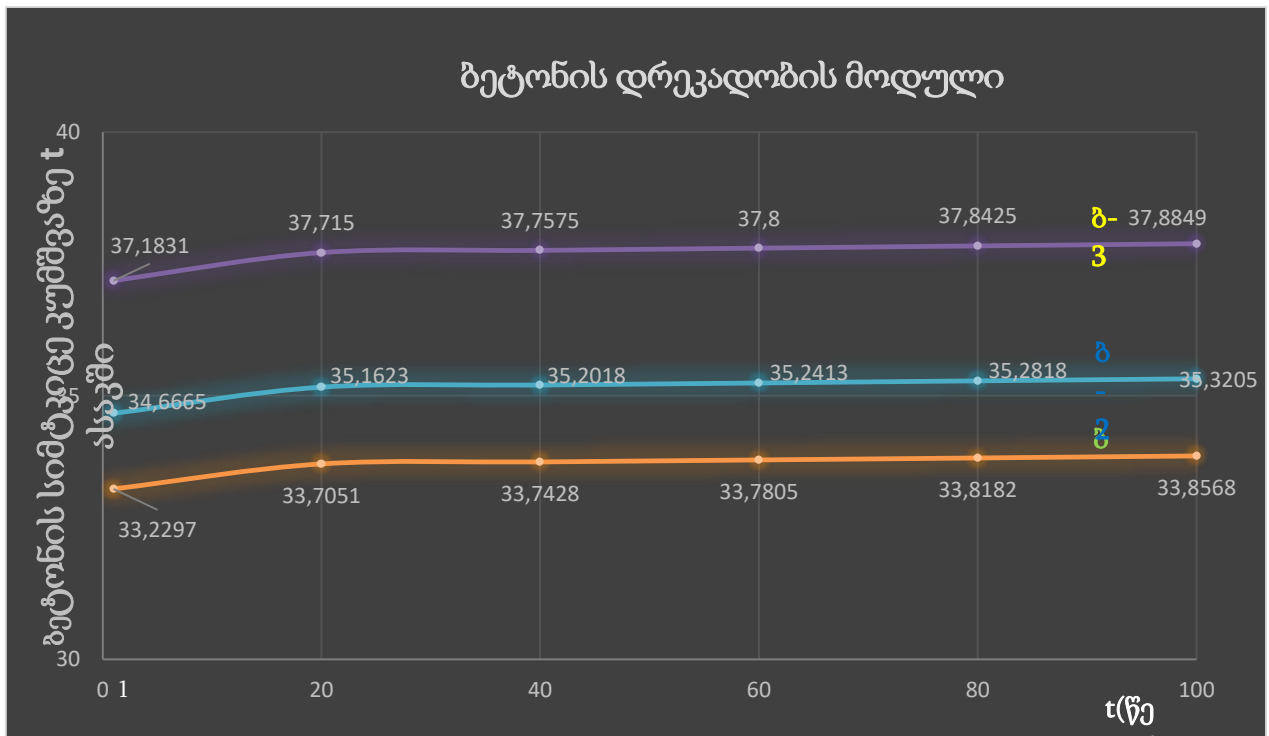
ისევე, როგორც ცოცვადობის კოეფიციენტების ანგარიშების დროს, სიმტკიცე და დრეკადობის მოდული გაანგარიშებული იქნა სამი სხვადასხვა შემადგენლობის ბეტონისათვის: **ბ-1:** კლასიკური, ე.წ. საბაზო ბეტონი, რომელშიც არ არის გარეული რაიმე სახის ქიმიური დანამატი ( $f_{cm} = 34,2$  მპა); **ბ-2:** საბაზო ბეტონის შემადგენლობას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

ანგარიშები ჩატარდა შემდეგი სავარაუდო ასაკისათვის:  $t = 1, 20, 40, 60, 80$  და 100 წელიწადი.

ანგარიშის შედეგები წარმოდგენილია გრაფიკული სახით ნახაზებზე №11 და №12.



ნახაზი №11



ნახაზი №12

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.

მექვსე თავში წარმოდგენილია სადისერტაციო ნაშრომის 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 დანამატის, 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 პუასონის 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 ნარევი (განსაკუთრებით კომბინირებული) ვარიანტის შემთხვევაში ბეტონი სწრაფად აღწევს სიმტკიცის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, რაც თავის მხრივ გვადლევს 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 დანამატიან 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.



დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია შემდეგ ნაშრომებში:

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 (ბეჭდვამია);

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

6. ნ. ბოჭორიშვილი. ბეტონის ცოცვადობა და ქიმიური დანამატების გალენა მის სიდიდეზე. ნიუ უნივერსიტეტი (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, Olga Giorgishvili.

## 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.