



საქართველოს ტექნიკური  
უნივერსიტეტი  
1922 წლიდან

ვახტანგ ჩხეიძე

ადგილობრივი ნედლეულის გარდაქმნის პროცესების შესწავლა  
რეაქტორ-დეკარბონიზატორიან მბრუნავ ღუმელში ცემენტის  
კლინკერის წარმოების პირობებში

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა - ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერია

შიფრი - 0711

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი, 0160, საქართველო

2023 წ

## საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### ქიმიური ტექნოლოგიის და მეტალურგიის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ვახტანგ ჩხეიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ადგილობრივი ნედლეულის გარდაქმნის პროცესების შესწავლა რეაქტორ-დეკარბონიზატორიან მბრუნავ ლუმელში ცემენტის კლინკერის წარმოების პირობებში“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2023 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: პროფესორი თამაზ გაბადაძე

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_

## საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2023 წ

**ავტორი:** ვახტანგ ჩხეიძე

**დასახელება:** ადგილობრივი ნედლეულის გარდაქმნის პროცესების შესწავლა რეაქტორ-დეკარბონიზატორიან მბრუნავ ღუმელში ცემენტის კლინკერის წარმოების პირობებში

**სადოქტორო პროგრამა:** ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერია

**მისანიჭებელი კვალიფიკაცია:** ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერიის დოქტორი

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

ავტორის ხელმოწერა \_\_\_\_\_

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

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

## რეზიუმე

ცემენტის და კლინკერის წარმოებისთვის ყოველთვის აქტუალური იყო დანახარჯების შემცირება, ნამწვი ჰაერების ანუ ემისიების შემცირება და ხარისხის სტაბილური გაზრდა. თანამედროვე მსოფლიოში CO<sub>2</sub>-ის გამონაბოლქვის შემცირებაზე ყურადღება განსაკუთრებითაა გამახვილებული, გლობალური დათბობის და სხვა ბევრი გარემოს დაცვითი საკითხების აქტუალობიდან გამომდინარე. არსებული გამოწვევებიდან გამომდინარე სადოქტორო ნამუშევრის ძირითად მიზნები იყო:

- სველი მეთოდის, გრძელი მბრუნავი ღუმელების მშრალი მეთოდის, რეაქტორ-დეკარბონიზატორიანი ღუმელით ჩანაცვლება, კლინკერის ხარისხის გაზრდის ან შენარჩუნების პირობებში
- კავთისხევის კირქვის კარიერის ამოწურვის გამო, მთავარი ნედლეულის წყაროს ჩანაცვლება
- საწვავის რაოდენობის და ჩამჯდარი ნაცრის გავლენის შესწავლა და საუკეთესო ნარევის შერჩევა
- ნედლეული კომპონენტების სხვადასხვა მიქსების გამოცდა და საუკეთესო ნარევის დადგენა
- ნედლეული ფქვილის და საწვავის კლინკერად გარდაქმნის პროცესის შესწავლა
- პუცოლანური დანამატის - ტუფის გააქტიურება კლინკერის მაცივარში

სველი მეთოდიდან მშრალ მეთოდზე გადასვლა მოხდა ისე, რომ კლინკერის დაფქვადობა გაიზარდა, კლინკერის სიმტკიცე იგივე ან გაზრდილია შედარებით ნაკლები LSF-ის კოეფიციენტით, სითბური ხარჯი ტონა კლინკერზე შემცირდა 2-ჯერ და წარმადობა გაიზარდა 2-ჯერ (ერთად აღებულ 3 სველ ღუმელთან მიმართებაში).

კავთისხევის კარიერის გადართვით გამოწვეული სირთულეები მოგვარებულ იქნა, სასხორის კირქვასთან ერთად გამამდიდრებლად გამოყენებულ იქნა დედოფლის წყაროს კირქვა რომლის 95%-ზე მეტი კალციუმის კარბონატია. ეს ჩანაცვლება მოხდა ისე, რომ კლინკერის ხარისხზე უარყოფითი გავლენა არ ჰქონია და პირიქით იგივე უფრო მეტად სტაბილური და აქტიური გახდა.

ნახშირის და შესაბამისად ნაცრის 2-ჯერ შემცირების შემდეგ ნედლეული ფქვილის ქიმიკა გადაითვალა ისე რომ კლინკერის ხარისხი იყო იგივე ან გაზრდილი. შესაბამისი გადათვლა ხდებოდა ცდების ყველა ეტაპზე.

კლინკერის ახალი მეთოდით გამოწვის პროცესი შესწავლილი და ოპტიმიზირებული იქნა. ნედლეულის და საწვავის გადანაწილების 20 ინდუსტრიული ექსპერიმენტის შედეგად დადგინდა საუკეთესო მიქსები, რომელთა საშუალებით კლინკერის ხარისხი იზრდება ან იგივე რჩება, ხოლო თბური დანახარჯი, საწვავის და ნედლეული ფქვილისგან მიღებული CO<sub>2</sub>-ის ემისიები კი შემცირდა.

ყველაზე მნიშვნელოვანი მიღწევა იყო ტუფის თერმული აქტივაცია, რომელიც წარმატებით დამთავრდა უკვე არა მხოლოდ ლაბორატორიული არამედ ინდუსტრიული ექსპერიმენტითაც. ინოვაციური იდეის საწყისი ის იყო რომ ფიზიკურად შეკავშირებული წყლის გამოდევნა (გამოშრობა) პუცოლანურ

მასალას გაცილებით აქტიურს ხდის და მისი 10%-მდე მოხმარება კლინკერთან მიმართებაში არამხოლოდ ინარჩუნებს არამედ ზრდის კიდევ ამ ნარევის სიმტკიცეს კლინკერთან შედარებით.

არსებული პუცოლანური მასალის გააქტიურების მეთოდი შესწავლილი იყო ძველი რომაელებისპერიოდიდან მოყოლებული. თუმცა პუცოლანური დანამატის გააქტიურებას სჭირდება არანაკლები თბური ენერგია გასახერხებლად ვიდრე კლინკერს და შესაბამისად ისიც გამოყოფს დამატებით CO<sub>2</sub>-ის ემისიებს. ამიტომ სტანდარტული მიდგომით გააქტიურებული პუცოლანური მასალა შედარებით ნაკლებად ამცირებს გამონახოლქვს, თერმულ და სხვა ხარჯებს, ამასთანავე საჭიროებს მინიმუმ 10 მილიონის ინვესტიციას და მინიმუმ 6 თვიან სამონტაჟო პერიოდს.

კლინკერის წარმოების პროცესების სრული შესწავლიდან გამომდინარე გამოიკვეთა სექცია, სადაც ტემპერატურა 600°C-დან 1200°C-მდე მერყეობს და მის შესამცირებლად გარემო ჰაერებს ვიყენებთ. აღნიშნული სექცია არის კლინკერის მაცივარი, სადაც ღუმელიდან გადმოსული 1200-1300°C-ზე გახურებული კლინკერი ხვდება. კლინკერი გაივლის 30 მეტრიან მაცივარს და დაახლოებით 100°C-მდე გაცივდება. ჩვენთვის სასურველი ტემპერატურები ცხელი მხრიდან 5-დან 10 მეტრამდე მონაკვეთში იყო.

ცხელი ბოლოდან 10 მეტრის მოშორებით მოხდა მასალის ჩამყრელი ყელის მოწყობა სადაც ტუფის მიწოდება 2 ბრუნ-რეგულირებადი ლენტით და ხვიდრით ხდება. 5% დოზით საწარმოო ექსპერიმენტი წარმატებულად დამთავრდა, მაგრამ ასევე შესაძლებელია პროპორციების გაზრდა 10%-მდე, შემდეგი ცდების პირობებში. ასევე ჩაყრის წერტილის გადატანა შეიძლება უფრო ცხელი მხარისკენ რაც კიდევ უფრო მეტად გააქტიურებს ტუფს და მოგვცემს საშუალებას გავზარდოთ მისი პროცენტულობა კლინკერში.

ყველაზე მნიშვნელოვანია ის, რომ აღნიშნულმა ექსპერიმენტმა საშუალება მოგვცა ვაწარმოოთ 100% კლინკერი 90% ემისიებით და თერმული ხარჯით, რაც გლობალურად წარმოუდგენელი შედეგია. პროექტის განხორციელება ხდება მინიმალური დანახარჯებით (200 ათასი ლარი) და რაც მთავარია არ მოითხოვს საწვავით მიღებულ თერმულ ენერგიას, რაც საოპერაციო ხარჯებს და ემისიებს თითქმის ანულებს. მაცივრის აღნიშნული სექცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას ნებისმიერი სხვა ცემენტის დანამატი მასალის შრობა-გახურებისთვის.

## Abstract

In cement and clinker production energy consumption reduction, specific emissions reduction and quality stable increase always has been daily challenge which was addressed in many studies. Nowadays, CO<sub>2</sub> emissions are under special focus since the gas is a main contributor in global warming and many other environmental topics. Considering existing challenges, the PhD study is addressing following:

- Revamping from wet process to the new dry line clinker production process
- Revamping from the old Kavtiskhevi quarry to new Saskhori quarry
- Raw meal, kiln feed and clinker quality adjustment after changing the type and amount of the fuel
- Study of clinkerization process based on the modified design
- Activation of pozzolanic material – Tuff in the clinker cooler

Clinker production process change from wet process to dry process was performed the way that clinker quality was at least the same but grindability of the clinker was increased with relatively lower lime saturation factor. Of course by avoiding drying wet slurry and making heat exchange process more efficient due to more dispersive, powderous material the heat consumption was reduced twice and capacity of the kiln line was doubled.

The difficulties caused by switching the Kavtishkevi quarry were solved by using Saskhori limestone as a main source and Dedopsitskaro limestone was used as a sweetener, which contains more than 95% calcium carbonate. This substitution took place in such a way that it did not have a negative impact on the quality of the clinker and on the contrary made it more stable and active.

After reducing coal and thus ash by 2 times, raw flour chemistry was recalculated so that the quality of clinker was the same or increased. Appropriate recalculation was done at all stages of trials.

The clinker process burning with a new method was studied and optimized. As a result of 20 industrial experiments of raw material and fuel distribution, the best mixes were determined, by means of which the quality of clinker increases or remains the same, while the thermal consumption was reduced as was CO<sub>2</sub> emissions from fuel and from raw meal.

The most important achievement was the thermal activation of Tuff (Zeolite), which was successfully completed not only in the laboratory but also in the industrial experiment. The origin of the innovative idea was that the drying out of physically bound water makes the pozzolanic material much more active due to created pores. The material usage (with clinker) up to 10% in relation to clinker not only preserves but also increases the strength of this mix compared to clinker.

The method of activation of existing pozzolanic material has been studied since the ancient Roman period. However, the activation of the pozzolanic additive requires less thermal energy than the clinker, and therefore also emits additional CO<sub>2</sub> emissions. Therefore, the pozzolanic material activated by the standard approach reduces emissions, thermal and other costs relatively less, and also requires an investment of at least 10 million and an installation period of at least 6 months.

Based on a complete study of the clinker production processes, a section was identified where the temperature ranges from 600°C to 1200°C and we use ambient air to reduce it. This section is a clinker cooler, where clinker heated at temperatures 1200-1300°C is coming out of from the rotary kiln. The clinker is passing a 30-meter cooler and cools down to about 100°C. The temperatures we wanted were 5 to 10 meters from the hot side.

10 meters away from the hot end, a material discharge chute was arranged, where tuff is supplied with transport conveyors and hopper. The production experiment with a dose of 5% was successful, but it is also possible to increase the proportions to 10% in the following trials. Also, the feeding point on the clinker cooler roof can be moved to the hotter side, which will further activate the tuff and allow us to increase its percentage in the clinker.

The most important is that this experiment allowed us to produce 100% clinker with 90% emissions and thermal consumption, which is an incredible result globally, especially for CO<sub>2</sub> reduction. The project was implemented with minimal costs (200,000 GEL) and, most importantly, does not include the thermal energy obtained with fuel, which almost cancels the operating costs and emissions. This section of the clinker cooler can be studied to use for drying and heating any other cement additive material.

## შინაარსი

<b>შესავალი</b>		16
1.	<b>ლიტერატურის მიმოხილვა</b>	20
1.1.	ცემენტის და კლინკერის წარმოება	20
1.2.	პორტლანდცემენტი	21
1.3.	კლინკერის მინერალოგიური შედგენილობის გავლენა ცემენტის თვისებებზე	22
1.4.	კლინკერის დახასიათება გაჯერების კოეფიციენტის და მოდულების სიდიდების მიხედვით	27
1.5.	კლინკერის ქიმიური და მინერალოგიური შედგენილობის გაანგარიშება	30
1.6.	რეაქციები, რომლებიც მიმდინარეობენ თხევადი ფაზის მონაწილეობით	39
1.7.	გაცივების რეჟიმის გავლენა კლინკერის თვისებებზე	42
1.8.	ექსპერიმენტის გარშემო ინფორმაცია	43
1.9.	კასპის ცემენტის ქარხნის ტექნოლოგიური მიმოხილვა	44
1.10.	მშრალ ღუმელში მიმდინარე პროცესები	50
1.11.	ტრადიციული საწვავი და ნედლეული მასალები	54
1.12.	გამოწვის მეთოდის ცვლილება	61
2.	<b>ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები და მათი განსჯა</b>	62
2.1.	ალოქსიდის და ბოქსიტის ნარევი	62
2.2.	რკინის ნამწვის და კვკის ნარევი	64
2.3.	ანალიზების ჩატარების მეთოდები და მოწყობილობები	65
2.4.	საწარმოო ექსპერიმენტები ნედლეულის და საწვავის სხვადასხვა მიქსებით, მიმდინარეობა და მათი შედეგები	68
2.4.1.	საწარმოო ექსპერიმენტი №1	68
2.4.2.	საწარმოო ექსპერიმენტი №2	70
2.4.3.	საწარმოო ექსპერიმენტი №3	71
2.4.4.	საწარმოო ექსპერიმენტი №4	72
2.4.5.	საწარმოო ექსპერიმენტი №5	72
2.4.6.	საწარმოო ექსპერიმენტი №6	73
2.4.7.	საწარმოო ექსპერიმენტი №7	74
2.4.8.	საწარმოო ექსპერიმენტი №8	74
2.4.9.	საწარმოო ექსპერიმენტი №9	75
2.4.10.	საწარმოო ექსპერიმენტი №10	75
2.4.11.	საწარმოო ექსპერიმენტი №11	77



2.4.12.	საწარმოო ექსპერიმენტი №12_____	79
2.4.13.	საწარმოო ექსპერიმენტი №13_____	79
2.4.14.	საწარმოო ექსპერიმენტი №14_____	80
2.4.15.	საწარმოო ექსპერიმენტი №15_____	81
2.4.16.	საწარმოო ექსპერიმენტი №16-17_____	82
2.4.17.	საწარმოო ექსპერიმენტი №18_____	83
2.4.18.	საწარმოო ექსპერიმენტი №19_____	84
2.4.19.	საწარმოო ექსპერიმენტი №20_____	85
2.4.20.	ნედლეულის და საწვავის ნარევის ექსპერიმენტების დასკვნები და შედეგები_____	86
2.4.21.	საწარმოო ექსპერიმენტების გრაფიკული გამოსახულება_____	88
2.5.	ტუფით კლინკერის ჩანაცვლების მნიშვნელობა_____	98
2.5.1.	ტუფის აქტივაცია - ლაბორატორიული ექსპერიმენტი_____	100
2.5.2.	ტუფის თერმული აქტივაცია_____	104
2.5.3.	ტუფის ინდუსტრიული ექსპერიმენტის შედეგები_____	109
2.5.3.1.	ტუფის ინდუსტრიული ექსპერიმენტის რუტინული ანალიზები_____	114
	დასკვნა _____	118
	გამოყენებული ლიტერატურა _____	121

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1.	სველი და მშრალი მეთოდის შედარება _____	17
ცხრილი 2.	ქართული ნახშირის და თიხის ქიმიური შემადგენლობები _____	55
ცხრილი 3.	კავთისხვევის კირქვის ქიმიური შემადგენლობა _____	56
ცხრილი 4.	სასხორის კირქვის ქიმიური შემადგენლობა 2019 წლის პირველი ნახევარი _____	56
ცხრილი 5.	საერთაშორისო ნახშირის ქიმიური შემადგენლობები და კალორიულობა _____	59
ცხრილი 6.	ქართული ნახშირის ქიმიური შემადგენლობები და კალორიულობა _____	60
ცხრილი 7.	ქართული მაღალი ხარისხის ალოქსიდი _____	62
ცხრილი 8.	ქართული დაბალი ხარისხის ალოქსიდი _____	63
ცხრილი 9.	აზერბაიჯანული ბოქსიტის ქიმიური ანალიზი _____	63
ცხრილი 10.	აზერბაიჯანული ბოქსიტის და ქართული ალოქსიდის ნარევის ქიმიური ანალიზი _____	63
ცხრილი 11.	აზერბაიჯანული კეკის ქიმიური ანალიზი _____	64
ცხრილი 12.	ესპანური რკინის ნამწვის და კეკის ნარევის ქიმიური ანალიზი _____	65
ცხრილი 13.	ექსპერიმენტი №1 _____	68-69
ცხრილი 14.	ექსპერიმენტი №2 _____	70-71
ცხრილი 15.	ექსპერიმენტი №3 _____	71
ცხრილი 16.	ექსპერიმენტი №4 _____	72
ცხრილი 17.	ექსპერიმენტი №5 _____	72-73
ცხრილი 18.	ექსპერიმენტი №6 _____	73
ცხრილი 19.	ექსპერიმენტი №7 _____	74
ცხრილი 20.	ექსპერიმენტი №8 _____	74-75
ცხრილი 21.	ექსპერიმენტი №9 _____	75
ცხრილი 22.	ექსპერიმენტი №10 _____	76-77

ცხრილი 23.	ექსპერიმენტი №11_____	78
ცხრილი 24.	ექსპერიმენტი №12_____	79
ცხრილი 25.	ექსპერიმენტი №13_____	80
ცხრილი 26.	ექსპერიმენტი №14_____	80
ცხრილი 27.	ექსპერიმენტი №15_____	81
ცხრილი 28.	ექსპერიმენტი №16_____	81
ცხრილი 29.	ექსპერიმენტი №17_____	82-83
ცხრილი 30.	ექსპერიმენტი №18_____	83-84
ცხრილი 31.	ექსპერიმენტი №19_____	84
ცხრილი 32.	ექსპერიმენტი №20_____	85
ცხრილი 33.	ცემენტის ტიპები EN 197-1-ის მიხედვით_____	99
ცხრილი 34.	ნედლი ტუფის ქიმიური შემადგენლობა_____	101
ცხრილი 35.	ნედლი ტუფის მინერალოგიური შემადგენლობა_____	101
ცხრილი 36.	ნედლ და გახურებულ ტუფში წყლის შემცველობა_____	113
ცხრილი 37.	ნედლ და გახურებულ ტუფში წყლის შემცველობა (კლ. მაცივარში)_____	114
ცხრილი 38.	ტუფით (5%) გააქტიურებული კლინკერის საშუალო სინჯების დაფქვის მონაცემები და სიმტკიცეები_____	114

## ნახაზების ნუსხა

ნახაზი 1.	ნედლეულის მასალების ხარჯები და მასალის ხარისხის შედარება_____	86
ნახაზი 2.	ნედლეულის მასალების ხარჯების და ხარისხის შედარება_____	87
ნახაზი 3.	საწარმოო ექსპერიმენტი №1_____	88
ნახაზი 4.	საწარმოო ექსპერიმენტი №2_____	88
ნახაზი 5.	საწარმოო ექსპერიმენტი №3_____	89
ნახაზი 6.	საწარმოო ექსპერიმენტი №4_____	89
ნახაზი 7.	საწარმოო ექსპერიმენტი №5_____	90
ნახაზი 8.	საწარმოო ექსპერიმენტი №6_____	90
ნახაზი 9.	საწარმოო ექსპერიმენტი №7_____	91
ნახაზი 10.	საწარმოო ექსპერიმენტი №8_____	91
ნახაზი 11.	საწარმოო ექსპერიმენტი №9_____	92
ნახაზი 12.	საწარმოო ექსპერიმენტი №10_____	92
ნახაზი 13.	საწარმოო ექსპერიმენტი №11_____	93
ნახაზი 14.	საწარმოო ექსპერიმენტი №12_____	93
ნახაზი 15.	საწარმოო ექსპერიმენტი №13_____	94
ნახაზი 16.	საწარმოო ექსპერიმენტი №14_____	94
ნახაზი 17.	საწარმოო ექსპერიმენტი №15_____	95
ნახაზი 18.	საწარმოო ექსპერიმენტი №16_____	95
ნახაზი 19.	საწარმოო ექსპერიმენტი №17_____	96
ნახაზი 20.	საწარმოო ექსპერიმენტი №18_____	96
ნახაზი 21.	საწარმოო ექსპერიმენტი №19_____	97
ნახაზი 22.	საწარმოო ექსპერიმენტი №20_____	97
ნახაზი 23.	ხეკორძულას ტუფის ლაბორატორიული ექსპერიმენტი_____	102
ნახაზი 24.	ხანდაკის ტუფის ლაბორატორიული ექსპერიმენტი_____	103

ნახაზი 25.	კლინკერის და ტუფის წყალმოთხოვნილება და შეკვრის ვადები_____	110
ნახაზი 26.	კლინკერის და ტუფის სიმტკიცეები - ექსპერიმენტი №1_____	111
ნახაზი 27.	კლინკერის და ტუფის სიმტკიცეები - ექსპერიმენტი №2_____	111
ნახაზი 28.	კლინკერის და ტუფის სიმტკიცეები - ექსპერიმენტი №3_____	112
ნახაზი 29.	კლინკერის და ტუფის რუტინული ანალიზები და მათი შედეგები_____	116

## სურათების ნუსხა

სურათი 1.	კასპის ცემენტის ქარხანა, დეკარბონიზატორიანი ღუმელი, 2018 წელი_____	16
სურათი 2.	კლინკერის წარმოების ტექნოლოგიური მიდგომები და მათი სხვაობები_____	18
სურათი 3.	დეკარბონიზატორიანი ღუმელის ციკლონებში მასალები თბოცვლის სქემა_____	19
სურათი 4.	ცემენტის ქარხნის, მშრალი მეთოდის ტექნოლოგიური სქემა_____	45
სურათი 5.	ორმაგ-ჩაქუჩებიანი სამსხვრეველა_____	46
სურათი 6.	კონვეიერზე დამონტაჟებული ონლაინ ანალიზატორი_____	46
სურათი 7.	მიმდინარე კორექტირების პროცესი ონლაინ ანალიზატორი პროგრამაში_____	48
სურათი 8.	ნედლეულის ჰიდრავლიკური როლიკებიანი წისქვილი_____	49
სურათი 9.	ნედლეული ფქვილის კლინკერად ჩამოყალიბების პროცესი_____	51
სურათი 10.	თბლომცვლელის ციკლონი და დეკარბონიზატორიანი ღუმელი_____	52
სურათი 11.	დეკარბონიზატორიან ღუმელის წინაგამახურებლის ტემპერატურული პროფილი_____	53
სურათი 12.	SO <sub>3</sub> -ის და ქლორის შემცველობის გავლება მასალის მიცხოებაზე_____	57
სურათი 13.	ესპანური რკინის ნამწვი და აზერბაიჯანული კეკი_____	64
სურათი 14.	CO <sub>2</sub> -ის ემისიის გლობალური და ინდუსტრიული წლიური მონაცემი_____	98
სურათი 15.	მაცივარში მიმდინარე პროცესების აღწერა_____	105
სურათი 16.	კასპის კლინკერის მაცივარში, ტუფის ჩაყრის წერტილის ტემპერატურა_____	106
სურათი 17.	მაცივრის სქემაზე დამატებული ტუფის მიწოდება, წითელი ფერით_____	107
სურათი 18.	ტუფის მიწოდების ბუნკერი_____	108
სურათი 19.	ტუფის მიწოდების კონვეიერები და ჩაყრის წერტილი_____	108
სურათი 20.	კლინკერის მაცივარში ტუფის 5%-იანი დოზით მიწოდებული მასალის გავლენა ხარჯებსა და CO <sub>2</sub> -ის ემისიაზე_____	117

## მადლიერება

დისერტაციის ავტორი მადლობას უხდის:

**ზაალ სადუნიშვილს** - ჰაიდელბერგცემენტ ჯორჯიას ტექნიკურ დირექტორს, ტუფის კლინკერის მაცივარზე მიწოდების პროექტის რეალიზებისთვის, რითიც შესაძლებელი გახდა საწარმოო ექსპერიმენტების ჩატარება, ასევე ლაბორატორიული და საწარმოო მოწყობილობების გამოყენებისთვის, კვლევითი და ექსპერიმენტული სამუშაოების მიმდინარეობის პროცესში მხარდაჭერისთვის.

## შესავალი

საქართველოში ცემენტის კლინკერის წარმოება ახალ, გადარჩენისთვის აუცილებელ ეტაპზე გადავიდა, რაც გულისხმობს სველი წარმოების მაღალ ხარჯიანი და დაბალ წარმადობიანი ღუმელების ახალი რეაქტორ-დეკარბონიზატორიანი ღუმელით ჩანაცვლება, რომელიც თანამედროვე წარმოებაში ყველაზე თბო-ეფექტურ ღუმელად ითვლება.

რადგან მასალის შლამად გარდაქმნა აღარაა საჭირო, აღარ ხდება მისი ხელოვნურად დასველება დენადობისთვის, რაც თავისთავად ამცირებს წყლის აორთქლების ენერჯიას. შესაბამისად ღუმელის კვება შლამის მაგივრად იღებს ნედლეული ნარევის დაფქვილ მასას, რასაც ნედლეულის ფქვილი ეწოდება. იმის გამო, რომ წინაგამახურებელი ვერტიკალურად არის განლაგებული ფქვილს არ ჭირდება დენადობა და ის უბრალოდ გრავიტაციის წყალობით გაივლის 5 ციკლონს და დეკარბონიზატორს და ყველა ეტაპზე განიცდის თბოცვლას. ვინაიდან ნედლეულის ფქვილი დისპერსიურია და ნაკადურ დინებასთან შედარებით გაცილებით ეფექტურად ხდება თბოცვლა, მასალის დეკარბონიზაცია ხდება გაცილებით სწრაფად დაახლოებით 60-90 წამის განმავლობაში (95% დეკარბონიზაცია), რაც მზრუნავ ღუმელში საშუალებას იძლევა გაცილებით მეტი რაოდენობის მასალა გამოიწვას.

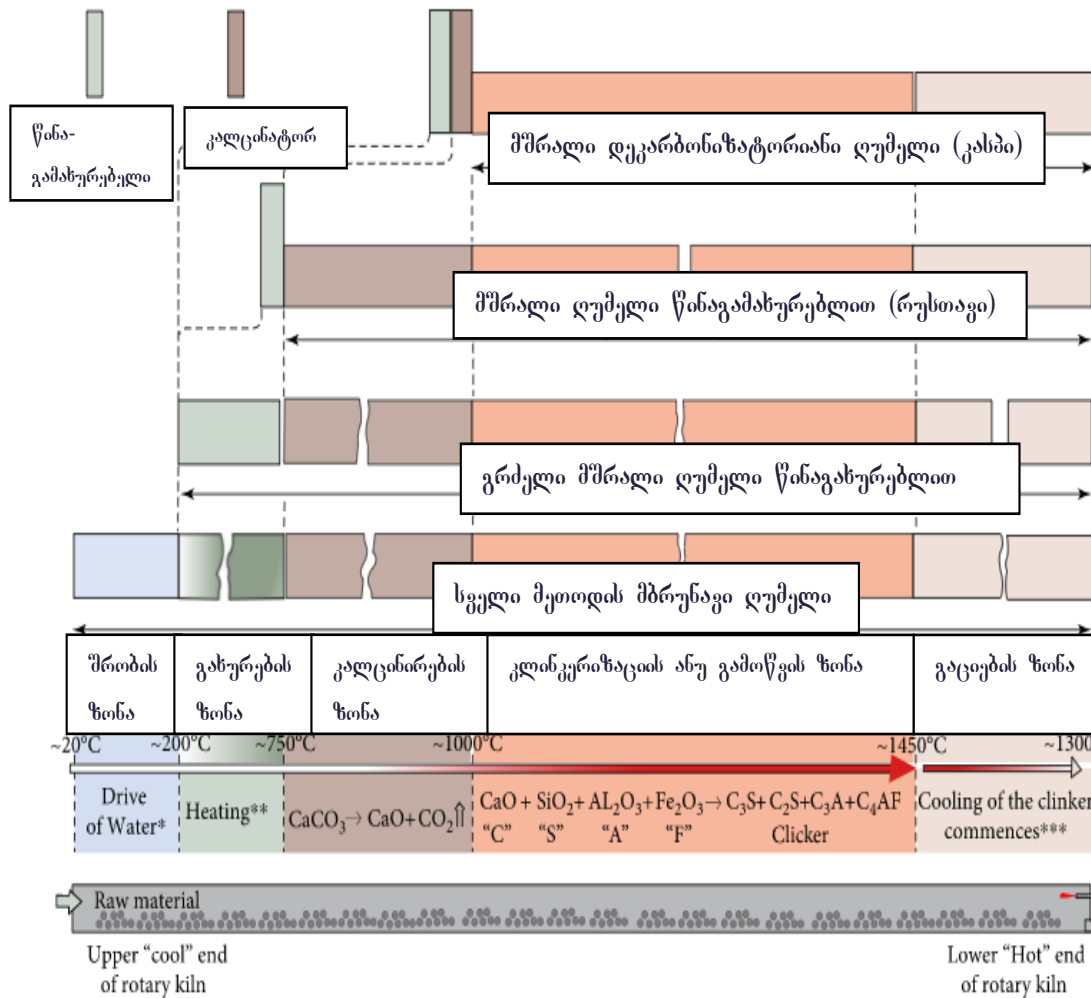


სურათი 1. კასპის ცემენტის ქარხანა, დეკარბონიზატორიანი ღუმელი, 2018 წელი



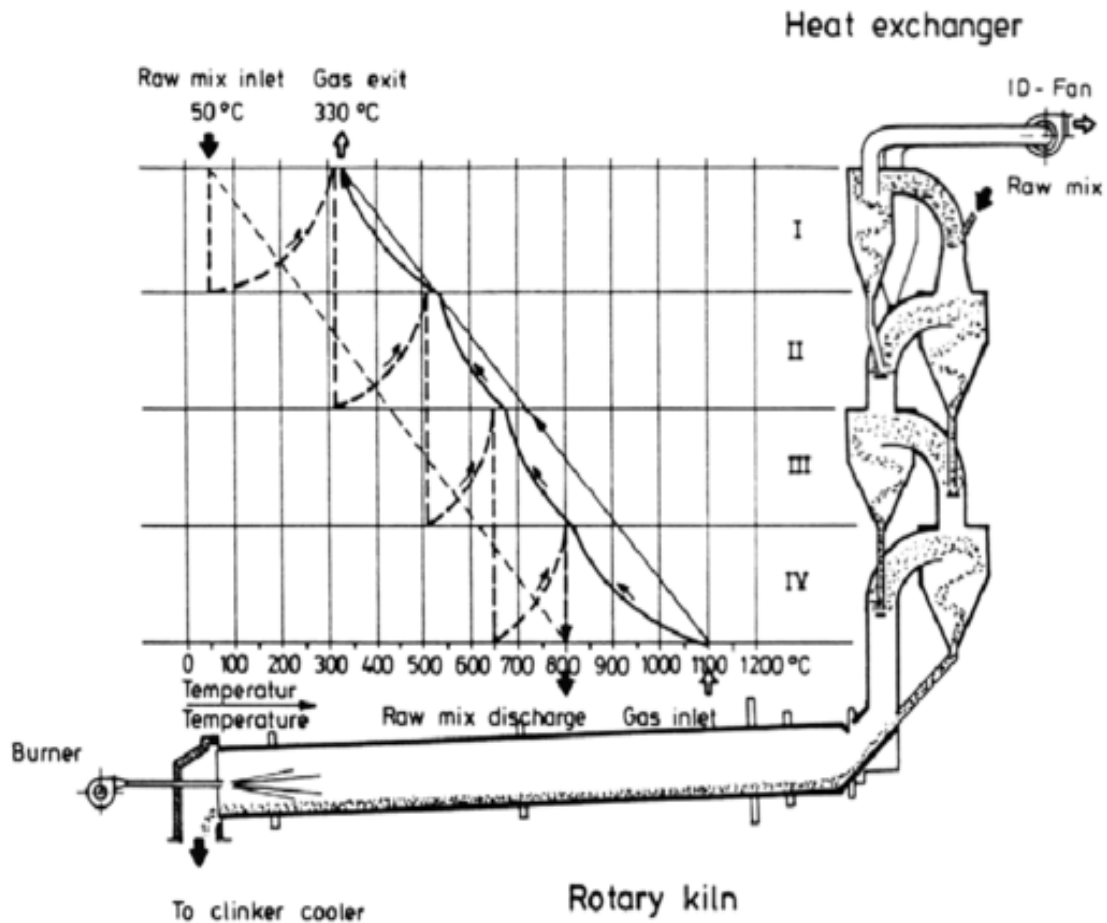
ცხრილი 1. სველი და მშრალი მეთოდის შედარება

	სველი მეთოდის მზრუნავი ღუმელი	5 ეტაპიანი, დეკარბონიზატორიანი მზრუნავი ღუმელი
წარმადობა (ტ/დღ)	700	3000 (დადგმული) 3800 (ამჟამინდელი)
თბური ხარჯი 1 ტონა კლინკერზე	6.3	3.1
გამოყენებული ნედლეული მასალა	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. კირქვა (მერგერი)</li> <li>2. ქვიშა</li> <li>3. პირიტის ნამწვი</li> <li>4. თიხა</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. კირქვა (მერგერი)</li> <li>2. კირქვა (მაღალი ხარისხ.)</li> <li>3. ალოქსიდი</li> <li>4. ბოქსიტი</li> <li>5. რკინის ნამწვი</li> <li>6. რკინის კეკი</li> </ol>
გამოყენებული საწვავი <i>ალტ. საწვავი ამჟამად არაა გამოყენებაში</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ბუნებრივი გაზი</li> <li>2. ქართული ნახშირი</li> <li>3. საერთაშ. ნახშირი</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ქართული ნახშირი</li> <li>2. საერთაშ. ნახშირი</li> <li>3. ალტერნატიული საწვავი <ol style="list-style-type: none"> <li>a. საბურავები</li> <li>b. პლასტმასი</li> <li>c. მუნიციპალური ნარჩენი</li> </ol> </li> </ol>
ღუმელის გეომეტრია	ღუმელი Ø4x150 მ.	ღუმელი Ø4.3x62 მ. 5 ეტაპიანი თბომცვლელი კალცინატორი
გაციების სისტემა	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ცეცხლრიკა მაცივარი</li> <li>2. სატელიტური მაცივარი</li> </ol>	ცეცხლრიკა მაცივარი



სურათი 2. კლინკერის წარმოების ტექნოლოგიური მიდგომები და მათი სხვაობები

აღნიშნულ სურათზე გამოსახულია კლინკერის წარმოების სხვადასხვა მეთოდის სქემატური შედარება. ქვედა ნაწილში აღწერილია სველი მეთოდი, რომელიც ყველაზე ხანდაზმული და სითბური მოხმარების კუთხით არაეფექტურია, ხოლო ზედა ნაწილში აღწერილია თანამედროვე და ყველაზე თბო-ეფექტური მეთოდი- 5 ციკლონიანი ღუმელი წინაგამახურებლით. სველი მეთოდი მშრალ მეთოდთან შედარებით 2-ჯერ მეტ სითბურ ენერგიას მოითხოვს [1].



სურათი 3. დეკარბონიზატორიანი ღუმელის ციკლონებში მასალები თბოცვლის სქემა

ზედა სურათზე ახსნილია ციკლონებში სითბოს გადაცემის პროცესი რაც იყო მთავარი განმაპირობებელი ამ მეთოდის ღუმელების გამოგონების და შემდგომში ბაზარზე დომინირების. მთავარი სხვაობა სველ და მშრალ მეთოდებს შორის იმაში მდგომარეობს, რომ დისპერსიული მასალა ბევრად ადვილად ახერხებს თბოცვლას ვიდრე იგივე მასალა მბრუნავ ღუმელში ნაკადისებურად მიმდინარე რომელსაც ცხელი ჰაერები მხოლოდ ზედაპირზე ეხება და შესაბამისად ქვედა ნაწილს ნაკლები სითბო გადაეცემა [2-35].

# 1. ლიტერატურის მიმოხილვა

## 1.1. ცემენტის და კლინკერის წარმოება

ცემენტის ინდუსტრია არის ერთ-ერთი ყველაზე ინტენსიური ენერჯის მოხმარებელი ინდუსტრიულ სექტორებში. ენერჯის მოხმარება წარმოადგენს წარმოების ღირებულების 40%-დან 60%-მდე. გარდა ამისა, ცემენტის ინდუსტრია მონაწილეობს ადამიანის მიერ წარმოებული CO<sub>2</sub>-ის ემისიების დაახლოებით 5%-დან 8%-მდე. ცემენტის წარმოებისთვის კლინკერის ღუმელებში ჩართული ფიზიოქიმიური და თერმოქიმიური რეაქციები ჯერ კიდევ არ არის კარგად გასაგები მათი სირთულის გამო. რეაქციებს აქვს გადამწყვეტი გავლენა ენერჯის მოხმარებაზე, გარემოს დეგრადაციაზე და ცემენტის წარმოების ღირებულებაზე. არსებობს ტექნიკური სირთულები ღუმელების სისტემებში კრიტიკული პროცესის ცვლადების პირდაპირი გაზომვების მისაღწევად [2-5].

მშენებლობა ეკონომიკური განვითარების განუყოფელი ნაწილია, სადაც გამოყენებული მასალის დიდი ნაწილი თბური ენერჯის დიდი რაოდენობით გამოყენებას ითხოვს. ამიტომ აუცილებელია კლინკერი და შესაბამისად ცემენტი იწარმოებოდეს შედარებით დაბალი თბო მოხმარებით, რაც თავის მხრივ შეამცირებს არა მხოლოდ ხარჯებს არამედ გამონაბოლქვს 1 ტონა წარმოებულ კლინკერზე და შესაბამისად კლინკერზე [2-35].

1950 წლიდან ცემენტის წარმოება 25-ჯერ გაიზარდა. ეს შთამბეჭდავი ზრდა მიუთითებს ეკონომიკურ წინსვლას ასევე გამონაბოლქვის ზრდას. შესაბამისად, 2010 წელს ცემენტის სექტორი პასუხისმგებელი იყო 2823 მილიონი ტონა CO<sub>2</sub>-ის ემისიაზე. ეს შეესაბამებოდა იმ წელს წიაღისეული საწვავის წვის შედეგად მიღებული CO<sub>2</sub>-ის გლობალური ემისიების თითქმის 9%-ს. საერთო ჯამში, ცემენტის წარმოება შეადგენს CO<sub>2</sub>-ის გლობალური ემისიების დაახლოებით 5-8%-ს. ამის გამო მნიშვნელოვანია ცემენტის წარმოება განსაკუთრებით თბო ეფექტური

იყოს მაგრამ ამასთანავე საჭიროა მოიძებნოს ალტერნატიული მჭიდა მასალები, რომლებსაც ნაკლები სათბობი ენერგია დასჭირდება მჭიდა თვისებების მისაღებად [2-51].

იმისათვის რომ სრულად იქნას გააზრებული ნაშრომის მნიშვნელობა და მასში ასახული ექსპერიმენტები, აუცილებელია ნედლეული მასალების კაზმების, კლინკერის და ცემენტის წარმოების შესახებ გვექონდეს ზოგადი ინფორმაცია, ამასთანავე უნდა გავცნოთ პუცოლანური დანამატების მახასიათებლებს და მათი გააქტიურების მეთოდებს. აუცილებელია საკითხები განხილულ იქნას დეტალებში უკვე არსებული და ცნობილი თეორიული მასალის გამოყენებით [3-67].

## 1.2. პორტლანდცემენტი

როგორც მოგეხსენებათ პორტლანდცემენტი, წიდა პორტლანდცემენტის და პოცოლანური პორტლანდცემენტისათვის ძირითად კომპონენტს წარმოადგენს კლინკერი. ცემენტის წარმოებისათვის კლინკერის მიღების ტექნოლოგია და ეკონომიკა არის ძირითადი განმსაზღვრელი ფაქტორი, რაგან კლინკერი შეადგენს ქართულ ცემენტის ქარხნებში და ადგილობრივ ცემენტის ბაზარზე მთლიანი ცემენტის რაოდენობის 80%-ს. დანარჩენი კლინკერი მიიღება დისპერსიული ნედლეულის ნარევის გამოწვით შეცხოების ტემპერატურამდე, რომელიც ძირითადად წარმოებს 1400-1500°C-მდე, რაც მოითხოვს სათბობის დიდ დანახარჯს. ამიტომ მნიშვნელოვანია გამოწვის ტემპერატურის შემცირება მხოლოდ ისე, რომ მიღებულ იქნას ხარისხიანი კლინკერი და ცემენტი. თანამედროვე პირობებში შესაძლებელია მივიღოთ აქტიური კლინკერები გამოწვის ტემპერატურის მნიშვნელოვნად დაწევით [3-37].

კლინკერის ძირითად ნედლეულად მიიჩნევა კირქვა, თიხა და მაკორექტირებელი დანამატები. თუმცა შესაძლებელია სხვა მასალების გამოყენებაც (ნაცარი,

მერგელი, წიდა, ნახშირის მოპოვების ნარჩენები და ა.შ) არსებული რესურსების და სხვა ფაქტორების გათვალისწინებით.

მაკორექტირებელი დანამატია, მასალა, რომლის მეშვეობით მიიღება წინასწარ დასახული ქიმიურ-მინერალოგიური შედგენილობის კლინკერი, რომელსაც მხოლოდ ძირითადი კომპონენტების (კირქვისა და თიხის) ნარევისაგან ვერ ვიღებთ.

მეტ წილად ძირითად ნარევაში არასაკმარისია ხოლმე რკინის ოქსიდი, ასეთ შემთხვევაში მაკორექტირებელ დანამატად გამოიყენება დიდი რაოდენობით რკინის ოქსიდის შემცველი მასალები. ეს დანამატი ემატება მცირე რაოდენობით (1-5%). ამ ნარევაში კირქვის რაოდენობა 3-4-ჯერ მეტია თიხასთან შედარებით. ნედლეულის ნარევის შედგენილობის განსაზღვრსას საჭიროა გავითვალისწინოთ კომპონენტების და კლინკერის ქიმიურ-მინეროლოგიური ანალიზით მიღებული შედეგები.

კლინკერის ხასიათდება მისი ქიმიური და მინერალოგიური შედგენილობის, სილიკატური (n) და თიხამიწოვანი (p) მოდულების, გაჯერების კოეფიციენტის (გკ) სიდიდეების მიხედვით. თითოეულ მათგანს აქვს საკუთარი საანგარიშო ფორმულა [3-67].

### 1.3. კლინკერის მინერალოგიური შედგენილოგის გავლენა ცემენტის თვისებებზე

ცემენტების ფიზიკურ-ტექნიკური თვისებებია: შეკვრის სიჩქარე, მექანიკური სიმტკიცე, ყინვაგამძლეობა, ქიმიური და ტემპერატურული მდგრადობა, კოროზიამედეგობა. ეს თვისებები დამოკიდებულია კლინკერის მინერალოგიურ შედგენილობაზე და მექანიკურ დამუშავებაზე.

კლინკერის ქიმიური ანალიზი ასე გამოიყურება: CaO (C) 63-67%; SiO<sub>2</sub>, (S) 21-24%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (A) 4-7%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (F) 2-4%. ამ ძირითადი ოქსიდების ჯამი 97%-მდეა, დანარჩენს შეადგენს მინარევეები (მანგანუმის, ტუტემიწათა ლითონების, ტიტანის, მაგნიუმის, ფოსფორის, გოგირდის და სხვა ელემენტების ოქსიდები). ეს

მინარევები უმნიშვნელოვანეს რომლს თამაშობენ როგორც გამოწვის პროცესში ასევე ცემენტების გამყარებისას, მათი კლინკერის მინერალებთან მყარი ხსნარების წარმოქმნის უნარის გამო.

ნედლეულის ნარევის მაღალ ტემპერატურაზე გამოწვის პროცესში კალციუმის ოქსიდი შედის რეაქციაში მჟავური და ამფოტერული ხასიათის სილიციუმის, ალუმინის და რკინის ოქსიდებთან და გვამღვეს კლინკერის ძირითად მინერალებს: სამკალციუმიან სილიკატს  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ), რომელიც უმეტეს სამრეწველო კლინკერებში შეადგენს 50-60%, ორკალციუმიან სილიკატს  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ) 15-30%; სამკალციუმიან ალუმინატს  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) 3-10%; ოთხკალციუმიან ალუმოფერიტს  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) 10-15%. კლინკერში ეს მინერალები ჯამურად საშუალოდ 85%-ია. დარჩენილი 15% მინარევებია, რომლითაც ეს ძირითადი მინერალების შედგენილობა და თვისებების ცვლილებაა შესაძლებელი. სამკალციუმიანი სილიკატი სხვადასხვა მინარევების შემცველობით - ალიტის, ორკალციუმიანი სილიკატი-ბელიტის, ხოლო ოთხკალციუმიანი ალუმოფერიტი-ცელიტის სახელწოდებითაა ცნობილი [3-17].

არსებობს გარკვეული შეზღუდვა ზოგიერთ მინარევთან მიმართებით, ცემენტის ხარისხის შენარჩუნების მიზნით. ესენია მაგნიუმის ოქსიდი - არაუმეტეს 5%, ტუტემიწათა ოქსიდები - არაუმეტეს 1%, სულფატმდგრადი ცემენტისათვის, გოგირდის ანჰიდრიდი - არაუმეტეს 3,5-4%, ცემენტის მარკების მიხედვით.

კლინკერის მინერალოგია განსაზღვრულია სპეციალური დანიშნულების ცემენტებისათვის, მაგალითად, თეთრი ცემენტის მისაღებად კლინკერი შეიცავს  $\text{C}_4\text{AF}$  -ს 1%-მდე, რადგან რკინის ოქსიდები ცემენტს მუქ ფერს აძლევს, ამის გამო  $\text{C}_3\text{A}$ -ს რაოდენობა იზრდება 16-18%-მდე. მაღალი ტემპერატურის სატამპონაჟე ცემენტებში, კლინკერი შეიცავს მცირე რაოდენობით  $\text{C}_3\text{A}$ -ს (1-4%), ხოლო სამაგიეროდ მის ხარჯზე იზრდება  $\text{C}_4\text{AF}$  15-18%-მდე. კლინკერის ქიმიური შედგენილობა გამოისახება ოქსიდების სახით და განისაზღვრება ქიმიური ანალიზის საშუალებით [3-29].

კლინკერის მინერალოგიური შედგენილობა განისაზღვრება, ქიმიური შედგენილობის და პეტროგრაფიული, რაოდენობრივი რენტგენოფაზური გაანგარიშების საფუძველზე. აღნიშნული მეთოდებით განსაზღვრული

კლინკერის მინერალოგიური შედგენილობის სიდიდეები ერთმანეთს იდენტურად არ ემთხვევა, თუმცა დაახლოებით სიდიდეებს ვხედავთ, რაც პრაქტიკისათვის სრულებით საკმარისია, მიღებული კლინკერის და ცემენტების თვისებების დახასიათებისთვის (სხვა პირობების მუდმივობის შემთხვევაში).

მაგალითისთვის, სამკალციუმიანი სილიკატის (C<sub>3</sub>S) რაოდენობის ზრდისას კლინკერში იზრდება ცემენტის მარკა, ჩქარდება გამაგრება, იზრდება ჰიდრატაციის სიღრმე (ეგზოთერმული რეაქციის გამო), არამდგრადობა სულფატურ და მტკნარ აგრესიულ წყლებში. ორკალციუმიანი სილიკატის (C<sub>2</sub>S) თვისებები განსხვავებულია C<sub>3</sub>S-სგან. ნელა მაგრდება, მიღებული ცემენტის მარკა დაბალია, თუმცა ხანგრძლივად გამაგრების შემდეგ მისი სიმტკიცე უთანაბრდება ჰიდრატირებული ალიტის სიმტკიცეს. ჰიდრატაციის სიღრმე მცირეა და ეს ეგზოთერმული რეაქციის სიჩქარე დაბალია. ამასთან ბელიტი უფრო მდგრადია მტკნარ და სულფატურ წყლებში, ვიდრე ალიტი. იქიდან გამომდინარე, რომ კლინკერის გამოწვისას ალიტი მიიღება ბელიტის ხარჯზე, ალიტის შემცველობის გაზრდა კლინკერში იწვევს ბელიტის შემცირებას. ალიტის და ბელიტის რაოდენობრივ ფარდობას აღწერს გაჯერების კოეფიციენტი - გკ. ალიტის და ბელიტის რაოდენობის ჯამი კლინკერში დაახლოებით 75 %-ია, ხოლო C<sub>3</sub>A და C<sub>4</sub>AF-ის ჯამი 20-25%, დარჩენილი პროცენტული ნაწილი მინარევებია [3-34].

ისეთი კლინკერის მიღებისთვის, რომელიც მხოლოდ ალის და ბელიტს შეიცავს, საჭიროა, რომ ნედლეულად გამოვიყენოთ სუფთა კირქვა და კვარცის ქვიშა (ან ამორფული სილიციუმის დიოქსიდი) და გამოწვა უნდა ვაწარმოოთ მაღალ ტემპერატურაზე. მრეწველობისთვის მსგავსი წარმოება მიუღებელია, რადგან ასეთი ნედლეული იშვიათადაა გავრცელებული ბუნებაში ამასთან მაღალია სათბობის ხარჯი. გასათვალისწინებელია, რომ კალციუმის ალუმინატები და ალუმოფერიტები კლინკერის და ცემენტის ზოგიერთ თვისებებს აუმჯობესებს, ზოგს კი პირიქით აუარესებს (სულფატმდგრადობას - C<sub>3</sub>A, რუხ ფერს იძლევა - C<sub>4</sub>AF და სხვა).

საწარმოო კლინკერებში ალიტის მაქსიმალური რაოდენობა 60-65%-ია, მაგრამ მათი მიღებისთვის საჭიროა მაღალ ტემპერატურას და სათბობის დიდ ხარჯი. ტემპერატურის ზრდისას ღუმლის ცეცხლგამძლე ამონაგის ზიანდება



მოკლე ვადაში, რის გამოც საჭირო ხდება მზრუნავი ღუმლის გაჩერება და რემონტი, რის გამოც კლინკერის წარმოება იზღუდება და ეკონომიკურად არამომგებიანია. ამასთანავე მაღალალიტური კლინკერის მისაღებად ნედლეულის ნარევი უნდა შეიცავდეს დიდი რაოდენობით კირქვას, შესაბამისად კლინკერში იზრდება კალციუმის ოქსიდის რაოდენობა. ამ კლინკერების ძნელად გამოწვის გამო კალციუმის ოქსიდი ხშირად რჩება თავისუფალი სახით, ე.ი. შეუბმელი კლინკერის მინერალებში. მაღალ ტემპერატურაზე გამოწვის გამო კალციუმის ოქსიდი მკვრივდება, კარგავს აქტიურობას და წყლის სწრაფი მიერთების უნარს. ასეთი გადამწვარი კალციუმის ოქსიდი გვიან უერთდება წყალს გამაგრებულ ცემენტის ქვაში ან ბეტონში და იწვევს არათანაბარ გაფართოებას, რაც ბეტონში ბზარებს აჩენს და ამასთან სიმტკიცეც მცირდება. სწორედ ამ მიზეზით, ზოგიერთი სტანდარტის მიხედვით 1-1.5%-ზე მეტი თავისუფალი კალციუმის ოქსიდის არსებობა კლინკერში დაუშვებელია. იმ შემთხვევაში თუ სტანდარტში თავისუფალი კალციუმის ოქსიდის რაოდენობა არარის განსაზღვრული, მაშინ საწიროა ხოლმე ცემენტების გამოცდა მოცულობის თანაბარი გაფართოების თვისებაზე. თუმცა ამ შემთხვევაში ცემენტის სათანადო ნიმუშებს თუ ეს მოვლენა აღმოაჩნდათ, მაშინ ცემენტის მთელი პარტია იქნება დაწუნებული [3-15].

ცელიტი ( $C_4AF$ ) მიიღება  $C_3A$ -ს ხარჯზე. მათ ფარდობას გამოსახავს თიხა-მიწური მოდული - $m$  ( $p$ ). კალციუმის ალუმინატებს და ალუმოფერიტებს, კალციუმის სილიკატებთან შედარებით უფრო დაბალი ლღობის ტემპერატურა აქვთ. ამის გამო, კლინკერის გამოწვის პროცესში  $1300-1450^{\circ}C$ -ზე ისინი ლღვება და გადადის თხევად ფაზაში. ეს უმნიშვნელოვანესია კლინკერის ძირითადი მინერალის ალიტის მისაღებად, რადგან ის მყარ მდგომარეობაში რთულად ფორმირდება, მაღალი ტემპერატურის თანაობისას. თხევადი ფაზის წარმოქმნის გამო (20-30%) კლინკერის მყარი ნაწილაკები იწყებს შეცხობას, რის გამოც იზრდება კლინკერის სიმტკიცე და ძნელდება მისი დაფქვა.

იმის მიხედვით როგორ მოხდება გაცივება წარმოიქმნება ან  $C_3A$  და  $C_4AF$ -ნელი გაციებისას ან კალცი უმაღლუმოფერიტული მინისებრი ფაზა -სწრაფი გაცივება. საშუალო სიჩქარისას მიიღება ორივე. ამ ფაზების განაწილება და რაოდენობა ცვლის როგორც კლინკერის, ასევე ცემენტის თვისებებს.

როგორც ზემოთ აღინიშნა კრისტალურ სტრუქტურაზე სხვადასხვა ფაქტორები მოქმედებს, როგორცაა გამოწვის და გაცივების რეჟიმი, მყარი ხსნარების სახეობა და რაოდენობა, მინარევები, დეფექტები და ა.შ. გახურებისა და გაცივების დროს ალიტი და ბელიტი პოლიმორფულ გარდაქმნებს განიცდია, რაც კლინკერის და შესაბამისად ცემენტის თვისებებზე აისახება და ცვლის მას. მაგალითისთვის :  $\beta$ - $C_2S$  მჭიდა მასალაა, ხოლო  $\gamma$ - $C_2S$  არ მაგრდება ნორმალურ პირობებში.

ალიტის შემადგენლობად შემდეგი ფორმულაა მიჩნეული:  $54CaO \cdot 16SiO_2 \cdot MgO \cdot Al_2O_3$  ე.ი 18 მოლეკულა ალიტში ორი მოლეკულა დიოქსიდის ნაცვლად გვაქვს ალუმინისა და მაგნიუმის ოქსიდები. იმ შემთხვევაში თუ მინარევების სახით ტუტე მეტალების ოქსიდების შემცველი მინარევები მოხვდებიან ნედლეულში მაშინ კლინკერში ყოველ 12 მოლეკულა  $C_2S$ -ში შეიძლება ერთ  $CaO$ -ს ჩაენაცვლოს ერთი მოლეკულა  $K_2O$  და სამ მოლეკულა  $C_3A$ -ში კი ერთ  $CaO$ -ს ჩაენაცვლოს 1 მოლეკულა  $Na_2O$  ან მცირე რაოდენობით ნატრიუმის სულფატები [3-19].

ნედლეულში ან სათბობში გოგირდის შემცველი ნივთიერებების არსებობის შემთხვევაში, კლინკერისას გამოწვისას შესაძლებელია შუალედურ ფაზებად მივიღოთ  $2(C_2S) \cdot CaSO_4$ ,  $3(C_2S) \cdot CaSO_4$ ,  $3(CA) \cdot CaSO_4$  და სხვ. ბოლო პერიოდში ნედლეულს დამატა 8-10% კალციუმის ქლორიდი, ეს დაბალ ტემპერატურაზე კლინკერის მიღების საშუალებას იძლევა. კალციუმის ქლორიდის დამატება ახალ აქტიურ მინერალს აჩენს კლინკერში - ალინიტს  $6(3CaO \cdot SiO_2) \cdot 4CaO \cdot 2AlOCl$ .

ყველა მინერალი რომელიც ზემოთ ჩამოვთვალეთ  $1000 - 1400^\circ C$ -ის ფარგლებში ინარჩუნებს სტაბილურობას, მაღალ ტემპერატურაზე იშლებიან, თითოეული მათგანი მნიშვნელოვანია კლინკერის მინერალების ფორმირებაში.

მიჩნეულია, რომ გამოწვისას ალუმინატური ფაზების შემადგენლობაში 13% მინარევებია, ალუმოფერიტულში- 10%, ბელიტურში 6%.

$Al_2O_3$ , და  $Fe_2O_3$  რაოდენობის თანაფარდობა გვაძლევს სხვადასხვა კალციუმის ალუმოფერიტებს-  $C_8A_3F$ ,  $C_6A_2F$ ,  $C_4AF$ ,  $C_6AF_2$ .  $C_4AF$  წარმოქმნისთვის  $Al_2O_3$  და  $Fe_2O_3$  -ის თანაფარდობა უნდა იყოს (მასის %-ის მიხედვით) 0,64 - 1,28.

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ის ერთი და იგივე კონკრეტული რაოდენობა, სხვადასხვა მინერალების წარმოქმნის საშუალებას იძლევა. აქედან გამომდინარე, პორტლანდცემენტის კლინკერი წარმოადგენს მრავალფაზურ რთულ სისტემას, და მისი მხოლოდ ოთხი მინერალის შემცველობით დახასიათება, რეალური სურათის იდენტური ვერ იქნება და დაახლოებით წარმოადგენას ქმნის. უფრო ზუსტი სურათის საჭიროების შემთხვევაში საჭიროა რთული ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდების და აპარატების გამოყენება [3-14].

#### 1.4. კლინკერის დახასიათება გაჯერების კოეფიციენტის და მოდულების სიდიდეების მიხედვით

კლინკერის და ცემენტის თვისებები ხასიათდება გაჯერების კოეფიციენტით გკ, სილიკატური მოდულით სმ (n) და თიხამიწური მოდულით - თმ (p) სიდიდეების საშუალებით:

$$g_k = \frac{CaO - (1.65 Al_2O_3 + 0.35 Fe_2O_3 + 0.7 SO_3 + CaO_{თავის})}{2.8(SiO_2 - SiO_2_{თავის})} \quad (1)$$

$$g_k = \frac{CaO - 1.65 Al_2O_3 - 0.35 Fe_2O_3}{2.8 SiO} \quad (2)$$

$$სმ (n) = S / (A + F); \quad თმ (p) = A / F$$

სადაც C, A, E, S არის ოქსიდების რაოდენობა კლინკერში (%-ობით).

CaO თავის და SiO<sub>2</sub> თავის. (1) - კალციუმის და სილიციუმის ჟანგბადნაერთების შეცვლობაა კლინკერში რომლებიც არ შევიდნენ რეაქციაში და გამოწვის შემდეგ დარჩნენ თავისუფალი სახით.

ფორმულა (2) გამარტივებულია. იგი არ ითვალისწინებს კლინკერში არსებული გოგირდის ანჰიდრიდის, თავისუფალი კალციუმის და სილიციუმის ჟანგბადნაერთების რაოდენობას. ოქსიდების წინ დაწერილი კოეფიციენტები მიღებულია შესაბამისი ნაერთებიდან:

3CaO\*SiO<sub>2</sub>-ში CaO-ს მოლეკულური წონითი შეფარდება SiO<sub>2</sub>-ის მოლეკულურ წონასთან უდრის 2,80: 1;

3CaO\*Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ში CaO-ს წონითი ფარდობა Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-თან უდრის 1,65 : 1;

CaSO<sub>4</sub> -ში CaO-ს წონითი ფარდობა SO<sub>3</sub> -თან უდრის 0,7:1;

$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  პირობითად შეიძლება წარმოვადგინოთ, როგორც ჯამი  $\text{C}_3\text{A} + \text{CF}$ .  
 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ -ში  $\text{CaO}$ -ს წონითი ფარდობა  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  -თანუდრის 0,35:1.

1% შეუერთდება 2,8%  $\text{CaO}$ -ს და მოგვცემს 5,8%  $\text{C}_2\text{S}$ -ს, ხოლო თუ შეუერთდა 1,87%  $\text{CaO}$  მოეცემს 2,87%  $\text{C}_2\text{S}$ -ს.

ნედლეულის ნარევის გამოწვის დროს ყველა მეტალის ოქსიდი გაჯერდება კალციუმის ოქსიდით და მოგვცემს ყველაზე უფრო მაღალფუძიან ნაერთებს. მხოლოდ სილიციუმის დიოქსიდი არ შედის სრულად კალციუმის ოქსიდთან რეაქციაში, მაღალი ტემპერატურისა და დიდი დროის გამო. შესაბამისად კლინკერში რეალურად მიიღება, როგორც  $\text{C}_3\text{S}$ , ასევე  $\text{C}_2\text{S}$ . თუ  $\text{SiO}_2$ -ის მთლიანი რაოდენობიდან მივიღეთ მხოლოდ  $\text{C}_3\text{S}$ , მაშინ გაჯერების კოეფიციენტი (გკ) 1-ის ტოლი იქნება, ანუ ამ დროს კლინკერში არ იქნება  $\text{C}_2\text{S}$ . თუკი  $\text{SiO}_2$  -გან მთლიანად მივიღეთ  $\text{C}_2\text{S}$ , მაშინ გკ იქნება 0,67-ის ტოლი, და შესაბამისად კლინკერში არ იქნება  $\text{C}_3\text{S}$ . აღნიშნულის გამო კლინკერში კალციუმის ოქსიდის რაოდენობა იანგარიშება (იმის მიხედვით თუ რამდენი გვინდა გვქონდეს მასში  $\text{C}_3\text{S}$  და  $\text{C}_2\text{S}$ . შემდეგი ფორმულით:

$$\text{CaO} = 2,8 \text{ გკ} * \text{SiO}_2 + 1.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 0.35 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 0.7 \text{ SO}_3.$$

აქედან იანგარიშება გკ (1) ან ( 2) ფორმულებით.

აქედან გამომდინარე, გკ კლინკერში არ ღებატება 1-ს და საწარმოო კლინკერებისში ლავირებს 0,66-დან 0,82-მდე. გკ-ს მაღალი მაჩვენებელი, ნიშნავს  $\text{C}_3\text{S}$  მაღალ რაოდენობას (37,5%-დან 60%-მდე). დანარჩენი 15-37,5%  $\text{C}_2\text{S}$ -ია ( $\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}$  ჯამი უნდა იყოს 75%). ალიტური კლინკერში ალიტის შემცხველობა აღებატება 60%-ს და ბელიტს არაუმეტეს 15%-ს. მისი გკ 0,92ზე მეტია. ბელიტურ კლინკერში  $\text{C}_2\text{S}$  37.5%-ზე მეტია, ხოლო  $\text{C}_3\text{S}$  - 37,5%-ზე ნაკლები , მისი გკ არ აღებატება 0.81-ს. ეს კიდევ ერთხელ აჩვენებს, რომ გკ-ს დამოკიდებულება ალიტთან პირდაპირპროპორციულია.

ჩვეულებრივ კლინკერებში სმ (n) ლავირებს 1,7-დან 3,5-მდე, ხოლო თმ (p) 1-დან 3-მდე. თმ პირდაპირ პროპორციულია C<sub>3</sub>A-სი და უკუპროპორციულია C<sub>4</sub>AF-სი. ასეთ დროს, როგორც უკვე აღვნიშნეთ კლინკერის თვისებებზე ძირითად გავლენას მოახდენს C<sub>3</sub>A.

სმ(n) - კლინკერის და ცემენტის თვისებებზე ბევრს არაფერს გვეუბნებნა, თუმცა ტექნოლოგიებისთვის მისი ცოდნა მნიშვნელოვანია, რადგან მისი აზრდით ალუმოფერიტული ფაზა მცირდება, რაც აძნელებს კლინკერის შეცხოვას, ალიტის წარმოქმნას და ყველა ამ პროცესების შესაბამის შედეგს.

C<sub>3</sub>A-ს და C<sub>4</sub>AF-ის თანაფარდობის მიხედვით კლინკერები სამ ნაწილად შეგვიძლია დავყოთ:

ალუმინატურად (p > 2,3), ნორმალურად (p 2,3 — 1,1), ცელიტურად (p < 1,1).

თუ კლინკერში რკინის ოქსიდების შემცველობა ბევრად აღემატება Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ს (თმ ნაკლებია 0,64), წარმოიქმნება რკინის ოქსიდებით მდიდარი ფაზები. ასეთი ალუმოფერიტების შედგენილობა გამოისახება ასეთი ფორმულით: C<sub>2</sub>(A,F) და პირობითად ისინი C<sub>2</sub>A-ს და C<sub>2</sub>F-ის მყარი ხსნარებად შეგვიძლია წარმოვადგინოთ. ასეთ დროს წონითი თანაფარდობა C:A= 1,10, ხოლო C:F = 0,70,რის გამოც გკს გამოსათვლელად გამოიყენება შემდეგი ფორმულად:

$$გკს=(C-1.1 A-0.7 F-0.7SO_3)/(2,8 S)$$

იმ შემთხვევაში თუ p=1, მაშინ კლინკერი შეიცავს დაახლოებით 5% C<sub>3</sub>A-ს, ხოლო C<sub>4</sub>AF-ს 17%-მდე (ჯამი 22%);

თუ p=1,5, შესაბამისად, 10 და 12%-ს; თუ p=2-ს, 12 და 10% ; თუ p=5, დაახლოებით 17 და 5 %-ს [3-4].

## 1.5 კლინკერის ქიმიური და მინერალოგიური შედგენილობის განგარიშება

კლინკერის ქიმიური ანალიზით მიღებულ პასუხებზე დაყრდნობით, შესაძლებელია მისი მინერალოგიური შედგენილობის განსაზღვრა და პირიქით.

კლინკერის მინერალოგიური შედგენილობა იანგარიშება შემდეგი ფორმულებით (%-ობით):

$$C_3S = 4,07 CaO - 7,6 SiO_2 - 6,7 Al_2O_3 - 1,42 Fe_2O_3$$

$$C_2S = 8,6 SiO_2 + 5,07 Al_2O_3 + 1,07 Fe_2O_3 - 3,07 CaO$$

$$C_3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,7 Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3,04 Fe_2O_3$$

$$CaSO_4 = 1,7 SO_3$$

რა დროსაც ითვლება, რომ  $C+S+A+F=100\%$ .

კალციუმის სილიკატების პროცენტული რაოდენობის განსაზღვრა გაჯერების კოეფიციენტის მნიშვნელობის გამოყენებითაც შესაძლებელია.

$$C_3S = 3,8 (3 \cdot \text{გკ} - 2) \cdot S$$

$$C_2S = 8,6 (1 - \text{გკ}) \cdot S$$

როგორც აღვნიშნეთ, კლინკერის მინეროლოგიურ შედგენილობაზე დაყრდნობით, შესაძლებელია მისი ქიმიური შედგენილობის განსაზღვრა შემდეგი ფორმულებით:

$$CaO = 0,7369 C_3S + 0,6512 C_2S + 0,6227 C_3A + 0,4616 C_4AF$$

$$SiO_2 = 0,2631 C_3S + 0,3488 C_2S$$

$$Al_2O_3 = 0,3773 C_3A + 0,2098 C_4AF$$

$$Fe_2O_3 = 0,3286 C_4AF$$

ამასთან მინეროლოგიაზე დაყრდნობით შესაძლებელია კლინკერის გკ, თმ და სმ ვიანგრარიშოთ :

$$\text{გკ} = \frac{C_3S + 0,8838 C_2S}{C_3S + 1,3250 C_2S}$$

$$n = \frac{C_3S + 1,3250 C_2S}{1,4341 C_3A + 2,0464 C_4AF}$$

$$p = \frac{1,1501 C_3A}{C_4AF} + 0,6383.$$

კლინკერის სისტემის შემადგენელი კომპონენტების გახურების შედეგად

მიიღება სხვადასხვა ფაზა. ამ ფაზების სისტემაში  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  და  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ძირითად ოქსიდებს წარმოადგენენ, მაგრამ მათ გარდა მინარევებად გვხვდება მაგნიუმის და ტუტემეტალთა ოქსიდები. ეს სისტემა ისე გამოიწვება მაღალ ტემპერატურაზე, რომ ნაწილობრივ ან მთლიანად ღვება ზოგიერთი კომპონენტი. გასათვალისწინებელია, რომ ყველა კომპონენტი თავისთავადაც რთულ გარდაქმნას ახორციელებს და შემდეგ ურთიერთქმედებს სხვა კომპონენტებთანაც, რა დროსაც მიიღება ახალი ქიმიური ნაერთები ან მყარი ხსნარები. ცალკე აღებულად, ამ ოქსიდების ღვობის ტემპერატურა საკმაოდ მაღალია ( $\text{CaO}$ -2550,  $\text{SiO}_2$ -1730,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -2050,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -1560,  $\text{FeO}$ -1350,  $\text{MgO}$ - 2800 °C ), თუმცა კომპონენტების რაოდენობის ზრდასთან ერთად მცირდება ღვობის ტემპერატურა (°C):

1455°C -  $\text{CaO}$  -  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$

1338 °C -  $\text{CaO}$  -  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

1315°C -  $\text{CaO}$  -  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -  $\text{Na}_2\text{O}$

1300°C -  $\text{CaO}$  -  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -  $\text{MgO}$

1280 °C -  $\text{CaO}$  -  $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  -  $\text{MgO}$  -  $\text{Na}_2\text{O}$

კლინკერის მრავალკომპონენტური ოქსიდების სისტემაში თხევადი ფაზის წარმოქმნა იწყება 1280—1300°C-ზე. ეს ფაზა 1400—1450°C-ზე შეცხოვრის დროს 15–35%-ია. თუ ტემპერატურას გავზრდით ნებისმიერი სისტემა ექვემდებარება სრულად გაღვობას. [3-4]

ოთხკომპონენტური სისტემის ევტექტიკას 1338°C ღვობის ტემპერატურით აქვს შემდეგი შედგენილობა:  $\text{CaO}$ -54,8,  $\text{SiO}_2$ -6,0,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -22,7,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -16,5%. ასეთი შედგენილობის სისტემა არ გამოიყენება კლინკერის მისაღებად.

სისტემის ცალკეული კომპონენტი (გამოყენებული ნედლეულის შემადგენლობიდან გამომდინარე) გახურებით რთულად გარდაიქმნება. მაგალითად, კვარცი (რომელიც შედის ქვიშაში, თიხაში და სხვა ნედლეულში) განიცდის შემდეგ ძირითად პოლიმორფულ გარდაქმნებს (°C):

*β*კვარცი -573°C – *α*კვარცი -873°C – *α*ტრიდიმიტი -1470°C – *α*კრისტობალიტი -1730°C – ნაღვობი

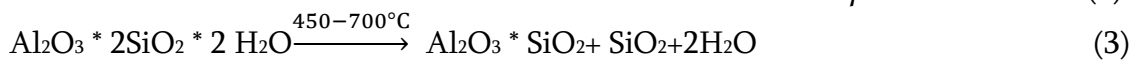
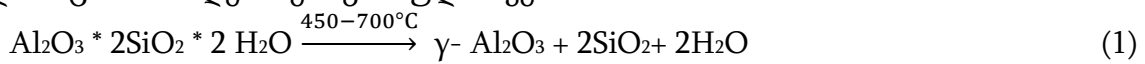




მიერთების უნარს. ამ დროს მიღებული კალციუმის ოქსიდი გადამწვარია და მისი ჰიდრატაცია ხდება გამაგრებულ ბეტონში, რის შემდეგაც ბეტონის მოცულობა იზრდება, დაძაბულობა იქმნება და ამასთან ხანდახან ბზარებიც ჩნდება. დაბალ ტემპერატურაზე კალციუმის კარბონატის გამოწვისას მიღებული კალციუმის ოქსიდი ბევრად უფრო აქტიურია.

თიხის შემადგენლობაში შედის ისეთი მინერალები როგორცაა კაოლინიტი, გალუაზიტი, მონტმორილონიტი. ზედაპირული წყლის მოსაშორებლად (სინესტე) თიხისთვის 100°C-მდე გახურება საკმარისია, ხოლო ადსორბციული წყლის მოსაშორებლად საჭიროა 200-400°C-ზე გახურება. თიხური მინერალები გამოწვის დროს ასევე წარმოქმნიან ფაზებს, თუმცა საკმაოდ რთულია და ბოლომდე დადგენილი ჯერ არ არის.

ცნობილი მეცნიერები ვ. ვერნადსკი და დ. ბელიანკინი გვამლევენ კოლინატის დისოციის რამდენიმე სავარაუდო სქემას:



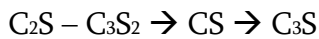
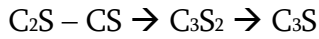
### სილიმანიტი

თიხის მაღალ ტემპერატურაზე გამოწვისას, ტემპერატურის შერჩევას დიდი მნიშვნელობა აქვს, მაგალითად 500-600°C-ზე გამომწვარი თიხა აქტიური და რენტგენოამორფულია, მას დაკარგული აქვს ბმული წყალი. ტემპერატურის გაზრდით გამომწვარი თიხის აქტიურობა რენტგენოამორფული ფაზების მკვრივ კრისტალურ ფაზებში გადასვლის გამო მცირდება, ხოლო 1000°C ზე ზევით იწყება ახალი ქიმიური ნაერთის - მულიტის (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* 2SiO<sub>2</sub>) წარმოქმნა, რომელსაც დიდი სიმტკიცე აქვს. დარჩენილი სილიციუმის დიოქსიდიპოლიმორფულად გარდაიქმნება თერმულად დამუშავებისას [3-11].

გარდაქმნები რომელზეც ზემოთ ვისაუბრეთ, ცალკეულ ოქსიდებში ან ცალკეულ მინერალებში დამოუკიდებლად მიდის, თუმცა კლინკერის გამოწვისას რთული პროცესები თანადროულად მიმდინარეობს. იმისთვის რომ მიმდინარე პროცესში თანმიმდევრულად გავერკვეთ, სასურველია ჯერ ორ სხვადასხვა

კომპონენტს შორის კავშირის დადგენა, შემდეგ კი სამ და უფრო მეტ კომპონენტის სისტემების განხილვა.

სისტემა  $\text{CaO-SiO}_2$  - ამ ორ ოქსიდს შორის ქიმიური რეაქცია სულ მცირე  $500^\circ\text{C}$ - დან იწყება. სისტემაში მიიღება ოთხი ნაერთი. თითოეული გარდაიქმნება პოლიმორფულად და თავის მხრივ დამოუკიდებელ ფაზებად ყალიბდებიან. მათი თანმიმდევრობის შესახებ რამდენივე შეხედულება არსებობს, მაგალითად:



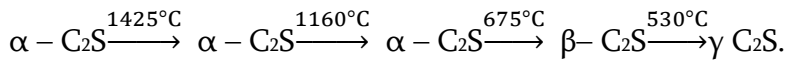
თუმცა თითოეულ ვარიანტში საბოლოოდ გვაქვს  $\text{C}_3\text{S}$ . ეს ნივთიერებები მყარფაზური რეაქციებისას მიიღება. უნდა ითქვას, რომ  $\text{C}_3\text{S}$ -ის მიღება მაღალ ტემპერატურაზეც კი ძნელია. რეალური ნედლეულის ნარევის გამოწვის დროს, როცა არსებობს მრავალი ნარევი და თხევადი ფაზა მიიღება, ფაზათა წარმოქმნის ტემპერატურული ინტერვალთან ერთად იცვლება მათი თანამიმდევრობა და პროცესის კინეტიკა.

აღნიშნული სისტემიდან გამომდინარე ფაზათა წარმოქმნის ტემპერატურული ინტერვალი შეიძლება იყოს ( $^\circ\text{C}$ ):



მყარ ფაზათა რეაქციებს ესაჭიროება დაბალი ტემპერატურა და ამასთან საკმაოდ რთული მექანიზმი აქვთ. სხვადასხვა ფაზის წარმოქმნა ფარავს ერთმანეთს.

სამრეწველო კლინკერების ძირითად მინერალებს წარმოადგენენ ალიტი ( $\text{C}_3\text{S}$ ) და ბელიტი ( $\text{C}_2\text{S}$ ). ტემპერატურის ცვლილების გამო ისინი პოლიმორფულად გარდაიქმნებიან, რაც იწვევს კლინკერის თვისებების ცვლილებას ( $^\circ\text{C}$ ):



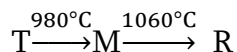
საერთო შემადგენლობის მქონე ნაერთის სხვადასხვა მოდიფიკაციას განსხვავებული კრისტალური მესრის აღნაგობა აქვს, რაც მათი განსხვავებული თვისებების მიზეზია. (მაგალითად,  $\text{C}_2\text{S}$  -ის ყველა მოდიფიკაციას მჭიდა მასალის თვისებები აქვს (ანუ ჰიდრატაციის და გამაგრების უნარი). გარდა  $\gamma - \text{C}_2\text{S}$ ,  $\beta - \text{C}_2\text{S}$  -ის გადასვლა  $\gamma - \text{C}_2\text{S}$  -ში კლინკერის გაცივების დროს იწვევს შემცხვარი და მაგარი კლინკერის გრანულების გადაქცევას ფხვნილისებრ მასალად, რაც მინერალის სტრუქტურის და სიმკვრივის ცვლილების გამოა (  $\beta - \text{C}_2\text{S}$  -ის სიმკვრივეა 3,28, ხოლო  $\gamma - \text{C}_2\text{S}$ -ის 2,97 ტ/მ), ეს იწვევს მოცულობის გაზრდას 12%-ით.  $\beta$  ფორმის სტაბილიზაციას ხელს, მინარევების არსებობა უწყობს.  $\text{C}_2\text{S}$ -ის ლღობის ტემპერატურაა  $2130^\circ\text{C}$ .

$\alpha - \text{C}_2\text{S}$ -ს აქვს ტრიგონალური მესერი,  $\beta - \text{C}_2\text{S}$  კი - მონოკლინური  $\gamma \text{C}_2\text{S}$  აქვს ოლივინის ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) ტიპის სტრუქტურა.

თუ გამოწვის დროს, გარემო აღმდგენელია, წარმოქმნილი  $\text{Fe}^{2+}$  ჩანაცვლება  $\text{Ca}^{2+}$  -ის ადგილზე და შესაბამისი კლინკერი დაიფუჭება.

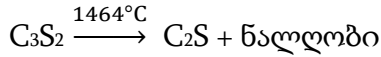
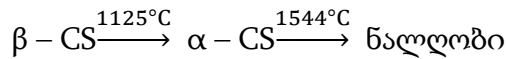
ალიტი ( $\text{C}_3\text{S}$ ) მდგრადიობას  $1250-2070^\circ\text{C}$ -ის ინტერვალში ინარჩუნებს. უფრო მაღალ ტემპერატურაზე იგი გალღვება ინკონგრუენტულად და მიღება ნალღობი და კალციუმის ოქსიდი.  $1250^\circ\text{C}$ -ზე დაბლა კი, ნელი გაცივებით  $\text{C}_3\text{S}$  დაიშლება  $\text{C}_2\text{S}$ -ად და  $\text{CaO}$ -დ. ალიტი არის  $\text{C}_3\text{S}$ -თან, მცირე შემცველობის  $\text{MgO}$  და  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -ის მყარი ხსნარი [3-14].

ოთახის ტემპერატურაზე  $\text{C}_3\text{S}$  -ს აქვს ტრიგონალური სტრუქტურა. ალიტი გვხვდება ტრიკლინურ (T), მონოკლინურ (M) და ტრიგონალურ (R) მოდიფიკაციებში, ქველა მათგანს მჭიდა მასალის უნარი აქვს



$\text{C}_2\text{S}$  და  $\text{C}_3\text{S}$ -ის სისტემა გვაძლევს ევტექტიკას  $2050^\circ\text{C}$ -ზე, ვოლასტონიტი (CS) და რანკინიტი ( $\text{C}_3\text{S}_2$ ) კლინკერში არ გვხვდება, მაგრამ ისინი წარმოიქმნება დაბალ ტემპერატურებზე. როგორც შუალედური ფაზები. მათ არა აქვთ

შემკვრელის თვისებები. ვოლასტონიტი პოლიმორფულად გარდაიქმნება:



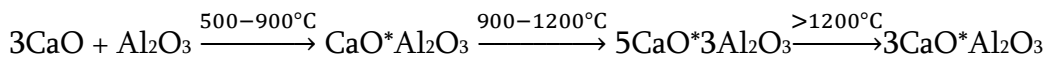
$\beta$ - CS აქვს ტრიკლინური და მონოკლინური მოდიფიკაციები. ფსევდო-ვოლასტონიტის ( $\alpha$  - CS) და რანკინიტის სტრუქტურა არ არის დადგენილი.

სისტემა CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ამ სისტემაში წარმოიქმნება შემდეგი ქიმიური ნაერთები: C<sub>3</sub>A, C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>, CA, CA<sub>2</sub>, CA<sub>6</sub>. პორტლანდცემენტის კლინკერში ძირითადად გვხვდება C<sub>3</sub>A და იშვიათად მცირე რაოდენობის C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>.

თიხურ- მაღალთიხურ ცემენტებში ძირითადად წარმოიქმნება CA და CA<sub>2</sub>, და იშვიათად მცირე რაოდენობის CA<sub>6</sub> და C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>

C<sub>3</sub>A პოლიმორფულად არ გარდაიქმნება და ლღობის ტემპერატურა 1542°C-ია, რომელზეც ლღვება ინკონგრუენტულად, წარმოქმნის ნალღობს და კალციუმის ოქსიდს და აქვს კუბური კრისტალური მესერი.

აღნიშნულ სისტემაში რეაქცია იწყება 500°C -ზე მყარ მდგომარეობაში. თუ სისტემაში საკმარისი რაოდენობითაა კალციუმის ოქსიდი, მაშინ მიიღება მაღალფუძიანი ნაერთი:



ჭარბი რაოდენობის თიხამიწის შემთხვევებში მიიღება CA<sub>2</sub>, და CA<sub>6</sub>. თითოეული ზემოთაღნიშნულ კალციუმის ალუმინატს ახასიათებს მჭიდა მასალის უნარი, თუმცა ერთმანეთისგან განსხვავდებიან. მონომინერალები C<sub>3</sub>A და C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> წყლის დასხმის შემდეგ იკვრებიან სწრაფად და აქვთ დაბალი სიმტკიცე, თუმცა კლინკერის სხვა მინერალებთან ერთად ისინი ხელს უწყობენ ცემენტის სწრაფად გამაგრებას. CA, CA<sub>2</sub>, და CA<sub>6</sub> ნელა მკვრივდება, მაგრამ ლეზულობს მაღალ სიმტკიცეს. თითოეული შედის თიხური ცემენტების შედგენილობაში [3-19].

სისტემა CaO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - სისტემაში თეორიულად რეაქცია იწყება 300-400°C-ზე, მაგრამ იგი ინტენსიურ ფაზას აღწევს 600 -800°C-ზე:



CF და CF<sub>2</sub> ჩვეულებრივი ცემენტების კლინკერებში არ გვხვდება, თუმცა სპეციალური დანიშნულების კლინკერებში Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ის მაღალი და Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ის დაბალი

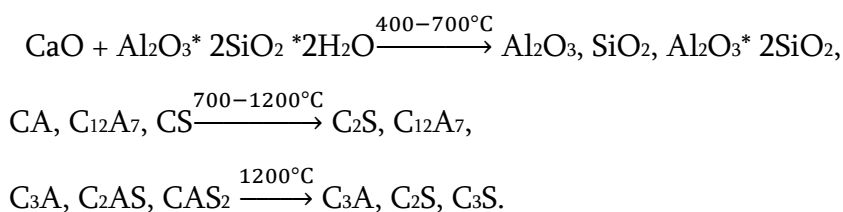
შემცველობის დროს მიიღება  $C_2F$ , რომელის გამაგრება ხანგრძლივ პროცესთანაა დაკავშირებული.

სისტემა  $CaO-SiO_2-Al_2O_3$  - ამ სისტემაში წარმოიქმნება ორი ქიმიური ნაერთი: გელენიტი  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$  (ღლობის ტემპერატურა  $1593^\circ C$ ) და ანორტიტი  $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  (ღლობის ტემპერატურა  $1553^\circ C$ ), არცერთი მათგანი არაა მჭიდა მასალის თვისებების მქონე. მიღებისთვის საჭიროა შემადგენელ კომპონენტების რაოდენობის ფარდობაზე დაკვირვება განსაკუთრებით  $CaO$ -ს რაოდენობაზე. რაც მეტია კალციუმის ოქსიდი, მით ნაკლებია - გელენიტი და ანორტიტი. პორტლანდცემენტის კლინკერებში ისინი თითქმის არ გვხვდება, რადგან კლინკერები შეიცავენ დიდი რაოდენობით კალციუმის ოქსიდს და მცირე რაოდენობით თიხამიწას, თუმცა მათ შეიძლება შუალედურ მინერალებად შევხვდეთ. ანორტიტს სამი მოდიფიკაცია აქვს: ტრიკლინური, რომისებრი და ჰექსაგონალური.

სისტემა  $CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3$  - აქ მიიღება კალციუმის ალუმოფერიტების მყარი ხსნარები საერთო ფორმულით  $6CaO \cdot x Al_2O_3 \cdot y Fe_2O_3$ . პირველ ეტაპზე მიიღება  $C_5A_3$  და  $C_2F$ , შემდეგ  $1100-1500^\circ C$ -ზე მიიღება  $C_6A_2F$ ,  $C_4AF$ ,  $C_6AF_2$  და ა.შ.

მინარეების არსებობისას ყველა ზემოთ აღნიშნული ფაზების წარმოქმნა ჩქარდება. მიიღება მრავალი მყარი ხსნარი და იცვლება მათი წარმოქმნის ტემპერატურული ინტერვალი.

სისტემა  $CaO-Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  - აოლინიტი თიხების ერთ-ერთი ძირითადი შემადგენელი მინერალია.



ამ სისტემაში მიიღება კლინკერი, მაგრამ იგი არ შეიცავს ფერიტულ ფაზებს. მაღალ ტემპერატურამდე რეაქციები მიდის მყარ ფაზებში და ძნელად წარმოიქმნება  $C_3S$ . ყველა აღნიშნული მაღალტემპერატურული ფაზები არიან კლინკერის ძირითადი მინერალები.

სისტემა  $CaCO_3-Al_2O_3-2SiO_2-2H_2O-Fe_2O_3$  - ეს სისტემა გამოიყენება

ძირითადად და შესაბამისად ფართოდაა გავრცელებული რიგითი პორტლანდ-ცემენტების კლინკერების მისაღებად. ამ შემთხვევაში ნელლეულის ნარევი მთავარი ნედლეულია კირქვა. თიხა და პირიტის ნამწვი (ეს უკანასკნელი არის ქიმიური მრეწველობის ნარჩენი, რომელიც შეიცავს 60-70%  $Fe_2O_3$  -ს და მოდება პირიტის  $FeS_2$  გამოწვის შედეგად ჟანგბადის გარემოში). გარდა ამ სისტემისა, ბუნებრივი ნედლეული და წარმოების ნარჩენები შეიცავენ მრავალ მინარევს, რომლებიც ცვლიან ქიმიური რეაქციების კინეტიკას და ფაზათა შედგენილობას.

ქვემოთ მოცემულია მიახლოებითი ტემპერატურები და წარმოქმნილი ფაზები, რომლებიც მიიღება აღნიშნულ რეალურ საქარხნო -სისტემაში, თუმცა მინარევების გათვალისწინების გარეშე, რომლებიც ყოველთვის გვხვდება – კლინკერებში ( $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $CaSO_4$ ,  $TiO_2$  და სხვა).

აღნიშნულ სისტემაში სხვადასხვა ტემპერატურაზე მიიღება სხვადასვა ფაზა და ყველა მოცემულ ტემპერატურაზე მივიღებთ მრავალფაზიან პროდუქტს: -

600°C –  $CaCO_3$ , მეტაკაოლინიტი,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CA$ ,  $CF$

700°C –  $CaCO_3$ , მეტაკაოლინიტი,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $C_2S$ ,  $CA$ ,  $CF$ ,  $C_2AS$ ;

800°C –  $CaCO_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $C_2S$ ,  $CS$ ,  $CF$ ,  $C_2AS$ ,  $CA$ ;

900°C –  $CaCO_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $C_2S$ ,  $CS$ ,  $C_2AS$ ,  $CF$ ,  $C_2F$ ,  $CA$ ,  $C_3A$ ;

1000°C –  $CaCO_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $C_2S$ ,  $CS$ ,  $C_2AS$ ,  $CA$ ,  $C_3A$ ,  $C_{12}A_7$ ,  $C_2F$

1100°C –  $CaCO_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $C_2S$ ,  $C_2AS$ ,  $C_2F$ ,  $C_3A$ ,  $C_{12}A_7$ ,

1200°C –  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $C_2S$ ,  $C_2AS$ ,  $C_2F$ ,  $C_3A$ ,  $C_{12}A_7$ ,  $C_4AF$ ;

1300°C –  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_{12}A_7$ ,  $C_4AF$ ,  $C_3S$  (მცირე რაოდენობით).

1300°C-ზე და უფრო მაღალ ტემპერატურაზე ამ სისტემაში წარმოიქმნება თხევადი ფაზას (ნალღობი), ამიტომ შემდგომში ტემპერატურის გაზრდით რეაქციები არის როგორც მყარ ასევე თხევად ფაზაში. ამ დროს ხდება როგორც მყარი ფაზის შეცხოვა თხევადი ფაზის სიშულებით, ასევე ქიმიური რეაქცია, სადაც კლინკერი ძირითადი მინერალს ალიტს ( $C_3S$ ) წარმოქმნის, რაც ჩქარდება თხევადი ფაზის არსებობის გამო. საჭირო დიდი რაოდენობის ალიტი წარმოიქმნება 1400—1450°C-ზე მხოლოდ თხევადი ფაზის დახმარებით [3-4].

## 1.6. რეაქციები, რომლებიც მიმდინარეობენ თხევადი ფაზის მონაწილეობით

ლღობის დაწყებისას აღნიშნული სისტემა მრავალფაზიანია, და ამასთან შეიცავს მინარევებს. ფაზების ლღობის ტემპერატურაზე გავლენა აქვთ  $R_2O$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ ,  $CaSO_4$  - და სხვა მინარევებს. მათი გავლენით ეს ტემპერატურა მცირდება. ნედლეულის ნარევის გამოწვისას კალციუმის ალუმოფერიტები და ალუმინატები მთლიანად თხევად ფაზაში ექცევიან მინარევებთან ერთად. თხევადი ფაზის დაახლოებითი რაოდენობა  $1450^{\circ}C$ -ზე შემდეგი ფორმულით იანგარიშება:

$$P=3x+2,25y+a+b,$$

სადაც-  $x$ ,  $y$ ,  $a$  და  $b$  შესაბამისად კლინკერში ალუმინის, რკინის, მაგნიუმის და ტუტე ოქსიდების რაოდენობაა პროცენტულობით. გასათვალისწინებელია რომ ნარევი არსებობის შემთხვევაში კალციუმის ქლორიდი, კალციუმის ფტორიდი, ტუტე მეტალთა სულფატები ნალღობში მოექცევა. ნალღობთა რაოდენობა  $1450^{\circ}C$ -ზე 15-დან 35% მდე მერყეობს.

ნალღობის წარმოქმნა  $1300$ -დან  $1450^{\circ}C$ -მდე ტემპერატურის ცვლილებით გვჭირდება ალიტის ( $C_3S$ ) საჭირო რაოდენობის მისაღებად. მის მიღებაში მონაწილეობას ღებულობს  $C_2S$  და კალციუმის ოქსიდისგან თხევადი ფაზის მონაწილეობით, რაც საჭიროა იონების გადატანასა და ურთიერთქმედებაში [3-67].

მკვრივი კალციუმის ოქსიდის ხსნადობის სიჩქარე შეცხოვამდე მიყვანისას დაახლოებით  $7,2 \cdot 10^{-6}$  მ/წმ-ია, ხოლო  $C_2S$ -ის ნაწილაკების სიჩქარე  $2,36 \cdot 10^{-6}$  მ/წმ-ია. ტუტე მეტალთა იონების და მათი სულფატების მინარევების დახმარებით ნალღობში  $C_2S$ -ის ხსნადობა იზრდება ისე, რომ 3-5-ჯერ უფრო მეტია, ვიდრე კალციუმის ოქსიდის ხსნადობა. შესაბამისად მინარევების ლავირებით შესაძლებელია ალიტის მიღების რეგულირება რაც პირდაპირ ნიშნავს შეცხოვბის პროცესის რეგულირებას. ალიტის წარმოქმნის მექანიზმის მხოლოდ დაახლოებითი მექანიზმი შეგვიძლია განვიხილოთ, რადგან სრულად არაა შესწავლილი. პირველ ეტაპზე ძირითადი კომპონენტების გახსნა ხდება და ნალღობისა და თხევადი ფაზის გადაჯერება იონებით. ამის შემდეგ არის კრისტალიზაციის პროცესი. ნალღობის გადაჯერებაში მონაწილეობს მაღალ

ტემპერატურაზე გახსნილი  $C_2S$ , კალციუმის ოქსიდი და მინარევეები, ან სხვა შემთხვევაში თხევადი ფაზა, რომლის გადაცივებაც ხდება გადაჯერებისთვის.

განვიხილოთ რამდენიმე მექანიზმი ალიტის წარმოქმნის პროცესში: ერთერთი მექანიზმისას კლინკერის ნალღობში ეტაპობრივად იწყება ორკალციუმიანი სილიკატის და კალციუმის ოქსიდის გახსნა, რა დროსაც წარმოიქმნება  $Ca^{2+}$ ,  $SiO_4^{4-}$  იონები, რომლის ზომები, ძვრადობა და რაოდენობა დამოკიდებულია ისეთ ფაქტორებზე, როგორცაა ტემპერატურა, სიბლანტე, შემადგენლობა ნალღობის და ა.შ. თუ მაგალითად ტემპერატურა აიწევს, იონების რაოდენობა და ძვრადობა გაიზრდება, თუმცა ნალღობის სიბლანტე შემცირდება. ასეთ შემთხვევაში იონები სწრაფად გადაადგილდებიან და შეჯახება და ურთიერთქმედება უფრო სწრაფად ხდება. ტემპერატურის დაკლებისას ნალღობის გადაჯერებისთვის სასურველი პირობები იქმნება, რა დროსაც ხდება კრისტალიზაციის პროცესის დაწყება და ალიტის კრისტალების ზომაში ზრდა.

სხვა მექანიზმის შემთხვევაში, კალციუმის ოქსიდი იხსნება ნალღობში და ორკალციუმიანი სილიკატი რჩება მყარ ფაზაში, ან პირიქით. ამ დროს  $Ca^{2+}$  დიდი რაოდენობითაა ნალღობში და აღწევს ორკალციუმიანი სილიკატის ფორებში, რომლის ზედაპირზეც იწყება ალიტის კრისტალიზაციის ცენტრის გაჩენა და კრისტალიზაცია. დასაშვებია, რომ ნალღობში არცერთი გაიხსნას და ორივე მყარი იყოს, თუმცა ნალღობის საშუალებით მათი მიკრონაწილაკები მაინც გადაადგილდება და ერთმანეთის ფორებში შედიან, რა დროსაც იწყება რეაქცია და იწყება ალიტის წარმოქმნა. თითოეულ ვარიანტში ნაწილაკების დიფუზია მთავარი პროცესია.

როგორც რამდენჯერმე უკვე აღვნიშნეთ ალიტის წარმოქმნის სიჩქარე და რაოდენობა ნალღობის როგორც შედგენილობაზე ასევე თვისებებზეა დამოკიდებული. ნალღობი იონური სითხეა, რომელიც შეიცავთ კათიონ-მოდულიკატორებს  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  და სხვ., რომლებიც ჟანგბადთან იონურ ბმას წარმოქმნიან და კათიონ-კომპლექსწარმომქმნელებს  $Si^{4+}$ ,  $Al^{3+}$  და სხვ., რომლებიც ჟანგბადთან კოვალენტურ ბმას წარმოქმნიან და ანიონების სახით გვევლინებიან  $[SiO_4]^{4-}$ ,  $[AlO_4]^{5-}$ .. ანიონურ კარკასს ქმნიან კომპლექსური იონები, რომელთან პოლარიზაციისადმი აქვთ მიდრეკილება. კათიონ მოდიფიკატორები კი წყვეტს



კომპლექსური იონების ჯაჭვს და ახდენს დეპოლიმერიზაციას.

მნიშვნელოვანია ნალღობის სიბლანტე, რომელზეც მოქმედებს რამდენიმე ფაქტორი, მაგალითად ტემპერატურის ზრდა, რომელიც ამცირებს ნალღობის სიბლანტეს  $1500^{\circ}\text{C}$ -ზე სიბლანტის სიდიდე შეადგენს  $0,02 \text{ ნ}^{\circ}\text{მ}/\text{მ}^2$ . ნალღობის სიბლანტე - მცირდება ასევე მაგნიუმის, ბარიუმის, მანგანუმის იონების არსებობის დროს, რომელებიც არღვევენ კომპლექსური ანიონებს, სიბლანტე აგრეთვე მცირდება ტუტე მეტალთა და კალციუმის სულფატების, 2-3%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  და  $\text{TiO}_2$ . 1-2% კალციუმის ქლორიდის და ფტორიდის არსებობის დროს. ნალღობის სიბლანტე იზრდება  $\text{P}_2\text{O}_5$  -ის საშუალებით. პროცესში მონაწილე ძირითადი ოქსიდებიდან კალციუმის და რკინის ჟანგეულები ამცირებენ ნალღობის სიბლანტეს, სილიციუმის და ალუმინის ჟანგეულები ზრდიან, რადგან მათ კომპლექსწარმომქმნელი თვისებები აქვთ. ნალღობის ზედაპირული დაწიმულობა ტემპერატურის უკუპროპორციულია და ტემპერატურის ზრდისას მცირდება. კლინკერის ძირითადი ოთხი ჟანგეულიდან კალციუმის და რკინის ოქსიდები ამცირებენ ნალღობის სიბლანტეს, ხოლო სილიციუმის და ალუმინისა - ზრდიან, რადგან უკანასკნელნი კომპლექსწარმომქმნელები არიან. ნალღობის ზედაპირული დაწიმულობა მცირდება ტემპერატურის ზრდის შედეგად.  $1450^{\circ}\text{C}$ -ზე ნალღობში იხსნება მაგნიუმის, ტუტე მეტალთა და გოგირდის ოქსიდები, რაც ამცირებს ზედაპირულ დაწიმულობის  $0,58$ -დან  $0,35 \text{ ნ}/\text{მ-მდე}$ . კლინკერულ ნალღობში მიკროგანფენადობა დაკავშირებულია მასში ჭარბი რაოდენობის ტუტე მეტალთა სულფატების გახსნასთან [3-15].

ტუტე მეტალთა იონების არსებობა იწვევს კალიუმის, სილიციუმის, ალუმინის, რკინის იონების ძვრადობის შემცირებას ნალღობში. ხოლო ძვრადობის ზრდის მიზეზი მაგნიუმის და სულფატ-იონების არსებობაა.

თითოეული ზემოთ აღნიშნული ფაქტორის სწორად გათვალისწინება აუცილებელი პირობაა ალიტის მიღების კინეტიკის სწორად წარმართვისთვის, რაც პირდაპირ ნიშნავს სასურველი ცემენტის მიღებას.

## 1.7. გაცივების რეჟიმის გავლენა კლინკერის თვისებებზე

კლინკერის წარმოება არ სრულდება მაღალ ტემპერატურაზე შეცხოების პროცესით, მზრუნავ ღუმლებში შეცხოების მომდევნო ეტაპი მიღებული კლინკერის სწრაფი გაცივებაა, რომელიც სპეციალური მაცივრების მეშვეობით ხდება. გაცივების რეჟიმი საკმაოდ მნიშვნელოვანია მთელი ტექნოლოგიური ციკლის ერთ-ერთ ძირითად პროცესია, რადგან არასწორმა გაცივებამ მიღებული კლინკერის, რომელსაც მაღალხარისხოვანი პოტენციალი აქვს, გაფუჭება შეიძლება მოახდინოს. რა შესაბამისად უარყოფითად აისახება ცემენტის შედეგებზე, წარმოების და მშენებლობის ეკონომიკაზე.

როგორც აღვნიშნეთ, მაქსიმალურ ტემპერატურაზე (1450°C) შეცხოებილი მასიდა დაახლოებით 20-30%-მდე ნალღობია, დანარჩენი კი - მყარი ფაზაა, რომელიც ძირითადად შედგება ბელიტისა და ალიტისგან. აღნიშნული მაღალტემპერატურული მასის გაცივების სიჩქარე მიღებულ შედეგზე სხვადასხვაგვარად აისახება. მაგალითად სწრაფი გაცივებისას კალციუმის სილიკატები რჩება კრისტალურ მდგომარეობაში, თხევადი ფაზა კი გვამლევს მინას. მიღებულ კლინკერში გვექნება ალიტი, ბელიტი და მინა. ასეთი მასალა მაღალ ხარისხოვანია [3-17].

ძალიან ნელა გაცივებისას ნალღობიდან  $C_3A$ -ს და  $C_4AF$ -ის კრისტალებს მივიღებთ. ამასთან ალიტი დაიშლება ბელიტად და კალციუმის ოქსიდად, მანამდე არსებული ბელიტი განიცდის მოდიფიკაციას რომელიც ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე არ მაგრდება. საბოლოოდ კი ვიღებ ბელიტს, მცირე რაოდენობის ალიტს, თავისუფალ კალციუმის ოქსიდს  $C_3A$  და  $C_4AF$ -ს და შესაბამისად იქნება გამოუსაყენებლად გამოუსადეგარი, მისი დაბალი ხარისხის გამო.

არსებულ საწარმოო პირობებში გავარვარებული კლინკერი, რომლის ტემპერატურა 1200—1300°C-ია მზრუნავი ღუმლიდან მიეწოდება მაცივრებში, სადაც იგი სწრაფად ცივდება ჰაერების საშუალებით. ასეთ შემთხვევაში ალიტი არ განიცდის გარდაქმნებს და არ იშლება, არც ბელიტის მოდიფიკაცია ხდება და არსებული თხევადი ფაზიდან ძირითადად ვიღებთ  $C_3A$ -ს და  $C_4AF$  ის კრისტალებს და მცირე რაოდენობით მინას. მიღებული კლინკერი ხასიათდება მაღალი

ხარისხით.

მაცივრის ფუნქცია მხოლოდ კლინკერის სწრაფად გაციება არაა, აქვე ხდება ჰაერის გახურება კლინკერის სითბოს ხარჯზე, რომელსაც მეორეული ჰაერი ეწოდება და მიეწოდება ღუმელს სათბობის წვისთვის. ეს რა თქმა უნდა იძლევა სათბობის ეკონომიას.

საწარმოო პირობები რეალურად განსხვავდება თეორული განხილვისგან, მასში უფრო რთული პროცესები მიდის, კლინკერის მინარევების გამო, რომლებსაც გავლენა აქვთ ძირითადი ფაზების სტაბილურობაზე. ამასთან, კლინკერის გამოწვის რეჟიმი (გრძელი და მოკლე ალი, ტემპერატურა, დრო, სათბობის სახეობა, ნაცარი და სხვ.) და არე (აღმდგენელი ან დამჟანგველი) გავლენას ახდენენ კლინკერის მინერალების სტრუქტურაზე, ზომაზე და ფორმაზე, დეფექტებზე, შემადგენლობაზე, რაც ძლიერ ცვლის კლინკერის და ცემენტის თვისებებს.

მაგალითად, გაცივების დროს ალიტის მყარი ხსნარები იშლებიან სუფთა სამკალციუმიანი სილიკატებზე სწრაფად. ამ დროს აღმდგენელ გარემოში სამვალენტური რკინა გადადის ორვალენტურში, რაც აჩქარებს ალიტის დაშლას, რადგან ორვალენტური კალციუმის ადგილს იკავებს.

β ბელიტის მყარი ხსნარები უფრო სტაბილურია, ვიდრე სუფთა β-C<sub>2</sub>S, ამიტომ მაგნიუმის, ნატრიუმის, კალციუმის, ქრომის, ბარიუმის, სულფატ-იონების მინარევები ხელს უშლის β ბელიტის გადასვლას γ ფორმაში. თეთრი კლინკერების გაცივება ზოგჯერ ხდება აღმდგენელ არეში. ამ დროს C<sub>3</sub>A იშლება C<sub>5</sub>A<sub>3</sub> და კალციუმის ოქსიდად, ხოლო C<sub>4</sub>AF დაიშლება C<sub>3</sub>A, C<sub>5</sub>A<sub>3</sub>, CaO და FeO-დ. C<sub>4</sub>AF-ის დაშლას აჩქარებენ ნატრიუმის, კალციუმის და ალუმინის ფტორიდები, ქლორიდები, ნიტრატები და სულფატები [3-67].

## 1.8. ექსპერიმენტის გარშემო ინფორმაცია

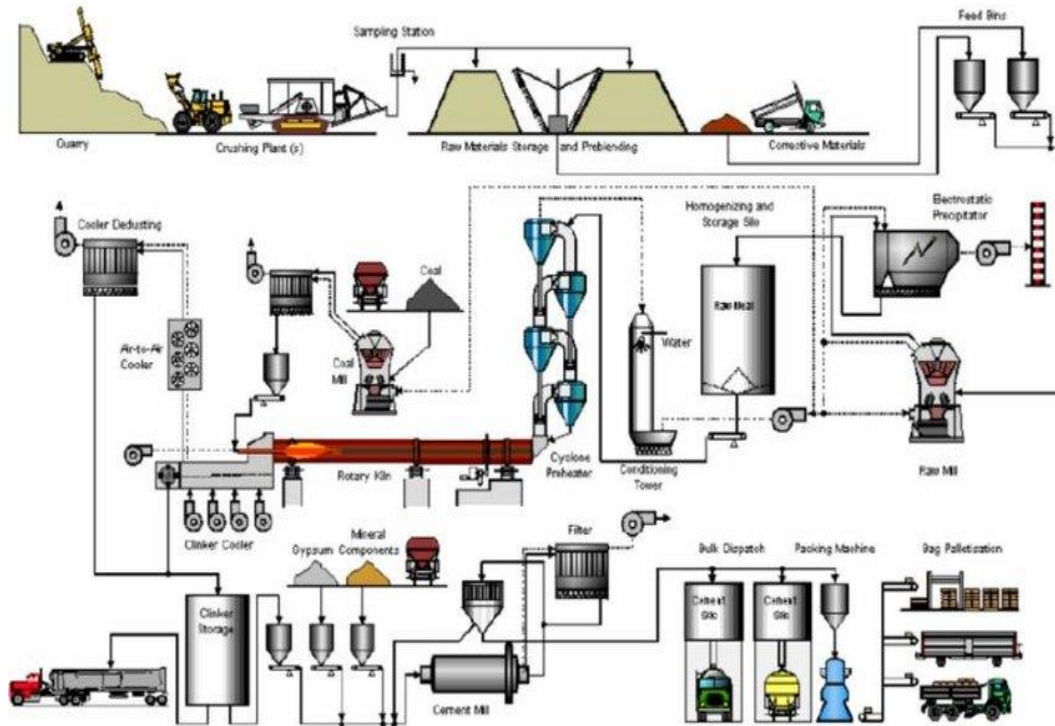
როგორც ზემოთ აღინიშნა ქარხნის მოდერნიზაციამ და ტექნიკურმა გადაიარაღებამ საშუალება მოგვცა არა მხოლოდ შეგვემცირებინა თბური

დანახარჯი და გაგვეზარდა წარმადობა, არამედ გააფართოვა ნედლეული და საწვავი მასალების გამოყენების სპექტრი, რასაც ეფუძვნება ჩემი კვლევა. კვლევის მიზანია ახალი ტიპის ღუმელზე გამოვიყენოთ ისეთი საწვავი და ნედლეული და ავარჯიოთ მათგან საუკეთესო ნარევი, რომლებიც ყველაზე მეტ ეკონომიკურ ეფექტს იძლევა ცემენტის კლინკერის ხარისხის მინიმუმ შენაჩუნებით ან უკეთეს შემთხვევაში ხარისხის მაჩვენებლების გაზრდით.

კვლევის პირველი ნაწილი სტანდარტული მიდგომით ნედლეული და საწვავის პროპორციების გადათამაშებით საუკეთესო შედეგის მიღება იყო, ხოლო მეორე ნაწილში არასტანდარტული მიდგომით კლინკერის წარმადობის და დანახარჯის შემცირება იყო ჩაფიქრებული. პუცოლანური დანამატის - ტუფის თერმული აქტივაციით კლინკერის გარკვეული რაოდენობის (მიზანი 10%) ჩანაცვლება უნდა მომხდარიყო ისე, რომ საბოლოო ნარევის ხარისხი არ შემცირებულიყო. მიდგომა იმით იყო გამორჩეული და არასტანდარტული, რომ ტუფის აქტივაციისთვის თერმული ენერჯია არ ხდებოდა საჭირო. სტანდარტულად მოხდებოდა საშრობი დოლის მონტაჟი სადაც მასალა - ტუფი გააქტიურდებოდა თერმულად და რასაც მოხმარდებოდა დიდი რამდენობით სითბური ენერჯია, ჩვენი კვლევის შემთხვევაში კი მასალის გააქტიურება უკვე არსებულ გახურებულ კლინკერთან ურთიერქმედებით მივაღწიეთ.

## 1.9. კასპის ცემენტის ქარხნის ტექნოლოგიური მიმოხილვა

კასპის ცემენტის ქარხნის ძირითადი ნედლეული მასალაა (85-90%), სასხორის კირქვა (მერგელი). აღნიშნული ნედლეული აფეთქების და შემდეგ ექსკავაციის საშუალებით მოიპოვე სასხორის კარიერზე, რომელიც კასპის ცემენტის ქარხნიდან დაშორებულია 17კმ-ით. მოპოვების შემდეგ ხდება მისი გადაზიდვა ექსკავატორების და მაღალი მტვირთ ამწეობის მანქანებით პირდაპირ კასპის ქარხნის მსხვრევის უბანზე, სადაც დამონტაჟებულია (2016 წელს) “ჰაზემაგის” წარმოების ორმაგ-ჩაქუცებიანი სამსხვრეველა, წარმადობით 500ტ/სთ.



სურათი 4. ცემენტის ქარხნის, მშრალი მეთოდის ტექნოლოგიური სქემა

აღნიშნული სამსხვრეველას შეუძლია მიიღოს და გადაამუშავოს 0.8მ-მდე მოცულობის ქვა, მიღებული მასალის დაქუცმაცება ხდება 0-90მმ ფრაქციაზე. სამსხვრეველადან მასალა ლენტური კონვეიერით მიეწოდება 20000 ტონიან კორქვის საწყობს სადაც სტეკერის მეშვეობით ხდება მისი 2 შტაბელად ფორმირება რაც ხელს უწყობს მის ჰომოგენიზაციას (თითო შტაბელი 10000 ტონა მოცულობით).

სამსხვრეველასა და კორქვის საწყობს შორის ლენტურ კონვეიერზე დამონტაჟებულია სასწორი და ონლაინ ანალიზატორი (XBA), რომლებიც რადიაციული წყაროს საშუალებით განგრძობითად ზომავენ ლენტზე გავლილი მასალის წონას და მის ქიმიურ შემადგენლობას, რაც იძლევა იმის საშუალებას, რომ მუდმივ რეჟიმში კონტროლდებოდეს დასაწყობებული კორქვის რაოდენობა და მისი ხარისხი (საშუალო და ყოველ წუთიერი ქიმიური შემადგენლობა და ხარისხობრივი მაჩვენებლების სტანდარტული გადახრის ფაქტორი).

მოწყობილობა: ორმაგ-ჩაქუჩებიანი სამსხვრეველა

მწარმოებელი: ჰაზმაგი

მისაწოდებელი მასალის მაქსიმალური ზომა: 0.8 მ<sup>3</sup>

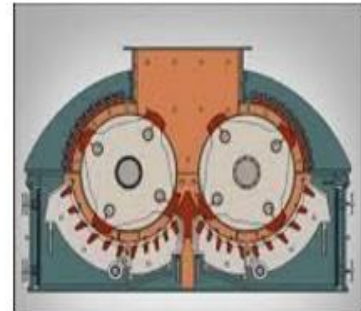
წარმადობა I: 350 ტ/სთ - 95% < 40მმ, 98% < 50მმ

წარმადობა II: 500 ტ/სთ - 95% < 90მმ, 98% < 100მმ

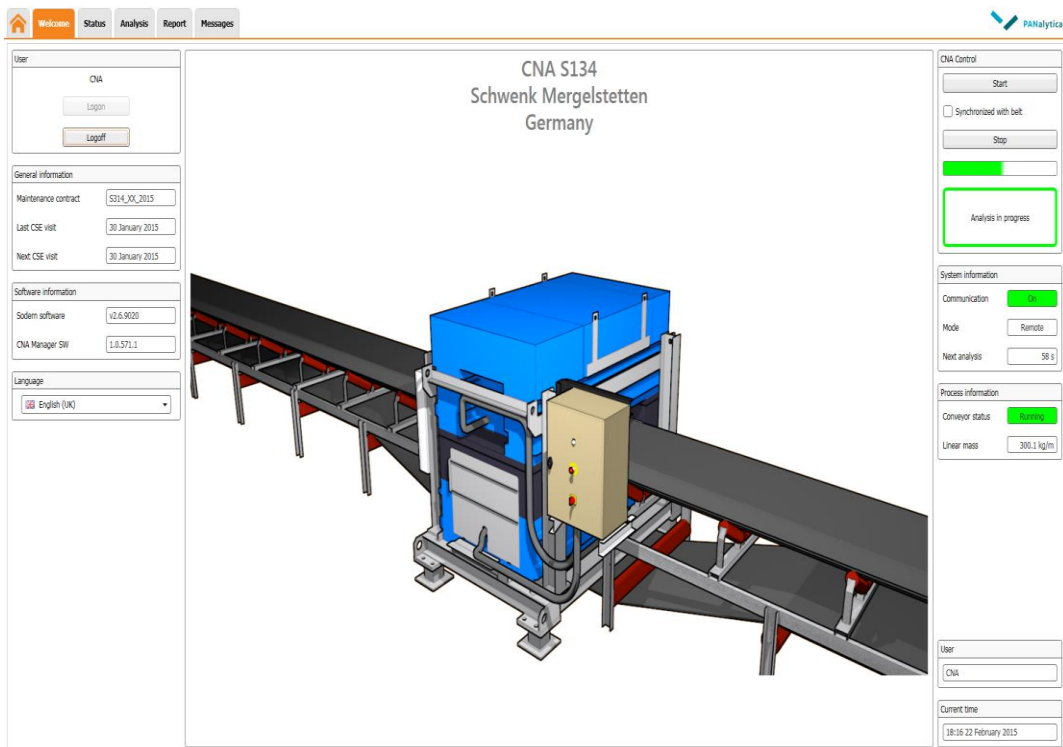
მიმწოდი ზუნკერის მოცულობა: 75 მ<sup>3</sup>

დაწნეხილი ჰაერის წყარო: კომპრესორი 4.57 მ<sup>3</sup>/სთ

დაწნეხილი ჰაერის სამუშაო წნევა: 4 – 6 ატმ (ბარი)



სურათი 5. ორმაგ-ჩაქუჩებიანი სამსხვრეველა



სურათი 6. კონვეიერზე დამონტაჟებული ონლაინ ანალიზატორი

სასხორის კირქვა კლინკერის გამოსაწვავი ფქვილის ძირითადი შემადგენელი მასალა, რომელიც დასაწყობების და ჰომოგენიზაციის შემდეგ

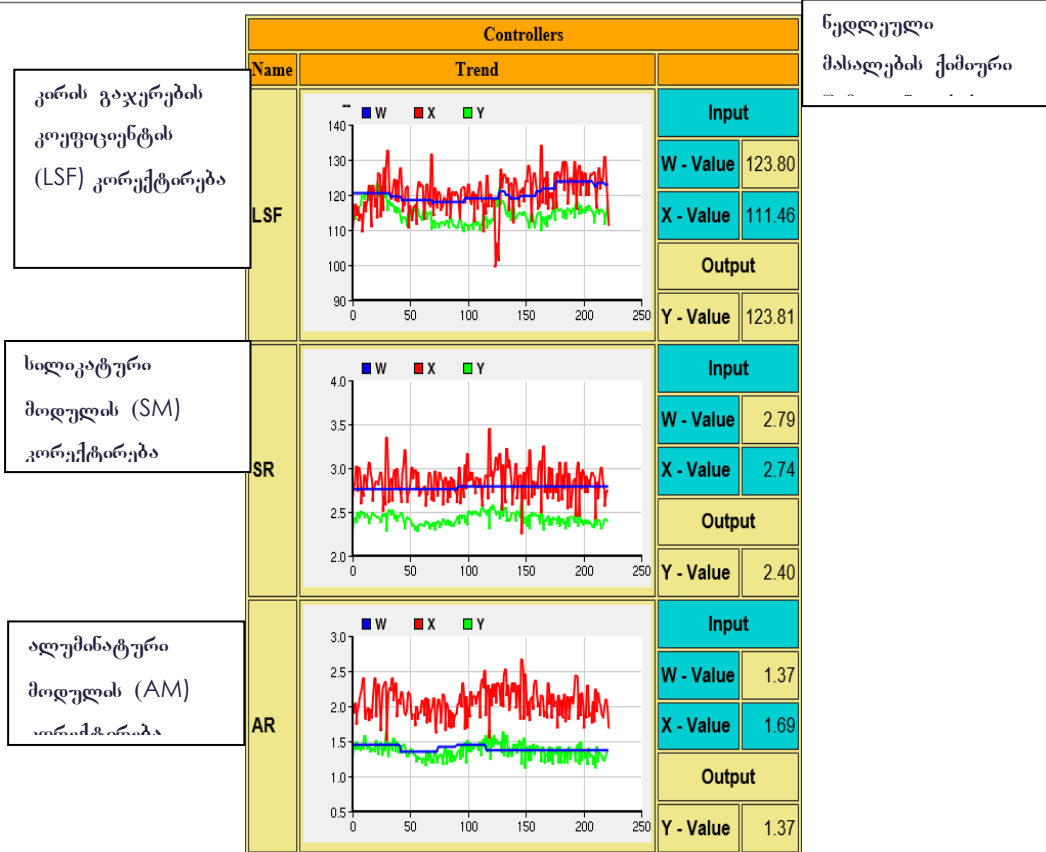
რეკლამერის საშუალებით გადადის 4 ნედლეულის სილოსიდან ერთერთში საიდანაც დოზატორის და ლენტური კონვეიერის საშუალებით, მეორე ონლაინ ანალიზატორის დავალებით მიეწოდება ვერტიკალურ როლიკებიან წისქვილს წარმადობით 270 ტ/სთ. დანარჩენ 3 სილოსში ნაწილდება შემდეგი ნედლეული:

- მაღალი ხარისხის კირქვა (დედოფლისწყაროს კარიერიდან)
- ალუმინის წყარო
  - ალოქსიდი (ქართული საწარმოო ნარჩენი რუსთავიდან)
  - ბოქსიტი (საწარმოო ნარჩენი თურქეთიდან)
- რკინის წყარო
  - რკინის ნამწვი (საწარმოო ნარჩენი ესპანეთიდან)
  - კეკი (საწარმოო ნარჩენი აზერბაიჯანიდან)

მეორე ონლაინ ანალიზატორი, მიღებული დავალების (გაჯერების, სილიკატური და თიხა-მიწური კოეფიციენტები) მიხედვით და ჩამოთვლილი ნედლეულის ქიმიის მიხედვით დოზატორებს აძლევს დავალებას იმუშავოს კონკრეტულ წარმადობაზე, რათა მუდმივ რეჟიმში კონტროლდებოდეს წისქვილზე მისაწოდებელი მასალის შემადგენლობა და გადაცდენის შეთხვევაში კორექტირდებოდეს მასალების პროპორციების შეცვლით.

აღნიშნული პროცესი სრულად ავტომატიზირებულია და დაკალიბრებას ითხოვს მხოლოდ ინსტალაციისას ან რადიაციის წყაროს შეცვლისას, მაგრამ მუდმივად ხდება მისი სიზუსტის გადამოწმება ხელით არეზულის სინჯების XRF ანალიზატორის მეშვეობით.

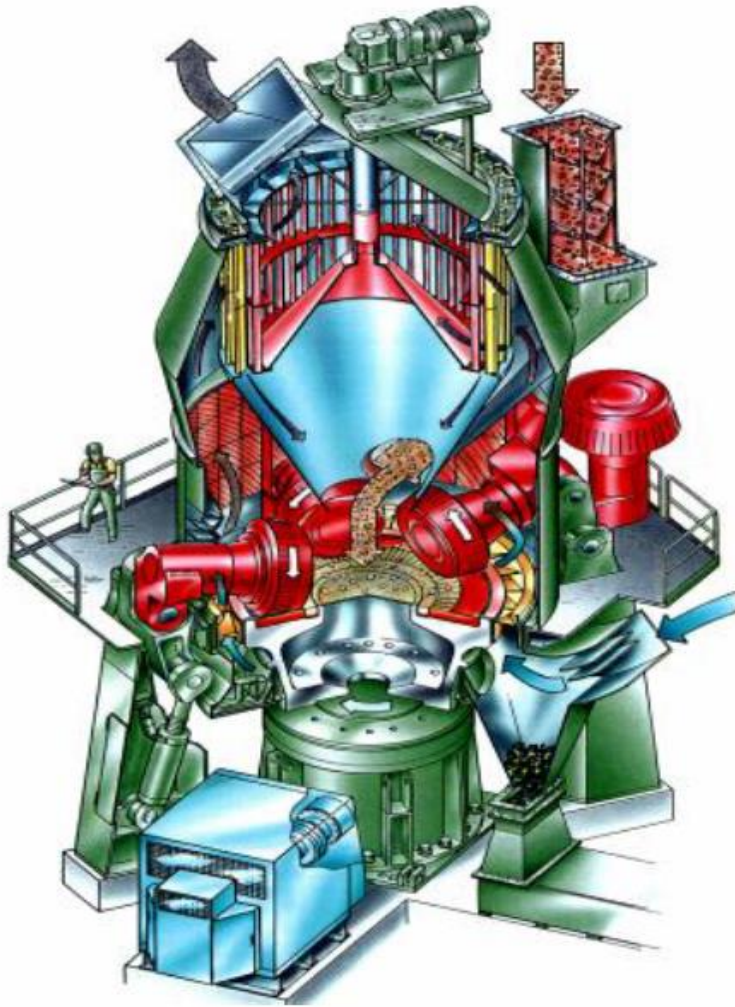
Scale Nb.	Material	Oxide [%]									Price	LSF	SR	AR	Scale		Ratio			
		SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Na2O	SO3	F					Min [T/h]	Max [T/h]	Min [%]	Max [%]	Real [%]	Setpoint [%]
1	HG Limestone	3.35	1.06	0.48	52.88	0.41	0.03	0.01	0.21	0.00	26.00	483.24	2.18	2.21	10.0	100.0	0.0	50.0	12.50	12.50
2	LG Limestone	13.27	3.16	0.80	45.00	0.11	1.33	0.22	0.03	0.00	8.00	108.68	3.35	3.95	35.0	350.0	0.0	100.0	84.36	84.36
3	Iron Ore	26.67	4.81	60.84	4.42	0.80	0.51	0.15	0.91	0.00	143.00	3.69	0.41	0.08	2.5	25.0	0.0	4.5	2.50	2.50
4	Aloxite	23.31	30.90	20.71	4.08	1.24	0.35	0.04	0.70	0.00	114.00	3.54	0.45	1.49	0.0	10.0	0.0	0.1	0.64	0.64



სურათი 7. მიმდინარე კორექტირების პროცესი ონლაინ ანალიზატორი პროგრამაში

მუდმივ რეჟიმში გაზომვების შედეგად უკვე დოზირებული კვება მიეწოდება ვერტიკალურ როლიკებიან წისქვილს სადაც ხდება მიწოდებული ნედლეულის დაფქვა-შრობა და შემდეგ ეტაპზე, ჰომოსილოსისკენ ტრანსპორტირება. აღნიშნული წისქვილი დამონტაჟებული და გაშვებულია 2018 წელს, მწარმოებელი გებრ. ფაიფერი (გერმანია).





სურათი 8. ნედლეულის ჰიდრავლიკური როლიკებიანი წისქვილის ესკიზი

მისაწოდებელი მასალის მაქსიმალური ფრაქცია უნდა იყოს არა უმეტეს 100მმ, მისი ზომები და ფრაქციული გადანაწილება დიდ გავლენას ახდენს წისქვილის წარმადობაზე. გამომავალი მასალა, რომელიც სეპარატორის წყალობით მაქსიმალურად ერთ ფრაქციას უშვებს წისქვილიდან, არის წმინდად დაფქვილი ისე, რომ ნარცენი 90 $\eta$ -იან საცერზე შეადგენს არაუმეტეს 12% და არა უმცირეს 10%-ს. აღნიშნული სიწმინდე კრიტიკულია წინაგამახურებლის ბოლო ციკლონების ეფექტურობისთვის, თუ ძალიან წმინდად იქნება დაფქვილი ღუმელში შემავალი ფქვილი მეტი იქნება დანაკარგი ციკლონიდან და შესაბამისად ციკლონის ეფექტურობა დაეცემა, სწორედ ამის გამო მკაცრად კონტროლდება დაფქვილი ნედლეული ფქვილის სიწმინდე. მეორეს მხრივ, თუ ზედმეტად მსხვილ ფრაქციაზეა ნედლეული ფქვილი დაფქვილი ღუმელში კალცინატორსა

და წინაგამახურებელში იგი იქნება ნაკლებად თბოცვლადი და მეტ ენერგიას მოითხოვს (საწვავს) ამასთანავე კრისტალების დიდი ზომის გამო გამომწვარი კლინკერი იქნება ნაკლებად აქტიური და ძნელად დასაფქვავე.

90<sup>თ</sup>-იან საცერზე 10-12%-ის სიწმინდის ფქვილი, რომელიც ნედლეულის წისქვილში დაიფქვა, შემდგომი ჰომოგენიზაციისთვის თავსდება ჰომო-სილოსში, მოცულობით 7700მ<sup>3</sup>.

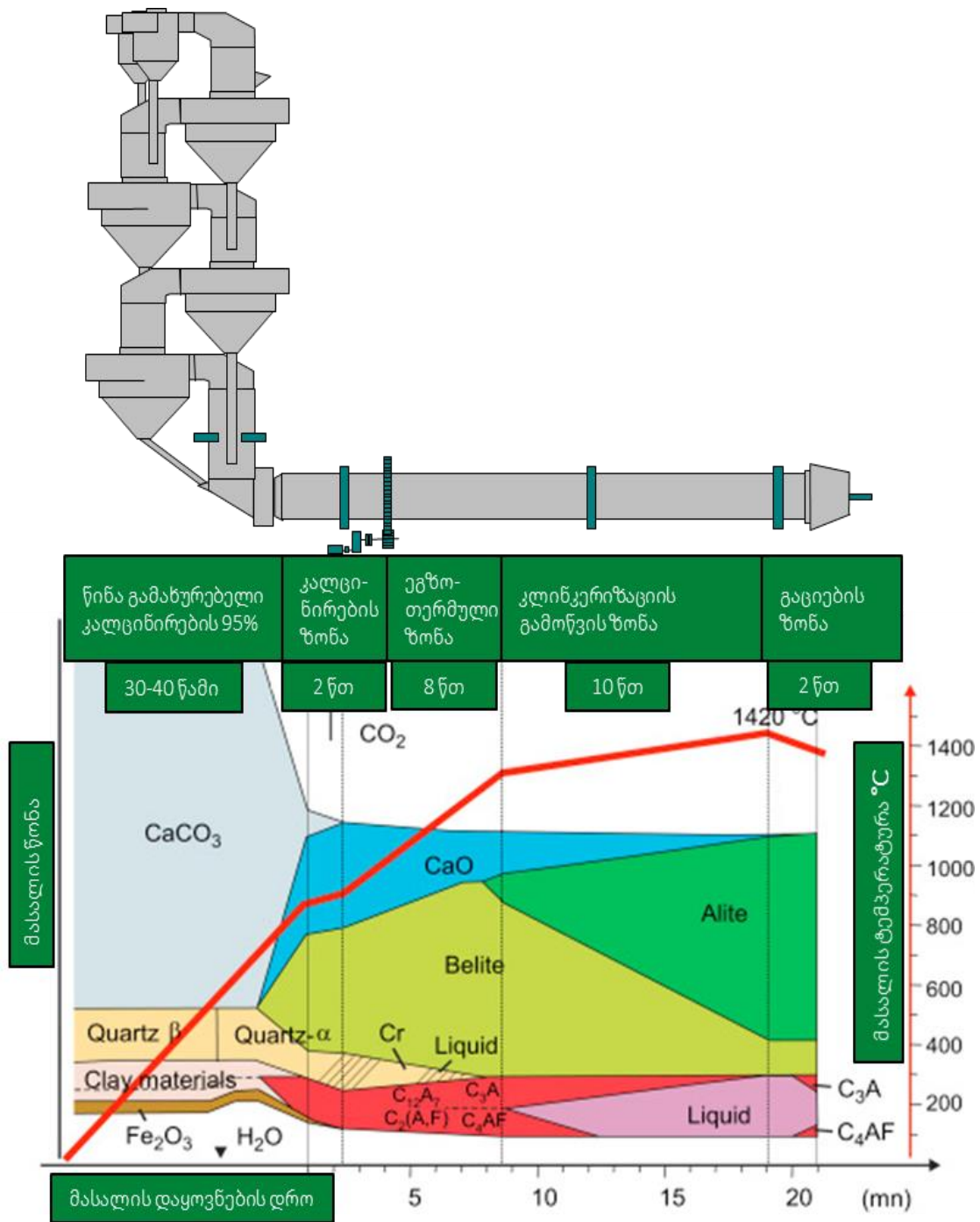
ნედლეულის ფქვილის ჰომოსილოსი წარმოადგენს მნიშვნელოვან კვანძს კლინკერის წარმოებაში სადაც ხდება მასალის კიდევ უფრო გაერთგვაროვნება რაც თავის მხრივ ხელს უწყობს წინაგამახურებელში და ლუმელში მიდინარე თბურ პროცესებს. მისი პირდაპირი დანიშნულებაა დაწიოს მიღებული ნედლი ფქვილის სტანდარტული გადახრის ფაქტორი და სილოსიდან გამომავალი მასალა იყოს იმასზე უფრო ერთგვაროვანი ვიდრე იყო სილოსში ჩამავალი მასალა.

სილოსიდან გამოსული მასალა ციკხვებიანი ელევატორის საშუალებით ხვდება 5 ეტაპიან წინაგამახურებლის ყველაზე მაღალ საფეხურზე და გრავიტაციის ძალით ეშვება პირველი ციკლონიდან ქვევით, გაივლის 4 ციკლონს, ხოლო მე-4 ციკლონიდან გახურებულია ფქვილი ნაცვლად მე-5 ციკლონისა მიეწოდება დეკარბონიზატორს და მხოლოდ ამის შემდეგ გაივლის მე-5 ციკლონს საიდანაც გახურებული მასა მიეწოდება ლუმელს.

## 1.10. მშრალ ლუმელში მიმდინარე პროცესები

დაფქვილი ნედლეული ნარევი თავდაპირველად ხვდება ზედა მეორე და პირველ ციკლონს შორის გარდამავალი აირის არხში. გახურებული ნედლეული ნარევი წინაგამახურებელსა და ლუმელში გაივლის კლინკერიზაციის პროცესის ყველა ეტაპს, რომელსაც თანამედროვე ლუმელში ჯამში 30 წუთი დასჭირდება [2-5].

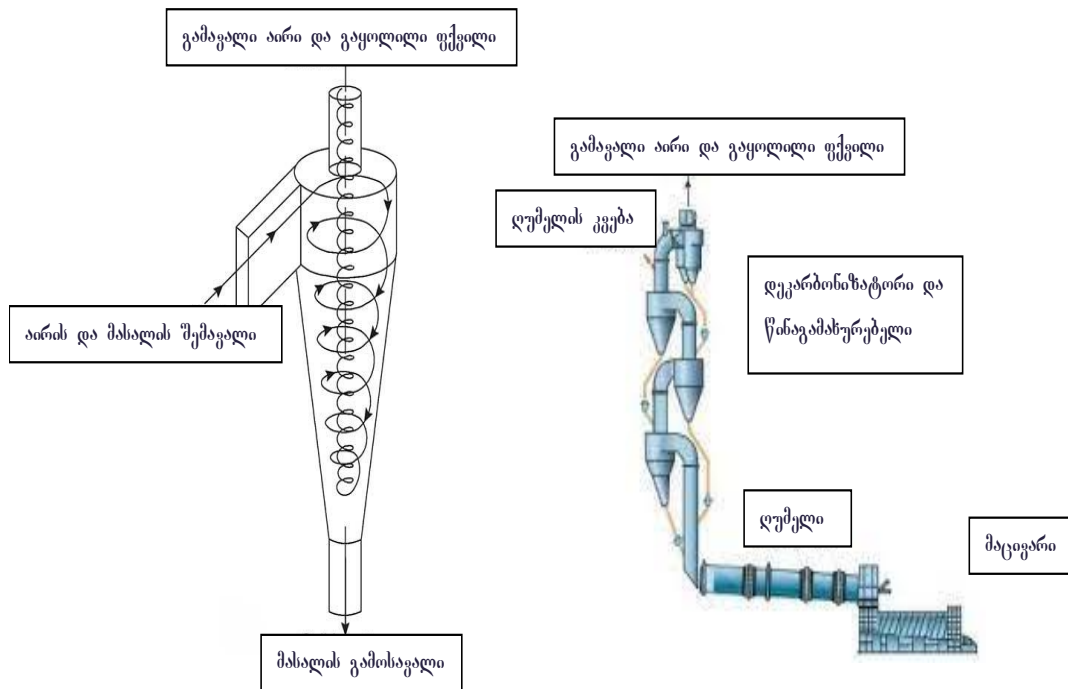
ქვედა სქემაზე მოცემულია ეტაპები და დაყოვნების ხანგრძლივობა, რომელსაც გადის ნედლეულის ფქვილი კლინკერად ჩამოყალიბების პროცესში.



სურათი 9. ნედლეული ფეხლის კლინკერად ჩამოყალიბების პროცესი

კლინკერის წარმოებამდე ტექნოლოგიური სქემის ძირითადი კვანძებია: კირქვის კარიერი, სამსხვრევი, კირქვის ჰომოგენიზაციის საწყობი, ნედლეული მასალების პროპორცირების კვანძი (სილოსებით და დოზატორებით), ნედლეულის დაფეხვის ვერტიკალური, როლიკებიანი წისქვილი, ნედლეული მასალის ტრანსპორტირების კვანძი და ნედლეული ფეხლის ჰომოგენიზაციის სილოსი.

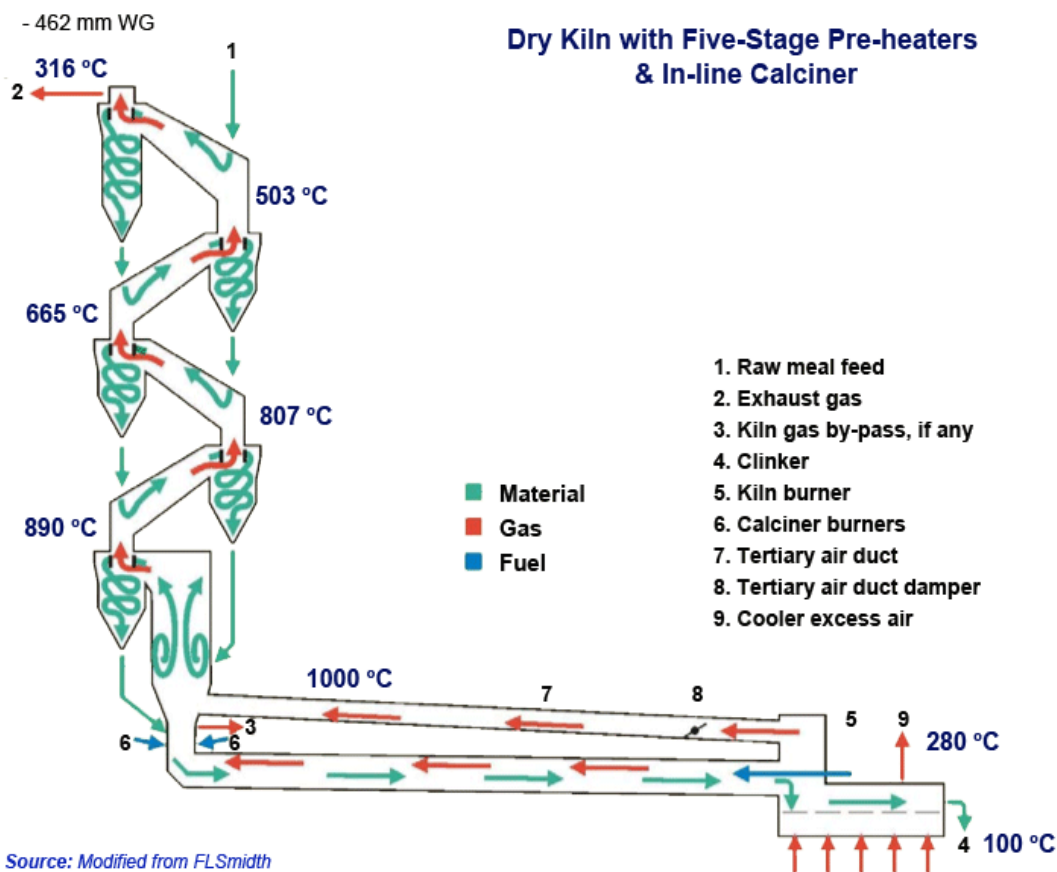
ამ ეტაპების გავლის შემდეგ, ნედლეულის ფქვილი ჰომოგენიზაციის სილოსიდან, სადაც მასალა მაქსიმალურად ერთგვაროვნდება, მასალის ელევატორის და აირსლაიდების წყალობით დოზირებულად მიეწოდება რეაქტორ-დეკარბონიზატორიანი ღუმელის ყველაზე მაღალ წერტილს (115 მეტრი), სადაც დაახლოებით 300°C გრადუსია.



სურათი 10. თბლომცვლელის ციკლონი და დეკარბონიზატორიანი ღუმელი

წინაგამახურებელის ტემპერატურული პროფილის წყალობით დისპერსიული მასალა დაახლოებით 95%-იან კალცინირებას განიცდის და ამას ახერხებს, მაქსიმუმ 2 წუთის განმავლობაში, როდესაც იგივე რეაქცია სველი მეთოდის ღუმელში 1 საათზე მეტ დაყოვნებას ითხოვდა. რაღა თქმა უნდა ეს არ მომხდარა იმის ხარჯზე, რომ დეკარბონიზაციის რეაქციამ განიცადა ცვლილება, არამედ ეს დრო შეამცირა მასალის დისპერსიულობამ, რადგან განცალკევებულ ფქვილის ნამცეცებს, რომელთა დაფქვის სიწმინდე 10-12%-ს შედგენს 90 მიკრონიან საცერზე, სითბო გაცილებით ადვილად გადაეცემა ვიდრე ერთ ნაკადად მიმავალ მასალას.





**სურათი 11. დეკარბონიზატორიან ღუმელის წინაგამახურებლის ტემპერატურული პროფილი**

ღუმელში (4.3 x 62მ, ჩინური წარმოების, 4.7 ბრ/წთ) შემავალი მასალა უკვე არის 95%-ით დეკარბონიზირებული, შესაბამისად როგორც ზემოთ აღინიშნა, ღუმელში რჩება დეკარბონიზაციის მცირე ზონა რასაც მოსდევს ეგზოთერმული რეაქციების ზონა, შემდეგ გამოწვა და ბოლოს გაციების ზონა. გაციების ზონიდან კლინკერი ჩადის ცეცხლრიკა მაღალ-ეფექტურ მაცივარში (ასევე ჩინური წარმოების, ჩენდუს უნივერსიტეტის ინდუსტრიული ჯგუფის მიერ), სადაც ხდება სითბოს რეკუპერირება, ანუ სითბოს ართმევა და ცხელი ჰაერების უკან ღუმელში დაბრუნება, ხოლო მაცივრის მეორე ზონაში კლინკერის გაციება. ორივე პროცესი მაღალ წარმადობიანი ჰაერის ვენტილატორებით ხორციელდება. ამ პროცესების შემდეგ ვიღებთ მზა ნახევარპროდუქტს – კლინკერს.

### 1.11. ტრადიციული საწვავი და ნედლეული მასალები

ტრადიციულად კლინკერის მისაღებად სველ მეთოდში გამოიყენება კირქვა ან მერგელი ან მათი ნარევი, თიხა, ქვიშა და პირიტის ნამწვი. აღნიშნული ნედლეულისგან დამზადებული შლამი (30-40% სინესტი) მიეწოდება ლუმელს რომლის გაშრობისთვის, კალცინირებისთვის და გამოწვისთვის გამოიყენება ბუნებრივი გაზი, რომელსაც ნარჩენი პროდუქტი ისეთი და იმდენი არ აქვს, რომ კლინკერში ჩაჯდეს და მასზე აღსაღწმნი გავლენა მოახდინოს. რა თქმა უნდა, ასეთი პირობებით მუშაობა ამარტივებს პროცესს და დიდი ძალისხმევის გარეშე მიიღწევა ხარისხიანი კლინკერი გამოშვება, მაგრამ ქვეყნებში სადაც არ არის ადგილობრივი გაზის რესურსი ეს მეთოდი დიდ საწარმოო დანახარჯებს უკავშირდება და ასევე აქვს მცირე წარმადობა, რაც კლინკერის დანახარჯს მის ღირებულებაზე მეტს ხდის და შესაბამისად შეუძლებელია თანამედროვე ეკონომიკის პირობებში ამ მეთოდით, მასალებით და საწვავით ოპერირება.

ამ მიზეზების გამო ცემენტის ქარხნების უმრავლესობამ დაიწყო საწვავად შედარებით იაფი ნახშირის გამოყენება, რამაც თავის მხრივ შეცვალა კლინკერის მომზადებისათვის საჭირო ნედლეული, რადგან ნახშირის დაწვის შედეგად წარმოიქმნება ნარჩენი, ნაცარი, რომელიც დიდი რაოდენობითაა და ჯდება მომზადებულ ნედლეულში და არის კლინკერის შემადგენელი ნაწილი, რაც თავისთავად ითხოვს ცვლილებებს ნედლეული მასალების პროპორციებში, რადგან ითხოვს დასამზადებელი შლამის მოდულების ცვლილებას იმისათვის, რომ მიიღოს იგივე მახასიათებლების კლინკერი რაც ბუნებრივი გაზის დაწვის შემთხვევაში ხდებოდა.

ვინაიდან, ნახშირის ნაცრის შემადგენლობა ძალზედ წააგავს თიხის შემადგენლობას (ცხრილი 1), ორივეს ძირითადი მდგენელებია  $Al_2O_3$  და  $SiO_2$ , თიხა ამოვარდა ხმარებიდან და მისი ადგილი დაიკავა ნახშირმა, რომლის ნამწვი პროდუქტიც ჯდება კლინკერის მოსამზადებელ ნედლეული შლამის კაზმში და ვიღებთ იგივე მახასიათებლების კლინკერს უკვე სხვა ნედლეულის პროპორციებით.

**ცხრილი 2. ქართული ნახშირის და თიხის ქიმიური შემადგენლობები**

ქიმიური შემადგენლობა	LOI [%]	SiO2 [%]	Al2O3 [%]	Fe2O3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Na2O [%]	K2O [%]	S-Bomb [%]	SO3- [%]	Cl [%]
ქართული ნახშირი	0.62	50.92	36.07	8.20	2.05	0.18	0.05	0.08	0.22	1.42	0.88	0.01
თიხა	0.80	64.79	17.17	7.22	0.4	2.38	0.09	0.15	2.68	-	0.79	0.04

2018 წელს ახალი მშრალი დეკარბონიზატორიანი ლუმელის გაშვების შემდეგ ნედლეული მასალები კიდევ ერთხელ შეიცვალა. აღნიშნულის მიზეზი რამოდენიმე იყო:

1. შეიცვალა მთავარი ნედლეულის კირქვის მოპოვების კარიერი და შესაბამისად კირქვის ხარისხი იყო განსხვავებული.
2. შეიცვალა საწვავი, ქართული ნახშირის მაგივრად დაიწყო საერთაშორისო ნახშირის გამოყენება
3. შეიცვალა კლინკერის გამოშვების მეთოდი, და შესაბამისად საწვავმოხმარებაც

აღნიშნული ნაშრომი მიეძღვნება ხსენებული ცვლილებების გამოკვლევას, მანიპულაციას და ოპტიმიზაციას, იმისათვის რომ მივიღოთ ეკონომიკურად და ხარისხობრივად ყველაზე საუკეთესო მიქსების სინთეზი.

**1. კარიერის კირქვის ცვლილება**

კავთისხევის კარიერის კირქვა იდეალური ნარევი იყო კლინკერის წარმოებისთვის და მას დამატებითი კირქვით გამდიდრება აღარ ჭირდებოდა, მოითხოვდა მხოლოდ მოდულების დასარეგულირებელ მცირე რაოდენობის დანამატს (რკინის ნამწვი, თიხა, ქვიშა).

**ცხრილი 3. კავთისხევის კირქვის ქიმიური შემადგენლობა**

მასალა/ქიმიური შემადგენლობა	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №1	38.56	9.79	2.5	1.2	43.26	3.70	0.02	0.20	0.51	0.05
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №2	42.6	2.42	0.82	0.3	51.20	2.26	0.00	0.06	0.14	0.08
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №3	42.03	4.29	1.21	0.7	45.36	4.95	0.00	0.06	0.25	0.20
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №4	41.35	4.27	1.21	0.8	50.67	1.19	0.00	0.02	0.22	0.03
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №5	41.59	4.21	1.11	0.6	49.36	2.25	0.00	0.08	0.23	0.36
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №6	31.39	22.22	5.47	2.0	35.48	1.15	0.09	0.04	1.09	0.10

**ცხრილი 4. სასხორის კირქვის ქიმიური შემადგენლობა 2019 წლის პირველი ნახევარი**

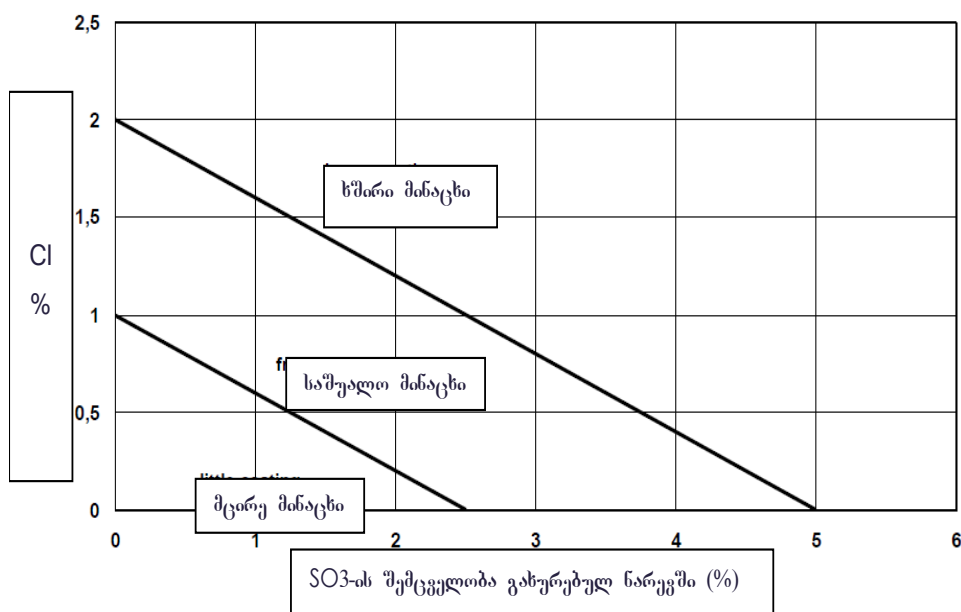
მასალა/ქიმიური შემადგენლობა	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
სასხორის კირქვა 1	34.46	16.76	3.44	1.23	40.23	1.24	0.04	0	0.84	0.06
სასხორის კირქვა 2	33.14	18.86	3.97	1.34	39.03	0.93	0.05	0	0.87	0.02
სასხორის კირქვა 3	31.11	25.33	5.38	1.46	33.65	1.41	0.02	0	0.69	0.11
სასხორის კირქვა 4	33.27	20.66	3.87	1.54	38.2	0.93	0.04	0	0.89	0.08
სასხორის კირქვა 5	36.53	13.26	2.49	0.91	43.61	0.71	0.04	0	0.59	0.04
სასხორის კირქვა 6	35.92	15.92	3.31	1.6	41.28	0.85	0.04	0	0.71	0.12
სასხორის კირქვა 7	31.88	19.89	4.66	1.41	39.88	1.09	0.04	0	0.9	0.13
სასხორის კირქვა 8	32.18	20.25	4.62	1.71	38.28	1.05	0.04	0	0.85	0.07
სასხორის კირქვა 9	36.7	13.22	2.38	0.89	43.91	0.88	0.04	0.02	0.9	0.06
სასხორის კირქვა 10	32.57	17.5	3.89	1.44	42.44	0.94	0.03	0.32	1.15	0.08
სასხორის კირქვა 11	36.37	12.7	2.56	0.92	45.45	0.71	0.03	0	0.66	0.07
სასხორის კირქვა 12	38.17	9.69	1.88	1.03	47.56	0.65	0.05	0	0.93	0.02
სასხორის კირქვა 13	31.55	21.26	4.85	1.88	35.85	1.51	0.04	0	1.03	0.09
სასხორის კირქვა 14	42.63	2.6	0.5	0.37	52.5	0.36	0.02	0	0.13	0.02
სასხორის კირქვა 15	31.61	20.52	4.59	1.78	37.71	1.48	0.04	0	0.99	0.1
სასხორის კირქვა 16	32.84	18.75	4.99	1.52	38.71	1.22	0.03	0.03	0.93	0.08
სასხორის კირქვა 17	36.12	12.75	3.67	1.65	42.17	2.52	0.03	0.26	0.73	0.09
სასხორის კირქვა 18	35.85	14.6	4.1	1.97	40.28	2.32	0.04	0	0.73	0.1



## 2. საწვავის ცვლილება, ნახშირი

სველ ღუმელებზე როგორც აღნიშნა კლინკერის გამოსაწვავად გამოიყენებოდა ქართული ნახშირი. ბაზარზე არსებულ საწვავებს შორის ქართული ნახშირის ყველაზე ხელსაყრელია ეკონომიკურად, თუმცა ასევე რთულია მისი წარმოების პროცესში გამოყენება რადგან შეიცავს გოგირდმჟავის მოჭარბებულ რაოდენობას.

გოგირდის (S) და გოგირდის ზეჟანგის (SO<sub>3</sub>) მოჭარბებული რაოდენობა ართულებს ღუმელის ოპერირებას იმ კუთხით, რომ ჩნდება უკონტროლო ან ძნელად სამართავი მინაცხები ღუმელის სხვადასხვა მონაკვეთში, დამოკიდებულია ტემპერატურულ კონდიციებზე, რაც თავის მხრივ ზღუდავს მასალის გადაადგილებას და წევს მასალის დონეს იმ კონკრეტულ სექციაში, იწვევს ცხელი ჰაერის გადაადგილების გაძნელებას და შესაბამისად მთავარი კვამლგამწოვის დიდ დატვირთვას და წარმადობის შემცირებას, თავის მხრივ აღნიშნული მინაცხი არის არასტაბილური და მისი ერთბაშად ჩამოვარდნა იწვევს ცეცხლგამძლე ამონაგის დაზიანებას და გამოუწვევლი კლინკერის გამოშვებას. აღნიშნულის თავიდან ასაცილებლად ან შესამსუბუქებლად პროცესის მართვა და კონტროლი მეტად ინტენსიური და ამასთავაზე უმნიშვნელოვანესია სწორი ტექნოლოგიური დაგეგმვა.



სურათი 12. SO<sub>3</sub>-ის და ქლორის შემცველობის გავლენა მასალის მიცხობაზე

საკმაოდ ბევრი პრობლემის ხსენების მიუხედავად სველ ღუმელზე SO<sub>3</sub>-ის შემცველობა უფრო ნაკლებ კრიტიკულია ვიდრე წინაგამახურებლიან და კალცინატორიან ღუმელებზე. ამ მეთოდების შემთხვევაშიც იგივე პროცესები ვითარდება სისტემაში, იმ განსხვავებით, რომ აქ ტემპერატურული პროფილი გაცილებით მეტად უწყობს ხელს ამ არასასურველი პროცესების განვითარებას და პრობლემის წარმოშობის ალბათობა გაზრდილია. ალბათობის გაზრდასთან ერთად პირდაპირ პროპორციულად იზრდება არასასურველი შედეგის სიდიდეც, რადგან წინაგამახურებელში და კალცინატორში ვერტიკალირად ხდება მასალის ზემოდან ქვემოთ ვარდნა 800მმ-იანი დიამეტრიც ციკლონის გამალი მილიდან და გადაადგილება ღუმელისკენ, ადვილი წარმოსადგენია რა მოხდება თუ კი მასალას ქვემოთ ამ მილიდან გამოსასვლელი შევიწროვებული ან სულაც ამოქოლილი დახვდა, ციკლონიდან გამოსავალს ვეღარ იპოვის და დაიწყებს მის ამოვსებას. გაზრდილი წარმადობიდან გამომდინარე ციკლონის ამოვსებას დაახლოებით 30-40 წუთი დაჭირდება.

ამოვსებული და გამაგრებული მასალის მოცილება დაახლოებით 1-დან 2 კვირამდე მძიმე და რისკიანი გამხსნელობითი სამუშაო, უამავი დახარჯული ადამიანური თუ მატერიალური რესურსი სჭირდება, ამასთანავე ეს პერიოდი ვერ ხდება კლინკერის წარმოება რაც საწარმოო დანახარჯებს ზრდის ხოლო შემოსავალს ამცირებს.

**ცხრილი 5. საერთაშორისო ნახშირის ქიმიური შემადგენლობები და კალორიულობა**

საერთაშორისო ნახშირი	ჯამური სინესტე	ნაცარი	აქროლადები	სრული	სრული	მშრალი	მშრალი					
				თბური ენერგია კკა/კგ	თბური ენერგია კკა/კგ	მასალის თბური ენერგია კკა/კგ	მასალის თბური ენერგია კკა/კგ					
სინჯი 1	8.59	10.27	33.73	28286	6757	25666	6132					
სინჯი 2	8.13	11.50	33.22	28139	6722	25670	6132					
სინჯი 3	9.69	11.29	34.90	28679	6851	25685	6136					
სინჯი 4	9.21	11.55	33.89	27937	6674	25158	6010					
სინჯი 5	8.87	9.35	33.14	28562	6823	25844	6174					
სინჯი 6	9.19	13.05	33.93	27776	6635	25017	5976					
სინჯი 7	8.54	9.85	32.14	26944	6437	24451	5841					
სინჯი 8	11.73	9.72	31.70	28329	6767	24743	5911					
სინჯი 9	9.69	12.90	33.55	27291	6520	24431	5836					
სინჯი 10	8.15	10.59	33.30	27575	6587	25146	6007					
სინჯი 11	8.53	9.61	34.70	27743	6628	25184	6016					
სინჯი 12	8.49	13.00	33.16	27381	6541	24870	5941					
საერთაშორისო ნახშირი	LOI [%]	SiO2 [%]	Al2O3 [%]	Fe2O3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Na2O [%]	K2O [%]	S [%]	SO3 [%]	Cl
სინჯი 1	0.85	55.59	26.68	8.73	4.11	1.06	0.05	0.01	1.77	0.56	1.15	
სინჯი 2	1.91	53.29	23.015	8.49	7.46	1.075	0.1	0.145	1.48	0.80	2.615	0.145
სინჯი 3	1.195	52.805	23	11.2	5.1	1.275	0.075	0.005	1.71	0.7	2.25	0.05
სინჯი 4	0.78	52.795	27.165	5.54	6.58	0.91	0.03	0.095	1.57	0.3	1.22	0.017
სინჯი 5	2.79	44.81	36.09	9.6	3.7	0.88	0.06	0.1	1.45	0.51	0.21	0.020
სინჯი 6	1.26	65.13	22.37	5.27	2.16	0.88	0.05	0.01	1.89	0.43	0.25	0.230
სინჯი 7	1.51	59.6	23.74	8.17	2.95	1.07	0.05	0.44	1.54	0.74	0.63	0.020
სინჯი 8	2.25	64.21	21.81	5.24	2.1	0.88	0.05	0.01	1.89	0.47	0.25	0.020
სინჯი 9	1.19	58.52	24.61	8.98	3.59	0.73	0	0.65	1.48	0.5	0.21	0.020
სინჯი 10	2.07	57.9	23.86	9.21	2.97	1.07	0.05	0.48	1.55	0.56	0.69	0.020
სინჯი 11	0.73	50.06	20.33	8.3	15.47	0.89	0.09	0	1.26	0.45	2.42	0.020
სინჯი 12	1.04	58.25	23.53	9.75	2.94	0.75	0.06	0	1.56	0.42	0.86	0.020

**ცხრილი 6. ქართული ნახშირის ქიმიური შემადგენლობები და კალორიულობა**

ქართული ნახშირი	ჯამური სინესტი	ნაცარი	აქროლადები	სრული თბური ენერჯია კკ/კგ	სრული თბური ენერჯია კკალ/კგ	მშრალის მასალის თბური ენერჯია კკ/კგ	მშრალის მასალის თბური ენერჯია კკალ/კგ
სინჯი 1	15.86	31.33	31.61	21080	5036	17382	4152
სინჯი 2	16.47	30.29	32.30	21175	5059	17318	4137
სინჯი 3	16.22	27.97	33.04	21096	5040	17310	4135
სინჯი 4	15.93	28.68	32.60	21088	5038	17371	4150
სინჯი 5	14.56	29.04	33.07	20970	5010	17589	4202
სინჯი 6	14.56	27.60	32.48	20995	5016	17614	4208
სინჯი 7	14.32	24.89	32.45	20730	4952	17440	4166

ქართული ნახშირი	LO I [%]	SiO2 [%]	Al2O3 [%]	Fe2O3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Na2O [%]	K2O [%]	S [%]	SO3 [%]	Cl [%]
სინჯი 1	1.08	49.61	31.58	8.01	3.88	1.00	0.16	0.11	0.44	1.26	3.61	
სინჯი 2	0.51	47.85	33.75	9.70	3.45	0.86	0.03	0.01	0.38		3.21	
სინჯი 3	0.44	50.90	33.63	8.38	2.87	0.51	0.04	0.01	0.46		2.17	
სინჯი 4	0.77	49.90	31.60	8.74	3.51	0.62	0.14	0.01	0.38		2.47	
სინჯი 5	0.78	50.28	33.72	7.92	3.30	0.66	0.08	0.01	0.44	1.28	2.44	0.06
სინჯი 6	0.86	49.44	33.68	10.39	2.18	0.00	0.00	0.01	0.36		2.60	
სინჯი 7	0.60	48.45	32.44	11.73	3.01	0.01	0.01	0.01	0.31		3.08	0.13

ზემოთ აღნიშნული არა ერთი მიზეზის მიუხედავად აუცილებელია ტექნოლოგიაში გამოიყენებოდეს ნაკლები ღირებულების (როგორც ლოჯისტიკური ასევე უშუალოდ მასალის ღირებულება) საწვავი და ნედლეული, რადგან ყველა ქარხანას ეკონომიკური სარგებლის მიღება ამოძრავებს და მათ გამოყენებას ამჯობინებს სწორი ტექნოლოგიური მოწყობილობების, მეთოდების, კვლევების, დაგეგმვის და განხორციელების გზით.

## 1.12. გამოწვის მეთოდის ცვლილება

როგორც შესავალშივე აღინიშნა მეთოდის ცვლილებამ გამოიწვია საწვავის შემცირება, რაც მყარი საწვავის (ნახშირის) გამოყენების შემთხვევაში დიდ გავლენას ახდენს კლინკერის ქიმიურ ცვლილებაზე იმით, რომ სველ მეთოდში თუ ნახშირის მიწოდება ტონა კლინკერზე იყო 6.3გჯ ანუ დაახლოებით 250-260კგ 1ტ კლინკერზე მშრალი მეთოდით, რომლის ხარჯიც 3.1გჯ/ტონა კლინკერზეა მოიხმარს 120-125კგ 1 ტონა კლინკერზე. იდენტური ნახშირის ან ნახშირების მიქსების გამოყენებისას, რომლის ნაცარი იქნება 10%, სველი მეთოდის გამოშვებულ კლინკერზე ეს ნაცარი თავისი რაოდენობით 2-ჯერ მეტ გავლენას მოახდენს ვიდრე იგივეს შეძლებს მშრალ მეთოდზე რადგან 2-ჯერ ნაკლები რაოდენობის ნაცარი მიიღებს მონაწილეობას კლინკერიზაციაში.

მაგალითად, მასის ბალანსით 1 ტონა სველი მეთოდით გამომწვარი კლინკერი შედგება 975კგ ნედლეული ფქვილის გახურებული ნარევის და 25კგ ნაცრისაგან, ხოლო მშრალი ღუმელის შემთხვევაში 988კგ ნედლეული ფქვილის გახურებული ნარევის და მხოლოდ 12კგ ნაცრისაგან (იგივე ნახშირის გამოყენებით ნაცრიანობა 10%).

აქედან გამომდინარე მშრალი ღუმელის შემთხვევაში ფქვილის პროცენტული რაოდენობა კლინკერში იზრდება და შესაბამისად უფრო მეტ გავლენას ახდენს კლინკერის საბოლოო ხარისხზე, სწორედ ამიტომ აუცილებელი გახდა ახალი, პერსპექტიული კომპონენტების მოძიება და გამოცდა შემდგომი გამოყენებისთვის.

## 2. ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები და მათი განსჯა

ჩატარებული ექსპერიმენტების პირველი ნაწილი ძირითადად ეხებოდა საწვავის და ნედლეული მასალების პროპორციების ცვლილებას, ამ ცვლილებების დაგეგმვას განხორციელებას, შედეგების გაანალიზებას და ექსპერიმენტის შემდეგი ეტაპის დაგეგმვას. ექსპერიმენტის საწყის ეტაპზე მიმდინარეობდა სხვადასხვა ნარევების შერჩევა, ახალი რკინის ოქსიდის წყაროს გამოყენება და ამ ექსპერიმენტების შედეგების დაფიქსირება დამუშავება.

ჩატარებული ექსპერიმენტის მეორე ნაწილი სრულად ეთმობა პუცოლანური დანამატის - ტუფის თერმულ გააქტიურებას, რომელმაც კლინკერი ნაწილობრივ ჩაანაცვლა. აღნიშნული ექსპერიმენტი წარმატებით დასრულდა და შედეგად მივიღეთ თერმულად გააქტიურებული ტუფი საწვავის დანახარჯის გარეშე.

### 2.1. ალოქსიდის და ბოქსიტის ნარევი

როგორც წინა ექსპერიმენტებში აღინიშნა ალოქსიდის ქართული ნედლეულის გამოყენება ეკონომიკურად ყველაზე მომგებიანია, მისი მაღალი ალუმინის (საშალოდ 44-45%) შემცველობა ამ ნედლეულ მასალას უკონკურენტოს ხდიდა.

ცხრილი 7. ქართული მაღალი ხარისხის ალოქსიდი

ალოქსიდი	ხ.დ.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SUM	სინესტე
№1 სინჯი	11.9	17.4	41.2	18.1	0.7	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	9.7	100	4.5
№2 სინჯი	11.8	11.9	45.1	18.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	10.8	99	5.0
№3 სინჯი	11.9	12.3	45.5	18.8	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	11.9	100	7.8
№4 სინჯი	12.2	13.9	47.9	12.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.7	100	3.8
№5 სინჯი	12.3	13.0	44.6	17.5	1.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	11.2	100	8.5
საშ. მონაცემი	12.0	13.7	44.8	17.1	0.6	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	11.3	99.9	5.9

თუმცა, როგორც აღმოჩნდა მომწოდებელმა ვერ შეძლო ამ ხარისხის სტაბილური შენარჩუნება, რადგან ძველი ნაყარი მასალა არ არის ერთგვაროვანი და ხარისხის კუთხითაც რადიკალური სხვაობაა.

**ცხრილი 8. ქართული დაბალი ხარისხის ალოქსიდი**

ალოქსიდი	ხ.დ.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	SO3	TiO2	SUM	სინესტე
№1 სინჯი	15.5	37.9	21.2	6.9	11.2	1.9	0.3	0.1	1.2	3.1	0.7	100.0	11.2
№2 სინჯი	9.1	42.8	17.0	19.6	6.2	2.2	0.7	0.1	1.2	0.5	0.7	100.0	12.0
№3 სინჯი	8.2	48.5	19.0	12.6	6.3	2.3	0.6	0.1	1.4	0.1	0.9	100.0	8.0
№4 სინჯი	11.4	46.5	19.6	9.6	6.9	2.1	1.3	0.1	1.4	0.2	0.7	99.6	3.6
№5 სინჯი	12.0	47.9	18.8	8.3	8.0	1.9	0.6	0.1	1.3	0.4	0.7	100.0	12.0
საშ. მონაცემი	11.3	44.7	19.1	11.4	7.7	2.0	0.7	0.1	1.3	0.8	0.7	99.9	9.4

ამ მასალების გასაშუალოება სირთულესთან არის დაკავშირებული თუმცა გასათვალისწინებელია მასალის რაოდენობა რომელიც ამოწურვადია, სწორედ ამიტომ საჭირო გახდა ალუმინის დამატებითი წყაროს გამოყენება, რომელიც არის სტაბილურად მაღალი ხარისხის და მარაგები არის ხელმისაწვდომი შორეულ პერსპექტივაშიც, მაგრამ არის გაცილებით ძვირი ნედლეული მასალა, რომელიც ასევე შემოდის აზერბაიჯანიდან.

**ცხრილი 9. აზერბაიჯანული ბოქსიტის ქიმიური ანალიზი**

ბოქსიტი	ხ.დ.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	SO3	TiO2	SUM	სინესტე
№1 სინჯი	12.0	15.6	42.4	19.9	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	9.7	100	3.4
№2 სინჯი	11.8	10.3	47.2	19.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	10.0	99	5.0
№3 სინჯი	11.9	10.6	46.9	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	10.6	100	3.2
№4 სინჯი	10.5	10.5	43.0	25.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	9.5	100	3.1
№5 სინჯი	10.7	4.5	44.8	32.8	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	6.9	100	2.7
№6 სინჯი	8.8	14.4	41.4	27.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	7.2	100	2.9
№7 სინჯი	11.7	18.7	33.3	28.3	0.2	0.3	0.1	0.1	0.9	0.0	6.5	100	4.8
№8 სინჯი	10.9	25.4	31.3	21.0	3.6	1.0	0.4	0.1	0.6	0.2	5.5	100	7.6
№9 სინჯი	11.6	7.4	48.1	22.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	10.3	100	5.0
№10 სინჯი	11.2	7.9	44.0	26.9	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	9.6	100	4.4
საშ. მონაცემი	11.1	12.5	42.2	24.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.3	0.0	8.6	99.9	4.2

მოცემულობიდან გამომდინარე საწარმოო ექსპერიმენტისთვის გავაკეთეთ ბოქსიტის და დაბალი ხარისხის ალოქსიდის დამიქსვა 1/3 პროპორციით და ამ ნარევის გამოყენება საწარმოო ექსპერიმენტში.

**ცხრილი 10. აზერ. ბოქსიტის და ქართული ალოქსიდის ნარევის ქიმიური ანალიზი**

	ხ.დ.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	SO3	TiO2	SUM	სინესტე
ანალი (დაბალ ალუმინიანი) ალოქსიდის და ბოქსიტის ნარევი 3/1	11.2	22.4	37.2	15.9	2.7	0.7	0.2	0.1	0.5	0.2	8.9	100.0	6.6
	20.5	36.1	19.6	9.7	7.8	2.1	0.4	0.1	1.2	1.5	1.1	99.9	11.8
	9.1	32.1	23.3	24.8	4.1	1.2	0.3	0.1	0.8	0.1	4.1	100.0	8.9
	9.6	33.1	21.8	22.1	6.3	1.6	0.4	0.1	0.9	0.3	2.9	99.1	8.4
	8.8	44.4	19.6	17.0	5.2	1.7	0.3	0.1	1.3	0.3	1.5	100.0	10.0
	11.0	38.7	23.4	14.0	6.1	1.4	0.3	0.1	1.2	0.4	3.5	100.0	9.4
	9.9	38.4	22.2	17.1	6.4	1.5	0.2	0.1	1.1	0.4	2.6	100.0	9.8
საშ. მონაცემი	11.4	35.0	23.9	17.2	5.5	1.4	0.3	0.1	1.0	0.4	3.5	99.9	9.3

აღნიშნულმა მიქსმა მოგვცა საშუალება სასურველ ნიშნულამდე გაგვეზარდა ალუმინის ოქსიდის შემდეგობა ალუმინის წყაროში, რაც აიოლებს კონტროლს და მიქსში შეყავს გაცილებით ნაკლები სილიციუმის ოქსიდი.

## 2.2. რკინის ნამწვის და კეკის ნარევი

ესპანური რკინის ნამწვი იძლეოდა სასურველ შედეგს, თუმცა არის ყველაზე ძვირი ნედლეული მასალა, რაც ამ ეტაპზე კასპის ქარხანაშია, შესაბამისად მიდიოდა მუდმივი მუშაობა მის ადექვატურ ჩამნაცვლებელზე. მიების პროცესში გაიტესტა ინდუსტრიული ნარჩენი რკინის კეკი, რომლის ანალიზებიც საკმაოდ პერსპექტიული ჩანდა.

### ცხრილი 11. აზერბაიჯანული კეკის ქიმიური ანალიზი

კარგი ლაბორატორიული მონაცემებიდან გამომდინარე გადაწყდა საწარმოო

რკინის კეკი	ხ.დ.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	SO3	TiO2	SUM	სინესტე
სინჯი №1	11.5	11.6	15.0	51.6	1.8	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	7.6	100.0	21.1
სინჯი №2	11.6	11.9	15.5	50.2	1.7	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	8.1	100.0	20.5
სინჯი №3	11.9	11.1	15.9	50.3	1.6	0.1	0.2	0.2	0.2	0.5	8.1	100.0	21.5
სინჯი №4	11.4	12.6	16.3	48.7	1.5	0.1	0.2	0.2	0.2	0.5	8.3	100.0	21.5
სინჯი №5	11.2	14.6	16.4	47.9	1.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	7.7	100.0	23.5
სინჯი №6	11.1	12.1	14.7	51.4	2.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.4	7.5	100.0	22.8
სინჯი №7	11.7	13.0	16.3	48.7	1.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.5	7.9	100.0	21.7
სინჯი №8	11.5	13.4	16.3	47.5	1.4	0.1	0.2	0.2	0.2	0.6	7.9	99.2	22.0
სინჯი №9	10.1	20.2	14.8	44.9	1.9	0.2	0.1	0.2	0.7	0.4	6.5	100.0	19.1
სინჯი №10	10.4	19.5	15.7	44.2	2.0	0.4	0.2	0.2	0.5	0.5	6.6	100.0	18.2
სინჯი №11	10.9	10.6	13.5	55.6	1.9	0.0	0.2	0.1	0.1	0.3	6.6	99.9	18.1
სინჯი №12	10.7	10.4	13.6	55.6	1.9	0.1	0.2	0.2	0.1	0.4	6.8	100.0	19.6
სინჯი №13	11.4	13.4	15.2	50.1	1.7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	7.1	100.0	19.0
საშ. მონაცემი	11.2	13.4	15.3	49.7	1.7	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	7.4	99.9	20.7

ექსპერიმენტის ჩატარება და ესპანური რკინის ნამწვის ნაწილობრივ ჩანაცვლება აზერბაიჯანული კეკით.



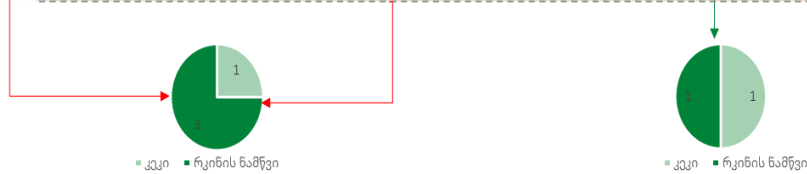
სურათი 13. ესპანური რკინის ნამწვი და აზერბაიჯანული კეკი



შერევის დოზირება ხდებოდა ავტომტვირთავების მეშვეობით, განისაზღვრა შესაძარებელი ნარევი - 100% რკინის ნამწვი, 1/1-ზე და 3/1-ზე შერეული ესპანური რკინის ნამწვი და აზერბაიჯანული კეკი.

**ცხრილი 12. ესპანური რკინის ნამწვის და კეკის ნარევის ქიმიური ანალიზი**

რკინის კომპონენტი	ხ.დ.	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	MnO	Na2O	K2O	SO3	TiO2	SUM	სინესტე	
რკინის ნამწვი		29.4	4.6	62.72	3.14							99.86	2.2	
		29.1	4.5	62.6	3.79							99.99	3.4	
		30	4.8	60.21	4.85							99.86	2.38	
		29.3	4.7	61.72	4.26							99.98	1.27	
		28.8	5.3	61.17	4.26							99.53	2.1	
		28.8	5.9	50.51	4.26							89.47		
		28.1	5.6	61.78	4.12							99.6		
		25.2	4	59.91	4.72	0.8	0.15	0.51	0.91	0.06	1.18	97.44	3.54	
		0	25	4.4	60.8	4.31	0.85	0	0.54	0.49	0.06	1.78	98.23	
		0	28.2	5.7	59.7	3.9	0.5	0.1	0.51	0.2	0.05	1.2	100.06	5.3
რკინის ნამწვი და კეკის მიქსი		2.8	19.6	9.2	60.73	1.9	0.41	0.1	0.5	0.7	0.09	3.96	99.99	4.78
		2.3	19.1	9.3	62.06	1.65	0.45	0.1	0.5	0.64	0.09	3.78	99.97	7.5
		5.3	17.1	10.9	57.47	1.85	0.27	0.12	0.42	0.62	0.1	5.89	100.04	8.5
		0.7	20.6	7.5	64	1.84	0.43	0.11	0.62	0.69	0.07	3.1	99.66	
		0	24.9	3	65.44	2.69	0.71	0.09	0.86	1.03	0.05	0.48	99.25	4
	0	23.9	2.8	62.91	1.76	0.68	0.16	0.79	0.88	0.07	3.35	97.3		



მიღებული ინდუსტრიული ტესტის შედეგად დადგინდა, რომ აღნიშნული პროპორციებით შერევა გამომავალი ფქვილის შენარჩუნებით საკმაოდ დიდ ფინანსურ ეფექტს იძლევა. რკინის ნამწვის სრულად კეკით ჩანაცვლება დამატებითი ინვესტიციის გარეშე ტექნიკურ სირთულეებთან არის დაკავშირებული რადგან კეკი არის ძალიან სველი და კრობადი, რაც ართულებს არსებული სილოსიდან და დოზირების სისტემიდან მის მიწოდებას შემკრებ ლენტზე. ექსპერიმენტის ერთერთი შემდეგი ეტაპი იქნება ამ მასალების დოზირების ისეთი პროპორციებით განსაზღვრა, რომ ტექნიკურად იყოს შეძლებადი და იძლეოდეს საუკეთესო ხარისხობრივ და ფინანსურ შედეგს.

### 2.3. ანალიზების ჩატარების მეთოდები და მოწყობილობები

ზუსტი დასკვნების გაკეთებისთვის აუცილებელია, პროცედურის დაცვის სრული სიზუსტით მოხდეს სინჯების აღება და ანალიზების გაკეთება ამასთანავე საჭიროა დაკალიბრებული ლაბორატორიული მოწყობილობა და მათი სწორი გამოყენება.

კვლევასთან დაკავშირებული ყველა ანალიზი კეთდება ქვემოთ ჩამოთვლილ ლაბორატორიულ მოწყობილობებზე შესაბამისი მეთოდის გამოყენებით.

მსხვილ გრანულიანი სინჯების შემთხვევაში, ხდება ყველა სინჯის ლაბორატორიულ სამსხვრევში ფრაქციის დაპატარავება ხოლო შემდეგ ლაბორატორიულ წისქვილში სამიზნო სიწმინდეზე დაფქვა და შემდგომ შესაბამის ხელსაწყოზე, შესაბამისი მეთოდით გაზომვა.

### **ნახშირის კალორიმეტრი - IKA-werke**

ნახშირის კალორიულობა კეთდება ახალ, თანამედროვე დანადგარზე C2000 <sup>®</sup> basic IKA-werke-ქანგბადის ბომბით. ეს ხელსაწყო ხასიათდება მაღალი ხარისხის ავტომატიზაციით, არის მეტად კომპაქტური, ხასიათდება დიდი სიზუსტით. კალორიმეტრის მართვა ხორციელდება მართვის ეკრანის მეშვეობით, სპეციალური პროგრამული უზრუნველყოფით. მის კალიბრაციას და მუშაობის სიზუსტეს აწარმოებს მომუშავე პერსონალი სპეც. სტანდარტული ბენზოლის აბებით. თითო სინჯის გაზომვას დაახლოებით ესაჭიროება 30 წუთი. ნახშირის სინჯის წონაკი იდება სპეციალურ კიუვეტში, რომელშიც თავსდება ნართის ძაფი. კიუვეტი იტვირთება ბომბაში და გაზომვის პროგრამის მითითების შემდეგ რეზულტატი ჩნდება ეკრანზე.

### **HP\_MP HERZOG- (წისქვილის პრესი)**

ეს დანადგარი გამოიყენება სპექტრომეტრზე (Z E T I U M) და დიფრაქტომეტრზე (XRD) გასაზომად საჭირო ტაბლეტების დასამზადებლად. HERZOG-ი ამა თუ იმ სინჯს ჯერ ფქვავს, შემდეგ კი პრესავს. ნიმუშების დაპრესვა ხდება სპეციალური ცელულოზის აბების დამატებითა და დაწნეხილი ჰაერის მიწოდებით ( აბების რაოდენობის შერჩევას აკეთებს მომსახურე პერსონალი სინჯის სიმკვრივის შესაბამისად ექსპერიმენტული გზით). ხელსაწყოზე დამონტაჟებულია ეკრანი, საიდანაც ხდება დანადგარის მართვა, მუშაობის რეჟიმზე ჩართვა, გასუფთავება და ა.შ. ხელსაწყო მუშაობს როგორც ხელის მართვის რეჟიმზე, ასევე ავტომატურზეც.

## სპექტრომეტრი XRF - ZETIUM

ნედლეული მასალებისა და მზა პროდუქციის ქიმიური ანალიზები კეთდება უახლეს რენტგენოფლუორესცენციურ სპექტრომეტრზე. მასზე ანალიზები კეთდება როგორც მყარ, ასევე ფხვიერ მასალაზე. ეს სპექტრომეტრი არის ლიდერი მთელს ბაზარზე, როგორც მაღალტექნოლოგიური დიზაინით, ასევე ინოვაციური შესაძლებლობებით. მასზე შეიძლება ერთდროულად განისაზღვროს მენდელეევის სისტემის თითქმის ყველა ელემენტი მისი კონცენტრაციის ფართო სპექტრის მიუხედავად. ZETIUM-ი წარმოადგენს რევოლუციურ ნაბიჯს მასალების ანალიზის სფეროში. ანალიზები კეთდება როგორც დაპრესილ, ასევე შელღობილ ტაბლეტებზე. მასალების შელღობა ხდება სპეციალური მაღლობელის (Xray flux შემადგენლობა:  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  და  $\text{LiBO}_2$ )-ის დამატებით. ამ დანადგარს უკეთდება ცალ-ცალკე კალიბრაცია დაპრესილი და შელღობილი სინჯებისათვის სტანდარტული ნიმუშების მიხედვით. ხელსაწყო გამოირჩევა დიდი სიზუსტით, ანალიზის გაკეთების სისწრაფით, საიმედოობითა და მომსახურების სიმარტივით .

## XRD-რენტგენული დიფრაქტომეტრი

XRD-არის ავტომატიზირებული სამაგიდო დიფრაქტომეტრი, რომლის მუშაობაც შესაძლებელია კომბინირებულად ZETIUM-ის მოდელის სპექტრომეტრის რობოტზე. მას შეუძლია კლინკერის, ცემენტების, თაბაშირის და სხვადასხვა დანამატების მინერალოგიური შემადგენლობის განსაზღვრა დაახლოებით 10 წუთის განმავლობაში, ეს კი რათქმაუნდა გვამღვებს სწრაფი რეაგირების საშუალებას ტექნოლოგიური პროცესების დარღვევების შემთხვევაში. ჩვენ ძირითადად ამ დანადგარით ვაკვირდებით თავისუფალი კალციუმის რაოდენობის ცვლილებას კლინკერსა და ცემენტში. XRD გამოირჩევა მუშაობის სიმარტივით. აქვს სენსორული ეკრანი. სულ 3 მოქმედებაა საჭირო მასზე სამუშაოდ:

- 1 დაპრესილი ტაბლეტის დადება სპეციალურ ბუდეში
- 2 გაზომვის პროგრამის არჩევა და
- 3 შედეგების ნახვა

## 2.4. საწარმოო ექსპერიმენტები ნედლეულის და საწვავის სხვადასხვა მიქსებით, მიმდინარეობა და მათი შედეგები

ზემოთ აღნიშნული კვლევებიდან გამომდინარე ეტაპობრივად მიმდინარეობდა საწარმოო ექსპერიმენტები, რათა დადგენილიყო ნედლეულის და ნახშირის მიქსების საუკეთესო ვარიანტი კლინკერის ხარისხის, ლუმელის მუშაობის პროცესის საიმედოობის და ნაკლები დანახარჯების მიხედვით.

საწარმოო ექსპერიმენტები 20 ეტაპად ტარდებოდა დაახლოებით 2 წლის განმავლობაში, ექსპერიმენტები განსხვავდებოდა შემდეგი მონაცემების მიხედვით:

- ძირითადი კომპონენტის, კირქვის, ხარისხით (CaO/SiO<sub>2</sub> ფარდობით და კირის გაჯერების კოეფიციენტით - LSF-ით)
- კომპონენტების რაოდენობით და ტიპით
- ნედლეული ფქვილის გაჯერების კოეფიციენტის მიზნით
- საწვავის ნარევით, ანუ ქართული და საერთაშორისო ნახშირების პროპორციების გადანაწილებით
- 

### 2.4.1. საწარმოო ექსპერიმენტი №1

პირველი საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, 100% ესპანური რკინის ნამწვი, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 109.5–113.3 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF), ხოლო ნახშირი - ქართული/ საერთაშორისო 3/2 პროპორციით.

ცხრილი 13. ექსპერიმენტი №1

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ლუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO <sub>2</sub>	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.442	0.0	89.9%	9.7%	2.5%	1.5%	107.3	96.3
3.448	111.4	89.0%	6.5%	2.3%	1.9%	107.8	96.7
0.000	0.0	88.6%	7.1%	2.4%	1.5%	106.9	96.7
3.454	111.3	87.6%	7.9%	2.2%	1.4%	105.9	95.9
3.448	0.0	90.3%	9.0%	2.5%	1.7%	106.2	96.4

3.450	111.1	88.9%	5.9%	2.3%	1.5%	106.6	96.4
0.000	0.0	89.2%	7.6%	2.6%	1.6%	106.1	96.7
3.450	111.0	86.9%	7.0%	2.3%	1.3%	106.3	96.8
3.456	111.1	89.4%	10.0%	2.4%	1.3%	105.2	96.8
0.000	0.0	89.5%	7.0%	2.4%	1.3%	105.5	97.1
3.450	111.2	87.1%	7.0%	2.4%	1.4%	105.4	96.7
0.000	0.0	86.6%	9.6%	2.5%	1.9%	104.6	96.3
3.457	111.2	86.6%	9.6%	2.5%	1.9%	106.1	96.5
0.000	0.0	90.0%	8.0%	2.0%	0.5%	105.4	96.9
3.411	109.5	89.0%	8.2%	2.0%	0.8%	105.3	96.4
0.000	0.0	88.0%	9.7%	2.0%	0.3%	105.8	96.8
3.456	111.2	91.0%	6.8%	2.1%	0.4%	106.1	96.9
3.458	111.5	90.0%	7.3%	2.2%	0.6%	105.7	96.5
0.000	0.0	92.0%	5.3%	2.1%	1.0%	105.8	96.6
0.000	0.0	88.0%	8.9%	2.1%	0.6%	105.7	96.6
3.454	111.5	90.0%	6.8%	2.2%	1.1%	106.4	96.6
3.457	0.0	90.0%	7.4%	2.2%	0.9%	106.0	94.8
0.000	0.0	88.0%	9.2%	2.1%	0.6%	105.7	95.3
0.000	0.0	88.0%	8.8%	2.3%	1.0%	105.8	96.5
6.913	223.6	87.0%	9.7%	2.2%	1.5%	105.2	96.6
3.454	112.0	87.0%	10.0%	2.2%	1.1%	106.0	96.9
0.000	0.0	90.0%	6.6%	2.2%	1.6%	106.1	97.2
3.456	111.8	88.0%	8.1%	2.1%	1.5%	105.5	96.7
0.000	0.0	91.0%	5.6%	2.2%	1.4%	105.5	96.5
3.462	112.1	85.0%	10.9%	2.2%	1.5%	105.7	96.5
0.000	0.0	87.0%	9.7%	2.2%	1.6%	105.5	96.7
3.465	112.3	86.0%	10.6%	2.2%	1.6%	105.6	96.9
0.000	0.0	89.0%	7.4%	2.2%	1.5%	105.7	97.1
3.475	112.2	86.0%	10.2%	2.2%	1.5%	105.2	96.6
3.474	112.4	86.0%	10.6%	2.2%	1.5%	105.6	96.9
0.000	0.0	88.0%	8.4%	2.1%	1.6%	105.8	96.8
3.486	113.0	88.0%	7.6%	2.3%	1.7%	105.4	96.7
0.000	0.0	87.0%	8.6%	2.2%	1.8%	105.3	96.6
3.493	113.1	90.0%	6.3%	2.2%	1.8%	106.1	96.8
0.000	0.0	87.0%	9.6%	2.2%	1.4%	106.2	96.4
3.497	113.3	89.0%	7.7%	2.1%	1.5%	105.5	96.5
3.500	113.2	90.0%	6.4%	2.3%	1.8%	107.0	96.8
3.497	113.2	89.0%	7.7%	2.1%	0.8%	107.0	96.4
0.000	0.0	89.1%	7.6%	2.3%	0.9%	106.2	96.3
0.000	0.0	88.4%	8.3%	2.2%	1.0%	107.3	97.1
3.490	113.0	82.5%	12.7%	1.9%	2.9%	107.2	97.2
საშუალო		88.3%	8.3%	2.2%	1.3%	105.96	96.59

## 2.4.2. საწარმოო ექსპერიმენტი №2

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 1/1 პროპორციების ნარევი, 100% ესპანური რკინის ნამწვი, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 109.5 – 113.3 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/2 პროპორციით.

ცხრილი 14. ექსპერიმენტი №2

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
0.000	0.0	90.1%	6.2%	2.2%	1.5%	106.7	96.6
3.493	113.0	88.3%	8.2%	2.1%	1.4%	106.5	96.7
0.000	0.0	88.1%	8.6%	2.1%	1.3%	105.9	96.6
3.495	113.1	89.1%	7.4%	2.0%	1.5%	106.7	97.1
3.493	113.1	89.5%	6.8%	2.1%	1.6%	106.7	97.2
0.000	0.0	89.5%	7.0%	2.1%	1.3%	106.4	96.8
3.498	113.3	88.5%	8.3%	2.1%	1.1%	105.4	96.5
0.000	0.0	91.5%	4.9%	2.2%	1.5%	107.0	96.9
3.490	112.9	86.2%	9.9%	2.1%	1.8%	106.7	97.0
0.000	0.0	87.1%	9.4%	2.2%	1.4%	106.7	96.9
3.494	113.0	89.0%	7.6%	2.1%	1.3%	106.7	97.0
3.496	113.2	87.6%	9.2%	2.2%	1.0%	106.4	97.1
3.498	113.0	91.2%	5.4%	2.1%	1.3%	105.8	96.4
0.000	0.0	90.3%	6.3%	2.1%	1.2%	105.6	97.0
3.494	112.9	89.5%	7.3%	2.1%	1.1%	106.1	97.0
0.000	0.0	89.9%	6.9%	2.1%	1.1%	106.4	97.0
3.474	112.5	89.6%	7.2%	2.2%	1.0%	105.9	97.0
0.000	0.0	89.9%	6.9%	2.1%	1.1%	106.4	97.0
3.474	112.3	88.9%	7.7%	2.2%	1.3%	105.8	97.0
3.476	112.5	89.0%	8.0%	2.0%	1.0%	106.6	97.5
3.476	112.3	86.7%	9.7%	2.1%	1.4%	106.3	97.5
0.000	0.0	88.6%	8.2%	2.1%	1.1%	105.8	97.3
3.474	112.3	88.2%	8.3%	2.1%	1.3%	105.2	96.9
0.000	0.0	90.0%	6.8%	2.2%	1.1%	106.7	97.6
3.472	112.0	88.4%	8.2%	2.2%	1.2%	106.1	97.1
0.000	0.0	87.8%	9.2%	2.2%	0.8%	105.4	96.5
3.472	112.2	90.9%	6.0%	2.2%	0.9%	106.1	96.8
0.000	0.0	90.1%	6.7%	2.2%	1.0%	105.8	96.4
6.946	224.1	90.0%	7.4%	2.1%	1.0%	105.2	96.6

0.000	0.0	91.0%	6.5%	2.1%	0.9%	105.3	96.7
3.477	112.2	91.0%	5.8%	2.2%	0.8%	105.1	96.3
3.479	112.4	88.3%	8.7%	2.2%	0.8%	105.0	96.8
0.000	0.0	90.4%	6.8%	2.2%	0.6%	105.3	96.4
3.482	112.5	90.5%	6.4%	2.2%	0.9%	104.8	96.5
3.475	112.4	89.8%	7.3%	2.2%	0.8%	105.2	96.4
საშუალო		89.3%	7.5%	2.1%	1.2%	105.99	96.85

### 2.4.3. საწარმოო ექსპერიმენტი №3

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 1/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კევი 3/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 112.1–112.4 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/2 პროპორციით.

#### ცხრილი 15. ექსპერიმენტი №3

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ლუმელის კევა	კლინკერი
CaO/SiO <sub>2</sub>	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
0.000	0.0	90.8%	6.1%	2.2%	0.9%	105.8	96.8
3.477	112.2	87.6%	9.3%	2.1%	1.0%	105.7	96.8
0.000	0.0	91.2%	5.8%	2.1%	0.9%	105.6	96.7
3.476	112.3	92.5%	4.7%	2.2%	0.6%	105.9	97.1
3.475	112.2	93.0%	4.7%	2.1%	0.2%	105.6	96.8
3.475	112.1	90.1%	7.2%	2.2%	0.5%	106.4	97.1
0.000	0.0	92.0%	4.7%	2.3%	1.0%	105.7	97.1
3.474	112.2	92.2%	4.8%	2.3%	0.8%	104.3	96.3
0.000	0.0	90.4%	6.6%	2.3%	0.8%	105.6	97.0
3.488	112.4	91.5%	5.3%	2.4%	0.8%	105.7	96.8
3.479	112.2	89.9%	7.0%	2.3%	0.8%	105.3	96.6
0.000	0.0	91.4%	5.8%	2.3%	0.5%	105.6	96.9
საშუალო		91.0%	6.0%	2.2%	0.7%	105.60	96.83

#### 2.4.4. საწარმოო ექსპერიმენტი №4

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 1/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კევი 1/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 112.1 – 112.5 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

ცხრილი 16. ექსპერიმენტი №4

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.474	112.2	89.0%	7.9%	2.4%	0.8%	105.7	96.9
0.000	0.0	86.4%	10.5%	2.4%	0.7%	106.2	96.7
3.474	112.3	88.5%	8.5%	2.6%	0.4%	106.4	96.8
3.475	112.5	90.6%	5.1%	3.7%	0.6%	106.8	97.0
3.473	112.1	89.5%	7.1%	2.3%	1.1%	106.4	96.1
0.000	0.0	92.1%	4.8%	2.3%	0.9%	106.0	96.2
3.477	112.3	90.0%	6.7%	2.7%	0.8%	106.3	96.7
საშუალო		89.4%	7.2%	2.6%	0.8%	106.26	96.64

#### 2.4.5. საწარმოო ექსპერიმენტი №5

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 2/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კევი 1/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 112.1 – 112.5 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/1.

ცხრილი 17. ექსპერიმენტი №5

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.473	111.9	91.0%	5.8%	2.3%	0.8%	106.1	96.4
0.000	0.0	91.0%	5.7%	2.3%	0.9%	106.0	96.2
3.471	112.2	93.0%	4.3%	2.4%	0.1%	105.8	96.2
0.000	0.0	89.8%	7.3%	2.8%	0.1%	104.8	95.2
3.474	112.0	90.5%	6.5%	2.9%	0.1%	105.3	96.0
3.474	112.2	88.8%	8.2%	2.7%	0.3%	105.6	96.3



0.000	0.0	91.2%	5.8%	2.6%	0.4%	106.1	96.6
0.000	0.0	92.2%	5.1%	2.4%	0.3%	106.4	96.9
0.000	0.0	91.0%	6.1%	2.5%	0.4%	105.8	96.2
3.478	112.1	87.7%	8.5%	2.5%	1.3%	106.3	96.8
0.000	0.0	89.4%	7.3%	2.6%	0.7%	106.2	96.4
3.486	112.3	91.1%	5.7%	2.5%	0.7%	105.9	95.7
3.478	112.1	89.4%	7.5%	2.5%	0.7%	106.1	95.9
0.000	0.0	89.4%	7.6%	2.5%	0.5%	106.6	96.5
საშუალო		90.4%	6.5%	2.5%	0.5%	105.93	96.22

### 2.4.6. საწარმოო ექსპერიმენტი №6

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კევი 1/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 110.5 – 112.0 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

#### ცხრილი 18. ექსპერიმენტი №6

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ლუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.475	112.1	89.2%	7.5%	2.5%	0.8%	106.7	96.5
3.472	112.0	88.9%	7.7%	2.7%	0.8%	106.9	96.7
0.000	0.0	86.7%	9.8%	2.4%	1.1%	106.4	96.5
3.446	110.5	88.5%	8.3%	2.4%	0.7%	106.8	96.7
3.474	111.2	85.5%	11.4%	2.3%	0.7%	106.1	96.2
0.000	0.0	83.2%	13.9%	2.3%	0.6%	105.9	95.7
3.474	111.1	85.8%	11.4%	2.2%	0.7%	107.4	96.0
0.000	0.0	88.6%	8.4%	2.2%	0.8%	106.8	96.5
3.475	111.2	84.4%	12.7%	2.3%	0.6%	106.2	95.7
0.000	0.0	80.5%	16.3%	2.3%	0.9%	105.8	95.9
3.473	111.1	83.6%	13.3%	2.2%	0.9%	106.6	96.0
0.000	0.0	84.0%	13.5%	2.3%	0.2%	106.1	95.3
საშუალო		85.8%	11.2%	2.3%	0.7%	106.48	96.14

### 2.4.7. საწარმოო ექსპერიმენტი №7

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კევი 2/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 111.2–113.6 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

ცხრილი 19. ექსპერიმენტი №7

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.477	111.4	82.9%	14.2%	2.2%	0.7%	106.5	95.9
0.000	0.0	82.6%	14.6%	2.3%	0.5%	107.3	96.1
3.476	111.2	85.1%	12.3%	2.3%	0.3%	107.4	96.3
3.496	111.8	83.8%	13.7%	2.3%	0.1%	106.8	96.7
0.000	0.0	84.3%	13.5%	2.2%	0.0%	107.1	96.6
3.536	113.6	85.3%	12.4%	2.3%	0.1%	106.8	96.4
საშუალო		84.0%	13.5%	2.3%	0.3%	106.98	96.33

### 2.4.8. საწარმოო ექსპერიმენტი №8

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კევი 3/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 114.0–121.6 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

ცხრილი 20. ექსპერიმენტი №8

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
0.000	0.0	85.1%	12.3%	2.4%	0.2%	106.0	96.5
3.570	114.4	81.9%	14.8%	2.4%	0.9%	106.7	96.4
3.591	115.0	86.0%	11.5%	2.4%	0.2%	106.4	95.8
0.000	0.0	85.1%	12.5%	2.4%	0.1%	106.8	95.5

0.000	0.0	85.4%	12.2%	2.3%	0.1%	106.5	95.4
0.000	0.0	83.4%	13.9%	2.5%	0.2%	106.5	96.1
3.641	116.7	84.9%	12.4%	2.4%	0.3%	106.7	95.9
3.681	117.6	86.0%	11.0%	2.4%	0.7%	106.6	96.2
0.000	0.0	83.9%	13.3%	2.3%	0.5%	106.4	95.9
3.716	118.9	83.7%	13.1%	2.2%	1.0%	106.8	96.1
3.809	121.6	85.9%	11.2%	2.2%	0.8%	106.7	96.3
0.000	0.0	85.9%	10.7%	2.8%	0.6%	107.8	96.9
0.000	0.0	87.9%	8.8%	2.4%	0.9%	107.2	96.2
საშუალო		85.0%	12.1%	2.4%	0.5%	106.69	96.09

### 2.4.9. საწარმოო ექსპერიმენტი №9

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი 100%, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 121.2 – 123.4 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

#### ცხრილი 21. ექსპერიმენტი №9

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.799	121.2	85.7%	10.9%	2.5%	1.0%	106.7	95.2
0.000	0.0	87.2%	9.8%	2.2%	0.8%	107.1	95.3
3.810	121.7	87.5%	9.6%	2.2%	0.7%	107.4	95.7
0.000	0.0	86.6%	10.4%	2.2%	0.8%	106.8	96.0
3.803	121.5	86.1%	11.2%	2.2%	0.5%	107.2	96.7
3.852	123.4	86.6%	10.7%	2.1%	0.7%	106.8	96.0
საშუალო		86.6%	10.4%	2.2%	0.7%	106.98	95.83

### 2.4.10 საწარმოო ექსპერიმენტი №10

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კეკი 3/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 107.0 – 124.0 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

ცხრილი 22. ექსპერიმენტი №10

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
0.000	0.0	87.3%	9.5%	2.1%	1.1%	106.8	96.1
3.852	122.7	87.5%	9.7%	2.4%	0.5%	107.0	96.3
0.000	0.0	88.9%	8.4%	2.4%	0.3%	107.1	96.2
3.856	122.6	89.4%	8.1%	2.4%	0.2%	107.1	96.2
3.849	122.6	88.5%	8.8%	2.4%	0.3%	106.8	97.0
3.894	124.1	92.0%	6.0%	2.0%	0.1%	106.7	96.4
0.000	0.0	91.0%	7.0%	2.0%	0.1%	106.9	97.4
3.894	123.8	92.0%	5.0%	2.0%	0.1%	106.7	97.2
0.000	0.0	88.4%	9.3%	2.2%	0.1%	107.2	96.5
3.895	124.2	92.3%	5.5%	2.2%	0.1%	107.1	97.5
0.000	0.0	91.7%	5.8%	2.5%	0.1%	106.3	97.5
3.897	124.4	90.5%	7.1%	2.3%	0.1%	107.0	97.4
3.895	124.8	93.5%	4.1%	2.2%	0.2%	105.8	97.7
0.000	0.0	92.8%	4.6%	2.5%	0.2%	107.0	97.8
3.900	124.7	92.2%	5.2%	2.4%	0.3%	107.0	97.8
0.000	0.0	93.3%	4.0%	2.1%	0.5%	106.3	97.9
3.896	123.8	89.3%	7.7%	2.3%	0.8%	106.5	97.1
0.000	0.0	94.4%	3.1%	2.4%	0.0%	106.8	97.1
3.900	124.9	92.5%	4.9%	2.5%	0.1%	105.4	97.3
3.906	124.6	94.4%	2.5%	2.5%	0.5%	105.2	97.4
3.899	124.6	93.9%	3.2%	2.3%	0.6%	106.1	97.1
0.000	0.0	94.6%	2.2%	2.6%	0.6%	104.9	97.1
3.894	124.3	94.5%	2.9%	2.6%	0.0%	106.2	96.6
3.864	123.4	95.5%	1.9%	2.5%	0.1%	105.2	97.5
0.000	0.0	92.8%	4.5%	2.4%	0.3%	104.8	97.2
3.826	122.6	94.8%	2.1%	2.4%	0.6%	103.9	96.7
0.000	0.0	95.6%	1.6%	2.6%	0.2%	104.6	96.4
3.822	122.5	94.1%	3.4%	2.5%	0.1%	104.5	96.8
0.000	0.0	96.2%	0.8%	2.3%	0.8%	105.0	97.2
7.598	242.8	92.5%	4.3%	2.5%	0.7%	104.8	97.3
0.000	0.0	92.6%	4.8%	2.6%	0.1%	104.5	96.9
3.770	120.6	96.4%	0.7%	2.5%	0.4%	105.3	97.3
3.779	121.0	95.3%	1.7%	2.6%	0.4%	104.7	97.0
0.000	0.0	96.7%	0.5%	2.6%	0.3%	103.8	96.4
0.000	0.0	96.4%	0.1%	2.5%	0.9%	105.5	96.1
3.780	120.9	95.3%	1.4%	2.4%	1.0%	104.0	96.2
3.773	120.7	95.8%	1.3%	2.6%	0.3%	104.4	96.1
3.699	118.1	96.2%	1.2%	2.5%	0.1%	104.6	96.8
0.000	0.0	95.6%	1.8%	2.3%	0.2%	105.1	96.9

3.645	116.5	94.9%	2.1%	2.4%	0.5%	104.0	96.6
3.645	116.5	92.0%	5.4%	2.5%	0.1%	104.1	96.7
0.000	0.0	92.8%	3.7%	2.6%	0.9%	105.7	96.9
0.000	0.0	95.6%	1.8%	2.5%	0.2%	104.3	96.8
3.647	116.5	93.9%	3.5%	2.5%	0.1%	104.9	96.6
0.000	0.0	96.6%	0.7%	2.5%	0.2%	104.4	96.4
3.647	116.2	95.3%	2.1%	2.6%	0.1%	103.7	96.8
3.643	116.7	95.6%	1.9%	2.5%	0.1%	104.7	96.2
0.000	0.0	95.4%	2.0%	2.6%	0.1%	103.9	96.4
3.647	116.5	93.4%	3.8%	2.6%	0.2%	104.8	97.1
3.644	116.5	96.2%	0.1%	2.5%	1.2%	104.4	96.6
3.640	115.7	96.5%	0.3%	2.5%	0.6%	105.1	96.6
0.000	0.0	96.7%	0.2%	2.4%	0.8%	104.8	96.8
3.646	116.2	96.5%	1.1%	2.4%	0.0%	104.2	96.4
3.585	114.1	97.0%	0.1%	2.4%	0.5%	105.1	97.2
0.000	0.0	97.0%	0.2%	2.5%	0.3%	105.6	97.0
3.584	114.4	96.6%	0.1%	2.5%	0.9%	104.8	96.7
3.587	114.6	96.6%	0.1%	2.6%	0.7%	104.9	97.1
0.000	0.0	96.8%	0.2%	2.4%	0.6%	104.6	96.8
3.541	113.3	95.9%	1.4%	2.5%	0.1%	105.4	96.1
0.000	0.0	96.8%	0.0%	2.5%	0.6%	104.9	97.0
3.392	108.4	91.6%	5.7%	2.4%	0.3%	105.0	97.6
3.399	108.6	93.9%	3.5%	2.5%	0.1%	102.8	96.6
0.000	0.0	94.3%	3.3%	2.5%	0.0%	104.5	96.5
3.355	107.0	91.9%	5.6%	2.5%	0.0%	104.1	96.5
3.355	107.2	95.0%	2.5%	2.5%	0.0%	103.8	96.2
0.000	0.0	91.3%	6.2%	2.5%	0.0%	104.6	96.6
3.356	107.2	93.4%	4.0%	2.6%	0.0%	103.1	96.2
0.000	0.0	93.5%	4.0%	2.5%	0.0%	102.5	96.0
საშუალო		93.8%	3.4%	2.4%	0.3%	105.19	96.82

### 2.4.11. საწარმოო ექსპერიმენტი №11

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კევი 3/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 107.5 – 112.9 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/ საერთაშორისო 2/1 პროპორციით.

ცხრილი 23. ექსპერიმენტი №11

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.372	107.7	88.5%	9.0%	2.5%	0.0%	103.7	95.4
0.000	0.0	91.4%	6.4%	2.3%	0.0%	103.9	95.8
3.374	107.5	89.7%	8.0%	2.3%	0.0%	104.0	96.2
3.372	107.7	90.9%	6.9%	2.2%	0.0%	104.0	95.8
0.000	0.0	91.9%	5.9%	2.2%	0.0%	104.9	96.3
3.446	109.8	90.4%	7.3%	2.2%	0.1%	105.8	96.7
3.448	110.1	93.6%	4.2%	2.2%	0.0%	103.9	96.9
3.448	110.3	91.5%	6.1%	2.4%	0.0%	104.9	96.5
0.000	0.0	91.7%	5.8%	2.4%	0.1%	104.1	96.3
3.449	110.4	91.7%	5.7%	2.4%	0.3%	104.9	96.8
3.449	110.4	90.2%	7.4%	2.2%	0.2%	104.6	96.5
0.000	0.0	89.7%	7.7%	2.3%	0.3%	105.0	96.5
3.448	110.3	92.9%	5.3%	2.5%	0.3%	104.2	96.7
3.449	110.2	91.0%	6.6%	2.3%	0.1%	102.8	96.7
3.449	110.2	90.1%	7.0%	2.7%	0.2%	102.5	97.0
0.000	0.0	91.7%	5.8%	2.3%	0.2%	105.3	96.5
3.443	110.4	91.7%	5.8%	2.5%	0.1%	104.5	96.1
0.000	0.0	91.6%	5.8%	2.5%	0.0%	104.4	96.6
3.497	112.0	89.7%	7.7%	2.6%	0.0%	104.9	97.1
3.497	112.2	91.7%	5.7%	2.4%	0.1%	104.3	96.3
0.000	0.0	91.5%	5.6%	2.5%	0.4%	106.0	97.6
3.499	112.4	93.2%	3.7%	2.5%	0.6%	103.7	96.4
3.504	112.3	91.8%	5.6%	2.3%	0.2%	104.9	96.7
0.000	0.0	92.9%	4.0%	2.5%	0.6%	103.7	96.8
3.498	112.1	90.0%	7.3%	2.4%	0.2%	104.8	96.2
0.000	0.0	90.4%	7.2%	2.2%	0.1%	105.6	97.1
0.000	0.0	93.4%	4.1%	2.4%	0.1%	104.9	97.0
3.498	111.7	91.4%	6.3%	2.3%	0.0%	103.9	97.0
0.000	0.0	92.9%	4.2%	2.4%	0.5%	101.4	94.3
3.527	112.9	91.0%	6.4%	2.3%	0.2%	105.3	96.9
0.000	0.0	90.4%	6.9%	2.3%	0.4%	104.1	96.1
3.492	111.8	90.2%	7.1%	2.1%	0.6%	104.8	96.4
3.513	112.6	92.2%	5.2%	2.4%	0.2%	104.5	96.4
0.000	0.0	91.9%	5.5%	2.2%	0.3%	104.4	96.1
3.495	112.1	92.0%	5.8%	1.8%	0.4%	105.8	96.5
3.497	111.9	90.4%	6.8%	2.3%	0.5%	104.0	96.2
3.495	112.0	90.9%	6.6%	2.2%	0.3%	104.8	95.5
3.495	112.1	94.1%	3.1%	2.3%	0.4%	104.4	96.5
საშუალო		91.4%	6.1%	2.3%	0.2%	104.40	96.42

### 2.4.12 საწარმოო ექსპერიმენტი №12

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი 100%, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 112.0 – 112.3 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/ საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

ცხრილი 24. ექსპერიმენტი №12

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.494	112.3	91.0%	6.2%	2.4%	0.3%	105.2	96.2
0.000	0.0	92.5%	4.9%	2.3%	0.3%	104.0	96.5
3.493	112.0	90.9%	6.4%	2.4%	0.4%	104.3	96.2
3.499	112.1	91.4%	5.8%	2.3%	0.5%	104.3	96.4
0.000	0.0	89.8%	7.4%	1.6%	1.2%	103.9	96.4
საშუალო		91.1%	6.1%	2.2%	0.6%	104.36	96.33

### 2.4.13. საწარმოო ექსპერიმენტი №13

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კეკი 3/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 111.6 – 112.3 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/ საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

**ცხრილი 25. ექსპერიმენტი №13**

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლის წყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.497	111.6	91.3%	6.8%	1.7%	0.2%	104.8	96.1
0.000	0.0	92.3%	5.0%	2.3%	0.4%	104.2	96.5
3.495	111.9	92.3%	5.4%	2.4%	0.0%	103.9	96.1
0.000	0.0	90.5%	7.0%	2.5%	0.0%	105.5	96.5
3.502	112.3	92.6%	4.9%	2.4%	0.1%	105.2	95.9
3.497	111.8	93.7%	2.7%	2.4%	0.2%	104.8	96.1
3.494	111.8	95.4%	2.2%	2.4%	0.0%	104.9	96.1
საშუალო		92.6%	4.9%	2.3%	0.1%	104.76	96.19

**2.4.14. საწარმოო ექსპერიმენტი №14**

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 3/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი 100%, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 112.3 – 114.1 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

**ცხრილი 26. ექსპერიმენტი №14**

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
0.000	0.0	93.0%	4.7%	1.8%	0.5%	104.3	96.3
3.494	112.3	90.1%	6.9%	2.2%	0.9%	104.7	96.0
0.000	0.0	89.1%	8.3%	2.2%	0.4%	105.1	96.3
3.492	112.4	90.2%	7.4%	2.1%	0.3%	106.5	96.8
0.000	0.0	90.5%	6.8%	2.4%	0.3%	104.9	96.5
3.527	113.4	90.9%	5.9%	2.9%	0.3%	104.7	96.3
0.000	0.0	90.7%	6.9%	2.3%	0.2%	104.7	96.3
3.555	114.1	91.9%	5.4%	2.3%	0.4%	104.7	96.7
საშუალო		90.8%	6.5%	2.3%	0.4%	104.95	96.39



### 2.4.15 საწარმოო ექსპერიმენტი №15

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 5/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი 100%, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 113.8 – 117.7 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/ საერთაშორისო 3/1.

ცხრილი 27. ექსპერიმენტი №15

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.555	114.3	93.9%	3.4%	2.2%	0.5%	103.4	95.9
3.559	114.6	89.9%	7.1%	2.4%	0.6%	105.2	96.8
0.000	0.0	88.5%	8.8%	2.2%	0.5%	104.4	95.6
3.533	113.8	92.9%	4.1%	2.4%	0.6%	104.6	96.5
3.654	117.6	90.1%	6.9%	2.2%	0.8%	103.5	96.4
0.000	0.0	90.5%	6.1%	2.3%	1.1%	105.7	96.6
3.658	117.4	90.2%	7.1%	1.9%	0.8%	104.5	96.8
0.000	0.0	92.4%	3.9%	2.6%	1.1%	106.1	96.1
3.652	117.4	92.4%	5.2%	2.3%	0.1%	105.0	96.5
0.000	0.0	94.6%	2.2%	2.5%	0.7%	104.3	97.0
3.656	117.6	93.2%	4.0%	2.3%	0.5%	104.4	96.4
3.653	117.0	91.0%	6.3%	2.3%	0.5%	104.5	96.4
0.000	0.0	87.9%	6.8%	2.3%	3.1%	104.7	95.8
3.659	117.7	89.7%	6.2%	2.1%	2.0%	104.2	96.3
საშუალო		91.2%	5.6%	2.3%	0.9%	104.61	96.36

ცხრილი 28. ექსპერიმენტი №16, იგივე პროპორციები და 100% ალოქსიდი

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
0.000	0.0	93.4%	4.1%	2.3%	0.2%	104.2	96.6
3.656	117.0	92.6%	4.8%	2.5%	0.1%	105.1	96.2
3.657	117.2	95.5%	2.2%	2.4%	0.0%	105.4	96.3
0.000	0.0	94.9%	2.6%	2.3%	0.2%	104.7	96.2
3.653	117.7	90.9%	5.6%	2.3%	1.3%	107.1	96.5
3.655	117.6	89.7%	5.4%	2.4%	2.4%	102.4	96.6
საშუალო		92.8%	4.1%	2.4%	0.7%	104.81	96.41

## 2.4.16. საწარმოო ექსპერიმენტი №17

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 9/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი 100%, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 112.3–118.8 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/ საერთაშორისო 3/1 პროპორციით.

ცხრილი 29. ექსპერიმენტი №17

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
0.000	0.0	92.6%	4.6%	2.4%	0.4%	104.7	96.0
0.000	0.0	93.1%	3.8%	2.4%	0.7%	104.7	96.2
3.603	116.0	94.1%	2.1%	2.3%	1.5%	104.3	96.0
3.659	117.6	89.0%	7.0%	2.2%	1.7%	104.2	96.0
0.000	0.0	92.8%	3.4%	2.2%	1.6%	104.1	95.9
3.657	0.0	91.1%	5.1%	2.2%	1.6%	105.0	96.2
3.654	117.6	91.5%	4.6%	2.1%	1.7%	104.4	95.8
0.000	0.0	91.0%	5.2%	2.1%	1.7%	104.1	96.2
3.659	117.5	94.3%	2.4%	2.1%	1.2%	104.8	95.9
0.000	0.0	92.6%	4.1%	2.2%	1.1%	104.6	95.9
3.602	115.5	92.9%	3.5%	2.3%	1.3%	103.5	96.0
0.000	0.0	91.1%	5.4%	2.3%	1.2%	102.7	96.3
3.656	117.4	92.7%	4.7%	2.2%	0.3%	104.1	95.6
0.000	0.0	95.8%	1.2%	2.2%	0.8%	103.9	96.4
3.648	117.0	95.1%	1.7%	2.3%	0.9%	103.2	96.1
0.000	0.0	94.0%	2.8%	2.2%	1.1%	103.3	95.9
3.653	117.2	94.2%	2.8%	2.0%	1.0%	103.9	96.5
0.000	0.0	89.0%	7.7%	2.2%	1.1%	103.1	96.2
0.000	0.0	84.5%	12.3%	2.3%	0.9%	103.2	96.0
0.000	0.0	93.3%	3.3%	2.1%	1.3%	103.5	96.3
3.653	117.0	94.1%	2.9%	2.0%	1.1%	104.2	96.3
0.000	0.0	92.5%	4.3%	2.0%	1.2%	103.7	96.5
0.000	0.0	92.2%	4.5%	2.2%	1.2%	104.5	96.3
3.657	117.4	92.6%	4.3%	2.3%	0.8%	103.3	96.7
3.711	118.8	92.7%	3.8%	2.2%	1.3%	104.1	96.6
3.603	115.6	93.1%	4.2%	2.0%	0.8%	104.0	96.3
0.000	0.0	94.4%	2.5%	2.2%	0.9%	104.3	97.2
3.555	114.2	95.0%	1.1%	2.6%	1.4%	103.5	98.5
0.000	0.0	97.5%	0.2%	1.9%	0.5%	102.8	95.4
3.501	112.5	92.9%	2.4%	2.3%	1.3%		97.5

0.000	0.0	92.7%	3.6%	2.0%	1.7%	102.7	97.2
3.502	112.6	93.2%	2.5%	2.4%	2.0%	102.8	97.1
0.000	0.0	93.8%	2.4%	2.1%	1.7%	101.8	96.6
0.000	0.0	90.6%	5.8%	2.1%	1.6%	103.6	96.7
3.503	112.3	90.8%	5.0%	2.5%	1.7%	102.3	95.3
0.000	0.0	87.7%	8.2%	2.2%	2.0%	104.0	95.3
3.550	114.1	88.2%	7.5%	2.3%	2.0%	104.3	95.7
0.000	0.0	89.7%	6.1%	2.2%	2.0%	104.8	96.5
3.553	114.1	90.2%	5.6%	2.2%	2.1%	102.9	96.9
0.000	0.0	91.5%	5.5%	2.4%	0.7%	104.5	97.0
3.549	114.0	94.5%	2.2%	2.4%	0.9%	103.5	95.8
3.558	114.4	91.7%	4.7%	2.3%	1.3%	104.7	97.2
0.000	0.0	93.6%	3.1%	2.4%	0.9%	103.7	96.9
3.502	112.5	92.5%	4.4%	2.3%	0.9%	103.0	96.4
0.000	0.0	91.4%	5.5%	2.3%	0.9%	102.4	96.5
საშუალო		92.3%	4.2%	2.2%	1.2%	103.74	96.34

### 2.4.17 საწარმოო ექსპერიმენტი №18

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 9/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი 100%, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 109.3–116.6 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - საერთაშორისო 100%.

#### ცხრილი 30. ექსპერიმენტი №18

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO <sub>2</sub>	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.458	111.1	90.1%	6.4%	2.0%	1.6%	102.2	97.1
3.430	0.0	95.0%	1.3%	2.0%	1.8%	100.2	97.9
0.000	0.0	93.8%	2.6%	1.9%	1.7%	102.0	96.8
0.000	0.0	93.7%	2.0%	2.3%	2.0%	101.0	96.7
0.000	0.0	89.0%	6.4%	1.9%	0.7%	99.5	95.1
3.433	110.4	89.8%	5.2%	2.5%	2.5%	100.1	95.5
3.398	109.3	86.6%	7.3%	2.4%	3.7%		95.7
0.000	0.0	88.3%	6.5%	2.7%	2.6%	99.2	95.3
0.000	0.0	88.0%	7.3%	2.0%	2.8%	103.4	95.1
0.000	0.0	86.4%	8.9%	2.2%	2.5%	103.6	94.7
3.457	111.2	85.6%	10.0%	2.2%	2.3%	104.0	95.1
3.494	112.3	85.8%	9.8%	2.3%	2.0%	104.3	95.1
3.500	112.2	85.7%	10.1%	2.4%	1.8%	104.3	95.8

3.586	114.8	87.2%	8.9%	2.3%	1.6%	104.5	96.3
0.000	0.0	88.6%	7.8%	2.4%	1.2%	105.0	97.0
3.608	115.8	90.0%	6.4%	2.4%	1.2%	105.1	97.2
0.000	0.0	90.8%	5.6%	2.6%	1.0%	104.6	96.3
3.636	116.6	89.2%	7.4%	2.6%	0.9%	103.8	96.6
3.634	116.3	91.2%	5.3%	2.4%	1.0%	103.9	96.8
0.000	0.0	91.9%	4.5%	2.4%	1.1%	104.4	96.4
საშუალო		89.3%	6.5%	2.3%	1.8%	102.89	96.11

### 2.4.18 საწარმოო ექსპერიმენტი №19

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 9/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კეკი 4/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 113.8–117.3 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 1/3 პროპორციით.

#### ცხრილი 31. ექსპერიმენტი №19

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO2	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.645	117.0	88.8%	8.1%	2.6%	0.5%	104.9	96.6
3.655	117.2	93.0%	4.0%	2.4%	0.7%	105.8	95.4
0.000	0.0	94.7%	2.2%	2.8%	0.3%	106.4	95.5
3.649	117.3	93.0%	4.4%	2.6%	0.1%	105.4	96.4
0.000	0.0	94.7%	2.3%	2.8%	0.2%	105.8	95.9
3.654	117.3	93.2%	3.7%	2.4%	0.7%	105.8	95.3
3.656	117.2	85.5%	11.1%	2.6%	0.8%	105.8	95.7
0.000	0.0	87.6%	8.1%	2.5%	1.8%	106.4	96.2
3.656	117.3	93.1%	3.6%	2.4%	0.9%	107.8	95.7
3.653	117.0	90.0%	6.7%	2.5%	0.9%	106.2	96.3
3.647	117.2	90.3%	6.9%	2.4%	0.4%	105.0	96.4
0.000	0.0	94.2%	2.6%	2.4%	0.8%	106.8	95.6
3.653	117.2	91.5%	5.3%	2.4%	0.8%	106.2	95.8
0.000	0.0	92.2%	4.6%	2.5%	0.8%	105.6	96.4
3.634	116.3	86.8%	9.5%	2.6%	1.1%	107.5	95.3
0.000	0.0	92.4%	5.1%	2.3%	0.2%	104.8	96.5
3.654	116.6	85.7%	11.8%	2.4%	0.1%	106.5	96.1
3.656	0.0	91.4%	6.0%	2.7%	0.0%	106.2	96.6
0.000	0.0	89.4%	7.9%	2.6%	0.2%	108.2	97.0
3.585	114.7	92.8%	4.7%	2.4%	0.1%	105.7	95.8
3.554	114.0	91.0%	6.0%	2.6%	0.3%	107.3	96.1

3.552	113.8	88.3%	8.6%	2.4%	0.7%	105.4	95.9
0.000	0.0	90.1%	7.2%	2.6%	0.2%	105.1	95.8
საშუალო		90.9%	6.1%	2.5%	0.5%	106.11	96.01

### 2.4.19 საწარმოო ექსპერიმენტი №20

საწარმოო ექსპერიმენტი დაიწყო შემდეგი ნარევით: ალუმინის წყაროში - ალოქსიდის და ბოქსიტის 9/1 პროპორციების ნარევი, ესპანური რკინის ნამწვი/კვეცი 4/1, დედოფლისწყაროს კირქვა, სასხორის კირქვა ხარისხით დაგეგმილი ვარიაციით 112.6–117.5 კირქვის ჩაჯდომის კოეფიციენტით (LSF) ხოლო ნახშირი - ქართული/საერთაშორისო 2/3 პროპორციით.

#### ცხრილი 32. ექსპერიმენტი №20

სასხორის კირქვის საწყობი		სასხორის კირქვა	დედოფლისწყაროს კირქვა	რკინის ოქსიდის წყარო	ალუმინის ოქსიდის წყარო	ღუმელის კვება	კლინკერი
CaO/SiO <sub>2</sub>	LSF	%	%	%	%	LSF	LSF
3.552	113.8	90.8%	6.0%	2.8%	0.4%	105.5	95.8
3.537	113.2	85.6%	11.4%	2.7%	0.4%	104.9	96.8
3.513	112.6	90.1%	7.2%	2.6%	0.0%	104.9	96.2
0.000	0.0	91.9%	5.3%	2.6%	0.3%	105.1	97.5
3.604	115.6	96.9%	9.9%	2.7%	0.5%	105.4	97.4
0.000	0.0	89.8%	6.8%	2.6%	0.8%	104.6	96.4
3.598	115.3	85.5%	10.2%	2.7%	1.7%	105.6	96.1
3.637	116.4	89.4%	7.4%	2.7%	0.5%	105.5	96.2
0.000	0.0	93.1%	3.9%	2.6%	0.4%	105.2	96.7
3.624	116.0	90.7%	6.3%	2.6%	0.4%	106.0	97.1
0.000	0.0	94.1%	2.8%	2.8%	0.3%	105.6	96.8
0.000	0.0	90.7%	6.5%	2.6%	0.2%	104.9	96.4
0.000	0.0	92.1%	5.1%	2.7%	0.2%	104.3	96.9
3.655	116.5	94.1%	3.1%	2.7%	0.2%	105.3	97.2
0.000	0.0	85.2%	12.1%	2.4%	0.2%	104.7	96.6
3.639	116.4	94.2%	2.8%	2.6%	0.5%	104.9	96.3
3.651	116.8	90.8%	6.3%	2.5%	0.4%	104.7	97.1
3.643	116.8	92.4%	4.4%	2.5%	0.8%	104.7	96.8
0.000	0.0	92.0%	4.8%	2.3%	0.9%	103.9	96.5
3.657	117.1	91.8%	4.5%	2.6%	1.1%	105.1	96.0
3.669	117.5	86.6%	9.0%	2.4%	2.0%	105.0	96.4
0.000	0.0	88.4%	7.7%	2.5%	1.4%	104.2	95.6
საშუალო		90.7%	6.5%	2.6%	0.6%	104.99	96.57

## 2.4.20 ნედლეულის და საწვავის ნარევის ექსპერიმენტების დასკვნები და შედეგები

გამოწვის მეთოდის ცვლილება აუცილებელი იყო რათა კლინკერის წარმოება პასუხებდეს თანამედროვე მოთხოვნებს, შეამციროს თბური ხარჯი და იყოს კონკურენტული ბაზარზე.

გამოწვის მეთოდის და საწვავის ცვლილება დიდ გავლენას ახდენს მოსამზადებელი ნედლეული ფქვილის მიქსზე. რიგ შემთხვევაში აუცილებელი ხდება ნედლეული მასალის გამოცვლა ან დამატება.

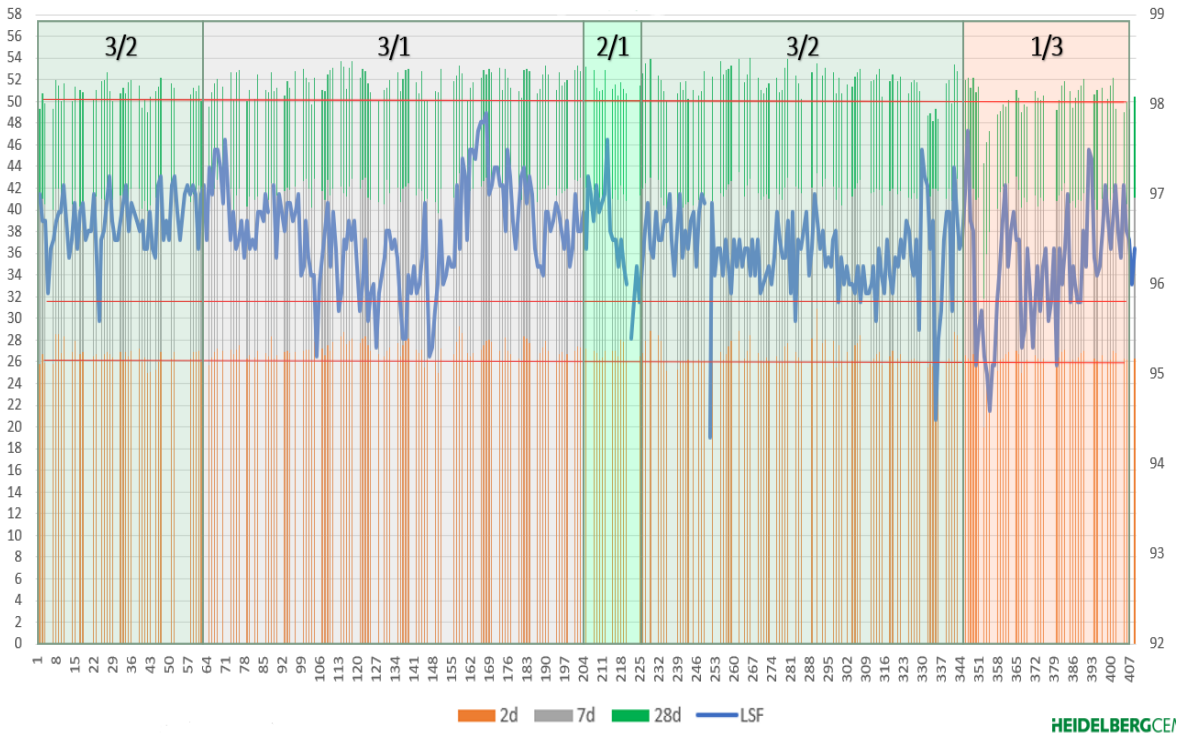
თანამედროვე გამოწვევების პირობებში აუცილებელია საწვავის და ნედლეულის ნარევის მუდმივი განახლება და თბური და მასალათა დანახარჯის ოპტიმიზაცია.

ბოქსიტის გამოყენებამ საშუალება მოგვცა დაბალი ხარისხის და ფასის ალუმინის კომპონენტი შეგვენარჩუნებინა მიქსში ისე, რომ დაფქვილი მასალის ხარისხი არის შენარჩუნებული სასურველი მახასიათებლებით.

აზერბაიჯანული კეკი საშუალებას იძლევა ჩაანაცვლოს ძვირად ღირებული რკინის ნამწვი გარკვეული პროპორციით.



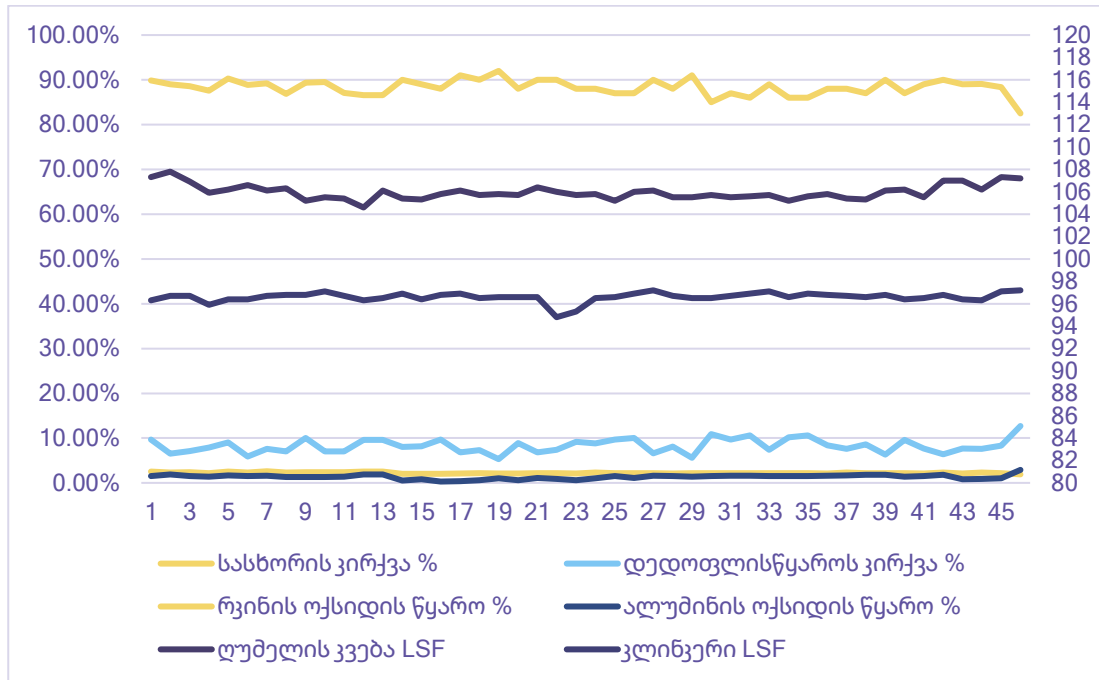
ნახაზი 1. ნედლეულის მასალების ხარჯები და მასალის ხარისხის შედარება



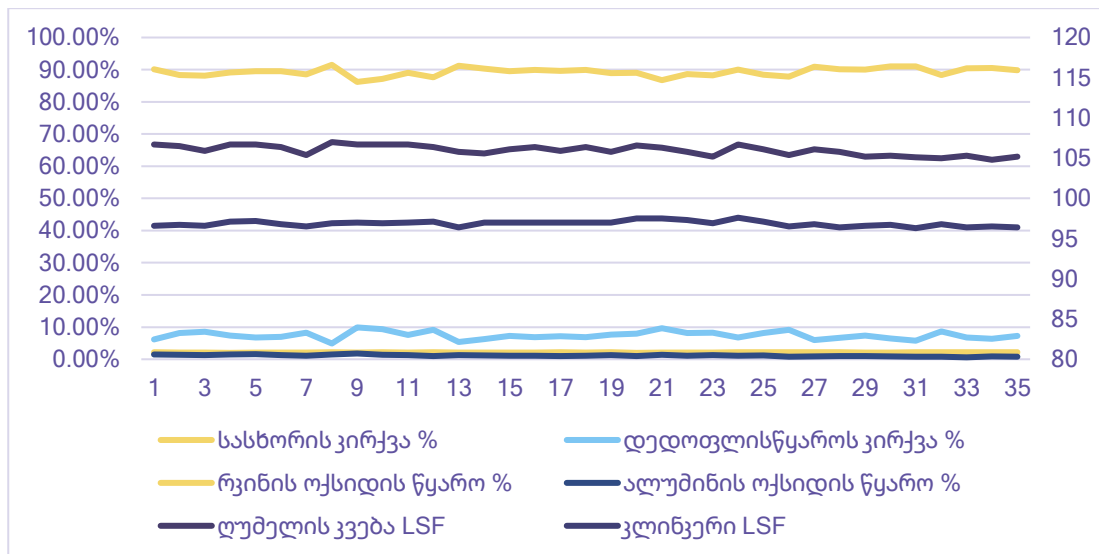
**ნახაზი 2. ნედლეულის მასალების ხარჯების და ხარისხის შედარება**

როგორც ზემოთ მოცემულ გრაფიკებზეა გამოსახული, ექსპერიმენტების გამვალობაში ნედლეული ნარევის გაჯერების კოეფიციენტი მერყეობდა 104-დან 107-მდე, თუმცა სასხორის კირქვის სხოლო კლინკერის კირის ჩაჯდომის კოეფიციენტი სტაბილურად 96-96.5 იყო. ამასთანავე განსხვავდებოდა ნედლეული მასალის ხარჯი და კლინკერის აქტიურობა ანუ სიმტკიცე. მაღალი კირის ჩაჯდომის კოეფიციენტის მქონე ნედლეული ნარევის გამოსაწვავად შესაბამისად უფრო დიდი თერმული ენერჯიაა საჭირო, მაგრამ ამათანავე გაცილებით მეტი CO<sub>2</sub>-ის ემისია გამოიყოფა არა მხოლოდ მომატებული თერმული ხარჯის გამო, არამედ მეტი კირქვის მინერალის (CaCO<sub>3</sub>) გაზრდილი რაოდენობის და მისი დეკომპოზიციისას გამოყოფილი CO<sub>2</sub>-ის გამო. შესაბამისად ყველაზე დიდი ეკონომიურ და ეკოლოგიურ ეფექტს იძლეოდა ექსპერიმენტი, რომელშიც ნედლეული ნარევის გაჯერების კოეფიციენტი იყო ყველაზე დაბალი მაგრამ კლინკერის აქტიურობა ანუ სიმტკიცე იყო შედარებით მაღალი.

## 2.4.21 საწარმოო ექსპერიმენტების გრაფიკული გამოსახულება



ნახაზი 3. საწარმოო ექსპერიმენტი №1

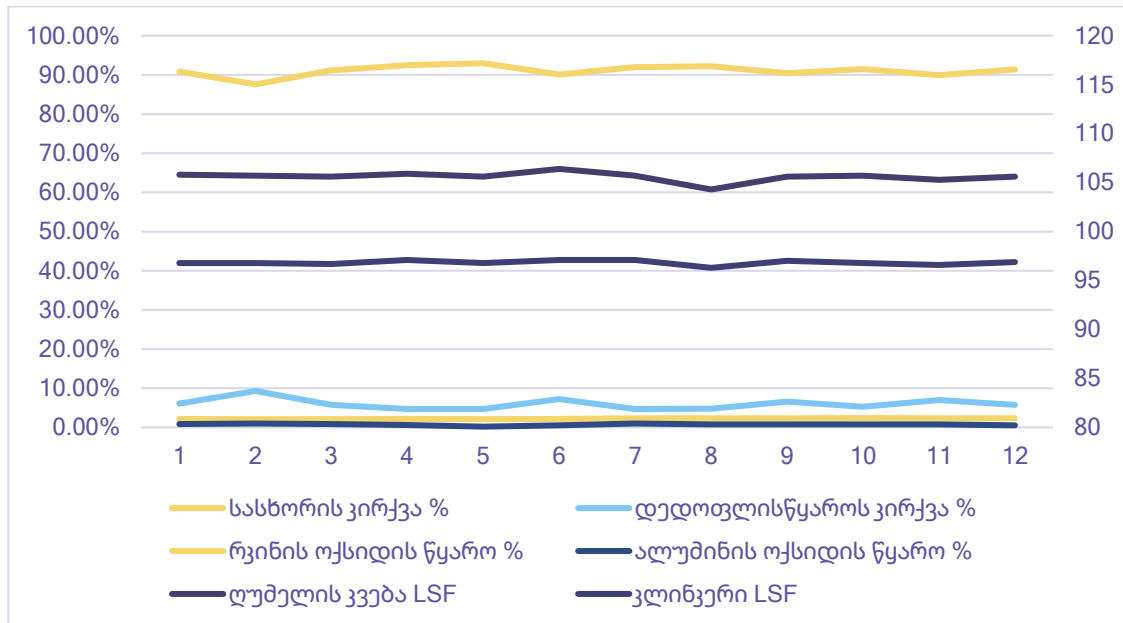


ნახაზი 4. საწარმოო ექსპერიმენტი №2

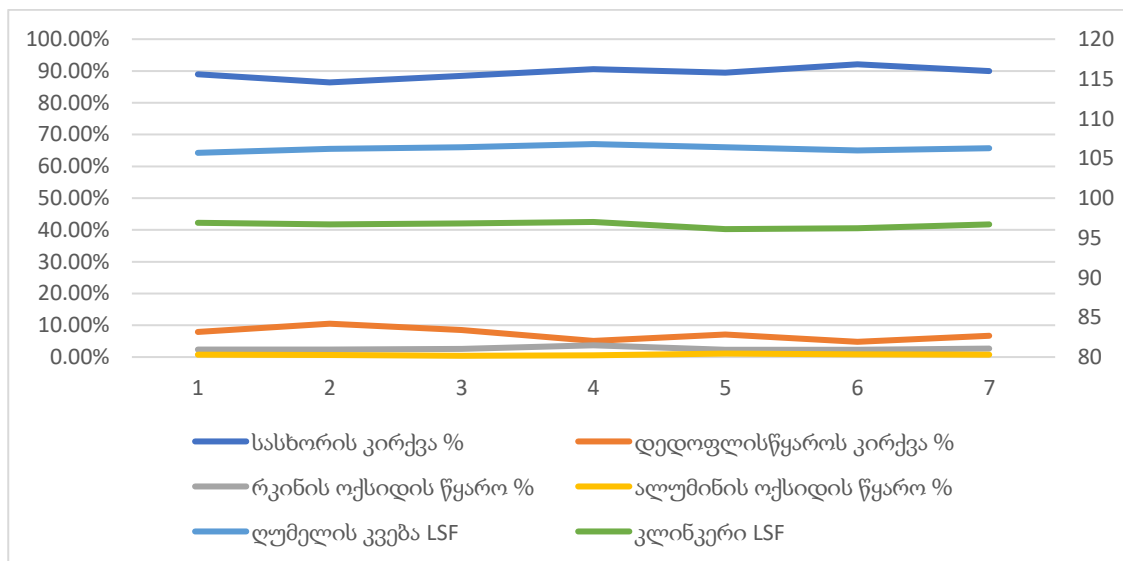
მე-3 და მე-4 ნახაზებზე მოცემულია პირველი და მეორე ექსპერიმენტის ნედლეული ნარევის ხარჯები და კირის ჩაჯდომის (LSF) კოეფიციენტი კლინკერის კირის ჩაჯდომის (LSF) კოეფიციენტთან მიმართებაში. აღნიშნული მონაცემებიდან კეთდება დასკვნა, რომ ექსპერიმენტი სტაბილური იყო და მეორე ექსპერიმენტზე მოხერხდა დედოფლისწყაროს კირქვის ხარჯის შემცირება, რაც იძლევა



ეკომონიურ ეფექტს, რადგან ის სასხორის კირქვასთან შედარებით ორჯერ ძვირი ჯდება.



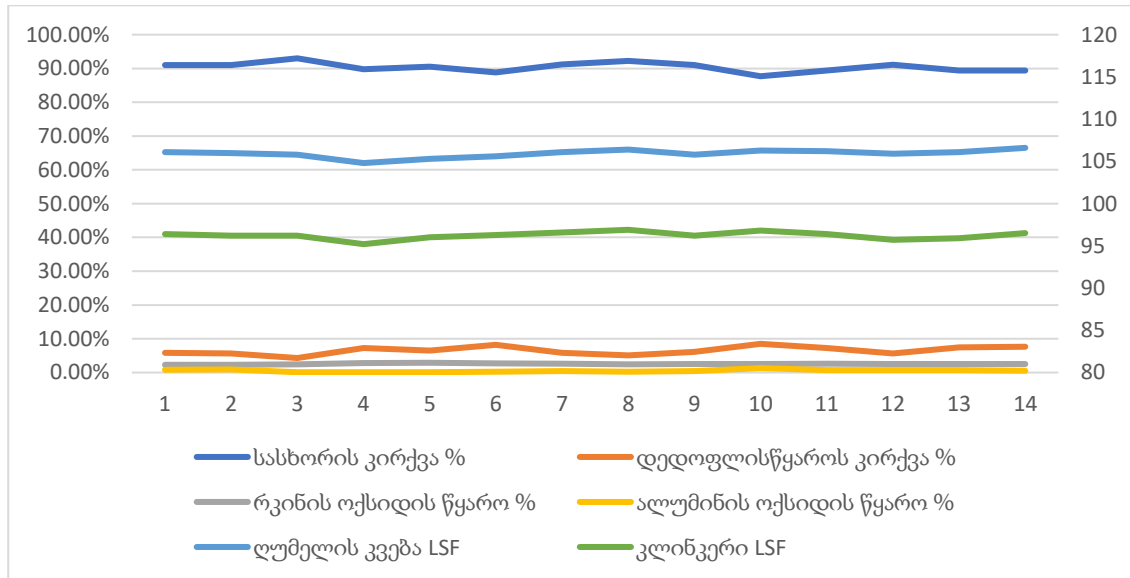
ნახაზი 5. საწარმოო ექსპერიმენტი №3



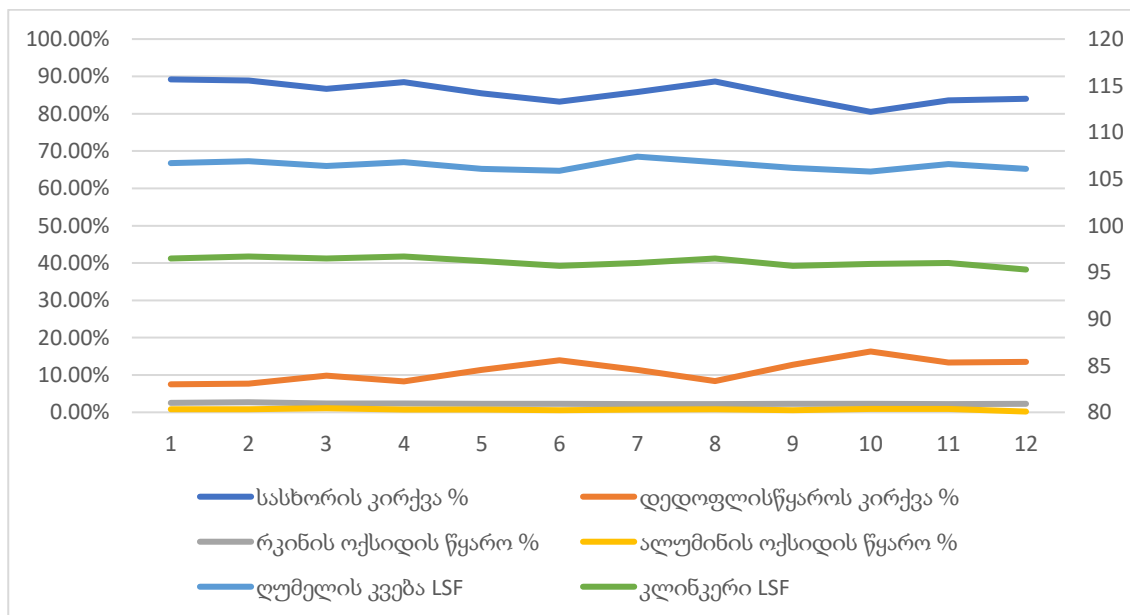
ნახაზი 6. საწარმოო ექსპერიმენტი №4

მე-5 და მე-6 ნახაზებზე მოცემულია მესამე და მეოთხე ექსპერიმენტის ნედლეული ნარევის ხარჯები და კირის ჩაჯდომის (LSF) კოეფიციენტი კლინკერის კირის ჩაჯდომის (LSF) კოეფიციენტთან მიმართებაში. აღნიშნული მონაცემებიდან დგინდება, რომ ექსპერიმენტი სტაბილური იყო და მე-3, მე-4 ექსპერიმენტებზე მოხერხდა დედოფლისწყაროს კირქვის ხარჯის კიდევ უფრო მეტად შემცირება. ხარჯვითი ნაწილი გაცილებით გაუმჯობესდა იგივე ხარისხის მასალის მიღებით.

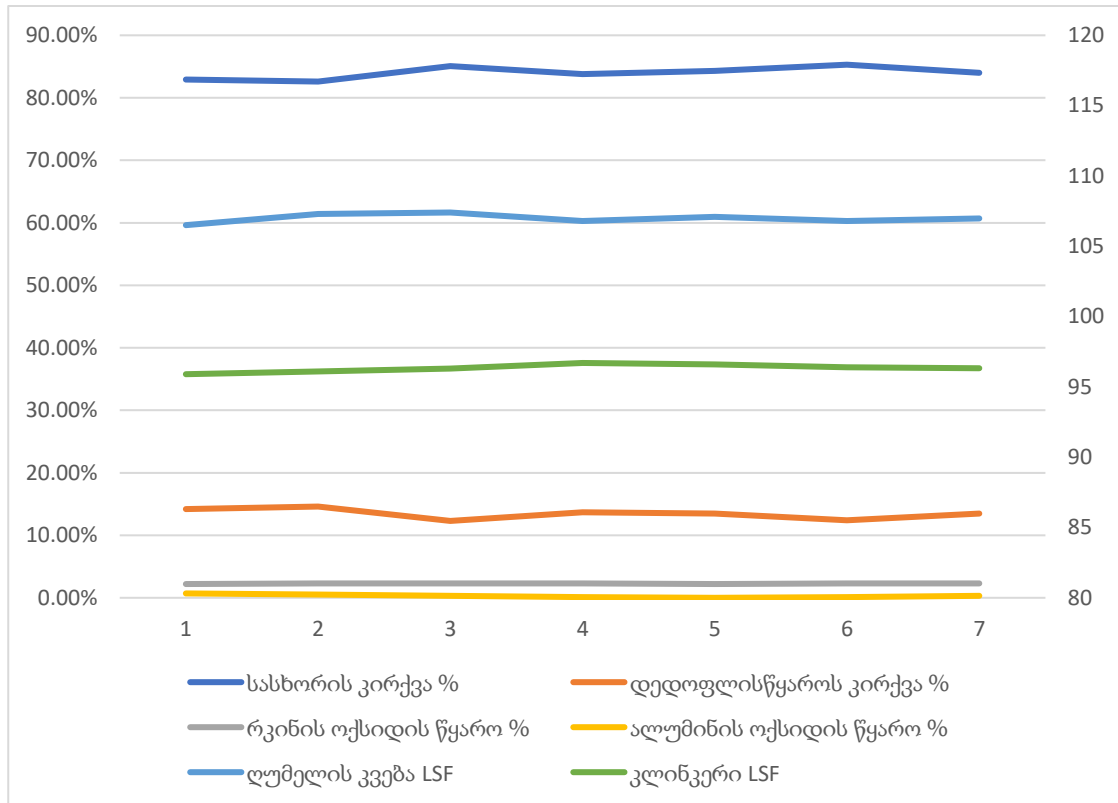
მე-7 და მე-8 ნახაზებზე მოცემულია მე-5 და მე-6 ექსპერიმენტის ნედლეული ნარევის ხარჯები და კირის ჩაჯდომის (LSF) კოეფიციენტი კლინკერის კირის ჩაჯდომის (LSF) კოეფიციენტთან მიმართებაში. აღნიშნული მონაცემებიდან დგინდება, რომ ექსპერიმენტი სტაბილური იყო, მაგრამ შედარებით გაზრდილია დედოფლის წყაროს კირქვის ხარჯი



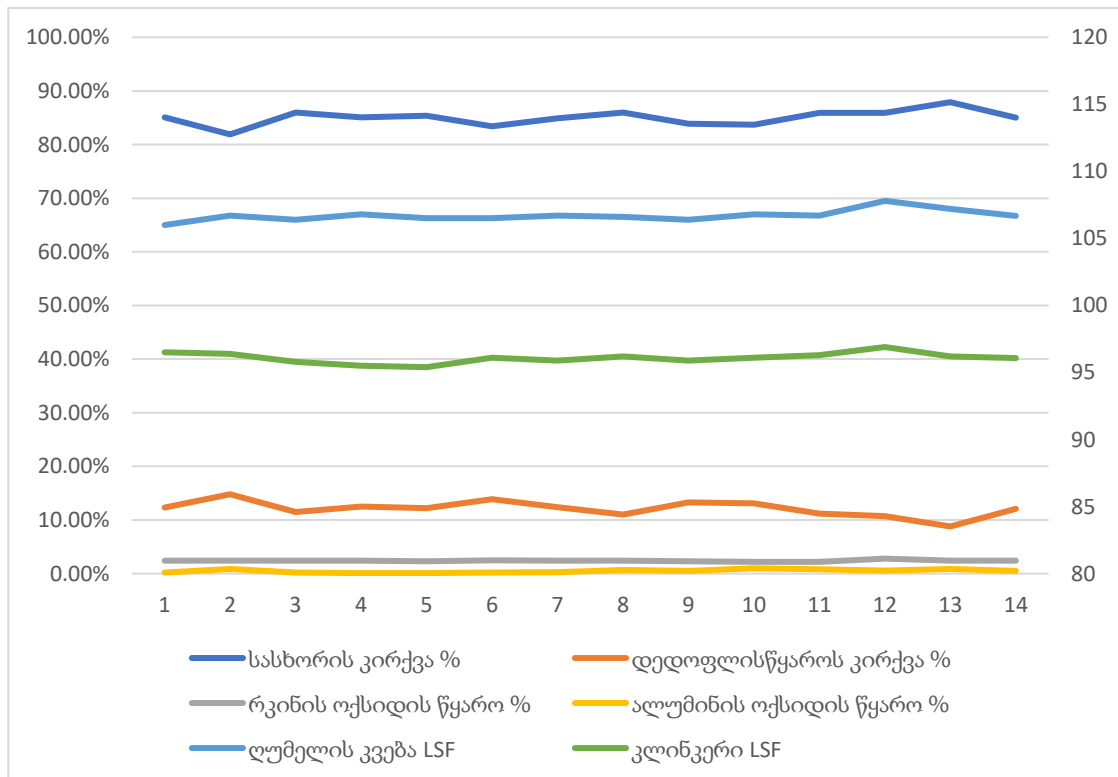
ნახაზი 7. საწარმოო ექსპერიმენტი №5



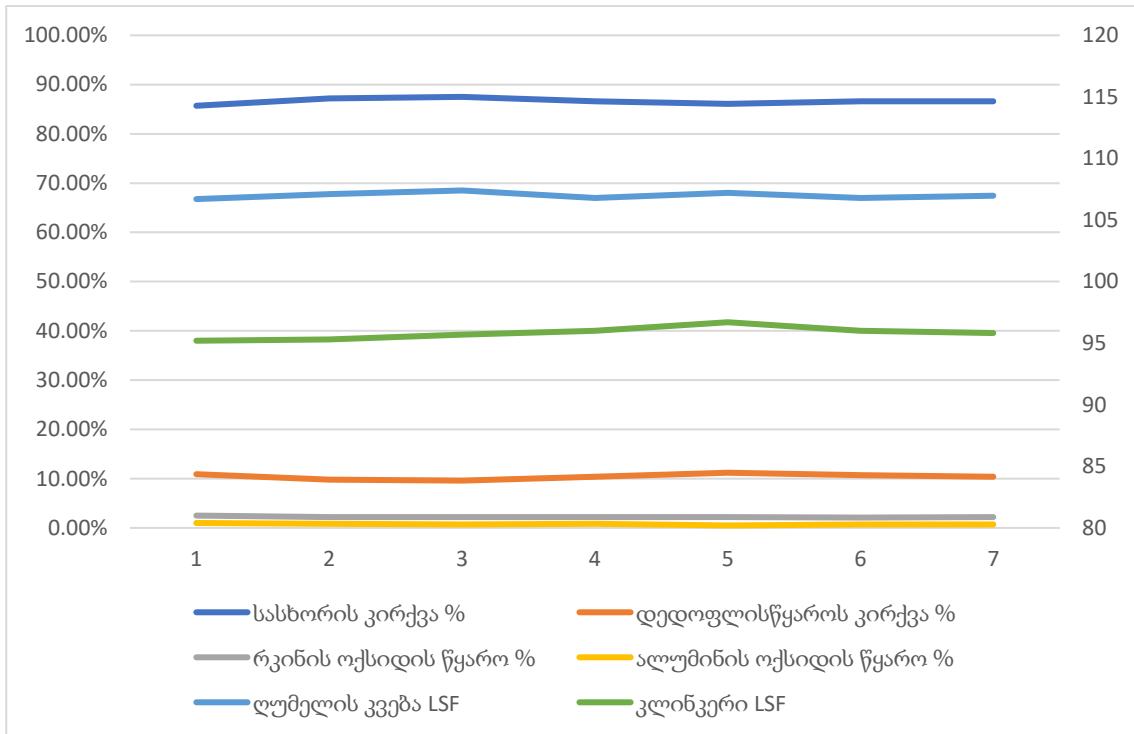
ნახაზი 8. საწარმოო ექსპერიმენტი №6



ნახაზი 9. საწარმოო ექსპერიმენტი №7

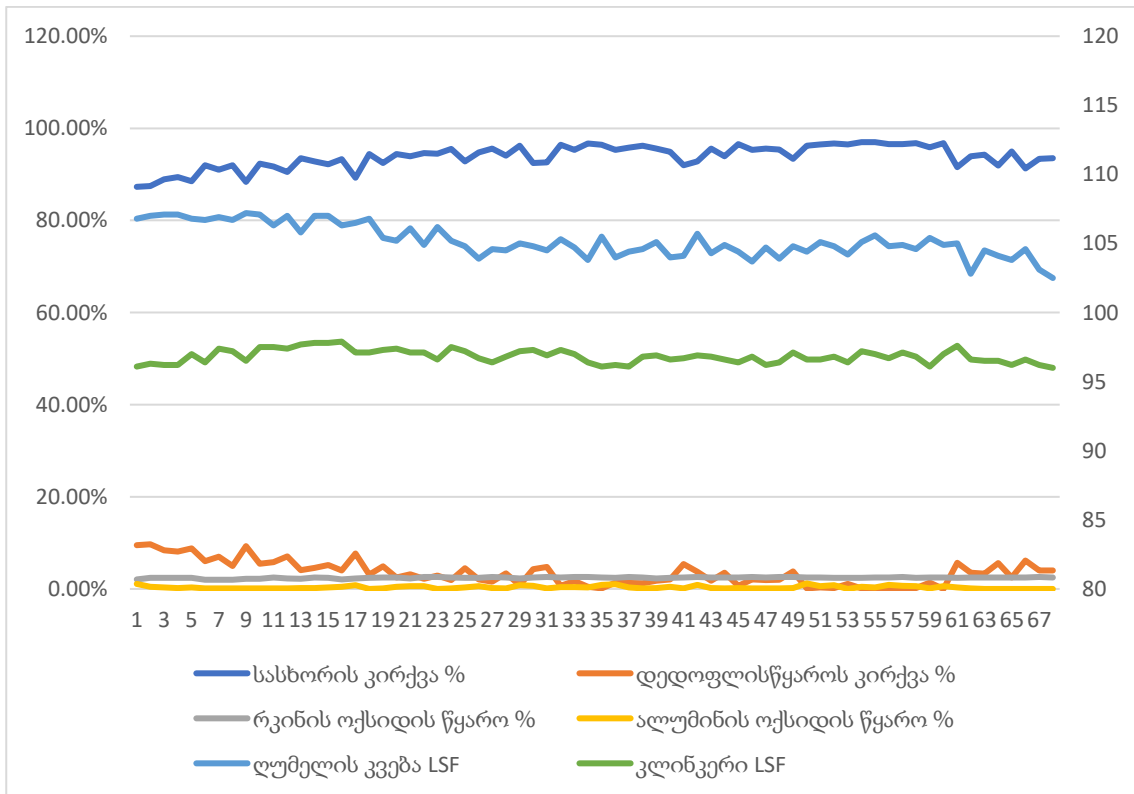


ნახაზი 10. საწარმოო ექსპერიმენტი №8

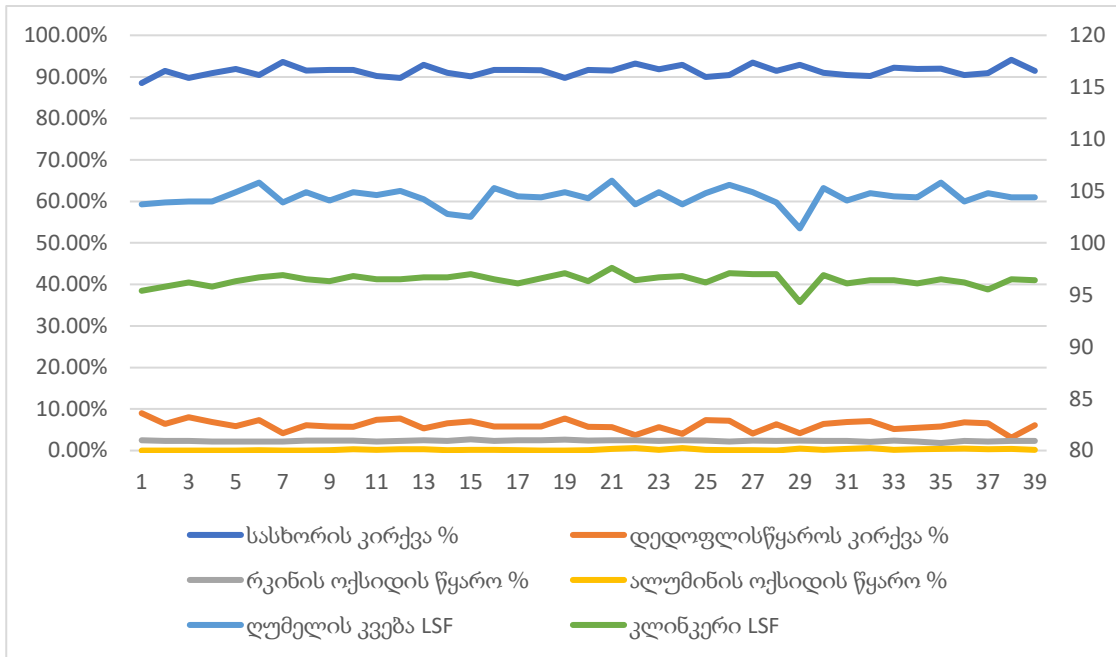


**ნახაზი 11. საწარმოო ექსპერიმენტი №9**

მე-7, მე-8 და მე-9 ხარჯები და ხარისხი თითქმის იგივე პროპორციებით ნაწილდებოდა და რადიკალური ცვლილებები არ ჩანდა ხარჯის და ხარისხის მხრივ.

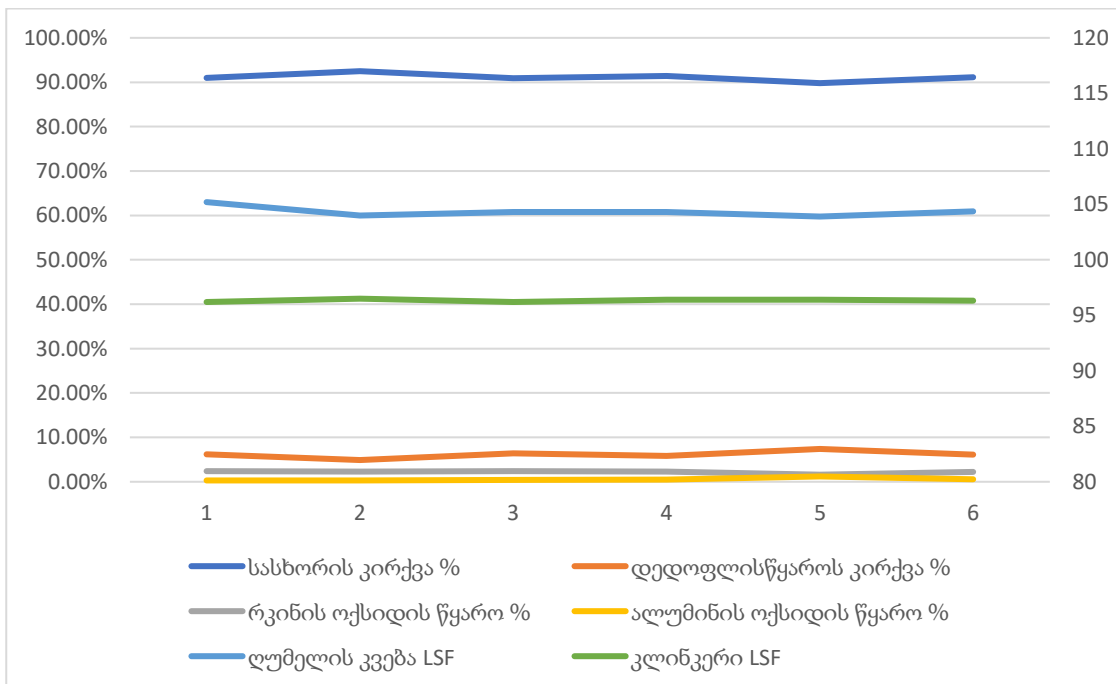


**ნახაზი 12. საწარმოო ექსპერიმენტი №10**

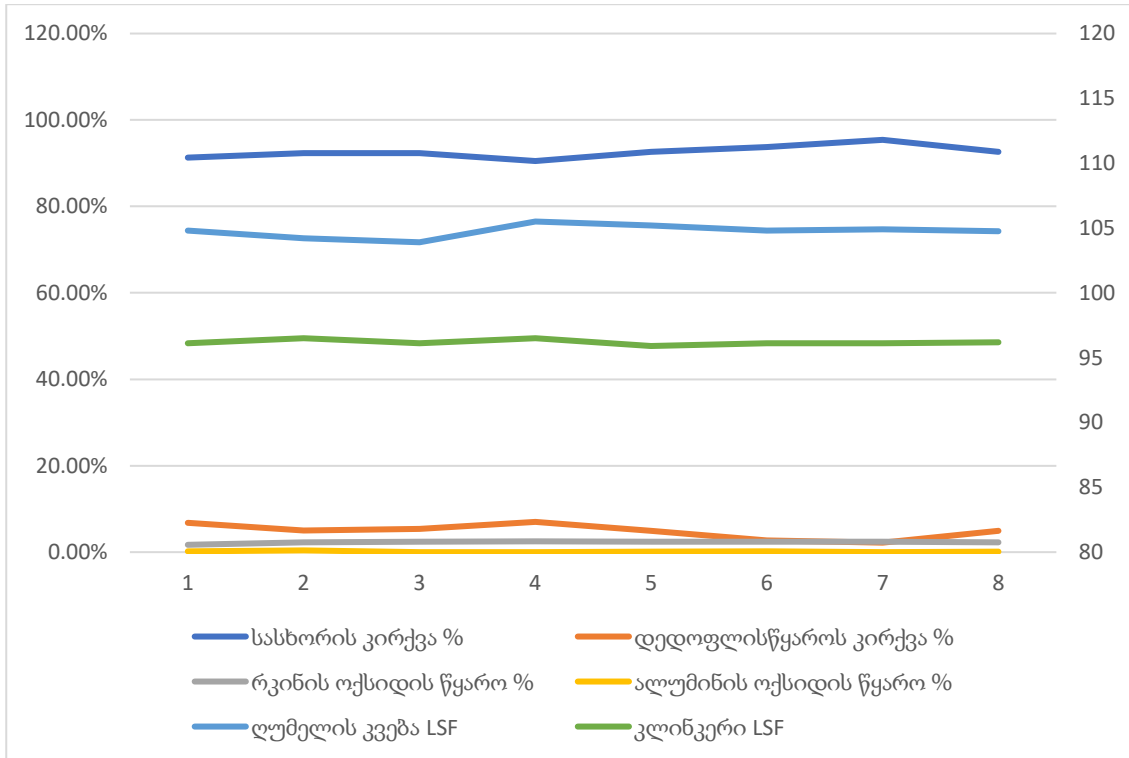


**ნახაზი 13. საწარმოო ექსპერიმენტი №11**

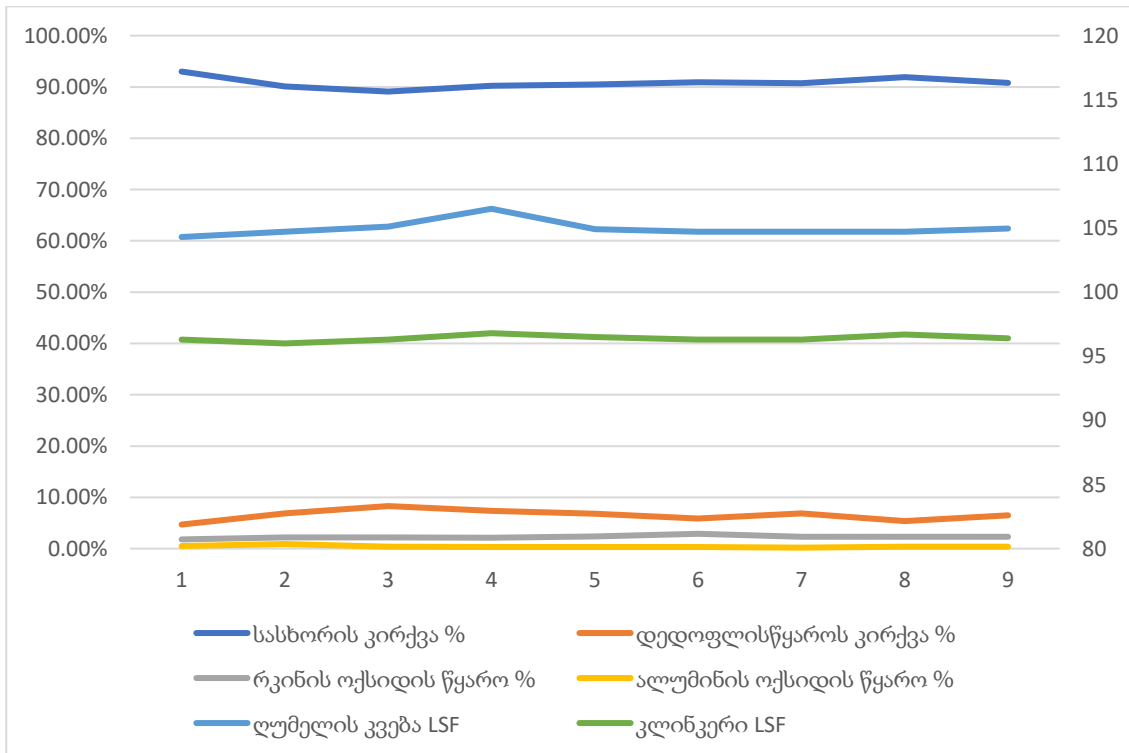
მე-10 და მე-11 ცდისას გამოყენებულ იქნა რკინის ნამწვის და რკინის კეკის მიქსი 3/1-თან ფარდობით აღნიშნული ნედლეული მასალის გამოყენება ამ პროპორციით ყველა პარამეტრზე დადებითად აისახა და საგრძნობლად შეიამცირა როგორც დედოფლისწყაროს კირქვის ხარჯი ასევე კრინის ოქსიდის საერთო ღირებულება, ამასთანავე ის დადებითად აისახა მბრუნავი ლუმელის პროცესსა და წარმოებული კლინკერის ხარისხზე.



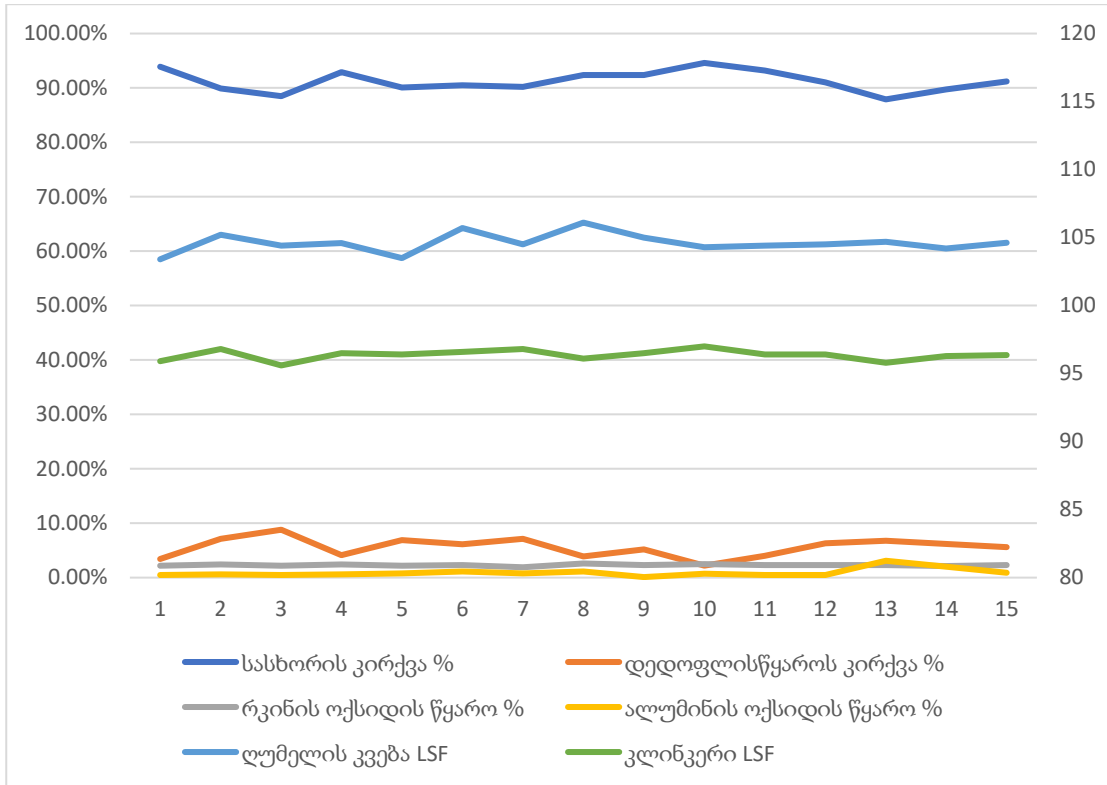
**ნახაზი 14. საწარმოო ექსპერიმენტი №12**



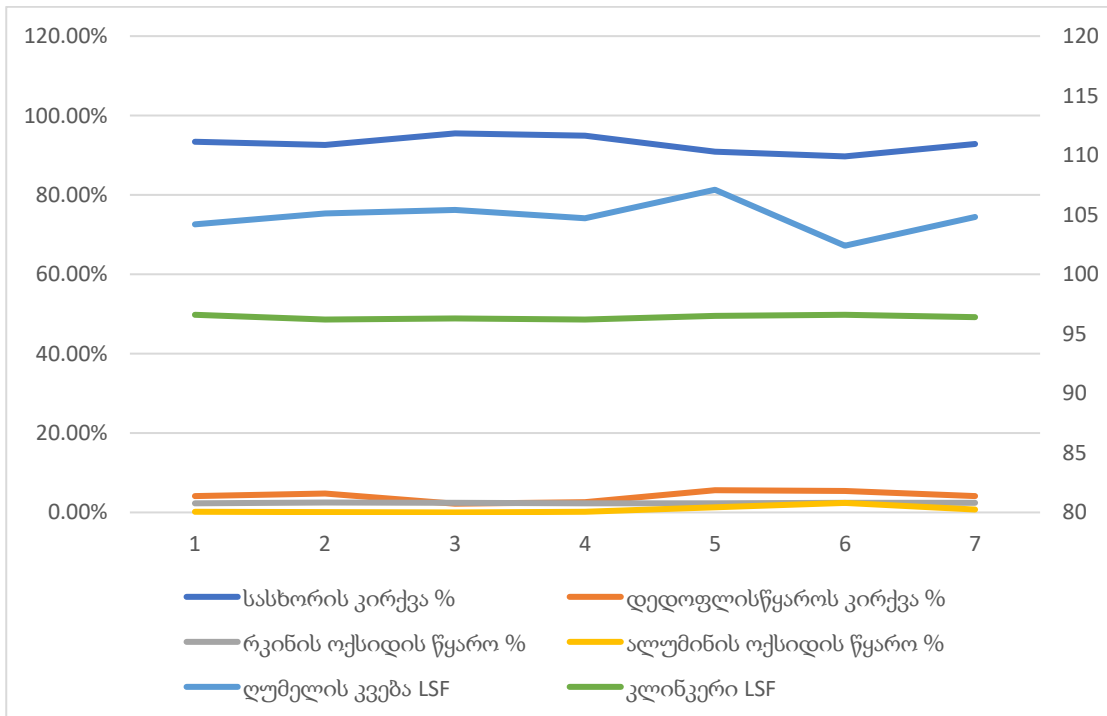
ნახაზი 15. საწარმოო ექსპერიმენტი №13



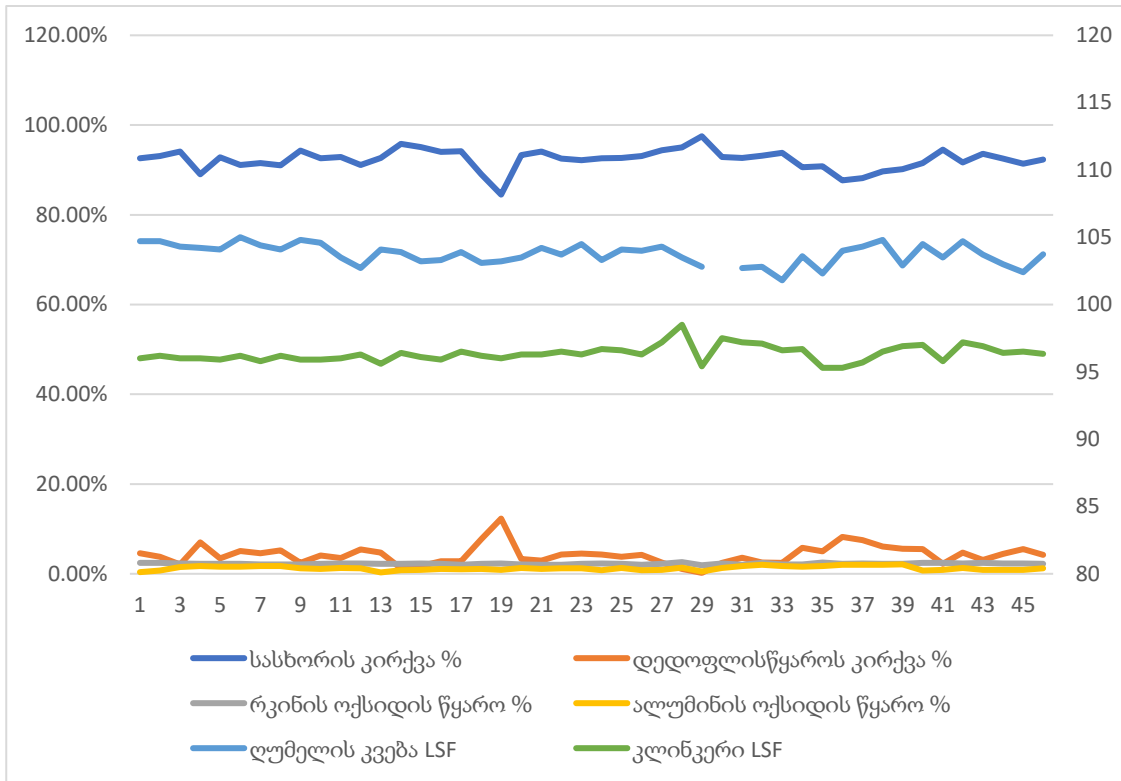
ნახაზი 16. საწარმოო ექსპერიმენტი №14



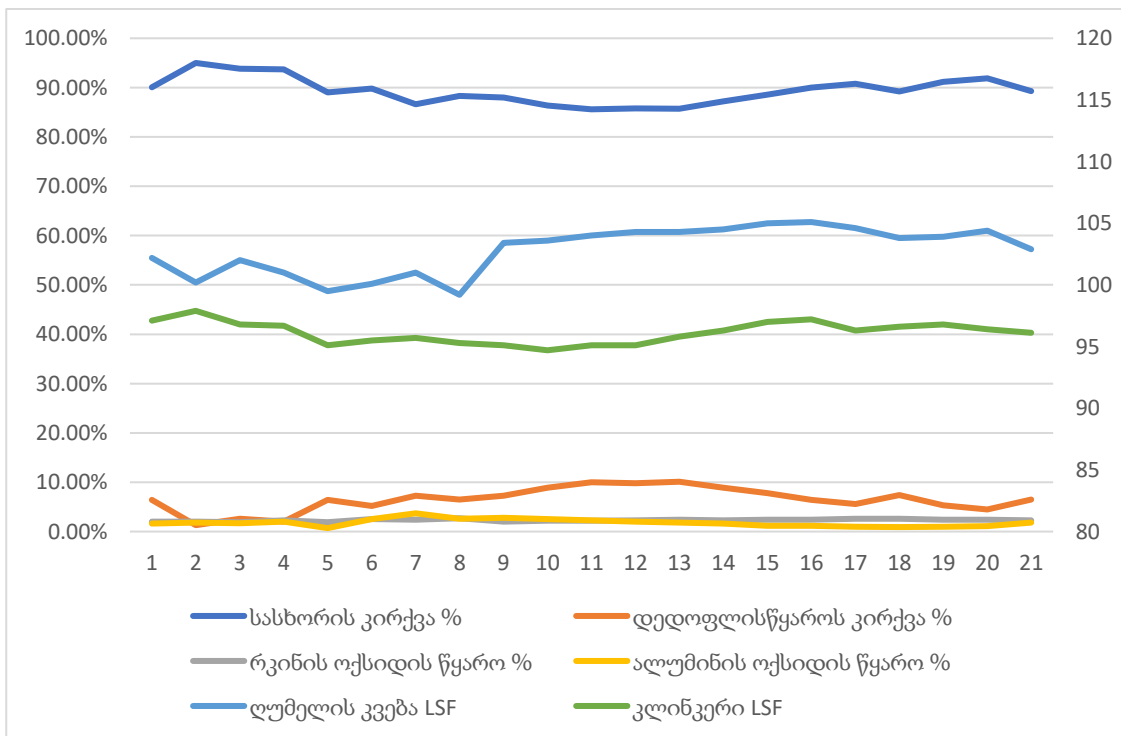
ნახაზი 17. საწარმოო ექსპერიმენტი №15



ნახაზი 18. საწარმოო ექსპერიმენტი №16

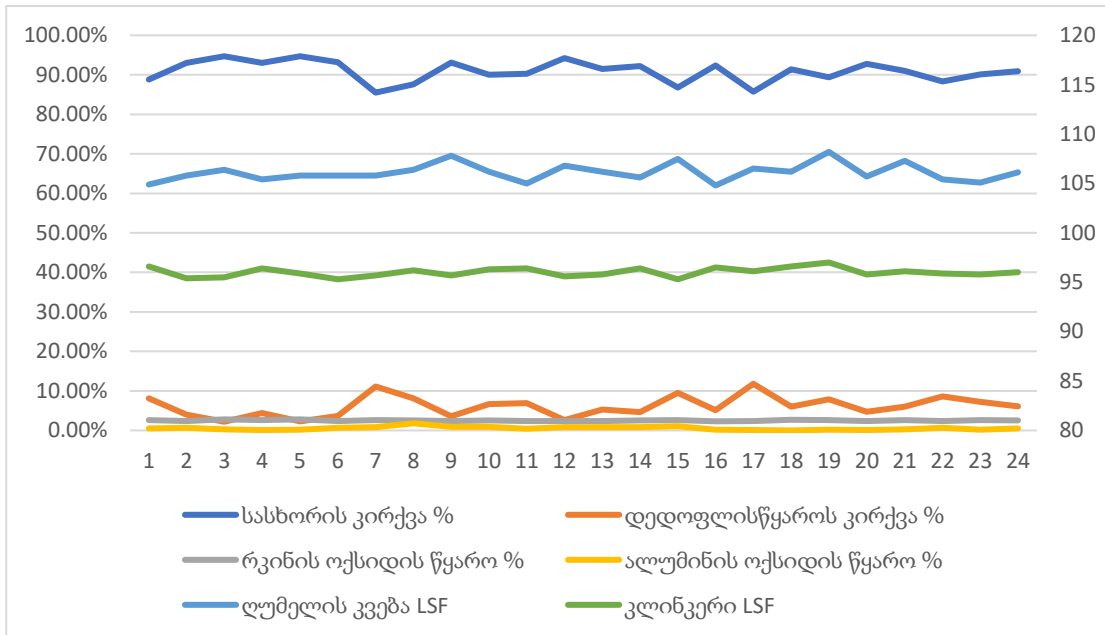


ნახაზი 19. საწარმოო ექსპერიმენტი №17

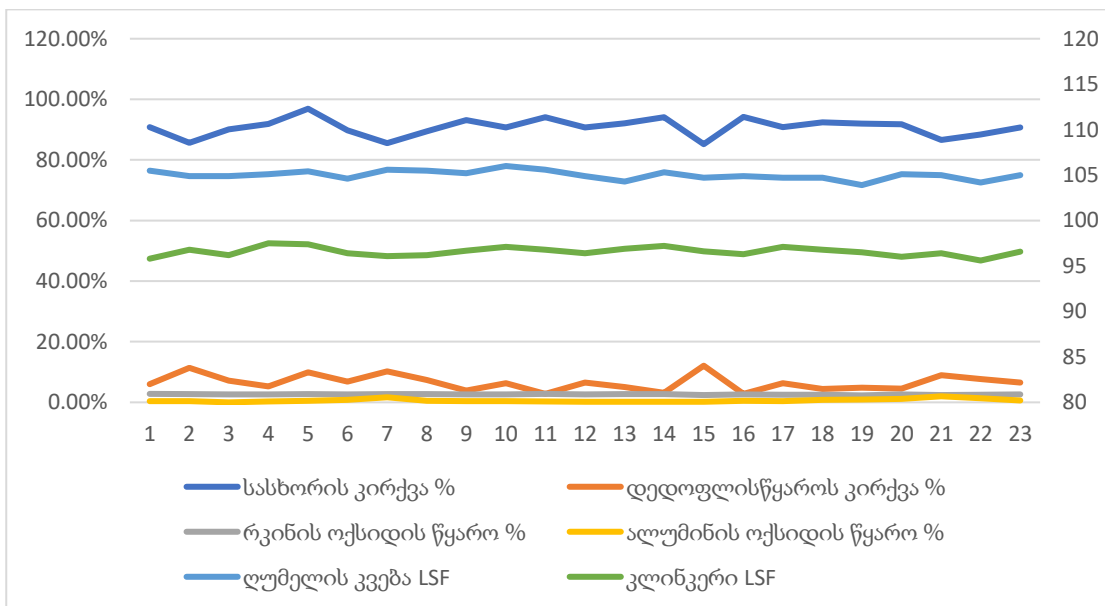


ნახაზი 20. საწარმოო ექსპერიმენტი №18





ნახაზი 21. საწარმოო ექსპერიმენტი №19

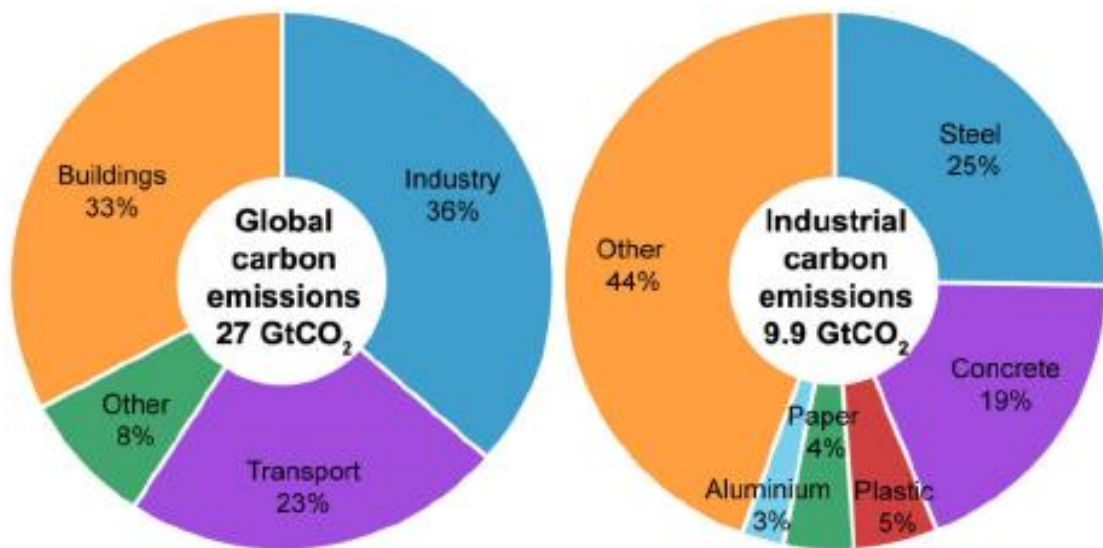


ნახაზი 22. საწარმოო ექსპერიმენტი №20

ჩატარებული ექსპერიმენტებიდან დადგინდა, რომ კეკის 30%-იანი მიქსი რკინის ნამწვთან იძლეოდა საუკეთესო შედეგს ქართული და საერთაშორისო ნახშირების მიქსთან ერთად, რადგან ამ დროს ნედლეული ნარევის მიქსი იყო ყველაზე დაბალი კირის გაჯერების კოეფიციენტით, ხოლო კლინკერის ხარისხი და აქტივობა იგივე ან შედარებით მაღალი ფიქსირდებოდა.

## 2.5. ტუფით კლინკერის ჩანაცვლების მნიშვნელობა

თანამედროვე პირობებში CO<sub>2</sub>-ის გამონაბოლქვის შემცირება უმნიშვნელოვანესი საკითხი გახდა ცემენტის და ნებისმიერი სხვა ინდუსტრიული მასშტაბის წარმოებისთვის. ამჟამად ითვლება, რომ CO<sub>2</sub>-ის გლობალური წარმოშობის 36% მოდის ინდუსტრიულ სექტორზე, ხოლო ამ სექტორის 19% კი ბეტონის, ანუ კლინკერით და ცემენტით შექმნილი საბოლოო პროდუქტის, წილია.



სურათი 14. CO<sub>2</sub>-ის ემისიის გლობალური და ინდუსტრიული წლიური მონაცემი

კლინკერიზაციის პროცესი არის CO<sub>2</sub>-ის ყველაზე დიდი წარმომქმნელი, მაგრამ ასევე ცემენტში ყველაზე დიდი წილი კლინკერს უჭირავს (ყველა ტიპის ცემენტის წარმოებაში საქართველოში საშუალოდ 80% კლინკერი გვჭირდება), შესაბამისად გამოდის, რომ ცემენტის საწარმოებლად ვუშვებთ კლინკერს, რომელიც CO<sub>2</sub>-ის გამონაბოლქვის ძირითადი წყაროა. კლინკერის წილის შემცირება სტანდარტულ პირობებში იწვევს ცემენტის მარკიანობის ანუ სიმტკიცის შემცირებას. იმისათვის რათა ცემენტის ხარისხი შეესაბამებოდეს თანამედროვე სტანდარტებს აუცილებელია კლინკერის ზემოთ ხსენებული პროცენტულობა შევინარჩუნოთ. [64-67]

ცხრილი 33. ცემენტის ტიპები EN 197-1-ის მიხედვით

Main types	Notation of the 27 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass <sup>3</sup> )										Minor additional constituents		
			Main constituents												
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone				
K	S	D <sup>b</sup>	natural P	natural calcined Q	siliceous V	calcareous W	T	L	LL						
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-pozzolana cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
CEM II/B-LL		65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
Portland-composite cement <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-94	←----- 6-20 ----->									0-5			
	CEM II/B-M	65-79	←----- 21-35 ----->									0-5			
CEM III	Blastfurnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Pozzolanic cement <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5		
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5		
CEM V	Composite cement <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 ----->		-	-	-	-	-	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←----- 31-50 ----->		-	-	-	-	-	0-5		

კლინკერის წილის შემცირება მხოლოდ იმ პირობებში იქნებოდა შესაძლებელი, ცემენტის სიმტკიცის დაკლების გარეშე, რომ თვითონ კლინკერი ან დანამატი იყოს გაცილებით მეტი აქტიურობის და შესაბამისად მეტი სიმტკიცის მატარებელი. კლინკერის გააქტიურება და მასზე ნაკლები თბური დანახარჯის გაწევა განხილულ იქნა ზედა ქვეთავებში, რომელის გავლენის მასშტაბი კლინკერზე არის დაახლოებით 2%-მდე, ხოლო დანამატის გააქტიურება და ამით ცემენტის სიმტკიცის გაზრდა შედარებით უფრო დიდ გავლენას მოახდენს საერთო ცემენტის დანახარჯებსა და ხარისხზე.

### 2.5.1. ტუფის აქტივაცია - ლაბორატორიული ექსპერიმენტი

აღნიშნული გამოწვევების გამო გამონაბოლქვსა და კლინკერის გამოწვისას სხვა ძვირადღირებული ხარჯების გათვალისწინებით, დიდი ხანია მიმდინარეობს კლინკერის სრულად ან ნაწილობრივ ჩამნაცვლებელი სხვადასხვა მასალების ძიება და მათზე ექსპერიმენტები. სადოქტორო კვლევის მიზანი იყო მოგვეძებნა გამოსავალი და შესაძლებლობის ფარგლებში ნაწილობრივ ჩაგვენაცვლებინა კლინკერი დანამატით. სტანდარტულად აღნიშნა, რომ კლინკერის ჩანაცვლება იწვევს ცემენტის სიმტკიცის კლებას, მაგრამ არსებული ხელმისაწვდომი და ნედლი დანამატებით ჩანაცვლება იგულისხმება. ამიტომ თუ გვინდა კლინკერის მაგივრად დანამატის გარკვეული რაოდენობა ჩავანაცვლოთ ცემენტში, აუცილებელია დანამატის წინასწარი გააქტიურება.

პუცოლანური დანამატის გააქტიურება შესაძლებელია თერმულად. ამ მიზნით ჰაიდელბერგცემენტის ლაბორატორიაში ჩატარდა ცდები, სადაც პუცოლანური დანამატი გახურებულ იქნა სხვადასხვა ტემპერატურებზე და შესადარებელი კლინკერთან ერთად დაიფქვა სხვადასხვა პროპორციებით.

აღნიშნული ექსპერიმენტისთვის გამოყენებულ იქნა პუცოლანური მასალა ტუფი 2 სხვადასხვა ლოკაციიდან რომელებც კასპის ცემენტის ქარხანასთან ახლოს მდებარეობს, ხეკორძულას ტუფის კარიერი კასპის ქარხნის აღმოსავლეთით, ხოლო ხანდაკის ტუფის დასავლეთით.

ქვედა ცხრილში მოცემულია ტუფის ქიმიური ანალიზი, რომელიც განისაზღვრა XRF-ის მეშვეობით:

**ცხრილი 34. ნედლი ტუფის ქიმიური შემადგენლობა**

ტუფის ქიმიური შემადგენლობა	ხ.დ.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	ჯამი
სინჯი №1	14.76	59.60	14.98	1.4	5.39	1.27	0.40	0.52	1.04	0.01	99.37
სინჯი №2	12.69	58.60	13.48	2.48	6.97	1.12	0.37	2.26	1.55	0.01	99.53
სინჯი №3	12.72	57.58	15.75	2.43	4.63	1.08	0.36	2.85	1.84	0.02	99.26
სინჯი №4	13.68	51.96	18.7	2.96	6.51	1.32	0.34	2.12	1.29	0.01	98.89

ასევე მოხდა XRD ანალიზით ტუფის მინერალოგიური შემადგენლობის განსაზღვრა:

**ცხრილი 35. ნედლი ტუფის მინერალოგიური შემადგენლობა**

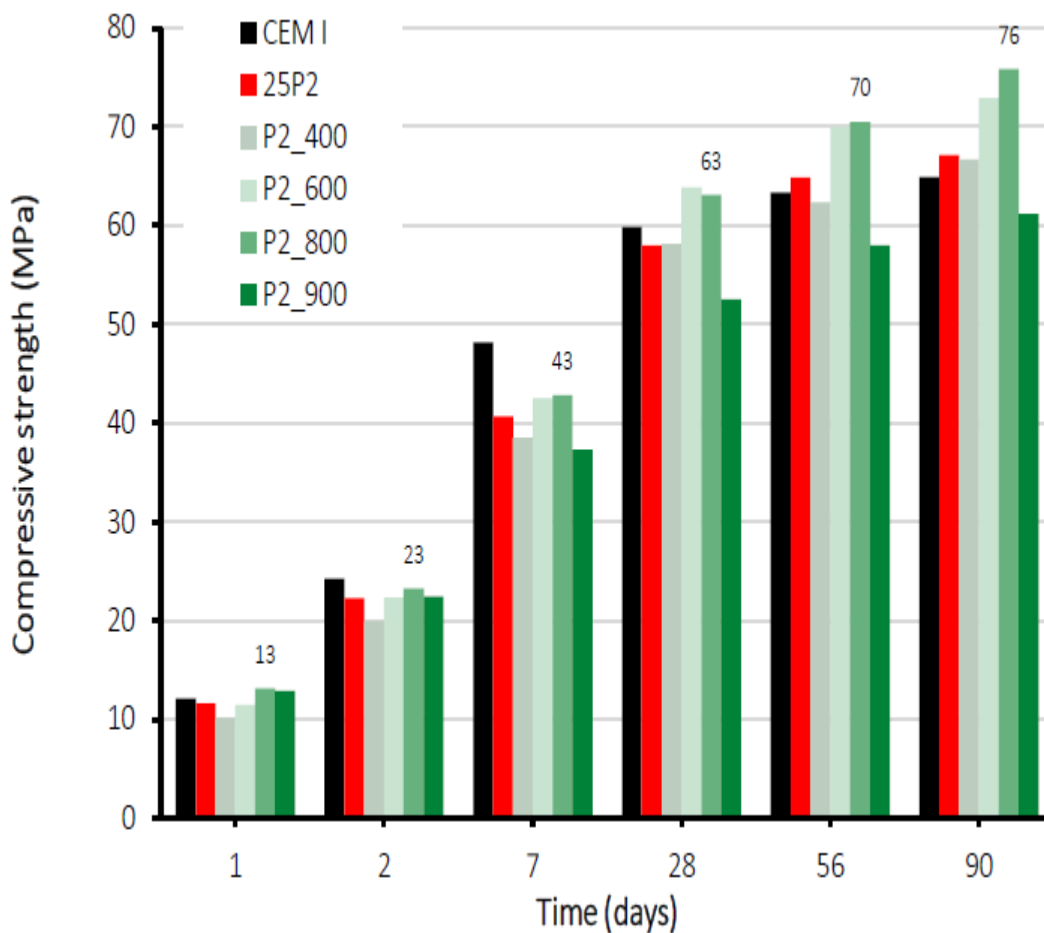
ტუფის მინერალოგიური შემადგენლობა	Calcite	Dolomite	Quartz	Plagioclase	orthoclase	Mica	Kaolinite	hematite	Fluorite
სინჯი №1	76.16	0	7	4.2	8.11	0.99	0	0.05	3.49
სინჯი №2	80.89	0	6.59	0.95	7.54	0	0	0.6	3.42

ქიმიური ანალიზით ტუფი ხასიათდება მაღალი სილიციუმის ოქსიდის შემცველობით (50-60%), მასში ალუმინის ოქსიდი სტაბილურად 13-19%-ია, რკინის შემცველობაც სტაბილურია და 1.4-დან 3%-მდე მერყეობს, კალციუმის ოქსიდი 4.5-დან 7%-მდე განისაზღვრება. ხურებითი დანაკარგი აქვს 12-დან 15%-მდე.

აღსაღნიშნია ის ფაქტი, რომ მასალის გახურება არ ხდება იმ ტემპერატურებზე სადაც ხურებითი დანაკარგი იქნება გამოდევნილი აირებში, მეტიც, თუ მოხდა მასალის ზედმეტად მაღალ ტემპერატურაზე გახურება მასალის აქტიურობა რეგრესს განიცდის და კლინკერის და გახურებული მასალის ნარევის სიმტკიცეები კლებაში მოდის. ტუფის გააქტიურება ხდება მხოლოდ ფიზიკური წყლის დაკარგვისას დარჩენილი ფორიანობის წყალობით.

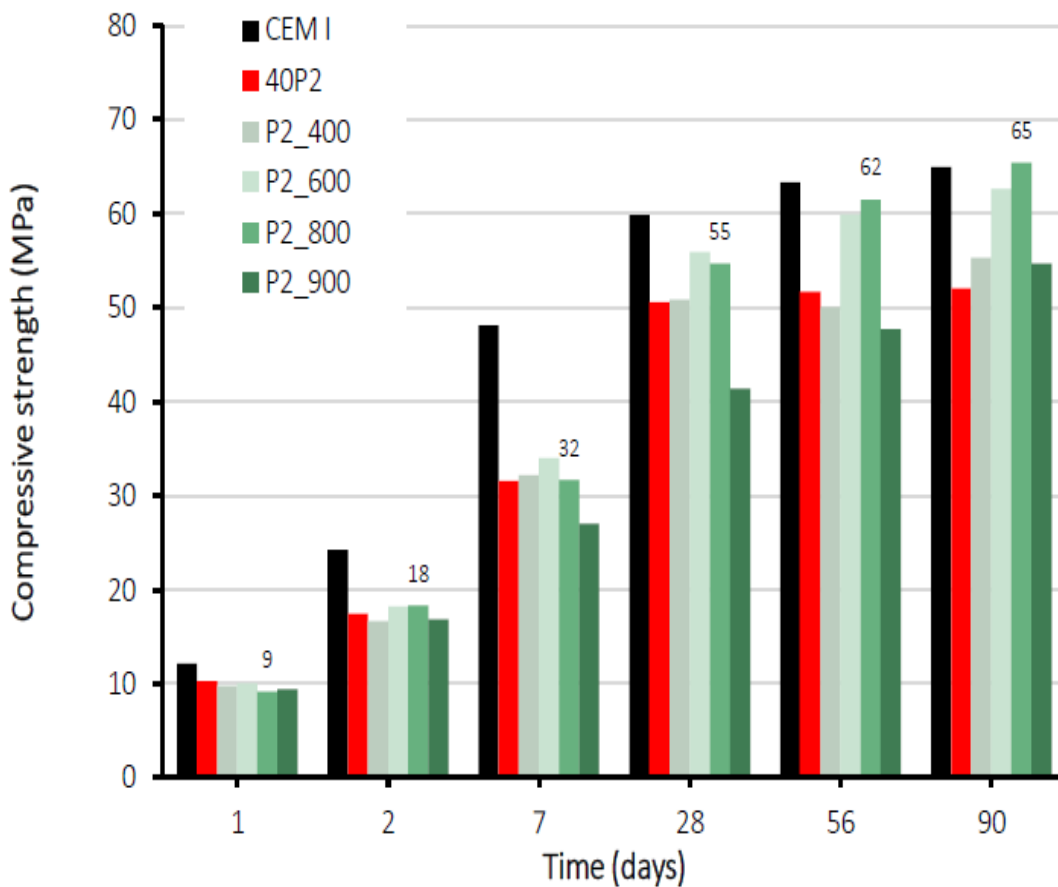
ქვემოთ გრაფიკებზე მოცემულია:

- სტანდარტული კლინკერით დაფუძვლილი ცემენტი CEM I (მხოლოდ კლინკერი და თაბაშირი)
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი ნედლი ხეკორძულას ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი,
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი 400°C-ზე გახურებული ხეკორძულას ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი 600°C-ზე გახურებული ხეკორძულას ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი 800°C-ზე გახურებული ხეკორძულას ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი 900°C-ზე გახურებული ხეკორძულას ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი



ნახაზი 23. ხეკორძულას ტუფის ლაბორატორიული ექსპერიმენტი

- სტანდარტული კლინკერით დაფუძვლილი ცემენტი CEM I (მხოლოდ კლინკერი და თაბაშირი)
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი ნედლი ხანდაკის ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი,
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი 400°C-ზე გახურებული ხანდაკის ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი 600°C-ზე გახურებული ხანდაკის ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი 800°C-ზე გახურებული ხანდაკის ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი
- 70% კლინკერი ჩანაცვლებული 25%-იანი 900°C-ზე გახურებული ხანდაკის ტუფით (პუცოლანური დანამატი) და 5% თაბაშირი



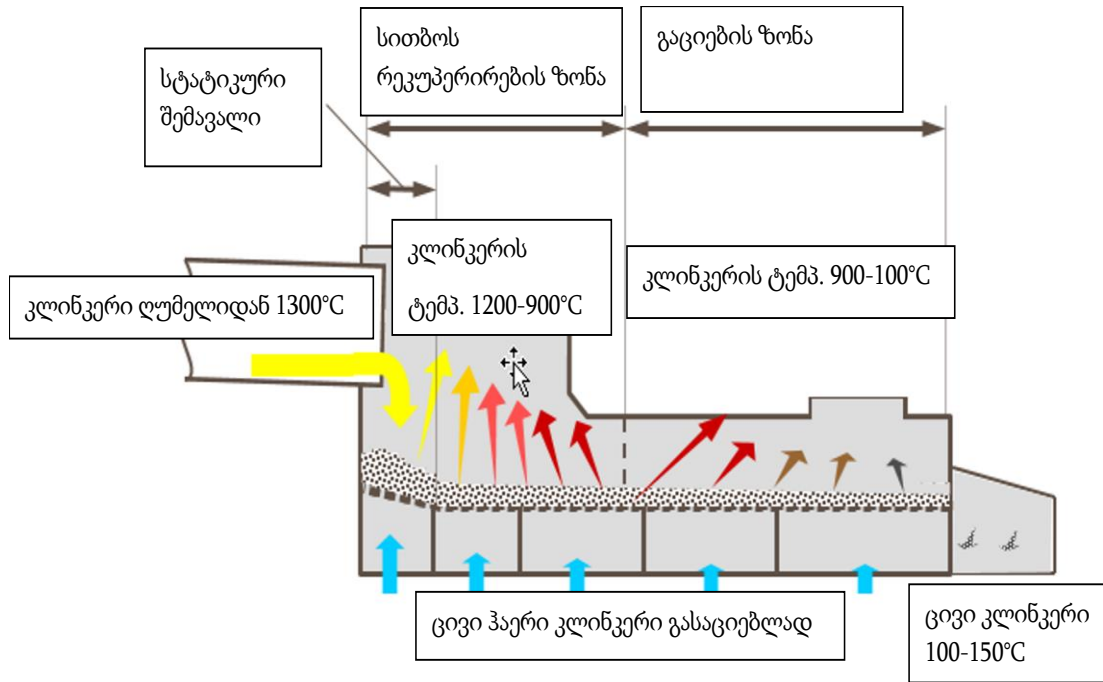
ნახაზი 24. ხანდაკის ტუფის ლაბორატორიული ექსპერიმენტი

## 2.5.2. ტუფის თერმული აქტივაცია

ლაბორატორიული მონაცემები საკმაოდ იმედის მომცემად გამოიყურებოდა და ამიტომ გადაწყდა ინდუსტრიული ექსპერიმენტების განხორციელება. სტანდარტული გამოსავალი იქნებოდა საშრობის ან მბრუნავი ღუმელის მონტაჟი ტუფის გასახურებლად მასალის აქტივობის გასაზრდელად, რომელსაც თერმული ენერგია სჭირდება 3-6 გჯ/ტ მასალაზე. აღნიშნული პროექტი დიდ დანახარჯებს (10 მილიონი დოლარი), მაღალ თბურ მოხმარებას და ინსტალაციის ანუ პროექტის დაწყება დამთავრების დიდ დროს გულისხმობდა. მსჯელობის და არსებული სიტუაციის სწორი შეფასების შემდეგ გადაწყდა, რომ არსებული სითბოს წყარო გამოგვეყენებინა ტუფის გასააქტიურებლად.

როგორც, აღინიშნა პუცოლანური მასალის, ტუფის, აქტივაცია ითხოვს დიდ ენერგიას, რომელიც 500-დან 800°C-მდე მასალის ტემპერატურას გულისხმობს, ამიტომ გამავალი ცხელი აირები, რომლებიც 280-დან 400°C-მდე მერყეობს ვერ იქნება საკმარისი. ასეთი ტემპერატურული ზღვრები არის კლინკერის მაცივარის გარკვეულ ზონებში, სადაც მთავარი მიზანია კლინკერის რაც შეიძლება სწრაფად გაციება. კლინკერის მაცივარში ტემპერატურული პროფილი ქვემოთ სურათზეა ნაჩვენები. გახურებული კლინკერი ღუმელიდან ჩაედინება დაახლოებით 1300°C ტემპერატურით და ცივი ჰაერების წყალობით მისი ტემპერატურა მცირდება საკმაოდ სწრაფად და გამოსავალი ტემპერატურა 100-150°C გრადუსია. [2-7,64-67]





სურათი 15. მაცივარში მიმდინარე პროცესების აღწერა

იქიდან გამომდინარე, რომ ტუფის აქტივაციისთვის სასურველი ტემპერატურული პროფილი გვაქვს კლინკერის ცეცხლრიკა მაცივარში ამას ემატება უფრო ხელსაყრელი გარემოება, რომ აღნიშნული კლინკერი უნდა გაცივდეს რაც სწრაფად მით უკეთესი, გადაწყდა ტუფის მიწოდება კლინკერის მაცივარში ჰაერების გაყოფის (რეკუპერირების ზონიდან ჰაერი მიდის ღუმელში, როგორც მეორადი ჰაერი, ხოლო გაციების ზონიდან ფილტრში, რომელიც პროცესში აღარ იღებს მონაწილეობას), ანუ ნულოვანი წნევის წერტილში. მასალის მაცივარში მოხვედრა მაქსიმალურად მარტივად უნდა მომხდარიყო და ამისთვის ჰაერის ნულოვანი წნევა აუცილებელი იყო.

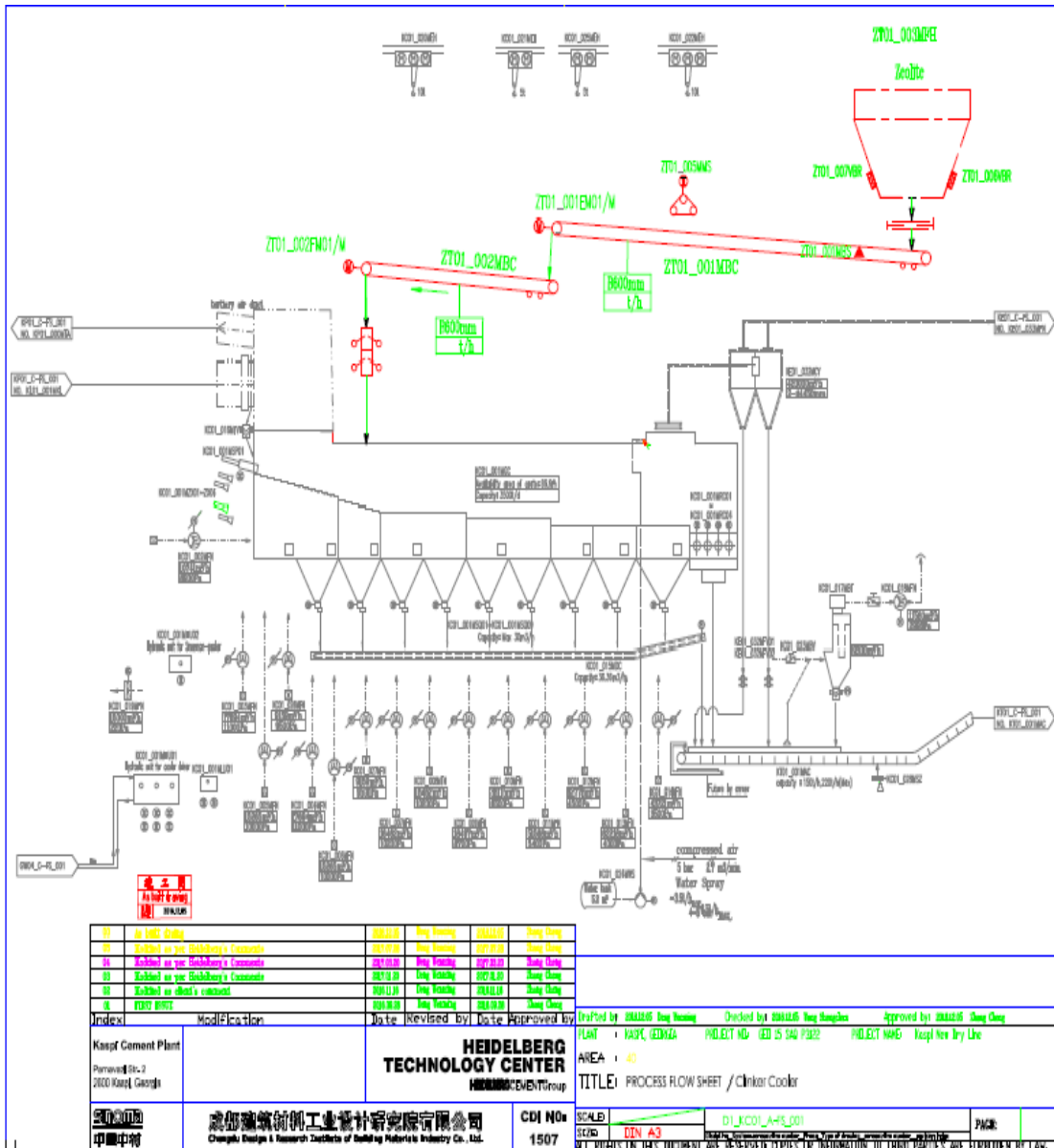
ამ ადგილას კლინკერის ტემპერატურა დაახლოებით 600 გრადუსია, აღნიშნული თავისთავად ლიმიტაციას უკეთებს ტუფის გააქტიურებას თუმცა წერტილი შეირჩა წნევის და ტემპერატურის საუკეთესო შუალედებში და თან ისე რომ ღუმელზე გავლენა ნაკლები ან საერთოდ არ იქონიოს.



სურათი 16. კასპის კლინკერის მაცივარში, ტუფის ჩაყრის წერტილის ტემპერატურა

ამასთანავე ტემპერატურის ზედა ზღვრებზე ასვლა უფრო მეტ ხიფათს უქმნიდა ტუფის გააქტიურებას რადგან ლაბორატორიულმა ცდებმაც აჩვენა, რომ 900°C გრადუსზე გამომწვარი ტუფის აქტივობა ეცემოდა.

სურათზე ნაჩვენები წერტილიდან ხდება ტუფის ჩაყრა მაცივარში მაცივრის სახურავიდან, რომელიც დაახლოებით 10 მეტრის დაშორებით არის მაცივრის ცხელ ბოლოსთან ანუ სადაც გახურებული კლინკერი ღუმელიდან მაცივარში იყრება და იწყებს გაციების პროცესს.



სურათი 17. მაცივრის სქემაზე დამატებული ტუფის მიწოდება (წითელი ფერით)

სურათზე გამოსახულია კლინკერის მაცივარი, ხოლო წითელი ფერით არის დამატებული ტუფის მიწოდების კვანძი და ჩაყრის წერტილი. როგორც აღინიშნა საკმაოდ მარტივი მიწოდების სისტემა 1 ხვიმირით და 2 ლენტით, რომელთაგან პირველს ურეგულირდება ბრუნის სიჩქარე რათა მიწოდებული მასალის რეგულირება იყოს შესაძლებელი, მასალის რაოდენობის განსაზღვრის მიზნით.



სურათი 18. ტუფის მიწოდების ბუნკერი



სურათი 19. ტუფის მიწოდების კონვეიერები და ჩაყრის წერტილი

### 2.5.3. ტუფის ინდუსტრიული ექსპერიმენტის შედეგები

კვლევების შედეგად მოლოდინი იყო, რომ 5% ტუფის გამოყენება იყო უსაფრთხო ცემენტის ხარისხისთვის, მაგრამ დაგეგმარებისას გადაწყდა, რომ აღნიშნული კლინკერი პირდაპირ ცემენტის წარმოებაში არ გაგვეშვა და ცალკე დასაწყობებელიყო, სიმტკიცის 2 დღიანი სიმტკიცეების გაგებამდე.

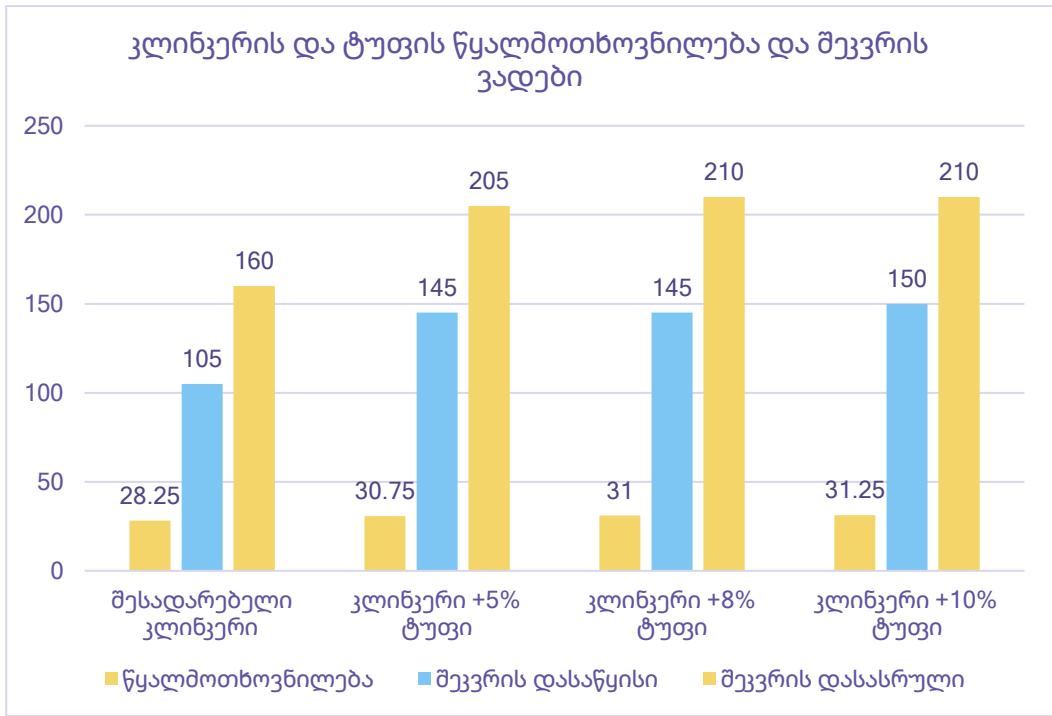
გარდა 2 დღიანი სიმტკიცის გაგებისა ასევე მნიშვნელოვანი იყო გაგვეგო ახალი კლინკერის ნარევის სხვა პარამეტრებიც, როგორებიცაა წყალმოთხოვნილება და შეკვრის ვადები. აღნიშნული პარამეტრები დიდ გავლენას ახდენს ცემენტის და შემდგომ ბეტონის თვისებებზე და მნიშვნელოვანია, რომ ისინი სტანდარტით დაწესებულ ზღვრებში იყვნენ.

დადგინდა რომ ტუფი კლინკერის მაცივარში კლინკერის ზედაპირზე დაახლოებით 10-15 წუთი ჩერდება. გამოსული კლინკერის და ტუფის ნარევი მასალიდან ამოირჩა ტუფის ქვები (ფორმებით და შეფერილობით საკმაოდ ადვილად გაირჩევა ერთმანეთისგან) და ხელოვნური შერევით დაიფქვა შემდეგი პროპორციებით:

- კლინკერი 95% და ტუფი 5%
- კლინკერი 92% და ტუფი 8%
- კლინკერი 90% და ტუფი 10%

ცალკე აირჩა შესადარებელი კლინკერი და 3 დღის განმავლობაში გაგრძელდა ანალოგიური მეთოდით სინჯების შერჩევა. შერჩეული სინჯები დაყალიბდა და ამასთანავე შემოწმდა შეკვრის ვადებსა და წყალმოთხოვნილებაზე.

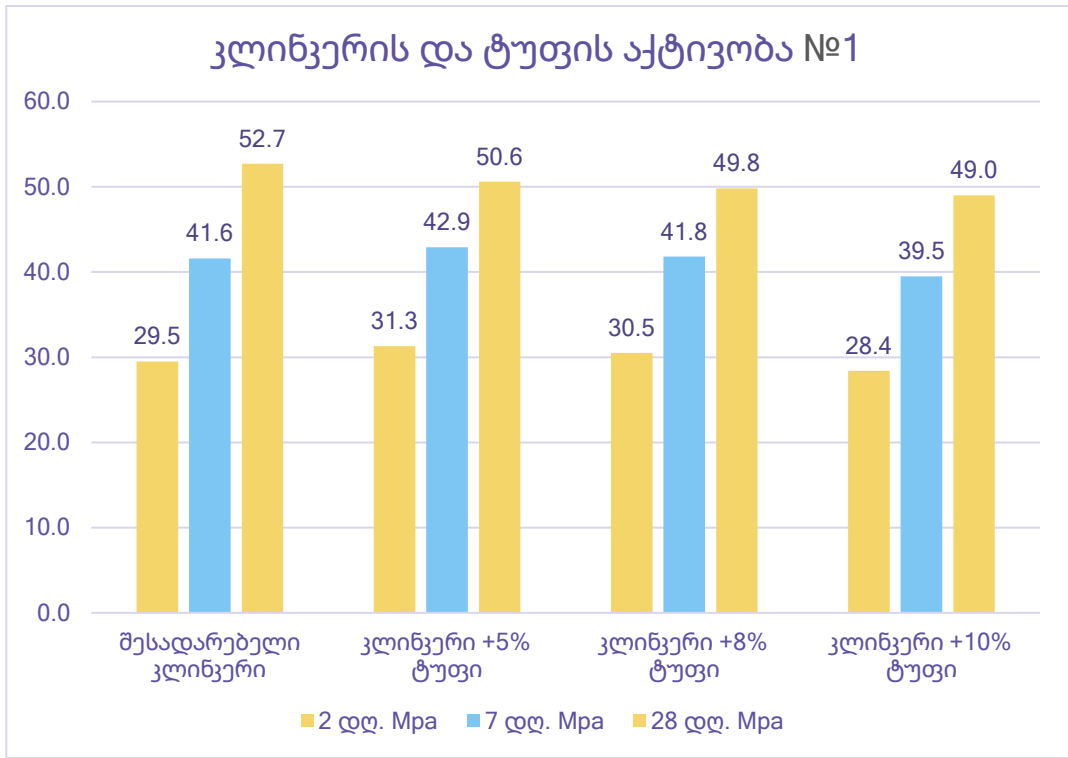
აღნიშნული შედეგები გრაფიკულად წარმოდგენილია ქვემოთ მოცემულ ნახაზებზე:



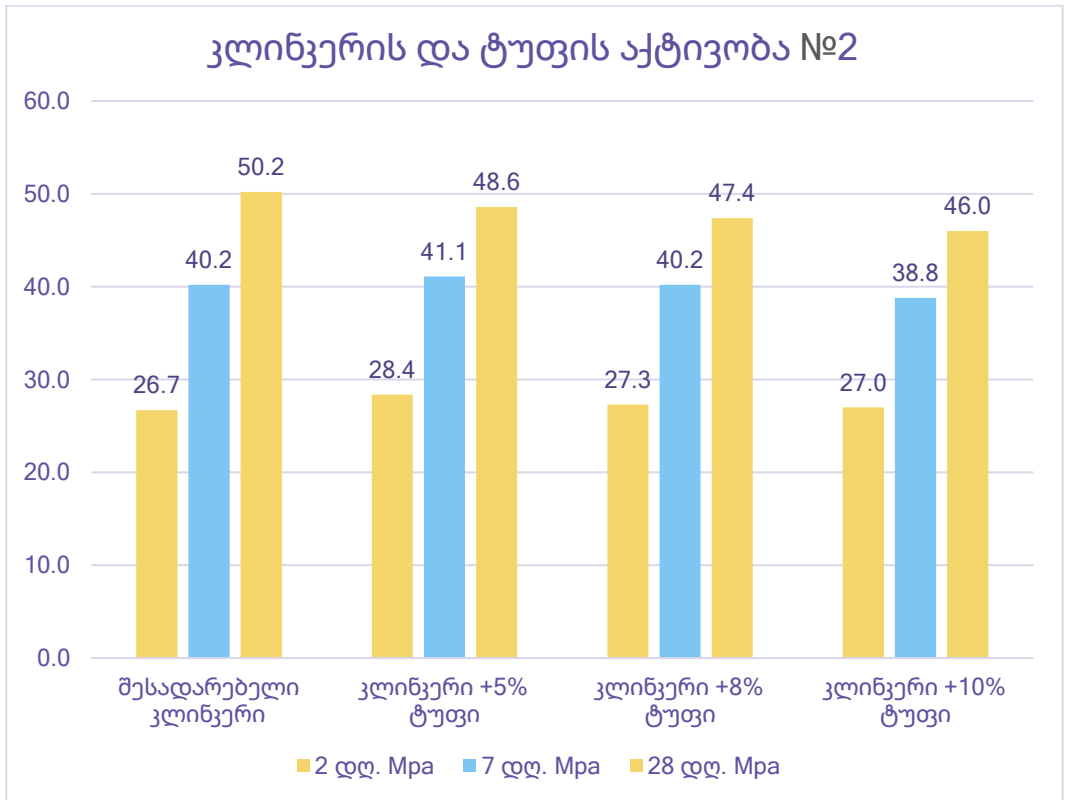
ნახაზი 25. კლინკერის და ტუფის წყალმოთხოვნილება და შეკვრის ვადები

წყალმოთხოვნილებაში მატება იყო 5-დან 10%-მდე, რაც დასაშვებ ნორმებს არ აღემატება და სტანდარტისთვისაც არ წარმოადგენს პრობლემას. შეცვლილია შეკვრის ვადების საწყისი და საბოლოო ვადები. შეკვრის დაწყება რომელიც 105 წუთიდან 145 წუთამდეა გაზრდილი, ხოლო შეკვრის დასრულება 160 წუთიდან 210 წუთამდე გაიზარდა, აღსანიშნავია, რომ აღნიშნული ზრდა არც სტანდარტით და არც პრაქტიკულად პრობლემას არ წარმოადგენს და მისაღებ ზღვრებშია.

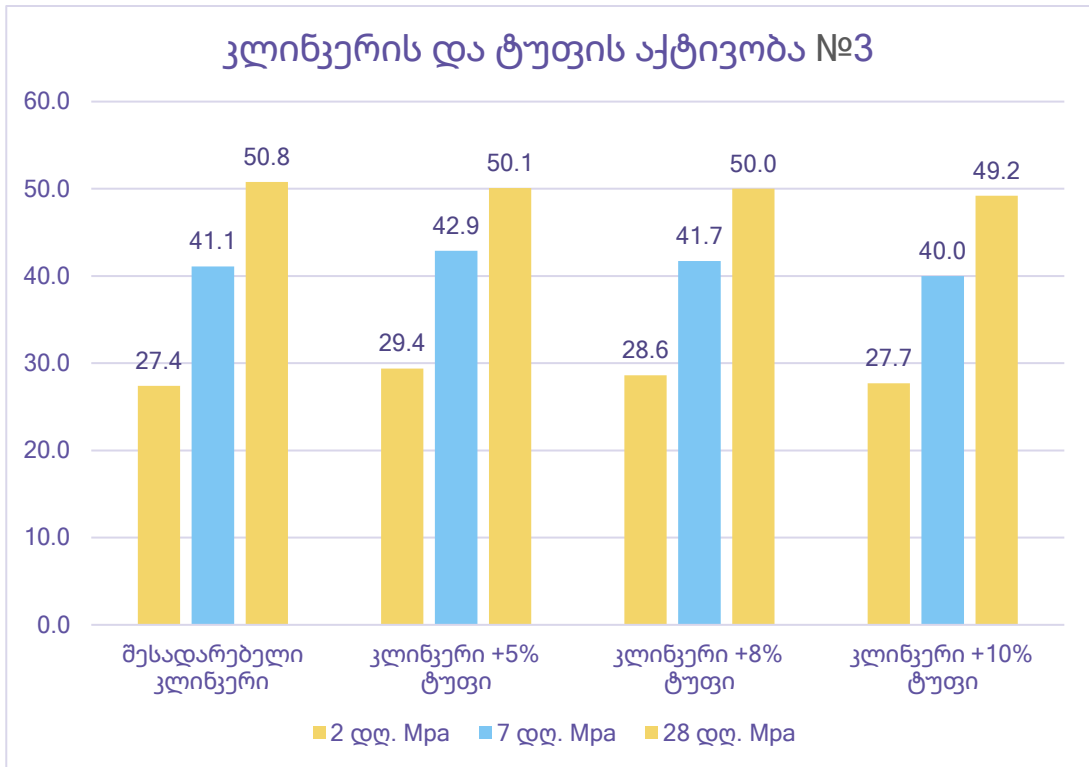
ხელით პროპორცირებული 3 სინჯი გაკეთდა კლინკერის და ტუფის ზემოთ ნახსენები პროპორციებით, სადაც უნდა დაგვეჩვენა თუ რა გავლენას ახდენს ტუფის დამატება კლინკერის როგორც, ადრეულ 2 დღიან ასევე საბოლოო სიმტკიცეებზე. აღნიშნული პარამეტრი როგორც ყველაზე მნიშვნელოვანია, როგორც კლინკერის და ასევე ცემენტის მახასიათებლებში. თუ კლინკერის სიმტკიცე არის მაღალი შესაბამისად ცემენტის სიმტკიცეც მაღალია რაც საშუალებას გვაძლევს გავზარდოთ დანამატი ან შევინარჩუნოთ ცემენტი გაზრდილი სიმტკიცით.



ნახაზი 26. კლინკერის და ტუფის სიმტკიცეები - ექსპერიმენტი №1



ნახაზი 27. კლინკერის და ტუფის სიმტკიცეები - ექსპერიმენტი №2



**ნახაზი 28. კლინკერის და ტუფის სიმტკიცეები - ექსპერიმენტი №3**

პირველი ცდის შესადარებელი კლინკერის 2 დღიანი სიმტკიცე იყო 29.5 მპა, ხოლო მაცივარში გახურებული ტუფის 5 %-ის დამატების შემდეგ გაიზარდა და გახდა 31.3 მპა, რაც აღნიშნავს, რომ 5%-ის დოზით გახურებული ტუფის კლინკერში დამატება დადებით გავლენას ახდენს ადრეულ სიმტკიცეებზე.

კლინკერის და გახურებული ტუფის უკვე 8%-ის შერევის შემდეგ მაინც შეინიშნა სიმტკიცის შედარებით ნაკლები, მაგრამ მაინც შესამჩნევი ზრდა, სიმტკიცის სიდიდემ ამჯერად 30.5 მპა-ს მიაღწია.

კლინკერის და გახურებული ტუფის უკვე 10%-ის შერევის შემდეგ კლინკერის სიმტკიცე ოდნავ გაიზარდა და მხოლოდ 0.3 მპა-ით მეტი იყო, შეიძლება ითქვას დიდად არ შეცვლილა, რაც იმას ნიშნავს, რომ 10% გახურებული და გააქტიურებული ტუფის დამატების შემდეგ კლინკერი იგივე ადრეულ სიმტკიცეს ინარჩუნებს.



რაც შეეხება საბოლოო სიმტკიცეებს, ისენი შედარებით ნაკლები გამოდიოდა თუმცა საბოლოო სიმტკიცე სტანდარტში განსაზღვრულ მოთხოვნებს სრულად აკმაყოფილებს.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, ტუფი აქტიურდება იმის ხარჯზე, რომ ხდება ფიზიკური წყლის აორთქლება რაც თავის მხრივ ზრდის ფორიანობას და მასალა ხდება გაცილებით უფრო აქტიური ვიდრე ეს ნედლად ანუ მოპოვებისას იყო. თეორიულად გაჩნდა ეს მოსაზრება ცდების დასაწყისშივე, რაც თავის მხრივ გადამოწმდა ლაბორატორიული ექსპერიმენტით.

ლაბორატორიული ექსპერიმენტით დადგინდა, რომ ნედლი ტუფის საწყისი სინესტე იყო 15%, ხოლო 105°C-ზე შრობისას მისი სინესტე მხოლოდ 4%-ით შემცირდა რადგან ტუფში ძირითადად ფიზიკურ ბმაში მყოფი წყალია. ეს შედეგი იმას მიგვანიშნებდა, რომ ტუფის შრობა უნდა გაკეთებულიყო გაცილებით მაღალ ტემპერატურებზე. ცდებით დადგინდა, რომ 800°C-ზე შრობისას ხდებოდა მისი სრულყოფილი გააქტიურება, რაც გულისხმობს იმას, რომ არამხოლოდ ზეპირული არამედ ფიზიკურ ბმაში არსებული წყალი შრებოდა რაც დაახლოებით 11%-ს შეადგენდა.

როდესაც წყლათან ბმაში არსებული ოქსიდები ტემპერატურის ხარჯზე თავისუფლდებოდა წყლის ოქსიდისგან, ეს იწვევდა არსებული ოქსიდების უფრო მეტ აქტიურობას არსებული ფორების გათვალისწინებით, რაც თავის მხრივ დადებითად აისახებოდა სიმტკიცეზე.

**ცხრილი 36. ნედლ და გახურებულ ტუფში წყლის შემცველობა (ლაბ. ცდა)**

მასა (გ)	ტემპერატურა	სინესტე
100	0°C	0
96.09	105°C	4%
85.1	800°C	15%

როგორც აღინიშნა, კლინკერის მაცივარში ჩაყრის წერტილზე დაახლოებით 650-750°C გრადუსია და დაყოვნების დროც გაცილებით ნაკლებია ვიდრე ლაბორატორიულ ლუმელში (1სთ ლაბორატორიულ ლუმელში, ხოლო კლინკერის მაცივარში დაახლოებით 10-15 წუთი), ამიტომ სრულად არ ხდება ტუფის

გააქტიურება. სამომავლოდ შეიძლება გაცილებით უფრო უკეთესი აქტივაციის მიღება ჩაყრის წერტილის შედარებით ცხელ წერტილში გადაწევით.

**ცხრილი 37. ნედლ და გახურებულ ტუფში წყლის შემცველობა (კლ. მაცივარში)**

ტუფის სინესტე მაცივრის შემდეგ	ტუფის სინესტე 800°C-ზე
6.5%	8.5%

აღნიშნული მონაცემების ნიშნავს იმას, რომ ტუფის კიდევ უფრო მეტად გააქტიურება არის შესაძლებელი და შესაბამისად მისი კლინკერში წილის გაზრდისაც.

#### 4.5.3.1. ტუფის ინდუსტრიული ექსპერიმენტის რუტინული ანალიზები

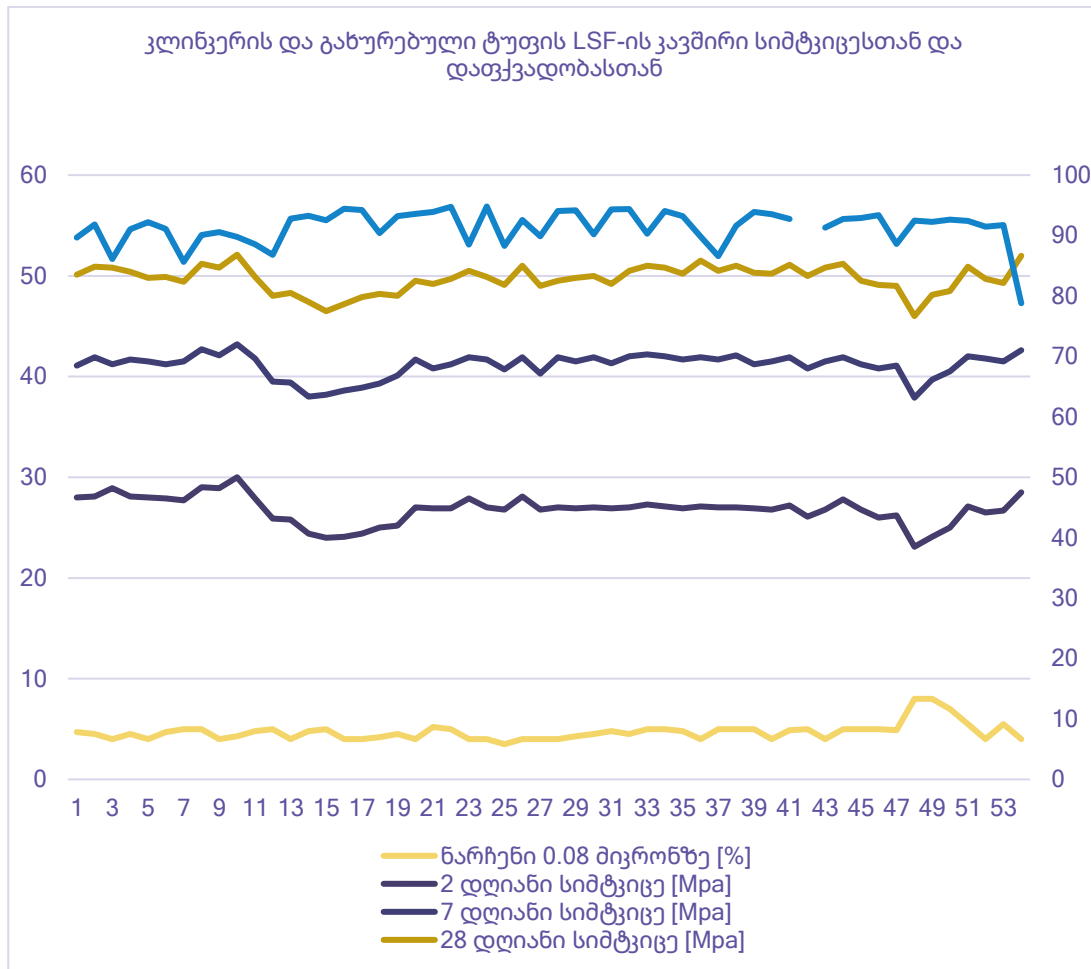
გარდა ნახსენები ლაბორატორიული ტესტებისა დიდი მასშტაბის ინდუსტრიულ ტესტებზე აუცილებელია მუდმივი ხარისხის კონტროლი რომელიც ჩვეულ რეჟიმში მიმდინარეობდა, ხოლო ქვემოთ მოცემულ ცხრილებში არის წარმოდგენილი დღის საშუალო ტუფით გააქტიურებული კლინკერის მონაცემები, შესაბამისი მახასიათებლებით. თითო სინჯი შეესაბამება 1 დღის საშუალო კლინკერის მონაცემს.

**ცხრილი 38. ტუფით (5%) გააქტიურებული კლინკერის საშუალოსინჯების დაფქვის მონაცემები და სიმტკიცეები**

ნარჩენი 0.08 მიკრონზე [%]	ბლენი [cm <sup>2</sup> /g]	საწყისი შეკვრის ვადა [min]	საბოლოო შეკვრის ვადა [min]	2 დღიანი სიმტკიცე [Mpa]	7 დღიანი სიმტკიცე [Mpa]	28 დღიანი სიმტკიცე [Mpa]	LSF [%]
4.7	4155	100	155	28	41.1	50.1	89.65
4.5	4183	100	155	28.1	41.9	50.9	91.84
4	4204	105	165	28.9	41.2	50.8	86.14
4.5	4163	110	170	28.1	41.7	50.4	91.06
4	4236	100	155	28	41.5	49.8	92.21
4.7	4168	105	165	27.9	41.2	49.9	91.09
5	4142	100	155	27.7	41.5	49.4	85.61
5	4122	100	160	29	42.7	51.2	90.09
4	4187	105	165	28.9	42.1	50.8	90.55
4.3	4151	105	160	30	43.2	52.1	89.76
4.8	4183	110	170	27.9	41.8	49.9	88.57
5	4232	100	155	25.9	39.5	48	86.78
4	4260	100	160	25.8	39.4	48.3	92.78

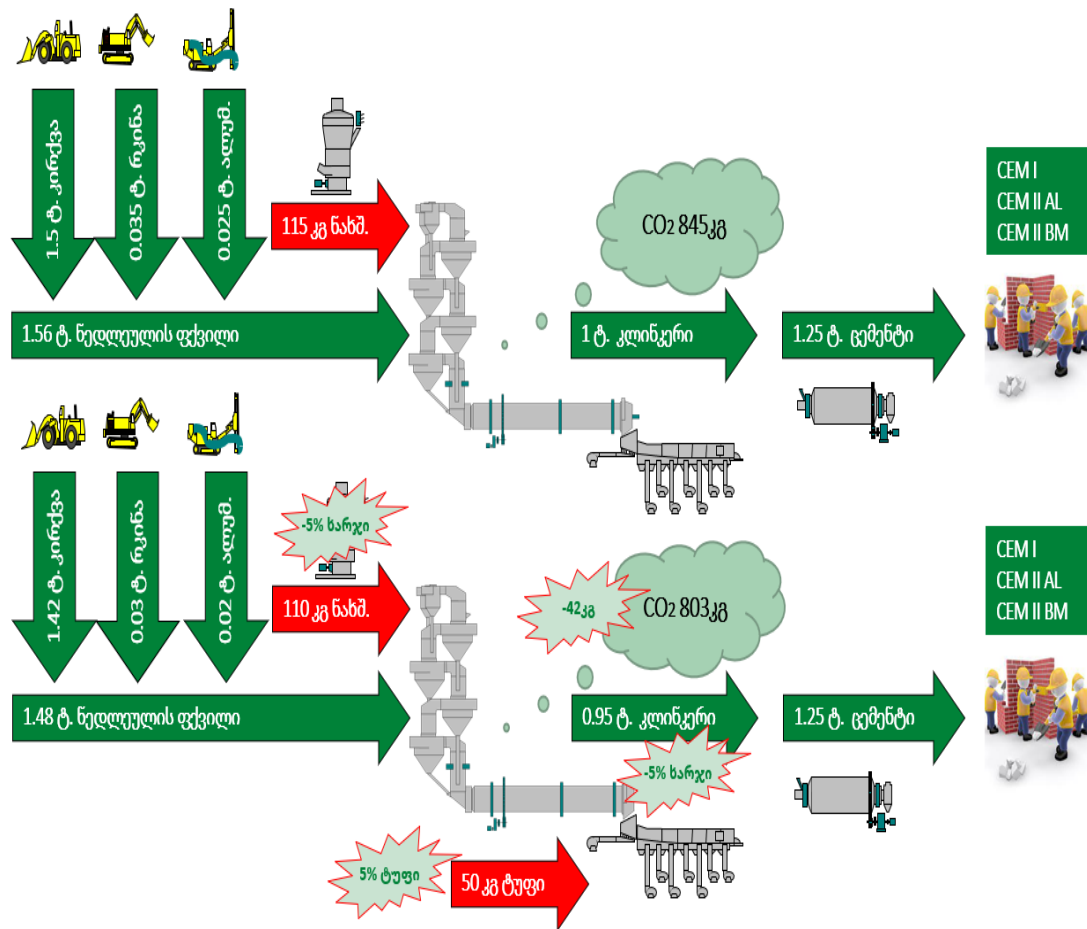
4.8	4275	90	145	24.4	38	47.4	93.27
5	4252	90	145	24	38.2	46.5	92.53
4	4291	90	150	24.1	38.6	47.2	94.45
4	4252	100	155	24.4	38.9	47.9	94.21
4.2	4211	90	145	25	39.3	48.2	90.41
4.5	4183	90	150	25.2	40.1	48	93.23
4	4128	90	145	27	41.7	49.5	93.59
5.2	4107	95	145	26.9	40.8	49.2	93.91
5	4149	90	145	26.9	41.2	49.7	94.75
4	4188	100	160	27.9	41.9	50.5	88.48
4	4227	105	160	27	41.7	49.9	94.80
3.5	4275	100	155	26.8	40.7	49.1	88.28
4	4233	100	150	28.1	41.9	51	92.55
4	4253	100	160	26.8	40.3	49	89.85
4	4272	100	160	27	41.9	49.5	94.07
4.3	4216	100	155	26.9	41.5	49.8	94.18
4.5	4202	95	155	27	41.9	50	90.20
4.8	4183	100	155	26.9	41.3	49.2	94.32
4.5	4248	105	160	27	42	50.5	94.37
5	4175	100	155	27.3	42.2	51	90.27
5	4218	100	160	27.1	42	50.8	94.08
4.8	4280	95	155	26.9	41.7	50.2	93.24
4	4315	100	160	27.1	41.9	51.5	89.84
5	4216	100	160	27	41.7	50.5	86.61
5	4257	105	160	27	42.1	51	91.60
5	4288	100	155	26.9	41.2	50.3	93.88
4	4353	95	155	26.8	41.5	50.2	93.51
4.9	4316	90	150	27.2	41.9	51.1	92.74
5	4292	90	150	26.1	40.8	50	91.85
4	4355	90	150	26.8	41.5	50.8	91.29
5	4310	95	155	27.8	41.9	51.2	92.74
5	4329	95	150	26.8	41.2	49.5	92.88
5	4350	90	145	26	40.8	49.1	93.35
4.9	4375	100	160	26.2	41.1	49	88.58
8	4135	100	150	23.1	37.9	46	92.47
8	4182	95	150	24.1	39.7	48.1	92.24
7	4263	95	150	25	40.5	48.5	92.60
5.5	4348	100	160	27.1	42	50.9	92.41
4	4225	100	155	26.5	41.8	49.7	91.48
5.5	4168	100	160	26.7	41.5	49.3	91.74
4	4187	105	160	28.5	42.6	52	78.79

იმის გათვალისწინებით, თუ როგორ დაიწია კირის ჩაჯდომის კოეფიციენტმა სტანდარტულად კლინკერი სიმტკიცეც და დაფქვალობა უნდა გაუარესებულიყო, თუმცა გააქტიურებულმა ტუფმა სიმტკიცეც და დაფქვალობაც გააუკეთესა.



ნახაზი 29. კლინკერის და ტუფის რუტინული ანალიზები და მათი შედეგები

იმისათვის, რათა ადვილი აღსაქმელი იყოს მიღწეული შედეგი ქვემოთ მოცემულ სურათზე გამოსახულია კლინკერის და ცემენტის წარმოების ნედლეული მასალის, წარმოებული მასალის და თბური ხარჯი რაოდენობები და მათთან მიმართებაში წარმოქმნილი CO<sub>2</sub>-ის რაოდენობა.



სურათი 20. კლინკერის მაცივარში ტუფის 5%-იანი დოზით მიწოდებული მასალის გავლენა ხარჯებსა და CO<sub>2</sub>-ის ემისიაზე

სურათის ზედა ნაწილი წარმოადგენს სტანდარტულ ცემენტის წარმოების პროცესს, შესაბამის დანახარჯებს და წარმოქმნილი CO<sub>2</sub>-ის რაოდენობას, ხოლო სურათის ქვედა ნაწილზე მოცემულია ტუფის დამატების შედეგად მიღებული ცემენტის რაოდენობა, რომელიც იგივეა, მაგრამ დანახარჯები, როგორც ნედლეული მასალის და თბური ხარჯის ასევე გამონაბოლქვის, შემცირებულია 5%-ით, ანუ ამ შემთხვევაში ტუფის გამოყენებული რაოდენობის შესაბამისი. ტუფის წილის გაზრდით ყველა ზემოთ ხსენებული ხარჯი და ემისია შესაბამისად შემცირდება [64-69].

## დასკვნა

კვლევის დასაწყისში არსებული გამოწვევები სრულად იქნა დამისამართებული, გამოკვლეული და წარმატებით დანერგილი:

- სველი მეთოდის, გრძელი მბრუნავი ღუმელების მშრალი მეთოდის, რეაქტორ-დეკარბონიზატორიანი ღუმელით ჩანაცვლება, კლინკერის ხარისხის გაზრდის ან შენარჩუნების პირობებში
- კავთისხევის კირქვის კარიერის ამოწურვის გამო, მთავარი ნედლეულის წყაროს ჩანაცვლება
- საწვავის რაოდენობის და ჩამჯდარი ნაცრის გავლენის შესწავლა და საუკეთესო ნარევის შერჩევა
- ნედლეული კომპონენტების სხვადასხვა მიქსების გამოცდა და საუკეთესო ნარევის დადგენა
- ნედლეული ფქვილის და საწვავის კლინკერად გარდაქმნის პროცესის შესწავლა
- პუცოლანური დანამატის - ტუფის გააქტიურება კლინკერის მაცივარში

დადგინდა რომ, სველი მეთოდიდან მშრალ მეთოდზე გადასვლა მოხდა ისე, რომ კლინკერის დაფქვადობა გაიზარდა, კლინკერის სიმტკიცე იგივე ან გაზრდილია შედარებით ნაკლები LSF-ის კოეფიციენტით, სითბური ხარჯი ტონა კლინკერზე შემცირდა 2-ჯერ და წარმადობა გაიზარდა 2-ჯერ (ერთად აღებულ 3 სველ ღუმელთან მიმართებაში) [68-70].

კავთისხევის კარიერის გადართვით გამოწვეული სირთულეები მოგვარებულ იქნა, სასხორის კირქვასთან ერთად გამამდიდრებლად გამოყენებულ იქნა დედოფლის წყაროს კირქვა რომლის 95%-ზე მეტი კალციუმის კარბონატია. ეს ჩანაცვლება მოხდა ისე, რომ კლინკერის ხარისხზე უარყოფითი გავლენა არ ჰქონია, არამედ უფრო მეტად სტაბილური და აქტიური გახადა [68-70].

ნახშირის და შესაბამისად ნაცრის 2-ჯერ შემცირების შემდეგ ნედლეული ფქვილის ქიმია გადაითვალა ისე რომ კლინკერის ხარისხი იყო იგივე ან გაზრდილი. შესაბამისი გადათვლა ხდებოდა ცდების ყველა ეტაპზე.

კლინკერის ახალი მეთოდით გამოწვის პროცესი შესწავლილი და ოპტიმიზირებული იქნა. ნედლეულის და საწვავის გადანაწილების 20 ინდუსტრიული ექსპერიმენტის შედეგად დადგინდა საუკეთესო მიქსები, რომელთა საშუალებით კლინკერის ხარისხი იზრდება ან იგივე რჩება, ხოლო

თბური დანახარჯი, საწვავის და ნედლეული ფქვილისგან მიღებული CO<sub>2</sub>-ის ემისიები კი შემცირდა, რაც იძლევა როგორც ეკომონიურ ასევე ეკოლოგიურ ეფექტს.

ყველაზე მნიშვნელოვანი მიღწევა იყო ტუფის თერმული აქტივაცია, რომელიც წარმატებით დამთავრდა უკვე არა მხოლოდ ლაბორატორიული არამედ ინდუსტრიული ექსპერიმენტითაც. ინოვაციური იდეის საწყისი ის იყო რომ ფიზიკურად შეკავშირებული წყლის გამოდევნა (გამოშრობა) პუცოლანურ მასალას გაცილებით აქტიურს ხდის და მისი 10%-მდე მოხმარება კლინკერთან მიმართებაში არამხოლოდ ინარჩუნებს არამედ ზრდის კიდეც ამ ნარევის სიმტკიცეს კლინკერთან შედარებით.

არსებული პუცოლანური მასალის გააქტიურების მეთოდი შესწავლილი იყო ადრეული 70-იანი წლებიდან მოყოლებული. თუმცა პუცოლანური დანამატის გააქტიურებას სჭირდება არანაკლები თბური ენერგია გასახერხებლად ვიდრე კლინკერს და შესაბამისად ისიც გამოყოფს დამატებით CO<sub>2</sub>-ის ემისიებს. ამიტომ სტანდარტული მიდგომით გააქტიურებული პუცოლანური მასალა შედარებით ნაკლებად ამცირებს გამონახობლქვს, თერმულ და სხვა ხარჯებს, ამასთანავე საჭიროებს მინიმუმ 10 მილიონის ინვესტიციას და მინიმუმ 6 თვიან სამონტაჟო პერიოდს [68-70].

კლინკერის წარმოების პროცესების სრული შესწავლიდან გამომდინარე განისაზღვრა სექცია, სადაც ტემპერატურა 600°C-დან 1200°C-მდე მერყეობს და მის შესამცირებლად გარემო ჰაერებს ვიყენებთ. აღნიშნული სექცია არის კლინკერის მაცივარი, სადაც ღუმელიდან გადმოსული 1200-1300°C-ზე გახურებული კლინკერი ხვდება. კლინკერი გაივლის 30 მეტრიან მაცივარს და დაახლოებით 100°C-მდე გაცივდება. ჩვენთვის სასურველი ტემპერატურები ცხელი მხრიდან 5-დან 10 მეტრამდე მონაკვეთში იყო.

ცხელი ბოლოდან 10 მეტრის მოშორებით მოხდა მასალის ჩამყრელი ყელის მოწყობა სადაც ტუფის მიწოდება 2 ბრუნ-რეგულირებადი ლენტით და ხვიმირით ხდება. 5% დოზით საწარმოო ექსპერიმენტი წარმატებულად დამთავრდა, მაგრამ ასევე შესაძლებელია პროპორციების გაზრდა 10%-მდე, შემდეგი ცდების პირობებში. ასევე ჩაყრის წერტილის გადატანა შეიძლება უფრო ცხელი მხარისკენ

რაც კიდევ უფრო მეტად გააქტიურებს ტუფს და მოგვცემს საშუალებას გავზარდოთ მისი პროცენტულობა კლინიკერში.

აღნიშნულმა ექსპერიმენტით დადგინდა, რომ არსებობს საშუალება ვაწარმოოთ 100% კლინიკერი 90% ემისიებით და თერმული ხარჯით, რაც გლობალური მნიშვნელობის შედეგია. პროექტის განხორციელება ხდება მინიმალური დანახარჯებით (200 ათასი ლარი) და რაც მთავარია არ მოითხოვს საწვავით მიღებულ თერმულ ენერჯიას, რაც საოპერაციო ხარჯებს და ემისიებს თითქმის ანულებს [68-70].

დადგინდა, რომ მაცივრის აღნიშნული სექცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას ნებისმიერი სხვა მასალის შრობა-გახურებისთვის და წარმოებამ გამოყენების მიზნით. ამ მიდგომის აღმოჩენა გატესტვამ შეიძლება საფუძველი დაუდოს ამ არსებული ინდუსტრიული არსებული



## გამოყენებული ლიტერატურა

1. John P. John Parametric Studies of Cement Production Processes Journal of energy 2020
2. Heat Consumption of Different Cement Kiln Technologies, IEA, 2007
3. თ. გაბადაძე ცემენტის და სხვა მჭიდა მასალების ტექნოლოგია. ლექციების კურსი. 2019
4. თ. გაბადაძე ო. ქურდევანიძე გ. არშიძე ვ. ჩეკრიგინი ვ. ზლატოკრილოვი პორტლანდცემენტის წარმოება თბილისი 2000
5. ლ. კლიმაშვილი, დ. გურგენიძე, ა. ჩიქოვანი ცემენტები, ტექნიკური მოთხოვნები, გამოცდის მეთოდები ევროპულ სამშენებლო ნორმებთან შესაბამისობით 2019
6. Walter H. Duda Cement-data-book 1976
7. H. F. W. Taylor Cement chemistry 1990
8. Frederick Measham Lea Lea's Chemistry of Cement and Concrete 2018
9. Lea's Chemistry of Cement and Concrete by Peter Hewlett Fifth Edition 2019
10. Lea's Chemistry of Cement and Concrete by Peter Hewlett fourth Edition. 2004
11. Cement principles of production and use . Friedrich W. Locher Verlag Bau Technk GmbH, 2006
12. Advances in cement technology S.N.GHOSH Chemistry , Manufacture and testing - second edition 2002 published by Tech book international. India.
13. Philip A. Alsop Cement Plant Operations Handbook: For Dry Process Plants 2007
14. <https://en.wikipedia.org/wiki/Cement> გადამოწმებულ იქნა 29.12.2022
15. Hargreaves, David The Global Cement Report 10th Edition International Cement Review 2013
16. Wayback Machine Coal and Cement. World Coal Association Archived 2011
17. Watts, Jonathan Concrete: the most destructive material on Earth 2022
18. Urbana-Champaign, Dept. of Materials Science and Engineering, University of Illinois, The history of concrete 2013
19. Cowan, Henry J. An Historical Note on Concrete. Architectural Science Review 1975
20. Sismondo, Sergio. An Introduction to Science and Technology Studies 2016

21. Mukerji, Chandra. Impossible engineering: technology and territoriality on the Canal du Midi 2016
22. Holland, Terence C. Silica Fume User's Manual 2014
23. Aitcin, Pierre-Claude (2000). "Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow". Cement and Concrete Research. 30 (9): 1349–1359. doi:10.1016/S0008-8846(00)00365-3.
24. Aitcin, Pierre-Claude (2000). "Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow". Cement and Concrete Research. 30 (9): 1349–1359. doi:10.1016/S0008-8846(00)00365-3.
25. Siegbert Sprung "Cement" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2012 Wiley-VCH, Weinheim.
26. Ludwig, U.; Schwiete H.E.. Lime combination and new formations in the trass-lime reactions 1963
27. Snellings R., Mertens G., Elsen J. Supplementary cementitious materials. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 2012
28. European cement standard EN 197-1 Cement – Part 1: “Composition, specifications and conformity criteria for common cements” which defines 27 distinct common cement products and their constituents
29. В.К. Классен. Технология и оптимизация производства цемента 2011
30. Damtoft, J.S.; Lukasik J.; Herfort D.; Sorrentino D.; Gartner E.M. Sustainable development and climate change initiatives 2008
31. Siegbert Sprung Cement in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2012
32. Ferrari, L. (2012). Reaction of clinker surfaces investigated with atomic force microscopy
33. Sohoni, S.; R. Sridhar; G. Mandal Effect of grinding aids on the fine grinding of limestone, quartz and portland cement clinker 1991
34. Rodgers, Lucy The massive CO<sub>2</sub> emitter you may not know about 2018
35. Колокольников. Производство цемента-М.: «Высшая школа» 1970г.
36. Бутт Ю. М. Тимашев В. В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов -М.: «Высшая школа» 1973г.

37. Попов А. Н. Лабораторный практикум по предмету «Строительны материалы и детали» Москва, 1988г.
38. Ходоров Е. И. Печи цементной промышленности-Л.: Издательство литературы по строительству. 1968г.
39. Воробьев Х. С. Мазуров Д. Я. Теплотехнические расчеты цементных печей и аппаратов-М.: «Высшая школа», 1962г.
40. Горбачев Г. И. Хигерович М. И. Иванов О. М. Домокеев А. Г. Ерофеева Е. А. Орендлихер Л. О. Вяжущие вещества, бетоны и изделия из них. М «высшая школа», 1976г.
41. Пашенко А. А. Сербин В. П. Старчевская Е. А. Вяжущие материалы-К.: «Выша школа» 1975.
42. Ведь Е. И. Бакланов Г. М. Жаров Б. Ф. Литвинова З. С. Химия в производстве строительных материалов-К.: «Буд/Вельник», 1968г.
43. Белянкин Д. С. Лапин В. В. Торопов Н. А. Физико-химические системы силикатной технологии-М.: Промстройиздат, 1954г.
44. Анастасиади А. П. Боровский В. Р. Выборнов Г. В. Копелянский Г. Д. Мак И. Л. Печуро С. С. Пиевский И. М. Справочник по производству гипса и гипсовых изделий. «Госстройиздат», 1963г.
45. Рояк С. М. Рояк Г. С. Специальные цементы- М.: Стройиздат, 1983г.
46. Горчаков Г. И. Строительные материалы- М.: «Высшая школа», 1981г.
47. Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества-М.: Стройиздат, 1986г.
48. Андреевич С. М. Быстротвердеющие безгипсовые портландцементы с регулируемыми сроками схватывания, 1991г.
49. Журавлев Н. Ф. Химия вяжущих веществ. –Л.: Госхимиздат, 1951г.
50. Федоров Н. Ф. Введение в химию и технологию специальных вяжущих веществ. – Л.: Изд-во ЛТИ, 1976г.
51. Справочник по производству гипса и гипсовых изделия / Под. ред. К.А. Зубарева. – М.: Госстройиздат, 1963г.
52. Бутт Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа. 1980г.

53. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, Ю.С. Колокольников.- М.: Стройиздат, 1979г.
54. Карибаев К.К. Поверхностно-активные вещества в производстве вяжущих. –Алма-Ата: Наука, 1980г.
55. Осокин А.П. Модифицированный портландцемент / А.П. Осокин, Ю.Р.Кривобородов , Е.Н. Потапова.- М.: Стройиздат, 1993г.
56. Бутт Ю.М. Портландцементный клинкер / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев.- М.: Стройиздат, 1967г.
57. Формирование и генезис микроструктуры цементного камня / Л.Г. Шпынова, В.И. Синенькая, В.И. Чих, И.И. Никонец, И.Ф. Дудинская, А.С.Криль, М.А.Саницкий, Е.В. Зданевич.-Львов: Вища школа. Изд-во при Львов.уи-те, 1975г.
58. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня /Л.Г. Шпынова, В.И. Чих, М.А.Саницкий, Х.С. Соболев, С.К. Мельник. Львов: Вища школа. Изд-во при Львов.уи-те, 1981г.
59. Саницкий М.А. Безгипсовые портландцементы с регулируемыми сроками схватывания: Аналитический обзор.-М.: ВНИИЭСМ, 1990г.
60. Зайцев И. Д., Асеев Г.Г. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ. Справ. изд.- М.: Химия, 1988г.
61. Цейтлин Н. А. Методы расчета параметров физических свойств смешанных растворов электролитов содового производства. НИОХИМ Харьков, 1975г.
62. Цейтлин Н. А., Зайцев И. Д. Харьков. Тр. НИОХИМ. 1980г.
63. Стромберг А. Г., Семченко Д. П. Физическая химия: -М: Высшая школа, 1988г.
64. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pozzolan#Pozzolan materials](https://en.wikipedia.org/wiki/Pozzolan#Pozzolan%20materials) გადამოწმებულ იქნა 29.12.2022
65. [https://en.wikipedia.org/wiki/Building\\_and\\_Road\\_Research\\_Institute#Pozzolana Cement](https://en.wikipedia.org/wiki/Building_and_Road_Research_Institute#Pozzolana_Cement) გადამოწმებულ იქნა 29.12.2022
66. Draeger Guide for selection and use of filtering devices 22 May 2020
67. Chatham House Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete 2018

68. Vakhtang Chkheidze. Crimsonpublishers: Local Raw Material, Fuel and Clinker Production Processing with 5 Stage Pre- Calciner Kiln and Grate Cooler in Georgia 2020. DOI: 10.31031/PPS.2020.03.000577
69. Vakhtang Chkheidze. Tamaz Gabadadze. Science Georgia International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies Dedicated to the 100th Anniversary of "GEORGIAN TECHNICAL UNIVERSITY - GTU". LOCAL RAW MATERIAL, FUEL AND CLINKER PRODUCTION PROCESSING WITH 5 STAGE PRE-CALCINER KILN AND GRATE COOLER IN GEORGIA (page 960-964). 2022
70. Vakhtang Chkheidze. Conversion processes of local raw materials considering the use of reactor-decarbonizer in rotary kiln system for clinker production. Journals 4science 2023 <https://journals.4science.ge/index.php/GS/article/view/1389>