

ნანა დონდოლაძე

საქართველოს შავიზღვისპირეთის კლიმატის დახასიათება,
მისი გავლენა რკინაბეტონის ატმოსფერულ კოროზიაზე და

მისდამი მდგრადი ბეტონის მიღება

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის

მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

29.03. 2013

© საავტორო უფლება ნანა დონდოლაძე, 2013 წ.

საქართველოს შავიზღვისპირეთის კლიმატის დახასიათება, მისი გავლენა რკინაბეტონის ატმოსფერულ კოროზიაზე და მისდამი მდგრადი ბეტონის მიღება

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით დონდოლაძე ნანას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: "საქართველოს შავიზღვისპირეთის კლიმატის დახასიათება, მისი გავლენა რკინაბეტონის ატმოსფერულ კოროზიაზე და მისდამი მდგრადი ბეტონის მიღება" და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი 29.03.2013

ხელმძღვანელი: ტ.მ.დ., სრ. პროფ.
მ. ლორთქიფანიძე

კონსულტანტი: ტ.მ.დ., სრ. პროფ.
ვ. ლოლაძე

რეცენზენტი: აკადემიური დოქტორი,
ასოც. პროფ. ზ. ქარუმიძე

რეცენზენტი: ტ.მ. კ., ე. კომელნიკოვი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2013 წელი

ავტორი: დონდოლაძე ნანა

დასახელება: საქართველოს შავიზღვისპირეთის კლიმატის დახასიათება,
მისი გავლენა რკინაბეტონის ატმოსფერულ კოროზიაზე და მისდამი
მდგრადი ბეტონის მიღება

ფაკულტეტი : სამშენებლო ფაკულტეტი

აკადემიური ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: 29.03.2013

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

ავტორის ხელმოწერა

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

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით 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

საქართველოს შავი ზღვის სანაპირო სუბტროპიკული ზონაა. მისთვის დამახასიათებელია თბილი, ზღვის ტენიანი კლიმატი. კლიმატის განსაკუთრებულობა ბეტონის კონსტრუქციების ექსპლუატაციისათვის სპეციფიკურ პირობებს ქმნის. მომატებული გამონაბოლქვის შედეგად ატმოსფეროში იქმნება სულფატური გარემო. ზღვის ანაორთქლი სულფატურ მარილებს შეიცავს, განსაკუთრებით ზღვის სანაპიროსთან ახლოს მდგომი შენობების შემომდგარგველი კონსტრუქციები იჟღინთება ამ მარილით.

შავიზღვისპირეთში არსებული სულფატური გარემოს მოქმედების შედეგად სამშენებლო კონსტრუქციებში ბეტონი იშლება, არმატურა განიცდის კოროზიას, შენობა-ნაგებობა კი რღვევას.

ნაშრომში განხილულია სულფატური გარემოსადმი ბეტონის მედეგობის ამაღლების ტრადიციული მეთოდები, ამასთან, ერთის მხრივ განხილულია ტექნოლოგია, სადაც შემკვრელის როლს ასრულებს თხევადი გოგირდი, მეორეს მხრივ კი წარმოდგენილია ახალი სახის ბეტონი-პოლიმერლექობეტონი.

გოგირდბეტონი გაციების შედეგად გამყარებული გოგირდის, წვრილმარცვლოვანი დანამატის და შემავსებლის - ქვიშა, ღორღი, ხრეშის ნარევის წარმოადგენს. გოგირდბეტონის დადებით თვისებებს მიეკუთვნება: სიმტკიცის სწრაფი აკრეფა, რომელიც მხოლოდ გოგირდბეტონის ნარევის გაციებასთან არის დაკავშირებული, მაღალი სიმტკიცე, რიგი აგრესიული პროდუქტების მიმართ ქიმიური მედეგობა, დაბალი წყალშეღწევადობა და შესაბამისად მაღალი ყინვამედეგობა.

გოგირდბეტონის მიღების ტექნოლოგია უმნიშვნელოდ განსხვავდება ასფალტბეტონის და ისეთი ბეტონების წარმოების ტექნოლოგიისგან, რომლებიც მაღალი სიმტკიცით ხასიათდებიან და შესაძლებელია მათი არსებულ ასფალტის ქარხნებში დამზადება.

ნაშრომში დადგენილია მძიმე და მსუბუქი გოგირდბეტონის შემადგენლობა, მასში შემავალი გოგირდის, მინერალური ქვის მტვრის ოპტიმალური კონცენტრაციის დადგენით, რისთვისაც ჩატარებულია მათემატიკურ-სტატისტიკური კვლევა. დამუშავებულია განტოლება, რომელიც გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულებას აღწერს გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობაზე. ექსპერიმენტის შედეგები (ცხრ. 2.3) შეიძლება აღიწეროს, როგორც წრფივი ფუნქციით (ნახ. 2.1) აპროქსიმებული განტოლებით: $y = ax + b$.

ასევე ლოგარითმული ფუნქციით (ნახ. 2.3.) აპროქსიმებული განტოლებით: $lgy = a_1 \cdot (-lgx + a_4)^{a_2} \cdot e^{a_3(-lgx+a_4)}$.

ექსპერიმენტის მონაცემების დამუშავებამ აჩვენა, რომ შედეგები ერთგვაროვანია, შემთხვევითია და დროში სტაბილურია. შესაბამისად, ექსპერიმენტიდან მიღებული და ფორმულით გაანგარიშებული მონაცემები შეფასებულია პირსონის კრიტერიუმით.

გამოკვლეულია, როგორც მძიმე ისე მსუბუქ ფორიან შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები. დასაბუთებულია მსუბუქი და მძიმე გოგირდბეტონის უპირატესობა აგრესიულ გარემოში ჩვეულებრივ პორტლანდცემენტზე დამზადებულ ბეტონთან შედარებით. გოგირდბეტონის თვისებებიდან გამომდინარე მოცემულია მისი გამოყენების არე.

ასევე გამოკვლეულია, როგორც მძიმე, ისე მსუბუქ ფორიან შემვსებზე დამზადებული პოლიმერლერბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები და ხანმედეგობა (წყალშთანთქმადობა, წყალმედეგობა, ცვეთადობა) და აგრესიული გარემოს გავლენა პოლიმერლერბეტონის სიმტკიცეზე (კოროზიამედეგობა). დასაბუთებულია მსუბუქი და მძიმე პოლიმერლერბეტონის უპირატესობა აგრესიულ გარემოში, ჩვეულებრივ პორტლანდცემენტზე დამზადებულ ბეტონთან შედარებით.

აქვე აღწერილია მსუბუქი პოლიმერლერბეტონით დამზადებული ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციები, რომლებიც ადვილად აწყობადი და ტექნიკურ-ეკონომიკურად ეფექტურია.

RESUME

The black sea coast of Georgia is a subtropical zone, with warm, wet climate of the sea. The peculiarity of climate is that it makes specific conditions for the exploitation of concrete. As a result of additional moisture there is created sulphate environment. Also evaporated sea water contains sulphate salt and especially that buildings, situated near the sea coast, are impregnated with this salt.

As a result of acting sulphate environment there is diminished the concrete in the building constructions, the armature is rusted and buildings begin to destroy.

There is discussed in the report the traditional methods how to improve the stability of concrete in the sulphate environment, also there is discussed the technology where liquid sulphur is in a role of astringent. There is presented new kind of polymer-concrete.

Sulphur concrete is the mixture of settled sulphur and close-grained things, like sand, road metal and so on. The advantage of sulphur concrete is solidity, also it is watertight and frost-resistant.

The technology to make a sulphur concrete isn't much different from asphalt-concrete.

There is established the staff of heavy and light sulphur-concrete in the report. That's why there is carried out mathematical - statical research. There are studied equations, where is shown dependence between sulphur and dust. The results of experiment can be shown as a linear function with approximated equation: $y=ax+b$, and also it can be shown with a logarithmic function of polymer-concrete.

The experiment showed that the results are similar and stable in time. The facts are estimated with the criterions of Pearson.

There are researched the properties of the sulphur-concrete, which is made from heavy and light porous fillers. There is substantiated the preference of heavy and light sulphur-concrete in aggressive environment. According to the properties of the sulphur-concrete there is shown the area of application.

There is researched properties of heavy and light concrete, which is made from porous filler and also the influence of aggressive environment. There is shown the advantage of polymer-concrete in an aggressive environment.

There is also shown the constructions which are made from polymer-concrete.

შინაარსი

შესავალი	14
1.ლიტერატურის მიმოხილვა.....	23
1.1.საქართველოს შავიზღვისპირეთის კლიმატის დახასიათება და მისი გავლენა რკინაბეტონის კოროზიაზე.....	23
1.2.ცემენტის, ბეტონის და რკინაბეტონის კოროზია აგრესიულ გარემოში.....	30
1.3. კოროზიის გამომწვევი მიზეზები.....	31
1.3.1. ატმოსფეროს გავლენა ბეტონის და რკინაბეტონის კოროზიაზე.....	40
1.3.2. რკინაბეტონის კონსტრუქციების კოროზია თხევადი აგრესიული გარემოს ზემოქმედებისას.....	43
1.4. ბეტონის დაცვის ღონისძიებები.....	46
1.5.ეტრინგიტის ბეტონის სიმტკიცეზე გავლენის ექსპერიმენტული დადგენა	50
1.6. გოგირდის, როგორც შემკვრელის მშენებლობაში გამოყენების მოკლე ისტორია და პერსპექტივები.....	52
1.7. დასკვნა.....	54
2.შედეგები და მათი განსჯა.....	56
2.1.გოგირდიანი ბეტონების მშენებლობაში გამოყენების შესაძლებლობის კვლევა.....	56
2.1.1. გოგირდბეტონის ზოგადი დახასიათება.....	56
2.1.2.მძიმე შემკვრელზე დამზადებული გოგირდბეტონის შედგენილობის შერჩევა.....	62
2.1.3. მსუბუქ შემკვრელზე დამზადებული გოგირდბეტონის შედგენილობის შერჩევა.....	66
2.2.ექსპერიმენტის შედეგების მათემატიკურ-სტატისტიკური დამუშავება.....	69
2.2.1.პირსონის X^2 კრიტერიუმის გამოყენება მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემების განაწილების იდენტიფიკაციისათვის.....	69
2.3.მსუბუქი და მძიმე გოგირდბეტონის მუშაობის გამოკვლევა მცირეციკლურ განმეორებით მკუმშავ დატვირთვაზე.....	84

2.4. ორფენიანი საფარის ქვედა ფენაში გოგირდბეტონის გამოყენების შესაძლებლობის კვლევა.....	89
2.4.1. ფოროვან ვულკანურ ახალქალაქის წიდაზე (ოკამი) დამზადებული გოგირდბეტონის სინჯის გამოკვლევა.....	91
2.5. მსუბუქი პოლიმერლერბეტონის შექმნის თეორიული საფუძვლები....	93
2.6. მსუბუქი ლერბეტონის შექმნის ექსპერიმენტული დასაბუთება.....	99
2.6.1. მსხვილი შემვსების მდგომარეობის გავლენა ბეტონის სიმტკიცესა და დეფორმაციულობაზე.....	99
2.6.2. მსუბუქი ბეტონისა და წყლითა და CaCl_2 შემვსებზე დამზადებული პოლიმერლერბეტონის სიმტკიცე და დეფორმაციულობა ცენტრალური გაჭიმვის დროს.....	108
2.6.3. მსუბუქი ბეტონისა და პოლიმერლერბეტონის ხანმედეგობის კვლევა	116
2.6.3.1. წყალშთანთქმადობის კვლევა.....	116
2.6.3.2. წყალმედეგობის კვლევა.....	118
2.6.3.3. კოროზიამედეგობის კვლევა.....	120
2.6.3.4. ცვეთადობის კვლევა.....	122
2.6.4. პოლიმერლერბეტონის ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციები.....	125
2.7. ეკონომიკა.....	134
2.7.1. პოლიმერლერბეტონის ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციების გამოყენების ეკონომიკური ეფექტურობა.....	134
3. დასკვნა.....	136
გამოყენებული ლიტერატურა.....	139

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1.1. საქართველოს ზოგიერთი ქალაქის საშუალო ტემპერატურა და ნალექების წლიური რაოდენობა	27
ცხრილი 1.2. საქართველოს ზოგიერთი ქალაქის ფარდობითი ტენიანობა, მზის სიკაშკაშის ხანგრძლივობა, წლიური რადიაცია და იონების კონცენტრაცია.....	27
ცხრილი 1.3. ბათუმის 2002-2009 წლის ატმოსფერული ჰაერის შემადგენლობა.....	28
ცხრილი 1.4. 2007 წლის საშუალო ტემპერატურა (°C) თვეების მიხედვით.....	28
ცხრილი 1.5. 2007 წლის ნალექების საშუალო (დღედამური, თვის, წლის) რაოდენობა.....	29
ცხრილი 1.6. სულფატური ხსნარით დამზადებული ბეტონის სტრუქტურული შედგენილობა.....	50
ცხრილი 1.7. ცდების შედეგები	51
ცხრილი 1.8. გოგირდბეტონის თვისებების შეფასება.....	53
ცხრილი 2.1. გოგირდბეტონის კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვრის ცვლილება, დამოკიდებული ბაზალტის მტვერით შევსების ხარისხზე.....	63
ცხრილი 2.2. მძიმე შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის შემადგენლობა.....	64
ცხრილი 2.3. მძიმე გოგირდბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლები.....	65
ცხრილი 2.4. ფოროვან შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის შედგენილობა.....	68
ცხრილი 2.5. ფორიან შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლები	68
ცხრილი 2.6. ექსპერიმენტის მონაცემების დამუშავება.....	71
ცხრილი 2.7. წრფივი განტოლების კოეფიციენტების მნიშვნელობები.....	72
ცხრილი 2.8. ექსპერიმენტის მონაცემების დამუშავება.....	76
ცხრილი 2.9. თანადობის კრიტერიუმის χ^2 საანგარიშო ცხრილი.....	78

ცხრილი 2.10. ექსპერიმენტული შედეგების დამუშავება.....	79
ცხრილი 2.11. ლოგარითმული განტოლებების კოეფიციენტების.....	81
ცხრილი 2.12. ექსპერიმენტული შედეგების დამუშავება.....	82
ცხრილი 2.13. თანადობის კრიტერიუმის χ^2 საანგარიშო ცხრილი.....	83
ცხრილი 2.14. გოგირდბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლები.....	84
ცხრილი 2.15. მცირეციკლურ მკუმშავ დატვირთვაზე გამოცდის შედეგები მსუბუქი გოგირდბეტონის ნიმუშების მაგალითზე.....	86
ცხრილი 2.16. K_1 პრიზმული სიმტკიცე - საწყისი და ციკლური გამოცდის შემდეგ R^m მძიმე და მსუბუქი გოგირდბეტონისათვის ახალქალაქის ფორიან შევსებზე (ოკამი).....	86
ცხრილი 2.17. გოგირდბეტონის ნიმუშების დრეკადი დეფორმაციის $E \cdot 10^{-3}$, კგძ/სმ ² მოდულის ცვლილება დამოკიდებული დატვირთვის n ციკლზე.....	87
ცხრილი 2.18. გოგირდბეტონის ნიმუშების შინაგანი ენერჯის შთანთქმის ψ კოეფიციენტი და ფარდობითი დრეკადი დეფორმაციის ξ მაჩვენებელი, დამოკიდებული დატვირთვის ციკლთა n რაოდენობაზე.....	88
ცხრილი 2.19. ორფენიანი, 10X10X40სმ ზომის ნიმუშის გამოცდის შედეგები.....	90
ცხრილში 2.20. ბეტონის შემადგენელი მასალები და შედგენილობები.....	101
ცხრილი 2.21. შენახვის პირობების გავლენა ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცეზე.....	103
ცხრილში 2.22. წყლით გაჯერებული შემვსებით დამზადებული ტუფობეტონის ნიმუშების დეფორმაციები კუმშვის დროს.....	105
ცხრილი 2.23. კალციუმქლორიანი ხსნარით გაჟღენთილი შემვსებით დამზადებული ტუფობეტონის, ზომებით 10X10X30სმ, ნიმუშების დეფორმაციები კუმშვის დროს.....	106
ცხრილი 2.24. პოლიმერლექობეტონის, ზომებით 10X10X30 სმ, ნიმუშების დეფორმაციები კუმშვის დროს.....	106
ცხრილი 2.25. ტუფის ქვიშის ნაყარი მოცულობითი მასა.....	108
ცხრილი 2.26. ტუფის ღორღის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები....	109
ცხრილი 2.27. 1მ ³ ტუფობეტონის შედგენილობა.....	110

ცხრილი 2.28. ტუფობეტონის რვიანების დეფორმაციები ცენტრალურ გაჭიმვაზე, ზომებით 10X10X70 სმ და წალკის საბადოს წყლით გაჟღენთილ შემკვსებზე.....	110
ცხრილი 2.29. ტუფობეტონის რვიანების დეფორმაციები ცენტრალურ გაჭიმვაზე, ზომებით 10X10X70სმ და წალკის საბადოს CaCl ₂ ხსნარით გაჟღენთილ შემკვსებზე.....	111
ცხრილი 2.30. 1მ ³ პოლიმერლექობეტონისა და მსუბუქი ბეტონის შედგენილობა, დამზადებული წალკის საბადოს ტუფოვან შემკვსებზე.....	112
ცხრილი 2.31. ტუფობეტონის დეფორმაციები ცენტრალურ გაჭიმვაზე ტუფის ღორღით და ქვიშით.....	113
ცხრილი 2.32. ტუფობეტონის დეფორმაციები ცენტრალურ გაჭიმვაზე ეპოქსიდური ფისით დაფარული ტუფის ღორღზე და ტუფის ქვიშაზე.....	114
ცხრილი 2.33. პოლიმერლექობეტონის წყალშთანთქმადობის კვლევა.....	117
ცხრილი 2.34. მსუბუქი ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის წყალმდეგობის კვლევა.....	119
ცხრილი 2.35. მსუბუქი ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის კოროზიამდეგობის კვლევა.....	120
ცხრილი 2.36. პოლიმერლექობეტონის (40% ეპოქსიდის ფისით 60% ბაკელიტის ლაქით) ცვეთადობის კვლევა.....	123
ცხრილი 2.37. ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონის (ოკამის საბადოს ფორიან შემკვსებზე) ცვეთადობის კვლევა.....	124
ცხრილი 2.38. 1მ ³ ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის შედგენილობა.....	130
ცხრილი 2.39. მსუბუქი და პოლიმერლექობეტონის კუმშვაზე გამოცდის შედეგები.....	131
ცხრილი 2.40. ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის ფერდობგამმაგრებელი კონსტრუქციების ელემენტების ნიმუშების მასა (Q), პირველი ბზარის წარმოქმნის (P _{ბზ}) და რღვევის (P _{რღ}) მნიშვნელობები ლუნვაზე გამოცდის დროს.....	132
ცხრილი 2.41. გაუმჯობესებული ფერდოსამაგრი კონსტრუქციის №1 ელემენტის თავების გაწყვეტაზე გამოცდის შედეგები.....	133
ცხრილი 2.42. გაუმჯობესებული ფერდოსამაგრი კონსტრუქციის №2 ელემენტების თავების რღვევაზე გამოცდის შედეგები, განივი ძალების მოქმედების დროს.....	133

ნახაზების ნუსხა

ნახაზი 1.1. ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება ეტრინგიტის (+4±2°C) და ტაუმასიტის (+20±2°C) წარმოქმნისას.....	39
ნახაზი 1.2. ბეტონის გრძივი დეფორმაცია ეტრინგიტის (+4±2°C) და ტაუმასიტის (+20±2°C) კრისტალიზაციისას.....	39
ნახაზი 2.1. გოგირდის სიბლანტის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება.....	57
ნახაზი 2.2. გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება გოგირდისა და მტვერის თანაფარდობაზე.....	72
ნახაზი 2.3. ცდომილებათა გრაფიკი 2.1. განტოლების მიხედვით.....	73
ნახაზი 2.4. გოგირდბეტონის სიმტკიცის, გოგირდისა და მტვერის თანაფარდობაზე, დამოკიდებულების გრაფიკი ლოგარითმულ კოორდინატებში....	80
ნახაზი 2.5. ცდომილებათა გრაფიკი 3.1. განტოლების მიხედვით.....	81
ნახაზი 2.6. კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვრის გასაშუალებული მნიშვნელობები სხვადასხვა შედგენილობის და შენახვის პირობების ბეტონისათვის.....	104
ნახაზი 2.7. ტუფობეტონისა და პოლიმერლექობეტონის ნიმუშების გასაშუალებული დეფორმაციები ცენტრალური კუმშვის დროს.....	107
ნახაზი 2.8. ტუფობეტონის რვიანების გასაშუალებული დეფორმაციები ცენტრალურად გაჭიმვის დროს.....	112
ნახაზი 2.9. ტუფობეტონისა და პოლიმერლექობეტონის ნიმუშების გასაშუალებული დეფორმაციები ცენტრალურად გაჭიმვის დროს.....	115
ნახაზი 2.10. მძიმე ბეტონის ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციის სქემა..	128
ნახაზი 2.11. მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციის სქემა.....	129

სურათების ნუსხა

სურათი 1.1. ბეტონის დაშლა ეტრინგიტის წარმოშობის შედეგად.....	37
სურათი 1.2. წვრილი ბზარების ქსელი ბეტონის ნიმუშის ზედაპირზე.....	37
სურათი 1.3. ეტრინგიტის კრისტალების სტერეომიკროფოტოგრაფია.....	38

შესავალი

თემის აქტუალობა – საქართველოს შავი ზღვის სანაპირო სუბტროპიკული ზონა თბილია, ზღვის ტენიანი კლიმატით. კლიმატის განსაკუთრებულობა ბეტონის კონსტრუქციების ექსპლუატაციის სპეციფიკურ პირობებს ქმნის.

ბუნებრივი პირობები ანთროპოლოგიური გავლენით ცვლილებას განიცდის. ეს პროცესი მთელ მსოფლიოშია გავრცელებული და მათ შორის შავიზღვისპირეთში. მისთვის დამახასიათებელია მაღალი ტენიანობა. მომატებული გამონაბოლქვის შედეგად ატმოსფეროში იქმნება სულფატური გარემო. ამავდროულად ზღვის ანაორთქლი სულფატურ მარილებს შეიცავს და განსაკუთრებით ზღვის სანაპიროსთან ახლოს მდგომი შენობების შემომფარგვლელი კონსტრუქციები იჟღინთება ამ მარილით.

შავიზღვისპირეთში არსებული სულფატური გარემოს მოქმედების შედეგად სამშენებლო კონსტრუქციებში ბეტონი იშლება, არმატურა განიცდის კოროზიას და შენობა-ნაგებობა კი რღვევას.

ბეტონისა და რკინაბეტონის კოროზიის პროცესების გარკვევას, მის პროგნოზირებას და ამ პროცესების არასასურველი შედეგების თავიდან აცილებას გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ბეტონისა და რკინაბეტონის კონსტრუქციების ხანმედეგობის უზრუნველსაყოფად მშენებლობის და ექსპლუატაციის პირობებში.

მიწისქვეშა ნაგებობების ბეტონის კონსტრუქციები ხშირად განიცდიან აგრესიული გარემოს ზემოქმედებას. ბეტონის კონსტრუქციების ხანმედეგობისათვის, თხევად და აირად გარემოში კოროზიული პროცესების მოქმედების საფუძველზე მიწისქვეშა ნაგებობების დაცვის ღონისძიებების შემუშავება მეტად საინტერესო და საჭიროა.

საქართველოში მიმდინარე რეფორმები მოითხოვს მატერიალური წარმოების აღდგენას და სამრეწველო და სამოქალაქო მშენებლობის ინდუსტრიას. რაც თავისთავად ითვალისწინებს ახალი სამშენებლო მასალების დიდი რაოდენობით გამოყენებას. ამ პირობებში განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს რესურსების რაციონალური გამოყენება. სამშენებლო მასალების ნაირსახეობა, აგრეთვე შავიზღვისპირეთის აგრესიული კლიმატური პირობები და სხვა მრავალი

ფაქტორი, რომლებიც მოქმედებენ ბეტონზე მისი ექსპლუატაციის დროს და ართულებენ ბეტონის საექსპლუატაციო თვისებების შენარჩუნებას.

ბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების შესწავლაში დიდი ღვაწლი მიუძღვის ქართველ მეცნიერებს: პროფ. ზ. წილოსანს, პროფ. ვ. ბალავაძეს, პროფ. ა. ნადირაძეს და სხვებს.

ყოველივე ზემოთმოყვანილი გვიჩვენებს განსახილველი პრობლემის აქტუალობას. ამიტომ პროექტირების დროს ბეტონის ხსნარისათვის მასალების შერჩევისას, აუცილებელია სრული ინფორმაცია გვექონდეს შემდგომის თვისებების, აგრეთვე გამოსაყენებლად დაგეგმილი ცემენტის, ან სხვა შემკვრელის შემადგენელი ნივთიერებების შესახებ. ეს საშუალებას მოგვცემს დავამუშაოთ და გამოვიყენოთ აუცილებელი ღონისძიებები, რათა გავაძლიეროთ ბეტონის მდგრადობა აგრესიულ გარემოში და შემავესებლის რეაქციული თვისებების გათვალისწინებით შევიმუშაოთ ბეტონის მიღების ახალი ტექნოლოგია, ან ავირჩიოთ ყველაზე ოპტიმალური შემკვრელი ეკონომიკური ეფექტის გათვალისწინებით.

ამ მიმართულებით მნიშვნელოვანი სამუშაოები აქვს ჩატარებული ტექნ. მეცნ. დოქტორს, პროფესორ ვლადიმერ ლოლაძეს. მისი კონსულტაციები, შენიშვნები და საქმიანი წინადადებები დაგვეხმარა სამუშაოს პროცესში, რისთვისაც გვინდა მადლობა გადავუხადოთ მას.

სადოქტორო ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს შავიზღვისპირეთის, კერძოდ ბათუმის აგრესიული გარემოს პირობებისადმი (მაღალი ტენიანობა, მაღალი წლიური საშუალო ტემპერატურა, წლის განმავლობაში ნალექების დიდი რაოდენობა, ზღვის ანაორთქლით, ანუ სულფატური მარილებით გაჯერებული ატმოსფერო) მდგრადი ბეტონის მიღება და ბეტონის კონსტრუქციებისა და ნაგებობების ხანმედეგობის ამალღების ტექნოლოგიების შემუშავება.

აღნიშნული მიზნის მისაღწევად დაისვა და გადაწყდა შემდეგი ამოცანები:

1. აგრესიული გარემოსადმი მდგრადი ბეტონის მიღების ტექნოლოგიის დამუშავება;
2. ბეტონში შემკვრელის სახით თხევადი გოგირდის გამოყენების კვლევა;
3. ადგილობრივი შემავესებლის გამოყენებით მძიმე და მსუბუქი გოგირდბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები შესწავლა;
4. რეკომენდაციების შემუშავება შავიზღვისპირეთის აგრესიული გარემოს მიმართ კვლევით მიღებული მდგრადი გოგირდბეტონისაგან დამზადებული, მიწისქვეშა და

წყალქვეშა ნაგებობების საძირკვლებისა და კედლებისათვის, საინჟინრო კომუნიკაციების მიწისქვეშა ჭების კონსტრუქციების, გზებისა და მოედნების ორფენიანი საფარისქვედა ფენის დასამზადებლად, ასევე ნაპირსამაგრ მშენებლობაში გამოსაყენებლად;

5. მძიმე და მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კვლევა;

6. მძიმე და მსუბუქ პოლიმერლექობეტონზე აგრესიული გარემოს გავლენის შესწავლა;

7. რეკომენდაციების შემუშავება ღვარცოფებისა და მეწყერების საწინააღმდეგოდ, ფერდოგამმაგრებელ სამუშაოებში პოლიმერლექობეტონის კონსტრუქციების გამოსაყენებლად.

მეცნიერული სიახლე

- შესწავლილია ახალი, ადგილობრივი შემვსებით და დანამატად ქვის მტვრის გამოყენებით დამზადებული გოგირდბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები;

- განისაზღვრა მძიმე გოგირდბეტონის R_b -სიმტკიცე კუმშვაზე; R_m - პრიზმული სიმტკიცე კუმშვაზე; R_c - სიმტკიცე ღუნვაზე;

- კვლევების საფუძველზე დადგენილია აღნიშნული გოგირდბეტონის ტექნოლოგიური მახასიათებლები. შესწავლილია თხევადი გოგირდის სიბლანტის, შეკვრის უნარის და სიმტკიცის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება;

- დადგენილია, რომ გოგირდბეტონში მინერალური ბაზალტის ქვის მტვრის გამოყენება დადებით ზეგავლენას ახდენს მის სიმტკიცეზე;

- კვლევების საფუძველზე დადგენილია მძიმე და მსუბუქი გოგირდბეტონის შემადგენლობა, მასში შემავალი გოგირდის და მინერალური ბაზალტის ქვის მტვრის ოპტიმალური კონცენტრაციის დადგენით;

- ჩატარებული ექსპერიმენტების მათემატიკურ-სტატისტიკური დამუშავების საფუძველზე დადგინდა, რომ გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობაზე 90%-ზე მეტი სიზუსტით აღწერს მიმდინარე ტექნოლოგიურ პროცესს;

- გამოკვლეულია, ახალი სახის მსუბუქი, კონსტრუქციული პოლიმერლექობეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები და ხანმედეგობა (წყალშთანთქმადობა,

წყალმედვეობა, ცვეთადობა, კოროზიამედვეობა);

- პოლიმერლექობეტონის კონსტრუქციული ელემენტები თავისი სიმტკიცითა და დეფორმაციულობის მაჩვენებლებით არ ჩამოუვარდება მძიმე ბეტონისაგან დამზადებულ კონსტრუქციულ ელემენტებს.

სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება

- დადგენილია ადგილობრივ მძიმე და მსუბუქ შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონების ოპტიმალური შემადგენლობა.

- დადგენილია მშენებლობაში გოგირდბეტონის გამოყენების არეები, კერძოდ გოგირდბეტონის კონსტრუქციები წარმატებით შეიძლება გამოვიყენოთ შავიზღვისპირეთის სანაპირო ზოლში აგრესიული გრუნტის წყლების პირობებში მიწისქვეშა და წყალქვეშა ნაგებობების საძირკვლებისა და კედლების, საინჟინრო კომუნიკაციების მიწისქვეშა ჭების კონსტრუქციების, გზებისა და მოედნების ორფენიანი საფარის დასამზადებლად, ასევე ნაპირსამაგრ მშენებლობაში ღვარცოფებისა და მეწყერების საწინააღმდეგოდ;

- გოგირდბეტონის შესანიშნავ თვისებათაგან ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი თვისებაა მისი ხელახალი გადამუშავების შესაძლებლობა, რაც მნიშვნელოვნად გააადვილებს და გააიაფებს კონსტრუქციის დაზიანების შემთხვევაში სარემონტო სამუშაოებს.

- მსხვილი ფორიანი შემვსებების თხევადი პოლიმერით დაფარვით მიღებულია მაღალი სიმტკიცის, მსუბუქი კონსტრუქციული მასალა-პოლიმერლექობეტონი;

- დამზადდა მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის ფერდგამმაგრებელი კონსტრუქციები და განისაზღვრა მისი ტექნიკურ-ეკონომიკური ეფექტურობა.

ნაშრომის შინაარსი

პირველ თავში – მოცემულია საქართველოს შავიზღვისპირეთის კლიმატური პირობების დახასიათება. შესწავლილია და გაანალიზებულია კლიმატის მონაცემები სანაპიროს სამ ქალაქში - ბათუმში, ფოთსა და სოხუმში. შესადარებელ ეტალონად აღებულია ქ. თბილისის კლიმატური მონაცემები, რადგან იგი მდებარეობს შედარებით მშრალ ზონაში.

ეს ქალაქები გამოირჩევიან საერთო კლიმატური თვისებებით; მაღალი ფარდობითი ტენიანობით, საშუალოდ 75-85%; წვიმიანი დღეების რაოდენობით დაახლოებით 2000 მმ წელიწადში; საშუალო წლიური ტემპერატურით 14-15°C;

ცხელი პერიოდით წელიწადში 6 თვის განმავლობაში - მაისიდან სექტემბრის ჩათვლით, საშუალო ტემპერატურით 16-25°C, ხოლო მაქსიმალური 40-42°C. ამავე პერიოდში გამოიყოფა ნალექების განსაკუთრებით დიდი რაოდენობა. ტენიანობის დღიური რაოდენობა აღწევს 15-20%. აღსანიშნავია რომ ატმოსფერული ნალექები ძლიერ მინერალიზებულია [1].

სანაპიროებისათვის ზაფხულში დამახასიათებელია მზის სიკაშკაშის დიდი ხანგრძლივობა, რომელიც ჰორიზონტალური ზედაპირებისათვის დღის 11 სთ-დან 14 სთ-მდე შეადგენს 800 კკალ/მ²-სთ. ზამთარში ზღვის სანაპიროს ახასიათებს თბილი ტემპერატურა 5-8°C. საშუალო მინიმალური ტემპერატურა აღწევს - 4°C. დროდადრო მოდის თოვლი, რომელიც იქვე დნება.

სანაპიროს კლიმატზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ქარი, რომელიც ძირითადად ზღვიდან - სამხრეთ დასავლეთის, დასავლეთის და ჩრდილო დასავლეთის მხრიდან უბერავს. ქარის საშუალო წლიური სიჩქარე 2,4-4,5 მ/წმ; ზოგიერთ შემთხვევაში კი - 15 მ/წმ [1].

შავიზღვისპირეთის ზოგიერთი ქალაქის კლიმატის საერთო მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილებში 1,1-1,4.

აქვე მოყვანილია შესაბამისი ტექნიკური ლიტერატურიდან ცნობილი, აღნიშნული კლიმატური პირობების აგრესიული გავლენა ბეტონის კონსტრუქციებზე.

ხშირი წვიმების შედეგად კონსტრუქცია მრავალჯერად გაშრობა-დაზიანებას განიცდის. ამავე დროს ხდება ბეტონის სიღრმეში აგრესიული ტენის მუდმივი მიგრაცია. ნალექებში იონების, განსაკუთრებით ქლორისა და სულფიდების დიდი კონცენტრაცია მნიშვნელოვნად აჩქარებს კოროზიული პროცესების განვითარებას. ამასთანავე, კონსტრუქციების ციკლურად განმეორებადი მრავალჯერადი გაღობა-გაშრობა, თანდათანობით არყევს ბეტონის სტრუქტურას და ამცირებს აგრესიისადმი მის სიმტკიცესა და მდგრადობას.

რკინა-ბეტონის ატმოსფერული კოროზიის განვითარებაში მნიშვნელოვან როლს თამაშობს ქარი. ზღვის ზედაპირიდან ქარი იტაცებს მარილიანი წყლის წვეთებს, გადააქვს ისინი დიდ მანძილზე და შთაინთქმება ატმოსფერულ ნალექებში. ნალექებში შთაინთქმული აგრესიული იონები დიფუზიითა და კაპილარული შესრუტვის გზით შედიან ბეტონში და აზიანებენ მას [2, 3].

მოცემულია აგრეთვე თუ რა გავლენას ახდენს წყლისქვეშა და მიწისქვეშა ნაგებობებზე ზღვის და გრუნტის წყალი, რომლითაც ასე მდიდარია შავი-ზღვისპირეთი.

განხილულია ბეტონის ხანმედეგობის ამალღების ტრადიციული მეთოდები, აღნიშნულია, რომ არც ერთი მათგანი არ არის სრულყოფილი და ამასთან თითოეული ძალიან ადიდებს ბეტონის და შესაბამისად კონსტრუქციის თვითღირებულებას. ყოველივე ზემოთ თქმულის გათვალისწინებით დასმულია ამოცანა ისეთი ბეტონის შესაქმნელად, რომელიც მდგრადი იქნება შავიზღვისპირეთისათვის დამახასიათებელ გარემო პირობებში და მოგვცემს მნიშვნელოვან ეკონომიკურ ეფექტს.

შავიზღვისპირეთისათვის დამახასიათებელი გარემო პირობებისადმი მდგრადი მაღალი სიმტკიცის, მცირე დეფორმაციული და წყალშეუღწევადი ბეტონის მისაღებად საჭიროა, რომ მსხვილი შემვსები, გარდა სხვა თანაბარი პირობებისა, იყოს მედეგი და მშრალი, ე.ი. არ შეიცავდეს და არ შთანთქავდეს წყალს. ყოველივე ამის დაცვა შესაძლებელია აფუებადი მასალების (მაგ. ნაცარმიწა, თიხა, ფიქალი) თერმული დამუშავებით ან შემკვრელად თხევადი გოგირდის გამოყენებით ან კიდევ, მშრალი ფორიანი შემვსების დაფარვით მაღალი სიმტკიცის თხევადი პოლიმერული მასალებით, რომლებიც გარდა იმისა, რომ ზრდიან შემვსების სიმტკიცესა და წყალშეუღწევადობას, უზრუნველყოფენ ერთ შემთხვევაში შემვსებების ერთმანეთთან უწყლო შეჭიდულობას, რაც თავის მხრივ ხელს უწყობს შესაბამისი ბეტონების სიმტკიცის მატებას, ხოლო მეორე შემთხვევაში შემვსების ცემენტის ქვასთან შეჭიდულობის გაზრდას.

მეორე თავში – მოყვანილია ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები. განხილულია მდგრადი ბეტონის დამზადების ტექნოლოგია, სადაც ერთის მხრივ შემკვრელის როლს ასრულებს თხევადი გოგირდი, ხოლო მეორეს მხრივ, წარმოდგენილია ახალი სახის ბეტონი- პოლიმერლექობეტონი, სადაც მსუბუქი მსხვილი ფოროვანი შემვსები იფარება თხევადი პოლიმერით.

გოგირდბეტონი გაციების შედეგად გამყარებული გოგირდის, წვრილ-მარცვლოვანი დანამატის და შემვსების - ქვიშა, ღორღი, ხრემის ნარევს წარმოადგენს. გოგირდბეტონის დადებით თვისებებს პირველ რიგში მიეკუთვნება: სიმტკიცის სწრაფი აკრეფა, რომელიც მხოლოდ გოგირდბეტონის ნარევის გაციებასთან არის

დაკავშირებული, მაღალი სიმტკიცე, რიგი აგრესიული პროდუქტების მიმართ ქიმიური მედეგობა, დაბალი წყალშედწევადობა და შესაბამისად მაღალი ყინვამედეგობა [4].

გოგირდბეტონის მიღების ტექნოლოგია უმნიშვნელოდ განსხვავდება ასფალტბეტონის და ისეთი ბეტონის წარმოების ტექნოლოგიისაგან, რომლებიც მაღალი სიმტკიცით ხასიათდებიან და შეიძლება მათი არსებულ ასფალტის ქარხნებში დამზადება.

გოგირდი (S) გამოიყენებოდა გრანულოვანი, მოყვითალო - ლიმონისფერი, მოცულობითი წონით $\gamma_0=1000\text{კგ/მ}^3$. გოგირდბეტონში აუცილებელ წვრილდისპერსიულ დანამატად გამოვიყენე მინერალური ბაზალტის ქვის მტვერი, რუსთავის თევზის ქვარტლის ნაცვლად [5].

გოგირდბეტონის დამზადება წარმოებდა $160^{\circ}\text{-}180^{\circ}\text{C}$ -მდე გაცხელებული გამდნარი გოგირდის შენადნობის გადარევით ამავე ტემპერატურამდე გაცხელებულ შემვსებებთან. ფორმებში ჩაწყობილი ნარევის შემკვრივება დატვირთვის ქვეშ ვიბრირებით ხდებოდა.

დადგენილია მძიმე და მსუბუქი გოგირდბეტონის შემადგენლობა, მასში შემავალი გოგირდის, მინერალური მტვრის ოპტიმალური კონცენტრაციის დადგენით.

გამოკვლევული ბეტონების სიმტკიცის მაჩვენებლები (როგორც მძიმე ისე მსუბუქი ბეტონებისათვის) გაჭიმვაზე ღუნვისას დაახლოებით 1,5-ჯერ აღემატება იმავე კლასის ცემენტის ბეტონის სიმტკიცის მაჩვენებლებს, რაც გოგირდბეტონის მაღალ სტრუქტურულ სიმტკიცეზე მეტყველებს.

გოგირდბეტონში დანამატის სახით მინერალური მტვრის ოპტიმალური რაოდენობის დასადგენად ჩატარებული ექსპერიმენტების მონაცემები მათემატიკურ-სტატისტიკურად დავამუშავე. გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება მასში არსებული გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობაზე შეიძლება აღიწეროს როგორც წრფივი, ასევე ლოგარითმული ფუნქციით. ანგარიშმა აჩვენა, რომ ორივე შემთხვევაში ამონაკრები ერთგვაროვანია, დროში სტაბილურია, შემთხვევითია და სტოქასტურად (შემთხვევითი, განუჭვრეტელი, განუსაზღვრელი ალბათობით მომხდარი) დამოუკიდებელი. მაქსიმალური ცდომილება კი არ აღემატება 10%-ს. ფუნქციაში შემავალი კოეფიციენტები ნაპოვნია პროგრამა Mathcad-ის 12 ვერსიის,

ფუნქცია genfit-ის უმცირეს კვადრატთა მეთოდით.

საბოლოოდ დადგინდა, რომ მიღებული გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობაზე 90%-ზე მეტი საიმედოობით აღწერს მიმდინარე ტექნოლოგიურ პროცესს.

ამავე თავში მოყვანილია მძიმე და მსუბუქი გოგირდბეტონის კვლევები განმეორებით მკუმშავ მცირეციკლიან დატვირთვებზე. ექსპერიმენტები ჩატარდა იგივე მეთოდიკით, რომელიც ცემენტის ბეტონების ციკლური დატვირთვის დროს გამოიყენება.

ციკლური დატვირთვებისას დრეკადი დეფორმაციების მოდულის ცვლილების გამოკვლევამ დატვირთვების ციკლის რაოდენობაზე გვიჩვენა, რომ გოგირდბეტონის დეფორმაციის მოდულის ცვლილება იმავე კანონზომიერებას ექვემდებარება, რასაც ცემენტის ბეტონების დრეკადი დეფორმაციის მოდულის ცვლილება. ამასთან ერთად გოგირდბეტონის დრეკადი დეფორმაციის მოდულები მეტია ცემენტის ბეტონების დრეკადი დეფორმაციის მოდულების ნორმატიულ მაჩვენებელზე.

მთლიანობაში გამოკვლევებმა გოგირდბეტონის საკმაოდ საიმედო მუშაობა გვაჩვენა მცირეციკლიანი მკუმშავი დატვირთვების დროს.

ამავე თავში შესწავლილია გოგირდბეტონის გამოყენების შესაძლებლობა ორშრიანი სამოსის ქვედა შრის მოსაწყობად. გოგირდბეტონის სიმტკიცის მაღალი მაჩვენებლების გათვალისწინებით შესწავლილი იქნა ორშრიანი სამოსის მოწყობის ეფექტურობა ორი შემთხვევისათვის: პირველი-ზედა ფენა ცემენტობეტონისაგან და ქვედა მძიმე ბეტონისაგან; მეორე-ზედა შრე ცემენტის ბეტონისაგან, ქვედა მსუბუქ ფოროვან შემცსებზე (ახალქალაქის ვულკანურ წიდაზე) დამზადებული გოგირდბეტონისაგან. ცდები ტარდებოდა 10X10X40სმ ძეგლების ღუნვაზე გამოცდით ძალის მოდების სამწერტილიანი სქემით, ნიმუშების გრძივი განლაგებისას ცემენტის ბეტონისა და გოგირდბეტონის შრეების სისქე კვეთის სიმაღლეში 1:0; 2:1; 1:1; 1:2; 0:1 შეადგენდა. ცემენტის ბეტონის შრის ფორმაში ჩაწყობა გოგირდიანი ბეტონის შრის გაცივების შემდეგ წარმოებდა.

გოგირდბეტონის ზემოთ მოყვანილი განსაკუთრებული თვისებების ასევე მონაცემების (სწრაფი გამყარება და გამყარებისთანავე მაღალი სიმტკიცე, დაბალი წყალშეღწევადობა, ყინვამედეგობა, წყალუჟონადობა, კოროზია მედეგობა, ხელმეორედ გადამუშავების შესაძლებლობა) გათვალისწინებით გოგირდბეტონის

შემადგენლობის შერჩევა, გოგირდის შემკვრელზე ისეთი კომპოზიციის შექმნის პირობიდან ხდება, რომელსაც მაღალი მოლექულური სიმტკიცის გოგირდის პოლიმერული მოდიფიკაციის წარმოქმნის უნარი ექნება. ამავ დროს ეკონომიკური მოსაზრებიდან გამომდინარე გოგირდბეტონში გამოყენებული მასალა იაფი და ხელმისაწვდომი უნდა იყოს. ამიტომ შემადგენლობის შერჩევას არჩევანი გაკეთდა იმავე შემავსებლებზე რაც ცემენტთან ბეტონს აქვს: ხრეში, ღორღი და ქვიშის ნარევი.

გამოცდილებამ აჩვენა, რომ გოგირდბეტონში მტვრის გამოყენება დადებით ზეგავლენას ახდენს [5], გარდა ამისა კვლევების დადებითი შედეგებისას, მიწისქვეშა, წყალქვეშა, ნაპირსამაგრი, საგზაო და აეროდრომის სამუშაოების მასშტაბების გათვალისწინებით, საკმაოდ ეფექტურად გადაიჭრება ასეთი ტიპის სამრეწველო ნარჩენების უტილიზაციის საკითხი.

გამოკვლეულია, როგორც მძიმე ისე მსუბუქ ფოროვან შემავსებელზე დამზადებული გოგირდბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები. დასაბუთებულია მსუბუქი და მძიმე გოგირდბეტონის უპირატესობა აგრესიულ გარემოში ჩვეულებრივ პორტლანდცემენტზე დამზადებულ ბეტონთან შედარებით. გოგირდბეტონის თვისებებიდან გამომდინარე მოცემულია მისი გამოყენების არეალი.

მეორეს მხრივ გამოკვლეულია, როგორც მძიმე ისე მსუბუქ ფოროვან შემავსებელზე დამზადებული პოლიმერლექობეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები (წყალშთანთქმადობა, წყალმედევობა, ცვეთადობა) და აგრესიული გარემოს გავლენა პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცეზე (კოროზიამედევობა). დასაბუთებულია მსუბუქი და მძიმე პოლიმერლექობეტონის უპირატესობა აგრესიულ გარემოში ჩვეულებრივ პორტლანდცემენტზე დამზადებულ ბეტონთან შედარებით.

აქვე აღწერილია მსუბუქი პოლიმერლექობეტონით დამზადებული ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციები, რომლებიც ადვილად აწყობადია და ტექნიკურ-ეკონომიკურად ეფექტური.

1. ლიტერატურის მიმოხილვა

1.1. საქართველოს შავი ზღვისპირეთის კლიმატის დახასიათება და მისი გავლენა რკინაბეტონის კოროზიაზე

სამუშაოები ძირითადად შესრულებულია თბილისის ენერგეტიკისა და ენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტის ბეტონის ლაბორატორიაში და შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ტექნოლოგიურ ფაკულტეტზე. ნაშრომში აგრეთვე გამოყენებულია მრავალწლიანი მეტეოროლოგიური ნატურული დაკვირვებანი [2, 6, 7].

საქართველოს შავი ზღვის სანაპირო სუბტროპიკული ზონაა თბილი, ზღვის ტენიანი კლიმატით. კლიმატის განსაკუთრებულობა ქმნის რკინაბეტონის კონსტრუქციების ექსპლუატაციის სპეციფიკურ პირობებს. ამიტომ მისი შესწავლა და ანალიზი საინტერესო და საჭიროა.

შესწავლილია და გაანალიზებულია კლიმატის მონაცემები სანაპიროს სამ ქალაქში - ბათუმში, ფოთსა და სოხუმში; შესადარებელ ეტალონად აღებულია ქ. თბილისის კლიმატური მონაცემები, რადგან იგი მდებარეობს შედარებით მშრალ ზონაში.

ეს ქალაქები გამოირჩევიან საერთო კლიმატური თვისებებით; მაღალი ფარდობითი ტენიანობით, საშუალოდ 75-85%; წვიმიანი დღეების რაოდენობით დაახლოებით 2000 მმ წელიწადში; საშუალო წლიური ტემპერატურით 14°-15°C; წელიწადში ცხელი პერიოდით 6 თვის განმავლობაში - მაისიდან სექტემბრის ჩათვლით, საშუალო ტემპერატურით 16°-25°C, ხოლო მაქსიმალური 40°-42°C. ამავე პერიოდში გამოიყოფა ნალექების განსაკუთრებით დიდი რაოდენობა. ტენიანობის დღიური რაოდენობა აღწევს 15-20%. აღსანიშნავია რომ ატმოსფერული ნალექები ძლიერ მინერალიზებულია. კერძოდ, ქლორის იონების მაღალი კონცენტრაცია დაფიქსირებულია ქ. ქობულეთში მოსულ ატმოსფერულ ნალექებში [1].

სანაპიროებისათვის ზაფხულში დამახასიათებელია მზის სიკაშკაშის დიდი ხანგრძლივობა, რომელიც ჰორიზონტალური ზედაპირებისათვის დღის 11 სთ-დან 14 სთ-მდე შეადგენს 800 კკალ/მ²-სთ. ზამთარში ზღვის სანაპიროს ახასიათებს თბილი ტემპერატურა 5°-8°C. საშუალო მინიმალური ტემპერატურა აღწევს 4°C. დროდადრო

მოდის თოვლი რომელიც იქვე დნება.

სანაპიროს კლიმატზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ქარი, რომელიც ძირითადად ზღვიდან - სამხრეთ დასავლეთის, დასავლეთის და ჩრდილო დასავლეთის მხრიდან უბერავს. ქარის საშუალო წლიური სიჩქარე 2,4-4,5 მ/წმ; ზოგიერთ შემთხვევაში კი - 15 მ/წმ.

ასეთია სანაპიროს კლიმატის საერთო მახასიათებლები [1].

ამასთან ერთად, სანაპიროს ცალკეულ პუნქტებს - ბათუმს, ფოთსა და სოხუმს აქვთ ცალკეული თავისებურებებიც.

მაგალითად, ბათუმი ხასიათდება უფრო მაღალი ფარდობითი ტენიანობით, რომელიც აღწევს 80-85%, რაც თავის მხრივ, 10%-ით მეტია სოხუმთან და 20%-ით მეტი თბილისთან შედარებით. ასევე, ბათუმის რაიონში ნალექების ჯამური რაოდენობა წელიწადში შეადგენს 2718 მმ, რაც 2-ჯერ მეტია, ვიდრე სოხუმში. ბათუმში ხშირად 2-3 დღის განმავლობაში 400 მმ ნალექის რაოდენობა მოდის წვიმის სახით, ზოგიერთი ქალაქის წლიურ ნორმას შეადგენს. სოხუმში გაგრასა და ბიჭვინთაში დაახლოებით ერთნაირი, გაცილებით მშრალი კლიმატია, ვიდრე ბათუმში. სამაგიეროდ ამ რაიონში აღინიშნება მაღალი ინტენსივობის მზიური რადიაცია, რაც გამოწვეულია ნათელი მზიანი დღეების დიდი რაოდენობითა და წვიმიანი დღეების ნაკლებობით.

კლიმატის მიხედვით ფოთს საშუალო პოზიცია უკავია ბათუმსა და სოხუმს შორის. ამავე დროს იგი გამოირჩევა ძლიერი ქარებით, რომელიც ზღვიდან უბერავს საკმაოდ ხანგრძლივად.

ბათუმის, ფოთის, სოხუმის, გაგრის და ბიჭვინთის ნაგებობების შესასწავლად ჩატარებული კვლევები გვიჩვენებს, რომ ამ რაიონებში რკინა-ბეტონის კონსტრუქციებს აქვთ მნიშვნელოვანი კოროზიული დაზიანებები.

ჰაერის მაღალი ფარდობითი ტენიანობა საშუალოდ 75-85%, რომელიც მნიშვნელოვნად აღემატება კრიტიკულს - 60%, წლიური დადებითი ტემპერატურა ბეტონის დამცავი ფენის კოროზიის შემდეგ ხელს უწყობს არმატურის კოროზიული პროცესების დაჩქარებას.

კონსტრუქციების ზედაპირზე არმატურის ღეროს გასწვრივ, ღეროების გაჭიმვის შედეგად ჩნდება ბზარები, დამცავი ფენა იშლება და ალაგ-ალაგ აჩენს არმატურას. ატმოსფერული კოროზიის პროცესი შეუწყვეტლად მიმდინარეობს, რაც

მნიშვნელოვნად აზიანებს კონსტრუქციებს.

ხშირი წვიმების შედეგად კონსტრუქცია ციკლურად განმეორებად გაღობა-გაშრობას განიცდის, რაც თანდათანობით არყევს ბეტონის სტრუქტურას და აგრესიული ტენის მუდმივ მიგრაციას იწვევს ბეტონის სიღრმეში. ნალექებში იონების, განსაკუთრებით კი ქლორისა და სულფიდების დიდი კონცენტრაცია მნიშვნელოვნად აჩქარებს კოროზიული პროცესების განვითარებას და ამცირებს აგრესიისადმი კონსტრუქციის სიმტკიცესა და მდგრადობას.

რკინა-ბეტონის ატმოსფერული კოროზიის განვითარებაში მნიშვნელოვან როლს თამაშობს ქარი. ზღვის ზედაპირიდან ქარი იტაცებს მარილიანი წყლის წვეთებს, გადააქვს ისინი დიდ მანძილზე და იშთანთქმება ატმოსფერულ ნალექებში. ნალექებში შთანთქმული აგრესიული იონები დიფუზიითა და კაპილარული შესრუტვის გზით შედიან ბეტონში და აზიანებენ მას [2, 3].

უხვი ნალექებისა და ქარის ურთიერთქმედება შეიმჩნევა ბათუმისა და განსაკუთრებით ფოთის რაიონებში, სადაც დარეგისტრირებულია ქლორისა და სულფატის ძლიერი კონცენტრაცია. შესაბამისად ატმოსფერული კოროზია ამ რაიონებში მოქმედებს ყველაზე ძლიერად. კვლევებმა გვიჩვენა, სპეციალური საფარით დაუცველი რკინისა და ფოლადის კონსტრუქციების დეტალები ადვილად იჟანგებიან. ბეტონის დამცავი ფენა ამ პირობებში არასაკმარისად იცავს არმატურას და ექსპლუატაციის 2-3 წლის შემდეგ რკინაბეტონის კონსტრუქციებში ჩნდებიან კოროზიული დაზიანებები.

რკინა-ბეტონის არასასურველ ფაქტორს წარმოადგენს სანაპირო ზონისათვის დამახასიათებელი მაღალი ინტენსივობის მზის რადიაცია, რომელიც ჰორიზონტალურ ზედაპირზე ზაფხულის დღის დროს იზომება სიდიდით > 800 კკალ/მ² საათში. სითბოს ძლიერი ნაკადი დამახასიათებელია სოხუმის რაიონისათვის, რაც გამოწვეულია მზიანი დღეების დიდი რაოდენობით და მაღალი ტემპერატურით, რომელიც ზაფხულში 42°C აღწევს.

მზის სხივებისაგან დაუცველი ბეტონი განიცდის ცვლილებას, მის ზედაპირზე განვითარებას იწყებს დესტრუქციული პროცესი - დაბზარვა, გამოფიტვა და სხვა დეფექტები, რომლებიც ვითარდება კონსტრუქციის სიღრმეში, ისინი არმატურამდე კოროზიული აგენტების მისაღწევი ე. წ. არხები ხდებიან [3].

ნატურულმა დაკვირვებებმა გვიჩვენა, რომ ბათუმსა და ფოთში აგრეთვე დიდია

მზის რადიაციის ნაკადი, მაგრამ მის მოქმედებას ნაწილობრივ ჰაერის მაღალი ტენიანობა და 2-ჯერ მეტი ნალექების რაოდენობა ანეიტრალებს.

სოხუმის რაიონში კი მზის რადიაციის მოქმედება განსაკუთრებით ძლიერია, რაც ბეტონის სწრაფ რღვევას იწვევს, მაგრამ ამავე დროს არმატურის ჟანგვა უფრო ხანგრძლივი დროის განმავლობაში მიმდინარეობს, ვიდრე ბათუმში.

როგორც ცხრილიდან 4 ჩანს, რომ 2007 წელს ბათუმში შედარებით დაბალი ტემპერატურა იყო. თუმცა მომდევნო წლებში ამ მხრივ მდგომარეობა შეიცვალა. საშუალო ტემპერატურამ საგრძნობლად მოიმატა, განსაკუთრებით აგვისტოს თვეში.

მიღებული ნატურული დაკვირვებების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 1.1. და 1.2.

ბათუმის 2002-2009 წლის ატმოსფერული ჰაერის შემადგენლობის ამსახველი ინფორმაცია მოყვანილია ცხრილში 1.3.

ცხრილიდან 1.3. ჩანს, რომ 2003 წლიდან ბათუმის ატმოსფეროში მოიმატა მავნე ნივთიერებებმა, კერძოდ მტვრის რაოდენობა 2008 და 2009 წლებში, ხოლო NO_2 -ის რაოდენობა 2009 წელს აღემატება ზღვრულად დასაშვებ კონცენტრაციას. ეს ნივთიერებები ნალექების პირველ ნაკადს შეერევინან და ბეტონის და რკინა-ბეტონის შემომფარგლავ კონსტრუქციებზე უარყოფით ზემოქმედებას ახდენენ.

შედარებისათვის მოყვანილია ზოგიერთი მავნე ნივთიერების ზღვრული დასაშვებ კონცენტრაციებს ე.წ. ზღვ: მტვერი-0,5მგ/მ³; SO_2 (გამონაბოლქვი)- 0,5მგ/მ³; NO_2 (ხანძრის შედეგად გამონაყოფი)- 0,085 მგ/მ³; H_2S -0,008 [8].

2007 წლის საშუალო ტემპერატურა თვეების მიხედვით მოცემულია ცხრილში 1.4., ხოლო ნალექების საშუალო (დღელამური, თვის, წლის) რაოდენობა ცხრილში 1.5.

ცხრილი 1.1.
საქართველოს ზოგიერთი ქალაქის საშუალო ტემპერატურა და ნალექების წლიური რაოდენობა

ქალაქი	საშუალო წლიური ჯამური ნალექი, მმ	დღეების რაოდენობა წელიწადში		ჰაერის საშუალო წლიური ტემპ, °C	საშუალო აბსოლუტური ტემპერატურა, °C		აბსოლუტ. მაქსიმალური ტემპერატურა, °C	დღეების რაოდენობა 0,1მმ-ზე მეტი ნალექებით
		ნათელი	წვიმიანი		მაქსი	მინი		
ბათუმი	2718	168	109	14,5	33,0	-4,0	41,0	168,0
სოხუმი	1831	157	100	14,4	34,0	-4,0	41,0	157,0
ფოთი	1475	151	150	15,0	34,0	-4,0	40,0	151,0
თბილისი	559	111	108	12,7	37,0	-10,0	40,0	111,0

ცხრილი 1.2.
საქართველოს ზოგიერთი ქალაქის ფარდობითი ტენიანობა, მზის სიკაშკაშის ხანგრძლივობა, წლიური რადიაცია და იონების კონცენტრაცია

ქალაქი	წლიური ფარდობითი ტენიანობა, %	მზის სიკაშკაშის ხანგრძლივობა, სთ	წლიური რადიაცია ნათელ ცაზე, კკალ/სმ ²	საშუალო წლიური ნალექების რაოდენობა, მმ	იონების კონცენტრაცია		საშუალო წლიური ქარის სიჩქარე, მ/წმ	დღეების საშუალო რაოდენობა ძლიერი ქარის დროს 15 მ/წმ
					SO ⁴ ''	CI'		
ბათუმი	81	1958	264	2046	122,03	365,3	1,8	16
ფოთი	78	2137	262	---	---	---	4,3	40
სოხუმი	75	2120	259	1321,8	59,66	28,9	2,4	16
თბილისი	66	2112	251	602,68	118,08	23,54	2,4	19

ცხრილი 1.3.

ბათუმის 2002-2009 წლის ატმოსფერული ჰაერის შემადგენლობა

ინგრედიენტი, მგ/მ ³	წლის საშუალო მაჩვენებელი						
	2002	2003	2004	2006	2007	2008	2009
მტვერი	---	---	---	---	---	61.3	54.3
SO_2	0.11	0.099	0.107	0.096	0.1	0.18	0.19
NO_2	0.051	0.048	0.062	0.056	0.053	0.153	0.096
ხსნადი სულფატები SO_4	0.02	0.022	0.026	0.019	0.021	0.02	0.02
H_2S	0.0046	---	---	0.0041	0.0046		

ცხრილი 1.4.

2007 წლის საშუალო ტემპერატურა (°C) თვეების მიხედვით

სადგური	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წლის
ბათუმი	7.8	6.8	9.7	9.9	---	---	23.7	24.9	22.3	19.0	11.8	7.6	14.34
ქობულეთი	5.7	5.4	8.9	9.6	18	21.7	23.5	24.9	22.1	18.6	10.5	6.8	14.64
ფოთი	6.5	6.7	9.0	10.1	19.2	22.5	23.0	25.3	22.9	18.9	10.7	6.9	15.14

ცხრილი 1.5.

2007 წლის ნალექების საშუალო (დღეღამური, თვის, წლის) რაოდენობა

სადგური		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	წლის
ბათუმი	საშუალო დღე- ღამური	8,8	4,9	4,1	4,2	0,3	5,2	2,7	7,0	8,6	11,2	15,2	12,8	2596,8
	თვის საშუალო	272,8	147,0	127,1	126,0	9,3	156,0	83,7	217,0	258,0	347,2	456,0	396,8	
ქობულეთი	საშუალო დღე- ღამური	8,7	4,3	4,9	4,2	1,6	5,7	3,9	6,5	10,2	8,4	16,7	11,4	2631,8
	თვის საშუალო	269,7	1,4	151,9	126,0	49,6	171,0	120,9	201,5	306,0	260,4	501,0	353,4	
ფოთი	საშუალო დღე- ღამური	3,9	-	3,0	4,3	1,0	9,4	3,2	3,9	4,8	6,0	13,0	8,3	1892,5
	თვის საშუალო	120,9		93,0	129,0	31,0	282,0	99,2	120,9	144,0	186,0	390,0	257,3	

1.2. ცემენტის, ბეტონის და რკინაბეტონის კოროზია აგრესიულ გარემოში

ბეტონს უწოდებენ ხანმედეგს თუ იგი რღვევის გარეშე მრავალი წლის განმავლობაში უძლებს იმ საექსპლუატაციო პირობებს, რომლისთვისაც იყო განკუთვნილი [9].

ხანმედეგობის დაბალი მაჩვენებელი შეიძლება განპირობებული იყოს ბეტონზე გარე ზემოქმედებით, ან თვით ბეტონში მიმდინარე შინაგანი პროცესებით. გარე ზემოქმედებას მიეკუთვნება: ფიზიკური, ქიმიური ან მექანიკური, რომელიც შეიძლება იყოს ატმოსფერული ზემოქმედების, ტემპერატურის ვარდნის, ანაორთქლის, ელექტროლიტების, ბუნებრივი და ტექნოლოგიური ხსნარების და აირების მოქმედების შედეგი. ამ ზემოქმედებით გამოწვეული დაზიანების ხარისხი განისაზღვრება ბეტონის ხარისხით, თუმცა ზოგიერთ შემთხვევაში ნებისმიერი დაუცველი ბეტონი ირღვევა. რღვევის შინაგან მიზეზებს წარმოადგენს კაჟმიწა შემავსებელთან ცემენტის ტუტე ხასიათი, სხვადასხვა ტემპერატურის გამო ცემენტის ქვის და შემავსებლის გაფართოების შედეგად მოცულობის ცვლილება და უპირველეს ყოვლისა ბეტონის შეღწევადობა. შეღწევადობა განისაზღვრება როგორც ბეტონის მდგრადობა გარე ზემოქმედებაზე. ამიტომ როგორც წესი ხანგამძლე ბეტონი უნდა იყოს შედარებით შეუღწევადი. ბეტონის დაშლა იშვიათად არის გამოწვეული მხოლოდ ერთი ფაქტორის მოქმედებით: ხშირად ბეტონი დამაკმაყოფილებლად იტანს გარე ზემოქმედებას, მაგრამ რომელიმე მავნე ზემოქმედების დამატებისას ხდება მისი რღვევა. ამიტომ რღვევის მიზეზის დადგენა ერთი განსაზღვრული ფაქტორით ძნელია, როგორც წესი მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ბეტონის ხარისხი [10].

მშენებლობაში გამოყენებული ბეტონის მხოლოდ მცირე ნაწილი ექვემდებარება ძლიერ ქიმიურ ზემოქმედებას. ეს კარგია, რადგან ბეტონის მდგრადობა ქიმიური აგენტების მიმართ გაცილებით დაბალია, ვიდრე სხვა ზემოქმედებაზე. ქიმიური აგრესიის გავრცელებული ფორმებია: ცემენტის

გამოტუტვა, სულფატების, ზღვის წყლის და ბუნებრივი მცირედ მჟავური წყლების მოქმედება [11].

ბეტონის მდგრადობა დამოკიდებულია გამოყენებული ცემენტის სახეზე. დამტკიცებულია, რომ მისი მდგრადობა მაღლდება შემდეგი თანმიმდევრობით:

1. ჩვეულებრივი და სწრაფად გამკვრივებადი პორტლანდცემენტი;
2. წიდაპორტლანდცემენტი ან დაბალთერმული პორტლანდცემენტი;
3. სულფატმდგრადი პორტლანდცემენტი ან პუცოლანური პორტლანდცემენტი;
4. სულფატურწიდა (თაბაშირწიდა) ცემენტი;
5. თიხამიწა ცემენტი;

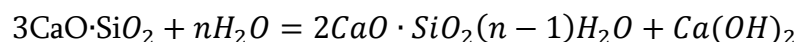
ხშირ შემთხვევაში ბეტონის სიმკვრივე და უჟონადობა უფრო დიდ გავლენას ახდენს მის ხანგამძლეობაზე, ვიდრე გამოყენებული ბეტონი [12].

1.3. კოროზიის გამომწვევი მიზეზები

გამყარებულ ცემენტზე, ბეტონზე ან დულაბზე შეიძლება მოქმედება მოახდინოს სითხეებმა და გაზებმა. ამათგან ზოგი ამცირებს სიმტკიცეს, ზოგიც აზიანებს ან მთლიანად შლის ცემენტს. ამ მოვლენების ერთობლიობაა ცემენტის კოროზია.

კოროზია გამყარებულ ცემენტში კალციუმის თავისუფალი ჰიდროქსიდის წარმოქმნასთან და სამკალციუმიანი ალუმინატის არსებობასთანაა დაკავშირებული [13].

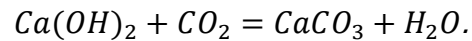
ცემენტის ჰიდროლიზის დროს შემდეგი რეაქცია მიმდინარეობს:



ამ დროს გამოიყოფა თავისუფალი კალციუმის ჰიდროქსიდი. მისი გახსნა და ცემენტიდან გამორეცხვა ფიზიკური კოროზიის უმარტივეს სახეს წარმოადგენს. მიუხედავად იმისა, რომ მისი ხსნადობა მცირეა (15⁰-ზე დაახლოებით 1,3 გრ. CaO იხსნება 1 ლ წყალში), გამდინარე წყლის

მოქმედების შედეგად ცემენტის ქვიდან ის დიდი რაოდენობით გამოირეცხება. ამის გამო ცემენტის ქვა ხდება ფოროვანი და კარგავს სიმტკიცის ნაწილს. თუ ბეტონი მკვრივია, არ შეიცავს სიცარიელებს და ბზარებს, მაშინ კოროზია შეიძლება მიმდინარეობდეს მხოლოდ ზედაპირზე. თუ ბეტონი ფოროვანია და მასში წყლის ნაკადი გამჭოლად, წნევით გაედინება, პროცესი ინტენსიურად მიმდინარეობს [14].

კალციუმის ჰიდროოქსიდზე ხსნად მოქმედებას ახდენს სუფთა კონდენცირებული და რბილი ბუნებრივი წყალი. თუმცა ხსნადობას ხელს უშლის კალციუმის ნახშირმჟავას დამცავი ქერქი, რომელიც ცემენტიდან გამოყოფილ კალციუმის ჰიდროოქსიდთან და ჰაერის ნახშირორჟანგის აირთან რეაქციის შედეგად წარმოიქმნება ცემენტის ან ბეტონის ზედაპირზე.



კალციუმის ნახშირმჟავას ხსნადობა სუფთა წყალში დაახლოებით 100-ჯერ მცირეა, ვიდრე კალციუმის ჰიდროოქსიდის. კალციუმის ნახშირმჟავას ქერქი თუმცა ძალიან თხელია, მაინც იცავს ცემენტის ქვას სუფთა წყლის ზემოქმედებისაგან (თუ ქერქი არ არის დაზიანებული).

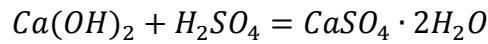
კალციუმის ნახშირმჟავას დამცავი თვისებები გამოიყენება საზღვაო ნაგებობების მშენებლობისას. ნაპირსამაგრი ბეტონის ბლოკებს ამზადებენ ნაპირზე, აჩერებენ 2-3 თვე ჰაერზე, რათა წარმოიშვას დამცავი ქერქი და მხოლოდ შემდეგ უშვებენ ზღვაში.

ცემენტის ქიმიური კოროზია ხდება მჟავების და ზოგიერთი მარილხსნარის ზემოქმედებით, რომლებიც რეაქციაში შედიან ცემენტიდან გამოყოფილ კალციუმის ჰიდროოქსიდთან ან ცემენტის სამკალციუმთან ალუმინატთან. შედეგად წარმოიქმნება მარილები, რომლებიც იოლად იხსნებიან წყალში ან კრისტალდებიან ფორებში და მოცულობაში გაზრდით ანგრევენ ცემენტის ქვას [15].

მჟავა, როგორც არაორგანული (გოგირდმჟავა, მარილმჟავა, აზოტმჟავა და სხვა) ისე ორგანული (ცხიმოვანი მჟავა, რომელსაც შეიცავს ცხოველური

და მცენარეული ცხიმები) დამანგრეველად მოქმედებენ ჩვეულებრივ ცემენტზე.

მაგალითად, გამყარებადი ცემენტიდან გამოყოფილ კალციუმის ჰიდროქსიდზე გოგირდმჟავას მოქმედებით თაბაშირი წარმოიქმნება, შემდეგი რეაქციით:



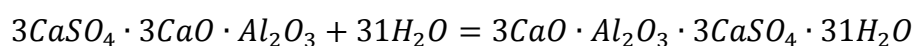
თაბაშირი კრისტალდება ცემენტის ქვის ფორებში, ფართოვდება და შლის მას. ცემენტის სამკალციუმიან ალუმინატთან თაბაშირი წარმოქმნის რთულ ნივთიერებებს - მოცულობაში მნიშვნელოვნად ზრდის კალციუმის სულფოალუმინატს. ყველა ამ მოვლენას მივყავართ გოგირდმჟავათი ცემენტის ქვის დაშლასთან.

მარილმჟავას მოქმედებით კი ქლოროვანი კალციუმი წარმოიქმნება, რომელიც იოლად იხსნება წყალში და ცემენტი იშლება [10].

ქლორიანი კალცი იოლად იხსნება წყალში და ცემენტი იშლება. თავისუფალი მჟავები გვხვდება სამრეწველო ორგანიზაციების ჩამდინარე (მათ შეუძლიათ ფორებში შეჭრა და ბეტონის ფუნდამენტის დაშლა) და ჭაობის წყლებში. მჟავა წარმოიქმნება ასევე გოგირდოვანი აირით, რომელიც გამოიყოფა საქვებებიდან, ორთქლმავლებიდან და სხვადასხვა ქიმიური აპარატებიდან. მისი შეერთებისას ჰაერის ტენთან ან წყლის ორთქლთან გოგირდმჟავა იწვევს ქარხნებისა და ორთქლმავლების დეპოს რკინაბეტონის გადახურვების კოროზიას [10].

მარილთა ხსნარებიდან ყველაზე საშიშია გოგირდმჟავას მარილები (სულფატები). ბუნებრივ წყლებში, ნაწილობრივ ზღვებში ყველაზე მეტად გვხვდება $CaSO_4$ და $MgSO_4$, იშვიათად $(NH_4)_2SO_4$ და სხვა სულფატები.

სუფთა თაბაშიროვანი დუღაბების ცემენტზე ზემოქმედებისას, თაბაშირი ზემოქმედებს ცემენტის სამკალციუმიან ალუმინატთან და წარმოიქმნება რთული ქიმიური შენაერთი, კერძოდ კი კალციუმის ჰიდროსულფატოალუმინატი.



მიღებულ შენაერთს ეწოდება ეტრინგიტი ანუ "ცემენტის ბაცილა" ეწოდება, რადგან კალციუმის ჰიდროსულფატოალუმინატი კრისტალდება წვრილი ნემსების სახით და ბაცილას მოგვაგონებს.

ამ ნივთიერების წარმოქმნა ხდება დიდი რაოდენობის წყლის მიერთებით და მოცულობაში 2,5-ჯერ გაზრდისას. ამ ნაერთის გაფართოებით ცემენტის ქვა სკდება და შემდეგ წყლის ან მარილხსნარების მოქმედებით გარდაიქმნება თხევად, თეთრ ლორწოდ და ბეტონიდან გამოედინება.

ყველა ეს გამოვლინება იწვევს ცემენტის ქვის დაშლას. მის ნაცვლად წარმოიშობა თეთრი ცომისებური მასა. აქედან გაჩნდა გამოთქმა "ბეტონის თეთრი სიკვდილი" [16].

ქლოროვანი მარილები (ქლორიდები) კი, რომელსაც ზღვის წყალი შეიცავს დამანგრეველად მოქმედებს ქლოროვან მაგნიუმის ცემენტზე ქლოროვან კალციუმზე და ალუმინზე. ქლოროვანი მაგნიუმის მოქმედებისას კალციუმის ჰიდროქსიდზე წარმოიქმნება ადვილად ხსნადი ქლოროვანი კალციუმი და მაგნიუმის ოქსიდის ჰიდრატი.

სუფრის მარილი $NaCl$ ამაღლებს კალციუმის ჰიდროქსიდის ხსნადობას, უერთდება ალუმინატებს და რამდენჯერმე ამცირებს ცემენტის სიმტკიცეს. ამიტომ ბეტონზე მოქმედ წყალში დიდი რაოდენობით $NaCl$ არსებობა არასასურველია.

$MgSO_4$, $MgCl_2$ და სხვა მარილების შემცველი ზღვის, ასევე მარილიანი ტბის და ზოგიერთი გრუნტის წყალი დამანგრეველად მოქმედებს ჩვეულებრივ ცემენტზე, თუ არ ჩავატარებთ სპეციალურ დამცავ ღონისძიებებს, ასეთ წყალში ცემენტი თუმცა ნელა, მაგრამ მაინც დაიშლება.

წყლის, მჟავას და მარილხსნარების მოქმედება ცემენტზე განსაკუთრებით ინტენსიურია თუ ბეტონი არამკვრივია ან ბოლომდე ჯერ არ გამყარებულა. ამ დროს ფილტრაცია მიმდინარეობს იმის გამო, რომ წყალი წნევით გაედინება [17].

მკვრივი კარბონატული ქანები (მარმარილო, დოლომიტი, კირქვა) კარგა ხანია და დიდი მოცულობით გამოიყენება მშენებლობაში ღორღის წარმოებისას. იგი ბეტონის ტექნოლოგიაში მსხვილი შემავსებლის როლს ასრულებს. ღორღად გადამუშავებული კარბონატული ქანების წილი 60%-მდეა. ბოლო წლებში კარბონატული ქანების გამოყენების სფერო მნიშვნელოვნად გაიზარდა. ჯერ ერთი არსებობს ევროპული ცემენტის ნორმატივის EN197-1-ის შესაბამისი ГОСТ 31108-2003 სტანდარტი, რომელიც პორტლანდცემენტში მასის 0-დან 5%-მდე კარბონატული ქანის, როგორც დამხმარე კომპონენტის შეყვანას ითვალისწინებს [18,19].

დიდი ხნის განმავლობაში კარბონატული შემავსებლები: ღორღი და ქვიშა, ცემენტის გამაგრებისას ფორებშორისი სითხის წარმოქმნის თვალსაზრისით ინერტულ კომპონენტებად ითვლებოდნენ [19,20].

უნდა აღინიშნოს, რომ ცემენტის ქვის კირქვის და მარმარილოს გლუვ ზედაპირთან მოჭიდების მაღალმა სიმტკიცემ განაპირობა, მკვლევართა დაინტერესება. კვლევებით კი დადგინდა, რომ კალციუმის კარბონატსა (კალციტი) და ცემენტის ცომს შორის რეაქცია მიმდინარეობს. 1956 წელს ჯ.ფარანმა პირველად განაცხადა ცემენტის კლინკერის კალციუმის ალუმინატსა და კარბონატულ ქანებს შორის რეაქციის შესახებ [21, 22].

მყარი მარილები ბეტონზე არ მოქმედებენ, მაგრამ ხსნარში მყოფნი ცემენტის ქვასთან შედიან რეაქციაში. ზოგიერთი თიხა შეიცავს ტუტეს, მაგნიუმის და კალიუმის სულფატს. გრუნტის წყალი ასეთ თიხაში სულფატების გამხსნელს წარმოადგენს. სულფატები რეაქციაში შედიან ცემენტის ქვის კალციუმის ჰიდროოქსიდთან და კალციუმის ჰიდროალუმინატთან.

რეაქციის პროდუქტებს - თაბაშირს და კალციუმის სულფატო-ალუმინატს მნიშვნელოვნად მეტი მოცულობა გააჩნია, ვიდრე შემადგენელ კომპონენტებს. ამიტომ სულფატებთან ურთიერთქმედება ბეტონის გაფართოებას და რღვევას იწვევს [23].

სულფატების აგრესიული მოქმედება იზრდება მისი კონცენტრაციის გაზრდით, მაგრამ $MgSO_4$ -ის 0,5%-ზე და Na_2SO_4 -ის 1%-ზე მეტი შემცველობისას აგრესიული ზემოქმედება ნელა იზრდება. სულფატების კონცენტრაცია ჩვეულებრივ გამოისახება SO_3 -ის მასური წილის რაოდენობით მოლიონზე და მიიღება: 1000-ის შემთხვევაში საშუალოდ - აგრესიული მოქმედების, ხოლო 2000-ის შემთხვევაში ძლიერ აგრესიულად. განსაკუთრებით თუ ის ეხება $MgSO_4$ -ს [11].

ბეტონზე ზემოქმედების ინტენსივობა დამოკიდებულია არა მარტო სულფატების კონცენტრაციაზე არამედ ცემენტის რეაქციის შედეგად დუღაბიდან გამოდევნილი სულფატების შერევის შესაძლებლობაზე. სულფატების ზემოქმედების მავნებლობის შეფასებისას საჭიროა გრუნტის წყლების გათვალისწინება.

ბეტონზე ერთის მხრივ სულფატებით გაჯერებული წყლის ზემოქმედებისას აგრესიულობა დიდია. წყლით გაჯერებისა და გამოშრობის მონაცვლეობისას ასევე მოსალოდნელია სწრაფი რღვევა. მეორეს მხრივ როცა ბეტონი მთლიანად გაჯერებულია წყლით და გრუნტის წყალი შიგ ვერ აღწევს საფრთხე მნიშვნელოვნად მცირდება. სულფატების მოქმედებაზე შეიძლება ვიმსჯელოთ ბეტონის გარეგანი სახის მიხედვით. რღვევა ჩვეულებრივ იწყება კუთხეებში და კიდეებზე, შემდეგ კი შეიმჩნევა ბზარები, ბეტონი იფშვნება და გადადის ფხვიერ მდგომარეობაში [24].

სულფატებისადმი მდგრადობა ცემენტში პუცოლანის დამატებით ან ცემენტის ნაწილის პუცოლანით შეცვლით იზრდება. ბეტონის სულფატებისადმი მედეგობა დამოკიდებულია აგრეთვე მის წყალუჟონაობაზე. მაგ, სამირკველში მწირი ბეტონის გამოყენებას კონსტრუქციის დაზიანებამდე მივყავართ, სხვა პირობებში კი საკმაო ხანმედეგობამდე. მკვრივ ბეტონს დაბალი წყალცემენტის თანაფარდობა (საკმარისი რაოდენობით ცემენტს უნდა შეიცავდეს) უნდა ჰქონდეს. თიხა მიწა ცემენტზე დამზადებულ ბეტონსაც კი არ უნდა ჰქონდეს

შემადგენლობა უფრო მწირი, ვიდრე 1:9, თორემ ბეტონი იქნება ფოროვანი და შედეგად არამდგრადი.

უნდა აღინიშნოს, რომ ბეტონი 385კგ/მ³ ცემენტის ხარჯით ირღვევანელა, მაშინაც კი თუ ის დამზადებულია ჩვეულებრივ პორტლანტცემენტზე. ცემენტის დაბალი შემცველობისას სულფატების მოქმედება სწრაფად ხდება და ცემენტის შემადგენლობა მეტ გავლენას ახდენს ბეტონის ხანმედეგობაზე. ავტოკლავური დამუშავება ამალეებს ბეტონის სულფატებისადმი მდგრადობას.

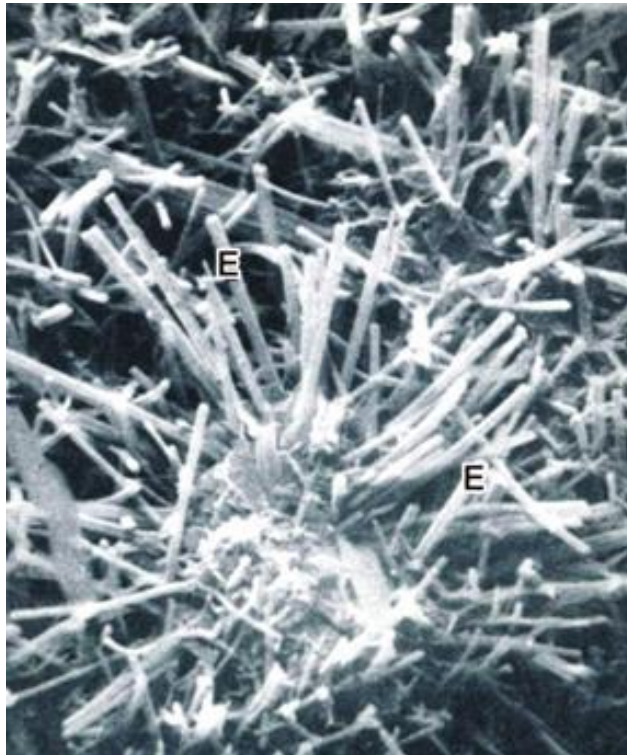


სურ.1.1. ბეტონის დაშლა ეტრინგიტის წარმოშობის შედეგად

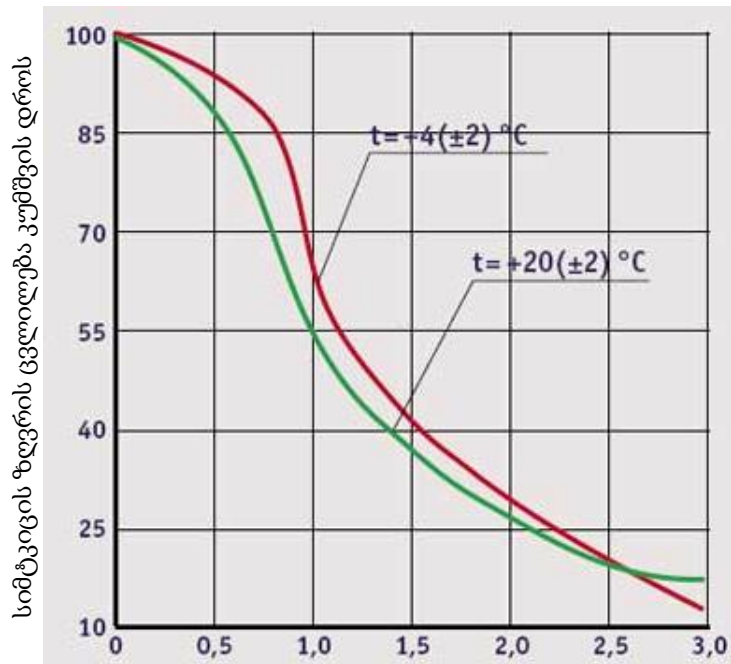


სურ.1.2. წვრილი ბზარების ქსელი ბეტონის ნიმუშის ზედაპირზე

ს.მ. ბაზანოვმა კვლევებით დაადგინა, რომ ატმოსფეროს დაბალი ტემპერატურა ($+4\pm 2^{\circ}\text{C}$) ეტრინგიტის წარმოქმნის პროვოცირებას იწვევს, ხოლო შედარებით მაღალი ტემპერატურა ($+20\pm 2^{\circ}\text{C}$) ტაუმასიტის წარმოშობას იწვევს. მიუხედავად იმისა, რომ ეტრინგიტს და ტაუმასიტს მსგავსი კრისტალური სტრუქტურა აქვს, ბეტონის კრისტალურ მასაში ერთ-ერთი კომპონენტის უპირატესად არსებობისას ბეტონის დაშლის ხასიათი მნიშვნელოვნად განსხვავებულია [25].

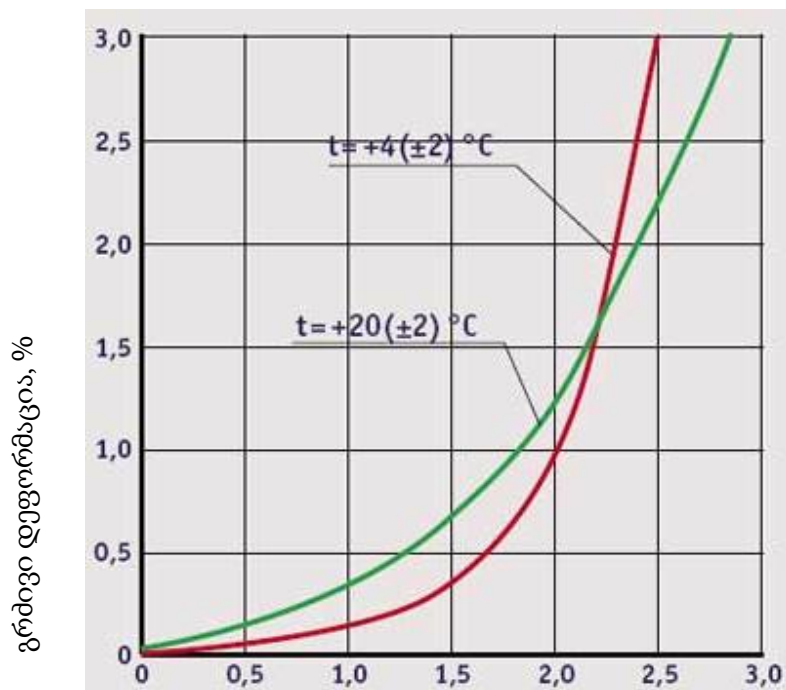


სურ. 1.3. ეტრინგიტის კრისტალების სტერეომიკროფოტოგრაფია



გამოცდის დრო, წელი

ნახ. 1.1. ბეტონის სიმტკიცის ცვლილება ეტრინგიტის (+4±2°C) და ტაუმასიტის(+20±2°C) წარმოქმნისას.



გამოცდის დრო, წელი

ნახ. 1.2. ბეტონის გრძივი დეფორმაცია ეტრინგიტის (+4±2°C) და ტაუმასიტის (+20±2°C) კრისტალიზაციისას.

1.3.1. ატმოსფეროს გავლენა ბეტონის და რკინაბეტონის კოროზიაზე

მიწისზედა და წყლისზედა რკინაბეტონის კონსტრუქციები შედარებით ხშირად განიცდიან ნელ რღვევას. რაც გამოწვეულია ფოლადის არმატურის და ბეტონის კოროზიით. არმატურა კოროზიას განიცდის ჰაერის 50%-ზე მეტი ფარდობითი ტენიანობის პირობებში, რადგან მხოლოდ მაშინ ბეტონის კაპილარებში და ფორებში იმყოფება ორივე აგრესიული აგენტი-წყალი და ჟანგბადი, რომელთა ერთობლივი არსებობა ფოლადის ელექტროქიმიური კოროზიის შესაძლებლობას განსაზღვრავს [26].

ფოლადის არმატურის კოროზიის სიჩქარე იზრდება გარემომცველი ჰაერის ტენიანობის და ტემპერატურის გაზრდით, ასევე ატმოსფეროში ზოგიერთი აგრესიული აირის-ქლორის, ქლორწყალბადის და სხვათა არსებობა. განსაკუთრებით ინტენსიურია ფოლადის არმატურის კოროზია ჰაერის 75-80% ფარდობითი ტენიანობის დროს. უფრო მაღალი ტენიანობისას კოროზიის პროცესი ნელდება და ჟანგბადი ვეღარ აღწევს არმატურის ზედაპირამდე [27].

რკინა-ბეტონის კონსტრუქციების არმატურის კოროზიის გარეგანი ნიშნებია ბეტონის დამცავი ფენის თანდათან გაფართოებული ბზარები, რომლებიც მუშა არმატურის გასწვრივ მიემართებიან, ბეტონის ახლეჩა და არმატურის გამიშვლება.

რკინაბეტონის კონსტრუქციებისათვის გარემოს აგრესიულობის ხარისხი არა მარტო ჰაერის ფარდობითი ტენიანობით, არამედ ბეტონის სახეობითაც (მძიმე, მსუბუქი ფოროვანი შემავსებლით, უჯრედოვანი) განისაზღვრება. ასე მაგალითად, გარემო, ჰაერის ფარდობითი ტენიანობით 75%, რომელიც არ შეიცავს აგრესიულ აირებს ჩვეულებრივი მკვრივი ბეტონით დამზადებული რკინაბეტონის კონსტრუქციებისათვის არ არის აგრესიული, თუმცა იგივე გარემო აგრესიულია მსუბუქი და ნაწილობრივ უჯრედოვანი ავტოკლავური ბეტონით დამზადებული რკინაბეტონის

შემომფარგლავი კონსტრუქციებისათვის. ასეთი კონსტრუქციების ხანმედევობის უზრუნველყოფა შეიძლება რიგი პროფილაქტიკური ღონისძიებებით, ნაწილობრივ არმატურაზე დამცავი საფარის დატანით.

ჰაერის აგრესიულობის სიძლიერის და რკინაბეტონის კონსტრუქციის სახეობის გათვალისწინებით ფოლადის არმატურას კოროზიისგან იცავენ სხვადასხვა საშუალებებით. მძიმე ბეტონის რკინა-ბეტონის კონსტრუქციებში არმატურის დაცვა უზრუნველყოფილია: სიმკვრივის ამღლებით და ბეტონის დამცავი ფენის სისქით; ბეტონში გამაპასიურებელი დანამატების შეყვანით, მაგ. ნატრიუმის ნიტრატი და სხვა; ცალკეულ შემთხვევებში ღია ზედაპირების ლაქსადებადებით დაფარვით, მაგ. ბიტუმი-ეთილენის ლაქი [28].

ფოროვან შემავსებელზე დამზადებული მსუბუქი ბეტონის რკინაბეტონის კონსტრუქციებში არმატურის დაცვა იგივე ღონისძიებებით ხორციელდება, თუმცა მათი ეფექტურობა საკმარისი არაა გარემოს მომატებული და მაღალი აგრესიულობის პირობებში (ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის 75-85% შემთხვევაში ან უფრო დაბალი ტენიანობისას, მაგრამ ჰაერში ქლორის, ქლორწყალბადის, გოგირდის ანჰიდრიდის ან სხვა აგრესიული აირების არსებობისას).

ავტოკლავური გამაგრების უჯრედოვანი ბეტონისგან დამზადებული შემომფარგლავი კონსტრუქციის არმატურის დაცვის უზრუნველყოფა უპირატესად შესაძლებელია არმატურაზე დამცავი საფარის მოწყობით და კონსტრუქციების ღია ზედაპირების ანტიკოროზიული საღებავებით შეღებვით. თუმცა აგრესიულ გარემოში (75% ჰაერის ფარდობითი ტენიანობის დროს და ჰაერში აგრესიული აირების არსებობისას ასეთი დაცვითი ღონისძიებები ნაკლებად ეფექტურია [29,30].

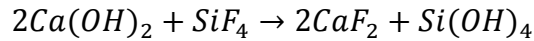
ტენიან ატმოსფეროში ბეტონზე SO_2 , CO_2 და სხვა მჟავა აირები მოქმედებენ. შლიან და აცილებენ ცემენტის გამაგრებულ ნაწილებს და ბეტონს გარდაქმნიან ფოროვან მასად. ზემოქმედების ასეთი სახე გვხვდება საკვამურ მიწებში და გვირაბებში, ასევე სამრეწველო შენობებში.

ბეტონი თავისუფალი CO_2 -ის შემცველი წყლის მოქმედებითაც იშლება. ყინულის დნობის ან კონდენსირების შედეგად წარმოშობილი წყალი, რომელიც მცირე რაოდენობით CO_2 -ს შეიცავს ხსნის $Ca(OH)_2$ და იწვევს ბეტონის ზედაპირის დაშლას. ზემოქმედების ასეთი სახე გასათვალისწინებელია მთიან რაიონებში მიწების მშენებლობისას, არა მარტო ხანგამძლეობის თვალსაზრისით არამედ იმიტომაც რომ ცემენტის გამოტუტვა აშიშვლებს შემავსებელს და ამაღლებს მიწების ხორკლიანობას. ამიტომ უმჯობესია კარბონატული ჯიშის შემავსებლების გამოყენება. თუმცა საყოფაცხოვრებო ჩამდინარე წყალს გააჩნია ტუტე რეაქცია და არ მოქმედებს ბეტონზე. კანალიზაციის რღვევა ხშირ შემთხვევაში, განსაკუთრებით მაღალი ტემპერატურის დროს არის მოსალოდნელი, როცა ანაერობული ბაქტერიების მეშვეობით გოგირდოვანი შეერთება გარდაიქმნება H_2S . ეს შეერთება თავისთავად არ წარმოადგენს დამანგრეველს, მაგრამ ბეტონის ზედაპირზე ტენის აფსკში გახსნისას და აერობული ბაქტერიების ამჟავებისას გადადის გოგირდმჟავაში. ცემენტის ხსნადობის შედეგად დაშლის პროცესი ჩამდინარე წყლების დონის ზემოთ მიმდინარეობს.

ბეტონის გამძლეობა ქიმიური ზემოქმედებისადმი მალღდება მისი წინასწარი გამოშრობით. კალციუმის კარბონატის აპკი, რომელიც კალციუმის ჰიდროოქსიდის CO_2 -თან ურთიერთმოქმედებით წარმოიქმნება, ამჭიდროებს ფორებს და ამცირებს ბეტონის ზედა ფენის შეღწევადობას. ამიტომ ქარხნულად დამზადებული ბეტონის კონსტრუქციები ჩვეულებრივ უფრო მედეგია ვიდრე მონოლითური. ბეტონის მდგრადობა ქიმიური ზემოქმედებისადმი მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული მის სიმკვრივეზე-შეღწევადობაზე [31,32].

წარმატებით გამოიყენება აგრეთვე ზედაპირის დამუშავება ქვანახშირის კუპრით, რეზინის ან ბიტუმის მასტიკით, კაჟფტორიანი მაგნიუმით და სხვა [33]. ზედაპირების ასეთი დაფარვის დამცავი თვისებები სხვადასხვაა, მაგრამ ნებისმიერი მათგანს არ უნდა ჰქონდეს დაზიანება,

ამიტომ აუცილებელია დათვალიერება და პერიოდული განახლება. მჟავას მოქმედებისაგან ბეტონის საიმედო დაცვა მიიღწევა მისი ვაკუუმში დამუშავებით. SiF_4 -აირი რეაგირებს კალციუმის ჰიდროოქსიდზე:



ასე ამუშავებენ ბეტონს ქარხნული დამზადებისას.

1.3.2. რკინაბეტონის კონსტრუქციების კოროზია თხევადი

აგრესიული გარემოს ზემოქმედებისას

წყლისქვეშა და მიწისქვეშა საინჟინრო ნაგებობების ნაწილებმა და შენობებმა კოროზია შეიძლება განიცადონ მათზე აგრესიული გრუნტის ან ზღვის წყლის ზემოქმედებით. თუ ღია ჰაერზე მდებარე რკინა-ბეტონის კონსტრუქციებში რკინა-ბეტონის ნელი რღევა გამოწვეულია ფოლადის არმატურის კოროზიით, აგრესიულ წყლებში რკინაბეტონის კოროზია უპირველესად გამოწვეულია ბეტონის დაშლით. აგრესიული წყლების ზემოქმედებით ცემენტის ქვა ნელ-ნელა იშლება. წყალი-გარემოს ბეტონთან მიმართებაში აგრესიულობას ადგენენ ქიმიური ანალიზის საფუძველზე, ნაწილობრივ 1ლ წყლის შემადგენლობით: HCO_3^- -იონების მგ/ეკვ. წყლის გამომტუტავი თვისების მახასიათებელია [34].

წყალი-გარემოს ბეტონისათვის აგრესიულობის ხარისხზე მსჯელობენ წყლის ქიმიური ანალიზის შედეგების აგრესიულობის ნორმებთან შეპირისპირებით.

1ლ წყალში ცალკეული იონების მაქსიმალური შემადგენლობის ნორმირებისას, რომლის დროსაც წყალი ჯერ კიდევ არ ითვლება ბეტონისათვის აგრესიულად მხედველობაში მიიღება: კონსტრუქციის მასიურობა, წყლის ჭავლი, ბეტონის შემომფარგლავი გრუნტის წყალჟონადობა, გამოყენებული ცემენტის სახეობა.

მინერალური წყლის გავლენის ქვეშ მყოფი რკინაბეტონის კონსტრუქციების ხანგამძლეობის ასამაღლებლად საჭიროა: ბეტონისათვის შემკვრელი ნივთიერებების სწორი შერჩევა, მაღალი ხარისხის შემავსებლის

კლასიფიცირებული ქვიშის და გარეცხილი ფრაქციული ხრემის გამოყენება, ბეტონის სიმკვრივის ამალღება წყალცემენტის თანაფარდობის შეზღუდვით (არაუმეტეს 0,5) და წყობაში ბეტონის ნარევის თანდათან გამკვრივება.

ზღვის წყალი შეიცავს სულფატებს. ქიმიური ზემოქმედების გარდა ბეტონის ფორებში მარილების კრისტალიზაციამ და ამ კრისტალების დაწოლამ შეიძლება მისი რღვევა გამოიწვიოს. იმის გამო, რომ კრისტალიზაციას ადგილი აქვს იქ სადაც წყალი ორთქლდება, ზემოქმედების ამ სახეს ადგილი აქვს წყლისზედა ნაწილში მოთავსებულ ბეტონში.

თუმცა მარილხსნარი ბეტონში კაპილარული შეწოვის შედეგად ხვდება, იგი მოქმედებს ბეტონზე მხოლოდ მაშინ თუ წყალი ბეტონის სიღრმეში შეაღწევს. ამიტომ ბეტონის წყალუჭონადობა დაცვის შედარებით საიმედო საშუალებაა.

წყლის ცვლადი დონის ზონაში ბეტონი პერიოდულად სველდება და შრება. ასეთ შემთხვევაში მისი დაშლის პროცესი უფრო სწრაფად მიმდინარეობს, ვიდრე მუდმივად სველი ბეტონის.

ზღვის წყლის ფაქტიური მოქმედება ბეტონის ფორებში მაგნიუმის ჰიდროქსიდის დალექვის შედეგად იცვლება და ნელდება. ცხელი კლიმატის პირობებში ზღვის წყლის მოქმედება უფრო ინტენსიურია.

რიგ შემთხვევებში ბეტონზე ზღვის წყლის მოქმედება თან ახლავს ყინვის, ტალღების დარტყმის, გამორეცხვის დამანგრეველ მოქმედებას. ყველაფერი ეს აძლიერებს და აჩქარებს ბეტონის დაშლას.

თუმცა ბეტონზე ზღვის სულფატების მოქმედება სულფატებით გაჯერებული გრუნტის წყლის მოქმედების ანალოგიურია. იმ განსხვავებით, რომ ზღვის წყლის მოქმედებას არ ახლავს ბეტონის გაფართოება. ეს იმით აიხსნება, რომ ზღვის წყალი დიდი რაოდენობით შეიცავს გაფართოების პროცესის შემანელებელ ქლორიდებს [7].

თაბაშირი და კალციუმის ალუმინოსულფატი ქლორიდების ხსნარებში მეტად იხსნებიან ვიდრე წყალში. ამიტომ გამოირეცხებიან ზღვის

წყლით. ლაბორატორიული გამოცდის დროს ისინი ადგილზე რჩებიან და იწვევენ ბეტონის გაფართოებას. ამიტომ ლაბორატორიული კვლევის შედეგების განზოგადოება ექსპლუატაციის რეალურ პირობებში გარკვეულ სირთულეებთან არის დაკავშირებული.

არმირებულ ბეტონში მარილების შთანთქმის შედეგად წარმოიქმნება ანოდური და კათოდური ზონები, ელექტროლიტური პროცესების შედეგად ხდება არმატურაზე კოროზიის პროდუქტების დალექვა, რაც იწვევს გარემომცველი ბეტონის დაშლას. ამიტომ ზღვის წყლის მოქმედება უფრო მეტად სახიფათოა არმირებული, ვიდრე არა არმირებული ბეტონისათვის. ამიტომ აუცილებელია არმატურისათვის ბეტონის დამცავი ფენის საკმარისი სისქის (5,1 ან უკეთესია 7,6) უზრუნველყოფა და მკვრივი წყალუჟონადი ბეტონის გამოყენება [35].

წყალცემენტის ფარდობა და ცემენტის ხარჯი მნიშვნელოვან ფაქტორებს წარმოადგენენ. ცემენტის მაღალი ხარჯი მკვრივი ბეტონის მიღების საშუალებას იძლევა დაბალი წყალცემენტის თანაფარდობის დროს. ცემენტის კარგ სიმკვრივეს და სამუშაოთა მაღალ ხარისხს, დიდი მნიშვნელობა განსაკუთრებით კონსტრუქციების შეერთებებში აქვს. რაც შეეხება გამოყენებული ცემენტის სახეს ნაკლებად მნიშვნელოვანია. კარგ შედეგს იძლევა თიხამიწა, სულფატებისადმი მდგრადი, პუცოლანური პორტლანდცემენტი და წიდაპორტლანდცემენტი.

განსაზღვრულ პირობებში ბეტონის გამოტუტვამ მის ზედაპირზე მარილების ნადების წარმოქმნა შეიძლება გამოიწვიოს. ამ მოვლენას ჩვენ ვხედავთ როცა წყლის ფილტრაცია ხდება ცუდად ჩაწყობილ ბეტონში, ნაპრალებში ან ცუდად გაკეთებულ შეერთებებში. ასევე ბეტონის ზედაპირიდან წყლის აორთქლებისას.

კალციუმის კარბონატი, რომელიც წარმოქმნის $Ca(OH)_2$ -ს და CO_2 -ს რეაქციის შედეგად ბეტონის ზედაპირზე ქმნის თეთრ ნადებს. ასეთივე ნადებს წარმოქმნის კალციუმის სულფატი.

ნადები შეიძლება გაჩნდეს როცა შემავსებლად იყენებენ ზღვის სანაპიროდან აღებულ გაურეცხავ შემავსებელს. მარილის ფენა შემავსებლის მარცვლების ზედაპირზე თეთრ ნადებს წარმოქმნის. ანალოგიური ეფექტი მოჰყვება, როცა შემავსებლის შემადგენლობაში არის ტუტეები და თაბაშირი. ასეთი ნადები აუხეშებს ბეტონის გარეგან სახეს [2].

თხევად აგრესიულ გარემოში მდგრადი, ხანგამძლე, საიმედოდ დაცული ბეტონი არის ეპოქსიდური ფისით დაფარული [3].

1.4. ბეტონის დაცვის ღონისძიებები

ბეტონის ნარევი კალციუმის ქლორიდის დამზადება ამცირებს სულფატებისადმი მდგრადობას, მიუხედავად იმისა თუ რა სახის ცემენტი იქნა გამოყენებული.

ჩვეულებრივი სილიკატური ცემენტისათვის უსაფრთხოა ტუტე ხსნარები (კირი, მწვავე ნატრიუმი და ა.შ.), რადგან გამყარებული ცემენტი თავისუფალი კალციუმის ჰიდროქსიდს შეიცავს და თავად წარმოადგენს მთავარ შემაერთებელს. ამიაკი და ამიაკური წყალი უსაფრთხოა ცემენტისათვის, მაგრამ ამიაკურ წყალში ამიაკური მარილების არსებობა ცემენტისათვის მავნე გარემოს ქმნის. დიდი რაოდენობით ალუმინატების შემცველი ცემენტი შეიძლება ფუძეებისა და ტუტეების მოქმედებითაც დაიშალოს. გარდა ამისა, საჭიროა მხედველობაში მივიღოთ, რომ თუ ცემენტიანი ბეტონი ტუტე ხსნარით (მწვავე ნატრიუმით და კალიუმით) არის გაჯერებული, შემდეგ კი შრება, ჰაერის ნახშირმჟავას მოქმედებით ცემენტის ქვიშაში წარმოიქმნება სოდა ან პოტაში, რომელიც კრისტალდება, იზრდება მოცულობაში და არღვევს ცემენტის ქვას.

ცემენტისთვის საშიშროებას არ წარმოადგენს ნავთობპროდუქტები (ნავთობი, ნავთი, ბენზინი, მაზუთი, ნავთობური ზეთები), თუ ისინი ამჟავებული არ არიან და არ შეიცავენ დიდი რაოდენობით ნავთობურ მჟავას ან შეერთებულ გოგირდს.

ბეტონის უფრო რადიკალური დაცვისათვის მინერალური წყლების აგრესიული ზემოქმედებისაგან (ნაწილობრივ ზღვის წყლისაგან) იყენებენ ცემენტის განსაკუთრებულ სახეს, რომლებშიც თავისუფალი კალციუმის ჰიდროოქსიდი არ გამოიყოფა ან გამოიყოფა მხოლოდ დიდი რაოდენობით, ასევე მცირედ შეიცავს ან საერთოდ არ შეიცავს სამკალციუმიან ალუმინატს. მათ მიეკუთვნება თიხამიწა ცემენტი, ცემენტი აქტიური კაჟმიწა დანამატებით და წიდა სილიკატური ცემენტი. ამასთან ეს ცემენტებიც ვერ ეწინააღმდეგებიან ძლიერი მჟავების მოქმედებას. მჟავების მოქმედებისაგან ნაგებობათა დაცვისათვის საჭიროა სპეციალური მჟავამდგრადი მასალების: მინა, კერამიკა, ბუნებრივი ან მდნარი მთის ჯიშის ქვა, მჟავამდგრადი ბეტონი ან ცემენტი, ბიტუმის გამოყენება [36].

ბეტონის თვისებების გაუმჯობესებას მეცნიერები მისი სამშენებლო მასალად აღიარებიდან ცდილობენ. ერთ-ერთი ასეთი მცდელობაა ფიბრობეტონი.

ფიბრობეტონის გამოყენების ისტორია რამდენიმე ათასწლეულს ითვლის. ჯერ კიდევ ძველმა ეგვიპტელებმა შეამჩნიეს, რომ თუ საცხოვრებელი ფართის ასაშენებელ თიხაში წინასწარ ჩალას, ლელქაშს ან თხის ბეწვს დაუმატებდნენ კედლები მომატებულ სიმტკიცეს იძენდნენ და ნაკლებად იზარებოდნენ. ასე შეიქმნა თიხაბზე-თანამედროვე ფიბრობეტონის ძველი წინაპარი.

1874 წელს ინგლისელმა მშენებელმა ა. ბერარდმა დააპატენტა ბეტონის დანამატი, რომელიც სხვადასხვა მასალის არაერთგვაროვან მასას წარმოადგენდა. 1918 წელს საფრანგეთში ხ. ალფსენმა გამოიგონა ფოლადის ან ხის ბოჭკოთი არმირების მეთოდი. 25 წლის შემდეგ დიდ ბრიტანეთში პირველად მიიღეს ფიბრობეტონი. 1976 წელს იგი პირველად გამოიყენეს რუსეთში აეროდრომის ასაფრენი ბილიკის მშენებლობაში. თუმცა ამ მასალამ მაშინ ვერ ჰპოვა ფართო გავრცელება. ძირითადად იმიტომ, რომ არც ტექნოლოგია და არც ფიბრა არ იყო სრულყოფილი.

საქართველოში ამ მიმართულებით მუშაობდნენ სამშენებლო მექანიკისა და სეისმომედეგობის ლაბორატორიაში ტმდ პროფ. ამირან საყვარელიძის ხელმძღვანელობით [37].

ფიბრობეტონი ეს არის წვრილმარცვლოვანი ბეტონის სახესხვაობა ფიბრის დამატებით. ფიბრის როლში შეიძლება იყოს მინის, სინთეტიკური ან ფოლადის ბოჭკო სიგრძით 5-დან 150 მმ-მდე და დიამეტრით 0,2 მმ-დან 1,0 მმ-მდე. შედეგად მიიღება ფიბრით არმირება, რაც ფიბრობეტონს ჩვეულებრივ ბეტონთან შედარებით უნიკალურ თვისებებს ანიჭებს. ფიბრა არა უბრალოდ ფოლადის ან მინის ნაჭრებია, არამედ სპეციალურად დამუშავებული და არაერთჯერ გამოცდილი მასალა,

ბეტონის არსებითი ნაკლი არის მისი დაბალი სიმტკიცე გაჭიმვაზე და ღუნვაზე. ფიბრობეტონში გამჭიმავ დატვირთვას თავის თავზე იღებს ფიბრის ბოჭკო, რაც 250%-ით ამაღლებს მის გამძლეობას ღუნვისას გაჭიმვაზე, ხოლო სიმტკიცეს კუმშვაზე 25%-ით. ფიბრობოჭკოს საუკეთესო ჰიდრატაციის უნარი აქვს, ამიტომ ბეტონის სტრუქტურაში თანაბრად ნაწილდება წყალი. ამის გამო შინაგანი დატვირთვა მცირდება, შედეგად კი ბეტონის ბზარმედეგობა 2-ჯერ იზრდება, ხოლო დარტყმითი სიმტკიცე 12-ჯერ [38].

ფიბრობოჭკო მდგრადია ტუტეების და უმრავლესი ქიმიური ნივთიერებების მიმართ. ამის გამო ფიბრობეტონი კარგად იტანს ქიმიურ აგრესიას. გარდა ამისა სამშენებლო ბოჭკოთი არმირებული ბეტონი გაცილებით მცირე წყლის არხებს და კაპილარებს შეიცავს, ვიდრე ჩვეულებრივი ბეტონი. ეს თვისება მას დაბალი ტემპერატურისადმი მდგრადობას ანიჭებს.

ფიბრობეტონის გამოყენების არეალი ძალიან ფართოა. ფოლადის ფიბრით არმირებული ბეტონი იდეალურია სამრეწველო იატაკების დასასხამად, გვირაბების გარსაცმისათვის, დიდი ზომის რეზერვუარების მშენებლობისათვის. ფიბრობეტონისაგან შეიძლება ჩამოისხას სხვადასხვა შპალები, დარტყმითი და დინამიკური მოქმედების მოწყობილობების

ფუნდამენტი, გზების მონოლითური და ასაწყობი საფარი, ნაპირსამაგრი ელემენტები, ხიდების ფენილი. ფიბრობეტონის ფილები კარგად გამოიყენება გზების მშენებლობაში. მათი გამოყენება ხიდების მშენებლობისას ისეთ შეფიცვრაში, რომელიც არ იხსნება, საშუალებას იძლევა მნიშვნელოვნად დააჩქაროს და გაადვილოს კონსტრუქციის ჩასხმის პროცედურა.

ატმოსფეროს აგრესიული გარემოში კონსტრუქციის ხანმედეგობის ასამაღლებლად, ზემოთ ჩამოთვლილი მეთოდებიდან არც ერთი არ არის სრულყოფილი, რადგან თითოეული დანამატი ძალიან აძვირებს ბეტონის ღირებულებას.

მინერალიზებული წყლების აგრესიულობის მაღალი ხარისხისას, როცა ჩამოთვლილი ღონისძიებები ვერ უზრუნველყოფენ ნაგებობის ხანგამძლეობას, საჭირო დაცვის კონსტრუქციული ღონისძიებების გატარება, რომელიც გამორიცხავს ბეტონის შიგნით წყლის შეღწევის შესაძლებლობას. ამისათვის კი საჭიროა ბეტონის შეუღწევადობის და წყალუქონადობის ხარისხის ამაღლება, რაც უპირატესად ბეტონში არსებულ შემკვრელზეა დამოკიდებული.

1.5. ეტრინგიტის ბეტონის სიმტკიცეზე გავლენის ექსპერიმენტულად დადგენა

როგორც ცნობილია კალციუმის ჰიდროსულფატოალუმინატი (ეტრინგიტი), იგივე ბეტონის ბაცილა, ნეგატიურად მოქმედებს ბეტონის ხარისხზე. თუმცა ზოგჯერ ბეტონისათვის ეტრინგიტი მავნე არ არის, პირიქით სასარგებლოცაა [67,68,69]. მისი წარმოშობის და განვითარების დროის რეგულირებით შესაძლებელია ამ ბაცილის სასიკეთოდ გამოყენება. იმის გამო, რომ ეტრინგიტს ხისტი, ნემსისებურად განშტოებული აგებულება აქვს, შეიძლება მისი მასობრივი წარმოშობის პროვოცირება ბეტონის გამყარებამდე. შედეგად კი მივიღებთ განშტოებულ, ხისტ კარკასს ჰიდრატაციის საწყის ეტაპზე და ბეტონის შემდგომ სტაბილიზაციას.

ბეტონის გამყარებამდე ეტრინგიტის წარმოშობისათვის და ბეტონის სიმტკიცეზე მისი გავლენის ექსპერიმენტულად დადგენისათვის დავამზადეთ ჩვეულებრივი მძიმე ბეტონი, სადაც გამხსნელად გამოვიყენეთ ნატრიუმის სულფატის სხვადასხვა კონცენტრაციის წყალხსნარი. ცდები ტარდებოდა ბათუმში სამშენებლო კომპანია "ანაგის" ლიცენზირებულ ლაბორატორიაში, შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ტექნოლოგიური ფაკულტეტის, ტექნოლოგიებისა და საინჟინრო მენეჯმენტის დეპარტამენტის სრული პროფესორის, ზურაბ მეგრელიშვილის ხელმძღვანელობით. 1მ³ B20 მარკის ბეტონის დასამზადებლად გამოყენებული იქნა სტანდარტული (266 33 91) შემადგენლობა:

ცხრილი 1.6.

სულფატური ხსნარით დამზადებული ბეტონის სტრუქტურული შემადგენლობა

მასალა	სტრუქტურა	
	მასა (კგ)	პროცენტული შედგენილობა (%)
ცემენტი	340	14,4
ქვიშა	800	33,9
ლორღი	5-10 ფრაქცია	310
	10-20 ფრაქცია	770
წყალი	140	5,9
ჯამი	2360	100

ცდების შედეგები

სერია	გამოცდა კუმშვაზე	ნიმუშის მასა (კგ)	მრღვევი დატვირთვა (ტ)	ნიმუშის სიმტკიცე მპა(კგ/სმ ²)	ნიმუშის საშუალო სიმტკიცე მპა(კგ/სმ ²)
ჩვეულებრივი წყალი	XIV დღეს	2,45	21,5	-	26,13
		2,375	25,5	24,23	
		2,445	29,5	28,03	
	XXVIII დღეს	2,365	26,5	25,18	31,83
		2,4	31,5	29,925	
		2,39	35,5	33,725	
ნატრიუმის სულფატის 3%-იანი ხსნარი	VII დღეს	2,435	20,5	19,48	22,33
		2,455	26,5	25,18	
	XXVIII დღეს	2,44	29,86	28,2	32,45
		2,45	30,0	28,5	
		2,47	38,32	36,4	
	ნატრიუმის სულფატის 5%-იანი ხსნარი	XIV დღეს	2,415	29,8	28,31
2,45			30,5	29,0	
2,45			29,8	28,36	
XXVIII დღეს		2,455	32,0	-	32,3
		2,45	33,4	31,78	
		2,405	34,5	32,775	
ნატრიუმის სულფატის 10%-იანი ხსნარი	XIV დღეს	2,475	20,5	-	24,28
		2,465	26,5	25,18	
		2,465	22,5	23,38	
	XXVIII დღეს	2,49	19,0	-	23,83
		2,45	24,7	23,25	
		2,44	25,7	24,415	

ბეტონის სიმტკიცეზე სულფატების გავლენის დასადგენად, კუბის ფორმის ნიმუშები ზომით 10X10X10 სმ³ დამზადდა, როგორც საკონტროლო-ჩვეულებრივი წყლით, ასევე ნატრიუმის-სულფატის 3%-იანი, 5%-იანი, 10%-იანი ხსნარით.

განისაზღვრა დამზადებული ბეტონის ძვრადობა. კონუსის ჯდენა იყო 12-14 სმ, რაც ნორმას შეესაბამებოდა.

დამზადებული ნიმუშები ინახებოდა ლაბორატორიაში ერთნაირ პირობებში, სადაც ტემპერატურა $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ იყო, ფარდობითი ტენიანობა კი 90%. ნიმუშები სიმტკიცეზე მე-7, მე-14 და 28-ე დღეს შემოწმდა. ცდების

შედეგები მოყვანილია ცხრილში 1.7. ცხრილიდან ჩანს, რომ უკეთესი შედეგი მივიღეთ ბეტონის ნატრიუმის სულფატის 5%-იანი ხსნარით დამზადებისას.

1.6. გოგირდის, როგორც შემკვრელის, მშენებლობაში გამოყენების მოკლე ისტორია და პერსპექტივები

სამშენებლო მასალა გოგირდბეტონი ცნობილია ჯერ კიდევ XVII საუკუნიდან. მაშინ გოგირდის საშუალებით აერთებდნენ ლითონის და ქვის ნაკეთობებს, რამაც თავისი გამოყენება ჰპოვა ხომალდების ღუზების დამზადებაში. პირველი მსოფლიო ომის პერიოდში აშშ-ში გოგირდის დიდი მარაგი იქნა დაზვერილი. ამასთან დაკავშირებით მისი რეალიზების საჭიროება წარმოიშვა. 1921 წელს ბეიკონმა და დევისმა გამოაქვეყნეს ნაშრომი, რომელშიც აღწერეს გოგირდის თვისებები და მისი გამოყენება სამშენებლო წარმოებაში.

გოგირდბეტონის გამოყენება მშენებლობაში გასული საუკუნის შუა ნაწილიდან დაიწყო: ხსნარების და მასტიკის სახით ქვის წყობის შეერთების ნაკერებისათვის, კიბის მარშების მოაჯირების და ლითონის კავშირების ქვის კონსტრუქციებში ჩამაგრებისათვის გამდნარი თუთიის ნაცვლად.

გოგირდბეტონის აქტიური კვლევა XX საუკუნის 70-იან წლებში ჩრდილოეთ ამერიკაში დაიწყო. ჯერ კიდევ მაშინ იყო გამოვლენილი მისი უპირატესობა ტრადიციულ პორტლანდცემენტზე დამზადებულ ბეტონთან შედარებით და რომ გოგირდბეტონი უსაფრთხოა გარემოსათვის. ასე იქნა დამტკიცებული, რომ ცემენტიან ბეტონთან შედარებით მას გააჩნია რიგი განსაკუთრებული თვისებები. ისეთები როგორცაა: დაბალი წყალშეღწევადობა, წყალუჭონადობა, მაღალი სიმტკიცის სწრაფად მიღწევა და შენარჩუნება, კოროზია მედეგობა. იმ პერიოდში დამზადებულ გოგირდბეტონის ნაკეთობებს ჰქონდათ ნაკლოვანებებიც - მაღალი ტემპერატურისადმი დაბალი მედეგობა, რაც აიხსნება იმით რომ 120

გოგირდის დნობის ტემპურაა, დაბალი ხანძარმდეგობა და ბზარების სიმრავლე დიდი მოცულობების გოგირდბეტონით დაბეტონებისას.

აღსანიშნავია რომ გოგირდბეტონის ტექნოლოგიის განვითარების შედეგად მისი ბევრი ნაკლი დღეისათვის ლიკვიდირებულია. კერძოდ დადგინდა, რომ გოგირდის შემკვრელზე პლასტიფიკატორის (ნაწილობრივ პოლუსულფიდის) დამატებით არა მარტო პლასტიკურობას შეიძენს ნარევი, არამედ შესაძლებელია ბზარების შემცირება. ხოლო დიციკლოპენტადინის დამატება აამაღლებს სამშენებლო მასალის ხანძარმდეგობას.

ცხრილი 1.8.

გოგირდბეტონის თვისებების შეფასება

დადებითი თვისებები	უარყოფითი თვისებები
მაღალი სიმტკიცე	დაბალი თერმომდეგობა
კოროზია მდეგობა	
დაბალი წყალშეღწევადობა	
წყალუჟონადობა	
ყინვამდეგობა	
სიმტკიცის სწრაფად მიღწევა	
ყინვაში გამყარება	
ხელმეორედ გადამუშავების შესაძლებლობა	
მცირედ ჯდენა	

მოგვიანებით უკვე 80-90-იან წლებში გოგირდწყალბადის მოპოვების გაზრდით დიდი რაოდენობით დაგროვდა გოგირდი, როგორც ნავთობისა და გაზის მოპოვების ნარჩენი პროდუქტი. გოგირდის უტილიზაციის ახალი მეთოდების ძიება დაიწყო მსხვილმა ნავთობისა და გაზის კომპანიებმა. რის შედეგადაც გაჩნდა გოგირდის, როგორც შემკვრელის ბეტონში გამოყენების ახალი ტექნოლოგიები.

1.7. დასკვნა

საქართველოს შავი ზღვის სანაპირო სუბტროპიკული ზონაა თბილი, ზღვის ტენიანი კლიმატით. კლიმატის განსაკუთრებულობა რკინაბეტონის კონსტრუქციების ექსპლუატაციის სპეციფიკურ პირობებს ქმნის.

ხშირი წვიმების შედეგად კონსტრუქცია მრავალჯერად გაშრობა-დაზიანებას განიცდის. ამავე დროს აგრესიული ტენის მუდმივი მიგრაცია ხდება ბეტონის სიღრმეში. ნალექებში იონების, განსაკუთრებით ქლორისა და სულფიდების დიდი კონცენტრაცია მნიშვნელოვნად აჩქარებს კოროზიული პროცესების განვითარებას. ამასთანავე, კონსტრუქციების ციკლურად განმეორებადი მრავალჯერადი გაღობა-გაშრობა, თანდათანობით არყევს ბეტონის სტრუქტურას და ამცირებს აგრესიისადმი მის სიმტკიცესა და მდგრადობას.

იმის გამო, რომ მარილხსნარი ბეტონში კაპილარული შეწოვის შედეგად ხვდება, იგი მოქმედებს ბეტონზე მხოლოდ მაშინ თუ წყალი ბეტონის სიღრმეში შეაღწევს. ამიტომ ბეტონის წყალუქონადობა დაცვის შედარებით საიმედო საშუალებაა.

წყლის ცვლადი დონის ზონაში ბეტონი პერიოდულად სველდება და შრება. ასეთ შემთხვევაში მისი დაშლის პროცესი უფრო სწრაფად მიმდინარეობს, ვიდრე მუდმივად სველი ბეტონის.

მინერალიზებული წყლების აგრესიულობის მაღალი ხარისხისას, როცა ჩამოთვლილი ღონისძიებები ვერ უზრუნველყოფენ ნაგებობის ხანგამძლეობას, საჭიროა დაცვის კონსტრუქციული ღონისძიებების გატარება, რომელიც გამორიცხავს ბეტონის შიგნით წყლის შეღწევის შესაძლებლობას. მათ რიცხვს მიეკუთვნება ბეტონის ზედაპირის დაფარვა წყალუქონადი სინთეტიკური მასალებით, კერამიკული ფილებით და ბუნებრივი ქვებით მოპირკეთება, ბეტონის გაჟღენთა ბიტუმით, წყალუქონადი რულონური მასალის დაწებება და სხვა.

თხევად აგრესიულ გარემოში მდგრადი, ხანგამძლე, საიმედოდ დაცული ბეტონი არის ეპოქსიდური ფისით დაფარული [3].

აგრესიული გარემოს ზემოქმედებისაგან ბეტონის დაცვის ზემოთ ჩამოთვლილი ღონისძიებები ძვირადღირებული და არასაკმარისია. ამიტომ შავიზღვისპირეთის კლიმატური პირობებში ბეტონის და რკინაბეტონის კონსტრუქციების დაცვის ერთ-ერთ საშუალებად ბეტონში შემკვრელის სახით თხევადი გოგირდის გამოყენება მიგვაჩნია. გოგირდიანი ბეტონის სიმტკიცის ასამაღლებლად კი დანამატის სახით მინერალური ბაზალტის ქვის მტვრის გამოყენებაა მიზანშეწონილი. ცემენტთან ბეტონთან შედარებით გოგირდიან ბეტონს რიგი განსაკუთრებული თვისებები გააჩნია. ისეთები როგორცაა: დაბალი წყალშეღწევადობა და ყინვამდეგობა, წყალუქონადობა, მაღალი სიმტკიცის სწრაფად მიღწევა და შენარჩუნება, კოროზიამდეგობა.

თუ იმასაც გავითვალისწინებთ, რომ გოგირდი მშენებლობაში ჯერ კიდევ XVII საუკუნეში წარმატებით გამოიყენებოდა, გოგირდბეტონის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების საფუძვლიანი გამოკვლევა აუცილებელი და საჭიროა.

2. შედეგები და მათი განსჯა

2.1. გოგირდიანი ბეტონების მშენებლობაში გამოყენების შესაძლებლობის კვლევა

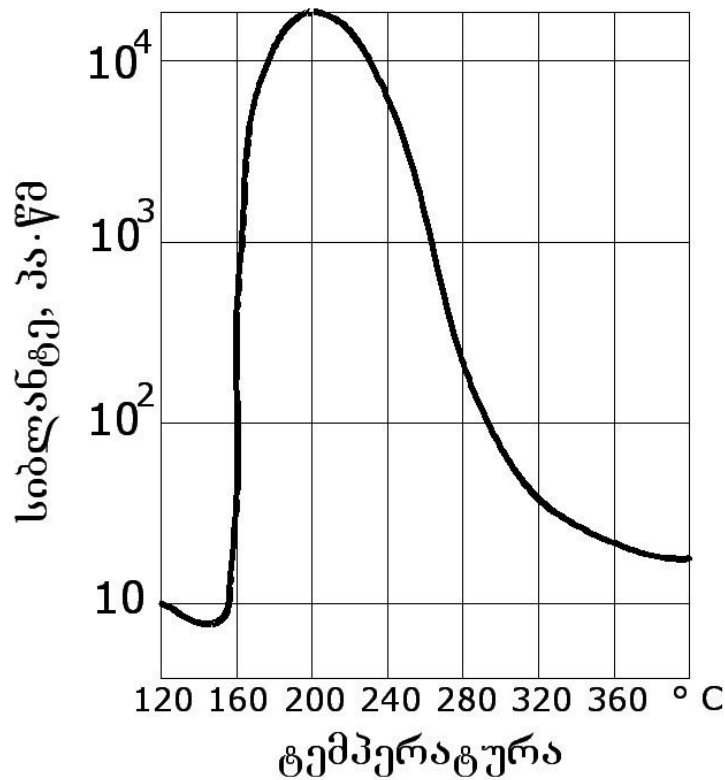
2.1.1. გოგირდბეტონის ზოგადი დახასიათება

გოგირდის გამოყენება მშენებლობაში გოგირდის მასტიკისა და ხსნარის სახით ჯერ კიდევ XIX საუკუნეში იყო ცნობილი. შემდგომში გოგირდის მასტიკამ და ხსნარმა გოგირდის ცემენტის სახელწოდება მიიღეს და ისეთ სამშენებლო კონსტრუქციებში იყენებდნენ, რომელთა ექსპლუატაცია აგრესიული ზემოქმედების პირობებში ხდებოდა. გოგირდი გამოიყენება გამდნარი სახით.

დღეს გოგირდის ცემენტის დამზადებისას გამოიყენება სასაქონლო სახის გოგირდი (ГОСТ 127-76). დანამატის სახით იყენებენ სხვადასხვა მინერალურ მასალებს, მაგ. კვარცის ქვიშა, ქვის მტვერი და სხვა. პლასტიფიკატორების როლს თიოქოლ–რეზინიტი, თერმოფრენი ან ნაფტალინი ასრულებს [5,13]. გოგირდის ცემენტის სიმტკიცის ზღვარი კუმშვისას არაუმცირეს 30 მპა–ს, გაჭიმვისას 2–2,5 მპა–ს წარმოადგენს. გოგირდიანი ბეტონები მდგრადია უმეტესი მჟავების (ფტორწყალბადმჟავას და აზოტმჟავას გარდა) და მინერალური მარილხსნარების მიმართ, მაგრამ არამდგრადია ზოგიერთი ორგანული გამხსნელების და ტუტეების მიმართ.

თვით გოგირდი, რომლის სიმკვრივეა 2,1 გრ/სმ³, ცუდად ატარებს სითბოს და ელექტრულ დენს, არ იხსნება წყალში და მით უმეტეს არაორგანულ მჟავეში. კარგად იხსნება უწყლო ამიაკში, გოგირდწყალბადში, ანილინში და სხვა ორგანულ გამხსნელებში. მყარი და თხევადი გოგირდის თბოგამტარობა უმნიშვნელოა.

დნობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გამო გამდნარი გოგირდის სიბლანტე ტემპერატურის დიდ შუალედში იცვლება (ნახ.2.1). გადნობით მიღებული მყარი გოგირდი მუდამ შეიცავს განსაზღვრული რაოდენობის ალოტროპების ნარევს, მათ შორის სამ ძირითად ფრაქციას: კრისტალურ ნაწილს, რომელიც ძირითადად ციკლოოქტა გოგირდისაგან



ნახ.2.1. გოგირდის სიბლანტის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება

შედგება, აქტიური ალოტროპული ნაირსახეობებისაგან და პოლიმერული გოგირდისაგან. ამ ფრაქციების ურთიერთობა დამოკიდებულია მყარი გოგირდის თერმული დამუშავების მიმდინარეობაზე (ნაღნობის ტემპერატურა გაცივების მომენტისათვის) და გამყარების რეჟიმზე [39].

გოგირდბეტონი გაციების შედეგად გამყარებული გოგირდის, წვრილმარცვლოვანი დანამატის და შემავსებლის - ქვიშა, ღორღი, ხრემის ნარევის წარმოადგენს. გოგირდბეტონის დადებით თვისებებს პირველ რიგში მიეკუთვნება: სიმტკიცის სწრაფი ზრდა, რომელიც მხოლოდ გოგირდბეტონის ნარევის გაციებასთან არის დაკავშირებული, მაღალი სიმტკიცე, რიგი აგრესიული პროდუქტების მიმართ ქიმიური მედეგობა, დაბალი წყალშეღწევადობა და შესაბამისად მაღალი ყინვამედეგობა [5].

გოგირდბეტონის მიღების ტექნოლოგია უმნიშვნელოდ განსხვავდება ასფალტბეტონის და ისეთი ბეტონის წარმოების ტექნოლოგიისაგან,

რომლებიც მაღალი სიმტკიცით ხასიათდებიან და შეიძლება არსებულ ასფალტის ქარხნებში დამზადდეს.

საზღვარგარეთ გოგირდიანი ბეტონებს გზის საფარად იყენებენ. კანადაში ამ მიზნით ბიტუმო - გოგირდიან ბეტონს იყენებენ (ბიტუმისა და გოგირდის თანაფარდობა 1:1), უფრო საპასუხისმგებლო უბნებზე კი მხოლოდ გოგირდიან ბეტონს ბიტუმის შემცველობის გარეშე. ასეთი საფარი უფრო მტკიცეა, მაღალი შეჭიდულობით ხასიათდება, მცირედ წყალშეღწევადი და მნიშვნელოვნად ხანმედეგია [40,41]. კალგარის რაიონში (კანადა) ჩქაროსნული მოძრაობის გზების და მოსანგრევი ზღუდარების წარმატებული ექსპლუატაცია ხდება, რომლებიც გოგირდიანი ბეტონის ასაწყობი არმირებული ელემენტებით მზადდება. მცირე სიმკვრივის მქონე აქაფებული გოგირდის კომპოზიციებს, მუდმივი ყინვების ზონებში შედარებით მაღალი ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების მქონე საავტომობილო გზების თბოიზოლაციისათვის იყენებენ.

აღსანიშნავია გოგირდბეტონის კიდევ ერთი განსაკუთრებული თვისება-წუნდებული კონსტრუქციების ხელმეორედ გამოყენება, მათი დამტვრევით, ხელმეორედ გადნობით და ფორმის მიცემით.

ყოფილ საბჭოთა კავშირში გოგირდის წარმოების ნარჩენებს გოგირდ-ასფალტის ნარევის მოსამზადებლად იყენებდნენ, რამაც ასფალტბეტონის ხარისხი გააუმჯობესა, შეამცირა მისი წყლით გაჯირჯვება და გაზარდა წყალმედეგობის კოეფიციენტი.

ასეთი სახით მიღებული გოგირდის მასტიკა, მინერალური დანამატის ზედაპირზე გოგირდის გაცივების პროცესში ერთგვაროვანი კრისტალები ფორმირდებიან, რომელთა ზომები მნიშვნელოვნად მცირეა, ვიდრე თავისუფალი გოგირდის მოცულობაში. ოპტიმალური რაოდენობის დამატებისას პრაქტიკულად მთელი გოგირდი გადადის უფრო ერთგვაროვან და წვრილკრისტალურ მდგომარეობაში, რაც სიმტკიცის ასეთ მნიშვნელოვან გაზრდას განაპირობებს. ამ თვისების გამოყენებამ საშუალება მოგვცა მნიშვნელოვნად შეგვემცირებინა გოგირდის ხარჯი და მაღალი

სიმკვრივის და 50-60 მპა კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარის მქონე გოგირდიანი ბეტონის შემადგენლობა აგვერჩია.

ცნობილია, რომ ტემპერატურის ვარდნისას, მზის გამოსხივების და სხვა ატმოსფერული ზემოქმედებისას, გოგირდის სტრუქტურული მდგომარეობა შეიძლება შეიცვალოს ერთი ალოტროპული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის ხარჯზე. ასეთი ცვლილებები საშიში შინაგანი ძაბვების წარმოშობას იწვევენ, რამაც შეიძლება მასალის მთლიანობის და კონსტრუქციის ხანგამძლეობის შემცირებამდე მიგვიყვანოს. გარდა ამისა გოგირდი მყიფე მასალაა, ხოლო გოგირდიანი ბეტონი უფრო მაღალი სიმყიფით გამოირჩევა ვიდრე ცემენტის ბეტონი.

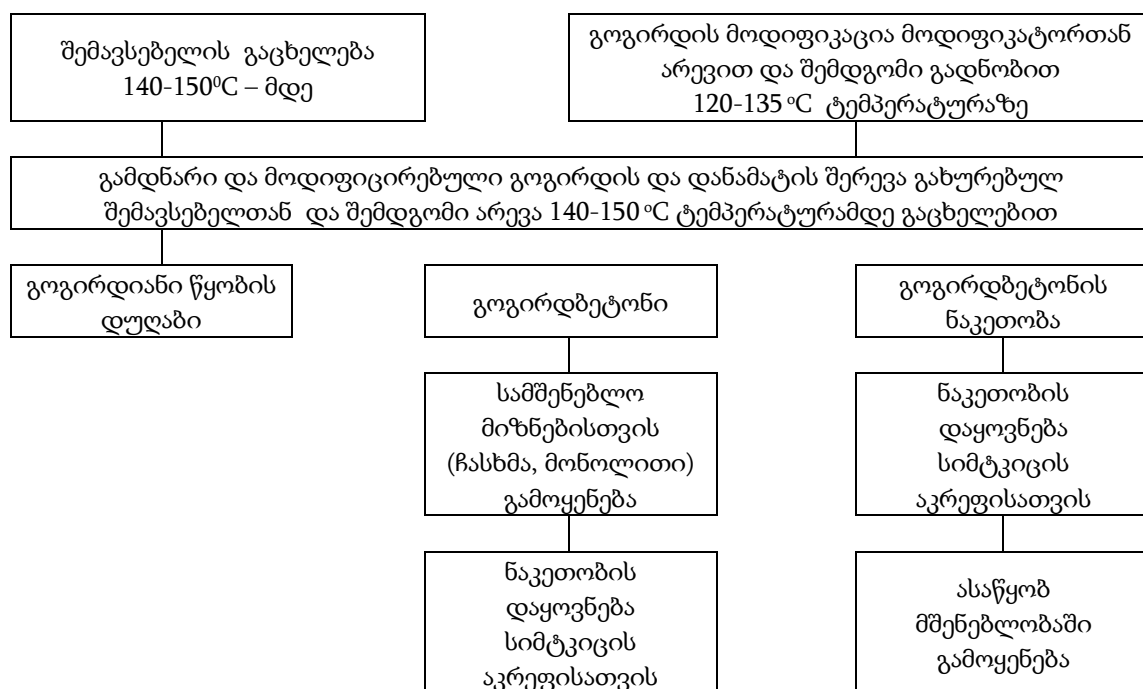
ჩამოთვლილი ნაკლოვანებების აღმოსაფხვრელად გოგირდის შემკვრელში სხვადასხვაგვარი პლასტიფიკატორები და დანამატები შეჰყავთ. დღეს გოგირდის მასტიკის, ხსნარების და ბეტონის დამზადებისას გოგირდი სუფთა სახით პრაქტიკულად არ გამოიყენება.

მაპლასტიფიცირებელი და მასტრუქტურიზებელი დანამატების სახით უმრავლეს შემთხვევაში სხვადასხვა პოლიმერული მასალები (თიოკოლი, თერმოპრენი, რეზინის ნაფხვენი, პოლიპროპილენი, ქლორ-პარაფინი და სხვა) გამოიყენება [42,43].

გოგირდბეტონი არის 140-150°C-მდე გაცხელებული მშრალი შემკვრების (ქვიშა, მინერალური ფქვილი, ღორღი) და 145-1550°C ტემპერატურის მქონე შემკვრელის (გამდნარი გოგირდი) ნარევი.

ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში ჩრდილოეთ ამერიკაში გოგირდბეტონის დამზადებასა და გამოყენებაზე დიდი რაოდენობით გამოკვლევები და ტექნოლოგიური დამუშავებები დაგროვდა. მათგან ისეთები, რომლებმაც ჰპოვეს ფართო გამოყენება განზოგადებული ვარიანტის სახით მოცემულია სქემაზე 1 [4].

გოგირდბეტონის დამზადების ტექნოლოგია



სქემა 1. გოგირდბეტონის წარმოების ტექნოლოგიის განზოგადებული ვარიანტი

გოგირდოვანი ბეტონის მიღება დამოკიდებულია მის თვისებაზე სხვადასხვა ტემპერატურის დროს შეიცვალოს თავისი შემკვერელი უნარი.

ნარევის გამოყენება მისი ძვრადობით განისაზღვრება. გოგირდბეტონის სიცოცხლისუნარიანობა დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე და მისი 130°C -150°C შორის ინტერვალის შენარჩუნებისას, პრაქტიკულად შეზღუდული არ არის. გამყარებული ნარევი ხელახალი გაცხელებისას პირველად ძვრადობას აღიდგენს. გოგირდიანი ბეტონით კონსტრუქციების და ნაკეთობების დამზადება შესაძლებელია როგორც მონოლითურ ისე ასაწყობ - მონოლითურ მშენებლობაში. გოგირდიანი ბეტონის გამყარება ხდება ცხელი ნარევის გაცივებისას, რაც კრისტალიზაციის შედეგია. ასეთი ბეტონი შეიძლება გამოვიყენოთ ზამთარში (-40°C-მდე) ბეტონირებისას და წყლის ქვეშ [4].

გოგირდბეტონის დამზადება ასფალტბეტონის ნებისმიერ ქარხანაშია შესაძლებელი. მისი მიღების ტექნოლოგია მცირედ განსხვავდება პორტლანდცემენტით ჩვეულებრივი ბეტონის მიღების ტექნოლოგიისაგან. გოგირდბეტონის მიღების პროცესი შემდეგი სტადიებისაგან შედგება: 130-

135°C -ზე თხევად გოგირდში მოდიფიკატორის გახსნა, 140°C - 150°C ტემპერატურის მქონე შემვისების შერევა, ფორმის მიცემა და მზა ნაკეთობის გაციება. გოგირდბეტონისაგან დამზადებული ნაკეთობები 130°C - 150°C – მდე გახურებისას მრავალჯერად გადამუშავებას და კონსტრუქციების ხელახალ დამზადებას ემორჩილებიან, რაც სამშენებლო ნარჩენებს და წუნს გამორიცხავს.

გოგირდბეტონის დასამზადებლად შეიძლება გამოვიყენოთ ტექნიკური გოგირდი, გოგირდშემცველი ნარჩენები. ინერტული მასალებისა და დანამატების სახით კი მკვრივი მთის ქანების წარმოების ნარჩენები, ბუნებრივი და ხელოვნური ფორიანი მასალის, მთის და დანალექი ქანების ნამტვრევების განაცერი.

სიმტკიცის მახასიათებლების მიხედვით გოგირდიან ბეტონს შუალედური ადგილი უჭირავს B25-B30 კლასის ცემენტთან ბეტონსა და მაღალი სიმტკიცის პოლიმერბეტონს შორის. მშრალ მდგომარეობაში ქიმიური და დიელექტრიკული მახასიათებლებით იგი ადგილს არ უთმობს მრავალი სახის პოლიმერულ ბეტონს, ხოლო ფასი მნიშვნელოვნად დაბალია იაფ ბეტონებთან შედარებით. არმირებული გოგირდბეტონის 2 წლის განმავლობაში შენახვის შემდეგ კვლევებმა გვიჩვენა, რომ გოგირდიანი ბეტონი საიმედოდ იცავს არმატურას კოროზიისაგან, ხარისხიანი, მკვრივი ბეტონის დამზადების პირობებში. გოგირდიანი ბეტონის გამოყენება ეფექტურია არა მარტო ასაწყობი და მონოლითური კონსტრუქციების დამზადებისას არამედ სხვადასხვა სახის სარემონტო სამუშაოებში.

2.1.2. მძიმე შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის შედგენილობის შერჩევა

გოგირდბეტონის ზემოთ მოყვანილი განსაკუთრებული თვისებების ასევე მონაცემების [5,44-46] გათვალისწინებით გოგირდბეტონის შემადგენლობის შერჩევა, გოგირდის შემკვრელზე ისეთი კომპოზიციის შექმნის პირობიდან ხდება, რომელსაც მაღალი მოლეკულური სიმტკიცის გოგირდის პოლიმერული მოდიფიკაციის წარმოქმნის უნარი ექნება. ამავე დროს ეკონომიკური მოსაზრებიდან გამომდინარე გოგირდბეტონში გამოყენებული მასალა იაფი და ხელმისაწვდომი უნდა იყოს. გარდა ამისა, კვლევების დადებითი შედეგებისას, საგზაო და სამოედნო სამუშაოების მასშტაბების გათვალისწინებით, საკმაოდ ეფექტურად გადაიჭრება ასეთი ტიპის სამრეწველო ნარჩენების უტილიზაციის საკითხი.

შემადგენლობის შერჩევასა არჩევანი გაკეთდა იმავე შემავსებლებზე რაც ცემენტთან ბეტონს აქვს ხრეში-ლორდი და ქვიშის ნარევი.

გოგირდი (S) გამოიყენებოდა გრანულოვანი, მოყვითალო-ლიმონისფერი, ნაყარი მოცულობითი წონით $\gamma_0=1000\text{კგ/მ}^3$. გოგირდბეტონში აუცილებელ წვრილდისპერსიულ დანამატად გამოვიყენე მინერალური ქვის მტვერი, რუსთავის თეც-ის წატაცებული ნაცრის, ჭვარტლის (3Y) ნაცვლად [5].

გამოცდილებამ აჩვენა, რომ გოგირდბეტონის სიმტკიცეზე დადებით გავლენას ახდენს დანამატად მინერალური ქვის მტვრის გამოყენება.

გოგირდისა და მტვრის ოპტიმალური თანაფარდობის დასადგენად ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 2.1.

მიღებული გამოცდილების საფუძველზე საბოლოოდ შემდგომი ექსპერიმენტული კვლევებისათვის შერჩეული იქნა გოგირდბეტონის შემდეგი შემადგენლობა (ცხრილი 2.2.).

საცდელი ნიმუშები დამზადდა ბათუმში ტექნოლოგიური ფაკულტეტის და თბილისში მეტალურგიის ინსტიტუტის ლაბორატორიებში, შემდეგი ტექნოლოგიის საფუძველზე: ბეტონის

დასამზადებლად საჭირო მასალას არევამდე, 160⁰-180⁰ C-მდე ცალ-ცალკე ვაცხელებდით:

ცხრილი 2.1.

გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება გოგირდითა და ბაზალტის მტვრით შევსების ხარისხზე

№	გოგირდისა და ბაზალტის მტვრის თანაფარდობა	გოგირდბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე, მპა	№	გოგირდისა და ბაზალტის მტვრის თანაფარდობა	გოგირდბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე, მპა
1	1:0,08	195.2	18	1:0,33	344.7
2	1:0,09	212.1	19	1:0,35	351.7
3	1:0,1	203.3	20	1:0,36	375.1
4	1:0,12	247.2	21	1:0,38	363.5
5	1:0,12	217.2	22	1:0,4	382.5
6	1:0,13	223.2	23	1:0,43	385.1
7	1:0,14	238.9	24	1:0,44	397.3
8	1:0,17	255.5	25	1:0,45	390.7
9	1:0,19	265.2	26	1:0,5	407.7
10	1:0,2	275.3	27	1:0,53	398.4
11	1:0,21	260.7	28	1:0,56	393.8
12	1:0,23	285.2	29	1:0,58	374.4
13	1:0,25	301.7	30	1:0,6	377.7
14	1:0,26	310.8	31	1:0,61	366.4
15	1:0,29	318.5	32	1:0,66	262.8
16	1:0,3	339.6	33	1:0,68	215.2
17	1:0,32	342.4			

- ერთად არეულ შემსუბუქებასა და დანამატს ანუ ქვიშას, ლორღს და მტვერს;
- გოგირდი აღნიშნული ტემპერატურის პირობებში იწყებდა დნობას და გადადიოდა თხევად მდგომარეობაში;
- ღრმა თუჯის ჭურჭელი მიღებული მასის ასარევად;
- სპეციალური ფორმები ნიმუშებისათვის.

- გოგირდბეტონის დამზადება-არევა და საჭირო ტემპერატურულ შუალედში შენარჩუნება ხდებოდა მეტალურგიის ინსტიტუტში არსებული სპეციალური ღუმელის საშუალებით.

ცხრილი 2.2.

მძიმე შემცვლებზე დამზადებული გოგირდბეტონის შედგენილობა

შემადგენლობა №	მასალების დანახარჯები 1მ ³ ნარევეზე,კგ					ნარევის შემადგენლობის ფარდობითი მასური დამოკიდებულება
	S	ქვ. ⁰⁻⁵	ღ ⁵⁻¹⁰	ღ ¹⁰⁻²⁰	მტვ.	
1	340	838	363	844	-	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ :ღ ¹⁰⁻²⁰ = =1:2,46:1,1:2,48
2	347	584	1122	-	347	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ : მტვ. = =1:1,68:3,23:1
3	420	515	1173	-	240	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ : მტვ. = =1:1,23:2,8:0,57
4	544	543	1017	-	240	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ =1:1:1,87:0,44
5	504	566	352	705	252	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ : ღ ¹⁰⁻²⁰ : მტვ. = =1:1,12:0,7;1,4:0,5

გაცხელებულ მასას ვურევდით ხის კოვზით და მიღებულ მასას ვაწყობდით ფორმებში. ფორმებს ზემოდან ვადებდით სიმძიმეს და ვათავსებდით ვიბრომაგიდაზე ვიბრაციისათვის.

ფორმები და სიმძიმე გამოყენების წინ, განყალიბების გასაადვილებლად, იზეთებოდა მანქანის ზეთით.

ნიმუშები განყალიბებამდე ინახებოდა ბუნებრივ პირობებში. ყალიბიდან ვიღებდით გარემოს ტემპერატურამდე გაცივების შემდეგ- ზაფხულის ცხელ დღეებში მეორე დღეს, ხოლო ზამთრის ცივ პირობებში 1-1,5 სთ-ში.

ბეტონის მიღებული ნიმუშების სიმტკიცის მახასიათებლები განვსაზღვრეთ იგივე მეთოდით, რომლითაც ჩვეულებრივი ბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლები. ცხრილში 2.3. მოყვანილია მძიმე გოგირდბეტონის მიღებული სიმტკიცის მახასიათებლები. ცხრილში 2.2 მოყვანილი პირველი ორი შემადგენლობით დამზადებულ გოგირდბეტონს დაბალი სიმტკიცე აღმოაჩნდა. ორივე შემთხვევაში ამის მიზეზი ექსპერიმენტების ბათუმში, ტექნოლოგიების ფაკულტეტზე, კუსტარულ

ლაბორატორიაში ჩატარება იყო. ვერ დავიცავით ის ტემპერატურული შუალედი, რომელშიც გოგირდს დაბალი სიბლანტე და საუკეთესო შემკვრელი უნარი აქვს. შემდგომში ჩატარებულმა ცდებმა ცხადყვეს, რომ გოგირდბეტონის დამზადებისას აუცილებელია, როგორც გოგირდის ისე არეული მასის 140-180°C ტემპერატურულ შუალედში შენარჩუნება, წინაარმდეგ შემთხვევაში გოგირდის სიბლანტე გაიზრდება და შემკვრელი უნარი კი შემცირდება.

მოყვანილი შედეგებიდან ჩანს, რომ მძიმე შემკვრეზე დამზადებული გოგირდბეტონი საკმაოდ მაღალი სიმტკიცის მახასიათებლებით გამოირჩევა, კუმშვაზე, როგორც კუბის ფორმის ნიმუშის, ისე პრიზმული ნიმუშის, ასევე ღუნვაზე. რაც მთლიანად აკმაყოფილებს გზების, მოედნების და აეროდრომების საფარის ქვედა ფენისათვის გამოსაყენებელი ბეტონისადმი წაყენებულ ნორმებსა და წესებს [42].

ცხრილი 2.3.

მძიმე გოგირდბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლები

შემადგენლობა №	γ_0 , გ/მ ³	R_b , კგძ/სმ ²	R_m , კგძ/სმ ²	R_c კგძ/სმ ²	R_b / R_c
1	2385	170			
2	2400	210			
3	2347	283	361	90,6	3,12
4	2344	306	312	105,3	2,91
5	2376	406	-	58,5	6,95

2.1.3. მსუბუქ შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის, შედგენილობის შერჩევა

მსუბუქი გოგირდბეტონის შემვსებად ავირჩიეთ ცემენტის ბეტონის ანალოგიურად ბუნებრივი ფორიანი, ვულკანური წარმოშობის წიდა ახალქალაქის რაიონიდან კერძოდ ოკამიდან.

გამოკვლევებისას გამოყენებული მასალის 24% მტვროვან ფრაქციას შეადგენდა. ეს გავითვალისწინეთ მსუბუქი გოგირდბეტონის შემადგენლობის შერჩევას. წინა თავში მოყვანილია, რომ მაღალი სიმტკიცის გოგირდბეტონის სტრუქტურის ჩამოსაყალიბებლად აუცილებელია დანამატის სახით წვრილდისპერსიული ფრაქციის სიჭარბე. მძიმე გოგირდბეტონში, ჩვენს შემთხვევაში, ამ როლს მტვერი ასრულებს.

მსუბუქ გოგირდბეტონში ფორიანი შემვსების მტვროვანმა მასამ, მისი მაღალი კუთრი ზედაპირის გამო, წარმატებით შეიძლება შეასრულოს აუცილებელი დანამატის როლი. ამიტომ, მსუბუქი გოგირდბეტონის შემადგენლობის შერჩევას მზადდებოდა ცალ-ცალკე სერიები, როგორც მტვრის გამოყენებით, ისე მის გარეშე.

გოგირდის ხარჯის განსაზღვრისას, მხედველობაში მიიღებოდა ის, რომ გამდნარ გოგირდს 140–160°C ტემპერატურულ დიაპაზონში საკმაოდ დაბალი სიბლანტე გააჩნია (იხ.ნახ.2.1.) და მას, ისევე როგორც წყალს ინტენსიურად შეიწოვს ფორიანი შემვსები. ამიტომ გაანგარიშებაში გოგირდბეტონის შემადგენლობის შერჩევას გოგირდის რაოდენობა აიღება საკმარისი შემვსების ხორკლიანი ზედაპირის დასასველებლად, შემვსების ფორებში შესაწოვად, შემვსების ზედაპირის დასაფარად, ასევე გარკვეული რაოდენობა აუცილებელია ნარევის ყალიბებში მოხერხებული ჩალაგებისათვის, რადგან ცნობილია, რომ მსუბუქი ბეტონი ჩალაგების სიმარტივით არ გამოირჩევა. გარდა ამისა მხედველობაში უნდა მივიღეთ ისიც, რომ გოგირდბეტონში შემკვრელის ფარდობითი ხარჯი უფრო მეტი უნდა იყოს, იმ მიზეზით, რომ გოგირდბეტონი მზადდება დაახლოებით 155°C–165°C ტემპერატურამდე გახურებულ შემადგენელ მასალაზე, რაც

ჰაერის ინტენსიურ გამოყოფას იწვევს შემვსების და დანამატის ფორების, მიკროფორების და მიკრობზარების ზედაპირიდან, რომლებიც გაციების შემდეგ ღრმად იჟლინთებიან შემკვრელი გამდნარი გოგირდით, როგორც ადგეზიური ძალების ზემოქმედებით, ასევე ტემპერატურის დაცემისას წარმოშობილი ვაკუუმის გავლენით. შემკვრელით ასეთი შევსების ხარისხი უფრო მაღალია, ვიდრე მსუბუქი ცემენტობეტონის, სადაც ჰაერი შემვსების ფორებში და კაპილარებში რჩება. აქვე შესაძლებელია ვივარაუდოთ, რომ გამდნარი გოგირდის და ფორიანი შემვსების ზემოქმედებამ უნდა გამოიწვიოს მოკუმშვის ეფექტი და გამტკიცება შემვსების თვითვაკუუმირების ხარჯზე უფრო მაღალ ხარისხში, ვიდრე ამას ადგილი აქვს მსუბუქ ცემენტიან ბეტონში [48].

ყოველივე ამის საფუძველზე შეიძლება ველოდოთ, მსუბუქ შემვსებზე დამზადებული საკმაოდ მაღალ სიმტკიცის გოგირდბეტონის მიღებას.

წინასწარი საცდელი ექსპერიმენტების შემდეგ შევარჩიეთ ოკამის მსუბუქ შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის შემდეგი შედგენილობა (ცხრილი 2.4.).

ცხრილი 2.4.

ფორიან შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის შედგენილობა

შემადგენლობა №	მასალების დანახარჯები 1მ ³ ნარევეზე, კგ					γ ₀ , კგ/მ ³	ნარევის შემადგენლობის ფარდობითი მასური დამოკიდებულება
	S	ქვ.0-5	ღ ⁵⁻¹⁰	ღ ¹⁰⁻²⁰	მტვ.		
1	737	383	480	-	-	1600	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ =1:0,52:0,65
2	976	674	400	-	-	2030	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ =1:0,69:0,41
3	875	729	187,5	250	-	2050	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ :ღ ¹⁰⁻²⁰ = =1:0,83:0,21:0,29
4	266	480	604	-	205	1555	S:ქვ:ღ ⁵⁻¹⁰ :მტვ. = =1:1,8:2,27:0,77

ცხრილში მოყვანილი პირველი სამი შედგენილობა მსუბუქ შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის ნიმუშების დამზადების ტექნოლოგია ანალოგიურია მძიმე შემვსებიანი გოგირდბეტონის ტექნოლოგიისა. ხოლო

მეოთხე შედგენილობის მიხედვით ბეტონის ნარევის დამზადება ხდებოდა შემდეგი ტექნოლოგიით:

დასაწყისში მზადდებოდა გოგირდის შემკვრელი – გამდნარი გოგირდის და მტვრის ნარევის პასტა. გამყარებისას პასტა ინტენსიურად ირევა და ყოვნდება 160⁰c – 170⁰c ტემპერატურაზე 0,5-1სთ მტვრის გამდნარი გოგირდით გაჯერებისათვის და ჰაერის გამოდევნისათვის. შემდეგ პასტა ერევა 160⁰c – 170⁰c ტემპერატურამდე გახურებულ შემვსებს. ტექნოლოგიის მიზანია გოგირდის ხარჯისა და მიღებული გოგირდბეტონის მოცულობითი მასის შემცირება. ამ ტექნოლოგიის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ შემვსები შთანთქავს გოგირდის მცირე რაოდენობას. თუმცა პირველი შედგენილობისგან განსხვავებით მეოთხე შედგენილობის ნარევი უფრო უხეშია და შემჭიდროებისათვის უფრო მეტი დროის განმავლობაში საჭიროებს ვიბრირებას.

ოთხივე შემადგენლობით დამზადებისას საჭიროა მასის ინტენსიური არევა და ვიბრირებისას ჩაწყობის გასაუმჯობესებლად ნიმუშებზე სიმძიმის მოთავსება.

ცხრილში 2.5. მოყვანილია ფორიან შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლები.

ცხრილი 2.5.

**ფორიან შემვსებზე დამზადებული გოგირდბეტონის
სიმტკიცის მახასიათებლები**

შემადგენლობა №	γ^0 , გ/მ ³	R_b , კგმ/სმ ²	R_m , კგმ/სმ ²	R_c , კგმ/სმ ²	R_b/ R_c
1	1600	109	95	34	3,23
2	2030	263	229	76,7	3,5
3	2050	262	228	72	3,64
4	1555	163	144	48	3,4

მოყვანილი მონაცემებიდან ჩანს, რომ გამოცდილი გოგირდბეტონის მახასიათებლები სრულად აკმაყოფილებენ სიმტკიცეზე ΓOCT-ის [49]

მოთხოვნებს, როგორც ორფენიანი საფარის ქვედა ფენისათვის მეორე და მესამე შემადგენლობით, ისე სრულყოფილი გზის საფარის ფუძისათვის პირველი და მეორე შემადგენლობით.

2.2.ექსპერიმენტის შედეგების მათემატიკურ-სტატისტიკური დამუშავება

2.2.1. პირსონის X^2 კრიტერიუმის გამოყენება მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემების განაწილების იდენტიფიკაციისათვის

ობიექტის ერთი და იმავე ხელსაწყოთი განმეორებითი გაზომვისას, არასდროს არ მიიღება ერთი და იგივე მონაცემები. თუ გამოვრიცხავთ სისტემური ცდომილების შესაძლებლობას და უხეშ აცილებებს აღმოჩნდება, რომ ტექნოლოგიური პროცესების ჩატარებაზე და გაზომვებზე გავლენას ახდენს ისეთი მრავალრიცხოვანი ფაქტორი, რომლებიც არ ექვემდებარებიან კონტროლს და იცვლებიან ერთი გაზომვიდან და ტექნოლოგიური პროცესიდან მეორემდე. როგორც წესი გაზომვები გვაძლევენ შემთხვევითი გაფანტულობის იმდენად სახასიათო სურათს, რომ იმ შემთხვევაში, როცა მათი თანმიმდევრობითი შედეგები ერთმანეთს ემთხვევა, შეიძლება ვილაპარაკოთ ანათვლების აღების გულდასმულობის ნაკლებობაზე ან გამოყენებული სკალის უხეშობაზე.

თუ დაკვირვების მარაგი შეზღუდულია და მასიური პროცესის მონაცემები ამჟღავნებს მნიშვნელოვან გაფანტვას, გაზომვის, ტექნოლოგიური პროცესის და ა. შ. ამა თუ იმ მეთოდის უპირატესობაზე ობიექტური მსჯელობა მხოლოდ შესაბამისი ობიექტის ცდების ან დაკვირვების მონაცემების შედარებისას და სტატისტიკური ანალიზის საფუძველზე შეიძლება. მათემატიკური სტატისტიკა ამუშავებს ხერხებს ასეთი შედარებისათვის და ცდილობს ამომწურავად გამოიყენოს მთელი ინფორმაცია, რომელსაც მოიცავს არსებული შეზღუდული მასალა და მიიღოს დასაბუთებული დასკვნები. მათემატიკური სტატისტიკის

ძირითად ამოცანას წარმოადგენს, მეცნიერულად დასაბუთებული დასკვნების მიღების მეთოდების დამუშავება მასიურ მოვლენებსა და პროცესებზე დაკვირვების ან ექსპერიმენტის მონაცემებიდან. ეს დასკვნები მიეკუთვნება არა ცალკეულ გამოცდას, რომლის განმეორებიდან გამომდინარეობს მოცემული მასობრივი მოვლენა, არამედ წარმოადგენს მტკიცებას მოცემული პროცესის ზოგად ალბათურ მახასიათებლებზე, ე.ი. ალბათობაზე, განაწილების კანონებზე, მათემატიკურ ლოდინზე და ა.შ. ფაქტიური მონაცემების ასეთი გამოყენება სტატისტიკური მეთოდის განმასხვავებელი მხარეა.

პარამეტრების განაწილების სტატისტიკური შეფასების შემდეგ მეორე და ამავე დროს მათემატიკური სტატისტიკის უმთავრესი ნაწილია ჰიპოთეზის სტატისტიკური შემოწმება. დავუშვათ, რომ რომელიმე მოსაზრების საფუძველზე ჩვენ ვვარაუდობთ რომელიმე მოვლენის ალბათობას, რომელიც p -ს ტოლია არსებული n დამოუკიდებელი ცდების შედეგად, რომლის დროსაც ეს მოვლენა დაკვირვებული იყო m -ჯერ, ჩვენ გვინდა შევამოწმოთ ჰიპოთეზა p ალბათობის სიდიდის მიმართ.

იმისათვის, რომ ვუპასუხოთ ზემოთმოყვანილ შეკითხვას შერჩეული უნდა იყოს ჩვენი ჰიპოთეზისათვის დასაშვები სიხშირეების მათემატიკური ლოდინისაგან გადახრის ზღვარი, რომლის გადამეტების ალბათობა ჩვენი ჰიპოთეზის დროს იმდენად მცირეა, რომ დაკვირვებული სიხშირე მნიშვნელოვნად განსხვავდება ალბათურისაგან და პირიქით, თუ ფაქტიური გადახრა ნაკლებია, კრიტიკულ ზღვარზე ითვლება, რომ ცდა არ ეწინააღმდეგება წამოყენებულ ჰიპოთეზას დაკვირვებული გადახრა შეიძლება განვმარტოთ შემთხვევითობით.

აქამდე არსებული სტატისტიკური მეთოდები და მაგალითები განიხილავენ მოვლენებს, რომლის მონაცემები დისკრეტულადაა წარმოდგენილი [50, 51,52].

ექსპერიმენტის მათემატიკურ-სტატისტიკური დამუშავების ერთ-ერთი ძირითადი ამოცანაა დამოკიდებულების დადგენა გოგირდბეტონის სიმტკიცესა და მასში შემავალი კომპონენტების თანაფარდობას შორის.

მონაცემების (ცხრილი 2.1) დამუშავების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 2.6.

ცხრილი 2.6.

ექსპერიმენტის მონაცემების დამუშავება

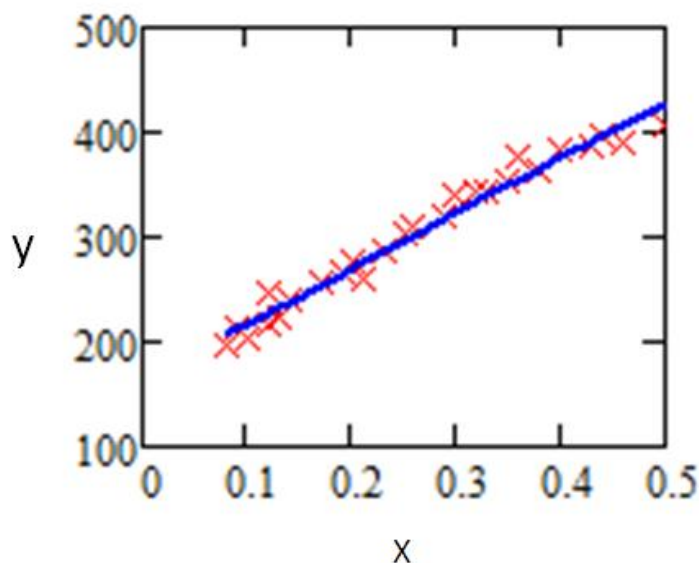
№	გოგირდისა და ბაზალტის მტვერის თანაფარდობა	ექსპერიმენტის შედეგები, $A_{ექსპ.}, კნ/სმ^2$	განგარიშებები (2.1) ფორმულის მიხედვით, $A_{თეორ.}, კნ/სმ^2$	ცდომილება %	ვარიაციული მწკრივი
1	2	3	4	5	6
1	1:0,08	195.2	206.6404	5.536359	8.538766
2	1:0,09	212.1	211.9184	0.085672	6.679236
3	1:0,1	203.3	217.1965	6.398141	6.398141
4	1:0,12	247.2	227.7527	8.538766	6.184054
5	1:0,12	217.2	227.7527	3.404011	5.536359
6	1:0,13	223.2	233.0308	2.158866	5.288022
7	1:0,14	238.9	238.3089	0.248033	5.218014
8	1:0,17	255.5	254.1432	0.533873	4.814225
9	1:0,19	265.2	264.6994	0.189125	3.404011
10	1:0,2	275.3	269.9775	2.158866	2.997959
11	1:0,21	260.7	275.2556	5.288022	2.906083
12	1:0,23	285.2	285.8118	0.214044	2.725771
13	1:0,25	301.7	296.368	1.799132	2.652356
14	1:0,26	310.8	301.646	6.184054	2.39441
15	1:0,29	318.5	317.4803	0.321177	2.158866
16	1:0,3	339.6	322.7584	5.218014	1.799132
17	1:0,32	342.4	333.3146	2.725771	1.550916
18	1:0,33	344.7	338.5927	2.39441	0.730665
19	1:0,35	351.7	349.1489	0.730665	0.533873
20	1:0,36	375.1	354.427	6.679236	0.406367
21	1:0,38	363.5	364.9832	0.406367	0.321177
22	1:0,4	382.5	375.5394	2.652356	0.248033
23	1:0,43	385.1	391.3736	2.906083	0.214044
24	1:0,44	397.3	396.6517	1.550916	0.189125
25	1:0,45	390.7	407.2079	2.997959	2.158866
26	1:0,5	407.7	428.3203	4.814225	0.085672

ექსპერიმენტის მონაცემები (ცხრ. 2.1) შეიძლება აღიწეროს წრფივი ფუნქციით (ნახ. 2.2)

$$y = ax + b \quad 2.1.$$

სადაც, y - გოგირდბეტონის სიმტკიცე, მპა;

x - ბეტონში არსებული გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობა.



ნახ.2.2. გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობაზე.

არსებული ექსპერიმენტული მონაცემების საშუალებით ვღებულობთ რიგ განტოლებებს, რომელთა გამოყენებითაც უმცირეს კვადრატთა მეთოდით ვადგენთ a და b კოეფიციენტების მნიშვნელობებს (ცხრ. 2.7.).

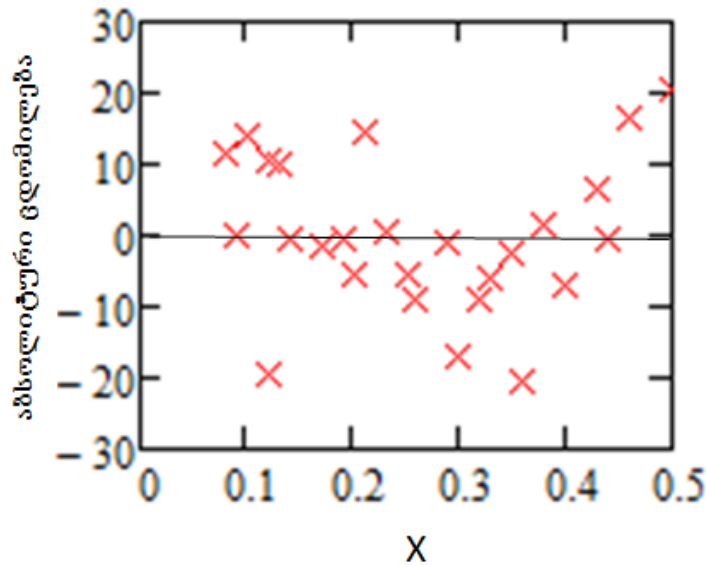
ცხრილი 2.7.

წრფივი განტოლების კოეფიციენტის მნიშვნელობები

№	კოეფიციენტი	მნიშვნელობა
1	a	527,809402
2	b	164,4156

პროგრამა «Mathcad» -ის გამოყენებით ჩატარებულმა ანგარიშებმა გვიჩვენა, რომ შემოთავაზებული განტოლება საკმარისი სიზუსტით აღწერს გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულებას გოგირდისა და მტვრის

თანაფარდობაზე. აგებული ცდომილებათა გრაფიკი (ნახ.2.2) კი გვიჩვენებს, რომ მაქსიმალური აბსოლუტური ცდომილება არ აღემატება 10%. დამოკიდებულების გამოყენების რეკომენდაციის მისაცემად საჭიროდ მიგვაჩნია თეორიული დამოკიდებულებისა და ექსპერიმენტით მიღებული შედეგების თანხვედრის შემოწმება პირსონის χ^2 კრიტერიუმის გამოყენებით.



ნახ.2.3. ცდომილებათა გრაფიკი 2.1. განტოლების მიხედვით.

მათემატიკური მოდელის ადეკვატურობის შეფასებისათვის ჩვეულებრივ რეკომენდირებულია თანადობის კრიტერიუმის გამოყენება. ამისათვის კი უნდა დადგინდეს რა პარამეტრებით და რის მიხედვით უნდა ვაწარმოთ კრიტერიუმის შერჩევა, მათემატიკური მოდელის და ექსპერიმენტით მიღებული მონაცემების თანადობის და საიმედოობის შეფასება.

განვიხილოთ ასეთი პროცესისათვის პირსონის χ^2 თანადობის კრიტერიუმის გამოყენება. პირსონის კრიტერიუმით შეიძლება შემოწმდეს ჰიპოთეზა განაწილების კანონის შესახებ.

თუ ექსპერიმენტით და განტოლებით მიღებულ მონაცემებს შორის ცდომილებანი ემორჩილებიან ნორმალური განაწილების კანონის, მაშინ

არსებული მიდგომის თანახმად [52,53] ადეკვატურობის შეფასება შეიძლება ვაწარმოოთ პირსონის χ^2 კრიტერიუმის გამოყენებით.

ამისათვის მიღებული ცდომილებანი (ცხრილი 2.6.) წარმოდგენილი უნდა იყოს პროცენტებში და განლაგდეს ვარიაციული მწკრივის სახით. ვარიაციული მწკრივი უნდა დაიყოს ინტერვალებად, დადგინდეს ინტერვალში მოხვედრილი ცდომილების რაოდენობა n_j .

დაკვირვების შედეგები, რომლებიც მიღებული იქნა გოგირდბეტონის სიმტკიცის გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობაზე დამოკიდებულების დასადგენად მოითხოვს შემოწმებას მონაცემების ერთგვაროვნებაზე, ამ ამონაკრებთა შემთხვევითობის დასაბუთებას და დროში სტაბილურობის დადგენას [53,54].

ამონაკრების შემთხვევითობის შეფასება ხორციელდება მედიანათა მეთოდის მეშვეობით. როგორც ცნობილია მედიანად მიღებულია ვარიაციული მწკრივის შუა ელემენტი, თუ ამონაკრების რაოდენობა კენტია (3.3), ხოლო ორი შუა ელემენტის არითმეტიკული საშუალო, თუ ამონაკრების რაოდენობა ლუწია, როგორც მოცემულ შემთხვევაში (3.4).

თუ n -კენტი რიცხვია

$$x_{მედ} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \quad (3.3)$$

თუ n -ლუწი რიცხვია

$$x_{მედ} = \frac{1}{2} \left[x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)} \right] \quad (3.4)$$

სადაც, $\left(\frac{n+1}{2}\right)$; $\left(\frac{n}{2}\right)$; $\left(\frac{n}{2}+1\right)$ - ცდის რიგითი ნომერია.

ექსპერიმენტის შედეგებიდან მკვეთრად გამოკვეთილი დაკვირვების გამოსაყოფად გამოვიყენეთ კრიტერიუმი (3.5)

ამონაკრების შემთხვევითობა გამართლებულია, თუ სრულდება პირობა:

$$l_{დაკ} > l_{კრ}; \quad \tau_{დაკ} < \tau_{კრ} \quad (3.5)$$

სადაც, $l_{დაკ}$ – დადებითი და უარყოფითი სერიების რაოდენობაა;

$\tau_{დაკ}$ – ყველაზე გრძელი სერიის ხანგრძლივობაა.

$$l_{\text{კრ}} = \left[\frac{1}{2} (n + 1 - 1.96\sqrt{n-1}) \right]$$

$$\tau_{\text{კრ}} = [3.3 \ln(n + 1)]$$

მიღებული ექსპერიმენტის შედეგების დროში სტაბილურობა მოწმდება დამოკიდებულებით (3.4.)

$$r^2 = q^2 / \sigma^2 \quad (3.6)$$

სადაც,
$$q^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_i^n (x_{i+1} - x_i)^2$$

σ^2 - ამონაკრეფის საშუალო კვადრატული გადახრაა.

დაკვირვებათა შედეგების დამუშავების შედეგად მივიღეთ:

ა) ერთგვაროვნებაზე

$$t_{\text{დაკ}} = \frac{|x_{\text{მაქს}} - \bar{x}|}{\sigma} \quad (3.7)$$

სადაც,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

n - ცდის რაოდენობაა (ექსპერიმენტით მიღებული ცდების რაოდენობა);

x_i - ცდების მნიშვნელობებია.

$$\bar{x} = 2,93 ; \sigma^2 = 5,93 ; \sigma = 2,43 ;$$

$$\max t_{\text{დაკ}} = \frac{|8,54 - 2,93|}{2,43} = 2,3 ;$$

$$\min t_{\text{დაკ}} = \frac{|0,086 - 2,93|}{2,43} = 1,17 ;$$

$$t_{\text{დაკ}} = 2,3 > t_{\text{კრ}} = 1,113 ;$$

$$t_{\text{დაკ}} = 1,17 > t_{\text{კრ}} = 1,113$$

ამონაკრეფი ერთგვაროვანია.

ბ) დროში სტაბილურობაზე

$$\bar{x} = 2,93 ; \sigma^2 = 5,93 ; q^2 = 12,87 ; r^2 = 2,17$$

სარწმუნოების შემთხვევაში $p = 0,001$, $r_{\text{კრ}}^2 = 0,482$, $r_{\text{დაკ}}^2 = 2,17 > r_{\text{კრ}}^2 = 0,482$

ამონაკრეფი სტაბილურია დროში.

გ) შემთხვევითობასათვის რადგან $n=26$ მედიანა განისაზღვრება ფორმულით (3.4)

$$x_{med} = \frac{1}{2}[0,652 + 2,39] = 1,52$$

$$l_{კრ} = \left[\frac{1}{2}(26 + 1 - 1.96\sqrt{26 - 1}) \right] = 7,6 \quad l_{დაკ} = 13;$$

$$\tau_{კრ} = [3.3\ln(26 + 1)] = 10,9; \quad \tau_{დაკ} = 6.$$

ცხრილი 2.8.

ექსპერიმენტული შედეგების დამუშავება

№	x_i	ერთგვაროვნებაზე		დროში სტაბილურობაზე		შემთხვევითობაზე - თუ $x_i < x_{med}$ + თუ $x_i > x_{med}$
		$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$x_{i+1} - x_i$	$(x_{i+1} - x_i)^2$	
1	5.536359	2,6	6,76	-5,45	29,7	+
2	0.085672	-2,84	8,06	6,32	39,9	-
3	6.398141	3,47	12,04	2,14	4,58	+
4	8.538766	5,61	31,47	-5,14	26,42	+
5	3.404011	0,47	0,22	-1,24	1,54	-
6	2.158866	-0,77	0,59	-1,91	3,65	-
7	0.248033	-2,68	7,18	0,28	0,078	-
8	0.533873	-2,4	5,76	-0,34	0,11	-
9	0.189125	-2,74	7,51	1,97	3,88	-
10	2.158866	-0,77	0,59	3,13	9,797	-
11	5.288022	2,36	5,57	-5,08	25,81	+
12	0.214044	-2,7	7,4	1,59	2,53	-
13	1.799132	-1,13	1,28	4,38	19,18	-
14	6.184054	3,25	10,56	-5,86	34,34	+
15	0.321177	-2,61	6,81	4,9	24	-
16	5.218014	2,28	5,2	-2,5	6,25	+
17	2.725771	-0,2	0,04	0,33	0,11	-
18	2.39441	-0,54	0,29	-1,66	2,75	-
19	0.730665	-2,2	4,84	5,95	35,4	-
20	6.679236	3,75	14,06	-6,27	39,3	+
21	0.406367	-2,53	6,4	2,24	5,02	-
22	2.652356	-0,28	0,078	0,26	0,07	-
23	2.906083	-0,02	0,0004	-1,36	1,85	-
24	1.550916	-1,38	1,904	1,45	2,1	-
25	2.997959	0,068	0,0046	1,81	3,28	-
26	4.814225	1,88	3,53			+
Σ 76,1		Σ 148,15		Σ 321,65		

რადგან პირობა (3.5) სრულდება, ამონაკრეფი შემთხვევითია, სტოქასტურად დამოუკიდებელი.

ანგარიშმა აჩვენა, რომ ექსპერიმენტის შედეგები ერთგვაროვანია, შემთხვევითია და დროში სტაბილურია. შესაბამისად, ექსპერიმენტიდან მიღებული და ფორმულით გაანგარიშებული მონაცემების შეფასება შეიძლება პირსონის კრიტერიუმით.

ინტერვალში მოხვედრილი თეორიული სიხშირეები გამოითვლება ფორმულით [55]

$$n_j = \frac{n\Delta x}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_j - \bar{x}_j)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.8)$$

სადაც:

x_j - ინტერვალის შუალედური მნიშვნელობა;

\bar{x}_j - დაკვირვების შედეგად მიღებულ რიცხვით მნიშვნელობათა აწონილი საშუალო;

σ - იგივე სიდიდის საშუალო კვადრატული გადახრა;

Δx - ინტერვალის სიგრძე;

n - შემთხვევათა რიცხვის (ექსპერიმენტიდან მიღებული წერტილების რაოდენობა).

\bar{x}_j გამოითვლება ფორმულით:

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{j=1}^m n_j x_j}{\sum_{j=1}^m n_j} \quad (3.9)$$

სადაც, m - ინტერვალთა რაოდენობა.

როგორც ცნობილია

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m n_j (x_j - \bar{x}_j)^2}{\sum_{j=1}^m n_j}} \quad (3.10)$$

გამოთვლის სიმარტივის მიზნით ვსარგებლობთ აღნიშვნით

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (3.11)$$

$$t = \frac{x_j - \bar{x}_j}{\sigma} \quad (3.12)$$

და ნორმალური განაწილების ფუნქციის ცხრილით [50,54].

თანადობის კრიტერიუმის χ^2 საანგარიშო ცხრილი

ინტერვალების №	ინტერვალების საზღვრები	ემპირიული სიხშირე n_j	ინტერვალების შუალედური მნიშვნელობა x_j	$t = \frac{x_j - \bar{x}_j}{\sigma}$	$\varphi(t)$	თეორიული სიხშირე n'_j	$\chi^2 = \frac{(n_j - n'_j)^2}{n_j}$
1	-8; -6	1	-7; 7	-1,89986	0,06565	1	0,07148
2	-6; -4	3	-5, -15	-1,37437	0,155186	2	0,536059
3	-4; -2	4	-3, 12	-0,84887	0,278321	3	0,199794
4	-2; 0	3	-1, -3	-0,32338	0,378715	4	0,501362
5	0; 2	8	1, 8	0,202113	0,390976	4	1,653249
6	2; 4	3	3, 9	0,727607	0,306239	3	0,058126
7	4; 6	2	5, 10	1,253101	0,181988	2	0,000479
8	6; 8	1	7, 7	1,778595	0,082053	1	0,007105
9	8; 10	1	9, 9	2,304088	0,028069	0	0,471633

Σ 3,499287

თავისუფლების ხარისხი იანგარიშება ფორმულით

$$S = m - r - 1 \quad (3.13)$$

სადაც,

 m - ინტერვალების რაოდენობა; r - განაწილების კანონში მონაწილე პარამეტრების რიცხვი.

თავისუფლების ხარისხი $S = 8$ და მნიშვნელობების დონის $\alpha=0,05$ -ის მიხედვით [52,56] დგინდება, რომ, $\chi^2_{0,05} = 15,507$, რაც გაცილებით მეტია მიღებულ ჯამურ მნიშვნელობაზე $15,507 > 3,499$ (ცხრილი 2.9). χ^2 კრიტერიუმი კი არ ამტკიცებს ჰიპოთეზის სამართლიანობას, არამედ მნიშვნელობების სათანადო დონის შესაბამისად ადგენს რამდენად ეთანხმება ან არ ეთანხმება ის ექსპერიმენტით მიღებულ შედეგს. თუ ემპირიულ და თეორიულ სიხშირეებს შორის სხვაობის მოსალოდნელი ალბათობაა (მნიშვნელობის დონე) $p > 0,05$ და სხვაობა თეორიულ და ემპირიულ სიხშირეებს შორის შემთხვევითია, თანხმობა ემპირიულ და ნორმალური განაწილების კანონებს შორის დამაკმაყოფილებელია. ეს კი

ნიშნავს, რომ გოგირდბეტონის სიმტკიცესა და გოგირდისა და მინერალური მტვრის თანაფარდობას შორის მიღებული დამოკიდებულება 90%-ზე მეტი საიმედოობით აღწერს მიმდინარე ტექნოლოგიურ პროცესს.

ექსპერიმენტის მიხედვით გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება მასში შემავალი გოგირდისა და მინერალური მტვრის თანაფარდობაზე (ცხრილი 2.10) ასევე შეიძლება აღიწეროს განტოლებით:

ცხრილი 2.10.

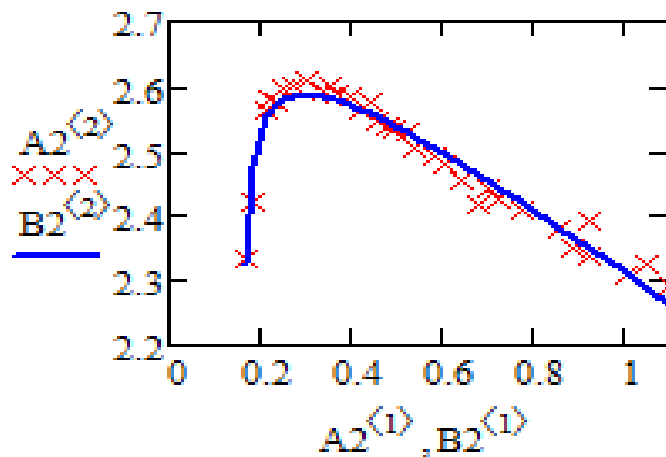
ექსპერიმენტული შედეგების დამუშავება

№	გოგირდისა და ბაზალტის მტვრის თანაფარდობა		ექსპერიმენტის შედეგები, $A_{ექსპ.}$		განგარიშებები (3.1) ფორმულის მიხედვით, $A_{თეორ.}$	ცდომილება %	ვარიაციული მწკრივი
	x	lgx	y	lgy			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1:0,08	1.0967	195.2	2.2905	2.26403048	1.168241	1.89025
2	1:0,09	1.046	212.1	2.3265	2.28863192	1.656393	1.879878
3	1:0,1	1,00	203.3	2.3081	2.31064271	0.108426	1.168241
4	1:0,12	0.921	247.2	2.3930	2.34865304	1.89025	1.656393
5	1:0,12	0.921	217.2	2.3369	2.34865304	0.265274	1.002366
6	1:0,13	0.886	223.2	2.3487	2.36527016	0.310126	0.955995
7	1:0,14	0.853	238.9	2.3782	2.38059368	0.099871	0.815379
8	1:0,17	0.7695	255.5	2.4074	2.42031826	0.534118	0.781946
9	1:0,19	0.7212	265.2	2.4236	2.44267392	0.781946	0.76444
10	1:0,2	0.699	275.3	2.4398	2.45284856	0.531722	0.646626
11	1:0,21	0.678	260.7	2.4161	2.46243176	1.879878	0.608441
12	1:0,23	0.638	285.2	2.4551	2.48000828	1.002366	0.534118
13	1:0,25	0.602	301.7	2.4796	2.49571324	0.646626	0.531722
14	1:0,26	0.585	310.8	2.4925	2.50293952	0.104574	0.52727
15	1:0,29	0.538	318.5	2.5031	2.52239162	0.76444	0.455969
16	1:0,3	0.523	339.6	2.531	2.52819469	0.109683	0.310126
17	1:0,32	0.495	342.4	2.534	2.53886672	0.170665	0.265274
18	1:0,33	0.481	344.7	2.5374	2.54375835	0.149563	0.255629
19	1:0,35	0.456	351.7	2.5462	2.55269781	0.255629	0.170665
20	1:0,36	0.444	375.1	2.57415	2.55675940	0.815379	0.149563
21	1:0,38	0.420	363.5	2.5605	2.56409091	0.139874	0.139874
22	1:0,4	0.398	382.5	2.5826	2.57038512	0.608441	0.109683
23	1:0,43	0.366	385.1	2.5856	2.57788523	0.0085	0.108426
24	1:0,44	0.356	397.3	2.5991	2.57985769	0.455969	0.104574
25	1:0,45	0.337	390.7	2.5918	2.58297784	0.52727	0.099871
26	1:0,5	0.301	407.7	2.6103	2.58562229	0.955995	0.0085

$$y = a_1 \cdot x^{a_2} \cdot e^{a_3 x}$$

იმის გამო, რომ გოგირდბეტონს მინერალური მტვრის დამატების გარეშე აქვს სიმტკიცე, განტოლებაში გაჩნდება დამატებითი პარამეტრი და განტოლება მიიღებს სახეს:

$$y = a_1 \cdot (x + a_4)^{a_2} \cdot e^{a_3(x+a_4)}$$



ნახ.2.4. გოგირდბეტონის სიმტკიცის, გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობაზე, დამოკიდებულების გრაფიკი ლოგარითმულ კოორდინატებში

გამოთვლების გასამარტივებლად მოცემული ფუნქცია გავალოგარითმოთ. საბოლოოდ გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება მასში შემავალი გოგირდისა და მინერალური მტვრის თანაფარდობაზე (ნახ.2.4.) აპროქსიმებულია განტოლებით:

$$\lg y = a_1 \cdot (-\lg x + a_4)^{a_2} \cdot e^{a_3(-\lg x + a_4)} \quad (3.14)$$

სადაც y - გოგირდბეტონის სიმტკიცე კუმშვაზე, მპა;

x - გოგირდბეტონში არსებული გოგირდისა და მინერალური მტვრის თანაფარდობა;

a_1, a_2, a_3, a_4 კოეფიციენტებია.

განტოლებაში შემავალი კოეფიციენტები ნაპოვნია უმცირეს კვადრატთა მეთოდით და მათი მნიშვნელობები მოყვანილია ცხრილში 2.11.

a_1, a_2, a_3, a_4 კოეფიციენტების მნიშვნელობების დასადგენად გამოვიყენეთ პროგრამა Mathcad-ის 12 ვერსია, ფუნქცია genfit, რომელსაც

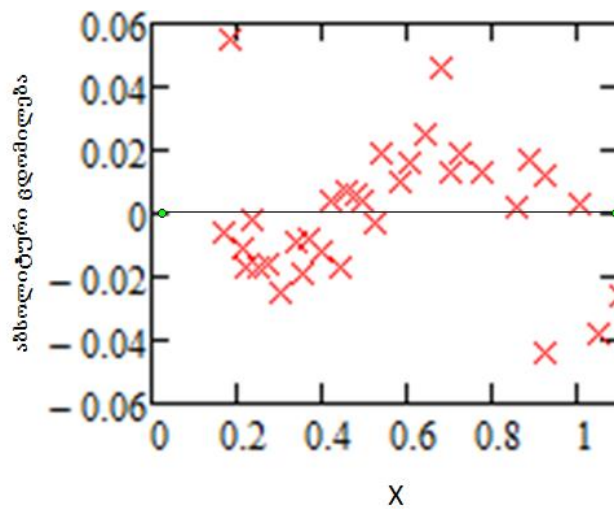
მივაწოდეთ ექსპერიმენტის მონაცემები და მივიღეთ ჰიპოთეზის შესაბამისი განტოლების კოეფიციენტების ერთობლიობა.

ცხრილი 2.11.

ლოგარითმული განტოლების კოეფიციენტის მნიშვნელობები

№	კოეფიციენტი	მნიშვნელობა
1	a_1	2,86072300
2	a_2	0,033737
3	a_3	-0,248526
4	a_4	-0,16526

ამ ფუნქციის მეშვეობით აგებული ცდომილებათა გრაფიკი (ნახ.2.5) გვიჩვენებს, რომ მიღებული კოეფიციენტების მნიშვნელობებისათვის მაქსი-



ნახ.2.5. ცდომილებათა გრაფიკი 3.14. განტოლების მიხედვით

მალური აბსოლუტური ცდომილება შეადგენს 0,06მპა-ს, რაც არ აღემატება 5-10%, და სავსებით დასაშვებია საინჟინრო-ტექნოლოგიური პროცესებისათვის.

დაკვირვებათა შედეგების დამუშავების შედეგად მივიღეთ:

ა) ერთგვაროვნებაზე

$$\bar{x} = 0,61; \quad \sigma^2 = 0,296; \quad \sigma = 0,54;$$

$$\max t_{დაკ} = \frac{1,89-0,61}{0,54} = 2,37;$$

$$\min t_{დაკ} = \frac{0,085-0,61}{0,54} = 1,114;$$

$$t_{დაკ} = 2,37 > t_{კრ} = 1,113;$$

$$t_{დაკ} = 1,114 > t_{კრ} = 1,113$$

ამონაკრეფი ერთგვაროვანია.

მონაცემების (ცხრილი 2.1.) დამუშავების შედეგად მიღებულია:

ბ) დროში სტაბილურობაზე. $\bar{x} = 0,61$; $\sigma^2 = 0,296$; $q^2 = 0,289$; $r^2 = 0,97$

$p = 0,001$ სარწმუნოების შემთხვევაში

$$r_{კრ}^2 = 0,482, r_{დაკ}^2 = 0,97 > r_{კრ} = 0,482$$

ამონაკრეფი სტაბილურია დროში.

ცხრილი 2.12.

ექსპერიმენტული შედეგების დამუშავება

№	x_i	ერთგვაროვნებაზე		დროში სტაბილურობაზე.		შემთხვევითობაზე - თუ $x_i < x_{med}$ + თუ $x_i > x_{med}$
		$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$x_{i+1} - x_i$	$(x_{i+1} - x_i)^2$	
1	1.168	0,56	0,31	0,49	0,24	+
2	1.656	1,05	1,1	-1,55	2,4	+
3	0.108	-0,5	0,25	1,78	3,17	-
4	1.890	1,28	1,64	1,63	2,66	-
5	0.265	-0,36	0,13	0,05	0,0025	-
6	0.310	-0,3	0,17	-0,3	0,09	-
7	0.1	0,51	0,26	0,52	0,27	-
8	0.5341	-0,08	0,0064	0,25	0,06	+
9	0.782	0,17	0,029	-0,25	0,06	+
10	0.5317	-0,08	0,0064	1,35	1,82	+
11	1.8799	1,27	1,61	-0,88	0,77	+
12	1.002	0,39	0,152	-0,35	0,12	+
13	0.647	0,04	0,0016	-0,55	0,3	+
14	0.104	-0,51	0,26	0,66	0,43	-
15	0.764	0,15	0,02	-0,65	0,42	+
16	0.11	-0,5	0,25	0,06	0,0036	-
17	0.171	-0,44	0,19	-0,03	0,0009	-
18	0.1496	-0,46	0,21	0,11	0,012	-
19	0.256	-0,35	0,12	0,56	0,31	-
20	0.815	0,2	0,04	-0,68	0,46	+
21	0.14	-0,47	0,22	0,47	0,22	-
22	0.608	0,00	0,00	-0,54	0,29	+
23	0.008	-0,54	0,29	0,38	0,14	-
24	0.456	-0,15	0,02	0,08	0,0064	+
25	0.527	-0,08	0,0064	0,42	0,176	+
26	0.956	0,35	0,12	-	-	+

$\Sigma 15,89$

$\Sigma 7,41$

$\Sigma 14,43$

გ) შემთხვევითობასათვის რადგან $n=26$ მედიანა განისაზღვრება ფორმულით (3.4)

$$x_{მედ} = \frac{1}{2}[0,65 + 0,105] = 2,37$$

$$l_{კრ} = \left[\frac{1}{2}(26 + 1 - 1,96\sqrt{26 - 1}) \right] = 7,6 \quad l_{დაკ} = 11;$$

$$\tau_{კრ} = [3,3\ln(26 + 1)] = 10,9; \quad \tau_{დაკ} = 6.$$

პირობა (3.5) სრულდება, ამონაკრეფი შემთხვევითია, სტოქასტურად დამოუკიდებელი.

ანგარიშმა აჩვენა, რომ ექსპერიმენტის შედეგები ერთგვაროვანია, შემთხვევითია და დროში სტაბილურია. შესაბამისად, ექსპერიმენტიდან მიღებული და ფორმულით გაანგარიშებული მონაცემების შეფასება შეიძლება პირსონის კრიტერიუმით.

ცხრილი 2.13.

თანადობის კრიტერიუმის χ^2 საანგარიშო ცხრილი

ინტერვალის №	ინტერვალის საზღვრები	ემპირიული სიხშირე n_j	ინტერვალის შუალედური მნიშვნელობა x_j	$t = \frac{x_j - \bar{x}_j}{\sigma}$	$\phi(t)$	თეორიული სიხშირე n'_j	$\chi^2 = \frac{(n_j - n'_j)^2}{n_j}$
1	-2;-1.5	1	-1,75; -1.75	-2,21318	0,034467	0	0,378661
2	-1,5;-1	1	-1,25; -1.25	-1,58771	0,113143	1	0,034496
3	-1;-0.5	3	-0,75; -2.25	-0,96225	0,251164	3	0,012941
4	-0,5;0	10	-0,25; -2.5	-0,33679	0,377042	4	3,355017
5	0;0.5	5	0,25; 1.25	0,288675	0,382758	4	0,106131
6	0,5;1	3	0,75; 2.25	0,914138	0,262761	3	0,001524
7	1;1.5	1	1,25; 1.25	1,539601	0,121983	1	0,130553
8	1,5;2	2	1,75; 1.25	2,165064	0,038295	0	1,236585

Σ 5,255909

თავისუფლების ხარისხი $S=7$ და მნიშვნელობის დონის $\alpha=0,05$ - ის მიხედვით [52, 56, 57] დგინდება, რომ $\chi^2_{0,05} = 14,067$, რაც გაცილებით მეტია მიღებულ ჯამურ მნიშვნელობაზე $14,067 > 5,26$ (ცხრილი 2.13). χ^2 კრიტერიუმი კი არ ამტკიცებს ჰიპოთეზის სამართლიანობას, არამედ მნიშვნელობების სათანადო დონის შესაბამისად ადგენს რამდენად ეთანხმება ან არ ეთანხმება ის ექსპერიმენტით მიღებულ შედეგს. თუ ემპირიულ და თეორიულ სიხშირეებს შორის სხვაობის მოსალოდნელი

აღბათობაა (მნიშვნელობის დონე) $p > 0,05$ და სხვაობა ემპირიულ და თეორიულ სიხშირეებს შორის შემთხვევითია, თანხმობა ემპირიულ და ნორმალური განიწილების კანონებს შორის დამაკმაყოფილებელია. ეს კი ნიშნავს, რომ მიღებული გოგირდბეტონის სიმტკიცის დამოკიდებულება გოგირდისა და მტვრის თანაფარდობაზე 90%-ზე მეტი საიმედოობით აღწერს მიმდინარე ტექნოლოგიურ პროცესს.

2.3. მსუბუქი და მძიმე გოგირდბეტონის მუშაობის კვლევა მცირეციკლურ განმეორებით მკუმშავ დატვირთვაზე

ექსპერიმენტები მიმდინარეობდა ზემოთ აღწერილი ცემენტის ბეტონის ნიმუშების ციკლურ დატვირთვაზე კვლევის მეთოდის თანახმად.

გამოვიკვლიეთ მძიმე გოგირდბეტონის ნიმუშები დამზადებული მეორე შედგენილობით (ცხრილი 2.2.) და მსუბუქ ფორიან შემდგომზე დამზადებული გოგირდბეტონის ნიმუშები დამზადებული მეორე შედგენილობით (ცხრილი 2.4.)

გოგირდბეტონის ნიმუშების სიმტკიცის მახასიათებლები მოყვანილია ცხრილში 2.14.

გოგირდბეტონის მცირეციკლურ და განმეორებით მკუმშავ დატვირთვაზე გამოკვლევის ექსპერიმენტში მიღებული შედეგები მოყვანილია ცხრილებში 2.15.-2.18.

ცხრილი 2.14.

გოგირდბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლები

ბეტონის სახე და ნიმუშის სერია	R_b , კგმ/სმ ²	R_m , კგმ/სმ ²	R_c , კგმ/სმ ²
მძიმე გოგირდბეტონი	306	292	105,3
მსუბუქი გოგირდბეტონი	309	332	77,4

კვლევებმა აჩვენა შემდეგი:

1. ციკლური გამოცდების ჩატარების დროს ადგილი აქვს გოგირდბეტონის სიმტკიცის შემცირებას 22-25%-ით იმ ნიმუშებში, სადაც $\frac{\sigma}{R_m} > 0,9$, ანუ რომელთა ციკლური დატვირთვების სიდიდე უახლოვდებოდა მრღვევ ძალას. ხოლო, როცა $\frac{\sigma}{R_m} = 0,86$ - ს დროს გოგირდოვანი ბეტონისათვის სიმტკიცის შემცირება 6%-ის ტოლია. დანარჩენ შემთხვევებში სიმტკიცის შემცირებას ადგილი არ ჰქონია. რაც გოგირდბეტონის საკმარის გამძლეობაზე მიგვითითებს მცირე ციკლური მკუმშავი დატვირთვებისას.
2. დატვირთვის ციკლზე დამოკიდებული დრეკადი დეფორმაციების მოდულის ცვლილების გამოკვლევამ აჩვენა, რომ ისევე როგორც ცემენტბეტონის შემთხვევაში მათი შემცირება დატვირთვის ციკლის რაოდენობის მიხედვით ხდება. ცემენტბეტონის ანალოგიურად ცალკეულ ნიმუშებზე შეინიშნებოდა დრეკადი დეფორმაციების მოდულის ცვლილების პერიოდულობა მზარდი დატვირთვების ციკლში. რაც შეეხება სიმტკიცის მიხედვით ერთი და იგივე კლასის გოგირდბეტონის და ცემენტბეტონის დრეკადი დეფორმაციის მოდულების შედარებას უნდა აღინიშნოს, რომ გოგირდბეტონის დრეკადი დეფორმაციის მოდული მნიშვნელოვნად აჭარბებს ცემენტბეტონის ნორმატიულს. ასევე აღსანიშნავია, რომ მძიმე გოგირდბეტონის დრეკადი დეფორმაციის მოდული აჭარბებს სიმტკიცის მიხედვით იგივე კლასის გოგირდბეტონის დრეკადი დეფორმაციის მოდულს. ე.ი. გოგირდბეტონები ექვემდებარებიან იგივე კანონებს, რასაც ცემენტბეტონები. დრეკადი დეფორმაციის მოდული კუმშვისას პირველ ყოვლისა დამოკიდებულია შემსვების დრეკადი დეფორმაციის მოდულზე, გოგირდი უნარს ანიჭებს ბეტონის მატრიცული ნაწილის, შემსვებთან უფრო ეფექტურ და მტკიცე შეჭიდულობას.
3. ისევე როგორც ცემენტბეტონის ბეტონების კვლევებშია გამოვლენილი, გოგირდბეტონში ბეტონის სტრუქტურის რღვევა შესაძლებელია არა მხოლოდ დატვირთვისას, არამედ ნიმუშების განტვირთვის დროსაც.

4. გოგირდიანი ბეტონების თვისებების გამოკვლევისას დადგენილია ციკლური დატვირთვისას მათი შედარებით მაღალი დრეკადი მუშაობის უნარი ცემენტთან ბეტონებთან შედარებით;

ცხრილი 2.15.

მცირე ციკლიან მკუმშავ დატვირთვაზე გამოცდის შედეგები მსუბუქი გოგირდბეტონის ნიმუშების მაგალითზე

დატვირთვა P, კგძ	საშუალო დეფორმაციები		პუასონის კოეფიციენტი $\nu = E_{გან} / E_{გრძ}$	დრეკადობის მოდული	
	გრძივი $E_{გრძ} \cdot 10^{-5}$	განივი $E_{გან} \cdot 10^{-5}$		$E_{გრძ}^{\delta} \cdot 10^{-3}$, კგძ/სმ ²	$E_{გან}^{\delta} \cdot 10^{-3}$, კგძ/სმ ²
300	0.0	0,0	0,00	0	0
1200	17,5	-5,5	-0,31	429	-41250
2400	48.0	-9,5	-0,20	313	-142500
3600	72,5	-15,5	-0,21	310	-348750
4600	119,0	-15,5	-0,13	242	-445625
3600	91,5	-14,5	-0,16	246	-326250
2400	62,5	-4,5	-0,07	240	-67500
1200	26,0	-1,0	-0,04	288	-76500
300	5,5	2,0	0,36	341	3750

მეორე ციკლზე გამჭოლი ბზარი სიმაღლის 3/4-ზე $P=3600$ კგძ= 225 კგძ/სმ²;
რღვევა მეოცე ციკლზე $P=4600$ კგძ= $287,5 \times 0,85=244$ კგძ/სმ²;

ცხრილი 2.16.

K_1 პრიზმული სიმტკიცე - საწყისი და ციკლური გამოცდის შემდეგ R_m მძიმე და მსუბუქი გოგირდბეტონისათვის ახალქალაქის ფოროვან შემავსებელზე (ოკამი)

ბეტონის სახე და ნიმუშის სერია	№	$\frac{\sigma}{R_m}$	K_1 , როცა $\frac{\sigma}{R_m} \approx 0,5$	R_m , კგძ/სმ ²	R_m^n , კგძ/სმ ²	R_m^n / R_m
მძიმე გოგირდბეტონი	1*)	0,91	0,217	292	229	0,78
	2	0,86	0,156		276	0,94
	3	0,64	0,196		411	1,41
მსუბუქი გოგირდბეტონი	4*)	0,94	0,063	332	250	0,75
	5	0,72	0,207		353	1,06
	6	0,8	0,148		353	1,06
	7**)	0,74	-		244	0,74

*) 1 და 4 ნიმუშები ირღვეოდა მეოთხე ციკლის შემდეგ;

***) მეორე ციკლზე გამჭოლი ბზარი სიმაღლის 3/4-ზე, შემდეგ რღვევა მე-20 ციკლზე, შესაძლოა გამოწვეული იყოს სტრუქტურაში ფარული ტექნოლოგიური დეფექტით.

გოგირდბეტონის ნიმუშების დრეკადი დეფორმაციის მოდულის $E \cdot 10^{-3}$, კგძ/სმ² ცვლილების
დამოკიდებულება დატვირთვის n ციკლზე

ბეტონის სახე და ნიმუშის სერია	$E \cdot 10^{-3}$, СннП, კგძ/სმ ²	$E \cdot 10^{-3}$, კგძ/სმ ²	$E \cdot 10^{-3}$, კგძ/სმ ²	№	$\frac{\sigma}{R_m}$	$\frac{E \cdot 10^{-3}}{E_n/E_{n=1}}$, ციკლოთა n რაოდენობისას						$\frac{E_{n=200}}{E_{n=25}}$
						n=1	n=2	n=25	n=50	n=100	n=200	
მძიმე გოგირდბეტონი	398	**) 1163X 0,85= 988	**) 1216X 0,85= 1033	1	0,91	781/1	658/0,842	-	-	-	-	
				2	0,86	2083/1	3125/1,5	1042/0,5	1042/0,5	781/0,375	833/0,4	0,799
				3	0,64	625/1	893/1,429	1389/2,222	1786/1,858	-	-	*) 1,286
მსუბუქი გოგირდბეტონი	240	562X 0,85= 178	331X 0,85= 281	4	0,94	560/1	990/1,768	-	-	-	-	-
				5	0,72	635/1	2717/4,279	362/0,57	354/0,557	381/0,6	368/0,579	1,016
				6	0,8	492/1	1071/2,177	300/0,61	300/0,61	284/0,577	256/0,52	0,85

*) $\frac{E_{n=200}}{E_{n=25}}$;

**) 0,85- მასშტაბური კოეფიციენტი 4X4X16 სმ ნაკეთობებისათვის.

ცხრილი 2.18.

გოგირდბეტონის ნიმუშების შინაგანი ენერჯის შთანთქმის ψ კოეფიციენტი და ფარდობითი დრეკადი დეფორმაციის ξ მაჩვენებელი, დამოკიდებული დატვირთვის ციკლთა n რაოდენობაზე

ბეტონის სახე და ნიმუშის სერია	№	$\frac{\sigma}{R_m}$	ψ კოეფიციენტი/ ξ მაჩვენებელი, ციკლთა n რაოდენობისას					
			n=1	n=2	n=25	n=50	n=100	n=200
მძიმე გოგირდბეტონი	1	0,91	0,202/ 0,918	*) -0,125/ 1,041	-	-	-	-
	2	0,86	-0,180/ 1,276	-0,169/ 1,077	-0,291/ 1,13	-0,50/ 1,2	0,329/ 1,127	-0,315/ 1,108
	3	0,64	-0,065/ 1,00	-0,065/ 1,00	-0,276/ 1,077	-0,319/ 1,6	-0,276/ 1,872	0,799/ 0,686
მსუბუქი გოგირდბეტონი	4	0,94	-0,073/ 1,045	**) -0,073/ 1,045	-	-	-	-
	5	0,72	-0,084/ 1,17	-0,084/ 1,17	0,0075/ 1,0	0,0157/ 0,994	-0,00176/ 1,012	0,0346/ 1,034
	6	0,8	-0,068/ 1,091	-0,209/ 1,778	0,054/ 0,957	-0,056/ 1,087	0,051/ 0,964	0,037/ 0,960
	7	0,74	-	-	-	-	-	-

ცხრილში: „მინუს“ ნიშნის მქონე მაჩვენებლები აღნიშნავენ „უარყოფითი“ ჰისტერეზისის გამოვლენას;

*) მეორე ციკლზე $\frac{\sigma}{R_m} = 0,64$ რღვევა ხდებოდა მეოთხე ციკლის შემდეგ;

**) მონაცემები მეოთხე ციკლის მიხედვით.

მთლიანობაში გამოკვლევამ აჩვენა გოგირდოვანი ბეტონების მუშაობის საკმაოდ მაღალი საიმედოობა, მცირეციკლიან და მკუმშავ დატვირთვაზე, რაც ერთხელ კიდევ და სრულიად საფუძვლიანად, გზებისა და მოედნების მშენებლობაში მისი გამოყენების რეკომენდაციის საშუალებას იძლევა.

2.4. ორფენიანი საფარის ქვედა ფენაში გოგირდბეტონის გამოყენების შესაძლებლობის კვლევა

გზებისა და მოედნების მშენებლობაში გამოყენებული ცემენტბეტონის საფარები შეიძლება ერთფენიანი და ორფენიანი იყოს. ორფენიანი საფარის მოწყობა ხარისხიანი მასალის ეკონომიის მიზნითაა რეკომენდებული [60-63]. ამასთან ზედა ფენა, არაუმცირეს 6სმ სისქისა, რეკომენდებულია მოწყოს მაღალი ხარისხის მასალით მიღებული მაღალი სიმტკიცის ბეტონით. ქვედა ფენა ჩვეულებრივი ცემენტითა და ნაკლებად მტკიცე, ყინვაგამძლე შემვსები მასალით (კერამზიდი, ღორღი, წიდა) შეიძლება დაბეტონდეს.

თუმცა, თანამედროვე მოსაზრებით სხვაგვარადაა [63]. ზედაფენის მაღალი სიმტკიცე არ შეიძლება გამოვიყენოთ საფარის გაანგარიშებისას, რამდენადაც საანგარიშო გაჭიმულ ზონაში ჩვეულებრივი ბეტონის რეალიზება ხდება.

სიმტკიცის ამაღლების მიზნით მიზანშეწონილია მაღალი სიმტკიცის ბეტონის ფენა განლაგდეს საფარის ქვედა გაჭიმულ ზონაში. ორფენიანი ბეტონის სიმტკიცე გაჭიმვაზე ღუნვისას, როცა მაღალი სიმტკიცის ბეტონი განლაგებულია გაჭიმულ ზონაში, ჩვეულებრივ ერთფენიანი ბეტონის სიმტკიცესთან შედარებით $2\div 4$ – ჯერ იზრდება [63].

გოგირდბეტონის სიმტკიცის მაღალი მახასიათებლების გათვალისწინებით გამოიკვეთა ორფენიანი გადახურვის გამოყენების ეფექტურობა. ფენების შემადგენლობა კი ასეთია: პირველი–ზედა ფენა ცემენტბეტონისაგან, ქვედა ფენა მძიმე გოგირდბეტონისაგან და მეორე: ზედა ფენა ცემენტბეტონისაგან, ხოლო ქვედა ფენა ფოროვან შემვსებზე-ახალქალაქის ვულკანურ წიდაზე (ოკამიდან), დამზადებული გოგირდბეტონისაგან.

10X10X40სმ ზომის საცდელი კოჭების გამოცდა მოხდა ღუნვაზე, დატვირთვის შეხების სამწერტილიანი სქემით. ნიმუშები განლაგდა გრძივი ღერძის გასწვრივ ცემენტბეტონის და გოგირდბეტონის ფენის სისქე

სიმაღლეზე კვეთისას იყო 1:0; 2:1; 1:2; 0:1. ფორმაში ცემენტბეტონის ფენა თავსდებოდა გაცივებული გოგირდბეტონის ფენაზე.

მივიღეთ ბეტონის შემდეგი შემადგენლობა:

1. ჩვეულებრივი ცემენტის ბეტონი ც:ქვ⁰⁻⁵:ღ⁵⁻¹⁰:ღ¹⁰⁻²⁰:წყ=1:1,43:0,89:0,45 დანამატით CPC-3 0,8% ოდენობით.

2. მძიმე გოგირდბეტონი.

S:ქვ⁰⁻⁵:ღ⁵⁻¹⁰:ღ¹⁰⁻²⁰:მტვ=1:1,2:0,7:1,4:0,5; $\gamma_0^{საშ} = 2376 \text{ კგ/მ}^3$.

3. მსუბუქი გოგირდბეტონი.

S:ქვ⁰⁻⁵:ღ⁵⁻¹⁰:ღ¹⁰⁻²⁰=1:0,85:0,21:0,29; $\gamma_0^{საშ} = 2050 \text{ კგ/მ}^3$.

გამოცდის შედეგები ორფენიანი ნიმუშებისათვის ქვედა ფენით მძიმე გოგირდბეტონისაგან და ქვედა ფენით მსუბუქი გოგირდბეტონისაგან მოყვანილია ცხრილში 2.19.

მოყვანილი შედეგებიდან ჩანს, რომ ორფენიანი საფარისას ქვედა ფენაში გოგირდბეტონის გამოყენებისას სიმტკიცე მნიშვნელოვნად აჭარბებს ბეტონის ერთფენიანი ნიმუშის სიმტკიცეს გაჭიმვაზე ღუნვისას.

ცხრილი 2.19.

**ორფენიანი, 10X10X40სმ ზომის ნიმუშის გაჭიმვაზე ღუნვით
გამოცდის შედეგები**

ორფენიანი ნიმუში მძიმე გოგირდბეტონის ქვედა ფენით			ორფენიანი ნიმუში მსუბუქი გოგირდბეტონის ქვედა ფენით		
ცემენტბეტონის ზედა შრის სისქე, სმ და ფენათა დამოკიდებ-ბა	მძიმე გოგირდბეტონის ქვედა შრის სისქე, სმ და ფენათა დამოკიდებ-ბა	ელემენტის სიმტკიცე გაჭიმვაზე ღუნვისას, P_{II} , კგ/სმ ²	ცემენტბეტონის ზედა ფენის სისქე, სმ და ფენათა დამოკიდებ-ბა	მსუბუქი გოგირდბეტონის ქვედა ფენის სისქე, სმ და ფენათა დამოკიდებ-ბა	ელემენტის სიმტკიცე გაჭიმვაზე ღუნვისას, P_{II} , კგ/სმ ²
10(1:0)	0(0:1)	32,2	10(1:0)	0(0:1)	32,2
6,6(2:1)	3,3(1:2)	50,7	6,6(2:1)	3,3(1:2)	44,6
5(1:1)	5(1:1)	60,6	5(1:1)	5(1:1)	48,3
3,3(1:2)	6,6(2:1)	35,6	3,3(1:2)	6,6(2:1)	50,5
0(0:1)	10(1:0)	51,5	0(0:1)	10(1:0)	72

2.4.1. ფოროვან ვულკანურ ახალქალაქის წიდაზე (ოკამი) დამზადებული გოგირდბეტონის სინჯის კვლევა

როგორც ცნობილია ვულკანური წარმოშობის გრანულირებული წიდა თავისი მინერალური და ქიმიური შედგენილობით მიეკუთვნება ფორიან ნაირსახეობას ანდეზიურ – ბაზალტური ტიპის [64, 65]. ის ალუმოსილიკატური შედგენილობის ნაბურღ ვულკანურ მინას წარმოადგენს. ვულკანური წიდას შემადგენლობის 75–85%-ს მინისებური ფაზა წარმოადგენს, ხოლო 15–20% კრისტალური.

წიდის გრანულები მსხვილ, საშუალო, წვრილ ფორებს და მიკროფორებს შეიცავენ. გოგირდბეტონის სტრუქტურულ შედგენილობის დიდ გავლენას ახდენს თვითონ წვრილი შევსების გრანულომეტრული შედგენილობა, განსაკუთრებით მისი მტვროვანი ფრაქცია. როგორც ადრე აღვნიშნეთ კვლევებში გამოყენებულ სინჯში შემავალი ვულკანური წიდის 24%-მდე მტვროვანი ფრაქციაა (0,14 მმ–ზე მცირე).

ვულკანური წიდის მტვროვანი შემადგენელი, როგორც მასალა, რომელსაც აქტიური კუთრი ზედაპირი აქვს, გოგირდთან ურთიერთქმედებისას გოგირდს გოგირდბეტონში, პოლიმორფული გარდაქმნის უნარს აძლევს. რაც თავის მხრივ ასტიმულირებს როგორც ნარევის პლასტიფიკაციას, ისე სტრუქტურის გამარტივებას კოგეზიური და ადგეზიური თვისებების გამოვლინების ხარჯზე.

გოგირდბეტონში გოგირდი გამოყენებულია, როგორც შემკვრელი 160°C ტემპერატურის ხსნარის სახით. ამ ტემპერატურაზე და უფრო ქვევით 120° C–მდე, გოგირდი S_8 პოლიმერულ მოდიფიკაციას წარმოადგენს. 120° C–ზე ქვევით იგი ბლანტი ხდება და ყვითელი ფერის კრისტალურ მასაში გადადის. პოლიმერულ გოგირდს ნარევიში ნაწილების შეერთების და თხევად ნაწილსა და შემვსების შორის საკონტაქტო ზონის წარმოქმნის უნარი აქვს. როგორც კვლევებმა აჩვენა გოგირდის სტრუქტურა საკონტაქტო ზონაში ბევრად არის დამოკიდებული ნაწილების ზედაპირებზე [66].

მსუბუქი გოგირდბეტონის, შემადგენლობით $S:ქვ:ღ^{5-10}=1:0,98;0,74$, მიკროსკოპულმა ანალიზმა გვიჩვენა, რომ წიდის ნაწილები, რომელთა ზედაპირი ოდნავ დაბურულად, მსუბუქად სახეშეცვლილად გამოიყურება და დაფარულია მუქი ფერის პოლიმერული გოგირდით. წიდის ფოროვანი ნაწილები სრულად ან ნაწილობრივ სავსეა გამოყოფილი გოგირდის ყვითელი კრისტალებით. იმის გამო, რომ ვულკანური წიდა ალუმინოსილიკატის შემცველ მინისებურ ნივთიერებას წარმოადგენს, გოგირდთან ურთიერთქმედებისას მისი ნაწილები მაღალ ზედაპირულ აქტიურობას ამჟღავნებენ. ამიტომ $160-120^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურულ ინტერვალში ადგილი აქვს შემდეგ რეაქციულ გამოვლინებებს:

1. როცა პოლიმერული მოდიფიკაციის (S_{μ}) გოგირდი უზრუნველყოფს ბეტონში ნაწილების შემაწებელი ძალის გაზრდას და ნაწილების ზედაპირებზე ადსორბციული ფენის წარმოქმნის სტიმულს იძლევა, რაც თავის მხრივ ბეტონის სიმტკიცის ამაღლებაზე დადებითად მოქმედებს;

2. წიდის მსხვილი გრანულების ურთიერთქმედებისას, როცა გოგირდის მიკროდანამატის ნაწილების შეწებების უნარის მქონე პოლიმერულ ნაღნობს ასევე თავისუფალ მსხვილ გრანულებს შორის მიზიდვის ძალების გაზრდის უნარი აქვს.

ტემპერატურის შემცირებისას ფორების სიცარიელების შემცვები გოგირდის ნაღნობი, მომჭიმავი ძალის გამომჟღავნების უნარს კარგავს და კრიტიკული ტემპერატურის შემდეგ კრისტალურ მდგომარეობაში გადადის.

როგორც ჩატარებული კვლევებიდან ჩანს, ფოროვან ვულკანურ წიდაზე დამზადებულ გოგირდბეტონში გოგირდსა და მიკროდანამატს შორის ადგილი აქვს ადსორბციულ ურთიერთქმედებას და წიდის გრანულების ფოროვანი სისტემის გოგირდის კრისტალებით შევსებას, რაც მექანიკური ადგეზიის პროცესის გამოვლენისას არის შესაძლებელი.

2.5. მსუბუქი პოლიმერლერბეტონის შექმნის თეორიული საფუძვლები

ახალი მსუბუქი კონსტრუქციული მასალა, ფორიან შემვსებზე დამზადებული მაღალი სიმტკიცის, მცირე დეფორმაციული და წყალშეუღწევი პოლიმერლერბეტონი შექმნილია XX საუკუნის 60-70-იან წლებში [70]. მის შექმნას საფუძვლად უდევს აკად. ნ. მუსხელიშვილის შრომები [71] და ტ.მ.დ. ვ. ბალავაძის მიერ წამოყენებული და დამუშავებული ბეტონის ცოცვადობის ადსორბციული თეორია [72], რომელიც შემდგომში ტ.მ.დ. მ. ლორთქიფანიძის უშუალო მონაწილეობით გავრცელდა მყარ სხეულებზე. ეს თეორია ემყარება აკად. პ. რებინდერის სწავლებას დამაბულ მყარ სხეულებში ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების ადსორბციული გავლენის შესახებ [73-75].

აკად. პ. რებინდერის თეორია მყარ სხეულებში ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების ადსორბციულ გავლენაზე იმაში მდგომარეობს, რომ დამაბულ მყარ სხეულში მიკრობზარების წარმოქმნასა და განვითარებას თან სდევს გახსნილი კედლები - ზედაპირები, რომლებიც თავისუფალი არიან მოლეკულათშორისი შეჭიდულობისაგან. შემდგომში მიკრობზარების გახსნილ ზედაპირზე, მათი შეერთების მწვერვალზე, იწყება ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების ნაწილაკების (მოლეკულები, ატომები) მიზიდვა, რომლებიც ცდილობენ რა დაიკავონ არაკომპენსირებული ადგილები, ეკვრიან ზემოთხსენებულ ზედაპირებს, ისწრაფვიან მწვერვალისაკენ და წარმოქმნიან დამატებით ძაბვებს, დამატებულს გარე დატვირთვიდან გამოწვეულ ძაბვებზე. სწორედ ამის გამო ხდება მყარი სხეულის მიკრობზარებში ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებების მიერ გამხლეჩი მოქმედება. რაც საბოლოოდ მყარი სხეულის სიმტკიცის დაქვეითებას და დეფორმაციების გაადვილებას იწვევს. თუ გარე დატვირთვით გამოწვეული და ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებების გამხლეჩი მოქმედებით წარმოქმნილი ძაბვების ჯამი გადააჭარბებს მყარი სხეულის სიმტკიცის ზღვარს, მოხდება მყარი სხეულის რღვევა.

ყოველივე ეს ძალიან კარგად ჩანს აკად. ბ. დედიაგინის ცნობილ ცდაში: სოლით იხლიჩება მართკუთხა ქარსის ფირფიტა მისი დარჩილული ზედაპირის მხარეს, ფიქსირდება გახლეჩის სიგრძე და მის მწვერვალზე მიაქვთ მხოლოდ ერთი წვეთი წყალი, რის მოქმედების შედეგად გახლეჩის სიგრძე იზრდება 20-30%-ით [76].

დადგენილია, რომ ძაბვა წარმოქმნილი გახლეჩვის მწვერვალზე წყლის გამხლეჩი მოქმედებიდან (რომელიც ემატება სოლიდან წარმოქმნილ ძაბვას) განაპირობებს ფირფიტის გახლეჩის შესაბამის წაგრძელებას.

რეზინდერის ეფექტს, ე.ი. მყარი სხეულების სიმტკიცის კლებისა და დეფორმაციის გაადვილების ეფექტს, აქვს დიდი პრაქტიკული გამოყენება, კერძოდ მყარი მასივების დასანგრევად, გეოლოგიურ გათხრებში, ჭაბურღილების ბურღვისას და სხვა [73].

როგორც ცნობილია, მშრალი ბეტონი (ე.ი. ბეტონი, რომელშიც არ არის თავისუფალი წყალი), არ განიცდის ცოცვადობას, ხოლო ტენიანი ბეტონი განიცდის ინტენსიურ ცოცვადობას. ასევეა სხვა მასალებიც, რომელთა მიმართ წყალი ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებაა, მაგ. თაბაშირი, ქარსი, მინა, ქვა და ა.შ. მშრალ მდგომარეობაში არ განიცდიან, ხოლო ტენიან გარემოში კი განიცდიან ცოცვადობის დეფორმაციას [74, 75, 77-79]. ისეთი მასალა, როგორცაა ლითონი (ფოლადი), ჩვეულებრივ პირობებში (ნორმალური ტემპერატურის დროს), თუ მასზე არ მოქმედებს კონკრეტულად ამ მასალისათვის ზედაპირულად აქტიური ნივთიერება, კერძოდ წყალბადი, არ განიცდის ცოცვადობის დეფორმაციას, ხოლო წყალბადის მოქმედების დროს მუდმივ ტემპერატურაზე იგი ცოცავს [80].

ამგვარად თუ დაძაბულ მასალაზე მოქმედებს ზედაპირულად აქტიური ნივთიერება, მაშინ აკად. რეზინდერისა და მისი თანამშრომლების გამოკვლევებით, ეს ნივთიერება მასალის მიკროზაარებასა და მიკროწარმონაქმნებზე ან უფრო სწორად მის ახალწარმოქმნილ ზედაპირზე ადსორბციულ მოქმედებას ახდენს, რაც ძირითადად დაძაბული მასალის მიმართ ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების გამხლეჩ მოქმედებაში

გამოიხატება [73,81]. შესაბამისად წყლის ადსორბციული მოქმედება დაძაბულ ბეტონზე გამოიხატება მასში მიკრობზარებისა და მიკროწარმონაქმნების გახსნით, რაც ჩვენს წინაშე წარმოდგება ბეტონის დეფორმაციით დროში, ე.ი. ცოცვადობის სახით. ეს მოვლენა განსაკუთრებით ნათლად ვლინდება ცენტრალური გაჭიმვის დროს, თუმცა მას ადგილი მასალის ნებისმიერი დაძაბული მდგომარეობის დროსაც აქვს, გარდა ყოველმხრივი თანაბარი კუმშვისას. მაგალითად, ღერძული კუმშვის დროს მიკრობზარები და მიკროწარმონაქმნები თანდათანობით იხსნება, რომლებიც მოქმედი მკუმშავი ძალების პარალელურად არიან ორიენტირებულნი, ე.ი. ადგილი აქვს განივ გაჭიმვას, რასაც საბოლოოდ გრძივი მიმართულებით მასალის ცოცვადობისაკენ მივყავართ.

ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების მოქმედების შედეგად დეფორმაციების გაადვილებას აქვს ადგილი, რაც თავის მხრივ სიმტკიცის ზღვრის ნაადრევ მიღწევას იწვევს, ე.ი. მცირდება მასალის სიმტკიცე. ფაქტიურად ეს არის რეზინდერის ეფექტი, რომელსაც ზოგჯერ მასალის სიმტკიცის ადსორბციული კლების ან დეფორმაციების ადსორბციული გაადვილების ეფექტს უწოდებენ.

ზემოთ აღნიშნულიდან ნათლად ჩანს, რომ ბეტონის ცოცვადობა არის ზედაპირულად აქტიური ნივთიერების გამხლეჩი მოქმედების შედეგი, როცა ბეტონი იმყოფება დაძაბულ მდგომარეობაში.

ბეტონის ცოცვადობის ადსორბციული თეორიის მთავარი არსი იმაში მდგომარეობს, რომ ბეტონის ცოცვადობა წყლის ადსორბციული მოქმედების შედეგად ხდება და ბეტონის მიკრობზარებზე მისი გამხლეჩი მოქმედებით გამოიხატება.

მრავალი ავტორის [75,82-84] გამოკვლევის შედეგად დადგენილია, რომ განსაზღვრულ დაძაბულ მდგომარეობამდე წყლის ადსორბციული გავლენა დატვირთული მასალების მიკრობზარებსა და მიკროწარმონაქმნებში შექცევადი პროცესია. ცნობილია აგრეთვე, რომ მასალების ხანგძლივი წინაღობის ზღვრის მიღწევამდე მრავალი მასალა (მაგ. მინა, ქარსი, ხე და

ა.შ.) მუდმივი დატვირთვის მოქმედებით მხოლოდ დრეკად დეფორმაციას განიცდის, ე.ი. დროში შექცევად ცოცვადობის დეფორმაციას. პრაქტიკით და აგრეთვე სპეციალურად ჩატარებული ექსპერიმენტებით დადგენილია, რომ ბეტონის ცოცვადობა, თუ ძაბვა მასში არ აღემატება ხანგძლივი წინააღმდეგობის ზღვარს, მიღევადია. ბეტონის მიღებადი დეფორმაციის ბუნების განსაზღვრისათვის, თუ კერძოდ როგორ დეფორმაციასთან გვაქვს საქმე დროში შექცევად თუ შეუქცევადთან, მრავალ ავტორს აქვს ჩატარებული სპეციალური ექსპერიმენტული კვლევები [85-89].

ამრიგად, თუ ბეტონზე მუდმივი დატვირთვის მოქმედების შედეგად ბეტონში აღძრული ძაბვა არ აჭარბებს ხანგძლივი წინააღმდეგობის ზღვარს, მაშინ ბეტონის ცოცვადობის დეფორმაცია დროში შექცევადი და მიღევადია.

ექსპერიმენტებით დადგენილია, რომ წყალგაჟღენთილი ბეტონის ჭიმვის დეფორმაციის შეზღუდვით (არმირებით ან ხახუნით) ბეტონის სიმტკიცე გაცილებით იზრდება, ვიდრე მშრალი ბეტონის [94-96]. ამ დებულებას დიდი მნიშვნელობა აქვს ჰიდროტექნიკური რკინაბეტონის ნაკეთობებისათვის.

როგორც ადრე აღვნიშნეთ, ბეტონის შექცევადი ცოცვადობის ძირითადი მიზეზია წყლის ადსორბციული გავლენა, ბეტონის ბზარებსა და მიკრობზარებში წყლის გამხლეჩი მოქმედებით გამოხატული.

როგორც წესი, მსუბუქი ბეტონი დამზადებულია მსუბუქ ფოროვან შემვსებებზე, რომლებიც ატმოსფეროდან ყველა შემთხვევაში შთანთქავენ წყალს, თუ სპეციალურად არ არის იგი გამომშრალი. აქედან გამომდინარე, ბეტონის მსუბუქი შემვსებების მუდმივი ტენიანობა მათთვის დამახასიათებელია და იგი მიჩნეულია ბუნებრივ მდგომარეობად. წყალი მსუბუქი ბეტონის მსუბუქი შემვსებებისათვის ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებაა, ამიტომ რეზინდერის ეფექტის მიხედვით, ფორიანი შემვსებები ყოველთვის განიცდიან წყლის გამხლეჩ მოქმედებას, რაც მათ სიმტკიცეს ამცირებს და აიოლებს დეფორმაციებს. ფორიან შემვსებებზე წყლის ადსორბციულ - გამხლეჩი მოქმედების ზრდას ხელს უწყობს ის

ფიზიკური მოვლენები, რომლებიც აკად. ნ. მუსხელიშვილის თეორიის საფუძველზე უნდა ვლინდებოდეს ბეტონში. ბრტყელი ამოცანების (შესუსტებული ხვრელებით და მათში მოთავსებული ან დარჩილული ბირთვებით ან მათ გარეშე) დაძაბული მდგომარეობის გადაწყვეტისას აკად. ნ. მუსხელიშვილი თავის შრომებში მიუთითებდა იმ ფიზიკურ მოვლენებზე, რომლებიც შესაძლებელია მივუსადაგოთ ბეტონს და ავხსნათ მასში მიმდინარე პროცესები, კერძოდ აკად. ნ. მუსხელიშვილი ბრტყელ ამოცანას შემდეგნაირად განიხილავდა:

1. ფირფიტის ხვრელში უბრალოდ ჩადებული ბირთვი არ იწვევს ხვრელის გარშემო მაქსიმალური დაძაბულობის შემცირებას;
2. ბირთვი იმავე მასალისაგან, რაც ფირფიტა, დარჩილული ფირფიტის ხვრელში, შთანთქავს მაქსიმალურ დაძაბულობას და ფირფიტა მუშაობს როგორც უწყვეტი სხეული;
3. დარჩილული ბირთვის სიხისტის გაზრდით ფირფიტაში ძაბვათა კონცენტრაცია კლებულობს, ხოლო რაც უფრო ვიწროა ბირთვი, მით მეტია მასში დაძაბულობა;
4. ხისტი ბირთვის ფართობის გაზრდით მცირდება დაძაბულობა როგორც ბირთვში ისე ფირფიტაში;
5. შეიძლება შეირჩეს ისეთი საკმაოდ ხისტი ბირთვი, ხვრელიან ფირფიტაში დაძაბულობა იყოს გაცილებით ნაკლები, ვიდრე უწყვეტ ფირფიტაში.

ეს დებულებები გ. სავინის [97] ნაშრომში დაყვანილია რიცხობრივ შედეგებამდე. ზემოთქმული საშუალებას გვაძლევს, რომ ბეტონი წარმოვიდგინოთ, როგორც ცემენტის ქვა, რომლის სიცარიელებში დარჩილულია შემვსებები. ცხადია რაც უფრო სუსტია შემვსებები, მით ნაკლებია დაძაბულობა მასში და მით მეტია ძაბვის კონცენტრაციის გავლენა ცემენტის ქვაში და პირიქით. აქედან გამომდინარე, დაძაბულ ბეტონში დაძაბულობის შემსუბუქებისა და შემვსების სიმტკიცის კლების ერთ-ერთი მთავარი მიზეზი არის შემვსებისა და ცემენტის ქვის კონტაქტის ზონაში

მაზვის კონცენტრაცია, რომლის მაქსიმალური მნიშვნელობა საშიში მუშა კვების კონტურზე, გამჭიმავი ძალების პერპენდიკულარულად წარმოიქმნება. თუ ეს მოვლენა მძიმე ბეტონისათვის არ წარმოადგენს საშიშროებას მისი შემვსების მაღალი სიმტკიცის, მცირე დეფორმაციულობის და წყალშეუღწევადობის გამო, მსუბუქი ბეტონის ფორიანი შემვსებისათვის ამ მოვლენას გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს, რადგან შემვსების საშიში მუშა კვების კონტურზე მოქმედი მაქსიმალური ძაბვა შემვსებებში მიკრობზარების წარმოქმნას იწვევს, მათში იწყება წყლის გამხლეჩი მოქმედების ზრდა, რაც შემვსებისა და საერთოდ მსუბუქი ბეტონის სიმტკიცის დაქვეითებას და ცოცვადობის გაზრდას იწვევს. აქედან გამომდინარე, მსუბუქი ბეტონის სიმტკიცისა და დეფორმაციულობის თავისებურებები წყლის ძლიერი ადსორბციული მოქმედების შედეგია.

ცნობილია, რომ მსუბუქი ბეტონი ლითოიდურ პემზაზე ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებით მძიმე ბეტონებს უახლოვდებიან. იმის გამო, რომ მათი შემვსებები ფორების ნაწილობრივი ჩაკეტილობით გამოირჩევიან, ნთქავენ გაცილებით ნაკლებ წყალს, ამიტომ ამ ბეტონებს ნაკლებად აქვთ გამოხატული მსუბუქი ბეტონისათვის დამახასიათებელი თვისებები.

როგორც ზემოთქმულიდან ჩანს, მაღალი სიმტკიცის, მცირე დეფორმაციული და წყალშეუღწევადი მსუბუქი ბეტონის მისაღებად საჭიროა, რომ მსხვილი შემვსები, გარდა სხვა თანაბარი პირობებისა, იყოს მედეგი და მშრალი, ე.ი. არ შეიცავდეს და არ შთანთქავდეს წყალს. ყოველივე ამის დაცვა შესაძლებელია აფუებადი მასალების (მაგ. ნაცარმიწა, თიხა, ფიქალი) თერმული დამუშავებით ან მშრალი ფორიანი შემვსების დაფარვით მაღალი სიმტკიცის თხევადი პოლიმერული მასალებით, ან კიდევ შემკვრელად თხევადი გოგირდის გამოყენებით, რომლებიც გარდა იმისა, რომ ზრდიან შემვსების სიმტკიცესა და წყალშეუღწევადობას, უზრუნველყოფენ ერთ შემთხვევაში შემვსების ცემენტის ქვასთან შეჭიდულობის გაზრდას, ხოლო მეორე შემთხვევაში შემვსებების

ერთმანეთთან უწყლო შეჭიდულობას, რაც თავის მხრივ ხელს უწყობს შესაბამისი ბეტონების სიმტკიცის მატებას [98-100].

ამ გზით, აკად. ნ. მუსხელიშვილის თეორიის სრული შესაბამისობით, სავსებით შესაძლებელია მაღალი სიმტკიცის, წყალშეუღწევადი, აგრესიული გარემოს მიმართ მდგრადი ბეტონი მივიღოთ.

2.6. მსუბუქი ლეჩობეტონის შექმნის ექსპერიმენტული დასაბუთება

2.6.1. მსხვილი შემვსების მდგომარეობის გავლენა ბეტონის სიმტკიცესა და დეფორმაციულობაზე

ბეტონის სიმტკიცეზე, როგორც §2.5-ში არის აღნიშნული დიდ გავლენას ახდენს მსხვილი შემვსების ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები. ამიტომ ისეთი ცდები დავგეგმეთ, რომ შეგვესწავლა მსხვილი შემვსების მდგომარეობის გავლენა ბეტონის სიმტკიცეზე, დეფორმაციულობასა და ხანმდეგობის მახასიათებლებზე. ბეტონი დამზადდა: მძიმე, მსუბუქი, წყლით და 2%-იანი CaCl_2 ხსნარით გაჟღენთილი და მძიმე და მსუბუქი პოლიმერლეჩობეტონით დაფარული მშრალ, მსხვილ შემვსებზე.

ბეტონის მთავარ მახასიათებელს წარმოადგენს მისი სიმტკიცე კუმშვაზე, რომელიც ნაგებობის დაპროექტებისას მხედველობაში მიიღება.

ჩვენი ამოცანა იყო შეგვექმნა ისეთი ბეტონი, რომელსაც მაღალი სიმტკიცისა და დეფორმაციულობის მაჩვენებელი ექნებოდა, როგორც გაჭიმვაზე, ასევე კუმშვაზე და ღუნვაზე. ჩვენთვის ცნობილი იყო, რომ ცემენტ-პოლიმერულ ბეტონებს სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე არა აქვთ უფრო მეტი ჩვეულებრივ ცემენტზე დამზადებულ ბეტონთან შედარებით. ჩვენი კვლევის მიზანი მარტივი და ნათელი იყო, რადგან ლეჩო ფორიან შემვსებებს იცავს წყლის გამხლეჩი ზემოქმედებისაგან და ამით ზრდის მის სიმტკიცეს, შესაბამისად გაიზრდება შეჭიდულობა ცემენტის ქვასა და შემვსებს შორის, რომელიც გამყარების დაწყებამდე დაფარულია ლეჩოთი.

ამავე დროს, ამ მოსაზრებას აქვს მყარი საფუძველი, რისთვისაც ჩვენს მიერ ჩატარებული იქნა კვლევები ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცისა და დეფორმაციულობის დასადგენად, ცენტრალური ხანმოკლე კუმშვის დროს.

როგორც ყველა ბეტონი, ასევე პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცეც მატულობს დროთა განმავლობაში. ამ მიმართებით ჩვენს მიერ ჩატარებული იქნა ექსპერიმენტალური ცდები შენახვის სხვადასხვა პირობების გათვალისწინებით.

დავამზადეთ 96 ბეტონის კუბი, ზომებით 10X10X10 სმ. მათ შორის 33 ცალი მძიმე ბეტონის, 33 ცალი პოლიმერლექობეტონის, 15 ცალი ტუფობეტონის და 15 ცალი მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის. აღნიშნული ბეტონის შემადგენელი მასალები და შედგენილობები მოყვანილია ცხრილში 2. 20.

შემკვრელად ყველა სახის ბეტონისათვის გამოიყენებოდა რუსთავის წიდაპორტლანდცემენტი მარკით 400. მძიმე ბეტონის შემვსებად გამოვიყენეთ წვრილი და მსხვილი შემვსებები წიწამურის კარიერიდან, მაქსიმალური სიდიდით 20 მმ, ხოლო მსუბუქი ბეტონის შემვსებად წალკის საბადოს წვრილი და მსხვილი ტუფი, მაქსიმალური სიდიდით 20 მმ. კუბები დავამზადეთ ხის ყალიბებში ლაბორატორიულ ვიბრომაგიდაზე. განყალიბება მოხდა დამზადებიდან ორი დღე-ღამის შემდეგ. კუბების შენახვის პირობები შემდეგნაირი იყო:

1. მძიმე ბეტონის 33 კუბიდან 18 მოვათავსეთ წყალში, დანარჩენი 15 ბუნებრივ მშრალ გარემოში. 18 კუბიდან 3 კუბი 4 თვის განმავლობაში ინახებოდა წყალში, ხოლო 3 თვის განმავლობაში ბუნებრივ მშრალ გარემოში.

2. მძიმე პოლიმერლექობეტონის 33 კუბისათვის წინა შემთხვევის ანალოგიური შენახვის პირობები იყო.

ბეტონის შემადგენელი მასალები და შედგენილობები

№	ბეტონის სახე	1მ ³ ბეტონის შედგენილობა						წყალცემენტის ფარდობა	„სტროიცილის“ კონუსით ტერადობა	ვიზრაცია, წმ
		ცემენტი, კგ	ლორდი (5-20), მმ	ქვიშა (0-5) მმ, კგ	წყალი, ლ	ჰა-5	გამამყარებელი			
1	მძიმე ბეტონი	300	1100	800	180	-	-	0,5	3	30
2	მძიმე პოლიმერბეტონი	300	1100	800	120	15	0,15	0,4	3	30
3	ტუფობეტონი	400	507	605	300	-	-	0,75	3	30
4	მსუბუქი პოლიმერლექობეტონი	400	507	605	160	30	0,3	0,4	3	30

3. მსუბუქი ბეტონისა და მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის შენახვის პირობები იყო- ბუნებრივი მშრალი გარემო.

სიმტკიცის ზღვრის დასადგენად კუბები კუმშვაზე გამოიცადნენ ერთი, ორი, ოთხი, ექვსი და შვიდი თვის ასაკში. თითო სერიაში 3-3 კუბი. გამოცდის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 2.21. ნახაზე 2.6. აგებულია სხვადასხვა შედგენილობის და შენახვის პირობების მქონე ბეტონის კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვრის გასაშუალებელი მნიშვნელობის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკები.

ცხრილი 2.21. ანალიზი შემდეგი სახის დასკვნების გაკეთების საშუალებას გვაძლევს:

შენახვის პირობები პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცეზე და დეფორმაციულობაზე მხოლოდ გამყარების სტადიაში (1-2 თვის ასაკში) ახდენს მნიშვნელოვან გავლენას. პოლიმერლექობეტონის შენახვის უკეთესი პირობაა ბუნებრივად მშრალი გარემო, ხოლო ცუდია წყალში შენახვა (რადგან წყალი ხელს უშლის პოლიმერის გამყარებას). კომბინირებული

შენახვა (4 თვე წყალში და 3 თვე ბუნებრივ-მშრალ გარემოში) სიმტკიცის ზრდას იწვევს. პოლიმერლექობეტონის შემვსების სიმტკიცე არსებით გავლენას არ არ ახდენს პოლიმერლექობეტონის საბოლოო სიმტკიცეზე. ჩვეულებრივი მძიმე ბეტონისა და მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცეებს შორის სხვაობა უმნიშვნელოა.

დავამზადეთ 18 პრიზმი ზომებით 10X10X30 სმ, რომელთაგან 6 ნიმუში დამზადებული იყო წყლით გაჯერებულ შემვსებზე, 6 ნიმუში 2% CaCl₂ ხსნარით გაჯერებულ შემვსებზე, რადგან CaCl₂ შევსებით ძლიერი მოქმედების ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებაა, კიდევ 6 პრიზმი კი ეპოქსიდის ფისით დაფარულ მშრალ ღორღზე.

მასალები, დამზადების თანმიმდევრობა და შენახვის წესი ისეთივე იყო, როგორც გაჭიმვაზე ჩატარებულ ცდებში.

პრიზმები გამოვცადეთ 3 თვის ასაკში.

დავამზადეთ აგრეთვე ტუფობეტონის კუბები. 6 ცალი ზომებით 15X15X15 სმ, 12 ცალი ზომებით 10X10X30 სმ. დამზადებული ნიმუშებიდან ნახევარი ეპოქსიდის ფისით დაფარულ ტუფოვან ღორღზე, ხოლო მეორე ნახევარი ბუნებრივ ღორღზე.

ბეტონის შემადგენელი მასალები, დამზადების წესი და შენახვის პირობები იგივე იყო, რაც შესაბამის ცდებში გაჭიმვის დროს.

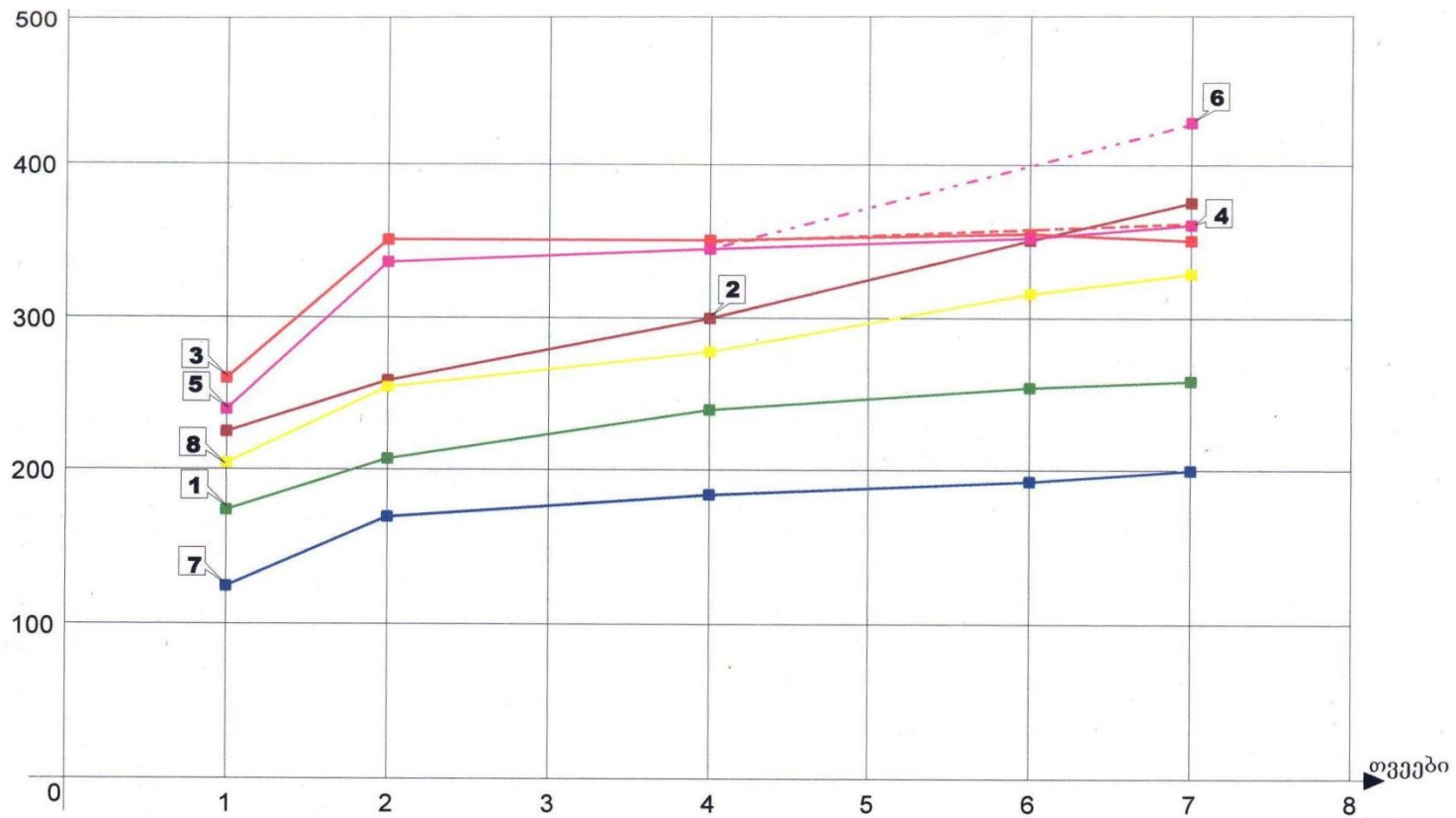
ბეტონის კუბების ზომით 10X10X30 სმ შენახვის წესი შემდეგი იყო:

ბუნებრივ ღორღზე დამზადებული ბეტონი ინახებოდა სარეჟიმო ოთახში სტანდარტულ პირობებში, ხოლო პოლიმერლექობეტონის ნიმუშები ჰაერ-მშრალ მდგომარეობაში. ბეტონის ნიმუშები გამოვცადეთ კუმშვაზე 1 თვის ასაკში.

ტუფობეტონის კუბები ზომებით 10X10X30 სმ დამზადების შემდეგ ინახებიდნენ სარეჟიმო ოთახში და თვენახევრის შემდეგ 3 ცალი გამოვცადეთ ღერძულ კუმშვაზე, ხოლო სარეჟიმო ოთახში დარჩენილი 3 კუბი გამოვცადეთ 2 თვის ასაკში. პოლიმერლექობეტონის

შენახვის პირობების გავლენა ბეტონისა და პოლიმერლერბეტონის სიმტკიცეზე

№	ბეტონის სახე, შენახვის პირობები	ბეტონის სიმტკიცის ზღვარი ასაკის მიხედვით																			
		1 თვის				2 თვის				4 თვის				6 თვის				7 თვის			
		R ₁	R ₂	R ₃	R _{საშ}	R ₁	R ₂	R ₃	R _{საშ}	R ₁	R ₂	R ₃	R _{საშ}	R ₁	R ₂	R ₃	R _{საშ}	R ₁	R ₂	R ₃	R _{საშ}
1	მძიმე ბეტონი ბუნებრივ-მშრალი	190	160	175	175	202	220	202	208	235	235	250	240	250	250	260	255	270	255	250	258
2	მძიმე პოლიმერლერბეტონი ბუნებრივ-მშრალი	225	215	235	225	268	243	268	258	285	302	315	300	355	325	365	350	365	370	390	375
3	მძიმე ბეტონი წყალში	265	250	265	260	341	352	357	350	345	350	355	350	358	354	358	355	340	350	360	350
4	მძიმე ბეტონი 4 თვე წყალში და 3 თვე ბუნებრივ-მშრალ გარემოში																	360	350	370	360
5	მძიმე პოლიმერლერბო- ბეტონი წყალში	245	245	230	240	328	329	344	336	337	346	352	345	365	347	359	352	350	360	370	360
6	მძიმე პოლიმერლერბო- ბეტონი 4 თვე წყალში და 3 თვე ბუნებრივ-მშრალ გარემოში																	430	423	430	428
7	მსუბუქი ბეტონი ბუნებრივ-მშრალ გარემოში	120	124	132	125	170	165	175	170	182	187	184	185	202	185	193	194	200	186	214	200
8	მსუბუქი პოლიმერლერბო- ბეტონი ბუნებრივ-მშრალ გარემოში	203	223	190	205	248	241	255		248	265	268		270	295	290		300	300	328	328



ნახ.2.6. კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვრის გასაშუალებული მნიშვნელობები სხვადასხვა შედგენილობის და შენახვის პირობების ბეტონისათვის:

1. მძიმე ბეტონი ბუნებრივ-მშრალ გარემოში; 2. მძიმე პოლიმერლერო-ბეტონი ბუნებრივ-მშრალ გარემოში; 3. მძიმე ბეტონი წყალში; 4. მძიმე პოლიმერლერო-ბეტონი წყალში; 5. მძიმე პოლიმერლერო-ბეტონი წყალში; 6. მძიმე პოლიმერლერო-ბეტონი 4 თვე წყალში და 3 თვე ბუნებრივ-მშრალ გარემოში; 7. მსუბუქი ბეტონი ბუნებრივ-მშრალ გარემოში; 8. მსუბუქი პოლიმერლერო-ბეტონი ბუნებრივ-მშრალ გარემოში.

კუბები ბუნებრივ მშრალ გარემოში შევინახეთ 14 დღე-ღამე, ხოლო შემდეგ სარეჟიმო ოთახში მოვათავსეთ თვენახევრის მანძილზე. ამასთან ნახევარი გამოვცადეთ ღერძულ კუმშვაზე, ხოლო მეორე ნახევარი ორი თვის ასაკამდე ბუნებრივ-მშრალ გარემოში იმყოფებოდა, რის შემდეგაც კუმშვაზე გამოვცადეთ.

გამოცდის მეთოდისა

თითო ჯგუფიდან 3 ცალი ნიმუში გამოვცადეთ მრღვევი დატვირთვის დასადგენად კუმშვის დროს, დარჩენილი 3 ცალი კი კუმშვაზე დრეკადი დეფორმაციების გაზომვით. დეფორმაციის გაზომვა ხდებოდა გუგენბერგერის სისტემის ორი ბერკეტული ტენზომეტრით, განლაგებული ორ მოპირდაპირე წახნაგზე, შუაში, ბაზით 10 სმ.

ნიმუშების გამოცდა საფეხურებრივად წარმოებდა.

გამოცდის შედეგები

გამოცდის შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.22-2.24.

ცხრილი 2.22.

წყლით გაჯერებული შემსვებით დამზადებული ტუფობეტონის ნიმუშების დეფორმაციები კუმშვის დროს

ძაბვა, კგ/სმ ²	I ნიმუში			II ნიმუში			III ნიმუში		
	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$
	t ₁	t ₂		t ₁	t ₂		t ₁	t ₂	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	40	10	25	20	33	26	50	10	30
80	80	48	65	45	80	62,5	75	30	52,5
120	105	83	85	67	115	91	110	50	80
160	130	120	125	85	157	121	150	90	120
200	160	160	160	113	200	157	200	140	170
240	190	200	195	140	240	190	-	-	-

ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი, კგძ/სმ²: R₁=240, R₂=240, R₃=220.

კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარი ხანმოკლე დატვირთვის დროს, კგძ/სმ²: R₄=250, R₅=255, R₆=252.

საკონტროლო კუბების ზომებით 15X15X15სმ, სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგძ/სმ²: R₁=260, R₂=268, R₃=276.

ცხრილი 2.23.

კალციუმქლორიანი ხსნარით გაჟღენთილი შემვსებით დამზადებული ტუფობეტონის, ზომებით 10X10X30 სმ, ნიმუშების დეფორმაციები კუმშვის დროს

ძაბვა, კგ/სმ ²	I ნიმუში			II ნიმუში			III ნიმუში		
	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$
	t ₁	t ₂		t ₁	t ₂		t ₁	t ₂	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	40	40	40	27	80	44	50	45	47
80	80	95	88	70	120	95	90	90	90
120	145	145	145	130	160	145	140	134	137
140	185	175	180	175	180	177	180	182	181
150	-	-	-	210	220	215	-	-	-

ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი, კგ/სმ²: R₁=140, R₂=150, R₃=140.

კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარი ხანმოკლე დატვირთვის დროს, კგ/სმ²: R₄=180, R₅=175, R₆=168. საკონტროლო კუბების ზომებით 15X15X15 სმ, სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგ/სმ²: R₁=205, R₂=200, R₃=212.

ცხრილი 2.24.

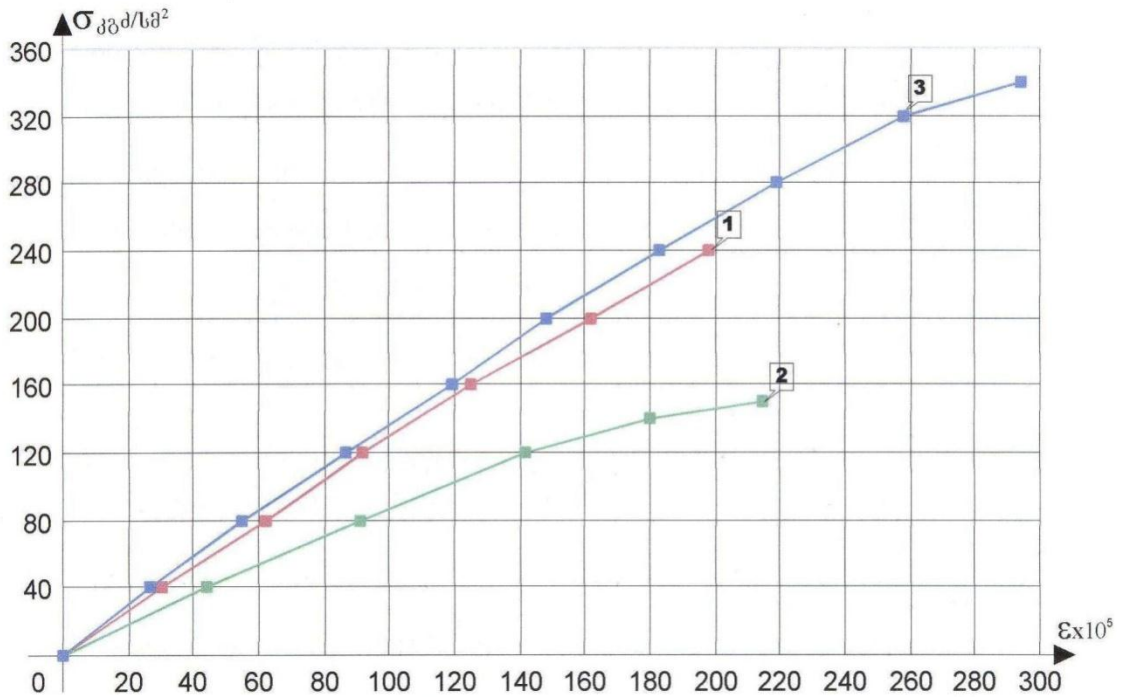
პოლიმერლენობეტონის, ზომებით 10X10X30 სმ, ნიმუშების დეფორმაციები კუმშვის დროს

ძაბვა, კგ/სმ ²	I ნიმუში			II ნიმუში			III ნიმუში		
	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$
	t ₁	t ₂		t ₁	t ₂		t ₁	t ₂	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	15	40	28	20	29	25	37	19	28
80	40	65	52	55	54	54,5	54	60	57
120	70	105	87	87	77	82	74	110	92
160	100	140	120	127	100	113	97	150	124
200	130	156	143	167	130	150	115	190	152
240	165	192	183	197	160	180	140	230	185
280	210	226	218	235	195	215	180	270	225
320	250	250	250	270	240	255	195	305	252
340	280	320	300	285	290	288	225	325	295

ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი, კგ/სმ²: R₁=340, R₂=340, R₃=340.

კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარი ხანმოკლე დატვირთვის დროს, კგ/სმ²: R₄=350, R₅=355, R₆=360. საკონტროლო კუბების ზომებით 10X10X10 სმ, სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგ/სმ²: R₁=508, R₂=480, R₃=520.

ნახაზზე 2.7. მოცემულია ბეტონის კუმშვაზე მუშაობის განზოგადებული მრუდები, ერთ შემთხვევაში წყლით გაჯერებული შემვსებით დამზადებულ ტუფობეტონზე, მეორე შემთხვევაში 2% კალციუმქლორიდის ხსნარით გაჯერებული შემვსებით დამზადებულ ტუფობეტონზე, ხოლო მესამე-პოლიმერლერობეტონზე.



- ნახ.2.7. ტუფობეტონისა და პოლიმერლერობეტონის ნიმუშების გასაშუალებული დეფორმაციები ცენტრალური კუმშვის დროს:
1. ტუფობეტონის წალკის საბადოს წყლით გაჯერებული ტუფის ღორღით და ქვიშით;
 2. ტუფობეტონი CaCl_2 ხსნარით გაჯერებული წალკის ტუფის შემვსებით;
 3. პოლიმერლერობეტონი ეპოქსიდური ფისით დაფარული წალკის საბადოს ტუფის ღორღზე და ტუფის ქვიშაზე;

ცხრილებისა და გრაფიკის ანალიზიდან ჩანს, რომ ჩვენს ცდებში პოლიმერლერობეტონის პრიზმების სიმტკიცე 2,5-ჯერ, ხოლო ზღვრული კუმშვადობა 2-ჯერ მეტია, ვიდრე წყლით გაჯერებული შემვსებით დამზადებულ ბეტონზე, ამავე დროს სიმტკიცე 3-ჯერ, ხოლო ზღვრული კუმშვადობა 1,5-ჯერ მეტია, ვიდრე კალციუმქლორიანი ხსნარით გაჯერებული შემვსებით დამზადებულ ბეტონზე.

2.6.2. მსუბუქი ბეტონისა და წყლითა და CaCl₂ ხსნარით გაჟღენთილ შემვსებზე დამზადებული პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცე და დეფორმაციულობა ცენტრალური გაჭიმვის დროს

ცნობილია, რომ ბეტონის, როგორც სამშენებლო მასალის ძირითადი ნაკლია დაბალი სიმტკიცის ზღვარი და ზღვრული წაგრძელება გაჭიმვის დროს. ბეტონის მცირე ზღვრული ჭიმვადობა ეკონომიური რკინაბეტონის კონსტრუქციების დამზადების საშუალებას არ იძლევა, რომლებშიც არ იქნება დაშვებული ბზარების წარმოქმნა. ამავ დროს არმატურის გამოყენების დაბალი ხარისხი ბეტონის ზღვრული ჭიმვადობის პირდაპირპროპორციულია. ე.ი. რაც მეტია ბეტონის ზღვრული წაგრძელება, მით მეტია რკინაბეტონში არმატურის გამოყენების ხარისხი.

ზემოთქმულიდან გამომდინარე ვასკვნით, რომ შემოთავაზებულ პოლიმერლექობეტონს, გარდა სხვადასხვა დადებითი თვისებებისა, აუცილებელია ჰქონდეს მაღალი სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვის დროს, გაზრდილი ზღვრული ჭიმვადობა და დაბალი დეფორმაციულობა ერთი და იგივე დატვირთვების დროს.

აღნიშნული თვისებების დასადგენად პოლიმერლექობეტონის პრიზმებზე ჩატარდა ცდები გაჭიმვაზე; პოლიმერლექობეტონის და ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონის ფოროვან შემვსებად გამოვიყენეთ წალკის ტუფი.

ცხრილი 2.25.

ტუფის ქვიშის ნაყარი მოცულობითი მასა

ფრაქცია, მმ	საცრებზე დარჩენილი ქვიშის მასა, %
5-2,5	8,0
2,5-1,2	12,6
1,2-0,6	17,5
0,6-0,3	21,4
0,3-0,15	24,5
< 0,15	16
	100%

დავამზადეთ და გამოვცადეთ რვიანები, ზომებით 10X10X70 სმ. ბეტონი მზადდებოდა წალკის საბადოს ტუფის ღორღზე ფრაქციით 5-20 მმ და 5მმ

საცერში გაცრილ ტუფის ქვიშაზე. ტუფის ქვიშის ნაყარი მოცულობითი მასა (ფრაქცია 0-5 მმ) - 950 კგ/მ³, ქვიშის სიმტკიცე (ფრაქცია 0-5 მმ) – 2,68 გ/სმ³.

ცხრილი 2.26.

ტუფის ღორღის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლები

გამოცდის სახე	განზომილება	ღორღის ფრაქციები, მმ	
		5-10	10-20
შემვსების ნაყარი მოცულობითი მასა	კგ/მ ³	450	400
შემვსების მარცვალთშორისი სიცარიელების მოცულობა	%	48,5	49
შემვსების მარცვლების ფორიანობა	%	20,7	19,2
შემვსების წყალშთანთქმა მასით	%	20,7	19,2
შემვსების სიმტკიცე ცილინდრში კუმშვისას	კგ/სმ ²	16,8	16,7

შემკვრელად გამოიყენებოდა პორტლანდცემენტი მარკით 500, რუსთავის ცემენტის ქარხნიდან.

დავამზადეთ იყო 14 ცალი საცდელი ნიმუში - რვიანები ზომებით 10X10X70 სმ. მათგან 7 ნიმუში წყლით გაჟღენთილი შემვსებით (რომელიც წინასწარ იყო გამომშრალი), ხოლო დანარჩენი 7-კალციუმქლორის (CaCl₂) ხსნარით გაჯერებული შემვსებით. 1მ³ ტუფობეტონის შედგენილობა მოცემულია ცხრილში 2.27.

გამოცდის მეთოდიკა

თითო ჯგუფიდან 3-3 ნიმუში გამოიცადა მრღვევი გამჭიმავი დატვირთვის დასადგენად, ხოლო დანარჩენი გრძივი დეფორმაციების გაზომვით გაჭიმვის დროს. დეფორმაციები გაიზომა გუგენბერგერის სისტემის 2 ბერკეტული ტენზომეტრით, განლაგებული ნიმუშის მოპირდაპირე წახნაგზე, შუაში, ბაზით 10 სმ.

ნიმუშების დატვირთვა საფეხურებრივად წარმოებდა.

გამოცდის შედეგები

გამოცდის მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.28, 2.29. და ნახაზზე 2.8.

ცხრილების და გრაფიკების ანალიზიდან ჩანს, რომ წყლით გაჯერებული ნიმუშების სიმტკიცე 1,5-ჯერ მეტია, ხოლო დეფორმაციულობა 1,5-ჯერ ნაკლები

(ერთნაირი დატვირთვის შემთხვევაში), ვიდრე 2% CaCl₂ ხსნარით გაჯერებული ნიმუშებისა.

ცხრილში 2.27.

1^ბ ტუფობეტონის შედგენილობა

№	ბეტონის დასახელება	ცემენტი, კგ	ქვიშა 0-5 მმ, კგ	ლორი 5-10მმ, კგ	ლორი 10-20მმ, კგ	* წყალი, ლ	გამომშრალი ბეტონის მოცულობითი მასა, კგ/მ ³	წყალცემენტის ფარდობა	ბერადობა სტროიცილის კონუსით, სმ
1	ტუფობეტონის წყლით გაჯერებული შემვსებით	400	605	302	265	340 (240)	1680	0,85	1
2	ტუფობეტონის CaCl ₂ გაჯერებული შემვსებით	400	605	302	265	340 (240)	1680	0,25	1

*შენიშვნა: ფრჩხილებში მოცემულია მსხვილი შემვსების მიერ შთანთქმული წყლისა და CaCl₂ ხსნარის რაოდენობა.

ცხრილი 2.28.

ტუფობეტონის რვიანების დეფორმაციები ცენტრალურ გაჭიმვაზე, ზომებით 10X10X70 სმ და წალკის საბადოს წყლით გაჟღენთილ შემვსებზე

ძაბვა, კგ/სმ ²	I ნიმუში			II ნიმუში			III ნიმუში			IV ნიმუში		
	ტენზომეტრის ჩვენება			ტენზომეტრის ჩვენება			ტენზომეტრის ჩვენება			ტენზომეტრის ჩვენება		
	t1	t2	t _{საშ}	t1	t2	t _{საშ}	t1	t2	t _{საშ}	t1	t2	t _{საშ}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1,5	2	1,7	1,5	2	1,7	1	2	1,5
4	3	3,5	3,2	3	4	3,5	3	3,5	3,2	3	4	3,5
6	5	4,5	4,7	4,5	5	4,7	4	5	4,5	5	6	5,5
8	7	6	6,5	5	6,5	5,7	5	6,5	5,8	6	8	7
10	8,5	7	7,7	6,5	8	7,2	7	8	7,5	8	10	9
12	10	8,5	9,2	8,5	10	9,2	8	10	9	9,5	12,5	10,5
13	11	9,5	10,2	9,5	10,5	10,5	8,5	11	9,8	11	13	12
14	12	11	11,5	10,5	11,5	11	9	12	10,5	12,5	14	13,2
14,5				13	13	13	10	12,5	11,7			
15							11,5	12,8	12,2			
15,5							13	13,2	13,1			

ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვის დროს, კგ/სმ²: Rp₁=14; Rp₂=14,5; Rp₃=15,5; Rp₄=14.

გაჭიმვაზე სიმტკიცის ზღვარი, ხანმოკლე გაჭიმვის დროს, კგ/სმ²: Rp₅=17, Rp₆=17,5; Rp₇=16; R₄=22; R₅=26; R₆=24.

საკონტროლო კუბების, ზომებით 15X15X15 სმ, სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგ/სმ²: R₁=180, R₂=195, R₃=185.

ცხრილი 2.29.

ტუფობეტონის რვიანების დეფორმაციები ცენტრალურ გაჭიმვაზე, ზომებით 10X10X70 სმ და წალკის საბადოს CaCl₂ ხსნარით გაჟღენთილ შემსვებზე

ძაბვა, კგ/სმ ²	I ნიმუში			II ნიმუში			III ნიმუში			IV ნიმუში		
	ტენზომეტრის ჩვენება			ტენზომეტრის ჩვენება			ტენზომეტრის ჩვენება			ტენზომეტრის ჩვენება		
	t ₁	t ₂	t _{საშ}	t ₁	t ₂	t _{საშ}	t ₁	t ₂	t _{საშ}	t ₁	t ₂	t _{საშ}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	2	1,5	1,8	1,7	1,5	2	2	2	2,5	2,3
4	4	4	4	3,5	3,5	3,5	3,5	4,5	4	3,5	4	3,7
6	6	5,5	5,7	5	4,5	4,8	5	7	6	5	6	5,5
8	8	7,5	7,7	7	6	6,5	6	9	7,5	7	8	7,5
9	9	9	9	8,5	7,5	8	7,5	10,5	9	8	9	8,5
10	10,5	12	11,5	9,5	8,5	9	9	13	11	9	12	10,5
11				10,5	10	10,2	11	15	13	13	13	13
11,5				12	12	12						

ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე, კგ/სმ²: Rp₁=10,2; Rp₂=11,5; Rp₃=11; Rp₄=10,5.

გაჭიმვაზე სიმტკიცის ზღვარი, ხანმოკლე გაჭიმვის დროს, კგ/სმ²: Rp₅=13, Rp₆=12, Rp₇=11, R₄=22, R₅=26, R₆=24.

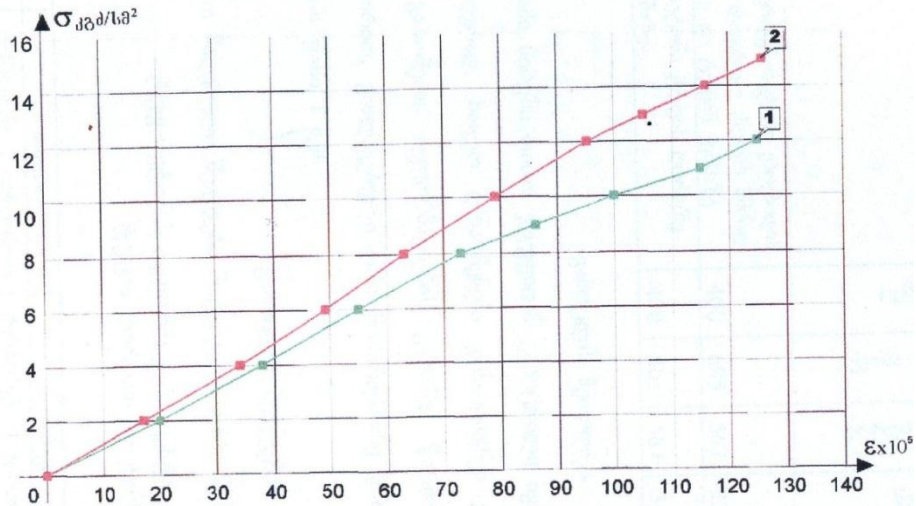
საკონტროლო კუბების, ზომებით 15X15X15 სმ, სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგ/სმ²: R₁=130; R₂=145; R₃=140.

1მ³ პოლიმერლექობეტონისა და მსუბუქი ბეტონის შედგენილობა მოცემულია ცხრილში 2.30.

პრიზმები დავამზადეთ ხის ყალიბებში ლაბორატორიულ ვიბრომაგიდაზე, ვიბრაციის ხანგრძლივობით 30 წმ. განყალიბება მოხდა დამზადებიდან ორი დღელამის შემდეგ. ტუფობეტონის პრიზმები ინახებოდა სარეჟიმო ოთახში,

ხოლო პოლიმერლექობეტონის პრიზმები 2 კვირის განმავლობაში ჰაერ-მშრალ გარემოში, შემდეგ კი სარეჟიმო ოთახში სტანდარტულ პირობებში.

თვენეხევრის ასაკში პრიზმები გამოიცადა ცენტრალურ გაჭიმვაზე.



ნახ.2.8. ტუფობეტონის რვიანების გასაშუალებული დეფორმაციები ცენტრალურად გაჭიმვის დროს:

1. ტუფობეტონი წალკის საბადოს CaCl₂ ხსნარით გაჟღენთილ შემცვლებზე;
2. ტუფობეტონი წალკის საბადოს წყლით გაჟღენთილ შემცვლებზე.

ცხრილი 2.30.

1მ³ პოლიმერლექობეტონისა და მსუბუქი ბეტონის შედგენილობა, დამზადებული წალკის საბადოს ტუფოვან შემცვლებზე

№	ბეტონის დასახელება	ცემენტი, კგ	ქვიშა 0-5 მმ, კგ	ღორი 5-10მმ, კგ	ღორი 10-20მმ, კგ	* წყალი, ლ	ეპოქსიდის ფისი 3D - 5, კგ	გამომშრალი ბეტონის მოცულობითი მასა, კგ/მ ³	წყალცემენტის ფარდობა	ძვრადობა სტროიცილის კონუსით, სმ
1	პოლიმერლექობეტონი ეპოქსიდის ფისით დაფარულ ტუფის მშრალ ღორლზე და ტუფის ქვიშაზე	400	605	302	567	132	1680	1652	0,33	1
2	ტუფობეტონი ტუფის ღორლზე და ქვიშაზე	400	605	302	567	340	1680	1652	0,85	1

გამოცდის მეთოდიკა

სამ-სამი ნიმუში თითო ჯგუფიდან გამოიკადა მრღვევი გამჭიმავი ძალვის განსაზღვრისათვის, ხოლო დანარჩენები გაჭიმვაზე გრძივი დეფორმაციების გაზომვით. დეფორმაციები ორი საათური ტიპის ინდიკატორით გაიზომა, რომლებიც ორ მოპირდაპირე წახნაგზე, შუაში, ბაზით 15 სმ იყვნენ განლაგებულნი. დანაყოფის ფასი 1 მკმ.

გამოცდის შედეგები

გამოცდით მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.31., 2.32. და ნახაზზე 2.9.

ცხრილი 2.31.

ტუფობეტონის დეფორმაციები ცენტრალურ გაჭიმვაზე ტუფის ღორლით და ქვიშით

მაზვა, კგ/სმ ²	I ნიმუში			II ნიმუში			III ნიმუში		
	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	t_2		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$
	t_1	t_2		t_1	t_2		t_1	t_2	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	5	5	3,3	7	4	3,7	8,5	3,5	4
8	9	10	6,8	12	7	6,3	15	10	9
12	16	14	10	18,5	19,5	9,3	23	16	13
14	21	17	12,6	22	14	12	32	20	16
16	23	20	14,5	26	16	14	40	25	21
17	30	27	18,5	33	23	18,5			

ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე, კგძ/სმ²: $R_{p1}=17$, $R_{p2}=17$, $R_{p3}=16$,

სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე ხანმოკლე დატვირთვის დროს, კგძ/სმ²: $R_{p4}=18$, $R_{p5}=18,5$, $R_{p6}=17,8$.

10X10X10 სმ ზომების საკონტროლო კუბების სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგძ/სმ²: $R_1=230$, $R_2=220$, $R_3=230$.

ტუფობეტონის დეფორმაციები ცენტრალურ გაჭიმვაზე ეპოქსიდური ფისით დაფარული ტუფის ღორღზე და ტუფის ქვიშაზე

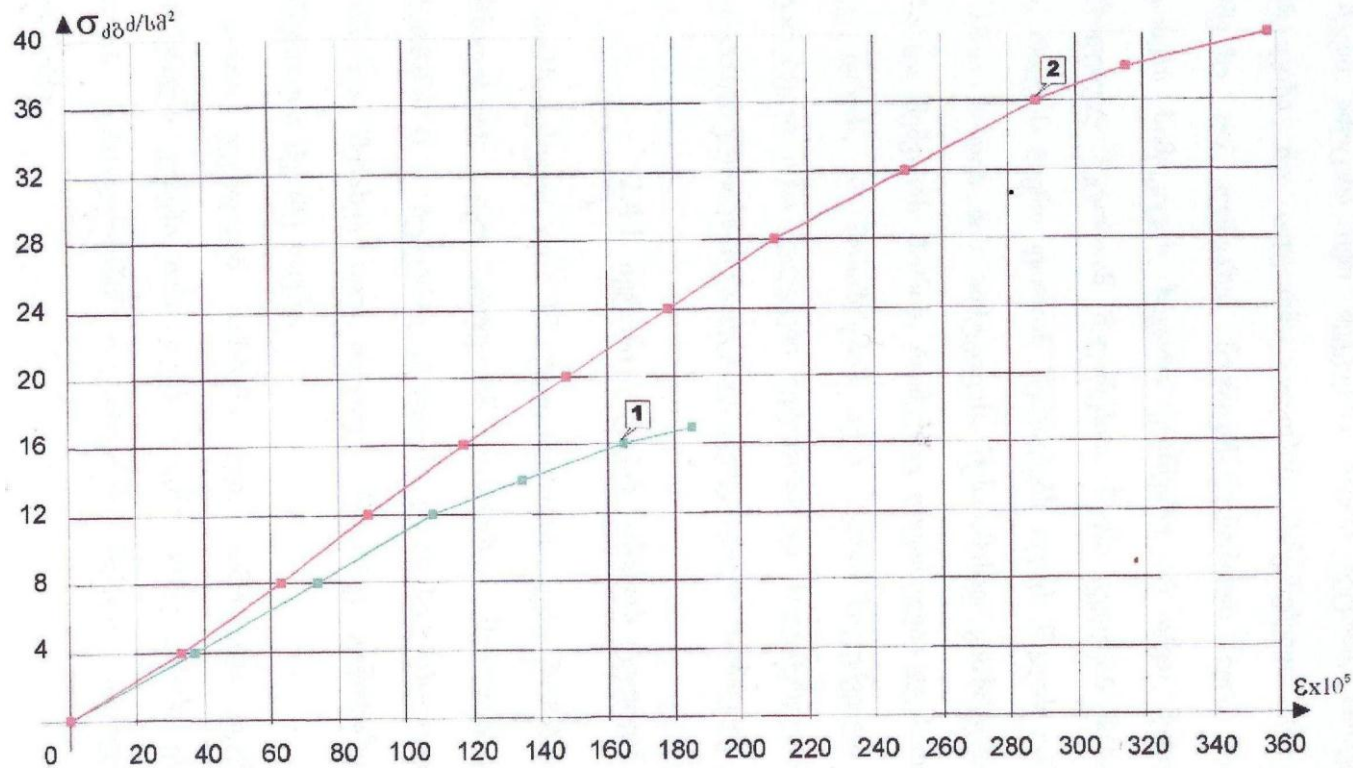
ძაბვა, კგ/სმ ²	I ნიმუში			II ნიმუში			III ნიმუში		
	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$	ტენზომეტრის ჩვენება		ფარდობითი დეფორმაცია, $\varepsilon \cdot 10^{-5}$
	t ₁	t ₂		t ₁	t ₂		t ₁	t ₂	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2	5	2,3	5,5	6	3,8	6	2	3,7
8	4	11	5	10	14	8	13	5	6
12	6	16	7	14	19	11	17	7	9,6
16	9	22	10,2	17,5	23	13,8	23	9,5	11
20	12	28	13,5	20	20	16,5	31,2	12	14,3
24	15	36	17	23,5	38	20,5	37	15	17,3
28	18	44	20	28	41	23	43	17	20
32	22	52	24	29	51	27	50	21	23,7
36	26	62	28	40	54	31,5	57	25	27
38	31	68	33	35	68	34	62	31	31
40				38	72	36	68	38	35,3

ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე, კგ/სმ²: Rp₁=39, Rp₂=40, Rp₃=40.

სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე ხანმოკლე დატვირთვის დროს, კგ/სმ²: Rp₄=42, Rp₅=41, Rp₆=42,5.

10X10X10 სმ ზომების საკონტროლო კუბების სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგ/სმ²: R₁=420, R₂=452, R₃=450.

ცხრილების და გრაფიკების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ პოლიმერლექობეტონს გაჭიმვაზე სიმტკიცის ზღვარი 2,5-ჯერ, ზღვრული წაგრძელება 2-ჯერ მეტი, ხოლო დეფორმაციულობა 1,5-ჯერ ნაკლები აქვს, ვიდრე ჩვეულებრივ ტუფობეტონს (ერთნაირი დატვირთვის დროს).



ნახ.2.9. ტუფობეტონისა და პოლიმერლერობეტონის ნიმუშების გასაშუალებული დეფორმაციები ცენტრალურად გაჭიმვის დროს:

1. ტუფობეტონი წალკის საბადოს ტუფის და ღორღის ქვიშით;
2. პოლიმერლერობეტონის ეპოქსიდური ფისით დაფარული წალკის საბადოს ტუფის ღორღზე და ტუფის ქვიშაზე.

2.6.3. მსუბუქი ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის ხანმედეგობის კვლევა

2.6.3.1. წყალშთანთქმადობის კვლევა

წყალშთანთქმადობის კვლევა მეტად მნიშვნელოვანია ექსპლუატაციაში მყოფი სამშენებლო მასალებისათვის. ის ნორმირებული არ არის, თუმცა რეკომენდირებულია, რომ წყალშთანთქმადობა არ აღემატებოდეს 5%-ს.

მსუბუქი ბეტონი ოკამის საბადოს ფორიან შემცვებზე ბუნებრივ მდგომარეობაში ხასიათდება მაღალი წყალშთანთქმადობით (საკუთარი მასის 18-20%): პოლიმერლექობეტონის წყალშთანთქმადობის გამოსაკვლევად ჩატარდა ექსპერიმენტები 10X10X10 სმ ზომების კუბებზე დადგენილი ნორმის [98] მიხედვით.

დამზადდა და გამოიცადა: 3 ნიმუში ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონისაგან ოკამის საბადოს ფორიან შემცვებზე და მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის 3 კუბი ანალოგიურ შემცვებზე. უნდა აღინიშნოს, რომ მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის პოლიმერად გამოყენებული იქნა 40% ეპოქსიდის ფისისა და 60% ბაკელიტის ლაქი. ბეტონის შედგენილობა და დამზადების წესი იგივე იყო რაც წყალშედწევადობის განსაზღვრის დროს. საცდელი ნიმუშები გამოიცადა დაორთქვლიდან მეორე დღეს.

ნიმუშები წყლის გაჯერებისათვის მოთავსდა 3სმ შრით წყლიან ჭურჭელში. ყოველ საათში ჭურჭელს თანაბარი პორციებით ემატებოდა წყალი ისე, რომ წყალგაჯერებიდან 3 საათის შემდეგ ნიმუშები წყლით დაფარული ყოფილიყო 1სმ-ით. შემდგომში წყლის დამატება ხდებოდა ისე, რომ წყალი ყოფილიყო მოცემულ დონეზე.

ყოველ 24 საათში ნიმუშები ამოიღებოდა წყლიდან, წარმოებდა მათი ზედაპირის გამშრალევა გაწურული სველი ტილოთი და აწონვა. როცა წყალში ნიმუშები გაიჟღინთებოდნენ მუდმივ მასამდე, ისინი თავსდებოდნენ საშრობ კარადაში და შრებოდნენ მუდმივ მასამდე.

წყალშთანთქმადობის კოეფიციენტი განისაზღვრა შემდეგი ფორმულით:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100\% ,$$

სადაც m_1 არის მუდმივ მასამდე წყალგაჟღენთილი ნიმუშის მასა; m_0 არის მუდმივ მასამდე გამომშრალი ნიმუშის მასა.

მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.33.

ცხრილი 2.33.

მსუბუქი ბეტონის და პოლიმერლექობეტონის წყალშთანთქმადობის კვლევა

ბეტონის სახე	ნიმუშის #	ნიმუშის მასა, კგ						გამომშრალი მუდმივ მასამდე, კგ	წყალშთანთქმადობის კოეფიციენტი, %
		წყალშთანთქმადობა, დღე-ღამეში							
		0	1	2	3	4	5		
მსუბუქი ბეტონი ოკამის საბადოს ფორიანი შემესვებით	1	530,6	606,7	611,0	614,0	618,9	619,0	521,5	18,7
	2	531,1	607,5	612,0	616,4	619,3	619,3	522,0	18,6
	3	530	608,0	613,0	616,0	619,0	620	521,5	18,9
პოლიმერლექობეტონი 40% ეპოქსიდის ფისი, 60% ბაკელიტის ლაქი	1	530,59	562,26	564,43	560,78	566,02	566,02	523,0	7,9
	2	529,54	558,34	559,67	558,8	561,2	561,2	522,02	7,48
	3	530	557,5	558,2	591,51	559,5	560,0	522,5	7,2

ცხრილის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ პოლიმერლექობეტონში, როცა პოლიმერად გამოიყენებოდა 40% ეპოქსიდის ფისი და 60% ბაკელიტის ლაქი ცოტათი მეტია 5%-ზე. მაგრამ თუ გავითვალისწინებთ იმას, რომ ნიმუშების გამოცდა მოხდა თბოტენიანი დამუშავებიდან მეორე დღეს და არა რაღაც

დროის შემდეგ, შეგვიძლია ვივარაუდოთ, რომ პოლიმერლეჩობეტონის წყალშთანთქმადობა დროთა განმავლობაში იქნება გაცილებით ნაკლები და არა ზღვრულად დასაშვები.

2.6.3.2. წყალმედვეობის კვლევა

როგორც ცნობილია, მასალის სიმტკიცის კლებას მისი ზღვრული წყალგაჟღენთილობის დროს წყალმედვეობა ეწოდება [99].

პოლიმერლეჩობეტონის წყალმედვეობა განისაზღვრა 10X10X10 სმ ზომის საცდელ კუბებზე

დამზადდა და გამოიცდა 6 პოლიმერლეჩობეტონის და 6 მსუბუქი ბეტონის კუბი კუმშვაზე. დამზადების დროს პოლიმერის შედგენილობა იყო შემდეგი: 40% ეპოქსიდის ფისით და 60% ბაკელიტის ლაქით. ბეტონის შედგენილობა, დამზადების ტექნოლოგია და თბოტენიანი დამუშავება ანალოგიური იყო წინა შემთხვევებისა. თბოტენიანი დამუშავების შემდეგ ნიმუშები ინახებოდა სარეჟიმო ოთახში სტანდარტულ პირობებში (ფარდობითი ტენიანობა 68%, ტემპერატურა 22°C).

სამთვიან ასაკში თითო სერიიდან სამ-სამმა ნიმუშმა გაიარა 50-ჯერადი წყალგაჟღენთვა-გამოშრობა (რაც წარმოადგენს გამოცდის ყველაზე ცუდ რეჟიმს), ხოლო დანარჩენი ნიმუშები ინახებოდა სარეჟიმო ოთახში ზემოაღნიშნული გამოცდების დამთავრებამდე.

სრული წყალშთანთქმადობა მიიღწეოდა ოთხი დღე-ღამის განმავლობაში, რის შემდეგ ნიმუშები შრებოდნენ მუდმივი მასის მიღებამდე. ამ თანმიმდევრობით ჩატარდა 50-ჯერადი წყალშთანთქმა-გამოშრობის ციკლი, რომლის დამთავრების შემდეგაც მოხდა ნიმუშების გამოცდა კუმშვაზე მათი სიმტკიცის ზღვრის დასადგენად. პარალელურად მიმდინარეობდა სარეჟიმო ოთახში შენახული ნიმუშების შრობა მუდმივ

მასამდე, შემდეგ კი ხდებოდა მათი გამოცდა კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვრის დასადგენად.

წყალმედეგობის კოეფიციენტი ანუ დარბილება განისაზღვრა შემდეგი ფორმულით:

$$K_{\text{დარბ}} = \frac{R_{\text{გაჟღ.}}}{R_{\text{შშრ.}}},$$

სადაც $R_{\text{გაჟ}}$ - წყალგაჟღენთილი ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი; $R_{\text{შშრ}}$ - სარეჟიმო ოთახში გამომშრალი ნიმუშების სიმტკიცის ზღვარი.

მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.34.

ცნობილია [100], რომ მასალა ითვლება წყალმედეგად იმ შემთხვევაში, თუ მისი წყალმედეგობის ან დარბილების კოეფიციენტი მეტია 0,9-ზე.

რადგან გამოცდილი ნიმუშების წყალმედეგობის კოეფიციენტი მეტია 0,9-ზე, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ გამოკვლეული ბეტონი წყალმედეგია.

ცხრილი 2.34.

მსუბუქი ბეტონისა და პოლიმერლექო ბეტონის წყალმედეგობის კვლევა

ბეტონის სახე		სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, R, კგ/სმ ²								წყალმედეგობის კოეფიციენტი
		ნიმუშები 50 - ციკლიანი წყალგაჟღენთვა- გამომშრობით				საკონტროლო ნიმუშები				
		R ₁	R ₂	R ₃	R _{საშ}	R ₁	R ₂	R ₃	R _{საშ}	
ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონი		160	148	150	153	196	202	190	195	0,8
პოლიმერლექო- ბეტონი	40% ეპოქსიდის ფისი, 60% ბაკელიტის ლაქი	311	306	315	311	318	310	315	314	0,99

2.6.3.3. კოროზიამდეგობის კვლევა

კოროზიამდეგობის გამოკვლევა ჩატარდა НИИЖБ - მეთოდის მიხედვით [97]. დამზადდა პოლიმერლექობეტონისა და ჩვეულებრივი ბეტონის საცდელი ნიმუშები ზომებით 7X7X7 სმ და 4X4X16 სმ. ბეტონის შემადგენლობა, მასალის მახასიათებლები, ბეტონის მომზადების წესი თბოტენიანი დამუშავება იგივე იყო, რაც წინა ექსპერიმენტში.

3 დღის შემდეგ საცდელი ნიმუშები მოთავსებული იყო A და B გარემოში

A გარემო- ზღვის წყალი (Na_2SO_4) ;

B გარემო- გრუნტის წყალი (CO_2) .

ცხრილი 2.35.

მსუბუქი ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის კოროზიამდეგობის კვლევა

ბეტონის სახე		სერიის #	პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცე, კგმ					
			გარემო A					
			ლუნვა		კუმშვა			
			4X4X16 სმ		4X4X4 სმ		7X7X7 სმ	
			1 თვე	6 თვე	1 თვე	6 თვე	1 თვე	6 თვე
ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონი		1	26,7	34	3300	2100	4500	4420
		2	30,2	32,1	3150	1400	3750	4500
		3	28,4	30,0	3250	1800	4200	4607
პოლიმერლექობეტონი 40% ეპოქსიდის ფისი, 60% ბაკელიტის ლაქი		1	62,8	66,8	5000	5600	10200	11125
		2	60,9	65,6	5300	5100	10700	11000
		3	63,7	65,3	5200	5300	10950	10980

ბეტონის სახე		სერიის #	პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცე, კგმ					
			გარემო B					
			ლუნვა		კუმშვა			
			4X4X16 სმ		4X4X4 სმ		7X7X7 სმ	
			1 თვე	6 თვე	1 თვე	6 თვე	1 თვე	6 თვე
ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონი		1	28,7	32	2400	1200	4200	4200
		2	29,4	33	2800	1850	4300	3700
		3	28,2	31,5	2600	1760	4100	4000
პოლიმერლექობეტონი 40% ეპოქსიდის ფისი, 60% ბაკელიტის ლაქი		1	62,0	66,1	5400	5500	11000	11780
		2	57,4	61,2	5200	5400	11050	10900
		3	60,5	65,0	5000	5200	10850	11000

ბეტონის სახე		სერიის #	პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცე, კგმ								
			სტანდარტული გარემო			კოროზიამედეგობის კოეფიციენტი K					
			ლუნვა		კუმშვა		ლუნვა		კუმშვა		
			4X4X16 სმ	4X4X16 სმ	7X7X7 სმ	4X4X4 სმ		4X4X4 სმ		7X7X7 სმ	
			6 თვე	6 თვე	6 თვე	6 თვე	6 თვე	6 თვე	6 თვე	6 თვე	6 თვე
ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონი		1	46	3600	5800	0,69	0,62	0,68	0,6	0,76	0,7
		2	48	3300	5000						
		3	44	3400	5700						
პოლიმერლექობეტონი	40% ეპოქსიდის ფისი, 60% ბაკელიტის ლაქი	1	64,5	5400	10933	0,999	1,0	1,02	1,0	1,02	1,21
		2	67,9	5500	11247						
		3	66,1	5200	11100						

A და B გარემოს უცვლელია შენარჩუნებული იყო ხსნარების დროდადრო შეცვლით. მოცემული დროის გასვლის შემდეგ გამოიცადნენ კუმშვაზე და ლუნვაზე.

НИИЖБ -ის მითითების მიხედვით კოროზიამედეგობის კოეფიციენტი K - A და B გარემოში მოთავსებული 6 თვის ბეტონისათვის გამოითვლება ფორმულით

$$K = \frac{\text{ბეტონის სიმტკიცის ზღვარი გარემოში ექვსთვიანი დაყოვნების შემდეგ}}{\text{ბეტონის სიმტკიცის ზღვარი ექვსი თვის ასაკში}}$$

საცდელი ნიმუშები გამოიცადა კუმშვაზე და ლუნვაზე ერთი და ექვსი თვის ასაკში. გარდა ამისა სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე დადგინდა 4X4X16 სმ პრიზმების ნატეხებზეც ლუნვაზე გამოცდის შემდეგ.

ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 2.35. საიდანაც ჩანს, რომ 40% ეპოქსიდის ფისის და 60% ბაკელიტის ლაქის ნარევით დამზადებულ პოლიმერლექობეტონის კოროზიამედეგობის კოეფიციენტი A და B გარემოში ყოფნის შემდეგ 0,99 – 1,02 აქვს და ის

გაცილებით მეტია 0,9. შესაბამისად შეიძლება ვთქვათ, რომ მოცემული პოლიმერლექობეტონი მედეგია აგრესიული გარემოს მიმართ.

2.6.3.4. ცვეთადობის კვლევა

ცვეთადობის გამოკვლევა ხდებოდა არსებული მეთოდის მიხედვით [92]. დამზადდა 7,07X7,07X7,07სმ ზომების ნიმუშები პოლიმერლექობეტონისა და ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონისაგან.

პოლიმერლექობეტონი დამზადდა შემდეგი შემადგენლობით: 40% ეპოქსიდის ფისით და 60% ბაკელიტის ლაქით. ბეტონის შედგენილობა, დამზადების წესი და თბოტენიანი დამუშავება იგივეა რაც წინა ექსპრიმენტებში.

ნიმუშები გამოვცადეთ დაორთქლიდან სამი დღე-ღამის შემდეგ თითოეულ პარტიაში გამოიცადა 3 კუბი. გამოცდის წინ ნიმუშები მოთავსებული იყვნენ სარეჟიმო ოთახში 48 საათის განმავლობაში, სადაც ტემპერატურა იყო $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$, ხოლო ტენიანობა 90%.

გამოცდისათვის გამოყენებული იყო ცვეთადობის სპეციალური ტიპის ქარგოლი, რომელიც შედგება ბრტყელი ცვეთადი დისკისაგან. მისი სიჩქარე დატვირთვის ქვეშ 30ბრ/წთ-ია. ხელსაწყო აღჭურვილი იყო ავტომატური გამომრთველის მქონე ბრუნვის მრიცხველით, რომელიც აჩერებდა დიკოს ყოველ 22 ბრუნზე. დამჭერ მოწყობილობას ნიმუში თავისუფლად ეჭირა. სახერხ მასალად გამოიყენებოდა შლიფმარცვალი #16 ГОСТ 3647 – 71 ბეტონის ნიმუშების ცვეთადობის დადგენა ხდებოდა ჰაერ-მშრალ მდგომარეობაში.

გამოცდის დაწყებამდე განისაზღვრა ნიმუშის მასა 0,1 გრ სიზუსტით. ნიმუშის სიმაღლე იზომებოდა ცვეთადი წახნაგის პერპენდიკულარულად ოთხივე გვერდით წახნაგზე, სიზუსტით 0,1მმ. ცვეთადი ქარგოლის ზედაპირზე თანაბარ შრედ ეფინებოდა 20 გრ შლიფმარცვალი. ამ ნაწილზე ემაგრებოდა გამოსაცდელი ნიმუში, რომელიც ცენტრში იტვირთებოდა 20 კგ. ყოველი 22 ბრუნის შემდეგ შლიფმარცვალის ნარჩენი, აგრეთვე ბეტონის

ნიმუშის ცვეთადობის შედეგად მიღებული ფხვნილი შორდებოდა და დისკოს ცვეთად ზედაპირს თანაბარი შრით ემატებოდა 20გრ ახალი შლიფმარცვალი.

დისკოს 110 ბრუნვის შემდეგ განისაზღვრა ნიმუშის მასა და გაიზომა ნიმუშის სიმაღლე ფანქრით აღნიშნულ ადგილას. ამის შემდეგ ნიმუში დაბრუნდა ვერტიკალური ღერძის მიმართ 90° - ით და ჩატარდა მომდევნო ციკლი, რომელიც ტოლი იყო დისკოს 110 ბრუნვისა.

ჩატარებული გამოცდის ყოველი ციკლის შემდეგ ხდება ნიმუშის მობრუნება 90° - ით. თითოეულ ნიმუშზე ჩატარდა გამოცდის სამი ციკლი. გამოცდის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 2.36. - 2.37.

ცვეთადობის კოეფიციენტი ითვლებოდა შემდეგი ფორმულით

$$K_{\text{ცვეთ}} = \frac{g-g_1}{F}, \text{ გრ/სმ}^2$$

ცხრილი 2.36.

პოლიმერლექობეტონის (40% ეპოქსიდის ფისით 60% ბაკელიტის ლაქით) ცვეთადობის კვლევა

#	h ₁ ,სმ	h ₂ ,სმ	h ₃ ,სმ	h ₄ ,სმ	F, სმ ²	გ, გრ	ციკლი	ცვეთადობის კოეფიციენტი, K _{გვ} გრ/სმ ²
I	7,1	7,0	7,1	7,1	7,81X7,05=50,619	608	0	0,494
	6,85	6,95	6,95	6,95		596	I	
	6,85	6,90	6,90	6,85		590	II	
	6,75	6,80	6,85	6,82		586	III	
	6,70	6,75	6,80	6,80		583	IV	
II	7,00	6,90	7,10	7,00	7,1X6,95=49,345	605	0	0,466
	6,90	6,85	6,95	6,95		595	I	
	6,80	6,80	6,90	6,90		590	II	
	6,75	6,77	6,85	6,87		585	III	
	6,70	6,75	6,80	6,85		582	IV	
III	7,00	7,10	7,05	7,00	7,1X7,15=50,765	610	0	0,501
	6,90	6,98	6,90	6,85		592	I	
	6,85	6,90	6,85	6,80		589	II	
	6,80	6,85	6,80	6,75		585	III	
	6,77	6,80	6,80	6,70		583,5	IV	

სადაც g - ნიმუშის მასაა გამოცდამდე, გრ; g_1 - ნიმუშის მასა ცვეთადობაზე გამოცდის შემდეგ, გრ; F - ნიმუშის ცვეთადობის განივკვეთის ფართობი, სმ².

2.36.-2.37. ცხრილების ანალიზიდან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ 40% ეპოქსიდის ფისით და 60% ბაკელიტის ლაქით მიღებულ პოლიმერლერობეტონს ცვეთადობის კოეფიციენტი იგივე აქვს, როგორც მძიმე ლითონებს. ამავე დროს, თუ გავითვალისწინებთ, რომ პოლიმერლერობეტონის ცვეთადობა განისაზღვრებოდა თბოტენიანი დამუშავებიდან მესამე დღეს, ხოლო პოლიმერლერობეტონის სიმტკიცე ინტენსიურად იზრდება დროში, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ აღნიშნული შედგენილობების პოლიმერლერობეტონი პასუხობს ცვეთადობის მოთხოვნებს.

ცხრილი 2.37.

ჩვეულებრივი მსუბუქი ბეტონის (ოკამის საბადოს ფორიან შემცვლებზე) ცვეთადობის კვლევა

#	h_1 ,სმ	h_2 ,სმ	h_3 ,სმ	h_4 ,სმ	F , სმ ²	g , სმ	ციკლი	ცვეთადობის კოეფიციენტი, $K_{გვ}$ გრ/სმ ²
I	6,80	7,0	7,0	6,85	7,1X7,15=50,765	600	0	0,827
	6,65	6,95	6,82	6,75		584	I	
	6,60	6,90	6,75	6,65		577	II	
	6,45	6,80	6,65	6,50		568	III	
	6,35	6,75	6,55	6,40		558	IV	
II	6,90	6,90	6,90	7,10	7,0X7,1=49,7	596	0	0,905
	6,70	6,85	6,75	6,80		580	I	
	6,62	6,80	6,60	6,70		865	II	
	6,55	6,77	6,45	6,55		555	III	
	6,45	6,75	6,40	6,45		550	IV	
III	7,09	7,00	6,95	7,00	7,0X7,0=49,0	605	0	0,918
	6,95	6,99	6,80	6,95		590	I	
	6,85	6,80	6,72	6,75		580	II	
	6,75	6,70	6,60	6,65		579	III	
	6,65	6,60	6,55	6,65		560	IV	

2.6.4. პოლიმერლექობეტონის ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციები

ცნობილია, რომ ფერდოების გამაგრების რამდენიმე ხერხი არსებობს. დაწყებული მათთვის ბალახის საფარის შექმნით და დამთავრებული ფერდოგამმაგრებელი რკინაბეტონის ფენილებისა და საყრდენი კედლებით.

ფერდოების გამაგრება ბალახის საფარის შექმნით, როგორც გამოცდილება გვიჩვენებს, ზოგიერთ შემთხვევაში არ აკმაყოფილებს ფერდოების ეროზიისაგან დაცვის მიმართ წაყენებულ თანამედროვე მოთხოვნებს. ამავე დროს უნდა აღინიშნოს, რომ ბალახის დათესვა შესაძლებელია გარკვეული კლიმატური პირობების დროს, თუმცა არა გრუნტის ნებისმიერი სახეობისათვის. ამასთან მხოლოდ დათესვიდან ორი წლის შემდეგ შეიძლება ჩაითვალოს ბალახის საფარი საიმედოდ ფერდოების გასამაგრებლად.

ფერდოების გამაგრება შეიძლება აგრეთვე ცემენტგრუნტისა და ბიტუმგრუნტების მასიური საფარით, სისქით 10 სმ, რომლებიც წინასწარ მომზადებულ ფერდოებზე ეფინება [101].

უბნებზე, რომლის გრძივი დაფერდება 30⁰-ს აღემატება, წყლის ხარჯი მნიშვნელოვანია და მდებარეობს ხელოვნური წყლის ნაგებობასთან ახლოს, ფერდოების გამაგრება ზემოთ ჩამოთვლილი მეთოდებით შეიძლება არასაკმარისი აღმოჩნდეს. ასეთ შემთხვევებში, ან უფრო ციკაბო ფერდოებისა და სუსტი გრუნტების დროს ასაწყობი რკინაბეტონის ან ასფალტბეტონის ფილები გამოიყენება, რომლებიც წყალმოვარდნების, ტალღების და სხვა. დამანგრეველი მოქმედებისაგან ფერდოების დასაცავადაა გაანგარიშებული [102]. კერძოდ, პრაქტიკაში გვხვდება ასაწყობი ბეტონის კვადრატული ფილები, ზომებით 50X50X8 სმ, ჩამოჭრილი კუთხეებით, რომლებიც წინასწარ დამზადებული ხრეშის ან ღორღის შრეზე თავსდებიან, იშვიათ შემთხვევაში კი უშუალოდ გრუნტზე. კუთხეებიდან გამოშვერილი არმატურები დაიგრიხება და ჩამონაჭერი კუთხეებიდან მიღებული ორმო ქვიშოვანი ასფალტბეტონით ივსება, რის

შედეგადაც ელასტიური ლეიბი წარმოიშობა, რომელიც გამორეცხვის შედეგად ჯდება და გამორეცხვას ხელს უშლის [103]. ატმოსფერული ნალექებისაგან და წყლის სხვადასხვა მოქმედებისაგან ფერდობების დასაცავად ასეთი მყარი საფარის გამოყენება სიძვირის გამო არ არის მიზანშეწონილი.

ამჟამად უმეტეს შემთხვევაში სხვადასხვა ასაწყობი რკინაბეტონისა და არმირებული ცემენტგრუნტის კონსტრუქციები გამოიყენება, რომლებიც აწყობის შემდეგ მოცემული სახის გისოსის ფორმას დებულობს. ფერდობების ქვედა ნაწილების გასამაგრებლად, სადაც ღრმა ქვაბულები და მაღალი ნაყარია რკინაბეტონის ელემენტები გამოიყენება, რომელთაგან თითოეულის მასა 82 კგ-ს შეადგენს.

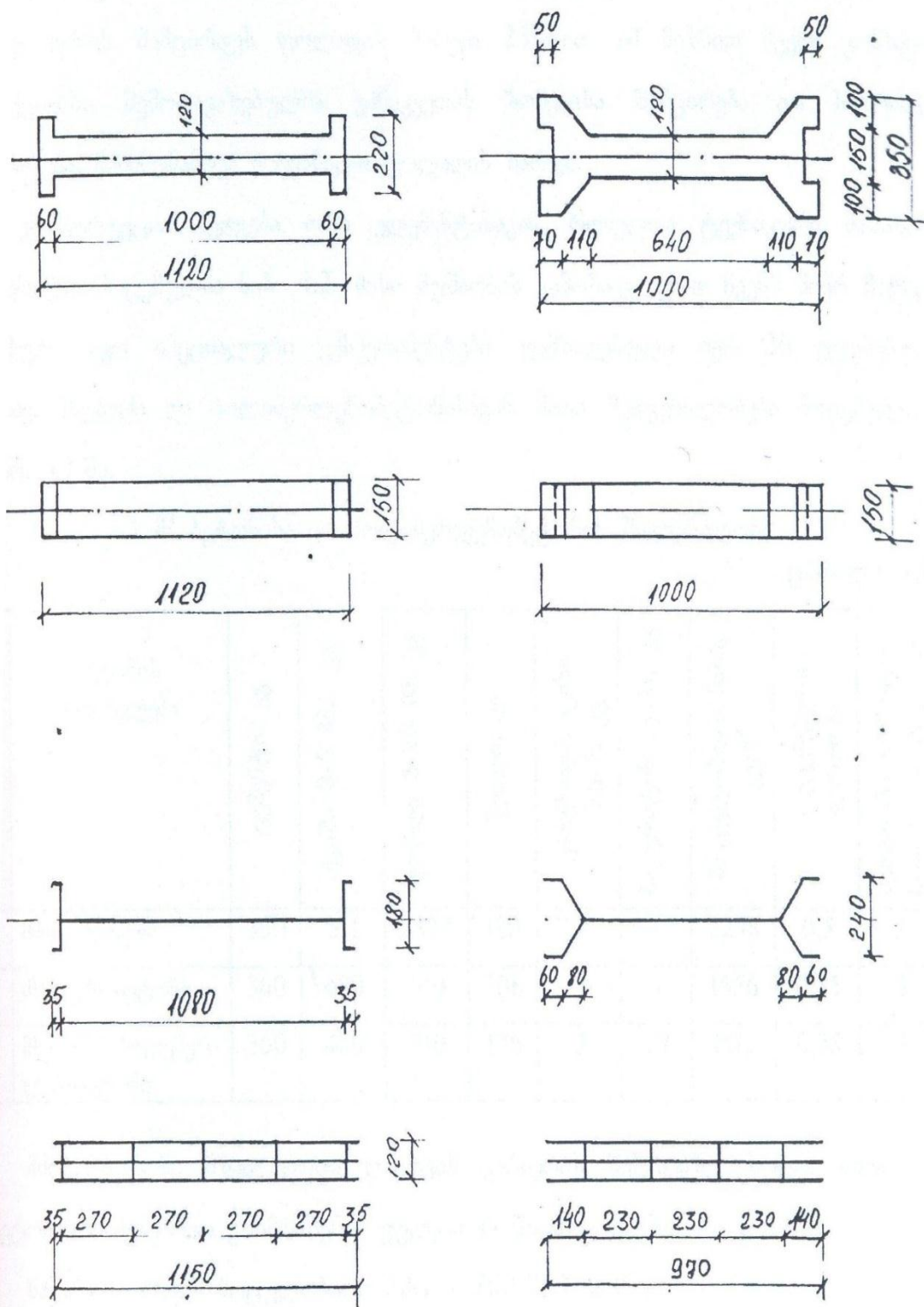
დამუშავებულია ასაწყობი რკინაბეტონის ფერდოგასამაგრი კონსტრუქციები, რომლებიც აწყობის შედეგად პროფილირებულ უჯრედს ქმნის. იგი აუცილებლობის შემთხვევაში შეიძლება გრუნტით ამოივსოს და ბალახით ან ასფალტით დაიფაროს.

კონსტრუქცია ორი ელემენტისგან შედგება, რომელთა ტექნიკური მახასიათებლები მოცემულია ნახ. 2.10. ელემენტების მასა 62-65 კგ-ია. მათი აწყობა მარტივად ხდება. ამავე დროს შეიძლება მისი დაშლა და დაზიანებული დეტალების შეკეთება ან გამოცვლა. უნდა აღინიშნოს, რომ ხელით მათი დამონტაჟება რთული და შრომატევადია. მათი უარყოფითი მხარეა დაბალი ხანმედეგობა. ასეთი ელემენტები გამოიყენეს მდინარე რიონის ზოგიერთ უბანზე და პიცუნდის გზის სხვადასხვა მონაკვეთზე. ამ კონსტრუქციებმა სიმძიმისა და დაბალი ხანმედეგობის გამო ფართო გამოყენება ვერ ჰპოვა.

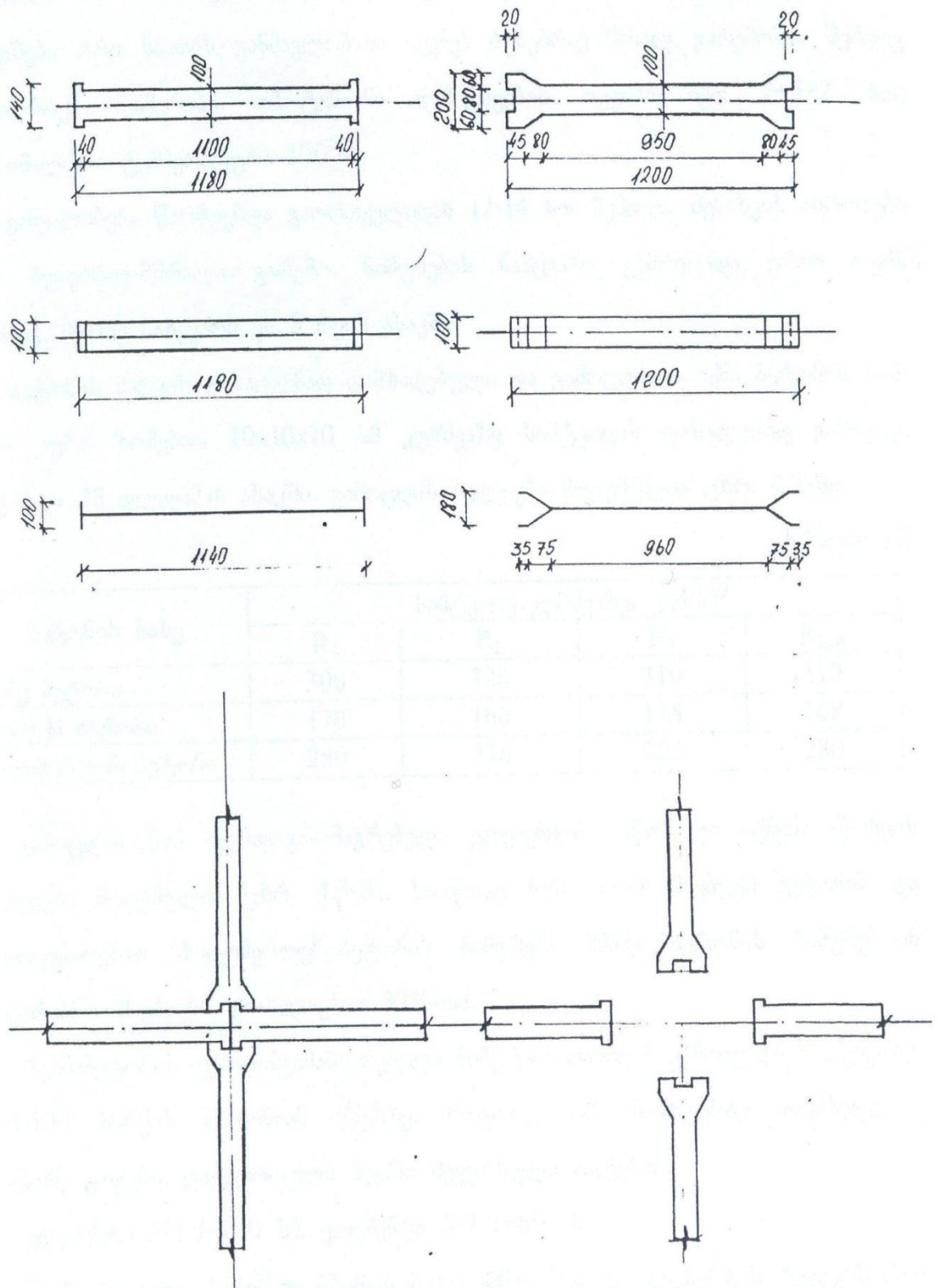
აღნიშნული ნაკლოვანებების აღმოსაფხვრელად, მძიმე ბეტონის ნაცვლად უმჯობესია პოლიმერლერბეტონის გამოყენება, რომელიც საშუალებას იძლევა 30-40%-ით შემსუბუქდეს კონსტრუქცია, ფიზიკურ-მექანიკური თვისებებით კი არ ჩამოუვარდეს მძიმე ბეტონისაგან დამზადებულ კონსტრუქციებს, იყოს ხანმედეგი და ამავე დროს ფოლადის

ხარჯი 25%-ით შემცირდეს. ამ მიზნით ჩვენს კონსტრუქციებში შემოთავაზებულია განიკვეთის ზომების შემცირება და სიგრძის გაზრდა, ფოლადის ხარჯი კი მინიმუმამდეა დაყვანილი.

კონსტრუქცია ორი ელემენტისგან შედგება, რომელთა ტექნიკური მახასიათებლები მოცემულია ნახ.2.11. მისი მუშაობის გამოსაკვლევად ჩვენს მიერ ჩატარებული იყო სპეციალური ექსპერიმენტები. დავამზადეთ 36 ელემენტი მძიმე, მსუბუქი და პოლიმერლექობეტონისაგან. მათი შედგენილობები მოცემულია ცხრილში 2.38.



ნახ.2.10. მძიმე ბეტონის ფერდოგამზარებელი კონსტრუქციის სქემა



ნახ.2.11. მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის ფერდოგამზარებელი კონსტრუქციის სქემა

1მ³ ბეტონისა და პოლიმერლერბეტონის შედგენლობა

№	ბეტონის დასახელება	ცემენტი, კგ	ქვიშა 0-5 მმ, კგ	ლორღი 5-20მმ, კგ	წყალი, ლ	ეპოქსიდის ფისი 3:1 – 5, კგ	ბაკელიტის ლაქი, კგ	მოცულობითი მასა, კგ/მ ³	წყალცემენტის ფარდობა	ძვრადობა სტროიცილის კონუსით, სმ
1	მძიმე ბეტონი	360	511	1327	180	-	-	2278	0,5	3
2	მსუბუქი ბეტონი	360	480	510	306	-	-	1656	0,85	3
3	პოლიმერლერბეტონი	360	480	510	126	3	27	1512	0,35	3

მძიმე ბეტონი დავამზადეთ ლიახვის კარიერის შემდგებზე, ხოლო მსუბუქი ბეტონი კარმრაშენის (წალკის) ვულკანურ წიდა ღორღზე.

ლორღის ნაყარი მოცულობითი მასა - 700-750 კგ/მ³;

ლორღის სიმტკიცე ცილინდრში 14,5 კგ/სმ²;

ქვიშის ნაყარი მოცულობითი მასა 800-850 კგ/მ³;

შემკვრელად რუსთავის ცემენტი მარკით 400 გამოიყენებოდა.

დავამზადეთ 6-6 ცალი №1 და ცალი №2 ელემენტები მძიმე, მსუბუქი და პოლიმერლერბეტონისაგან. ნიმუშები დავამზადეთ ლითონის ყალიბებში. ვიბრაცია ხდებოდა ИГ-21 მარკის სიღრმული ხელის ვიბრატორით. ახალდამზადებული ნიმუშები ორი საათის განმავლობაში იყო ბუნებრივ-მშრალ გარემოში, შემდეგ გასაორთქლ კამერაში. თბოტენიანი დამუშავების რეჟიმი 2+5+2 სთ იყო, მაქსიმალური ტემპერატურა 100°C.

განყალიბება წარმოებდა გაორთქვლიდან 12-14 სთ შემდეგ, შენახვის პირობები ბუნებრივად მშრალი გარემო იყო. ნიმუშების ნახევარი ერთი თვის შემდეგ გამოვცადეთ, მეორე ნახევარი კი 3 თვის ასაკში.

ბეტონის მარკის დასადგენად დამზადდა და გამოიცადა სამ-სამი კუბი, ზომებით 10X10X10 სმ. კუმშვაზე სიმტკიცის დასადგენად გამოცდა ჩატარდა 28 დღე-ღამის ასაკში. გამოცდის შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.39.

მსუბუქი და პოლიმერლექობეტონის კუმშვაზე გამოცდის შედეგები

ბეტონის სახე	სიმტკიცე კუმშვაზე, R, კგ/სმ ²			
	R ₁	R ₂	R ₃	R _{საშ}
მძიმე ბეტონი	300	320	310	310
მსუბუქი ბეტონი	170	160	175	168
პოლიმერლექობეტონი	280	276	285	280

გამოცდის წინ ფერდოგასამაგრებელი ელემენტები აიწონა. აწონვის შედეგები მოცემულია ცხრილი 2.40., საიდანაც ჩანს, რომ მსუბუქი ბეტონის და განსაკუთრებით პოლიმერლექობეტონის ნიმუშები მძიმე ბეტონის ნიმუშებთან შედარებით დაახლოებით 37%-ით მსუბუქია.

რკინაბეტონის ფერდოგამაგრებელი ნიმუშები თავიდან გამოიცადა რუნვაზე, PM-100 მარკის 100 ტონიან წნეხზე, როგორც ორ საყრდენზე თავისუფლად მდებარე კოჭები, დატვირთული შუაში შეყურსული ძალებით:

ელემენტი №11=100სმ, ელემენტი №21=60სმ.

ფიქსირდებოდა პირველი ბზარის წარმოქმნის $P_{ზ}$ და ელემენტის რღვევის როგორც $P_{გრღ}$ მომენტები, რადგან არმირების პროცენტი მცირე იყო, პირველი ბზარის წარმოქმნა ვიზუალურად განისაზღვრა, მეორე ბზარის კი წნეხის მანომეტრის ისრის სვლის შეჩერებით. გამოცდის შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.40.

როგორც ცხრილიდან ჩანს, პირველი ბზარის წარმოქმნა, ერთი თვის ასაკის მსუბუქი რკინაბეტონის ნიმუშებისათვის, მძიმე რკინაბეტონის ბზარწარმოქმნის ($P_{ზ}$) 70-72% შეადგენს, ხოლო პოლიმერლექობეტონისათვის 98%-ს. სამთვიანი ასაკის პოლიმერლექობეტონის სიმტკიცე დროში უფრო ინტენსიურად გაიზარდა, ვიდრე მძიმე ბეტონის ნიმუშების სიმტკიცე (დაახლოებით 10 %-ით), რაც დაახლოებით 9-15%-ს შეადგენს. პოლიმერლექობეტონისათვის დამახასიათებელია სიმტკიცის დროში ზრდა, რაც ნათლად მიუთითებს მის ნაკლებად ჯდენაზე.

ბეტონისა და პოლიმერლექობეტონის ფერდობგამმაგრებელი კონსტრუქციების ელემენტების ნიმუშების მასა (Q), პირველი ბზარის წარმოქმნის (P_{ბზ}) და რღვევის (P_{მრღ}) მნიშვნელობები ღუნვაზე გამოცდის დროს

ელემენტი	ბეტონის სახე	ნიმუშის №	მასა,კგ			ძალა, (კგძ) ნიმუშებისათვის											
			თითოეული Q	საშუალო Q _{საშ}	%	ერთი თვის ასაკი						სამი თვის ასაკი					
						P _{ბზ}	P _{ბზ.საშ.}	%	P _{მრღ}	P _{მრღ.საშ.}	%	P _{ბზ}	P _{ბზ.საშ.}	%	P _{მრღ}	P _{მრღ.საშ.}	%
№1	მძიმე ბეტონი	1	35	35,2	100	430	423	100	1250	1220	100	545	540	100	1350	1300	100
		2	35,4			420			1210			540			1240		
		3	35,2			420			1205			535			1310		
	მსუბუქი ბეტონი	1	24,7	24,4	68	265	262	67	855	840	70	385	390	68,5	920	910	70
		2	24,3			255			835			390			910		
		3	24,2			260			830			395			900		
	პოლიმერლექობეტონი (ბაკელიტის ლაქი+ეპოქსიდის ფისი ЭД5)	1	20,5	20,4	58	423	422	99,8	1230	1200	98,5	593	590	109	1450	1420	110
		2	20			423			1185			587			1400		
		3	20,7			419			1185			590			1410		
№2	მძიმე ბეტონი	1	40,2	40,5	100	840	810	100	1565	1550	100	1150	1120	100	1815	1805	100
		2	41,2			780			1520			1100			1800		
		3	40,0			810			1570			1090			1805		
	მსუბუქი ბეტონი	1	27,6	27	67	495	503	63	1120	1100	71	770	750	67	1250	1230	100
		2	27			518			1100			750			1230		
		3	26,5			497			1080			730			1210		
	პოლიმერლექობეტონი (ბაკელიტის ლაქი+ეპოქსიდის ფისი ЭД5)	1	23	24	58,5	805	800	98	1525	1500	97	1330	1300	115	1990	1960	69
		2	24,6			802			1500			1300			1940		
		3	25			792			1475			1270			1950		

შემდგომში ღუნვაზე გამოცდილი №1 ელემენტების გამოცდა მოხდა თავების გაწყვეტაზე, რადგან ექსპლუატაციის პროცესში ყველაზე უფრო ეს კვეთია საშიში. გამოცდა 20 ტონიან წნეხზე ჩატარდა, სატაცების და ორი გვარლის გამოყენებით. მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილში 2.41. და 2.42. აღნიშნულ ცდებში პირველი ბზარის წარმოქმნა მათ რღვევას ემთხვევა.

ცხრილი 2.41.

გაუმჯობესებული ფერდოსამაგრი კონსტრუქციის №1 ელემენტის თავების გაწყვეტაზე გამოცდის შედეგები

ბეტონის სახე	ნიმუშის №	ძალა, P _{MP}					
		ერთოვანი ნიმუშებისათვის			სამთვინი ნიმუშებისათვის		
		P	P _{საშ}	%	P	P _{საშ}	%
მძიმე ბეტონი	1	1250	1200	100	1410	1420	100
	2	1200			1420		
	3	1150			1430		
მსუბუქი ბეტონი	1	855	840	71	1020	980	69
	2	840			1000		
	3	825			950		
პოლიმერლენობეტონი (ბაკელიტის ლაქი+ეპოქსიდის ფისი 3D5)	1	1200	1180	99,5	1520	1500	110
	2	1190			1520		
	3	1150			1560		

ცხრილი 2.42.

გაუმჯობესებული ფერდოსამაგრი კონსტრუქციის №2 ელემენტების თავების რღვევაზე გამოცდის შედეგები, განივი ძალების მოქმედების დროს

ბეტონის სახე	განივი ძალა, P _{კვძ}											
	ერთოვანი ნიმუშებისათვის						სამთვინი ნიმუშებისათვის					
	I	II	III	IV	V	საშ	I	II	III	IV	V	საშ
მძიმე ბეტონი	410	412	418	420	420	415	442	458	455	445	450	450
მსუბუქი ბეტონი	300	300	290	285	295	295	305	300	300	325	325	310
პოლიმერლენობეტონი (ბაკელიტის ლაქი+ეპოქსიდის ფისი 3D5)	410	400	405	395	415	405	490	480	480	500	500	490

2.7. ეკონომიკა

2.7.1. პოლიმერლექობეტონის ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციების გამოყენების ეკონომიკური ეფექტურობა

ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციების ეკონომიკურ ეფექტურობას ვსაზღვრავთ 100მ^2 ფართობზე. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ჩვენს მიერ შემთავაზებულ კონსტრუქციებში საწყის ვარიანტთან შედარებით, განსხვავებულია ზომები, კერძოდ შემცირებულია განივკვეთი და გაზრდილია საწყისი სიგრძე, რაც საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ ბეტონისა და არმატურის ხარჯი.

საწყისი მონაცემები:

ა) მძიმე კონსტრუქციის ელემენტებზე გამოყენებული ბეტონის რაოდენობა $V=n_1v_1+n_2v_2=99\times 0,022+100\times 0,0244=4,618\text{მ}^3$,

სადაც, $n_1=99$ და $n_2=100$, ცალი, კონსტრუქციების ელემენტების საჭირო რაოდენობაა 100მ^2 ფართობზე, ხოლო v_1 და v_2 , შესაბამისად ბეტონის ხარჯია;

ბ) მძიმე ბეტონის ღირებულება საბაზრო ფასით 140 ლარი/მ³;

გ) გაუმჯობესებული პოლიმერლექობეტონის კონსტრუქციის ელემენტებზე დახარჯული ბეტონის რაოდენობა:

$$V_1= n_1v_1+n_2v_2=79\times 0,01212+77\times 0,0134=1,032\text{მ}^3;$$

პოლიმერლექობეტონის ღირებულება საბაზრო ფასით 160 ლარი/მ³;

ე) კაპიტალური რემონტი საწყისი ვარიანტით-ყოველ 5 წელიწადში 30% კონსტრუქციის აღდგენა;

ვ) შემთავაზებული ვარიანტით კაპიტალური რემონტი-ყოველ 10 წელიწადში 5% კონსტრუქციის აღდგენა.

ეკონომიკური ეფექტის ანგარიში:

დანახარჯები საბაზრო ვარიანტით $K_1=140\times 4,618=646,52$ ლარი;

$$C_1=0,33\times 646,52=213,352 \text{ ლარი};$$

საშუალო წლიური დანახარჯი $t=5$ წლის განმავლობაში

$$C'_{\text{შპს}} = \frac{C_1(1+E)^{1-t}}{\sum_{t=1}^5(1+E)^{1-t}} = \frac{213,352(1+0,1)^{1-5}}{\sum_{t=1}^5(1+0,1)^{1-5}} = 34,8 \text{ ლარი,}$$

სადაც $E=0,1$ დანახარჯების ნორმატივია.

დანახარჯები შემოთავაზებული კონსტრუქციით $K_2=160 \times 1,0318=165,1$ ლარი;

დანახარჯები რემონტზე $C_2=165,1 \times 0,05=8,255$ ლარი;

საშუალო წლიური დანახარჯი $t=10$ წლის განმავლობაში

$$C'_{\text{შპს}} = \frac{C_1(1+E)^{1-t}}{\sum_{t=1}^5(1+E)^{1-t}} = \frac{8,255(1+0,1)^{1-10}}{\sum_{t=1}^5(1+0,1)^{1-10}} = 0,51 \text{ ლარი.}$$

წლიური ეკონომიკური ეფექტი

$$\Xi = (C'_{\text{შპს}} + E_1 K_1) - (C'_{\text{შპს}} + E_1 K_2) = (34,8 + 0,08 \times 646,52) - (0,51 + 0,08 \times 165,1) = 86,52 - 13,72 = 72,8 \text{ ლ.}$$

აქ $E_1=0,08$ დანახარჯების ეფექტურობის ნორმატიული კოეფიციენტია. როგორც შედარებიდან ჩანს, წლიური ეკონომიკური ეფექტი საბაზო მონაცემთან შედარებით მხოლოდ 100მ^2 ფართობზე არის 72,8 ლარი. გარდა ამისა, გაუმჯობესებული კონსტრუქცია გამოირჩევა სიმსუბუქით (თითქმის 2,5-ჯერ ნაკლები წონით), არმატურის ნაკლები ხარჯითა და მონტაჟის დროს მცირე შრომატევადობით.

3. დასკვნა

აგრესიული გარემოს ზემოქმედებისაგან ბეტონის დაცვის დღეს არსებული ღონისძიებები ძვირადღირებული და არასაკმარისია. ამიტომ შავიზღვისპირეთის კლიმატურ პირობებში ბეტონის კონსტრუქციების დაცვის ერთ-ერთ საშუალებად ბეტონში შემკვრელის სახით თხევადი გოგირდის გამოყენება მიგვაჩნია. ცემენტთან ბეტონთან შედარებით გოგირდიან ბეტონს რიგი განსაკუთრებული თვისებები გააჩნია. ისეთები როგორცაა: დაბალი წყალშედწევადობა, წყალუქონადობა, მაღალი სიმტკიცის სწრაფად მიღწევა და შენარჩუნება, კოროზია მედეგობა.

შავიზღვისპირეთის აგრესიული გარემოს შესაბამისი ბეტონის მისაღებად ჩატარებული კვლევების შედეგად მიღებულია:

1. ოპტიმალური შემადგენლობის მძიმე (S:ქვ:ღ⁵⁻¹⁰:ღ¹⁰⁻²⁰: მტვ. 1:1,12:0,7;1,4:0,5), $\gamma_0=2376\text{კგ/მ}^3$, $R_b=406\text{კგ/სმ}^2$ და მსუბუქ ფოროვან, ბუნებრივ შემკვრელზე (S:ქვ:ღ⁵⁻¹⁰ =1:0,69:0,41) $\gamma_0=2030\text{კგ/მ}^3$, $R_b=263\text{კგ/სმ}^2$ დამზადებული გოგირდიანი ბეტონები, რომელთა სიმტკიცის მახასიათებლები სრულად აკმაყოფილებენ აგრესიული გარემოს მიმართ მდგრადი ბეტონებისადმი СНиП 3.04.03.85-ით წაყენებულ მოთხოვნებს, რომლებიც შენობების საძირკვლის ფილაში ან საგზაო მშენებლობაში, გრუნტის წყლების პირობებში ორფენიანი საფარის ქვედა ფენაში გამოიყენება.

2. როგორც მძიმე, ისე მსუბუქი გოგირდბეტონის სიმტკიცის მახასიათებლები გაჭიმვაზე ღუნვისას 1,5-ჯერ აჭარბებენ იგივე კლასის ცემენტის ბეტონების სიმტკიცის მახასიათებლებს, რაც გოგირდიანი ბეტონების მაღალ სტრუქტურულ სიმტკიცეზე მეტყველებს.

3. გოგირდბეტონის კიდევ ერთ განსაკუთრებულ თვისებას წარმოადგენს მისი გაცივებისთანავე სიმტკიცის ზღვრის მიღწევა. ამ თვისების გამო იგი წარმატებით შეგვიძლია გამოვიყენოთ მეწყერების და წყალმოვარდნების დროს ნაპირსამაგრ სამუშაოებში.

4.იმის გამო, რომ გოგირდის შემკვრელი თვისება იცვლება მისი ტემპერატურის ცვლასთან ერთად, წუნდებული გოგირდბეტონის კონსტრუქციები შეიძლება დავამტვრიოთ, გავაცხელოთ და ხელახლა დავამზადოთ კონსტრუქციები. ამით თავიდან ავიცილებთ ზედმეტ ხარჯებს და გარემოსაც დავიცავთ სამშენებლო ნაგვისაგან.

5.დამუშავებულია მაღალი სიმტკიცის, მცირე დეფორმაციული და წყალშეუღწევი პოლიმერული დანამატით დაფარული ფორიან შემკვებზე დამზადებული კონსტრუქციული მსუბუქი ბეტონი-პოლიმერლექობეტონი (ვ. ბალავაძე, მ. ლორთქიფანიძე, „ბეტონის დამზადების წესი“ გამოგონება №4661986 1978წ.), რომელსაც გააჩნია მცირე მასა, მაღალი სიმტკიცე, წყალშეუღწევადობა და ზღვრული ჭიმვადობა, ამიტომ მისი გამოყენება მძიმე ბეტონის მსგავსად შესაძლებელია საპასუხისმგებლო ნაკეთობებსა და კონსტრუქციებში (მათ შორის წინასწარ დაძაბულშიც).

6.ექსპერიმენტით დადგინდა, რომ ადგილობრივ მსუბუქ შემკვებზე დამზადებული მსუბუქი პოლიმერლექობეტონის (მოცულობითი მასით 1200-1800 კგ/მ³) კუმშვაზე სიმტკიცემ მიაღწია 500 კგ/სმ²-ზე და მეტს. დადგინდა, რომ შესაბამის მსუბუქ ბეტონებთან შედარებით პოლიმერლექობეტონებს გააჩნიათ 2-2,5-ჯერ მეტი სიმტკიცის ზღვარი გაჭიმვაზე, კუმშვაზე და ლუნვაზე, 2-ჯერ მეტი კუმშვადობა და ჭიმვადობა, გაცილებით ნაკლები ცოცვადობა და ჯდენა, ამავე დროს ერთნაირი დატვირთვების დროს პოლიმერლექობეტონის ჭიმვადობა და კუმშვადობა 2-ჯერ ნაკლებია შესაბამის მსუბუქ ბეტონებთან შედარებით.

7.პოლიმერლექობეტონის მოცულობითი მასით 1200-1800კგ/სმ³ მნიშვნელოვანი თვისებაა მისი მაღალი ხანმედეგობა. ჩატარებული ცდებით დადგინდა, რომ პოლიმერლექობეტონი აკმაყოფილებს სახსტანდარტის მიერ წაყენებულ მოთხოვნებს წყალმედეგობაზე, წყალშთანთქმაზე, წყალშეღწევადობაზე, კოროზიამედეგობაზე, აგრესიულ გარემოსთან მედეგობაზე.

8.პოლიმერლექობეტონის ნაპირგამმაგრებელი, ფერდოგამმაგრებელი კონსტრუქციები შესაბამის მიმდებარე კონსტრუქციებთან შედარებით გამოირჩევიან სიმსუბუქით, ხანმედეგობით, სიმტკიცითა და შავიზღვისპირეთის აგრესიული გარემოს მიმართ მედეგობით.

9.ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშებით დადგენილია პოლიმერლექობეტონის კონსტრუქციების ეკონომიკური სიიაფე, რომელიც მიიღება გოგირდბეტონის შემთხვევაში ცემენტის, ხოლო პოლიმერლექობეტონის შემთხვევაში ფოლადის ეკონომიით და ხანმედეგობის მნიშვნელოვანი გაზრდის ხარჯზე.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. სამეცნიერო ტექნიკური ჟურნალი „ენერჯია“, თბილისი, 3(51)/2009;
2. Бобохидзе К.Е. Влияние внешней среды на микроклимат жилищ Черноморского побережья, Аджария, ЦНИИЭП жилища, М., Стройиздат, 1968;
3. Алексеев С. Н. Коррозия железобетона и защита арматуры в бетоне. М., Стройиздат, 1962;
4. Практика применения суробетона за рубежом <http://newchemistry.ru/letter.php?nid=3946>
5. Патуроев В. В., Полимербетоны, СИ., М., 1987;
6. Справочник по климату. Вып. 14. Ч. I. „Солнечная радиация...“. Ч. II. „Температура воздуха и рочвы“. Ч. III. „Ветер“. Ч. IV. „Влажность воздуха“, „Атмосферные осадки“. Л., Гидрометеоздат, 1967;
7. Вербецкий Г.П. „Прочность и долговечность бетона в водной среде, Стройиздат, М., 1976, 127с;
8. მეგრელიშვილი ზ., ქიქვაძე თ., ჩხაიძე დ., „საინჟინრო ეკოლოგია და გარემოს დაცვა“, ბათუმი, 2001;
9. Баженов Ю.М., Технология бетона, М., Издательство АСВ, 2003.
10. Алексеев С.Н. и др. Долговечность железобетона в агрессивных средах, Совм. изд. СССР - ЧССР - ФРГ/С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль, М., Стройиздат, 1990;
11. Невилль А.М., Свойства бетона, Пер. с англ. В. Д. Парфенова и Т. Ю. Якуб, М., Стройиздат, 1972г, 344с;
12. Штарк И., Вихт Б., Долговечность бетона, Киев, издательство «Оранта», 2004, 295с;
13. Дерешкевич Ю.В. и др., Анतिकоррозийная защита аппаратов и строительных конструкций. Изд-во „Лесная промышленность, М., 1967;
14. Корчагина О.А., Однолько В.Г., Материаловедение, Бетоны и строительные растворы, Учебное пособие, Тамбов, Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004 г, 80 с;
15. Скрамтаев Б.Г., Попов Н.А., Герливанов Н.А., Мудров Г.Г., Строительные материалы, М., 1952г;
16. Корчагина О.А., Однолько В.Г., Бетоны и строительные растворы, Учебное пособие, Тамбов, Издательство ТГТУ, 2004;
17. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писанко Г.Н. „Высокопрочный бетон“, изд.-во литература по строительству, 207с. М., 1971;
18. Баженов Ю.М., Технология бетона, Учебник. -М.: Изд-во АСВ, 2002 - 500 стр;
19. ГОСТ 31108-2003, Цементы общестроительные. Технические условия, МНТКС;
20. Ицкович С. М., Чумаков Л. Д., Баженов Ю. М. Технология заполнителей бетона. М., Высш. шк., 1991г. 272с;
21. Kjellsen K. O., Lagtrblad B. Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars, Swedish cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1995, 41с;
22. Ицкович С.М. и др. Технология заполнителей бетона, Учеб. для строит. вузов по спец. «Производство строительных изделий и конструкций» / С. М. Ицкович, Л. Д. Чумаков, Ю. М. Баженов. - М.: Высш. шк., 1991г., 272с;
23. Виноградов Б.Н., Влияние заполнителей на свойство бетона, М., 1979, 224с;

24. Федосов С.В., Базанов С. М. Сульфатная коррозия бетона, Издательство АСВ, 2003;
25. Особенности коррозионного разрушения бетона при кристаллизации в нем этtringита и таумасита, <http://www.dissercat.com/content/issledovanie-vliyaniya-tverdykh-rastvorov-ettringit-taumasit-na-svoistva-i-korroziionnyustoi#ixzz2CsxcGGcq>;
26. Ицкович С. М., Чумаков Л. Д., Баженов Ю.М., Технология заполнителей бетона, М., Высшая школа, 1991;
27. Сульфатная коррозия бетона <http://library.stroit.ru/articles/razbet/index.html>;
28. Афанасьев Н.Ф., Целуйко М.К. „Довавки в бетоны и растворы”. К.: Будивельник, 1989, 128с;
29. Сажнев Н.П., Технология производства ячеистобетонных изделий. Теория и практика, Минск: Стрикино, 1999, 288с;
30. Дерябин П.П., Технология ячеистых бетонов, Методические указания к лабораторным работам. – Омск: СибАДИ, 2009, 32 с;
31. Лермит Р., Проблемы технологии бетона, Пер с фр./Под ред. и с предисл. Десова А.Г. – М.: Издательство ЛКИ, 2007, 296 с;
32. Реферат, Специальные виды бетона, Дальневосточный государственный институт, Кафедра строительных материалов, Владивосток 2010;
33. Михайлов К.В., Путляев И.Е. Состояние и перспективы развития легковесного строительства., Сб. науч. Труд. НИИЖБ Госстроя ССС. Легкие бетоны на основе отходов промышленности и конструкции из них. М., 1983.
34. Стефанов Б.В., Технология бетонных и железобетонных изделий, Киев: Будівельник, 197с;
35. Журавлёв В. Ф., Штейерт Н. П., Сцепление цементного камня с различными материалами. Цемент, №5, 17-19с;
36. Федосов С.В., Базанов С.М., Сульфатная коррозия бетона, М., Издательство АСВ, 2003, 191 с;
37. საყვარელიძე ა., ლუდუშაური ნ., ტურძელიძე მ., ფიბრობეტონის ასაკის გავლენა კომპოზიტის ცოცვადობაზე გრებისას, [მშენებლობა](#) - სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი, სტუ, მშენებლობის პროექტირების და ექსპერტიზის ცენტრი, თბ, 2010, ISSN 1512-3936, N3(14), გვ.30-33;
38. <http://www.rosfibra.ru/fibreconcrete>;
39. Новый вид химической продукции-полимерная сера Обзор. Информ. НТИНИИТЭХИМ, М., 1982;
40. Minke G. Schwefelbeton-Experimentem mit einem neuen Baustoff, „Deutsche Bauzeitschrit”, №10, 1978;
41. Proceedings of: Sulfur-81 an international Conference in Sulphur. Calgary, Alberta, Canada, 1981;
42. Тарасова А.Л. „Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе”, М., Стройиздат, 1982, 133с;
43. Дерябин П.П., Задорожная В.И. „Заполнители бетона”. Омск: Изд-во СибАДИ, 2006, 51с;
44. Никитин А. Е. Серные бетоны на основе серосодержавших отходов промышленного производства. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1989;
45. Тегелеков Я.К. Серные бетоны с использованием барханных песков, модифицированные нефтяными отходами. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1990;

46. Оспанова М.Ш. Шлакополимерсерные бетоны на отходах фосфорной промышленности Казахстана. Автореферат кандидатской диссертации. Алма-Ата, 1990;
47. Строительные нормы и правила. СНиП 2.05.08-85. Аэродромы. Нормы проектирования. Изд-во ЦИТП, М., 1985;
48. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях М.: Стройиздат, 1993, 82с;
49. ГОСТ 8424-72. Бетон дорожный;
50. ანთელავა ნ., ედიბერია ა., მანია გ. ალბათობის თეორიისა და მათემატიკური სტატისტიკის ამოცანათა კრებული – თბილისი: „უნივერსიტეტის გამომცემლობა“ 1980, 120გვ.;
51. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теорий случайных функций, под редакцией А.А.Светникова.- М: «Наука», 1965, 632с;
52. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВУЗОВ, Бронштейн И.М., Семендяев К.А. – М: «Наука», 1981, 720 с;
53. Мхитарян В.С. Статистические методы в управлении качеством продукции – М. «Финансы и статистика» 1982, 119 с;
54. Кузмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д. Автоматизация экспериментальных исследований – М., «Наука, Главная редакция физико-математической литературы», 1983, 392 с;
55. გვანჯი მანია, მათემატიკური სტატისტიკის ზოგიერთი მეთოდები, თბ, „საქართველოს სსრ მეცნიერებათა აკადემიის გამომცემლობა“, 1963, გვ.350;
56. Корн Г., Корн Т., Справочник по математикею. Для научных работников и инженеров, М, 1968, 720с;
57. Таблицы математической статистики. Болшев Л.Н., Смирнов Н.В. – М: «Наука, Главная редакция физико-математической литературы», 1983, 416с;
58. Лоладзе В.В. Технологические решения обеспечения эксплуатационных свойств бетонных и железобетонных изделий. . Автореферат докторской диссертации. Тбилиси, 1997;
59. Loladze V., The energy Dissipation „negative” Histeresis effect in the Modified Heavy and Light-weight concretes under the Cyclic Loading. Bulletin of the Georgian Academu of Sciences, 153 №2, Tb, 1996;
60. Лоладзе В.В. „Обратная,, петля гистерезиса пропитанных серой образцов бетона при циклических нагрузках. „труды” №1, Тбилисский институт архитектуры и строительства. Тб, 1996;
61. Лоладзе В.В. Отрицательная петля гистерезиса циклически нагружаемых образцов модифицированного тяжелого и легкого бетонов. М., СИ, журнал „Бетон и железобетон,, №6, 1997;
62. Лоладзе В.В., Кевлишвили З.Д., Абжандадзе Н.А. „Отрицательная” петля гистерезиса при циклическом нагружении образцов с остаточными внутренними напряжениями. Тезисы докладов на Международном симпозиуме по „Механике деформируемого твердого тела”, состоявшегося в Тбилиси 4-6.11.1998. Изд-во ГТУ, Тб, 1998;
63. Шейкин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. Изд.-во „Транспорт”, М., 1991;
64. Татишвили А.З. и др. Природные пористые заполнители Грузинской СССР и легкие бетоны на их основе. (Каталог-справочник), Тб, 1976;

65. გაგუნაშვილი დ., ხოჯაშვილი მ., დეკანოზიშვილი თ., საქართველოს ტერიტორიაზე განლაგებული მსუბუქი და მძიმე შემვსებების საბადოთა ნედლეულის დახასიათება, მათ საფუძველზე მიღებული ბეტონები და ბეტონის ტექნოლოგიის ზოგიერთი საკითხი, თბილისი, 1993;
66. Смирнов А.В. Технология и свойство бетона, пропитанного серой, как материала для труп. Автореферат кандидатской диссертации, Харьков, 1987;
67. Силаенков Е.С., Долговечность изделий из ячеистых бетонов, М.: Стройиздат, 1986. 176с;
68. Сажнев Н.П. „Технология производства ячеистобетонных изделий”, Теория и практика. Минск: Стрикино, 1999, 288с;
69. http://edu.dvgups.ru/metdoc/its/ekon_s/formir_str_bet/beton/Kras_1.htmю;
70. Валавадзе В.К., Лордкипანიძე М.М., Кожоридзе И.Г. А.С. №466198;
71. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М., Изд.-во АН СССР. 1949;
72. Балавадзе В.К. Новое о прочности и деформативности бетона и железобетона. Тбилиси., Месниерева, 1986;
73. Ребиндер П.А. Физико-химические исследования процессов деформации твердых тел. М., Изд.-во АН СССР, 1947;
74. Ребиндер П.А., Логинов Г.В. Изменения упругих свойств среды при проникновении жидкости в деформируемый кристалл/Доклад АН СССР, Новая серия, Т.30, №6, 1941;
75. Асланова М.С., Ребиндер П.А. Адсорбционные эффекты упругого последствия и ползучести в стеклянных волокнах/Доклады АН СССР. Т.96.2. 1954;
76. ნადირაძე ა, ბეტონის შემვსებების ტექნოლოგია, თბილისი, 1988;
77. Логинов Г.И. Влияние среды и адсорбирующих веществ на механические свойства слюд. «Журнал технической физико» Т.8, 1928;
78. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси, Изд.-во АН Груз. ССР. Т. 1963;
79. Glusklich I., Ishai O. Creep Mechanism in Cement Mortar. ACUJournal. Proc.59. Julu. 1962;
80. Фатнер С.И., Разрушение при повторных нагрузках, М., Госиздат оборонной промышленности, 1959;
81. Горюнов Ю.В., Перцов Н.В., Сумм Б.Д. „ЭффуктРебиндера,, М., Наука. 1966;
82. Шестоперов С.В., Любимова Т.Ю. „Зависимость механических свойств мономинерального вяжущего-трехкальсевого алюмината от влажности образцов,, ДАН СССР. Т.36. 6. 1952;
83. Корнилович Ю.З., Гуликова Л.Г., Строительный микропорист, Изд.-во Академии Архитектуры Укр. ССР. 1952;
84. Мощанский И.А., Плотность и стойкость бетонов, М., Госстройиздат. 1951;
85. Гийон И., Предварительно напряженный железобетон, М., Госстройиздат. 1959;
86. Лермит Р. Проблемы технологии бетона, М., Госстройиздат, 1959;
87. Столяров Я.В. Введение в теорию железобетона, М., Госстройиздат, 1941;
88. Берг О.Я., Физические основы теории прочности бетона и железобетона, М., Госстрой. 1961;
89. Natt. Proceeding of the Amer. Soc. Oftestingmaterials. Т. 7. 1907;
90. Балавадзе В.К., Надирадзе А.Д. К вопросу адсорбционного понижения прочности бетона/Сообщения АН Груз. ССР. Т.52. =2. 1968.

91. Цулукидзе П.П., Балабадзе В.К., Надирадзе А.Д. Адсорбционное влияние воды на прочность бетона при свободной и стеной деформации, М., Гидротехническое строительство, 12, 1969;
92. Балабадзе В.К., Лордкипанидзе М.М. Влияние влажности сжатого бетона и стесненности его деформации расширения на коэффициент Пуассона/ Сообщения АН Груз. ССР. Т.62/2, 1971;
93. Савин Г.Н., Концентрация напряжений около отверстий, М., Гостехиздат, 1951;
94. ГОСТ 12730-67, Водопоглощение;
95. Шейкин А.В., Строительные материалы, М., 1978;
96. ТУ-69 РСФСР 87-67, М., 1976;
97. Алексеева С.Н., Розенталь Н.К. и др. „Коррозионная стойкость железобетонных конструкции в агрессивной промышленной среде”. М., С тройиздат, 1976;
98. Баженов Ю.М., Бетонополимеры, М., Стройиздат, 1983, 472 с;
99. Изотов В.С. и др., Химические добавки для модификации бетона, М., Казанский Государственный архитектурно-строительный университет, Издательство «Палеотип», 2006, 244 с;
100. Попов К.Н., Полимерные и полимерцементные бетоны, растворы и мастики, Учебное пособие для СПТУ, М., Высш.шк., 1987, 72;
101. Казарновский В.Д., Укрепление откосов обработанным грунтом, М., Автомобильные дороги, 7, 1969;
102. Кудряшов Н.Н., Проектирование земляного полотна автомобильных дорог в лесисто-болотной местности, М., Автомобильные дороги, №4, 1965;
103. Владимиров Г.Н., Надежная конструкция укрепления подмываемых откосов, М., Автомобильные дороги, 7, 1971.