

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ნინო ქარქუსაშვილი

სხვადასვა დანამატის გავლენა კლინკერის ჰიდრატაციის  
პროცესზე და ცემენტის რეოლოგიურ თვისებებზე

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2014

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის ქიმიური ტექნოლოგიის დეპარტამენტის სილიკატების ტექნოლოგიის მიმართულებასზე.

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:----- პროფ. თამაზ გაბადაძე

რეცენზენტები: -----პროფ. ა. ნადირაძე

-----ტ.მ.კ. ე. შაფაქიძე

დაცვა შედგება -----წლის”-----”, -----საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს

სხდომაზე, კორპუსი-----, აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს

ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატის - ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი-----

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

**სამუშაოს აქტუალობა.** წარმოდგენილი სადოქტორო ნაშრომი შეეხება ისეთ აქტუალურ საკითხებს როგორცაა:

სწრაფშეკვრადი ცემენტების მიღება და მათი თვისებების კვლევა. დასაწყისშივე უნდა ავღნიშნოთ, რომ საქართველოში უკვე გასული საუკუნის 60-70 წლებში პროფ. თ. გაბადაძის მიერ მიღებული იყო და ფართოდ გამოიყენებოდა ალუნიტიანი სწრაფშეკვრადი, ზესწრაფგამაგრებადი, გაფართოებადი, დამძაბავი და სხვა სახეობის ცემენტები. ამჟამად ეს ცემენტები აღარ იწარმოება სხვადასხვა მიზეზების გამო. პროფ. თ. გაბადაძის ხელმძღვანელობით გაგრძელდა სამუშაოები ახალი სახეობის სწრაფშეკვრადი ცემენტების მიღების მიზნით ხელმისაწვდომი მასალების ბაზაზე. კერძოდ უთაბაშიროდ დაფქვილი კლინკერის ბაზაზე. ნაშრომში მოცემულია სხვადასხვა ელექტროლიტების დამატების გავლენა დაფქული კლინკერის ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე. გამოთქმულია მოსაზრება დაფქული კლინკერის შეკვრის მექანიზმის შესახებ სხვადასხვა ელექტროლიტის დამატებისას. მიღებულია სწრაფშეკვრადი მაღალი სიმტკიცის მქონე ცემენტები, რომლებიც შეიძლება გამოყენებული იყოს მშენებლობის მთელ რიგ უბნებზე. როგორცაა ჰიდროენერგეტიკა, მეტრომშენებლობა, წყალმომარაგება, მელიორაცია და სამოქალაქო მშენებლობა. დისერტაციაში დასმული საკითხების გარშემო არსებული ლიტერატურის განხილვისას ყურადღება მიიქცია ბრუნაუერის, სკალნის, ოდღერის, შპინოვას და სანიცკის შრომებმა. ისინი ზამთრის პირობებში ბეტონირებისათვის ცემენტს ამზადებდნენ უთაბაშიროდ დაფქული კლინკერის ბაზაზე, რადგან მიიჩნევდნენ, რომ თაბაშირშემცველი ცემენტის გამაგრების პირველ საათებში წარმოქმნილი კალციუმის ჰიდროსულფოალუმინატი ადრეული გაყინვის პირობებში ასრულებს დესტრუქციულ როლს (ამცირებს სიმტკიცეს).

უთაბაშიროდ დაფქული კლინკერის ძალზე სწრაფ შეკვრის ვადებს (რომლებიც პრაქტიკულად გამორიცხავენ მის გამოყენებას არაპლასტიურობისა და უმნიშვნელო სიმტკიცის გამო) მითითებული ავტორები არეგულირებდნენ პლასტიფიკატორის და პოტაშის დამატებით. ჩვენ გადავწყვიტეთ ეს ეფექტი გამოგვეყენებინა სწრაფშეკვრადი ცემენტების

მიღებისათვის. ამასთან გაგზარდეთ ამ დანამატების სია. გამოვიყენეთ რა ნატრიუმის და კალციუმის ქლორიდები, ნატრიუმის, კალიუმის, კალციუმის კარბონატები, ნატრიუმის და კალიუმის სულფატები, შაქარი, სამშენებლო თაბაშირი და სხვა პლასტიფიკატორის გარეშე.

ჩატარებულმა კვლევებმა საშუალება მოგვცა მიგველო სწრაფშეკვრადი ცემენტები პორტლანდცემენტის კლინკერის (რომელიც დიდი მასშტაბით იწარმოება საქართველოში) და არადეფიციტური, იაფი და ხელმისაწვდომი დანამატების საფუძველზე, ამასთან მათი წარმოების ტექნოლოგია შესაძლებელია განხორციელდეს ცემენტის მოქმედ საწარმოებში ცვლილებების გარეშე ან უშუალოდ სამშენებლო პოლიგონზე.

დამუშავებული ცემენტები შეიძლება გამოვიყენოთ მშენებლობის ისეთ არეებში, სადაც საჭიროა მათი სწრაფი შეკვრა (მაგ: ნაგებობებში ან კონსტრუქციებში წყალმოდინების შეჩერება), ან სამუშაოების ჩატარება დაბალ ან უარყოფით ტემპერატურებზე.

მშენებლობის თანამედროვე ტექნოლოგიებს ახასიათებთ ბეტონის ნარეგების დიდ მანძილებზე ტრანსპორტირება, გადატვირთვები და სხვ. რაც მოითხოვს დიდ დროს. ნარეგებში წყლის და ცემენტის ურთიერთქმედების შედეგად სწრაფად იწყება სტრუქტურწარმოქმნის პროცესები, რომელთა დარღვევა გარკვეული დროის შემდეგ იქნის შეუქცევად ხასიათს. ე.ი. მისი თვისებები (განსაკუთრებით სიმტკიცე) მკვეთრად უარესდება. დროის იმ ინტერვალის დადგენა, რომლის განმავლობაშიც ბეტონის ნარეგს აქვს დარღვეული სტრუქტურის თვითაღდგენის უნარი თვისებების გაუარესების გარეშე, ძალზე დიდი მნიშვნელობა აქვს მშენებლობისათვის. ამ ინტერვალის დადგენის მეთოდოლოგია ჩვენ შევიმუშავეთ რეოლოგიის მეთოდების გამოყენებით, ამასთან სათანადო რეკომენდაციის გაცემა შესაძლებელია მოხდეს სწრაფად.

### **სამუშაოს მიზანი და პრაქტიკული მნიშვნელობა.**

მშენებლობის მრავალი სფეროსთვის საჭირო სწრაფშეკვრადი ცემენტები ძნელად ხელმისაწვდომია. ჩვენი მიზანი იყო მარტივი ტექნოლოგიით არსებული მასალების ბაზაზე სწრაფშეკვრადი ცემენტების მიღება და თვისებების კვლევა, როგორც კლინკერის, ასევე ცემენტების და ხსნარების ჰიდრატაციის საკითხების შესწავლა, სხვადასხვა ჩვენ-

თვის ხელმისაწვდომი მასალების დამატებისას. ჩვენთვის საინტერესოა კლინიკურისა და ცემენტის შეკვრის პროცესების, როგორც დაჩქარება ასევე შენელება. ამ თვისებების არსებობას მოითხოვს მშენებლობის მრავალი დარგი.

შეკვრის პროცესის მკვეთრი დაჩქარება საჭიროა მშენებლობის ისეთ სფეროში, როგორცაა გვირაბებისა და სხვა ნაგებობების შიდა ზედაპირების ტორკრეტირება. ამ დროს დასაფარ ზედაპირთან შეჭიდულობის გაზრდისათვის საჭიროა ცემენტის სწრაფი შეკვრა. დიდი ფართობების ცემენტის ხსნარით დაფარვისას საჭიროა მისი ხანგრძლივი შეკვრა, რათა მოესწროს მისი დამუშავება. ცემენტის სწრაფი შეკვრა საჭიროა აგრეთვე კონსტრუქციებში და ნაგებობებში წყალმოდინების შეჩერებისათვის. გამოთქმულია მოსაზრება აღნიშნული ცემენტების წარმოების განხორციელების შესაძლებლობებზე როგორც ცემენტის ქარხანაში, ასევე უშუალოდ სამშენებლო პოლიგონზე.

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, თანამედროვე მშენებლობისათვის დამახასიათებელია ბეტონის მზა ნარეგების დიდ მანძილებზე ტრანსპორტირება და ხანგრძლივი ბეტონირება. ბეტონის ნარეგებს მხოლოდ გარკვეული დროის განმავლობაში (ტიქსოტროპიული პერიოდი) აქვთ უნარი აღიდგინონ დარღვეული სტრუქტურა საბოლოო თვისებების გაუარესების გარეშე. ნაშრომში შესწავლილია ნარეგის (ცემენტის ცომის) მომზადებიდან სხვადასხვა დროის გავლენა მის რეოლოგიურ (პლასტიურ-დენად) თვისებებზე და სიმტკიცეზე. შემუშავებულია მეთოდი მზა ნარეგის დაყალიბების დროის ოპტიმალური ხანგრძლივობის დადგენისათვის.

### **კვლევის ობიექტი და მეთოდები**

კვლევის ობიექტი იყო კომპანია „ჰაიდელბერგცემენტის“ მიერ წარმოებული კლინიკური და ცემენტი. შევისწავლიდით კლინიკურის ჰიდრატაციის და გამაგრების პროცესებს ასევე რეოლოგიურ თვისებებს სხვადასხვა დანამატის დამატების შემთხვევაში.

სამუშაოს საფუძველი იყო სტანდარტებით ГОСТ 10178-85, 310.1.4-81 და EN 197-1 გათვალისწინებული მოწყობილობა: ვიკას ხელსაწყოები ცომის ნორმალური სისქის და შეკვრის ვადების განსაზღვრისათვის,

შემრევი, ვიბრომაგიდა, სხვადასხვა ზომის ყალიბები, კუმშვაზე და ღუნვაზე სიმტკიცის ზღვრის დამდგენი აპარატები MIII-100, MC-100, MC-1000 და სხვა.

სამუშაოს შესასრულებლად გამოყენებული იყო სხვადასხვა ქიმიური რეაქტივი და ბუნებრივი მასალები. ქიმიურ ანალიზებს ვატარებდი პირადად მე „ჰაიდელბერგცემენტის“ კასპის ცემენტის ქარხნის ცენტრალურ ლაბორატორიაში.

რენტგენოსტრუქტურული ანალიზი ჩავატარეთ დიფრაქტომეტრზე „DPOH-3“ ი. ჯავახიშვილის სახელმწიფო უნივერსიტეტის არაორგანული ქიმიის და ელექტროქიმიის სამეცნიერო კვლევით ინსტიტუტში.

ცემენტების პლასტიურ სიმტკიცეს ვსაზღვრავდით VUE კონსტრუქციის კონუსურ პლასტომეტრზე.

### **ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე**

შემუშავებულია მთელი რიგი სწრაფშეკვრადი ცემენტები, დადგენილია მათი ოპტიმალური შედგენილობები, შესწავლილია ძირითადი თვისებები და გამოვლენილია გამოყენების არეები.

დადგენილია, უთაბაშიროდ დაფქული კლინკერის შეკვრის შენელების მექანიზმი და იდენტიფიცირებულია სხვადასხვა დანამატების თანაობისას ჰიდრატაციის პროცესში წარმოქმნილი ნაერთები.

რეოლოგიური მეთოდებით დადგენილია ურთიერთკავშირი წყალცემენტის ფარდობის სიდიდის, შეკვრის ვადების და ტიქსოტროპიული პერიოდის ხანგრძლივობებს შორის.

ნაჩვენებია, რომ მზა ცემენტის ცომის და ბეტონის ნარევის გამოყენების ოპტიმალური პერიოდი (ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გაუარესების გარეშე) შეადგენს ამა თუ იმ წ/ც ფარდობის შესაბამისი შეკვრის დასაწყისის ხანგრძლივობის 70-80%.

### **დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა.**

სადისერტაციო ნაშრომი წარმოდგენილია 110 ნაბეჭდ გვერდზე. იგი შედგება შესავლის, ორი თავისა და დასკვნისაგან. შეიცავს 39 ცხრილს, 9 ნახაზს და ერთვის ციტირებული ლიტერატურული ნუსხა.

## სამუშაოს ძირითადი შინაარსი

### თავი 1. სწრაფშეკვრადი ცემენტების მიღება უთაბაშიროდ დაფქული კლინკერის ბაზაზე

ცნობილია, რომ ცემენტებზე მოქმედი სტანდარტების ГОСТ 10178-85 და EN 197-1 შესაბამისად პორტლანდცემენტის და წიდაპორტლანდცემენტის შეკვრის ვადები ხანგრძლივია (დასაწყისი არა უადრესი 45 წთ, დასასრული არა უგვიანეს 10 სთ). ამ პერიოდში მათ არ გააჩნიათ სიმტკიცე, თუმცა თანდათანობით და ხანგრძლივად განიცდიან შედეგებას (ე.ი. კარგავენ ძვრადობას).

არსებობს მშენებლობის გარკვეული სფეროები, რომლებიც მოითხოვენ სწრაფშეკვრადი ცემენტის და ბეტონის გამოყენებას (ტორკრეტბეტონი, წყლიანი სატრანსპორტო გვირაბების ცემენტაცია და ინექცია, მეტროპოლიტენის ტიუბინგების და სადაწნეო მილების პირაპირების შევსება, სწრაფი გამაგრება და წყალგაუმტარებლობა, კოლხეთის დაბლობის დაჭაობებული სუსტი გრუნტის სწრაფი შეშრობა, შეკვრა, გამაგრება და სხვა).

აღნიშნული მიზნით ცნობილია ალუნიტიანი ზესწრაფგამაგრებადი წყალგაუმტარი ცემენტის მიღება და გამოყენება, მაგრამ ამისათვის საჭიროა ალუნიტის ქანის შემოტანა აზერბაიჯანიდან და მისი გამოწვა 600–700°C-ზე, რაც ხშირად სირთულეებთან არის დაკავშირებული. ამიტომ ამოცანად დავისახეთ მიგველო სწრაფშეკვრადი და დამაკმაყოფილებელი სიდიდის სიმტკიცის მქონე ცემენტები კასპის და რუსთავის ცემენტის ქარხნების პორტლანდცემენტის კლინკერების ბაზაზე. დანამატებად გამოვიყენეთ რეალიზაციაში მყოფი მზა მარილები. გამოცდილია რამოდენიმე ათეული წყალში ხსნადი ელექტროლიტი, რომელთა ნაწილის გავლენა დაფქული კლინკერის თვისებებზე მოცემულია ქვემოთ.

ჩვენს მიერ ჩატარებულია დიდი მოცულობის სამუშაო თაბაშირის გარეშე დაფქული კლინკერის (დკ) თვისებების რეგულირების საკითხებზე. კვლევის ობიექტი იყო კომპანია „ჭაიდელბერგცემენტ ჯორჯიას“ სველი მეთოდით მომუშავე რუსთავისა და კასპის ცემენტის ქარხნების,

აგრეთვე იგივე კომპანიის მშრალი მეთოდით მომუშავე „ქართული ცემენტის“ კლინკერები. რომლის ქიმიური შემადგენლობა იყო შემდეგი (%):  $\text{SiO}_2$ -21,01-21,67;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -4,85-5,77;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -2,50-2,98;  $\text{CaO}$ -66,36-67,55; ამ კლინკერის მახასიათებლები ასეთია:  $\text{KH}=0.91$ ;  $n=2.14$ ;  $p=1.43$ . ხოლო მისი მინერალოგიური შემადგენლობა კი ასეთი, %:  $\text{C}_3\text{S}=59,78$ - $68,20$ ;  $\text{C}_2\text{S}=9,88$ - $16,31$ ;  $\text{C}_3\text{A}=6,63$ - $8,41$ ;  $\text{C}_4\text{AF}=12,61$ - $14,07$ .

გამოყენებული იყო ხელმისაწვდომი დანამატები. გამოყენებულ დანამატთა უმრავლესობა (გარდა კალციუმის კარბონატისა) კარგად იხსნებოდა წყალში, რაც საშუალებას გვაძლევდა დკ-ს შემადგენლობაში ისინი შეგვეტანა, როგორც დაფქვის პროცესში ასევე უშუალოდ დკ-ს გამოყენების წინ წყალხსნარის სახით. დანამატები დკ-ს შემადგენლობაში შეგვეყავდა 1-10% ოდენობით მისი მასიდან ან ვამზადებდით შესაბამისი კონცენტრაციების წყალხსნარებს.

## 1.1. სწრაფშეკვრადი ცემენტები ნატრიუმის ქლორიდის დამატებით

გამოყენებული იყო კომპანია „Heidelbergcement“-ის მიერ წარმოებული კლინკერები. უნდა აღვნიშნოთ, რომ უთაბაშიროდ დაფქული კლინკერი იკვრება ძალზე სწრაფად, მიუხედავად მისი მაღალი წყალმომთხოვნელობისა. მიღებული ცომი სწრაფად კარგავს პლასტიურობას, რის გამოც ძნელია მისგან ნიმუშების დაყალიბება. მჭიდის მასიდან 1%  $\text{NaCl}$  (ცხრილი 1) შემცველობისას შეკვრის დასაწყისი გახანგრძლივდა. თითქოს ეს გახანგრძლივება უმნიშვნელოა (შეკვრის დასაწყისის დრო გაიზარდა 2-დან 5 წთ-მდე), მაგრამ ეს დრო საშუალებას გვაძლევს ნორმალურად ჩავატაროთ, როგორც ცემენტის ცომის მოზეღვის, ასევე დაყალიბების პროცესი. დროის ასეთი გახანგრძლივება გვაძლევს არამარტო ცემენტის ცომის ნორმალურად გამოყენების საშუალებას, არამედ მთელი რიგი სამშენებლო ოპერაციების ჩატარების შესაძლებლობასაც, მაგალითად ტორკრეტირების.



**ცხრილი 1. ნატრიუმის ქლორიდის დამატების რაოდენობის გავლენა უთაბაშიროდ დაფქვილი კლინკერის ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე**

NaCl რაოდენობა, % მჭიდის მასიდან	ცომის ნორმალური სისქე, %	შეკვრის ვადები, წთ.		სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგძ/სმ <sup>2</sup>			
		დასაწყისი	დასასრული	1 დღე	3 დღე	7 დღე	28 დღე
0	42	2	4	0	0	62	106
1	40	5	30	10	180	250	488
2	37	6	40	30	147	225	428
3	32	5	40	130	312	325	473
5	32	7	42	75	230	315	455
10	40	6	44	87	290	310	430

NaCl-ის დამატების რაოდენობის ზრდა არ ახდენს არსებით გავლენას შეკვრის დასაწყისის ხანგრძლივობაზე. უფრო არსებითად იგი მოქმედებს შეკვრის დასასრულის ხანგრძლივობაზე, რომელიც იცვლება 10-დან 44-წუთამდე.

NaCl-ის დამატების რაოდენობის შემდგომი ზრდა გარკვეულად ახანგრძლივებს შეკვრის დასაწყისს. ამავდროულად მცირდება ცომის ნორმალური სისქის სიდიდე. რაც დადებით გავლენას ახდენს ცემენტის სიმტკიცეზე. ცომის ნორმალური სისქის სიდიდე, რომელიც სჭირდება ბოლა უდანამატო კლინკერს, მცირდება 5–10%-ით. უდანამატოდ დაფქული კლინკერს 1 და 3 დღის გამაგრების შემდეგ არ გააჩნია სიმტკიცე. 7 დღის გამაგრების შემდეგ მისი სიმტკიცე არის 62, ხოლო 28 დღის გამაგრების შემდეგ 106კგძ/სმ<sup>2</sup>, რაც მიგვანიშნებს იმაზე, რომ უდანამატოდ დაფქული კლინკერის გამოყენება მიზანშეწონილი არ არის.

დანამატშემცველ კომპოზიციებს 1 დღის გამაგრების შემდეგ ყველას გააჩნია სიმტკიცე, ამასთან მაქსიმალური სიმტკიცე 130კგძ/სმ<sup>2</sup>-ზე მიღწეულ იქნა კომპოზიციაში 3% NaCl-ის შემცველობისას. ასევე მაღალია იმ კომპოზიციების სიმტკიცე, რომლებიც შეიცავენ 5 და 10% NaCl მჭიდის მასიდან.

3 დღის გამაგრების შემდეგ ყველაზე მაღალი სიმტკიცე გააჩნია 3% NaCl-ის შემცველ კომპოზიციას - 312კგძ/სმ<sup>2</sup>, ასევე მაღალია 5 და 10% NaCl შემცველი კომპოზიციების სიმტკიცე. დაახლოებით იგივე სურათია 7 დღის გამაგრების შემდეგ. 28 დღის გამაგრების შემდეგ ყველაზე მაღალი სიმტკიცე ჰქონდა კომპოზიციას, რომელიც შეიცავდა 1% NaCl-488კგძ/სმ<sup>2</sup>. პრაქტიკულად იგივე სიმტკიცე გააჩნია 3% NaCl-ის შემცველ კომპოზიციას. ყველა კომპოზიციის სიმტკიცე 28 დღის გამაგრების შემდეგ 4-4,5-ჯერ აღემატება უდანამატო დაფქვილი კლინკერის სიმტკიცეს. უთაბაშიროდ დაფქვილი კლინკერის შეკვრის და გამაგრების პროცესების ნორმალურად წარმართვისათვის მიზანშეწონილად მიგვაჩნია მასზე 1 და 3% NaCl-ის დამატება როგორც შერევით, ასევე წყალხსნარების სახით.

## 1.2. სწრაფშეკვრადი ცემენტები კალციუმის ქლორიდის დამატებით

ცდების ამ სერიაში კალციუმის ქლორიდი შეგვყავდა წყალხსნარის სახით. წყალხსნარების კონცენტრაცია იყო ისეთი, რომ CaCl<sub>2</sub>-ის რაოდენობა მჭიდის მასის მიმართ ყოფილიყო 1, 2, 3, 5, და 10%.

ამ დანამატის, როგორც შეკვრის და ძირითადად გამაგრების დამახჩარებლად გამოყენების საკითხებს მრავალი შრომა მიეძღვნა, მაგრამ მათი და ჩვენი მიდგომა აღნიშნული პროცესების დაჩქარებაზე განსხვავებულია. ჩვენ გვინდა მივიღოთ სწრაფი შეკვრა და გამაგრება (წუთებში და საათებში), ხოლო აღნიშნულ შრომებში აქცენტი გაკეთებულია გამაგრების შორეულ ვადებზე.

უთაბაშირო და უდანამატო დაფქული კლინკერის სწრაფ შეკვრაზე და პლასტიურობის სწრაფ დაკარგვაზე ზემოთ ავლნიშნეთ.

მჭიდის მასიდან 1% CaCl<sub>2</sub>-ის შემცველობისას შეკვრის დასაწყისი გაიზარდა 2-დან 4-წუთამდე. ეს მცირე ცვლილება თითქოს უმნიშვნელოა, მაგრამ სრულიად საკმარისია იმისთვის, რომ ნიმუშები თავისუფლად დაგვეყალიბებინა.

**ცხრილი 2. კალციუმის ქლორიდის დამატების რაოდენობის გავლენა უთაბაშიროდ დაფქვილი კლინკერის ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე**

CaCl <sub>2</sub> რაოდენობა, %, მჭიდის მასიდან	ცომის ნორმალური სისქე, %	შეკერის ვადები, წთ.		სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგძ/სმ <sup>2</sup>			
		დასაწყისი	დასასრული	1 დღე	3 დღე	7 დღე	28 დღე
0	42	2	4	0	0	62	106
1	36	4	15	25	112	210	463
2	36	10	43	25	195	250	458
3	36	20	70	25	197	290	497
5	35	40	85	50	145	290	480
10	32	50	92	60	172	320	530

CaCl<sub>2</sub>-ის დამატების რაოდენობის შემდგომი ზრდა ახანგრძლივებს შეკერის დასაწყისს 10-დან 50-წუთამდე და ამავე დროს ამცირებს ცომის ნორმალური სისქის სიდიდეს 36-დან 32%-მდე, რაც დადებით გავლენას ახდენს ცემენტის სიმტკიცეზე.

დანამატშემცველ კომპოზიციებს 1 დღის გამაგრების შემდეგ მაქსიმალური სიმტკიცე 60 კგძ/სმ<sup>2</sup> აქვს 10% CaCl<sub>2</sub>-ის შემცველ კომპოზიციას.

3 დღის გამაგრების შემდეგ ყველაზე მაღალი სიმტკიცე გააჩნია 3% CaCl<sub>2</sub> შემცველ კომპოზიციას, ასევე მაღალია CaCl<sub>2</sub>-ის შემცველი ყველა კომპოზიციის სიმტკიცეებიც.

7 დღის გამაგრების შემდეგ ყველაზე მაღალი სიმტკიცე აქვს 3 და 5% კალციუმის ქლორიდის შემცველ კომპოზიციას - 290 კგძ/სმ<sup>2</sup>. ასევე მაღალია 1, 2, 10% CaCl<sub>2</sub> შემცველი კომპოზიციების სიმტკიცეებიც.

28 დღის გამაგრების შემდეგ CaCl<sub>2</sub> შემცველი ყველა კომპოზიციის სიმტკიცე 3-4-ჯერ აღემატება უდანამატო დაფქვილი კლინკერის სიმტკიცეს. ოპტიმალურად შეიძლება მივიჩნიოთ 3% CaCl<sub>2</sub>-ის დამატება, რადგან მისი სიმტკიცე 28 დღის გამაგრების შემდეგ არის 497 კგძ/სმ<sup>2</sup>.

CaCl<sub>2</sub> დამატების რაოდენობის ცვლილება საშუალებას გვაძლევს ვარეგულიროთ (გავახანგრძლივოთ) შეკერის ვადების (განსაკუთრებით

შეკვრის დასაწყისი) სიდიდე, რაც ძალზე მნიშვნელოვანია ტექნოლოგიური პროცესის მსვლელობისათვის.

### 13. სწრაფშეკვრადი ცემენტები კალციუმის კარბონატის დამატებით

საინტერესო იყო ორვალენტიანი კათიონის შემცველი კარბონატის გავლენის შესწავლა. ყველაზე ხელმისაწვდომად მივიჩნიეთ შეგვესწავლა კალციუმის კარბონატის (კირქვის) დამატების გავლენა უთაბაშიროდ დაფქვილი კლინკერისაგან დამზადებული მჭიდზე. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ კალციუმის კარბონატი პრაქტიკულად უხსნადია წყალში.

განსხვავებით სხვა სერიებისაგან, სადაც სხვა დანამატები კომპოზიციაში შეგვყავდა წყალხნარის სახით, კალციუმის კარბონატი კომპოზიციაში შეგვყავდა შერევით მჭიდის მასიდან 5, 10, 20%. ცდის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 3.

**ცხრილი 3. კალციუმის კარბონატის დამატების რაოდენობის გავლენა უთაბაშირო კლინკერის ცომის ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე**

CaCO <sub>3</sub> რაოდენობა, %, მჭიდის მასიდან	ცომის ნორმალური სისქე, %	შეკვრის ვადები, წთ.		სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგ/სმ <sup>2</sup>			
		დასაწყისი	დასასრული	1 დღე	3 დღე	7 დღე	28 დღე
0	42	2	4	0	0	62	106
5	38	4	8	125	245	380	578
10	38	5	19	100	125	300	425
20	36	5	30	80	100	270	400

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს 5 და 10% კალციუმის კარბონატის დამატებამ უმნიშვნელოდ შეამცირა ცომის ნორმალური სისქის მაჩვენებელი (42–დან 38%), ხოლო შეკვრის დასაწყისი უდანამატო კლინკერთან შედარებით პრაქტიკულად არ შეიცვალა. შეკვრის დასასრული კი უმნიშვნელოდ გახანგრძლივდა.

რაც შეეხება კალციუმის კარბონატის 20%-ის შემცველ მჭიდს, ცომოს ნორმალური სისქის სიდიდე შემცირდა, ხოლო შეკვრის დასაწყისი გახანგრძლივდა 5 წუთამდე, დასასრული კი 30 წუთამდე.

კალციუმის კარბონატის შემცველ ყველა კომპოზიციას გააჩნია გარკვეული სიმტკიცე. მათგან ყველა ვადებში თავისი მაჩვენებლებით გამოირჩევა კომპოზიცია, რომელიც შეიცავდა 5% კირქვას.

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს, კალციუმის კარბონატი ყველაზე ნაკლებეფექტურია როგორც შეკვრის ვადების რეგულირების, ასევე სიმტკიცის ზრდის მიზნით.

#### 14. სწრაფშეკვრადი ცემენტები კალიუმის სულფატის დამატებით

კალიუმის სულფატის შედარებით შეზღუდული ხსნადობის გამო, ამ დანამატის  $3\pm 10\%$  მჭიდის მასიდან კომპოზიციაში შეყვანა წყალხსნარების სახით შედარებით ძნელი იყო. ამიტომ ისინი კომპოზიციებში შეგვყავდა შერევით. ცდის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 4.

**ცხრილი 4. კალიუმის სულფატის დამატების რაოდენობის გავლენა უთაბაშირო კლინკერის ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე**

K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> რაოდენობა, %, მჭიდის მასიდან	ცომის ნორმალური სისქე, %	შეკვრის ვადები, წთ.		სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგ/სმ <sup>2</sup>			
		დასაწყისი	დასასრული	1 დღე	3 დღე	7 დღე	28 დღე
0	42	2	4	0	0	62	106
1	35	2	3	85	210	410	670
3	36	4	12	100	280	484	720
5	36	4	12	112	262	398	435
10	37	5	16	162	310	358	400

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს კალიუმის სულფატის ხეგავლენა პრაქტიკულად უმნიშვნელოა შეკვრის ვადების ხანგრძლივობაზე, მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ მიუხედავად ცომის შეკვრის მოკლე ვადებისა ცომი იყო გაცილებით პლასტიური და უფრო დამყო-

ლი. მიგვაჩნია, რომ დადებითი როლი შეასრულა სულფატონის არსებობამ.

ამ დანამატმა 5–7% შეამცირა წყალმომთხოვნელობა, რაც დადებითად აისახა სიმტკიცის მაჩვენებლებზე. 1 და 3 დღის გამაგრების შემდეგ ყველაზე მაღალი სიმტკიცე ჰქონდა 10% კალიუმის სულფატის შემცველ კომპოზიციას 162–310 კგ/სმ<sup>2</sup>. გამაგრების შემდგომ ვადებში კი მისი სიმტკიცე დანარჩენ კომპოზიციებთან შედარებით დაბალია.

სიმტკიცის, როგორც ალების მაღალი ტემპით, ასევე საბოლოო მაჩვენებლებით გამოირჩევა 3% K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> შემცველი კომპოზიცია.

### 1.5. სპეცციემენტების სიმტკიცე გამაგრების პირველ საათებში სხვადასხვა ელექტროლიტის დამატებისას

ცხრილში 5 მოყვანილია ოპტიმალური რაოდენობით სხვადასხვა ელექტროლიტის დამატების გავლენის შედეგები დკ-ს თვისებებზე, როგორცაა ცომის ნორმალური სისქის, შეკვრის ვადების და დაყალიბებიდან გამაგრების პირველ საათებში სიმტკიცის მაჩვენებლები.

**ცხრილი 5. სხვადასხვა ელექტროლიტის დამატების გავლენა დაფქვილი კლინკერის ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე**

ელექტროლიტის		ცომის ნორმალური სისქე, %	შეკვრის ვადები, წთ		სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგ/სმ <sup>2</sup>	
დასახელება	რაოდენობა დკ-ს მასიდან, %		დასაწყისი	დასასრული	6 სთ	12 სთ
0	0	42	2	4	0	0
NaCl	1	40	5	30	5	10
CaCl <sub>2</sub>	1	36	4	15	8	12
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2	29	4	9	12	45
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1	41	10	38	15	20
CaCO <sub>3</sub>	5	38	4	8	15	40
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3	36	4	12	16	45
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	40	8	48	18	45

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს ყველა დანამატმა შეამცირა ცომის ნორმალური სისქის სიდიდე. შემცირება ყველაზე არსებითია ნატრიუმის კარბონატის დამატების შემთხვევაში (42%-დან 29%-მდე). ყველა გამოყენებული დანამატი ახანგრძლივებს შეკვრის ვადებს დკ-თან შედარებით. დანამატებმა გაახანგრძლივეს შეკვრის დასაწყისი 2 წუთი-

დან 4-10 წუთამდე. შესაბამისად გაახანგრძლივეს შეკვრის დასასრულის პერიოდიც. ყველაზე მცირე შეკვრის დასასრულის პერიოდი აქვს კარბონატ შემცველ დანამატებს. თითქოს ასეთი უმნიშვნელო გაახანგრძლივება საშუალებას გვაძლევს ჩავატაროთ ბევრი ტექნოლოგიური ოპერაცია. იქნება ეს გადატუმბვა, ზედაპირზე დატანა, ღრეჩობის შესება და სხვა.

აღსანიშნავია, რომ გამოყენებულ დკ-ს არ გააჩნია სიმტკიცე არათუ გამაგრების პირველ 6-12 სთ-ში არამედ 1 და 3 დღე-ღამის გამაგრების შემდეგაც კი. მაშინ როცა, ყველა გამოყენებული დანამატის თანობისას უკვე 6სთ-ში მიიღწევა სიმტკიცე 5-18კგძ/სმ<sup>2</sup> ფარგლებში. რაც სრულიად საკმარისია იმისათვის, რომ წყალმოდინებისას ცემენტი არ იქნეს წატაცებული.

გამოყენებული დანამატები მოგვცემენ საშუალებას ვიმუშაოთ დაბალ და უარყოფით ტემპერატურებზეც, რადგან ისინი დაბლა სწევენ წყლის გაყინვის ტემპერატურას. აქ გვაქვს პრაქტიკულად სრული ანალოგია ჩვეულებრივ თაბაშირ შემცველ ცემენტებთან. EN-197-1-ის მიხედვით გამოცდისას დადგინდა, რომ შესწავლილი ცემენტები მიეკუთვნება კლასს 22,5-32,5.

## **1.6. დამუშავებული სპეცცემენტების შეკვრის და გამაგრების მექანიზმის შესახებ**

რაც შეეხება შეკვრის ვადების შენელების ქიმიზმს, მიგვაჩნია, რომ უთაბაშირო კლინკერის შეკვრის ვადების ამა თუ იმ სიდიდით გაახანგრძლივებას იწვევს ის აფსკები, რომელიც წარმოიქმნება კლინკერის მინერალების წყლიან გარემოში. განსაკუთრებით სამკალციუმიანი ალუმინატის ურთიერთქმედებით ამა თუ იმ დანამატთან. C3A ხაზს ვუსვამთ იმიტომ რომ, იგი გამოირჩევა ჰიდრატაციის სწრაფი უნარით და არის ძირითადი გამომწვევი ჩქარი შეკვრისა. ჩვენი აზრით, დანამატები ამ მინერალთან წარმოქმნიან სხვადასხვა კომპლექსურ ნაერთებს, რომლებიც აფსკის სახით (ანალოგია ჩვეულებრივი ცემენტის შეკვრის პროცესთან) გადაეკვრება ცემენტის მარცვლებს და ხელს უშლის წყლის შეღწევას მარცვლის სიღრმით ფენებში. აფსკის მდგრადობა

განაპირობებს შეკვრის ვადების ხანგრძლივობას. აფსკების სისქე და დროში მდგრადობა კი უშუალო კავშირშია დანამატის კონცენტრაციასთან. შეკვრის ვადები კანონზომიერად იცვლება ერთი რომელიმე დანამატის რაოდენობის ცვლილებასთან ერთად, მაგრამ სხვადასხვა დანამატის შემთხვევაში თუნდაც ერთნაირი კათიონის ან ანიონის შემთხვევაში ეს კანონზომიერება ძნელი დასადგენია.

გამოყენებული დანამატები მსგავსად თაბაშირისა, კლინკერის სამკალციუმიან ალუმინატთან ( $C_3A$ ) რეაგირებისას წარმოქმნიან მაკროანირებელ აფსკებს. მაგალითად  $CaCO_3$  დამატებისას წარმოიქმნება კარბონატული კომპლექსები  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$  [d, A (7,60; 3,80; 2,86)] და  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCO_3 \cdot 32H_2O$  [d, A (9,41; 3,80; 2,70; 2,51)]. კალციუმის ქლორიდის დამატებისას კალციუმის ქლორალუმინატები:  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  [d,A (7,91; 3,94; 3,81; 2,35; 2,15),  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCl_2 \cdot 30H_2O$  და სხვა ნაერთები.

აღნიშნულ ნაერთთა წარმოქმნის დადასტურების მიზნით ჩატარებული იქნა რენტგენოსტრუქტურული კვლევები. ანალიზი ჩატარდა არაპიდრატირებულ დაფქულ და ჰიდრატირებულ კლინკერებს და შედარებისთვის ამავე კლინკერის ბაზაზე თაბაშირის თანაობისას დამზადებულ ცემენტებს, აგრეთვე სავადასხვა დანამატთან ერთად ჰიდრატირებულ კლინკერებს. აღნიშნული საკითხი დეტალურად არის განხილული დისერტაციაში. აქ აღვნიშნავთ, რომ არსებითი განსხვავება ჰიდრატირებულ კლინკერსა და ცემენტს შორის მდგომარეობს პირველში სულფოალუმინატური ფაზების არარსებობაში. გამოყენებული დანამატები პირველ რიგში რეაგირებენ სამკალციუმიან ალუმინატთან და წარმოქმნიან ზემოთ აღნიშნულ რთულ კომპლექსებს, რომელთა იდენტიფიცირება გარკვეული სირთულეების მიუხედავად (მცირე რაოდენობა, პიკების ურთიერთგადაფარვა და სხვა) გამო მაინც მოხერხდა.



## თავი 2. ცემენტების თვისებების რეგულირება რეოლოგიური მეთოდების საშუალებით

სამშენებლო სამუშაოთა სახის და სპეციფიკის მიხედვით ბეტონირების პროცესმა შეიძლება მოითხოვოს სხვადასხვა დრო (რამდენიმე წუთიდან რამდენიმე საათამდე). მთელი ამ პერიოდის განმავლობაში ბეტონის (ან ხსარის-ღუღაბის) ნარევი უნდა შეინარჩუნოს საჭირო ადვილჩაწყობადობა. ამ თვისების ხანგრძლივი შენარჩუნების ყველაზე ადვილი და მარტივი გზაა წყალცემენტის ფარდობის გაზრდა ან წყლის დამატება ბეტონირების პროცესში. მაგრამ აღნიშნული ზომები უარყოფითად მოქმედებს ბეტონის გამაგრების ტემპზე და ბეტონის სხვა მახასიათებლებზე. ბოლო დროს ფართო გამოყენება ჰპოვეს პლასტიფიკატორებმა (და სუპერპლასტიფიკატორებმა), რომლებიც საშუალებას იძლევიან შევამციროთ:  $V/C$  ფარდობის სიდიდე, ცემენტის ხარჯი ბეტონში და ამასთან შევინარჩუნოთ (და გავაუმჯობესოთ კიდევ) ადვილჩაწყობადობის ხარისხი. პლასტიფიკატორების გამოყენების ხაზით საქართველოში დიდი სამუშაოებია ჩატარებული პროფ. ა. ნადირაძის და მისი თანამშრომლების მიერ. ცემენტის შეკვრის დასაწყისის ხანგრძლივობის სიდიდიდან გამომდინარე, ხშირად ბეტონირების პროცესის საუკეთესო პერიოდის ხანგრძლივობაზე მსჯელობენ, გამომდინარე შეკვრის დასაწყისის ხანგრძლივობის სიდიდიდან. ჩვენი აზრით, ეს სწორი არ არის, რადგან მშრალი ბეტონის ნარევის წყალთან ურთიერთქმედების საწყისი მომენტიდანვე იწყება სტრუქტურწარმოქმნის პროცესები, როგორც ბეტონის ნარევიში მყოფ ცემენტში, ასევე თვით ბეტონის ნარევიშიც. ბეტონირების პროცესში იძულებით მრავალჯერადად ხდება ბეტონის ნარევიში მიმდინარე სტრუქტურწარმოქმნელი პროცესების დარღვევა (მაგ.: ტრანსპორტირება, გადმოტვირთვა, თვით ბეტონირება და სხვა).

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ცემენტის წყალთან ურთიერთქმედების საწყისიდანვე წარმოიქმნება კოაგულაციური სტრუქტურები. მათ ახასიათებთ შექცევადობა–დარღვეული სტრუქტურის თავისთავად აღდგენის უნარი საბოლოო თვისებების გაუარესების გარეშე, ამასთან არაერთჯერადად. ამ მოვლენას ეწოდება ტიქსოტროპია.

მაგრამ, ცემენტის ცომი ან ბეტონის ნარევი ამ შექცევადობის უნარს ინარჩუნებს ხანმოკლე დროით (ყველა შემთხვევაში ცემენტის შეკვრის დასაწყისის ხანგრძლივობაზე ნაკლები დროით). დროის ეს მონაკვეთი (წყალთან შერევის მომენტიდან თვისებების გაუარესების გარეშე დარღვეული სტრუქტურის აღდგენის უნარის დაკარგვამდე) დგინდება რეოლოგიური კვლევებით. ჩვენ შემთხვევაში ვიყენებდით კონუსურ პლასტომეტრს. ცდებს ვატარებდით შემდეგნაირად: ვიღებდით 350გ ცემენტს, ვზედდით ცომის ნორმალური სისქის შესაბამისი ან სხვა რაოდენობის წყლით და ვათავსებდით რგოლში ზომებით, მმ ( $=100$ ,  $=40$ ). რგოლს ვდგამდით პლასტომეტრის მოძრავ მაგიდაზე და ცომის ზედაპირი მოგვეყავდა შეხებაში პლასტომეტრის კონუსის წვეროსთან. დროის ტოლ მონაკვეთებში კონუსს ვყურსავდით ერთი და იგივე სიღრმეზე ცემენტის ცომის სხვადასხვა ადგილას. ჩაყურსვის სიღრმეს ვადგენდით საათის ტიპის ინდიკატორის მეშვეობით (ინდიკატორის სკალის დანაყოფის ფასი 0,01 მმ). ჩაყურსვის სიღრმე ყველა შემთხვევაში შეადგენდა 5მმ. აღნიშნულ სიღრმეზე კონუსის ჩაყურსვისათვის საჭირო ძალას ვსაზღვრავდით პლასტომეტრის უძრავი და მოძრავი სკალების მეშვეობით, რომელთა დანაყოფის ფასია 5გ (0,005კგ). პლასტიური სიმტკიცის სიდიდეს, კგძ/სმ<sup>2</sup>.

საქართველოში წარმოებული ცემენტების რეოლოგიური თვისებები პრაქტიკულად არ არის შესწავლილი. ამჟამად ძირითადად იწარმოება მაღალალიტური ცემენტები. ამიტომ საჭიროდ ჩავთვალეთ პირველი რიგის კვლევები ჩაგვეტარებინა ადგილობრივი ქარხნების მიერ წარმოებულ პორტლანდცემენტებზე. კვლევისათვის გამოვიყენეთ კომპანია ჰაიდელბერგცემენტის რუსთავის და კასპის ცემენტის ქარხნების მიერ წარმოებული კლინკერების ბაზაზე დამზადებული უდანამატო და დანამატიანი პორტლანდცემენტები. ყველა ცემენტი შეიცავდა 5% თაბაშირს ცემენტის მასიდან, ხოლო საჭიროების შემთხვევაში ამა თუ იმ სახეობის დანამატს გარკვეული რაოდენობით. ცემენტები იფქვებოდა ისე, რომ დაფქვის ხვედრითი ზედაპირი ყოფილიყო 3000-3200 სმ<sup>2</sup>/გ ფარგლებში. ცდების პირველი სერია ჩატარდა უდანამატო პორტლანდ-ცემენტზე. აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ ორივე ქარხნის მიერ წარმოე-

ბული კლინკერების მინერალოგიური შედგენილობა ძალზე ახლოსაა ერთმანეთთან. საკვლევი ცემენტის ცომის ნორმალური სისქის სიდიდე შეადგენდა 24%. შეკვრის ვადები, სთ-წთ: დასაწყისი 1-35, დასარული 6-15. მარკა ГОСТ 10178-85 მიხედვით შეადგენდა 500, ხოლო EN 197-1 მიხედვით მიეკუთვნებოდა კლასს 42,5. დამატებით შევისწავლიდით საკვლევი ცემენტების სიმტკიცეს ცომში (1:0), რომლის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 6.

**ცხრილი 6. ცემენტის ფიზიკო-მექანიკური თვისებების დამოკიდებულება წ/ც ფარდობის სიდიდეზე.**

წ/ც	შეკვრის ვადები, წთ		სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგძ/სმ <sup>2</sup>			
	დასაწყისი	დასასრული	1დ.	3დ.	7დ.	28დ.
0.24	62	280	375	580	815	1020
0.28	75	330	340	520	740	960
0.30	108	470	280	410	625	880
0.35	142	660	125	210	475	720
0.40	185	775	55	140	375	675

ამავე ცხრილში ნაჩვენებია შესწავლილ საკვლევი ცემენტზე წყალ/ცემენტის ფარდობის ცვლილების გავლენა მის შეკვრის ვადებზე და სიმტკიცეზე. წ/ც ფარდობის მნიშვნელობის ზრდა ახანგრძლივებს შეკვრის ვადებს და ამცირებს სიმტკიცეს გამაგრების ყველა ვადებში, ცხრილში მოყვანილი სურათი გარკვეული მიახლოებით ასახავს სხვა ცემენტებზე ჩატარებულ ცდებს და ამიტომ ამ შედეგების მოყვანა არ ჩავთვალეთ მიზანშეწონილად.

ცხრილში მითითებული წ/ც ფარდობებით დავაყალიბეთ ნიმუშები დროში პლასტიური სიმტკიცის ცვლილების შესასწავლად. რეოლოგიურ თვისებებს შევისწავლიდით კონუსური პლასტომეტრის მეშვეობით. პლასტიური სიმტკიცე განისაზღვრებოდა ფორმულით:

$$F=K \times P/h^2,$$

სადაც, K-ხელსაწყოს მუდმივაა, დამოკიდებული კონუსის წვეროსთან კუთხის სიდიდეზე. ჩვენ შემთხვევაში იგი ტოლია 0,658;

h-კონუსის ჩაყურსვის სიღრმე, სმ;

P-ჩაყურსვაზე მიყენებული ძალის სიდიდე, კგძ.  $P=n*0,005$ , სადაც n- უძრავი და მოძრავი სკალეების მეშვეობით ათვლილი დანაყოფთა რიცხვია. კვლევის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 7.

**ცხრილი 7. ცემენტის პლასტიური სიმტკიცის დამოკიდებულება წ/ც ფარდობის სიდიდეზე**

კონუსის ჩაყურსვის დრო, წთ	პლასტიური სიმტკიცე, კგძ/სმ <sup>2</sup> , წ/ც სიდიდისას				
	0,24	0,27	0,30	0,35	0,40
მაშინვე	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
10 წთ.შემდეგ	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000
20 წთ.შემდეგ	0,040	0,022	0,013	0,000	0,000
30 წთ.შემდეგ	0,085	0,055	0,040	0,015	0,000
40 წთ.შემდეგ	0,130	0,085	0,062	0,035	0,013
50 წთ.შემდეგ	0,360	0,135	0,078	0,048	0,026
60 წთ.შემდეგ	0,510	0,340	0,100	0,065	0,035
70 წთ.შემდეგ		0,550	0,165	0,082	0,052
80 წთ.შემდეგ			0,310	0,110	0,075
90 წთ.შემდეგ			0,530	0,170	0,120
100 წთ.შემდეგ				0,315	0,155
120 წთ.შემდეგ				0,550	0,285
130 წთ.შემდეგ					0,525

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს, წ/ც ფარდობის ნებისმიერ შემთხვევაში პლასტიური სიმტკიცის ზრდის პროცესში გამოიყოფა სამი პერიოდი: 1-როდესაც ცემენტებს აქვთ პლასტიური სიმტკიცის ძალზე მცირე მნიშვნელობები (0,000 – 0,120 კგძ/სმ<sup>2</sup>), რაც შეესაბამება ინდუქციურ (ანუ სტრუქტურწარმოქმნის შენელებულ პროცესებს; ეს კი ძირითადად გამოწვეულია კალციუმის ჰიდროსულფოალუმინატის წარმოქმნით; 2-ამ დროს ცემენტების გამაგრება ხასიათდება პლასტიური სიმტკიცის ზრდით; და 3-ხასიათდება პლასტიური სიმტკიცის მკვეთრი

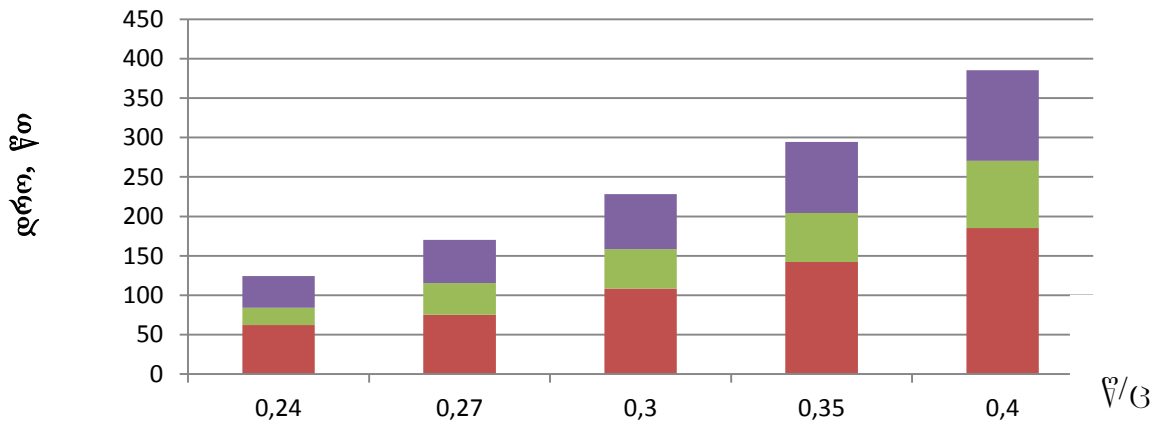
ზრდით, რასაც მივყევართ ცემენტების შეკვრის დასაწყისის და შემდგომ დასასრულის პროცესებამდე.

პირველი პერიოდის ხანგრძლივობები  $\nabla/\nabla$  ფარდობის ზრდის შესაბამისად იზრდება, მაგრამ ყველა შემთხვევაში პლასტიური სიმტკიცის მკვეთრი ზრდა შეინიშნება მაშინ, როცა მისი სიდიდე აღწევს 0,30–0,35 კგ/სმ<sup>2</sup>. აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ ცნობილი მონაცემების (ურიევი) მიხედვით ცემენტის წყალთან შერევის საწყის მომენტში პლასტიური სიმტკიცის სიდიდე ტოლია 0,0005–0,005 კგ/სმ<sup>2</sup>. შეკვრის დასაწყისის მომენტისათვის იგი აღწევს 0,7–1,5, ხოლო შეკვრის დასასრულისათვის მიიღწევა სიმტკიცე 5 კგ/სმ<sup>2</sup>-მდე.

ზემოთქმულის დადასტურებისათვის ნახაზზე 1 მოყვანილია ტიქსოტროპიული პერიოდის და შეკვრის ვადების ხანგრძლივობების ურთიერთდამოკიდებულების სურათი.

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს, ტიქსოტროპიული, ანუ დაყალიბებისათვის ყველაზე საუკეთესო პერიოდის ხანგრძლივობა (რათქმა უნდა ცემენტზე წყლის დასხმის მომენტიდან) შეადგენს შეკვრის დასაწყისის ხანგრძლივობის 65-70%.

ცემენტების გამაგრების საწყის პერიოდში ტიქსოტროპიული პერიოდის ხანგრძლივობის მნიშვნელობის დაზუსტებისათვის ჩატარებულ იქნა ცდების სერია, ცემენტზე წყლის დასხმის მომენტიდან დაყალიბების სხვადასხვა დროის გავლენის შესწავლისათვის. ცემენტები ყალიბდებოდა ზემოთ მოყვანილი  $\nabla/\nabla$  ფარდობების შესაბამისი ოდენობის წყლით. ნიმუშები ყალიბდებოდა ცემენტის ცომის მომზადებისთანავე და შემდეგ დროის გარკვეული, ტოლი მონაკვეთების შემდეგ. ყოველი დაყალიბების წინ ხდებოდა ცემენტის ცომის გადაზელება 1წთ განმავლობაში. დიდი რაოდენობის მონაცემებისგან განტვირთვის მიზნით ცხრილში 8 მოყვანილია ცემენტების ფიზიკო-მექანიკური მაჩვენებლები იმ შემთხვევისათვის, როცა  $\nabla/\nabla$  ფარდობა ტოლია 0,24% (შეესაბამება საკვლევი ცემენტის ცომის ნორმალური სისქის სიდიდეს) და 0,35% (შეესაბამება სხმულ მასას).



**ნახ. 1. ტექსტროპიული პერიოდის და შეკვრის ვადების ხანგრძლივობის დამოკიდებულება წ/ც ფარდობის სიდიდეზე**

**შენიშვნა:** სვეტების სიმაღლე შეესაბამება ხანგრძლივობას, წთ: ქვედა ნაწილის-ტიქსოტროპიული პერიოდის, სვეტების ქვედა და შუა ნაწილების სიმაღლეების ჯამი-შეკვრის დასაწყისის, სვეტების მთლიანი სიმაღლე-შეკვრის დასასრულის.

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს, ცხრილში 8 წ/ც ფარდობის ყოველ მნიშვნელობას შეესაბამება დროის გარკვეული პერიოდი, რომლის განმავლობაშიც არამარტო შენარჩუნდება, არამედ უმჯობესდება კიდევ ცემენტების ფოზიკო-მექანიკური მაჩვენებლები. მაგალითად როცა წ/ც ფარდობა ტოლია 0,24, წყლის დასხმიდან 10 და 20 წუთის შემდეგ დაყალიბებული ნიმუშების სიმტკიცე გამაგრების ყველა ვადებში აღემატება მაშინვე დაყალიბებული ნიმუშების სიმტკიცეს, ხოლო 28 დღის გამაგრების შემდეგ მათი სიმტკიცე არსებითად (14-15%-ით) მეტია. წ/ც აღნიშნული ფარდობისას თვისებების გაუარესების გარეშე ნიმუშების დაყალიბება შესაძლებელია 30 წუთის განმავლობაში ცემენტის ცომის მომზადების მომენტიდან.

როცა წ/ც=0,35 დროის ეს ინტერვალი (თვისებების შენარჩუნების) იზრდება 60 წუთამდე. ეს ფაქტი, ჩვენი აზრით, უნდა მნიშვნელოვანი იყოს მშენებლებისათვის.

ანალოგიური დამოკიდებულება მივიღეთ სხნარების რეოლოგიური თვისებების შესწავლის დროს. მხოლოდ აქ პლასტიური სიმტკიცის

განსაზღვრის ნაცვლად ესაზღვრავდით ცემენტის ხსნარის განშლადობას (დენადობას) დროში.

**ცხრილი 8. წყლის დახსმის მომენტიდან სხვადასხვა დროს დაყალიბების გაგლეხა ნიმუშების სიმტკიცეზე ცომში (1:0)**

წ/ც	ნიმუშების დაყალიბების დრო წყლის დახსმის მომენტიდან, წთ	სიმტკიცის ზღვარი კუმშვაზე, კგძ/სმ <sup>2</sup>			
		1 დღე	3 დღე	7 დღე	28 დღე
0.24	მაშინვე	360	560	805	1030
	10	370	585	875	1180
	20	375	580	860	1155
	30	320	525	835	1080
	40	280	415	670	860
	50	110	275	430	645
0.35	მაშინვე	55	140	375	675
	20	68	145	420	740
	40	60	150	410	728
	60	58	140	390	635
	80	50	125	265	580
	100	35	90	180	410

შენიშვნა: ცდების შეწვეგება განპირობებულია ნიმუშების დაყალიბების სირთულით.

**2.1. პლასტიური სიმტკიცის და წ/ც ფარდობის დროში დამოკიდებულების მათემატიკური მოდელირება**

როგორც ცხრილი 7-დან ჩანს არსებობს გარკვეული დამოკიდებულება კონუსის ჩაყურსვის დროსა და ცემენტის პლასტიურ სიმტკიცეს კგძ/სმ<sup>2</sup> შორის. ჩვენ შევეცადეთ ეს დამოკიდებულება წარმოგვედგინა შემდეგი პოლინომის (მათემატიკური მოდელი) სახით.

$$y=f(X)=b_0+b_1+b_1x+b_2x^2+\dots$$

სადაც, y-კონუსის ჩაყურსვის დროა, წთ.

X-ცემენტის პლასტიური სიმტკიცე, კგძ/სმ<sup>2</sup>.

კოეფიციენტები  $a, b, c, \dots$  უნდა შეირჩეს ისე, რომ ცდომილება ექსპერიმენტულ მონაცემებსა და განტოლებით მიღებულ შედეგებს შორის იყოს მინიმალური. ამისათვის უნდა შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა:

$$1) nb_0 + (X_1 + X_2 + X_3 \dots) * b_1 + (X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 \dots) + b_2 (X_1^3 + X_2^3 + X_3^3 \dots) = y_1 + y_2 + y_3$$

$$2) (X_1 + X_2 + \dots) * b_0 + (X_1^2 + X_2^2 \dots) * b_1 + (X_1^3 + X_2^3 \dots) * b_2 + \dots = y_1 X_1 + y_2 X_2 + y_3 X_3 + \dots$$

$$m+1) (X_1^2 + X_2^2 + \dots) * b_0 + (X_1^3 + X_2^3 + \dots) * b_1 + (X_1^4 + X_2^4 + \dots) * b_2 = y_1 X_1^2 + y_2 X_2^2 + y_3 X_3^2$$

$X_1, X_2, \dots$  და  $y_1, y_2, \dots$  ექსპერიმენტული მონაცემებია

$n$ -ცდების რაოდენობა

განტოლებათა სისტემას, რიცხვითი მონაცემების (ცხრილი 7) ჩასმის (სხადასხვა თანაფარდობისათვის- $\nabla/\nabla$ ) შემდეგ ვხსნით და ვღებულობთ  $b_0, b_1, b_2$ -ის მნიშვნელობებს, რის შემდეგაც ვადგენთ ემპირიულ განტოლებას ცხრილი 9.

**ცხრილი 9. ემპირულ განტოლებათა სისტემა სხადასხვა  $\nabla/\nabla$  თანაფარდობის შემთხვევაში**

ფარდობა $\nabla/\nabla$	ემპირული განტოლებები
0,24	$Y=0,0025-4,4574*10^{-4}x+5,0476*10^{-5}x^2+1,6944*10^{-6}x^3$
0,27	$Y=0,00586+0,0033x-1,5804*10^{-4}x^2+32171*10^{-6}x^3$
0,3	$Y=0,0187+0,0057x-1,0402*10^{-4}x^2+2,2121*10^{-6}x^3$
0,35	$Y=0,00754+0,00554x-1,0941*10^{-4}x^2+8,9219*10^{-6}x^3$
0,4	$Y=0,2544+0,0134x-2,1078*10^{-4}x^2+1,16834*10^{-6}x^3$

ცხრილში 9 წარმოდგენილია ემპირიული განტოლებებით გამოთვლილი ცემენტის პლასტიური სიმტკიცის მაჩვენებლები.



**ცხრილი 10. ფორმულებით გამოთვლილი ცემენტის პლასტიური სიმტკიცის დამოკიდებულება წ/ც ფარდობის სიდიდეზე**

კონუსის ჩაქურსვის დრო, წთ	პლასტიური სიმტკიცე, კგ/სმ <sup>2</sup> , წ/ც სიდიდისას				
	0,24	0,27	0,30	0,35	0,40
მაშინვე	0,0025	0,000	0,000	0,000	0,000
10 წთ.შემდეგ	0,003	0,014	0,000	0,000	0,000
20 წთ.შემდეგ	0,0027	0,022	0,02	0,000	0,000
30 წთ.შემდეგ	0,084	0,038	0,038	0,018	0,000
40 წთ.შემდეგ	0,175	0,081	0,08	0,031	0,018
50 წთ.შემდეგ	0,314	0,16	0,1	0,043	0,030
60 წთ.შემდეგ	0,517	0,33	0,3	0,06	0,41
70 წთ.შემდეგ		0,057	0,2	0,085	0,053
80 წთ.შემდეგ			0,35	0,12	0,07
90 წთ.შემდეგ			0,59	0,18	0,1
100 წთ.შემდეგ			1	0,31	0,16
120 წთ.შემდეგ				0,564	0,31
130 წთ.შემდეგ					0,5

როგორც მიღებული შედეგებიდან ჩანს ექსპერიმენტული და ფორმულით გამოთვლილი სიდიდეები (ცხრ.7 და ცხრ.10) კარგ თანაფარდობაშია ერთმანეთთან. რაც მიუთითებს იმაზე, რომ მიღებული ემპირული განტოლებები კარგად აღწერენ პროცესს და მათი გამოყენება სავსებით შესაძლებელია.

## დასკვნა

სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი საკითხების კვლევისა და ანალიზის შედეგები საშუალებას გვაძლევს ჩამოვაყალიბოთ შემდეგი ძირითადი დასკვნები:

1. შესწავლილია ზოგიერთი ტუტე და ტუტემიწა ლითონთა ქლორიდების, კარბონატების და აგრეთვე სხვა ნაერთების დამატების ზეგავლენა უთაბაშირო კლინკერის ჰიდრატაციისა და გამაგრების პროცესზე.
2. დადგენილია, რომ ეს დანამატები გარკვეულად ახანგრძლივებენ შეკვრის ვადებს და ანიჭებენ უკეთეს პლასტიურ-დენად თვისებებს ვიდრე ეს გააჩნია უთაბაშირო კლინკერის ცომს, რაც თავის მხრივ აუმჯობესებს ცემენტის დაყალიბებისა და გამოყენების პირობებს.
3. მიღებულია კომპოზიციები, რომლებიც შეკვრის ვადების მიხედვით შეიძლება მივაკუთვნოთ სწრაფშეკვრად ცემენტებს. ისინი ეფექტურად შეიძლება იქნეს გამოყენებული მშენებლობის მთელ რიგ არეებში. მაგალითად წყალმოდინების შეჩერების დროს.
4. გამოთქმულია მოსაზრება აღნიშნულ დანამატებთან ერთად უთაბაშირო კლინკერის შეკვრის ვადების გახანგრძლივების მექანიზმის შესახებ.
5. ნაჩვენებია, დანამატების ეფექტური ზეგავლენა უთაბაშირო კლინკერის სიმტკიცის ინტენსიურ ზრდაზე, განსაკუთრებით გამაგრების პირველ საათებში, 1 და 3 დღის შემდეგ ვადებში.
6. ნაჩვენებია, რომ აღნიშნული დანამატების თანაობისას ცემენტებს აქვთ უარყოფით ტემპერატურაზე გამაგრების უნარი, რადგან ისინი დაბლა სწევენ წყლის გაყინვის ტემპერატურას.
7. რეოლოგიური მეთოდებით შესწავლილია ცემენტის ბლანტპლასტიური თვისებები სხვადასხვა პლასტიფიკატორის თანაობისას და მათ გარეშე.
8. დადგენილია კავშირი  $V/C$ -ს ფარდობის შეკვრის დასაწყისის სიდიდესა და ტიქსოტროპიული პერიოდის ხანგრძლივობას შორის.
9. ნაჩვენებია, რომ მზა ცემენტის ცომის (ხსნარების, ბეტონების) დაყალიბების ოპტიმალური პერიოდის ხანგრძლივობა (ე.ი. როდუ-

საც არ ხდება მათი თვისებების და განსაკუთრებით ფიზიკო-მექანიკური თვისებების გაუარესება) შეადგენს შეკვრის დასაწყისის ხანგრძლივობის 70-80%-ს.

10. შემუშავებულია ცემენტის პლასტიური სიმტკიცის და სხვადასხვა წ/ც ფარდობის დროში ურთიერთქმედების მათემატიკური მოდელი, რომლის დახმარებით გაცილებით გამარტივებულია ტექსოტროპიული პერიოდის ხანგრძლივობის დადგენა.

## სამუშაოს აპრობაცია

1. Republic Conference of Young Scientist. „Chemistry Today,, 26 February-2011. Georgian Technical University. (გამოქვეყნებულია თეზისების კრებული).
2. სტუდენტთა 79-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია 2011წ. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. (მიღებულია სიგელი II ადგილის დაკავებისათვის).
3. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „ქალი და XXI საუკუნე,, 30 ივნისი 1 ივლისი.

## დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში

1. ნ. ქარქუსაშვილი, თ. გაბადაძე, ი. სულაძე. სწრაფშეკვრადი ცემენტების მიღება და მათი თვისებების კვლევა. „მშენებლობა” №2(25), 2012.
2. Т.Габададзе, И.Суладзе, Н.Каркусашвили. Изучение реологических свойств местных цементов с целью определения оптимального времени укладки бетонной смеси. „მშენებლობა” №4(27), 2012.
3. И.Суладзе, Н.Каркусашвили, Т.Габададзе.Исследование реологических и технических свойств цементов с добавкой суперпластификаторов. „ბიზნეს-ინჟინერინგი” №3 2013.

## Abstract

In the introduced master work it is discussed impact of various additions on an ordinal hydration process of a clinker of receivable milled (except adding the gypsum) of portlandcement.

In the literature review of the work it is discussed one of the main acceptance technologies of the component-clinker, mineralogical composition, the process and structure of the clinker formation of our research. A lots of work have been dedicated to the study of clinker microstructure, its minerals and the questions of the cement hydration. We have tried to give you the main essence of these works briefly.

Diversity of portlandcement characters reach on a consumption of changes of its chemical-mineralogical composition, which implements through same components (lime stone, clay, cinder of pyrite) with changes of their massive relationship. Due to this change it is received principally different clinkers of chemical-mineralogical composition and accordingly cements. Massive relationship change doesn't occur empirically. It bases on deeply treatment methodology, which gives us to receive necessary for us designed clinkers which have chemical-mineralogical composition.

Except clinker, necessary component of cement isagypsum. It regulates the binding dates of cement (actually extends it), herewith, gypsum does an important role in an intensification of solidification processes. But in some conditions of building site, especially in a corrosive atmosphere and during working on negative temperature, appears its role. That's why it's very important to create such ungupsum portlandcement, which has constructional-technical quall liters, and is similar to the constructional-technical qualities of portlandcement.

Relation a lots of work have been held to this question. Scientists mainly used two additions, potash and super plasticized instead of gypsum.

We increased the list to these additions and used various additions: chlorides of super plasticized and calcium, carbonates of super plasticized, potassium, calcium sulfates of super plasticized and potassium, sugar constructional gypsum and so on.

We also used compositions, which consisted of an addition and various kind of super plasticized: carbonate+ plasticized of super plasticized, cod a+ plasticized, constructional gypsum+ super plasticized , chlorides and so on.

For holding of experimental work, we used clinker of Kaspi Cement Factory. We have held a chemical analysis of give clinker in Kaspi Cement Factory, where I participated in it personally. We defined a chemical composition of give clinker, we calculated its characteristics and we found out its mineralogical composition on the base of indicators of the chemical analysis. We studied parameters of research materials, such as volume mass, grinding finless, grinding fated surface beforehand. We also defined a normal thickness of research material slurry, binding dates, strength limit on a compression we experimented a lot of

experiments. We carried in a tables the main results of the experiments which are give in the experimental part of a the work.

The work of the experimental analysis gives us a chance to conclude, that it is possible to resave binders of high strength of high-early bundle (in comparison which binding dates of the portlandcement). The base of these bundles is a milled clinker and above mentioned additions. Ungypsum clinker is bundled very fast and gives us a low strength. It hasn't one main quality of tenacious materials-plasticized. The additions used by us gave the compositions more extended bundle dates, which subordinate a regulation with change of the addition amount and a high strength in all dates of the solidification. With the two parameters of the quality it is especially effective to add super plasticized, carbonate and sulfate of potassium by 1-3% for a mass of a tenacious

We can use processed cements in areas of construction, where it is necessary their fast bundle (foreigsample in constructions or stopping water-inflow in constructions) or holding works on low or negative temperature.