

**T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK CAM TOZU TABANLI GEOPOLİMER  
HARÇLARDA KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSU  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan  
Cemre AY**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEY**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Kasım 2021**

**NEVŞEHİR**



## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca karşılaştığım tđm zorluklarda yardımcı olan, bilgi ve birikimleriyle yoluma daima ışık tutan, öğrencisi olmaktan hayatım boyunca gurur duyacağım hocam İsmail İsa ATABEY'e,

Cam tozu temini için Akcihan Cam Tozu'na, Kalsiyum Alüminat Çimentosu için ÇİMSA'ya,

Tez çalışmamı yürütmeme ABAP20F20 numaralı proje ile maddi destek veren Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Ayrıca daima yanımda olan en büyük destekçilerim annem Sabır AY ve babam Cihan AY ile moral kaynağım, yeğenim Asya ÖZCAN'a en içten teőekkürlerimi sunarım.

Cemre AY

Kasım, 2021

# ATIK CAM TOZU TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARDA KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSU ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Cemre AY

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım,2021

## ÖZET

Bu çalışmada atık cam tozu tabanlı geopolimer harçlara kalsiyum alüminat çimentosu ikamesinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kalsiyum alüminat çimentoları (Isıdaç40 ve Refro50) ayrı ayrı %5, %10 ve %15 oranında atık cam tozu ile ikame edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Harçlarda aktivatör olarak sodyum silikat-sodyum hidroksit karışımı kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harçlar 24 saat 90°C etüvde ısı küre tabi tutulmuştur. Geopolimer harç numuneleri üzerinde birim ağırlık ve yoğunluk, yayılma tablası, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme ve boşluk oranı, karbonatlaşma, rötre ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyleri ve SEM incelemeleri yapılmıştır. Çalışmanın sonunda, cam tozu esaslı geopolimer harçlara kalsiyum alüminat çimentosu ikame edilmesinin fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirdiği tespit edilmiştir. Basınç dayanım değerlerinde 28 gün sonunda %100 cam tozu ile üretilen harçlara göre %15 kalsiyum alüminat çimentosu yer değişikliğinde Isıdaç40 ile yaklaşık %55, Refro50 ile %65 oranında artış meydana gelmiştir. Ayrıca yüksek oranda Si içeren atık cam tozu için kalsiyum alüminat çimentolarının ilave Al kaynağı olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** *Atık cam tozu, Geopolimer, Kalsiyum alüminat çimentosu, Dayanım*

**Tez Danışman:** Dr.Öğr.Üyesi İsmail İsa ATABEY

**Sayfa Adeti:** 79

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CALCIUM ALUMINATE CEMENT  
ON WASTE GLASS POWDER BASED GEOPOLYMER MORTARS**

**(M. Sc. Thesis)**

**Cemre AY**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**November, 2021**

**ABSTRACT**

In this study, the effect of calcium aluminate cement replacement on waste glass powder based geopolymer mortars was investigated. For this purpose, geopolymer mortars containing waste glass powder and 5%, 10%, and 15% calcium aluminate cement (Isıdaç40, and Refro50) were produced. Sodium silicate-sodium hydroxide mixture was used as activator in the mortars. The produced geopolymer mortars were cured at 90°C for 24 hours. Unit weight and specific gravity, flow table, flexural strength, compressive strength, water absorption and porosity, carbonation, shrinkage, elevated temperatures tests and SEM analysis were carried out on the geopolymer mortar samples. At the end of the study, it was determined that the replacement of calcium aluminate cement to the glass powder-based geopolymer mortars improves the physical and mechanical properties. At the end of 28 days, when the samples were evaluated in terms of compressive strength, compared to the mortars produced with 100% glass powder the replacement of 15% calcium aluminate cement increased by approximately 55% with Isıdac40 and 65% with Refro50. In addition, it has been observed that calcium aluminate cement can be used as an additional source of Al for waste glass powder with high Si content.

***Keywords: Waste glass powder, Geopolymer, Calcium aluminate cement, Strength***

**Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. İsmail İsa ATABEY**

**Page Number: 79**

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ .....	1
<b>GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI</b>	
1.1. Geopolimerler .....	4
1.1.1. <i>Geopolimerlerin Kimyası</i> .....	4
1.1.2. <i>Geopolimerlerin Alkali Aktivasyon Süreci</i> .....	6
1.1.3. <i>Geopolimerlerin Kullanım Alanları</i> .....	6
1.2. Atık Cam .....	8
1.3. Kalsiyum Alüminat Çimentosu .....	11
1.4. Aktivatörler .....	13
1.5. Literatür Özeti .....	13
<b>BÖLÜM 2</b>	
<b>MATERYAL ve YÖNTEM</b>	
2.1. Materyal .....	21
2.1.1. Atık Cam Tozu .....	21
2.1.2. <i>Kalsiyum Alüminat Çimentosu</i> .....	22
2.1.3. <i>Dere Kumı</i> .....	23
2.1.4. <i>Aktivatörler</i> .....	23
2.1.5. Su.....	24
2.2. Ön Deneme Çalışmaları .....	24
2.3. Deneylerin Tasarımı .....	29

2.4.	Harç Üretimi ve Kürü.....	30
2.5.	Deney Yöntemleri.....	33
2.5.1.	<i>Yayılma Tablası Deneyi</i> .....	33
2.5.2.	<i>Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi</i> .....	33
2.5.3.	<i>Eğilme Dayanımı Deneyi</i> .....	34
2.5.4.	<i>Basınç Dayanımı Deneyi</i> .....	35
2.5.6.	<i>Su Emme Boşluk Oranı Deneyi</i> .....	36
2.5.7.	<i>Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi</i> .....	37
2.5.8.	<i>Kuruma Büzülmesi Deneyi</i> .....	38
2.5.9.	<i>Karbonatlaşma Deneyi</i> .....	40
2.5.9.	<i>SEM İncelemeleri</i> .....	40
<b>BÖLÜM 3</b>		
<b>BULGULAR ve TARTIŞMA</b>		
3.1.	Ön Deneme Çalışmaları Deney Sonuçları .....	42
3.1.1.	<i>Ön Deneme Çalışmaları Yayılma Çapı Değerleri</i> .....	42
3.1.2.	<i>Ön Deneme Çalışmaları Eğilme Dayanımı Değerleri</i> .....	44
3.1.3.	<i>Ön Deneme Çalışmaları Basınç Dayanımı Değerleri</i> .....	47
3.2.	Yayılma Tablası Deney Sonuçları .....	49
3.3.	Birim Ağırlık ve Yoğunluk Deney Sonuçları .....	51
3.4.	Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları .....	52
3.5.	Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	53
3.6.	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deney Sonuçları .....	54
3.6.1.	<i>Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları</i> .....	54
3.6.2.	<i>Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Deney Sonuçları</i> .....	58
3.7.	Su Emme ve Boşluk Oranı Deney Sonuçları .....	60
3.8.	Karbonatlaşma Deney Sonuçları .....	61
3.9.	Rötre Deney Sonuçları .....	65
3.10.	SEM İnceleme Sonuçları.....	66
<b>4. BÖLÜM</b>		
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b>		

4.1.	Yayıma Tablası Deneyi ile İlgili Sonuçlar.....	70
4.2.	Birim Ağırlık Deneyi ile İlgili Sonuçlar .....	70
4.3.	Eğilme Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar .....	70
4.4.	Basınç Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar .....	71
4.5.	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi ile İlgili Sonuçlar .....	71
4.5.1.	<i>Eğilme Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar .....</i>	<i>71</i>
4.5.2.	<i>Basınç Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar .....</i>	<i>72</i>
4.6.	Su Emme ve Boşluk Oranı Deneyi ile İlgili Sonuçlar.....	72
4.7.	Karbonatlaşma Deneyi ile İlgili Sonuçlar .....	73
4.8.	Rötre Deneyi ile İlgili Sonuçlar .....	73
4.9.	SEM Analizi ile İlgili Sonuçlar .....	73
KAYNAKÇA .....		75
ÖZGEÇMİŞ .....		79



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. 1.	Ülkelere göre atık cam miktarları ve geri dönüşüm oranları[20] .....	9
Tablo 2. 1.	Cam tozu kimyasal özellikleri.....	21
Tablo 2. 2.	Isıdac40 ve Refro50 kimyasal özellikleri .....	22
Tablo 2. 3.	Dere kumu tane dağılımı .....	23
Tablo 2. 4.	Birinci ön deneme çalışması karışım oranları, g.....	25
Tablo 2. 5.	İkinci ön deneme çalışması karışım oranları, g .....	26
Tablo 2. 6.	Üçüncü ön deneme çalışması karışım oranları, g .....	27
Tablo 2. 7.	Dördüncü ön deneme çalışması karışım oranları, g.....	28
Tablo 2. 8.	Karışım oranları, g .....	29
Tablo 3. 1.	Birinci ön deneme yayılma çapı değerleri.....	42
Tablo 3. 2.	İkinci ön deneme yayılma çapı değerleri .....	43
Tablo 3. 3.	Üçüncü ön deneme yayılma çapı değerleri .....	43
Tablo 3. 4.	Birinci ön deneme eğilme dayanımı sonuçları, MPa.....	44
Tablo 3. 5.	İkinci ön deneme eğilme dayanımı sonuçları, MPa.....	45
Tablo 3. 6.	Üçüncü ön deneme eğilme dayanımı sonuçları, MPa .....	45
Tablo 3. 7.	Dördüncü ön deneme eğilme dayanımı sonuçları, MPa.....	46
Tablo 3. 8.	Birinci ön deneme basınç dayanımı sonuçları, MPa .....	47
Tablo 3. 9.	İkinci ön deneme basınç dayanımı sonuçları, MPa .....	48
Tablo 3. 10.	Üçüncü ön deneme basınç dayanımı sonuçları, MPa .....	48
Tablo 3. 11.	Dördüncü ön deneme basınç dayanımı sonuçları, MPa .....	49
Tablo 3. 12.	Taze harçların yayılma çapları.....	50
Tablo 3. 13.	Geopolimer numunelerin birim ağırlık ve yoğunlukları .....	51
Tablo 3. 14.	Ortalama eğilme dayanımı sonuçları, MPa .....	53
Tablo 3. 15.	Ortalama basınç dayanımı sonuçları, MPa.....	54
Tablo 3. 16.	400 °C, 600°C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımları, MPa .....	55
Tablo 3. 17.	Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı deney sonuçları, MPa.....	58
Tablo 3. 18.	Geopolimer numunelerin su emme ve boşluk oranları.....	60
Tablo 3. 19.	Geopolimer numunelerin karbonatlaşma derinlikleri .....	64

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1.	Alkali aktif cüruftan yapılmış konut binaları, Ukrayna[16].....	7
Şekil 1. 2.	Brisbane West Wellcamp Havalimanı .....	7
Şekil 2. 1.	Atık cam tozu görünümü .....	22
Şekil 2. 2.	Isıdac40 ve Refro50 kalsiyum alüminat çimentoları .....	23
Şekil 2. 3.	Sodyum hidroksit vesodyum silikat.....	24
Şekil 2. 4.	Ön deneme çalışmalarında üretilen harçlar .....	25
Şekil 2. 5.	Deneme çalışmalarında en yüksek ve en düşük dayanımlı numune....	28
Şekil 2. 6.	Çözeltilerin hazırlanması ve oda sıcaklığına soğutulması.....	31
Şekil 2. 7.	Hobart Mikseri .....	31
Şekil 2. 8.	Numunelerin Kalıplara Yerleştirilmesi.....	32
Şekil 2. 9.	Taze harç numunelerine ısıl kür uygulanması.....	32
Şekil 2. 10.	Yayıma Tablası Deneyi .....	33
Şekil 2. 11.	Arşimet Terazisi .....	34
Şekil 2. 12.	Eğilme Dayanımı Deneyi .....	35
Şekil 2. 13.	Basınç Dayanımı Deneyi.....	36
Şekil 2. 14.	Arşimet terazisi ile su içinde ağırlık ölçümü.....	37
Şekil 2. 15.	Yüksek sıcaklık uygulaması.....	38
Şekil 2. 16.	Rötre Deney Düzeneği.....	39
Şekil 2. 17.	Rötre Deney Numuneleri.....	39
Şekil 2. 18.	Karbonatlaşma Deneyi.....	40
Şekil 3. 1.	Taze geopolimer numunelerinin yayılma çapı değerleri .....	51
Şekil 3. 2.	Geopolimer harç numunelerinin birim ağırlık ve yoğunlukları .....	52
Şekil 3. 3.	Geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları .....	53
Şekil 3. 4.	Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımları .....	54
Şekil 3. 5.	400°C, 600°C ve 800°C sonrası eğilme dayanımları, MPa.....	55
Şekil 3. 6.	400°C sonrası numunelerin görünüşü.....	56
Şekil 3. 7.	600 °C sonrası numunelerin görünüşü.....	57
Şekil 3. 8.	800 °C sonrası numunelerin görünüşü.....	58
Şekil 3. 9.	Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı, MPa .....	59

Şekil 3. 10.	Geopolimer numunelerinin su emme ve boşluk oranı .....	60
Şekil 3. 11.	Numunelerin 30 günlük karbonatlaşma görüntüsü .....	62
Şekil 3. 12.	Numunelerin 90 günlük karbonatlaşma görüntüsü .....	63
Şekil 3. 13.	Numunelerin 180 günlük karbonatlaşma görüntüsü .....	64
Şekil 3. 14.	Numunelerin 30, 90 ve 180 günlük karbonatlaşma derinlikleri .....	65
Şekil 3. 15.	Geopolimer numunelerin 180 günlük rötre ölçümleri .....	66



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b>Al</b>	Alümin
<b>ASTM</b>	Amerikan Test ve Materyal Topluluğu
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alüminyum Oksit
<b>Ca</b>	Kalsiyum
<b>C-A-S-H</b>	Kalsiyum Alümino Silikat Hidrat
<b>EN</b>	Avrupa Normu
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gram/santimetreküp
<b>ISD40</b>	Isıdac40
<b>KA</b>	Kalsiyum Alüminat
<b>KAÇ</b>	Kalsiyum Alüminat Çimentosu
<b>MPa</b>	Mega Paskal
<b>Na</b>	Sodyum
<b>N/mm<sup>2</sup></b>	Newton/milimetrekare
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	Sodyum Silikat
<b>NaOH</b>	Sodyum Hidroksit
<b>N-A-S-H</b>	Sodyum Alümina Silikat Hidrat
<b>NH</b>	Sodyum Hidroksit
<b>NS</b>	Sodyum Silikat
<b>PÇ</b>	Portland Çimentosu
<b>RFR50</b>	Refro50
<b>Si</b>	Silis
<b>TS</b>	Türk Standartları
<b>XRD</b>	X Işını Kırınım Yöntemi

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyılda hızlı endüstriyel gelişme ve aşırı tüketim ciddi çevresel zararlara neden olmakta ve zararlı gaz salınımı artmaktadır. Küresel ısınma ile birlikte iklim değişikliği, dünyamız üzerinde olumsuz etkileri olan kritik bir çevre sorunudur. Son yıllarda çevrenin korunması ve sürdürülebilir gelişmenin sağlanması için enerji tasarrufu ve karbon salınımının azaltılması gerekliliği herkesçe kabul edilmektedir. Bu sebeple sınırlı kaynakların daha etkin kullanımı için atık geri dönüşümü önem kazanmaktadır [1].

Dünya genelinde her yıl büyük miktarda ortaya çıkan atık cam ciddi bir sorundur. Geri dönüştürülemeyen atık camlar depolama alanlarında bekletilmektedir. Atık camın kullanım alanları olarak agrega, dolgu malzemesi, katkı malzemesi ve alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcı üretimi gösterilebilir. Tüm atık camların geri dönüştürülebilir olduğu ve cam fabrikalarında tekrar kullanılabilmesi görülmesine rağmen, ana sorun toplanan camın kalitesi ve rengi arasındaki farktır. Farklı renk ve orijinli karışık camlar, yeni camda kontrol edilemeyen bir renk ve özelliklere neden olur ve geri dönüştürülemez, bu da düzenli depolama alanına atılması anlamına gelir [2,3]. Ancak inşaat vb. alanlarda renk faktörü önemli olmadığı için bu sektörde kullanımı ile bu faktör ortadan kaldırılabilir. Katı atıkların kullanımı ile depolama alanlarında azalma meydana gelir. Bu durumda sadece enerji tüketimi ve karbondioksit emisyonu azaltılmaz aynı zamanda atık geri dönüşümü sayesinde çevresel avantajlar da elde edilebilir [4]. Birleşmiş Milletlere göre, dünyada ortaya çıkan katı atıkların yıllık 200 milyon ton olduğu, bunun %7'sini ise atık camların oluşturduğu tahmin edilmektedir. Türkiye için atık cam miktarı 120000 ton olduğu ve ancak 80000 tonunun geri dönüştürülebildiği ifade edilmektedir [5,6].

Atıkların bertarafı için araştırılan yöntemlerden biri de kısmen/tamamen çimento yerine kullanılarak alkalilerle harç üretim yöntemidir. Alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcı üretim yöntemlerinden olan geopolimerler, alüminosilikat malzemenin alkali hidroksit ve/veya alkali silikatlar ile sentezlenerek üç boyutlu amorf yapıyı inorganik polimerler oluşturmasıdır. Geopolimerizasyon sürecinde mekanik özelliklerin belirlenmesinde alüminosilikatların kimyasal kompozisyonları önemlidir. Bu nedenle beklenen dayanım gelişiminin elde edilebilmesi için karışıma giren malzemelerde uygun oranda Silis (Si)

ve Alümin (Al) bulunması gerekmektedir. Atık cam tozu büyük miktarda Si içerdiği için daha düşük miktarda yer alan Al miktarını arttırmak için zengin Al içeren bir malzeme ilave edilerek bileşimin değiştirilmesi bağlayıcının özelliklerini iyileştirmektedir [5]. Bu amaçla, kalsiyum alüminatlı çimentolar (KAÇ) zengin alümina içeriği sayesinde cam tozu ile karıştırılarak Al eksikliği telafi edilebilmektedir [2,7].

Geopolimerler, çok kısa süre içinde dayanım kazanmaları, dış etkilere karşı dayanıklılığı, düşük ısı iletkenlikleri ve yüksek hacim stabilitesi açısından olumlu özelliklere sahiptirler [8]. KAÇ'lar ise, uygulamaya ve alüminyum kaynağının saflığına bağlı olarak geniş bir mineral bileşim aralığına sahiptir. Alümina içeriği %38- %80 arasında değişen özel bir çimento türüdür. Bütün KAÇ'larında monokalsiyumalüminat (CA) ana fazdır ve diğer kalsiyum alüminatlar daha az reaktif olan ikincil bileşenleri oluşturur. Kimyasal bileşimleri farklı olsa da tüm KAÇ türleri geopolimer üretimi için ek alümina kaynakları olarak kullanılabilir [2, 9].

Bu çalışmada; geopolimer harç üretiminde KAÇ'ın atık cam tozu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Atık camın elenip değirmenlerde un haline getirilmesiyle ortaya çıkan atık cam tozu, sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit (NaOH) yardımıyla aktifleştirilerek harç üretilmiştir. Atık cam tozu tabanlı harçlara KAÇ'ın etkisi belirlenmesi için cam tozu ile ikame edilerek deney numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen deney numuneleri 24 saat  $90^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ısıl küre tabi tutulmuştur. Ek olarak kalsiyum alüminat çimentolu harçlar ile karşılaştırma yapmak amacıyla TS EN 196-1 standardına göre %100 cam tozundan kontrol numuneleri üretilmiş ve bu numuneler ile deneyler yapılmıştır. Çalışmanın temel amaçları;

- a. Atık cam tozu ve KAÇ ile üretilen geopolimer harçların karışım oranı, aktivatör tipi ve kür özelliklerinden en uygun olanı belirlenerek yüksek dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip olabilmesi,
- b. Atık camların geri dönüşümü sağlanarak çevresel etkisinin azaltılması ve yakıt tasarrufu sağlanması,
- c. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalacak atık cam tozu tabanlı geopolimer harçlara KAÇ tipi çimentoların etkisinin belirlenmesi,

d. Elde edilecek olan geopolimer harçlarının sektörel kullanımının önünün açılabilmesi için dayanım ve dayanıklılık koşulları araştırılarak piyasa koşullarında uygun maliyetli üretim yapılmasına katkı sağlanması.



## GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

### 1.1.Geopolimerler

Küresel inşaat sektörü özellikle Portland Çimentosunun üretimi yoluyla ortaya çıkan faaliyetlerinin çevresel olumsuz etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu nedenle yeni, sürdürülebilir, düşük CO<sub>2</sub>'li inşaat malzemelerinin geliştirilmesi önemlidir. Beton sudan sonra dünyada en çok kullanılan ikinci inşaat ürünüdür ve dünya çapında yılda 10 milyon tonu aşan hacimlerde üretilmektedir. Yaygın kullanımı göz önüne alındığında, çimento üretim hacmi önemli çevresel sorunları beraberinde getirir [10].

Küresel toplum, gelişmekte olan dünyanın alt yapı ihtiyaçlarını karşılamak için sürekli artan miktarda beton ürettiğinden, alternatif çimento benzeri bağlayıcıların geliştirilmesine ihtiyaç vardır [10]. Geopolimer bağlayıcılar çimentoya alternatif bir malzemedir ve alüminosilikat malzemenin alkali çözeltisi ile polimerizasyonu sonucu üretilir [11].

Geopolimer malzemeler Portland Çimentosu ile karşılaştırıldığında umut verici özelliklere sahiptir. Ek olarak, uygun karışım tasarımı ile geopolimerler yüksek sıcaklığa karşı daha iyi direnç ve erken mukavemet gelişimi gibi özellikler açısından sıradan Portland Çimentosuna göre bazı özel avantajlar sunabilir.

#### 1.1.1. Geopolimerlerin Kimyası

Geopolimer bağlayıcılar, alüminosilikatca zengin içeriğe sahip malzemeler ile alkali aktivatörler arasında gerçekleşen reaksiyon sonucu oluşmaktadırlar. Bu reaksiyonlar Al ve Si monomerler meydana getiren Si-Al-O bağlarını oluştururlar. Monomerler, oligomere dönüşüp daha sonra da silikat polimerlere dönüşürler. Alüminosilikatlar ve alkaliler (Na<sub>2</sub>O) ile oluşan reaksiyonda alümino-silikat-hidrat (N-A-S-H) jeli oluşmaktadır. Bu jel yapı oksijen atomlarını paylaşarak birbirine bağlı SiO<sub>4</sub> ve AlO<sub>4</sub> tetrahedral birimleri içermektedir [12]. Böylece düşük kalsiyumlu alkali ile aktifleştirilmiş sistemlerdeki temel bağlayıcı, yapısal olarak düzensiz, yüksek oranda çapraz bağlı alüminosilikat jel yapısıdır [10]. Cam tozu yüksek oranda reaktif silika içerdiğinden aktivatörler ile reaksiyona girerek “geopolimer” olarak adlandırılan amorf yapıyı inorganik polimerler oluştururlar [13].

Geopolimer bağlayıcılar, sıradan Portland çimentosu (PÇ) ile karşılaştırılabilir özelliklere sahip katı bir bağlayıcı oluşturmak için alümina-silikat malzemeler ve



sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatörler arasındaki kimyasal reaksiyondan oluşan bir inorganik polimer türüdür. Alkali aktivatörün rolü, kaynak malzemede bulunan reaktif silika ve alüminayı çözmek ve polikondenzasyon reaksiyonu sırasında yüksek alkali ortam sağlamaktır. Bu durumda oluşan ana reaksiyon ürünü, Si-O-Al bağlarından oluşan üç boyutlu bir polimerik zincir ve halka yapısıdır [7].

Geopolimerizasyon reaksiyonlarının mekanizması ve kimyası son yirmi yılda bağlayıcının mekanizmasının ve kimyasının hem alüminosilikat öncü materyalinin hem de alkali aktivatörün özelliklerine bağlı olduğunu gösteren çok sayıda bilimsel tartışmanın konusu olmuştur [14]. Alkali ile aktive olan bağlayıcıların kimyası ile ilgili tartışmalarda, öncelikle bu sistemleri yapıya hakim olan jel tiplerine göre sınıflandırmak esastır. Bu ayrım esas olarak birincil reaksiyon ürününün bir alüminosilikat tipi jel veya bir (alümino)silikat hidrat (C-A-S-H) tipi jel olduğu sistemdeki kalsiyum içeriği temelinde çizilir. Kalsiyum açısından zayıf olan jel tiplerinden ilki genellikle N-A-S-H olarak temsil edilir. C-A-S-H-tipi jeller hemen hemen her zaman, çift katmanlı hidroksit grubunun ikincil ürünleriyle birlikte bulunur [10].

Geopolimerizasyon süreci, yüksek alkali ortamdaki moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve çoklu yoğuşma hareketinden meydana gelen ekzotermik bir kimyasal reaksiyondur. Geopolimerlerin kimyası temel olarak ham alüminosilikat malzemelerin tipi (atık toz vb.), kimyasal bileşimi ve reaktivitesinden ve alkali çözeltilerin kimyasal özelliklerinden etkilenir. Bu nedenle, öngörülebilir özelliklere sahip geopolimer karışımların tasarımı basit olmaktan uzaktır. Başlangıç malzemedeki reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün miktarı,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  oranı, sentez koşulu, kür süresi, kür sıcaklığı ve pH gibi çeşitli parametreler geopolimerlerin özelliklerini etkiler. Bununla birlikte,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün molar oranı, jeopolimer sistemlerinin priz süresi ve mukavemet gelişimi üzerinde temel bir etkiye sahiptir. Daha spesifik olarak, düşük bir Si/Al oranının (=1) mevcudiyeti, esas olarak poli(sialat) polimer yapılarının oluşumu ile sonuçlanır. Bu oran artarken poli(sialate-siloxo) (Si/Al=2), poli(sialate-disiloxo) (Si/Al=3) ve poly(sialate-multisiloxo) (Si/Al>3) tipi tipi jeopolimerik bileşiklerin oluşumunu desteklemektedir [15]. Yani bu oranın 1 olması halinde zeolit kristaline benzer seramik, tuğla ve yangın koruyucu malzemeler oluşabilir. Oran 2 olursa seramik amorf yapı oluşur ve çimento gibi bağlayıcı yapı ile beton üretilebilmektedir. Si/Al oranı 3 olması

halinde ise fiber glass yangına karşı koruyucu kaplama ve gelişmiş teknolojilerde kullanılması için yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler elde edilebilmektedir [13].

### **1.1.3. Geopolimerlerin Alkali Aktivasyon Süreci**

Feret 1939 yılında, Purdon 1940 yılında cüruf üzerinde çalışarak alkali ile aktivasyon sürecini başlatmıştır. İlerleyen yıllarda alkali aktivasyon kullanılan hammadde içeriğine göre sınıflandırılmıştır. Davidovits alkali aktivasyon üzerine önemli çalışmalar yapmıştır. Kireç taşı ve kaolinitin sinterleşmiş ürünleri ile dolomit gibi alüminosilikatları kullanarak 1979 yılında yeni bir bağlayıcı geliştirmiştir [13].

Alkali ile aktive edilmiş bir bağlayıcı ile geleneksel Portland çimentosu arasındaki en belirgin fark, Portland çimentosunun sertleşmesinin sadece su ile karıştırılarak elde edilmesi; aktivasyonun ise, sulu formda bir alkali bileşenin eklenmesini gerektirmesidir. Bu nedenle, bu uygulamada kullanılan alkali çözeltilerin özelliklerinin belirlenmesi önemlidir [10].

Geopolimer üretiminde yaygın kullanılan aktivatörler sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum sülfat ve sodyum metasilikattir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit üretim yoluyla elde edilir. Sodyum karbonat ve sodyum sülfat ise doğal kaynaklardan elde edilir. İçeriğindeki su oranı arttıkça sodyum silikatların yoğunluğu azalmaktadır [13].

### **1.1.4. Geopolimerlerin Kullanım Alanları**

Alkali aktif maddeler uzun yıllardır bilinmektedir. Ukrayna Mariupol'da (Şekil 1.1) gösterilen evler bu uygulamanın kullanımına örnektir ve 1960 yıllarında yapılmıştır. Evlerin inşasında demir-çelik cürufunun alkali ile aktivasyonu sonucu elde edilen bağlayıcı kullanılmıştır. İnşa edildiği yıllarda 7,5 MPa tasarım dayanımına göre yapılmış, 2012 yılında evden alınan örnekler üzerindeki testlerde basınç dayanımı 14 MPa olarak belirlenmiştir [16].



**Şekil 1. 1** Alkali aktif cüruftan yapılmış konut binaları, Ukrayna [16]

Avustralya'nın inşa edilen halka açık havalimanı Brisbane West Wellcamp Havalimanı (BWWA) (Şekil 1.2.), Kasım 2014'te tam olarak faaliyete geçmiştir. Bu proje, mühendislikte çok önemli anlam ifade eden dünyanın en büyük geopolimer beton projesidir. BWWA, yaklaşık 40.000 m<sup>3</sup> (100.000 ton) çimentosuz geopolimer beton ile inşa edilmiş olup, bu yeni beton sınıfının dünyadaki en büyük uygulamasıdır. Wagners firması tarafından geliştirilen ve Dünya Dostu Beton (EFC) olarak bilinen geopolimer betonun, yüksek eğilme çekme dayanımı, düşük büzülme ve işlenebilirlik özellikleri nedeniyle bu yapıya çok uygun olduğu tespit edilmiştir [17].



**Şekil 1. 2** Brisbane West Wellcamp Havalimanı

Alkali ile aktive edilen alkalin bağlayıcıların uygulama alanları;

1. Duvar blok elemanı üretimi
2. Prefabrik yapı inşaatı
3. Gaz beton uygulamaları
4. Yüksek sıcaklığa dayanıklı beton yapımı
5. Yapısal betonlar
6. Döşeme yapımı, temel yapımı
7. Petrol kuyuları
8. Beton büz boru yapımı [13]

## 1.2. Atık Cam

İnsanların cam yapmayı ilk kez ne zaman, nerede veya nasıl öğrendiği tam olarak belli değildir. İlk üretilen cam M.Ö. 3000 yıllarında Mezopotomya'da bulundu. İlk cam kaplar M.Ö. 1500 civarında Mezopotomya ve Mısır'da yapıldı. O zamanlar küçük fırınlar, kil çömleklerin kalitesiz olması ve ısının ham maddeleri eritmek için pek yeterli olmaması nedeniyle cam endüstrisi yavaş ve maliyetliydi. M.Ö. 30 civarında üfleme borusunun icadı cam üretimi daha kolay, daha hızlı ve daha ucuz hale getirdi ve cam ilk kez sıradan insanların kullanımına açıldı. Renksiz cam ilk olarak M.S. birinci yüzyılda manganez oksitinin tanıtılmasıyla ortaya çıktı [3].

Cam; silika (silikon oksit), sodyum karbonat, dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ve kireçtaşı ( $\text{CaCO}_3$ ) karışımının 1600°C'ye kadar yüksek sıcaklıkta eritilmesiyle üretilebilir. Karışım daha sonra kristalleşmeden katılaşmak üzere soğutulur. Sıvı ve katı olmayan hal, camı amorf bir malzeme yapar. Camlara renklerini ve belirli özelliklerini kazandırmak için özel katkı maddeleri kullanılır. Kimyasal bileşime ve kullanılan katkılara bağlı olarak farklı cam formları üretilir. Örnek olarak; alkali silikatlar, camsı silika, soda-kireç camları, kurşun camlar, borosilikat camlar, baryum camlar ve alüminosilikat camlar. Bu camlar çoğunlukla yeşil, kahverengi ve renksiz olmak üzere üç farklı renkte üretilmektedir.[3]

Hızla artan dünya nüfusu ve buna bağlı sanayileşme, atık işlemenin çevresel sonuçlarıyla ilgili endişeleri arttırmıştır. Günümüzde birçok endüstri ulusal ve uluslararası mevzuatı yerine getirmek için atık bertaraf yönetim sistemlerinin optimizasyonuna yatırım yapmaya başlamıştır. Potansiyel atık malzemelerin olumsuz çevresel etkilerini azaltmak ve doğal kaynakları korumak için geri dönüştürülmesi ve

diğer endüstriyel süreçlerde birincil veya ikincil hammadde olarak yeniden kullanılması teşvik edilir. Cam endüstrisinde cam geri dönüşümü nispeten yüksek bir ortalama orana ulaşmıştır [18].

Dünyada 2007 yılında toplam cam üretimi yaklaşık 89,4 milyon tondur. Aynı yıl toplam dünya üretiminin yaklaşık %30'unu oluşturan yaklaşık 38,3 milyon ton üretim yapan AB ülkeleri 2007 yılında AB'yi dünyanın en büyük cam üretici konumuna getirdi. AB'de cam üretiminin yaklaşık %83'ü soda kireç camıdır. Sanayileşmenin artması ve yaşam standardının iyileşmesi nedeniyle toplam cam üretiminin artması dolayısıyla atık camın da artması beklenmektedir. Örnek olarak 2002 yılında AB'nin toplam cam atığı 3 milyon ton iken, 2008 yılında AB'nin toplam cam atığı 4,1 milyon ton olmuştur [3]. Ayrıca AB'de atık cam şişeler katı atık akışında da önemli bir katı atık türüdür. Avrupa Konteyner Cam Federasyonu'na göre 2014 yılında 11,6 milyon ton atık cam şişe toplanmış ve Avrupa'da cam geri dönüşüm oranı %74'e ulaşmıştır [19].

Çevre Koruma Ajansı'nın (Environmental Protection Agency-EPA) yaptığı araştırmaya göre, 2015 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde ortaya çıkan atık cam miktarı 11,5 milyon ton civarındadır. Buna karşılan geri dönüşümde kullanılan cam miktarı ise 3 milyon ton düzeyindedir. Dolayısıyla, Amerika Birleşik Devletleri'nde geri dönüşüm oranı %27 düzeyindedir [20]. Türkiye'de ise atık cam miktarı 120000 ton olduğu ve ancak 80000 tonunun geri dönüştürülebildiği ifade edilmektedir [5,6]. Bazı ülkelere göre atık cam miktarları ve geri dönüşümde kullanılma oranları Tablo 1.1'de gösterilmiştir:

**Tablo 1.1** Ülkelere göre atık cam miktarları ve geri dönüşüm oranları [20]

Ülke	Atık Cam Miktarı (ton)	Geri Dönüşümde Kullanılma Oranı (%)
ABD	11,500,000	27
Kanada	116,000	68
Singapur	72,800	29
Portekiz	493,000	25
Türkiye	120,000	66
Almanya	3,200,000	94

Alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcı üretim yöntemlerinden olan geopolimerler, alüminosilikat malzemenin alkali hidroksit ve/veya alkali silikatlar ile sentezlenmesi ile ortaya çıkan üç boyutlu amorf yapılı inorganik polimerlerdir. Geopolimerizasyon sürecinde mekanik özelliklerin belirlenmesinde alüminosilikatların kimyasal

kompozisyonları ciddi önem taşır. Ulaşılmak istenen dayanım gelişiminin elde edilebilmesi için başlangıç malzemesinde optimum oranda Silis (Si) ve Alüminanın (Al) bulunması gerekir. Atık cam tozu önemli oranda Si içermektedir [5].

Cam tozu, toplanan atık camların değirmende öğütülüp toz haline getirilmesiyle elde edilmektedir. Bu toz, eleklerde elenerek kullanıma hazır hale getirilir. Cam tozu beton, kompozit, plastik, yalıtım, seramik, yapıştırıcı, epoksi, boya gibi farklı birçok sektörde maliyet düşürme ve/veya kalite artırma amacıyla kullanılmaktadır. Cam tozunun daha etkin kullanılması için tane boyutu büyük önem kazanmaktadır. Bu nedenle doğru elek kullanımını oldukça önemlidir [21]. Ayrıca cam tozunun silika açısından zengin olduğu bilinmektedir. Sodyum silikat jeli oluşturmak için alkaliler ile aktive edilebilir [22].

Camın geri dönüşümü için en erişilebilir ve en kolay yöntemlerden biri, metallerin temizlenmesinde, katkılı çimentolarda puzolan olarak, beton veya asfalt karışımında iri agrega olarak, aşındırıcı üretiminde hammadde olarak kullanılabilen toz haline getirilmesidir. İnce öğütülmüş cam tozu (38 ile 75 µm arası), bir puzolanın betona faydalı olabilmesi için gerekli olan %75'lik dayanım aktivite indeksi ön koşulunu karşılamaktadır [23].

Jani ve Hogland çimento ve cam endüstrilerinin, yüksek sera gazı emisyonları, yoğun enerji kullanımı ve dünyanın doğal kaynaklarının yoğun kullanımı nedeniyle birçok zorlukla karşı karşıya olduklarını belirtmişlerdir. Atık camın kimyasal bileşimi ve puzolanik özelliklerinin, bu atığın çimento ve beton endüstrilerinde kullanımını teşvik etmekte ve cam ve çimento endüstrileri için çevre dostu bir çözüm sunmakta olduğunu belirtmişlerdir. Cam atıkların inşaat sektöründe kullanılması bu atık için çevre dostu bir çözüm sunabilir ve cam ve çimento sektörlerinde de karşılaşılan sorunları azaltır [3].

Daha önce Poon ve Hong Kong Politeknik Üniversitesindeki iş arkadaşları, atık cam kırıntılarını beton bloklarda veya harç üretiminde ince agregalar olarak geri dönüştürmek için pratik yöntemler geliştirmek için çok çaba harcamıştı. Sonuçlar cam kırığının doğal ince agregalar olarak dahil edilmesinin camın emici olmayan doğası nedeniyle kuruma büzülmesini ve su emilimini azaltabileceğini göstermiştir. Dere kumunun cam kırıntıları ile değiştirilmesi, cam parçacıkların pürüzsüz yüzeyi ve düşük su emmesi nedeniyle betonun taze özelliklerini arttırmıştır. Ayrıca cam kırıntılarının eklenmesi asit saldırısına ve yüksek sıcaklık etkilerine karşı direnci iyileştirebilir [19].

Dünyanın farklı yerlerinde endüstriyel ve konut sektörleri tarafından büyük miktarda atık cam (tüketim sonrası cam) üretilmektedir. Bazıları geri dönüştürülmekle birlikte, bunların en uygun şekilde nasıl kullanılabileceğini görmek için birçok yöntem incelenmektedir. Geri dönüşüm için betona hem bağlayıcı hem de ince agrega katkı maddesi olarak ve harç gibi çimento esaslı malzemelerin üretimi için ve toprak iyileştirmede bağlayıcı olarak atık camı alkali veya geopolimer çimento üretiminde bir öncü olarak kullanmak mantıklıdır. Sonuç olarak, geri dönüştürülmemiş camlar genellikle çöplüklere atılmakta ve birçok çevresel soruna neden olmaktadır. Bir ton cam üretimi 0,39 metrik ton CO<sub>2</sub> saldığında, camın geri dönüştürülmesi sera gazı emisyonunda %37'lik bir azalma sağlayabilir [23].

### **1.3.Kalsiyum Alüminat Çimentosu**

Kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ) geopolimer çimentoları sentezlemek için doğal puzolanlara eklendiğinde ikincil bir reaktif alümina kaynağı olarak uygun olabilecek Al bakımından zengin bir malzemedir. KAÇ'lar yaklaşık %38 ile %95 arasında değişen farklı miktarlarda alümina içeren bir malzemedir. Orantılı bir kireçtaşı ve boksit karışımının eritilmesi elde edilen çimento ailesinden bir grup hidrolik bağlayıcıdır. KAÇ'lar, hızlı mukavemet gelişimi ve agresif kimyasallara ve yüksek sıcaklıklara karşı direnç gibi gelişmiş özellikleri ile de bilinir. KAÇ'ın ana reaktif bileşeni, reaktif alümina içeriği yüksek olan monokalsiyum alüminattır. Reaktif alümina içeriği nedeniyle, KAÇ'lar karışımın reaktivitesini arttırmak için geopolimerizasyon sürecinde düşük reaktif alümina içeriğinin öncülerine potansiyel olarak eklenebilir. KAÇ'nun geopolimer sistem özelliklerine etkisi konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır [7].

Kalsiyum alüminat çimentosu Portland çimentosunun (PÇ) 8 ayda kazandığı basınç dayanımını 1-2 gün gibi kısa sürede kazanabilmektedir. Ek olarak PÇ içeren betonlara göre daha yüksek sıcaklıklarda dayanımını koruyabilmekte, darbeye, aşınmaya karşı yüksek direnç gösterebilmekte ve asidik ortamlardan etkilenmemektedir. KAÇ, en yaygın özel çimento çeşididir buna rağmen dünya genelinde yıllık üretimi PÇ'nin %0,1 oranından daha azdır. Bu derece az kullanılmasının en büyük sebeplerinden biri, geçirdiği dönüşüm reaksiyonlarının yarattığı düzensizliktir. Hidratasyon sürecinde ortaya çıkan dönüşüm reaksiyonlarında gözenek yapısı artmakta ve dayanım azalmaktadır. PÇ, kalsiyum ve silisyum oksitleri ile C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S fazlarını oluşturup su ile tepkimeye girdiğinde kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidrat (C-H)

oluşumlarını sağlamaktadır. KAÇ, kalsiyum ve alüminyum oksitleri ile mono kalsiyum alüminat (KA) oluşturup su ile tepkimeye girdiğinde sıcaklığa bağlı olarak kararsız ya da yarı kararlı hidrasyon ürünlerini oluşturmaktadır [25].

ISIDAÇ40 tipi kalsiyum alüminatlı çimento, 6 saatte normal Portland çimentoların 28 günde kazandığı mukavemeti kazanabilir. Sülfat, asit direnci ve çok yüksek aşınma mukavemetine sahiptir. Hidrasyon ısısının yüksek olması nedeniyle, -10 °C sıcaklığa kadar soğuk havalarda uygulama imkânı sağlar. Köprü, havaalanı pistleri, otoyollar, baraj savakları ve döşeme yolları, madencilik, kanalizasyon sistemlerinin iç kaplamalarında, boru ve atık su mühendislik uygulamalarında, hayvan barınaklarında, merdivenlerde, endüstriyel kazanlarda, toplama rögarlarında, lentolar ve hatılarda, fabrika zeminlerinde ve prekast eleman imalatlarında kullanıma uygundur. Portland çimentosu ile belirli oranda karıştırıldığında ISIDAÇ40 priz süresini azaltma-uzatma imkânı sağlamaktadır. Bu özelliği ile yapı kimyasalı uygulamalarında ani sertleşen tamir harcı, kendiliğinden yerleşen beton imalatlarında kullanılır. Isıya dayanıklı agregalarla birlikte kullanıldığında 1300°C' ye kadar sıcaklık dayanımına sahiptir. REFRO50 tipi kalsiyum alüminatlı çimento, refrakter üreticilerinin beklentilerine cevap verecek şekilde tasarlanmış alüminyum içeriği %50'den daha fazla olan kalsiyum alüminat çimentosudur [26]. REFRO50 üreticilerin yüksek ısı dayanım beklentilerine cevap verecek şekilde özel olarak dizayn edilmiştir. REFRO50 1450°C'ye kadar ısıya dayanıklılık özelliğine sahiptir ve özel faz yapısı sayesinde refrakter uygulamalarında çok yüksek aşınma mukavemeti gösterir [25].

Alümina açısından zengin malzemeler olarak kalsiyum alüminat çimentoları, ilk ham karışım bileşimindeki reaktif alümina içeriği eksikliğini telafi etmek için potansiyel olarak cam tozuna eklenebilir [2].

Literatür incelendiğinde alkali ile aktive edilen artan KAÇ içeriği ile harçların basınç dayanımının iyileşmeler olduğu belirtilmektedir. Bu davranış, bağlayıcıya daha fazla KAÇ eklenmesiyle jeopolimer jeldeki Al ve Ca'nın artmasına bağlanmalıdır. Alümina, jeopolimer çimentolarda mukavemet gelişimi için kritik olan hidratlı sodyum alüminosilikat jelin (N-A-S-H) oluşumunda önemli bir rol oynar. Ek olarak, mevcut CaO, 3D polimerik yapı ile birlikte var olan ve mukavemet artışına neden olan alümina ve silika oluşturan C-A-S-H jeli ile reaksiyona girebilir [7,27].



#### 1.4. Aktivatörler

Alkali ile aktifleştirilmiş bir bağlayıcı ile geleneksel bir Portland çimentosu arasındaki en belirgin fark, Portland çimentosunun sertleşmesinin sadece suyla karıştırılarak indüklenmesi, alkali aktivasyonunun ise sulu formda bir alkalın bileşeninin eklenmesini gerektirmesidir. Alkali aktivatör olarak en yaygın olarak kullanılan hidroksit çözeltisi sodyum hidroksittir; potasyum hidroksit özel uygulamalarda bir miktar kullanım görürken, lityum, rubidyum ve sezyum hidroksitler sınırlı büyük ölçekli uygulamalara sahiptir. Alkali aktivasyonunda en çok ilgi çeken silikat çözeltileri ise, alkali katyonu olarak sodyum veya potasyum içerenlerdir. Alkalisilikatlar genellikle karbonat tuzlarından ve silikadan eritilerek cam oluşturmak üzere üretilir. Bu cam daha sonra cam suyu olarak da bilinen viskoz, yapışkan bir çözelti oluşturmak için ılık suda çözülür.[10]. Silika ve alümin içeren bütün malzemeler teorik olarak alkaliler ile aktive edilir [28].

Alkali aktivatör, geopolimer matrisin mukavemet gelişimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Normal olarak, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri, aktivatörler olarak en çok kullanılanlar arasındadır. Çünkü kolay temin etme ve iyi mekanik özellikler açısından en uygun aktivatörler oldukları çalışmalarla gösterilmiştir. Sodyum hidroksit çözeltisi (SH), alüminosilikat malzeme oluşturmak için öncü malzemelerden  $Si^{4+}$  ve  $Al^{3+}$  iyonlarının çözündürülmesi için yaygın olarak kullanılır. Sodyum silikat çözeltisi (SS) ise çözünür silikat türleri içerir ve bu nedenle geopolimerin yoğunlaşma sürecini desteklemek için kullanılır [29].

#### 1.5. Literatür Özeti

1950'lerin ortalarında eski Sovyetler Birliği'ndeki Portland Çimentosu alternatiflerine yönelik talep bağlamında Glukhovsky alkali metal içeren alkali çözeltilerle aktive edilen düşük kalsiyumlu veya kalsiyumsuz alüminosilikat öncüleri kullanan bağlayıcılar geliştirdi. Bağlayıcılara toprak çimentoları ve karşılık gelen betonlara toprak silikatları adını verdi. Bu malzemeler o zamanlardan beri altyapı, ticari ve ev inşaatlarında kullanılmıştır. Kuzey Avrupa'da F betonu olarak bilinen alkali aktif cüraf betonları 1980'lerde geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir. 1970'lerde Fransa'da Davidovits, metakaolin bazlı alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcıları geliştirdi ve ticarileştirmeye başladı. Ürünler ateşe dayanıklı, inorganik reçine olarak satıldığından, bu malzemeler

ile organik termoset reçineler arasındaki fiziksel özelliklerdeki bazı benzerlikleri vurgulamak için geopolimer terimini kullandı [10]. Puertas ve ark. yüksek fırın cürufunu aktive etmek için bir alkali aktivatörün hazırlanmasında cam atığı kullanma olasılığını araştırmışlardır. Farklı miktarlarda cam atığını bir NaOH/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> çözeltisi içinde çözerek bir dizi alkali aktivatör hazırlamışlardır. Bu aktivatörler daha sonra BFS'nin etkinleştirilmesinde ve 20 ± 2°C'de 1, 2, 7 ve 28 gün süreyle nemde kürlenmiş numunelerinin hazırlanmasında su-cam ve düz NaOH/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> çözeltisi ile karşılaştırmışlardır. Mekanik, mineralojik (XRD, FTIR) ve mikroyapısal (porozimetri, NMR ve SEM/EDX) ölçümlerine dayanarak, cam atıklarının NaOH/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> çözeltisinde pH = 13.6'da çözünmesinin, BFS'yi aktive eden bir alkali aktivatör sağladığını doğrulamışlardır. NaOH/Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> çözeltisi ve geleneksel su camı ile aktifleştirilmiş BFS'de gözlemlenenlere kıyasla benzer bileşim ve yapıya sahip C-A-S-H jelleri oluşturmuşlardır [14].

NaOH kullanılarak aktive edilen cam tozu, daha düşük ısıyla kürlenme sıcaklıklarında NaOH ile aktifleştirilmiş uçucu kül bağlayıcılardan daha yüksek basınç mukavemetleri sağlar. Aktifleştirilmiş cam tozu-uçucu kül karışımlarında sodyum silikat ve sodyum alüminosilikat (N-A-S-H) jellerinin bir kombinasyonu oluşurken, kaynak malzeme olarak tek başına cam tozu kullanıldığında sodyum silikat jeli reaksiyon ürünüdür. Aktifleştirilmiş cam tozu içeren bağlayıcıların, en yüksek mukavemet kaybına maruz kalan saf cam tozu bağlayıcılar ile neme veya alkaline bir çözeltiye maruz kaldıklarında parçalandığı ve mukavemet kaybettiği bulunmuştur. Sistemlere Al içeren (metakaolin) ve Ca içeren (cüruf) kaynak malzemelerin eklenmesi, ana bileşen olarak cam tozunun (%50 veya daha fazla) tutulması, neme dayanıklı reaksiyon ürünlerinin oluşmasına neden olarak mukavemet kaybını büyük ölçüde azaltır [24].

Literatür incelendiğinde geopolimerler ile ilgili çalışmalar son yıllarda büyük önem kazanmaktadır. Ancak atık camın alkaliler ile aktifleştirilerek kalsiyum alüminat katkıları ile geliştirilmesine yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır. Cam tozu ile yapılan çalışmalarda çoğunlukla farklı malzemelerle karışımı üzerine yer almaktadır;

Redden ve ark. (2014), cam tozunun farklı molaritelerde (4, 6 veya 8 M) NaOH çözeltileri ile etkinleştirilmesinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçların, NaOH ile aktifleştirilen cam tozunun, daha düşük sıcaklıkta külendiğinde NaOH ile aktifleştirilen uçucu kül sınıfına kıyasla daha yüksek basınç dayanımı

sergilediğini gösterdiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, düz cam tozu bazlı bağlayıcı ve cam tozu ve uçucu külün %50-50 ikili karışımına dayalı bağlayıcının, neme maruz kaldığında çok yüksek basınç dayanımı kaybına uğradığını söylemişlerdir. Bu mukavemet kaybı, suda çözünen ana alkali aktivasyon ürünü olarak sodyum silikatın oluşumuna bağlamışlardır [24].

Bakharev ve ark. cürufun alkali aktivasyonunu, sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum fosfat ve sodyum karbonat ve bu aktivatörlerin kombinasyonları kullanarak gerçekleştirmiştir. Sodyum silikatla aktive olan cüruf çimentoları için elde edilen basınç dayanımını, 20 ila 40 MPa aralığında bulmuşlardır ve çözelti modülüne ve alkalilerin konsantrasyonuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek silika modülünde, erken mukavemet azaldığını ve sertleşme süresi önemli ölçüde kısalacağını söylemişlerdir. Yüksek alkali konsantrasyonlarında sodyum silikat çözeltisi ile aktive edilen cürufun yüksek bir büzümeye sahip olduğunu ve hızlı sertleşen bir çimento gibi davrandığı bulmuşlardır [28].

Si ve ark. (2020), %0-20 arası cam tozu ilaveli metakaolin tabanlı geopolimerlerin mekanik özellikleri, nano boşluk yapısı ve kuruma büzülmesi davranışını araştırmışlardır. Hazırlanan numuneleri sırasıyla ortam sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta (60°C) kürelemişlerdir. Numunelerin mekanik özelliklerinin, düşük cam tozu içeriği (%5, %10) eklenerek geliştirilebildiğini söylemişlerdir. Mikroyapı ve nanogözenek yapısı analizi, cam tozu ile modifiye edilmiş geopolimer numunelerinde daha yoğun bir jel fazının oluştuğunu göstermiştir. Eklenen cam tozunun, numunelerin kurutma koşullarındaki su kayıp oranını azalttığını ve erken yaşlarda kuruma büzülmesinin azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. [30].

Vafaei ve Allahverdi (2017), cam tozu tabanlı geopolimerlere kalsiyum alüminat çimentosu ilavesi üzerine çalışmışlardır. Üç farklı Na<sub>2</sub>O oranında (%8, %10 ve %12) sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımından oluşan aktivatör çözeltisi ile üç farklı oranda (%8, %16 ve %24) kalsiyum alüminat çimentosu ile cam tozunu yer değiştirerek harç hazırlamışlardır. Hazırlanan harçları işlenebilirlik, priz süresi, basınç dayanımı, serbest alkali içeriği ve çiçeklenme oluşumuna eğilim açısından test etmişlerdir. Üretilen geopolimerin morfolojisini ve yapısını karakterize etmek için FTIR ve SEM analizleri de yapmışlardır. Optimum dayanımı %10 Na<sub>2</sub>O aktivatör oranında %24

kalsiyum alüminatlı çimento-cam tozu yer değişiminde elde etmişlerdir. Optimize edilmiş geopolimer harcın, 87 MPa'lık dikkate değer bir maksimum basınç dayanımı sergilediğini belirtmişlerdir [2].

Hadi ve ark. (2017), yüksek fırın cürufu ile alkali ile aktive edilmiş beton tasarımı üzerine Taguchi yöntemi kullanarak çalışmışlardır. Bağlayıcı içeriği 400, 450 ve 500 kg/m<sup>3</sup>, Aktivatör/Bağlayıcı oranı 0.35, 0.45 ve 0.55, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1.5, 2 ve 2.5 ve sodyum hidroksit konsantrasyonu 10, 12 ve 14 M olarak karışımlar hazırlanmıştır. Aktivatör/bağlayıcı oranı 0,35, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı 2,5 ve sodyum hidroksit konsantrasyonu 14 M olan numunelerin 7 günlük basınç dayanımını 60,4 MPa olarak bulmuşlardır [31].

Cao ve ark. (2018), ekstra Al ve Ca kaynağı olarak belirli miktarda kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ) eklenerek ortam sıcaklığında kürlenerek uçucu kül bazlı geopolimer betonun mekanik performansını araştırmışlardır. Uygun karışım oranlarını elde etmek için 3 farklı oranda (%5,10,20) KAÇ ve 3 farklı konsantrasyonda (10,12, 14 Mol) sodyum hidroksit kullanmışlardır. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranını %35, 40 ve 45 olarak 3 farklı seviyede, alkali aktivatörü sabit Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH=2,5 oranında kullanmışlardır. Sonuçların, KAÇ ikame oranının dayanım gelişiminde önemli bir rol oynadığını, buna karşın alkali aktivatörün bağlayıcıya oranının harçların işlenebilirliği üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gösterdiğini söylemişlerdir. Sırasıyla en yüksek mukavemeti ve en iyi işlenebilirliği elde etmek için iki uygun karışım önermişlerdir. Bu arada, mukavemet ve işlenebilirlik arasında bir denge sağlamak için başka bir karışım geliştirmişlerdir. Uçucu kül bazlı geopolimer karışımına KAÇ'ın dahil edilmesinin, ortam koşullarında mukavemet gelişimini büyük ölçüde desteklediğini söylemişlerdir. Böylece bu tip geopolimer beton, ısıyla kürlenme ihtiyacını ortadan kaldırarak yerinde inşaat için uygun olduğunu belirtmişlerdir. KAÇ değiştirme oranının, geopolimer harcın mukavemet gelişimini önemli ölçüde etkilediğini söylemişlerdir. Geopolimer harç için optimize edilmiş KAÇ değiştirme oranını, hem 7 hem de 28 günlük basınç dayanımları için %10 olarak belirlemişlerdir. KAÇ değiştirme oranı %20'ye yükseldiğinde, Al açısından zengin geopolimerin, nispeten düşük mekanik mukavemetle üretileceğini belirtmişlerdir. Basınç dayanımı için optimum karışım tasarımını, 14 M alkali çözelti konsantrasyonu, %10 KAÇ değiştirme oranı ve %35 aktivatör/bağlayıcı oranı ile elde etmişlerdir. 28 günlük optimum basınç dayanımını 56,8 MPa olarak bulmuşlardır [32].

Atabey ve Ay (2021), atık cam tozu esaslı geopolimerler harçlara kalsiyum alüminat çimentosunun etkisi üzerine çalışmışlardır. %10 Na<sub>2</sub>O oranında sıvı sodyum silikat aktivatörü ile farklı oranlarda (%5,10,15,20 ve %25) cam tozu ile KAÇ'ı yer değiştirerek harç hazırlamışlardır. Etüv kürü ve hava+etüv kürü uyguladıkları çalışmada en uygun dayanımı hava+etüv(90°C) küründe %5 cam tozu-KAÇ yer değişimi ile 25,5 MPa olarak elde etmişlerdir [5].

Allahverdi ve Mahinroosta (2020), inşaat ve yıkım atıkları, atık cam, kırmızı çamur, maden atıkları vb. gibi uçucu kül olmayan alüminosilikat endüstriyel atık malzemelerinin geopolimere geri dönüştürülmesine ilişkin son on yılda yayınlanmış literatürün sistematik bir incelemesini yapmışlardır. Alüminosilikat endüstriyel atıkların geopolimer üretimi için öncü malzeme olarak geri dönüştürülmesinin, bu konuda önemli bir adım olduğunu söylemişlerdir. Farklı inşaat ve yıkım atıkları türleri arasında ve beton atıkları ile karşılaştırıldığında tuğla, kiremit ve seramik atıkları, yüksek reaktif SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikleri nedeniyle geopolimerizasyon için daha yüksek potansiyel gösterdiklerini söylemişlerdir. Uygun alüminosilikat endüstriyel atıkların karakterize edilmesinin, uygun düzeltici materyaller kullanılarak kaynak materyallerin reaktivitesinin iyileştirilmesinin, sentez ve kür koşullarının optimize edilmesinin, sağlamlığın araştırılması için ileri araştırma faaliyetleri ve geopolimerin dayanıklılık performansı için gerekli olduğunu ve bu teknolojinin pratik uygulamasına kesinlikle katkıda bulunacağını söylemişlerdir [14].

Vafaei ve Allahverdi (2016), kalsiyum alüminat çimentosunun (KAÇ) doğal puzolanın geopolimerizasyonu üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Alkali aktivatör olarak farklı SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranlarına sahip NaOH ve sodyum silikat çözeltilerine, puzolana ağırlıkça %0, 8, 16 ve 24 oranında KAÇ ilave edilmiştir. Harçların işlenebilirliğini, 0.48–0.56 aralığında ayarlanan su/çimento oranları ile %110 ± %5'de sabitlemişlerdir. Kürlenmiş çimento numunelerinin priz süresi, işlenebilirliği, basınç dayanımı, reaktif içeriği ve serbest alkali içeriğini belirlemişlerdir. FTIR spektroskopisi ve XRD yapmışlardır. Tüm numuneleri üretirken ilk olarak puzolan-KAÇ karışımı ve kumu kuru halde karıştırmış ve ardından aktivatör solüsyonunu eklemişlerdir. Karışımı elle 3 dakika karıştırmış ve elde edilen harcı 50 mm'lik test küplerine dökmüşlerdir. Küpleri, nem dolabındaki kalıplarda yaklaşık 23.0 ± 2.0 C'de ve %95'in üzerinde bir bağıl nemde 24 saat tutmuşlardır. Daha sonra numuneleri kalıptan çıkarmış ve 95°C'de

20 saat süreyle kürlemişlerdir. Kürlendikten sonra geopolimer harçların fiziksel ve kimyasal özelliklerini karakterize etmişlerdir. Sonuçlara göre, kalsiyum alüminat çimentosunun dahil edilmesinin, bağlayıcının reaktif Al'sini arttırdığını, reaktif içeriklerin çözünmesini hızlandırdığını ve polikondenzasyon reaksiyonlarının ilerlemesini kolaylaştırdığını söylemişlerdir. Bağlayıcıdaki Na<sub>2</sub>O içeriği, MS ve KAÇ ikame seviyesinin harçların basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Basınç dayanımının, Na<sub>2</sub>O içeriği %10, MS 1.5 ve KAÇ içeriği %24 olan harç için elde edilen en yüksek değerle 9 ila 65 MPa arasında değişmekte olduğunu söylemişlerdir [7].

Vafaei ve ark. (2018) atık cam tozu ve kalsiyum alüminat çimentosu karışımına dayalı geopolimer çimentonun pH = 3 HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltilerindeki performansını 24 ay boyunca incelemişlerdir. Geopolimer harcı, ağırlıkça %10 Na<sub>2</sub>O (ağırlıkça kuru bağlayıcı) içeren bir aktivatör çözeltisi ile aktive edilen, atık cam tozu (ağırlıkça %76) ve kalsiyum alüminat çimentosundan (ağırlıkça %24) oluşan 1.5 silika modülüne (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O kütle oranı) sahip ikili bir karışımla hazırlamışlardır. Geopolimer harç numunelerini üretmek için, atık cam tozu/kalsiyum alüminat çimentosu karışımı ve standart kumu önce 2 dakika kuru karıştırmışlar ve ardından aktivatör solüsyonu eklemişlerdir. Ardından homojen bir taze harç elde etmek için 3 dakika daha karıştırmışlardır. 50 mm kübik çelik kalıplara döküldükten sonra taze harçları 24 saat oda sıcaklığında (23,0 ± 2,0°C) ve %95'in üzerinde bağıl nemde depolamış ve daha sonra kalıptan çıkarmış ardından 95 °C'de 20 saat boyunca hidrotermal kür şartlarına tabi tutmuşlardır. Ayrıca aynı büyüklükte bir grup portland çimentosu ve yüksek alümina çimentosu kontrol harcı numunesi hazırlanarak standart kür koşulunda 28 gün kür etmişler ve karşılaştırma amaçlı kullanmışlardır. Portland çimentosu ve yüksek alümina çimentosu harçları için su-bağlayıcı oranlarını, ASTM C 109 ve ASTM C 1437'ye göre işlenebilirliği 110 ± %5'de tutmak için sırasıyla 0,485 ve 0,550'de sabitlemişlerdir. Geopolimer harç, %3 ve %29'lük minimum kütle kayıpları ile kontrol harçlarına kıyasla her iki asit solüsyonunda da üstün dayanıklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Geopolimer çimentonun üstün dayanıklılığının, alüminosilikat yapısının daha yüksek stabilitesine ve ayrıca bu bağlayıcının asit saldırılarına karşı daha dirençli olmasına neden olan nispeten düşük kalsiyum içeriğine bağlanabileceğini söylemişlerdir [33].

He ve ark. (2020), farklı oranlarda soda kireç camı tozu (GP), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) ve kalsiyum alüminatın harmanlanmasının etkisini değerlendirmek için üçlü kontur diyagramıyla birlikte tek merkezli bir tasarım yönteminin kullanımını tanıtmışlardır. Agregada olarak kırılmış cam kırıntısı (GC) kullanılarak hazırlanan alkali aktifleştirilmiş çimento (AAC) harçlarının alkali-silika reaksiyonu (ASR) genişmesi, kuruma büzülmesi ve yüksek sıcaklık dayanımını incelemiştirler. Geopolimerin performansı ile öncü bileşimi arasındaki ilişki kurmuşlardır. Atık camın içeriğinin artmasıyla ASR genişlemesinin arttığını ve GGBS'nin değiştirilmesi olarak KAÇ'nin eklenmesinin ASR genişlemesini önemli ölçüde azaltabileceğini bulmuşlardır. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra harçların kalan dayanımının, KAÇ içeriğinin artmasıyla arttığını gözlemişlerdir. Yüksek sıcaklıkta kısmi erimesinden kaynaklanan cam tozu içeriğinin artmasıyla mukavemet katsayısının arttığını belirtmişlerdir. Kabul edilebilir ASR genişmesi ve kuruma büzülmesi elde etmek için GP içeriğinin %77-90 aralığında olması, GGBS içeriğinin %5'ten düşük olması ve KAÇ içeriğinin %10'dan yüksek olması gerektiği bulmuşlardır [34].

Tho-In ve ark. (2018), atık cam tozu ve yüksek kalsiyumlu uçucu kül içeren geopolimer harçların basınç dayanımlarını ve mikro yapılarını araştırmışlardır. Yüksek kalsiyumlu uçucu külü, geopolimer harçları üretmek için ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 seviyelerinde atık cam tozu ile değiştirmişlerdir. Aktifleştirilmiş çözeltiler olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Alkali sıvının bağlayıcıya oranı 0.6 ve sodyum silikatın sodyum hidroksite oranını 1,0 olarak belirlemişlerdir. Tüm numuneleri  $60 \pm 2$  °C'de 48 saat kür etmişler ve test edilene kadar  $23 \pm 2$  °C'de tutmuşlardır. En yüksek basınç dayanımını %20 öğütülmüş atık cam içeren numune ile elde 48 MPa (referans harcının %104'ü) olarak elde etmişlerdir [11].

Lloyd ve Rangan (2010), uçucu kül bazlı geopolimer beton üzerinde yapılan kapsamlı çalışmaların bir özetini sunmuşlardır. Su/geopolimer katı oranının kütlece geopolimer betonun basınç dayanımı ve işlenebilirliği üzerindeki etkisini belirlemek için testler yapmışlardır. Düşük kalsiyumlu uçucu kül bazlı geopolimer beton karışımlarının tasarımına yardımcı olmak için kütlece su/geopolimer katı oranı adı verilen tek bir parametre geliştirilmişlerdir. Bu parametrede toplam su kütlesinin, sodyum silikat çözeltisinin içerdiği su kütlesinin, sodyum hidroksit çözeltisinin yapımında kullanılan

suyun kütlesinin ve eğer varsa karışımında bulunan ekstra su kütlesinin toplamı olduğunu söylemişlerdir. Geopolimer katıların kütlesini, uçucu kül kütlesinin, sodyum hidroksit çözeltisini yapmak için kullanılan sodyum hidroksit katılarının kütlesinin ve sodyum silikat çözeltisindeki katıların kütlesinin (yani Na<sub>2</sub>O ve SiO<sub>2</sub>'nin kütlesi) toplamı olarak belirlemişlerdir. Test numuneleri olarak, 24 saat boyunca çeşitli sıcaklıklarda bir fırında ısıyla kürlenmiş 100×200 mm'lik silindirler kullanmışlardır. Sonuçların geopolimer betonun mükemmel özelliklere sahip olduğunu ve bir felaketten sonra yapıların tadilatı ve güçlendirilmesinde ihtiyaç duyulan prekast beton ürünleri üretmek için çok uygun olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Beton endüstrisinde geopolimer teknolojisinin daha fazla benimsenmesini sağlamak için, dayanıklılık alanında araştırmalara ihtiyaç olduğunu söylemişlerdir [35].

Wang ve ark. (2016), temel malzeme olarak endüstriyel yan ürün cürufu kullanarak farklı sıvı-katı oranları (0,50, 0,55, 0,60), farklı alkali çözeltiler (%0,5, %0,75, %1) ve cürufu atık cam tozu ile değiştirerek (%0, %10, %20) harç üretmişlerdir. Çalışmada toz haline getirilmiş öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Alkali aktivatörün ticari olarak %98 saflıkta alkali olduğunu ve NaOH çözeltisi yapmak için deiyonize su ile karıştırıldığını belirtmişlerdir. Sonuçlara bakıldığında sıvı-katı oranı 0.60 ve cam kumu değişimi %0, %10 ve %20 olduğunda, 28. günde basınç dayanımlarının sırasıyla 50.11 MPa, 50.71 MPa ve 53.46 MPa'dır olduğunu söylemişlerdir. Cam kumu değişiminin %10 ve %20 olduğunda, erken ultrasonik darbe hızı belirgin olmadığını söylemişlerdir. Ultrasonik darbe hızının, cam kumunun değiştirilmesiyle göreceli olarak arttığını belirtmişlerdir [1].

Fernandez ve ark. metakaolin ve KAÇ karışımının (ağırlıkça %20) alkali aktivasyonu ile 13 MPa'lık en yüksek basınç dayanımına sahip geopolimer macunlar geliştirmişlerdir ve 85°C'de 20 saat kür uygulamışlardır [36].



## BÖLÜM 2

### MATERYAL ve YÖNTEM

#### 2.1. Materyal

##### 2.1.1. Atık Cam Tozu

Harç karışımlarında alkali ile aktive etmek amacıyla atık cam tozu temin edilmiştir. Cam tozu %100 geri dönüşüm camın elenip değirmenlerde un haline getirilmesiyle üretilmiştir [37]. Cam tozunun tane boyutu 50 µm altındadır. Kimyasal özellikleri Tablo 2.1.' de, şekli ise Şekil 2.1'de gösterildiği gibidir. Kimyasal içeriğinin yaklaşık %70'i SiO<sub>2</sub>'den oluşmaktadır.

Tablo 2. 1Cam tozu kimyasal özellikleri

Özellik	Cam Tozu
SiO <sub>2</sub> (%)	69,42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,48
CaO (%)	8,27
MgO (%)	4,25
SO <sub>3</sub> (%)	-
Na <sub>2</sub> O (%)	12,31
K <sub>2</sub> O (%)	-
Cl <sup>-</sup> (%)	-
K. K. (%)	16,18
Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )	2,58



**Şekil 2. 1** Atık cam tozu görünümü

### **2.1.2. Kalsiyum Alüminat Çimentosu**

Bu çalışmada, kontrol numuneleri dışında geopolimer numunelerin üretimi için Kalsiyum Alüminat Çimentosu (KAÇ) kullanılmıştır. Isıdac40 ve Refro50 Kalsiyum Alüminat Çimentoları Çimsa Mersin Tesisinden temin edilmiştir. Çimentoların kimyasal içerikleri Tablo 2.2’deve görünüşleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2. 2** Isıdac40 ve Refro50 kimyasal özellikleri

<b>Özellik</b>	<b>Isıdac40</b>	<b>Refro50</b>
SiO <sub>2</sub> (%)	3,60	6,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	39,80	51,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	17,05	2,5
CaO (%)	36,20	38,8
MgO (%)	0,65	1,0
SO <sub>3</sub> (%)	0,04	0,2
Na <sub>2</sub> O (%)	0,16	0,3
K <sub>2</sub> O (%)		
Cl (%)	0,009	-
K. K. (%)	0,30	-
Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )	3,25	3,03



Şekil 2. 2 Isıdac40 ve Refro50 kalsiyum alüminat çimentoları

### 2.1.3. Dere Kumu

Çalışmada özgül ağırlığı 2,68, su emme oranı %1,97 olan dere kumu kullanılmıştır. Dere kumunun tane dağılımı Tablo 2.3.'de verilmiştir.

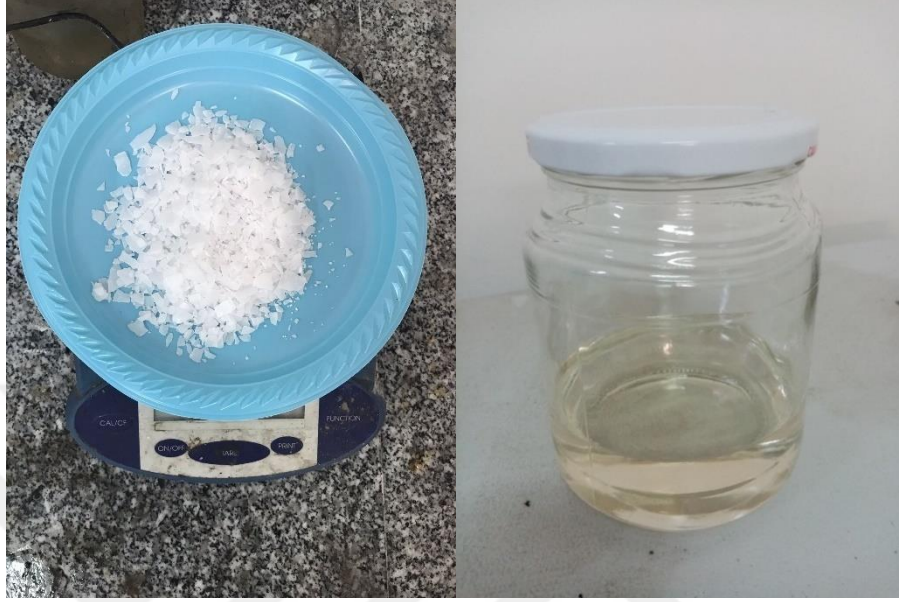
Tablo 2. 3Dere kumu tane dağılımı

Elek Çapı, mm	Geçen, mm
4,00	99,1
2,00	65,1
1,00	40,2
0,5	21,3
0,25	9,9
0,125	3,7
0,063	0,9

### 2.1.4. Aktivatörler

Çalışmada sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) aktivatör olarak kullanılmıştır. Kostik olarak bilinen sodyum hidroksitin, ucuzluğu ve kolay temin edilmesi önemli avantajıdır. Boncuk veya beyaz pul şeklinde, su ile bir araya geldiğinde ısı vererek çözünür. Diğer aktivatör olarak kullanılan sıvı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , cam suyu olarak da adlandırılan suda çözünen bir cam türüdür. Seramik sektörü başta olmak üzere birçok

alandaki kullanılır. Kolaylıkla istenilen miktarda temini mümkündür [13]. Şekil 2.3.'te kullanılan aktivatörler gösterilmiştir.



**Şekil 2. 3** Sodyum hidroksit ve sodyum silikat

#### **2.1.5.Su**

Harç üretiminde, Nevşehir şebeke musluk suyu kullanılmıştır. TS EN 1008 [38] standardına göre karışım için içilebilir suların kullanımının uygun olduğu ifade edilmektedir.

#### **2.2. Ön Deneme Çalışmaları**

Bu çalışmada yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmek için bir takım ön deneme çalışmaları yapılmıştır (Şekil 2. 4). Bu kapsamda en uygun üretim özellikleri için sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum hidroksit-sodyum silikat karışımı ayrı ayrı aktivatör olarak kullanılmıştır. Ayrıca doğrudan 24 saat 90°C etüv kürü veya 24 saat laboratuvar ortamında havada kürü sonrası 24 saat 90°C etüv kürü yöntemleri araştırılmıştır.



**Şekil 2. 5** Ön deneme çalışmalarında üretilen harçlar

*Birinci Ön Deneme Çalışması*

Sıvı sodyum silikatın tek başına aktivatör olarak kullanıldığı ilk çalışmada atık cam tozu ile üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine kalsiyum alüminat çimentosunun farklı kür koşullarında etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla atık cam tozu ve %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında KAÇ (Isıdaç40 ve Refro50) içeren on bir farklı karışıma sahip geopolimer harçlar üretilmiştir (Tablo 2.4).

Tablo 2. 4 Birinci ön deneme çalışması karışım oranları, g

Numune Kodu	Cam Tozu	Isıdaç40	Refro50	Kum	Su	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
CT100	450,0	-	-	1350	86	228
ISD5	422,5	22,5	-	1350	86	228
ISD10	405,0	45,0	-	1350	86	228
ISD15	387,5	67,5	-	1350	86	228
ISD20	360,0	90,0	-	1350	86	228
ISD25	337,5	112,5	-	1350	86	228
RFR5	422,5	-	22,5	1350	86	228
RFR10	405,0	-	45,0	1350	86	228
RFR15	387,5	-	67,5	1350	86	228
RFR20	360,0	-	90,0	1350	86	228
RFR25	337,5	-	112,5	1350	86	228

Harç üretiminde sıvı sodyum silikat %10 Na<sub>2</sub>O oranında kullanılmıştır. Taze geopolimer harçlar 24 saat 90°C etüv ve 24 saat hava + 24 saat 90°C etüv olmak üzere 2 farklı küre

maruz bırakılmıştır. Taze harçlara yayılma tablası ve sertleşmiş harç numunelerine su emme-boşluk oranı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. En yüksek 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri hava+etüv küründe %5 Isıdaç40 tipi çimento ile üretilen harçlarda sırasıyla 24,2 MPa ve 25,5 MPa olarak elde edilmiştir. Kontrol grubu CT100 harçlarının basınç dayanımı ise 7 günlük doğrudan etüv küründe 19,4 MPa ve 28 günlük doğrudan etüv küründe 20 MPa olarak ölçülmüştür (Tablo 3.4, Tablo 3.9) [5].

#### *İkinci Ön Deneme Çalışması*

Sodyum hidroksit ile yapılan ikinci çalışmada atık cam tozunun %15'den sonra KAÇ ilavesinin önemli dayanım artışı göstermemesi sebebiyle %5, %10, %15 oranında KAÇ (Isıdaç40 ve Refro50) içeren yedi farklı karışıma sahip geopolimer harçlar üretilmiştir (Tablo 2.5.).

**Tablo 2. 5** İkinci ön deneme çalışması karışım oranları, g

Numune Kodu	Cam Tozu	Isıdaç40	Refro50	Kum	Su	NaOH
CT100	450,0	-	-	1350	225	78
ISD5	422,5	22,5	-	1350	225	78
ISD10	405,0	45,0	-	1350	225	78
ISD15	387,5	67,5	-	1350	225	78
RFR5	422,5	-	22,5	1350	225	78
RFR10	405,0	-	45,0	1350	225	78
RFR15	387,5	-	67,5	1350	225	78

Aktivatör olarak sodyum hidroksit %10 Na oranında kullanılmıştır. Harçlar 24 saat 90°C etüv ve 24 saat hava + 24 saat 90°C etüv olmak üzere 2 farklı küre tabi tutulmuştur. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek basınç dayanım değerleri 28 günlük hava+etüv küründe CT100 grubu kontrol harcında 36,6 MPa olarak elde edilmiştir. ISD15 ve RFR15 grubu harçlarda 28 gün sonunda doğrudan etüv kürünesırasıyla26,4 MPa ve 19,2 MPa değerleri elde edilmiştir (Tablo 3.5, Tablo 3.10)

#### *Üçüncü Ön Deneme Çalışması*

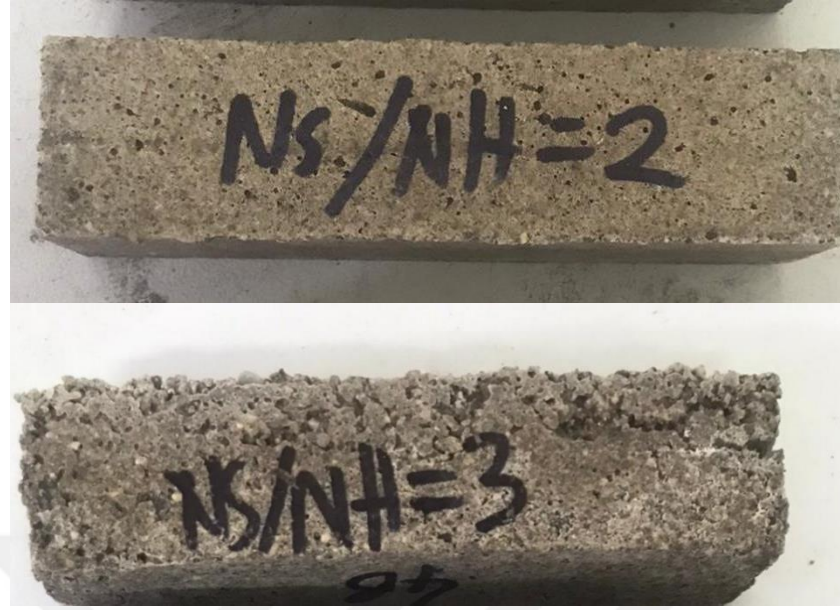
Yapılan üçüncü ön deneme çalışmasında, sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )- sodyum hidroksit (NaOH) karışımı ile harç dökümü yapılmıştır. Ancak  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ -NaOH karışımının hangi ağırlık oranında kullanılabileceğinin tespit edilmesi için %100 cam tozundan oluşan

karişimlar oluşturularak kıvam ve dayanım özellikleri test edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  (kısaltma NS/NH) oranı 1-3 arasında (1; 1,5; 2; 2,5 ve 3) değişen beş grup harç karişımı hazırlanmıştır (Tablo 2.6).

**Tablo 2. 6** Üçüncü ön deneme çalışması karişım oranları, g

Numune Kodu	Cam Tozu	Kum	Su	NaOH	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
NS/NH=1	450	1350	185	67	67
NS/NH=1,5	450	1350	167	62	93
NS/NH=2	450	1350	155	60	120
NS/NH=2,5	450	1350	142	55	137
NS/NH=3	450	1350	130	52	156

Harç karişımı hazırlamak için su/bağlayıcı oranı 0,50 ve kum/bağlayıcı oranı 3 seçilmiştir. Tüm karişımlar TS EN 196-1 standardına göre Hobart mikserinde hazırlanmıştır. Kalıba (40×40×160 mm) yerleştirilen taze harç numuneleri etüvde 90°C sıcaklıkta 24 saat süre ile ısı küre tabi tutulmuştur. Taze harç gruplarına yayılma tablası deneyi, sertleşmiş harçlar numunelerine 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Taze harçların işlenebilirlik değerleri  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı 2,5'dan sonra azalmıştır. Deneyler sonunda 7 ve 28 günlük en yüksek basınç dayanımı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$  olan numunelerde 34,7 ve 35,8 MPa olarak belirlenmiştir. Üretim özelliklerinin de kötüleşmesi ile en düşük eğilme ve basınç dayanımları  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=3$  olan grupta elde edilmiştir (şekil 2.5). Genel bir değerlendirme olarak  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$ 'nin cam tozu esaslı geopolimer harç numunesi üretimi için uygun aktivatör oranı olduğu ortaya konmuştur (Tablo 3.3, Tablo 3.6, Tablo 3.11).



**Şekil 2. 6** Deneme çalışmalarında en yüksek ve en düşük dayanımlı numune  
*Dördüncü Ön Deneme Çalışması*

Dördüncü ve son ön deneme çalışmasında önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlara dayanarak yüksek dayanım elde etmek amacıyla sodyum silikat ve sodyum hidroksit birlikte kullanılmıştır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2$  oranında uygun olduğu üçüncü ön denem ile ortaya konmuştur. Sodyum silikat %10  $\text{Na}_2\text{O}$  oranında kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak seçilmiştir. Cam tozu ve %5, 10, 15 KAÇ içeren 7 farklı karışıma sahip geopolimer harçlar üretilmiştir (Tablo 2.7.).

**Tablo 2. 7** Dördüncü ön deneme çalışması karışım oranları, g

Numune Kodu	Cam Tozu	Isıdac40	Refro50	Kum	Su	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	NaOH
<b>CT100</b>	450,0	-	-	1350	155	120	60
<b>ISD5</b>	422,5	22,5	-	1350	155	120	60
<b>ISD10</b>	405,0	45,0	-	1350	155	120	60
<b>ISD15</b>	387,5	67,5	-	1350	155	120	60
<b>RFR5</b>	422,5	-	22,5	1350	155	120	60
<b>RFR10</b>	405,0	-	45,0	1350	155	120	60
<b>RFR15</b>	387,5	-	67,5	1350	155	120	60

Geopolimer numuneleri etüvde  $90^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 24 saat süre ile ıslı küre tabi tutulmuştur. Taze harçlar üzerinde yayılma tablası, sertleşmiş harç numunelerine ise 7 ve 28 günlük



eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda KAÇ ilavesinin harcın kıvamına ve basınç dayanımına olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Ancak sabit işlenebilirlik değerlerinde özellikle yüksek oranda KAÇ içeren harçlar ile cam tozu tabanlı kontrol harçlarının karşılaştırmasını (CT100, ISD15 ve RFR15 için) yapabilmek amacıyla hedef yayılma çapı kullanımının uygun olacağı belirlenmiştir (Tablo 3.7, Tablo 3.12).

### 2.3.Deneylerin Tasarımı

Ön çalışmalar sonucunda üretim özellikleri ve dayanım sonuçları göz önüne alındığında geopolimer harç numuneleri elde edilmesi için uygun su/bağlayıcı oranı,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı, kür koşulları ve aktivatör tipi belirlenmiştir. Dayanım ve durabilite deney sonuçlarında tablo ve grafik üzerinde atık cam tozu (CT), Isıdac40 (ISD), Refro50 (RFR), sodyum hidroksit (NH), sodyum silikat (NS) şeklinde kısaltılarak verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki aşamalarla gerçekleştirilmiştir.

Aktivatör tipi, kür koşulları, su/bağlayıcı oranı ve NS/NH oranını belirlemek amacıyla bazı ön deneme karışımları yapılmıştır. Bu karışımlar yukarıda bölüm 2.2'de özetlenmiştir. Ön deneme çalışmaları sonucunda NS/NH=2 oranında ve 90 °C 24 saat kür koşullarında NS-NH karışımının cam tozu tabanlı kalsiyum alüminat çimentolu harç numunelerinde etkin olduğu görülmüştür. Ancak yüksek dayanım değerlerine ulaşmak ve ideal harç üretimi için için 130±10 mm yayılma çapı hedef alınmıştır. Çalışmada control amaçlı tamamen cam atık tozundan üretilen bir grup karışım ile %5, %10, %15 oranında kalsiyum alüminat çimentolarının (Isıdac40 ve Refro50) ayrı ayrı cam tozu ile yer değiştirerek elde edilen yedi farklı karışıma sahip geopolimer harçlar üretilmiştir. KAÇ ikamesi geopolimer numuneler için ek Al kaynağı olması nedeniyle yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında en uygun karışım parametreleri belirlenerek aşağıda Tablo 2.8.'de verilmiştir.

**Tablo 2. 8** Karışım oranları, g

Karışım Kodu	Cam Tozu	Çimento Tipi	Çimento	Kum	Su	NaOH	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
CT100	450,0	-	-	1300	130	60	120
ISD5	427,5	Isıdac40	22,5	1300	115	60	120
ISD10	405,0	Isıdac40	45,0	1300	115	60	120
ISD15	382,5	Isıdac40	67,5	1300	115	60	120

<b>RFR5</b>	427,5	Refro50	22,5	1300	115	60	120
<b>RFR10</b>	405,0	Refro50	45,0	1300	115	60	120
<b>RFR15</b>	427,5	Refro50	67,5	1300	115	60	120

#### 2.4.Harç Üretimi ve Kürü

Sodyum hidroksitle üretilen harçlarda önce karışıma girecek su cam kavanoz içine dökülüp üzerine sodyum hidroksit ilave edilerek tamamen eriyinceye kadar kavanoz çalkalanmıştır. Sodyum hidroksitin su ile tepkimesi ekzotermik olduğu için oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. (Şekil 2.6) Oda sıcaklığına gelen çözelti karıştırma kabına alınmıştır. Daha sonra karıştırma kabına sıvı sodyum silikat eklenmiştir. Sonra atık cam tozu konup 30 saniye karıştırdıktan sonra ikinci 30 saniye içerisinde kum ilave edilmiştir. Ardından yüksek hızda 30 saniye daha karıştırmaya devam edilmiştir. Karıştırıcı durdurulup ilk 30 saniyede kabın çeperlerindeki harç ortaya toplanarak toplam 90 saniye beklenmiştir. Ardından 60 saniye daha yüksek hızda devam edilerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Deneysel çalışmalarda üretilen harç karışımları TS EN 196-1'e uygun olarak Hobart Mikserinde (Şekil 2.7.) hazırlanmıştır.

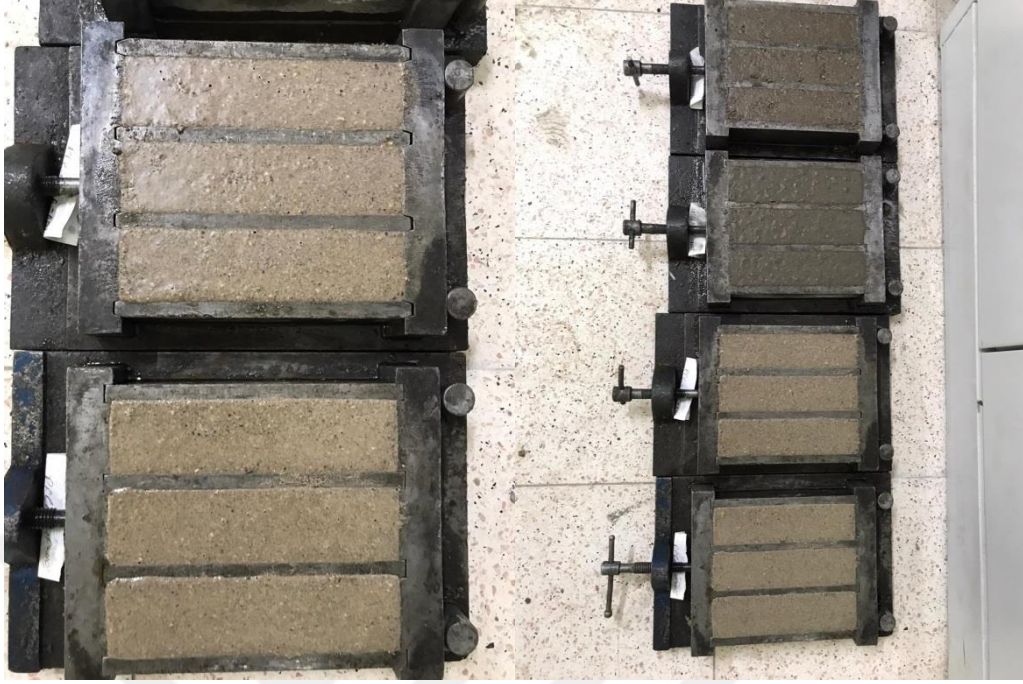
Tüm harç grupları dayanım veya durabilite deneyleri için numune türüne göre Şekil 2.8'de görülen 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara sıkıştırma işlemi yapılarak yerleştirilmiştir.



Şekil 2. 7 Çözeltilerin hazırlanması ve oda sıcaklığına soğutulması



Şekil 2. 8 Hobart Mikseri



**Şekil 2. 9** Numunelerin Kalıplara Yerleştirilmesi



**Şekil 2. 10** Taze harç numunelerine ısı k r uygulanması

Laboratuvarda hazırlanan taze harç numuneleri kalıplara yerleştirildikten sonra kalıp ile birlikte ıslık kür süresini tamamlamaları için etüve yerleştirilmiştir (Şekil 2.9). Kür süresi sonunda sertleşmiş harç numuneleri etüvden çıkarılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar laboratuvar ortamında soğuması beklenmiştir.

## 2.5. Deney Yöntemleri

### 2.5.1. Yayılma Tablası Deneyi

Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harçlara TS EN 1015-3 [39] standardına göre yayılma tablası yöntemi ile uygulanmıştır. Tabla üzerinde yayılan harcın çapı mm cinsinden ölçülerek işlenebilirlik değeri olarak kaydedilecektir. Deney düzeneği Şekil 2.10'da görüldüğü gibidir.



Şekil 2. 11. Yayılma Tablası Deneyi

### 2.5.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi

Sertleşmiş harçların kuru yoğunluk, görünür yoğunluk, doymuş kuru yüzey yoğunluk ve görünür birim ağırlık değeri ASTM C 642'ye göre Bağıntı 2.1, Bağıntı 2.2, Bağıntı 2.3 ve Bağıntı 2.4 yardımı ile belirlenmiştir. Deney düzeneği ise Şekil 2.11' de görüldüğü gibidir.

$$\text{Görünür Birim Ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{\text{Numune Boyutları}} \quad (\text{Bağıntı 2.1})$$

$$\text{Görünür Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{A_{FK} - A_{SU}} \quad (\text{Bağıntı 2.2})$$

$$\text{Kuru Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{FK}}{A_{KYD} - A_{SU}} \quad (\text{Bağıntı 2.3})$$

$$\text{KYD Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{KYD}}{A_{KYD} - A_{SU}} \quad (\text{Bağıntı 2.4})$$

$A_{FK}$ : Fırın kurusu ağırlığı (g)

$A_{KYD}$ : Kuru yüzey doymuş ağırlığı (g)

$A_{SU}$ : Su içindeki ağırlığı (g)



**Şekil 2. 12** Arşimet Terazisi

### 2.5.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

Deneylerde 40×40×160 mm ebatlarında üretilen numunelere TS EN 1015-11 standardına göre eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi mesnet açıklığı 100 mm, yükleme hızı 50 N/s olacak şekilde tek noktadan yükleme yapılarak 3 numunenin ortalama sonucu eğilme dayanımı değeri Bağıntı 2.5’e göre

hesaplanarak kaydedilmiştir. Üretilen numuneler 90°C’de 24 saat etüv kürü sonrası laboratuvar ortamında 7, 28, 56 ve 90 gün bekletilerek eğilme dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.

$$R_f = 1,5 \frac{F \times l}{b^3}$$

(Bağıntı 2.5)

Burada;

$R_f$ : Eğilmede çekme mukavemeti, N/mm<sup>2</sup>

b: Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (40 mm)

F: Prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, (N)

l: Destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (100 mm)



**Şekil 2.13 Eğilme Dayanımı Deneyi**

#### **2.5.4. Basınç Dayanımı Deneyi**

Eğilme deneyi sonucunda ikiye bölünen harç numunelerinin düzgün olarak çıkan kalıp yüzeyine basınç dayanımı deneyi, TS EN 1015-11 standardına göre Şekil 2.13’te belirtildiği gibi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı sonucunda ortaya çıkan iki yarım numune 40×40 mm test cihazı başlığı arasına yerleştirilip 500 N/s hızda yük

uygulanmış ve çıkan sonuçlar Bağıntı 2.6 ile hesap edilerek kırılan numunelerin ortalama değerleri basınç dayanım sonucu olarak kaydedilmiştir. Üretilen numuneler 90°C’de 24 saat etüv kürü sonrası laboratuvar ortamında 7, 28, 56 ve 90 gün bekletilerek basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

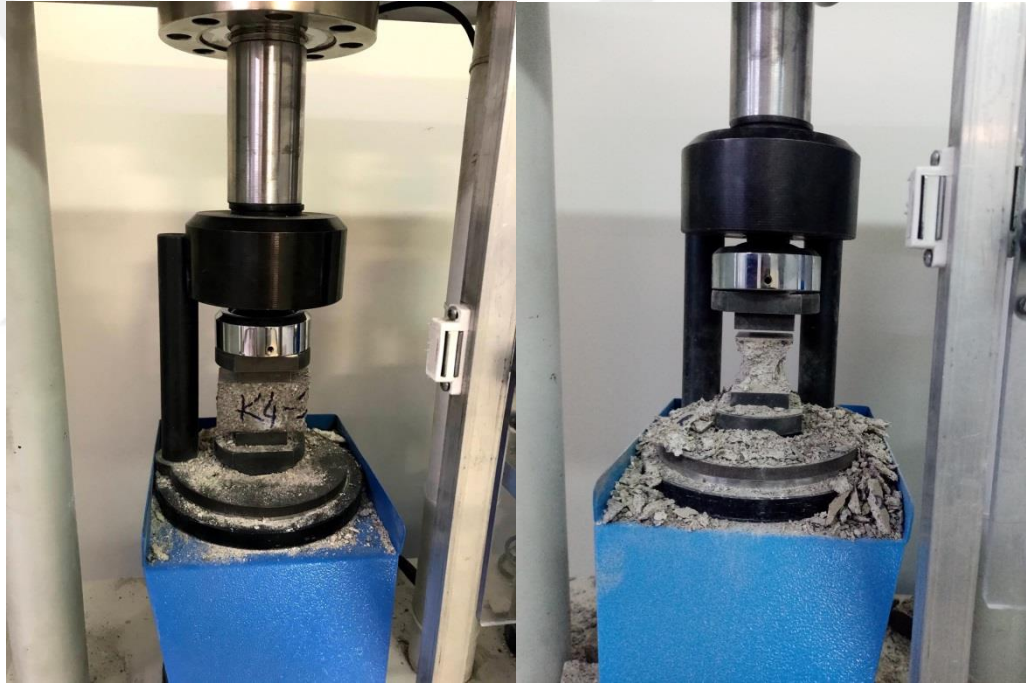
(Bağıntı 2.6)

Burada;

$R_c$ : Basınç mukavemeti, N/mm<sup>2</sup>

$b$ : Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

$F_c$ : Kırılmadaki en büyük kuvvet, (N)



Şekil 2. 14 Basınç Dayanımı Deneyi

### 2.5.6. Su Emme Boşluk Oranı Deneyi

Sertleşmiş numunelere ait su emme ve boşluk oranları tayini, kür sonrasında 40×40×160 mm’lik prizma numunelere uygulanmıştır. Numunelere ait fiziksel özellikleri tespit etmek için fırın kuru ağırlıkları, kuru yüzey doygun ağırlıkları ve Şekil 2.14’te gösterilen Arşimet terazisi yardımıyla su içinde ağırlık ölçümü yapılarak Bağıntı 2.7 ve 2.8 yardımı ile su emme ve boşluk oranı belirlenmiştir.



$$\text{Boşluk Oranı (\%)} = \frac{(A_{KYD} - A_{FK})}{(A_{KYD} - A_{SU})} \times 100 \quad (\text{Bağıntı 2.7})$$

$$\text{Su Emme Oranı (\%)} = \frac{A_{KYD} - A_{FK}}{A_{FK}} \times 100 \quad (\text{Bağıntı 2.8})$$

Burada;

$A_{FK}$ : Fırın kurusu ağırlığı (g)

$A_{KYD}$ : Kuru yüzey doygun ağırlığı (g)

$A_{SU}$ : Su içindeki ağırlığı (g)



**Şekil 2.15** Arşimet terazisi ile su içinde ağırlık ölçümü

### 2.5.7. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi

Deney numuneleri 40×40×160 mm boyutunda üretilerek yüksek sıcaklık direnci deneyi uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler yüksek sıcaklık fırınında 5°C/dakika sıcaklık artışı ile belirlenen sıcaklığa getirilmiş ve 60 dakika 400, 600 ve 800°C'de ayrı ayrı yüksek sıcaklığa maruz bırakılarak ortam sıcaklığında eğilme ve basınç dayanım kayıpları test edilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2. 16 Yüksek sıcaklık uygulaması

#### 2.5.8. Kuruma Büzülmesi Deneyi

Büzülmeye bağlı olarak numune boyunda oluşan değişimin belirlenmesi için ASTM C157/C157M standardı referans alınmıştır. Her grup karışım için 3 adet 40×40×160 mm boyutunda rötre numuneleri üretilip 23±2°C sıcaklık ve %50±4 bağıl nemi bulunan laboratuvarında bekletilmiştir. 180 gün boyunca numune boylarında meydana gelen değişim Bağıntı 2.10 yardımı ile ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17).

$$\Delta L_x = \frac{\text{CRD} - \text{initial CRD}}{G} \times 100$$

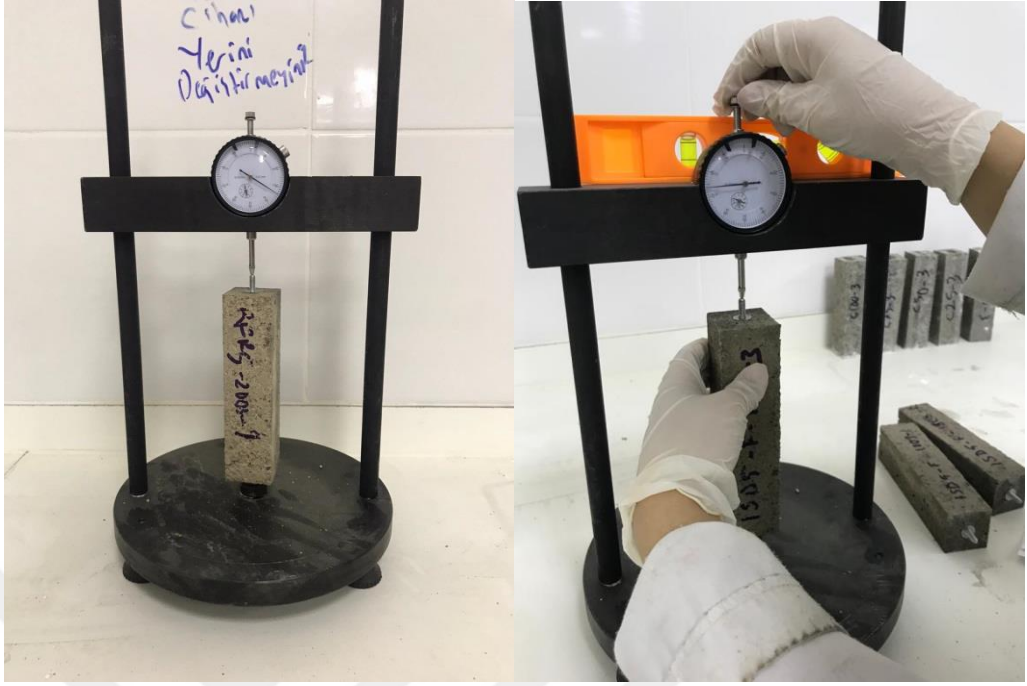
(Bağıntı 2.10)

$\Delta L_x$ : Numunenin yaşına bağlı olarak boydaki değişimi, %

CRD: Ölçüm aletinin yaşa bağlı olarak okuduğu son değer, mm

İnitial CRD: Ölçüm aletinin referans için deney başlangıcında okuduğu ilk değer, mm

G: Ölçüm noktaları arasındaki mesafe, mm



Şekil 2. 17 Rötire Deneş Düzenegİ



Şekil 2. 18 Rötire Deneş Numuneleri

### 2.5.9. Karbonatlaşma Deneyi

Karbonatlaşma derinliği 40×40×160 mm'lik prizmatik numuneler üzerinde TS EN 14630'a göre yapılmıştır. Harç numuneleri 180 günlük deney süresi boyunca sıcaklığı 23±2°C ve bağıl nemi %55±5 olan laboratuvar ortamında bulundurulurarak karbonatlaşma derinliği ölçümleri Bağntı 2.11 yardımı ile yapılmıştır (Şekil 2.18).

$$D = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4}$$

(Bağıntı 2.11)

Burada;

D: Karbonatlaşma derinliği, mm

A<sub>1,2,3,4</sub> : Dört kenardaki karbonatlaşma derinlikleri, mm



Şekil 2.19 Karbonatlaşma Deneyi

### 2.5.9. SEM İncelemeleri

KAÇ ikamesinin geopolimer harç numunelerin içyapıları üzerindeki etkilerini araştırmak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeler yapılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskopisi'nde, elektron kaynağından koparılan elektronlar vakum altında bulunan bir kolonda toplayıcı mercekler yardımıyla numune üzerine düşürülür. Numunelerin yüzeyinde yer alan atomlarla elektron demetinin etkileşmesi ile ortaya

ıkan parçacıklar ve x-ışınları belirlenerek, incelenmekte olan örneğin içyapısı ve topoğrafyası hakkında bilgi edinilmektedir [8].

90°C’de 24 saat ısıl kr uygulanarak üretilen geopolimer numunelerden (CT100, RFR5 ve RFR15) alınan kırık parçalar Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) tarafından öncelikle vakumlanmış, daha sonra altın-paladyum kaplama yapılmıştır. Şekil 2.19’da verilen Zeiss (GeminiSEM 500) marka cihaz kullanılarak farklı büyütmeler uygulanmıştır.



**Şekil 2. 19 SEM cihazı**

## BÖLÜM 3

### BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde; ikinci bölümde anlatılan deney metotlarına göre yapılan deneyler ve sonuçları değerlendirilmiştir. Ön deneme sonuçları göz önüne alınarak NaOH-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile kalsiyum alüminat çimentosu %5, %10 ve %15 oranında cam tozu ile ikame edilerek, üretim sonrası etüvde 24 saat 90 °C’de kür edilerek kullanılmıştır. Cam tozu tabanlı geopolimer harçlar, karışımlar taze halde iken yayılma tablası deneyi, 90°C’de 24 saat kür edildikten sonra birim ağırlık ve yoğunluk, eğilme ve basınç dayanımı, su emme ve boşluk oranı, yüksek sıcaklığa dayanıklılık, kuruma büzülmesi ve karbonatlaşma deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca iç yapı analizi için SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kalsiyum alüminat çimentosunun cam tozu tabanlı geopolimer harçlara etkisi tartışılmıştır.

#### 3.1. Ön Deneme Çalışmaları Deney Sonuçları

##### 3.1.1.Ön Deneme Çalışmaları Yayılma Çapı Değerleri

Çalışmada üretilen taze harç numunelerine ait yayılma değerleri, yayılan harç numunesinin ortalama çapının ölçülmesiyle belirlenmiştir. Ön deneme karışımları üzerinde TS EN 1015-3’e göre yapılan yayılma tablası deneyi sonucunda yayılma çapları Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3’te verilmiştir.

**Tablo 3. 1** Birinci ön deneme yayılma çapı değerleri

Numune Kodu	Yayılma Çapı, mm
<b>CT100</b>	125
<b>ISD5</b>	121
<b>ISD10</b>	125
<b>ISD15</b>	130
<b>ISD20</b>	136
<b>ISD25</b>	148
<b>RFR5</b>	150
<b>RFR10</b>	165
<b>RFR15</b>	171
<b>RFR20</b>	175
<b>RFR25</b>	180

Birinci ön deneme çalışmasında  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile üretilen numunelerin yayılma çapı değerleri incelenmiştir. ISD5 grubunda 121 mm olan yayılma çapı değeri ISD25 grubuna gelindiğinde 148 mm'ye yükselmiştir. RFR5 grubunda yayılma çapı değeri 150 mm ölçülmüştür. Bu değer RFR ikamesi arttıkça artmıştır. RFR25 grubunda yayılma çapı 180 mm olmuştur.

CT100 grubunda yayılma çapı değeri 125 mm ölçülmüştür. %10 ve üzerindeki ISD ikamesi ve RFR ikamesi yayılma çapı değerini CT100 grubuna göre arttırmıştır.

**Tablo 3. 2** İkinci ön deneme yayılma çapı değerleri

Numune Kodu	Yayılma Çapı, mm
CT100	166
ISD5	148
ISD10	149
ISD15	160
RFR5	150
RFR10	170
RFR15	170

NaOH ile üretilen ikinci ön deneme çalışması numunelerinin üretim sonucunda ölçülen yayılma çapı değerleri incelendiğinde ISD5, ISD10 ve ISD15 gruplarında sırasıyla 148 mm, 149 mm ve 160 mm değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.

RFR5, RFR10 VE RFR15 gruplarında ise yayılma çapı değerleri sırasıyla 150 mm, 170 mm ve 170 mm ölçülmüştür.

CT100 grubu numunelerinin ortalama yayılma çapı değeri 166 mm'dir. ISD ikamesi CT100 grubuna göre yayılma çapını azaltmış, RFR ikamesi ise yayılma çapı değerini arttırmıştır.

**Tablo 3. 3** Üçüncü ön deneme yayılma çapı değerleri

Numune Kodu	Yayılma Çapı, mm
NS / NH=1	171
NS / NH=1,5	169
NS / NH=2	163
NS / NH=2,5	125
NS / NH=3	121

Üçüncü ön deneme çalışması numunelerine ait yayılma çapı değerleri incelendiğinde NS/NH=1 oranında 171 mm olan yayılma çapının NS/NH=2 oranında 163 mm olduğu

görülmüştür. NS/NH=3 oranında ise yayılma çapı 121 mm ölçülmüştür. NS/NH oranı arttıkça yayılma çapı değeri azalmıştır.

### 3.1.2.Ön Deneme Çalışmaları Eğilme Dayanımı Değerleri

Birinci ön deneme çalışmasında  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile üretilen doğrudan etüv ve hava+etüv küründe bekletilen numunelerin eğilme dayanımı 7 ve 28 gün sonunda ölçülmüştür.

Elde edilen sonuçlar Tablo 3.4'te verilmiştir.

**Tablo 3. 4** Birinci ön deneme eğilme dayanımı sonuçları, MPa

Karışımlar	7 Günlük		28 Günlük	
	Etüv	Hava+Etüv	Etüv	Hava+Etüv
<b>CT100</b>	5,2	4,6	5,9	4,8
<b>ISD5</b>	4,6	5,0	7,3	5,2
<b>ISD10</b>	4,4	3,8	5,0	4,3
<b>ISD15</b>	3,2	2,8	5,0	3,4
<b>ISD20</b>	3,0	2,0	3,9	2,4
<b>ISD25</b>	2,7	1,7	3,2	1,9
<b>RFR5</b>	5,8	4,4	6,8	4,6
<b>RFR10</b>	5,2	3,1	5,5	3,5
<b>RFR15</b>	3,6	2,5	4,2	2,2
<b>RFR20</b>	3,3	2,3	3,7	1,8
<b>RFR25</b>	2,7	2,0	2,9	1,8

ISD5 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 4,6 MPa, hava+etüv küründe 5,0 MPa olan eğilme dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 7,3 MPa, hava+etüvde 5,2 MPa olmuştur. ISD25 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 2,7 MPa, hava+etüv küründe 1,7 MPa olan eğilme dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 3,2 MPa, hava+etüv küründe 1,9 MPa olmuştur.

RFR5 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 5,8 MPa, hava+etüv küründe 4,4 MPa olan eğilme dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 6,8 MPa, hava+etüvde 4,6 MPa olmuştur. RFR25 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 2,7 MPa, hava+etüv küründe 2,0 MPa olan eğilme dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 2,9 MPa, hava+etüv küründe 1,8 MPa olmuştur.

CT100 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 5,2 MPa, hava+etüv küründe 4,6 MPa olan eğilme dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 5,9 MPa, hava+etüvde 4,8 MPa



olmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde KAÇ ikamesinin CT100 grubuna göre numunelerde eğilme dayanımını azalttığı görülmüştür.

**Tablo 3.5** İkinci ön deneme eğilme dayanımı sonuçları, MPa

Karışımlar	7 Günlük		28 Günlük	
	Etüv	Hava+Etüv	Etüv	Hava+Etüv
<b>CT100</b>	4,6	6,1	5,1	7,3
<b>ISD5</b>	3,0	4,6	3,5	4,6
<b>ISD10</b>	3,4	4,9	4,4	5,0
<b>ISD15</b>	4,4	5,9	5,7	6,3
<b>RFR5</b>	3,1	3,8	3,6	4,2
<b>RFR10</b>	3,4	4,4	3,9	4,5
<b>RFR15</b>	3,8	5,4	3,9	5,5

Tablo 3.5'te NaOH ile üretilen doğrudan etüv ve hava+etüv kürüne tabi tutulan ikinci ön deneme çalışması numunelerinin ortalama eğilme dayanımı sonuçları verilmiştir.

ISD5 grubunda eğilme dayanımı 7 gün sonunda doğrudan etüvde 3,0 MPa, hava+etüv küründe 4,6 MPa, 28 gün sonunda doğrudan etüvde 3,5 MPa, hava+etüvde 4,6 MPa olmuştur. ISD15 grubunda eğilme dayanımı 7 gün sonunda doğrudan etüvde 4,4 MPa, hava+etüv küründe 5,9 MPa, 28 gün sonunda doğrudan etüvde 5,7 MPa, hava+etüv küründe 6,3 MPa olmuştur.

RFR5 grubunda eğilme dayanımı 7 gün sonunda doğrudan etüvde 3,1 MPa, hava+etüv küründe 3,8 MPa, 28 gün sonunda doğrudan etüvde 3,6 MPa, hava+etüvde 4,2 MPa olmuştur. RFR15 grubunda eğilme dayanımı 7 gün sonunda doğrudan etüvde 3,8 MPa, hava+etüv küründe 5,4 MPa, 28 gün sonunda doğrudan etüvde 3,9 MPa, hava+etüv küründe 5,5 MPa olmuştur.

CT100 kontrol grubunda eğilme dayanımı 7 gün sonunda doğrudan etüvde 4,6 MPa, hava+etüv küründe 6,1 MPa, 28 gün sonunda doğrudan etüvde 5,1 MPa, hava+etüv küründe 7,3 MPa ölçülmüştür. KAÇ ikamesi eğilme dayanımını genel olarak arttırmıştır. Fakat CT100 grubu ile kıyaslandığında eğilme dayanımını iyileştirdiği gözlenmemiştir.

**Tablo 3.6** Üçüncü ön deneme eğilme dayanımı sonuçları, MPa

Karışımlar	7 Günlük	28 Günlük
------------	----------	-----------

<b>NS/NH=1</b>	5,3	6,3
<b>NS/NH=1,5</b>	4,9	5,2
<b>NS/NH=2</b>	6,4	7,0
<b>NS/NH=2,5</b>	5,9	6,1
<b>NS/NH=3</b>	4,1	4,3

Üçüncü ön deneme çalışmasının eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 3.6'da verilmiştir. NS/NH=1 oranında 7 günlük eğilme dayanımı 5,3 MPa, 28 günlük eğilme dayanımı 6,3 MPa ölçülmüştür. NS/NH=2 oranında 7 günlük eğilme dayanımı 6,4 MPa'ya, 28 günlük eğilme dayanımı ise 7,0 MPa'ya ulaşmıştır. NS/NH=3 olduğunda ise eğilme dayanımı 7 günlük 4,1 MPa'ya, 28 günlük 4,3 MPa'ya düşmüştür. Bu sonuçlar incelendiğinde NS/NH=2 oranında daha yüksek eğilme dayanımı sonuçları elde edildiği görülmüştür.

**Tablo 3. 7** Dördüncü ön deneme eğilme dayanımı sonuçları, MPa

<b>Karışımlar</b>	<b>7 Günlük</b>	<b>28 Günlük</b>
<b>CT100</b>	8,4	9,3
<b>ISD5</b>	5,5	5,8
<b>ISD10</b>	6,0	6,0
<b>ISD15</b>	6,2	6,4
<b>RFR5</b>	5,1	6,0
<b>RFR10</b>	6,0	6,5
<b>RFR15</b>	6,3	6,5

Dördüncü ön deneme çalışmasının 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları Tablo 3.7'de verilmiştir. ISD5 grubunun 7 günlük eğilme dayanımı 5,5 MPa, 28 günlük eğilme dayanımı 5,8 MPa ölçülmüş; ISD15 grubunun 7 günlük eğilme dayanımı 6,2 MPa, 28 günlük eğilme dayanımı 6,4 MPa ölçülmüştür.

RFR5 grubunun 7 günlük eğilme dayanımı 5,1 MPa, 28 günlük eğilme dayanımı 6,0 MPa ölçülmüş; RFR15 grubunun 7 günlük eğilme dayanımı 6,3 MPa, 28 günlük eğilme dayanımı 6,5 MPa ölçülmüştür.

CT100 grubu kontrol numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımı 8,4 MPa, 28 günlük eğilme dayanımı 9,3 MPa ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde KAÇ ikamesinin dördüncü ön deneme çalışmasında kontrol grubuna göre eğilme dayanımını azalttığı görülmüştür. Kür süresinin 7 günden 28 güne çıkarılması dayanımı genel

olarak iyileştirmemiştir. KAÇ ikamesinin artması ise eğilme dayanımını bir miktar arttırmıştır.

### 3.1.3.Ön Deneme Çalışmaları Basınç Dayanımı Değerleri

Birinci ön deneme çalışmasına ait ortalama basınç dayanımı sonuçları Tablo 3.8’de verilmiştir.

**Tablo 3. 8** Birinci ön deneme basınç dayanımı sonuçları, MPa

Karışımlar	7 Günlük		28 Günlük	
	Etüv	Hava+Etüv	Etüv	Hava+Etüv
<b>CT100</b>	19,4	18,8	20,0	19,4
<b>ISD5</b>	20,0	24,2	22,3	25,5
<b>ISD10</b>	18,1	19,8	18,6	20,3
<b>ISD15</b>	17,8	16,9	18,5	18,0
<b>ISD20</b>	17,6	17,1	17,8	17,8
<b>ISD25</b>	16,3	15,2	16,4	16,8
<b>RFR5</b>	21,4	19,5	22,1	20,7
<b>RFR10</b>	19,2	19,3	19,5	20,6
<b>RFR15</b>	17,4	18,6	17,9	20,1
<b>RFR20</b>	16,9	18,6	17,1	19,6
<b>RFR25</b>	12,7	14,6	13,1	16,0

ISD5 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 19,4 MPa, hava+etüv küründe 18,8 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 20,0 MPa, hava+etüvde 19,4 MPa olmuştur. ISD25 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 16,3 MPa, hava+etüv küründe 15,2 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 16,4 MPa, hava+etüv küründe 16,8 MPa olmuştur.

RFR5 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 21,4MPa, hava+etüv küründe 19,5 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 22,1 MPa, hava+etüvde 20,7 MPa olmuştur. RFR25 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 12,7 MPa, hava+etüv küründe 14,6 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 13,1 MPa, hava+etüv küründe 16,0 MPa olmuştur.

CT100 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 19,4 MPa, hava+etüv küründe 18,8 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 20,0 MPa, hava+etüvde 19,4 MPa olmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde KAÇ ikamesinin CT100 grubuna göre %5 cam tozu ile yer değişiminde basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür.

Cam tozu ve kalsiyum alüminat çimentosu yer değişimi %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ise basınç dayanımının git gide azaldığı görülmüştür.

**Tablo 3.9** İkinci ön deneme basınç dayanımı sonuçları, MPa

Karışımlar	7 Günlük		28 Günlük	
	Etüv	Hava+Etüv	Etüv	Hava+Etüv
<b>CT100</b>	30,3	34,6	33,9	36,6
<b>ISD5</b>	24,2	25,7	26,7	26,2
<b>ISD10</b>	26,7	29,2	29,2	29,8
<b>ISD15</b>	29,2	30,9	32,0	32,3
<b>RFR5</b>	23,0	23,3	24,7	23,8
<b>RFR10</b>	24,2	25,1	25,1	27,6
<b>RFR15</b>	28,2	29,8	29,2	30,1

Tablo 3.9’da ikinci ön deneme çalışmasına ait ortalama basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. ISD5 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 24,2 MPa, hava+etüv küründe 25,7 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 26,7 MPa, hava+etüvde 26,2 MPa olmuştur. ISD15 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 29,2 MPa, hava+etüv küründe 30,9 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 32,0 MPa, hava+etüv küründe 32,3 MPa olmuştur.

RFR5 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 23,0 MPa, hava+etüv küründe 23,8 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 24,7 MPa, hava+etüvde 23,8 MPa olmuştur. RFR15 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 28,2 MPa, hava+etüv küründe 29,8 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 19,2 MPa, hava+etüv küründe 30,1 MPa olmuştur.

CT100 grubunda 7 gün sonunda doğrudan etüvde 30,3 MPa, hava+etüv küründe 34,6 MPa olan basınç dayanımı 28 gün sonunda doğrudan etüvde 33,9 MPa, hava+etüvde 36,6 MPa olmuştur. Ortalama basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde ikinci ön deneme çalışması karışımlarında CT100 grubuna göre KAÇ ikamesinin basınç dayanımını iyileştirmediği görülmüştür.

**Tablo 3.10** Üçüncü ön deneme basınç dayanımı sonuçları, MPa

Karışımlar	7 Günlük	28 Günlük
<b>NS/NH=1</b>	30,2	31,9
<b>NS/NH=1,5</b>	25,9	29,2
<b>NS/NH=2</b>	34,7	35,8

<b>NS/NH=2,5</b>	29,9	31,8
<b>NS/NH=3</b>	22,2	23,9

Üçüncü ön deneme çalışması sonucunda üretilen numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 3.10’da verilmiştir. 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde en yüksek dayanıma sahip oranın NS/NH=2 oranı olduğu görülmektedir. NS/NH=2 oranında 7 günlük ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları sırasıyla 34,7 MPa ve 35,8 MPa ölçülmüştür. Tamamen (%100) cam tozu ile üretilen üçüncü ön deneme çalışmasında kür süresi basınç dayanımında çok büyük bir artış sağlamamıştır.

**Tablo 3. 11** Dördüncü ön deneme basınç dayanımı sonuçları, MPa

<b>Karışımlar</b>	<b>7 Günlük</b>	<b>28 Günlük</b>
<b>CT100</b>	34,7	35,7
<b>ISD5</b>	32,6	37,8
<b>ISD10</b>	32,8	39,5
<b>ISD15</b>	40,0	40,5
<b>RFR5</b>	34,2	40,2
<b>RFR10</b>	35,1	43,6
<b>RFR15</b>	43,3	46,4

Dördüncü ön deneme çalışmasının 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Tablo 3.11’de verilmiştir. ISD5 grubunun 7 günlük basınç dayanımı 32,6 MPa, 28 günlük basınç dayanımı 37,8 MPa ölçülmüş; ISD15 grubunun 7 günlük basınç dayanımı 40,0 MPa, 28 günlük basınç dayanımı 40,5 MPa ölçülmüştür.

RFR5 grubunun 7 günlük basınç dayanımı 34,2 MPa, 28 günlük basınç dayanımı 40,2 MPa ölçülmüş; RFR15 grubunun 7 günlük basınç dayanımı 43,3 MPa, 28 günlük basınç dayanımı 46,4 MPa ölçülmüştür.

CT100 grubu kontrol numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı 34,7 MPa, 28 günlük basınç dayanımı 35,7 MPa ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde KAÇ ikamesinin dördüncü ön deneme çalışmasında kontrol grubuna göre basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür. Kür süresinin 7 günden 28 güne çıkarılması CT100 grubunda dayanımı büyük oranda etkilemese de KAÇ ilave edilen gruplarda dayanım artış görülmüştür. KAÇ ikamesinin artması ise basınç dayanımını bir miktar arttırmıştır.

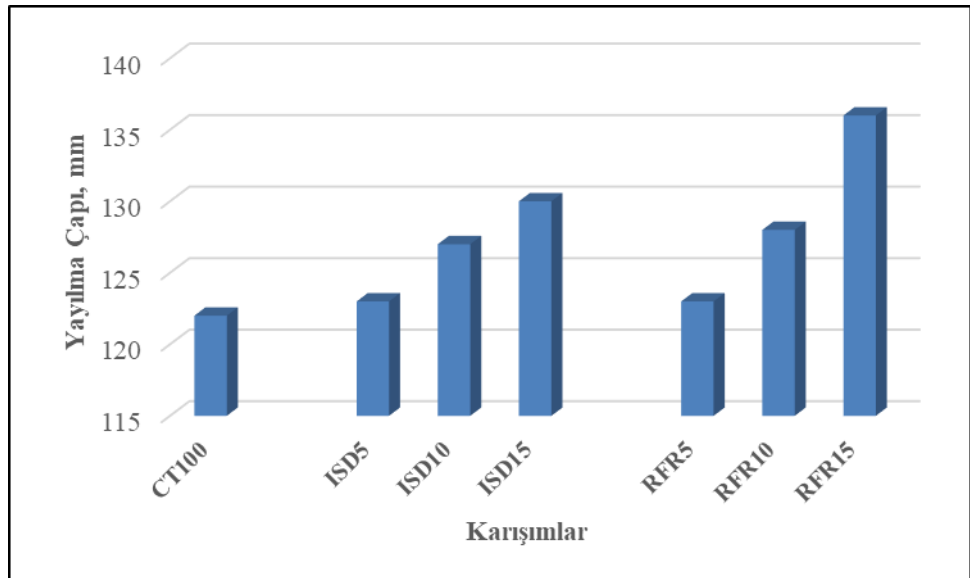
### **3.2. Yayılma Tablası Deney Sonuçları**

Üretilen geopolimer harç numunelerinin yayılma çapları Tablo 3.12’de verilmiştir.

**Tablo 3. 12** Taze harçların yayılma çapları

NumuneKodu	Yayılma Çapı, mm
<b>CT100</b>	122
<b>ISD5</b>	123
<b>ISD10</b>	127
<b>ISD15</b>	130
<b>RFR5</b>	123
<b>RFR10</b>	128
<b>RFR15</b>	136

Alkaliler ile aktifleştirilmiş atık cam tozu tabanlı geopolimer harç numunelerinin yayılma çapları 130±10 mm arasında ölçülmüştür. Kontrol grubu harcı olan CT100 ile üretilen geopolimer harç numunesinin yayılma çapı değeri 122 mm olarak ölçülmüştür. Isıdaç40 ile üretilen harçlar 123-130 mm arasında, Refro50 ile üretilen harçlar ise 123-136 mm arasında yayılma değerlerine sahiptir. Geopolimer harçlara KAÇ ikamesi arttıkça yayılma çapında artış gözlenmiştir. En yüksek yayılma değeri RFR15 tipi KAÇ ile üretilen harçlarda 136 mm olarak elde edilmiştir. Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi %5 ve %10 KAÇ ilavesi hem Isıdaç40 hem Refro50 tipi harçlarda benzer yayılma değerlerine sahiptir. Ancak KAÇ ilavesi CT100 harçlara göre kıvamı iyileştirmiştir. Vafaei ve Allahverdi deneysel çalışmalarında, cam tozu tabanlı harçlarda kalsiyum alüminat çimentosunun işlenebilirliği iyileştirdiğini belirtmiştir [2].



**Şekil 3. 1** Taze geopolimer numunelerinin yayılma çapı değerleri

**3.3.Birim Ağırlık ve Yoğunluk Deney Sonuçları**

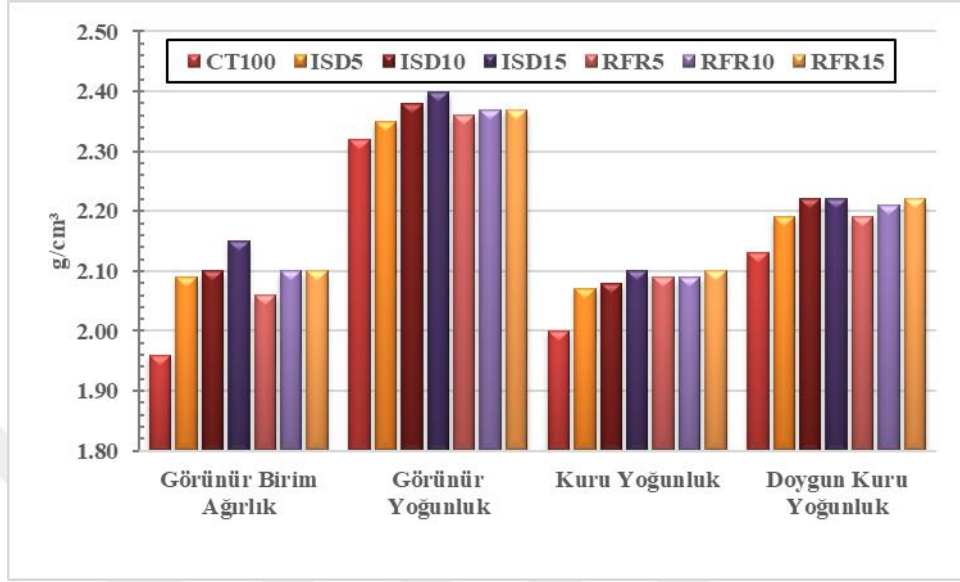
Alkaliler ile aktifleştirilmiş atık cam tozu tabanlı geopolimer harç numuneleri etüvde 24 saat ısıtma kürlerini tamamladıktan sonra ortam sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiştir. Elde edilen numunelerin görünür birim ağırlık, görünür yoğunluk, kuru yoğunluk ve doymuş kuru yüzey yoğunluk değerleri ASTM C 642'ye göre ölçülmüş ve Tablo 3.13.'te verilmiştir.

**Tablo 3. 13** Geopolimer numunelerin birim ağırlık ve yoğunlukları

No	Birim Ağırlık ve Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> )				
	Karışım	Görünür Birim Ağırlık	Görünür Yoğunluk	Kuru Yoğunluk	Doymuş Kuru Yoğunluk
1	CT100	1,96	2,32	2,00	2,13
2	ISD5	2,09	2,35	2,07	2,19
3	ISD10	2,10	2,38	2,08	2,22
4	ISD15	2,15	2,40	2,10	2,22
5	RFR5	2,06	2,36	2,09	2,19
6	RFR10	2,10	2,37	2,09	2,21
7	RFR15	2,10	2,37	2,10	2,22

Çalışmada elde edilen tüm numune gruplarının birim ağırlık ve yoğunluklarındaki değişim Şekil 3.2'de gösterilmiştir. CT100 grubu karışımın görünür birim ağırlığı 1,96 g/cm<sup>3</sup> ve görünür yoğunluğu 2,32 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. %5,10 ve15 Isıdaç40 tipi KAÇ içeren geopolimer numunelerin görünür birim ağırlıkları sırasıyla 2,09, 2,10 ve 2,15 g/cm<sup>3</sup>'tür. Görünür yoğunlukları ise sırasıyla 2,35, 2,38 ve 2,40 g/cm<sup>3</sup> ölçülmüştür. %5, 10 ve 15 Refro50 tipi kalsiyum alüminat çimentosu içeren geopolimer numunelerin ise görünür birim ağırlıkları 2,06, 2,10 ve 2,10g/cm<sup>3</sup>, görünür yoğunlukları ise sırasıyla 2,36, 2,37 ve 2,37g/cm<sup>3</sup> arasında ölçülmüştür. Kuru yoğunluk ve doymuş kuru yoğunluk değerlerindeki değişim de birim ağırlık ve görünür yoğunlukta gibi KAÇ ilavesi ile bir miktar artış göstermiştir. Kalsiyum alüminat çimentosu ikamesinin sertleşmiş harçların birim ağırlıklarını biraz arttırdığı görülmüştür. Bunun sebebi cam tozunun yoğunluğunun 2,58 g/cm<sup>3</sup> iken Isıdaç40 3,25g/cm<sup>3</sup> ve Refro50 3,03 g/cm<sup>3</sup> değerlerinde olmasıdır. Her harç grubunun (ISD ve RFR) kendi içinde yoğunluk farkının fazla olmamasının sebebi ise cam tozu ile ikame oranlarının en fazla %15 gibi düşük

seviyelerde olmasıdır. Genel olarak Isıdaç40 tipi KAÇ ile üretilen harçların birim ağırlık ve yoğunlukları Refro50 ve cam tozu ile üretilen karışımlara göre yüksektir. ISD15 karışımı hem birim ağırlık hem de yoğunluk açısından en yüksek değerlere sahiptir.



Şekil 3. 2 Geopolimer harç numunelerinin birim ağırlık ve yoğunlukları

### 3.4. Eğilme Dayanımı Deneç Sonuçları

Geopolimer numunelerin ortalama eğilme dayanımı sonuçları ölçülmüş Tablo 3.14 ve Şekil 3.3'te verilmiştir. ISD5 grubunun 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla 3,9 MPa, 4,3 MPa, 5,0 MPa ve 5,2 MPa olarak ölçülmüştür. ISD15 grubunun ise 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla 5,0 MPa, 6,5 MPa, 7,5 MPa ve 7,7 MPa olarak ölçülmüştür.

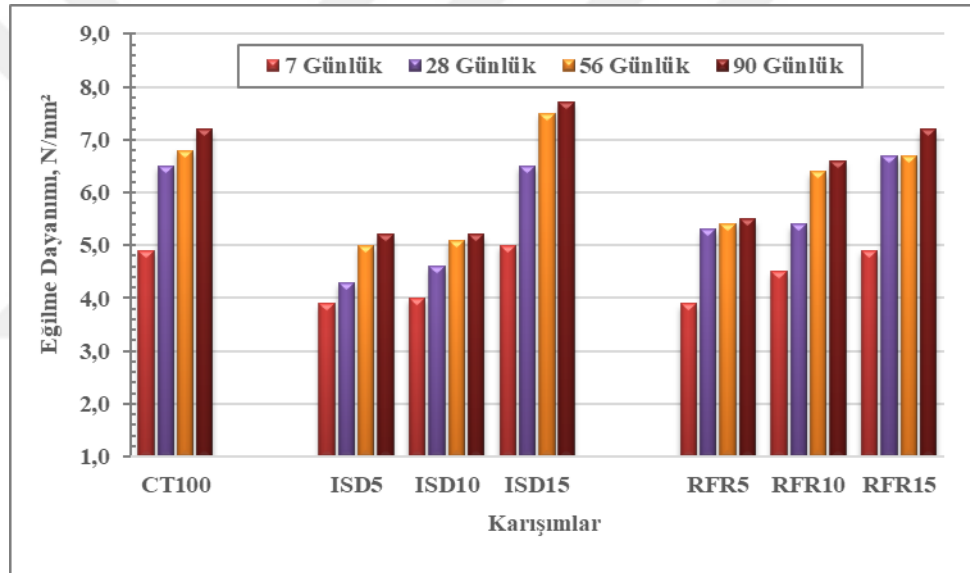
RFR5 grubunun 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla 3,9 MPa, 5,3 MPa, 5,4 MPa ve 5,5 MPa olarak ölçülmüştür. RFR15 grubunun ise 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla 4,9 MPa, 6,7MPa, 6,7 MPa ve 7,2 MPa olarak ölçülmüştür.

CT100 kontrol grubunun 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla 4,9 MPa, 6,5 MPa, 6,8 MPa ve 7,2 MPa olarak ölçülmüştür.



**Tablo 3. 14** Ortalama eğilme dayanımı sonuçları, MPa

Karışımlar	7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	90 Günlük
CT100	4,9	6,5	6,8	7,2
ISD5	3,9	4,3	5,0	5,2
ISD10	4,0	4,6	5,1	5,2
ISD15	5,0	6,5	7,5	7,7
RFR5	3,9	5,3	5,4	5,5
RFR10	4,5	5,4	6,4	6,6
RFR15	4,9	6,7	6,7	7,2



**Şekil 3. 3** Geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları

### 3.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Geopolimer numunelerin ortalama basınç dayanımı sonuçları ölçülmüş Tablo 3.15 ve Şekil 3.4'te verilmiştir. 90°C'de 24 saat etüvde kür edilen numuneler laboratuvar ortamında deney günü (7, 28, 56 ve 90 gün) gelinceye kadar bekletilmiştir. ISD5 grubunun 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 34,1 MPa, 34,4 MPa, 37,6 MPa ve 38,7 MPa olarak ölçülmüştür. ISD15 grubunun ise 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 48,2 MPa, 48,7 MPa, 50,3 MPa ve 51,3 MPa olarak ölçülmüştür.

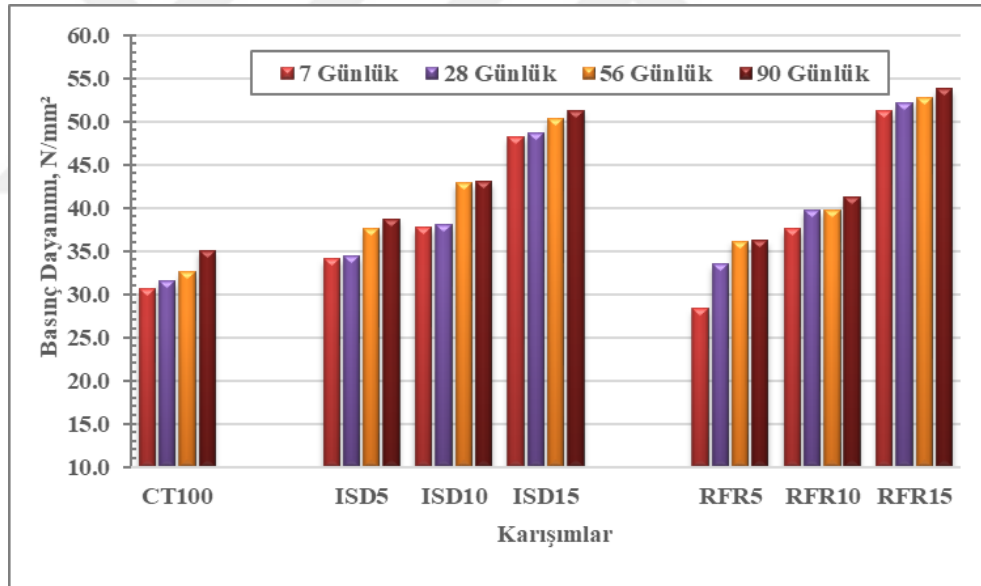
RFR5 grubunun 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 28,3 MPa, 33,5 MPa, 36,1 MPa ve 36,2 MPa olarak ölçülmüştür. RFR15 grubunun ise 7, 28,

56 ve 90 gün sonunda eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla 51,3 MPa, 52,1 MPa, 52,7 MPa ve 53,8 MPa olarak ölçülmüştür.

CT100 kontrol grubunun 7, 28, 56 ve 90 gün sonunda basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 30,6 MPa, 31,5 MPa, 32,6 MPa ve 35,1 MPa olarak ölçülmüştür.

**Tablo 3. 15** Ortalama basınç dayanımı sonuçları, MPa

Karışımlar	7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük	90 Günlük
CT100	30,6	31,5	32,6	35,1
ISD5	34,1	34,4	37,6	38,7
ISD10	37,7	38,0	42,9	43,0
ISD15	48,2	48,7	50,3	51,3
RFR5	28,3	33,5	36,1	36,2
RFR10	37,6	39,8	39,8	41,3
RFR15	51,3	52,1	52,7	53,8



**Şekil 3. 4** Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımları

### 3.6.Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deney Sonuçları

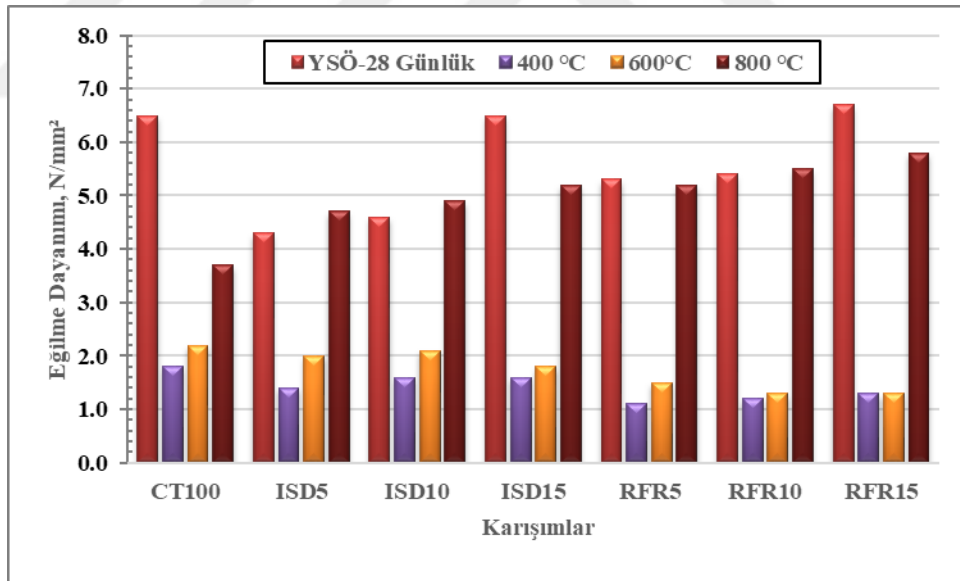
#### 3.6.1. Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Yüksek sıcaklık etkisini araştırmak için üretilen geopolimer harç numuneleri 24 saat 90 °C’de ısıtıldıktan sonra oda sıcaklığında 28 gün bekletilmiştir. 28 gün sonunda fırın sıcaklığı 5 °C/dak sıcaklık artışı ile 400 °C, 600 °C, 800 °C sıcaklıklarda 60 dakika deney sıcaklığına tabi tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası numunelerin

görünümü Şekil 3.6, 3.7 ve 3.8’de verilmiştir. Deney numuneleri oda sıcaklığına gelince eğilme ve basınç dayanımı uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi (YSÖ) 28 günlük numunelerin dayanımları kıyaslama yapabilmek için yüksek sıcaklık sonrası elde edilen eğilme dayanımı değerleri ile birlikte Tablo 3.16 ve Şekil 3.5’te verilmiştir.

**Tablo 3. 16** 400 °C, 600°C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımları, MPa

Karışımlar	Yüksek Sıcaklık Öncesi (28 Günlük)	400 °C	600°C	800 °C
CT100	6,5	1,8	2,2	3,7
ISD5	4,3	1,4	2,0	4,7
ISD10	4,6	1,6	2,1	4,9
ISD15	6,5	1,6	1,8	5,2
RFR5	5,3	1,1	1,5	5,2
RFR10	5,4	1,2	1,3	5,5
RFR15	6,7	1,3	1,3	5,8



**Şekil 3. 5** 400°C, 600°C ve 800°C sonrası eğilme dayanımları, MPa

Numunelerin 400 °C’de yakıldıktan sonra elde edilen eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde ISD5 grubunun eğilme dayanımı 1,4 MPa, ISD15 grubunun eğilme dayanımı, 1,6 MPa ölçülmüştür. RFR5 grubunun eğilme dayanımı 1,1 MPa, RFR15 grubunun eğilme dayanımı 1,3 MPa ölçülmüştür. CT100 kontrol grubunun eğilme dayanımı ise 1,8 MPa elde edilmiştir.



**Şekil 3. 6** 400°C sonrası numunelerin görünüşü

Numunelerin 600 °C’de yakıldıktan sonra elde edilen eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde ISD5 grubunun eğilme dayanımı 2,0 MPa, ISD15 grubunun eğilme dayanımı, 1,8 MPa ölçülmüştür. RFR5 grubunun eğilme dayanımı 1,5 MPa, RFR15 grubunun eğilme dayanımı 1,3 MPa ölçülmüştür. CT100 kontrol grubunun eğilme dayanımı ise 2,2 MPa elde edilmiştir.



**Şekil 3. 7** 600 °C sonrası numunelerin görünüşü

Numunelerin 800 °C'de yakıldıktan sonra elde edilen eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde ISD5 grubunun eğilme dayanımı 4,7 MPa, ISD15 grubunun eğilme dayanımı, 5,2 MPa ölçülmüştür. RFR5 grubunun eğilme dayanımı 5,2 MPa, RFR15 grubunun eğilme dayanımı 5,8 MPa ölçülmüştür. CT100 kontrol grubunun eğilme dayanımı ise 3,7 MPa elde edilmiştir.



Şekil 3. 8 800 °C sonrası numunelerin görünüşü

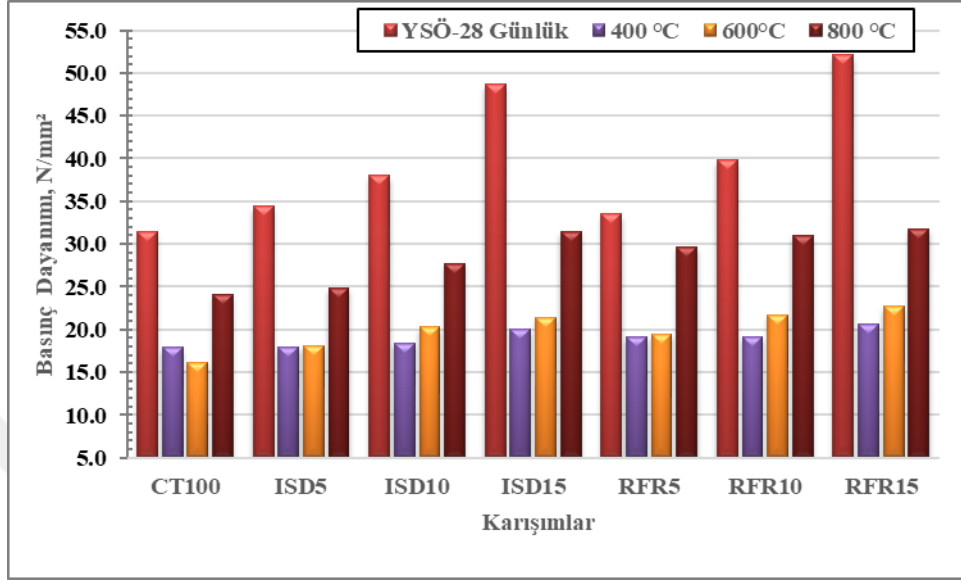
### 3.6.2. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Yüksek sıcaklık öncesi (YSÖ) 28 günlük numunelerin dayanımları kıyaslama yapabilmek için yüksek sıcaklık sonrası elde edilen basınç dayanımı değerleri ile birlikte Tablo 3.17 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.

**Tablo 3. 17** Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı deney sonuçları, MPa

Karışımlar	Yüksek Sıcaklık Öncesi (28 Günlük)	400 °C	600°C	800 °C
CT100	31,5	17,9	16,1	24,1
ISD5	34,4	18,0	18,1	24,9
ISD10	38,0	18,4	20,3	27,7
ISD15	48,7	20,1	21,4	31,5

<b>RFR5</b>	33,5	19,1	19,5	29,7
<b>RFR10</b>	39,8	19,2	21,7	31,0
<b>RFR15</b>	52,1	20,6	22,7	31,8



**Şekil 3.9** Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı, MPa

Numunelerin 400 °C’de yakıldıktan sonra elde edilen basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde ISD5 grubunun basınç dayanımı 18,0 MPa, ISD15 grubunun basınç dayanımı, 20,1 MPa ölçülmüştür. RFR5 grubunun basınç dayanımı 19,1 MPa, RFR15 grubunun basınç dayanımı 20,6 MPa ölçülmüştür. CT100 kontrol grubunun basınç dayanımı ise 17,9 MPa elde edilmiştir.

Numunelerin 600 °C’de yakıldıktan sonra elde edilen basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde ISD5 grubunun basınç dayanımı 18,1 MPa, ISD15 grubunun basınç dayanımı, 21,4 MPa ölçülmüştür. RFR5 grubunun basınç dayanımı 19,5 MPa, RFR15 grubunun basınç dayanımı 22,7 MPa ölçülmüştür. CT100 kontrol grubunun basınç dayanımı ise 16,1 MPa elde edilmiştir.

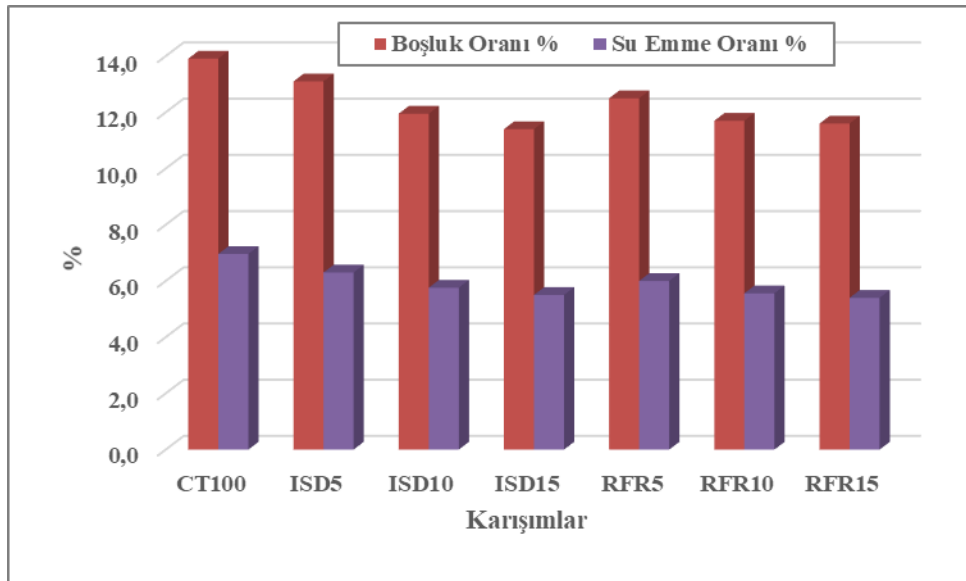
Numunelerin 800 °C’de yakıldıktan sonra elde edilen basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde ISD5 grubunun basınç dayanımı 24,9 MPa, ISD15 grubunun basınç dayanımı, 31,5 MPa ölçülmüştür. RFR5 grubunun basınç dayanımı 29,7 MPa, RFR15 grubunun basınç dayanımı 31,8 MPa ölçülmüştür. CT100 kontrol grubunun basınç dayanımı ise 24,1 MPa elde edilmiştir.

### 3.7.Su Emme ve Boşluk Oranı Deney Sonuçları

Geopolimer numuneler, 90°C sıcaklıkta 24 saat ıslı kür uygulandıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında bekletilmiş ve su emme boşluk oranı deneyi uygulanmıştır. Deney günü numunelere su banyosuna konarak 24 saat boyunca su içerisinde bekletilmiş, Arşimet terazisi yardımıyla su içindeki ağırlığı ve yüzeyleri kurulanıp kuru yüzey doygun ağırlıkları ölçülmüştür. Ardından numuneler 24 saat boyunca 105±5 °C sıcaklıkta etüvde bırakılmış ve etüv sonrası kuru ağırlıkları tartılmıştır. Geopolimer harç numunelerinin kuru yüzey doygun ağırlıkları, kuru ağırlıkları ve Arşimet sepetinde tartılan su içindeki ağırlıkları ile numunelerin boşluk oranları ve su emme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen su emme ve boşluk oranı değerleri Tablo 3.18 ve Şekil 3.10'da sunulmuştur.

**Tablo 3. 18** Geopolimer numunelerin su emme ve boşluk oranları

Karışım Kodu	Boşluk Oranı	Su Emme Oranı
CT100	13,9	7,0
ISD5	13,1	6,3
ISD10	12,0	5,8
ISD15	11,4	5,5
RFR5	12,5	6,0
RFR10	11,7	5,6
RFR15	11,6	5,4



**Şekil 3. 10** Geopolimer numunelerinin su emme ve boşluk oranı



Geopolimer numunelerin su emme ve boşluk oranı değerleri incelenmiştir. CT100 grubu numunelerin boşluk oranı %13,9 iken ISD5 grubunda bu oran %13,1'e düşmüştür. ISD10 grubunda %12,0 olarak ölçülmüştür. ISD15 grubunda ise en düşük boşluk oranı olan %11,4'e ulaşılmıştır. RFR5 grubunda su emme oranı %12,5 iken RFR10 grubunda %11,7 olarak ölçülmüştür. RFR15 grubunda ise boşluk oranı çok az yükselmiş ve %11,6 olarak ölçülmüştür. Tüm bu sonuçlar incelendiğinde KAÇ ilavesinin boşluk oranını düşük bir miktar da olsa azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Su emme oranı CT100 grubunda %7,0 iken ISD5, ISD10 ve ISD15 gruplarında sırasıyla %6,3, %5,8 ve %5,5 olarak ölçülmüştür. RFR5, RFR10 ve RFR15 gruplarında ise sırasıyla %6,0, %5,6 ve %5,4 olarak ölçülmüştür. Boşluk oranında olduğu gibi KAÇ miktarının artması su emme oranını da azaltmıştır.

### **3.8.Karbonatlaşma Denev Sonuçları**

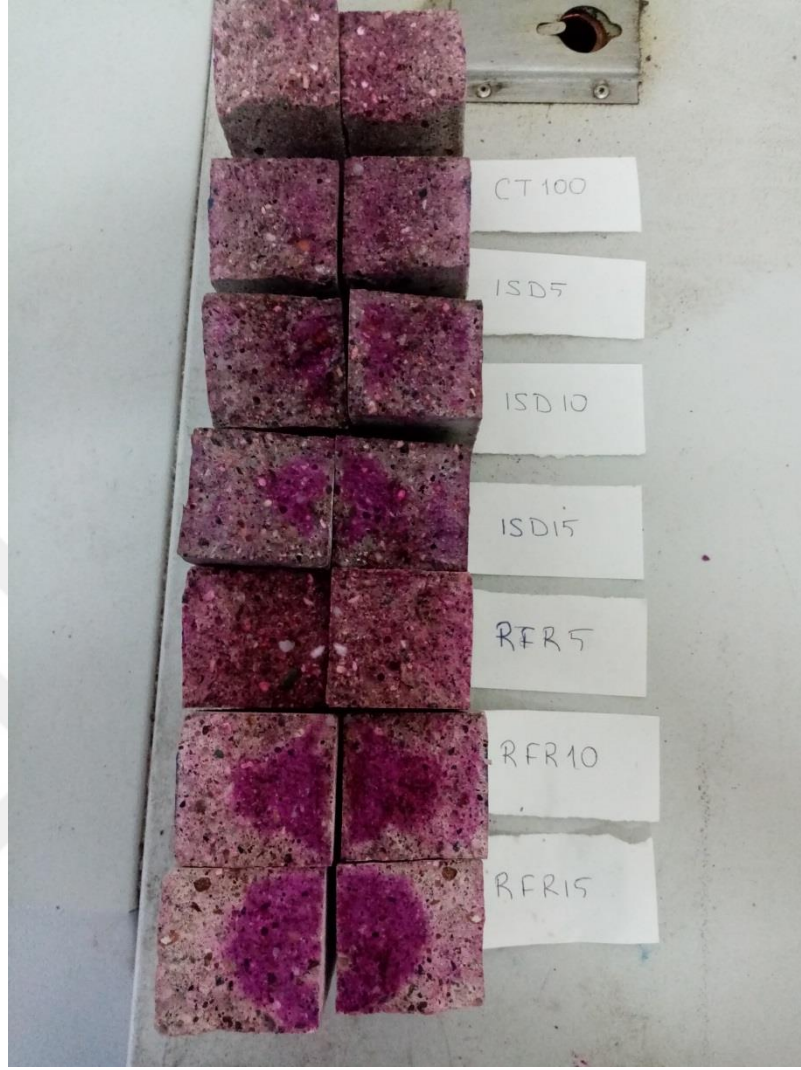
Elde edilen geopolimer numuneler ısı kr sonrasında, sıcaklığı  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  ve bağıl nemi  $\%55\pm 5$  olan laboratuvar ortamında deney gününe kadar bekletilmişlerdir. Numuneler eğilme presinde ikiye bölünerek yüzeylerine fenolftalein çözeltilisi püskürtülmüştür. Numune yüzeyinde renk değişimi oluşmayan kısımlar kumpas ile ölçülmüştür. Karbonatlaşma derinlikleri 30, 90 ve 180 günlük numunelerde yapılmıştır (şekil 3.11, şekil 3.12 ve şekil 3.13). Ortalama karbonatlaşma derinlikleri mm cinsinden Tablo 3.19'da verilmiştir. Ayrıca karbonatlaşma derinlik değişimi grafik yardımı ile şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 11 Numunelerin 30 günlük karbonatlaşma görüntüsü



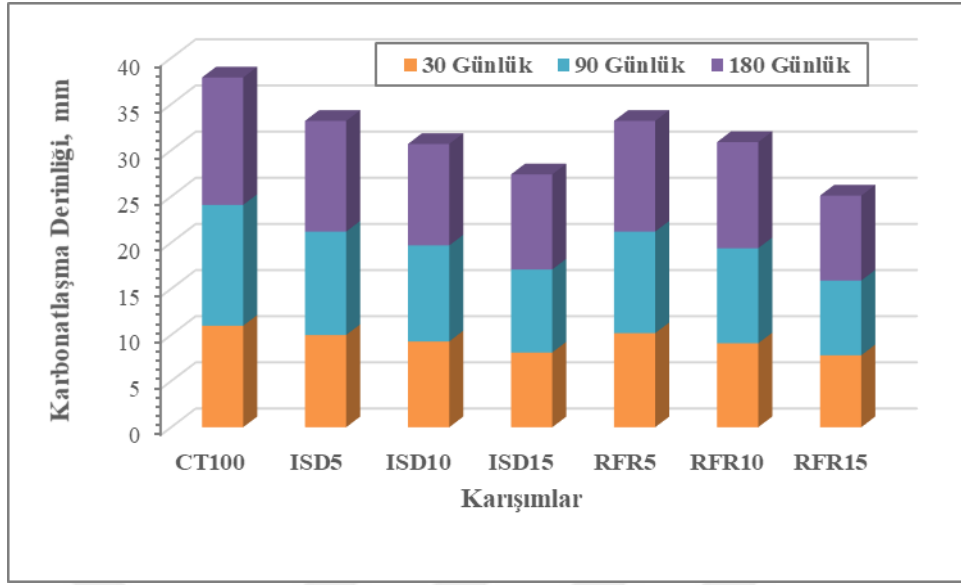
**Şekil 3. 12** Numunelerin 90 günlük karbonatlaşma görüntüsü



Şekil 3. 13 Numunelerin 180 günlük karbonatlaşma görüntüsü

Tablo 3. 19 Geopolimer numunelerin karbonatlaşma derinlikleri

Karışımlar	Karbonatlaşma Derinliği (mm)		
	30 Günlük	90 Günlük	180 Günlük
<b>CT100</b>	11,0	13,1	13,8
<b>ISD5</b>	10,0	11,2	12,0
<b>ISD10</b>	9,3	10,4	11,0
<b>ISD15</b>	8,1	9,0	10,3
<b>RFR5</b>	10,2	11,0	12,0
<b>RFR10</b>	9,1	10,3	11,5
<b>RFR15</b>	7,8	8,1	9,2



Şekil 3. 14 Numunelerin 30, 90 ve 180 günlük karbonatlaşma derinlikleri

Üretilen geopolimer numunelerin 30 günlük karbonatlaşma derinlikleri CT100, ISD5, ISD15, RFR5 ve RFR15 gruplarında sırasıyla 11,0, 10,0, 8,1, 10,2 ve 7,8 mm ölçülmüştür.

90 günlük karbonatlaşma derinlikleri CT100, ISD5, ISD15, RFR5 ve RFR15 gruplarında sırasıyla 13,1, 11,2, 9,0, 11,0 ve 8,1 mm ölçülmüştür.

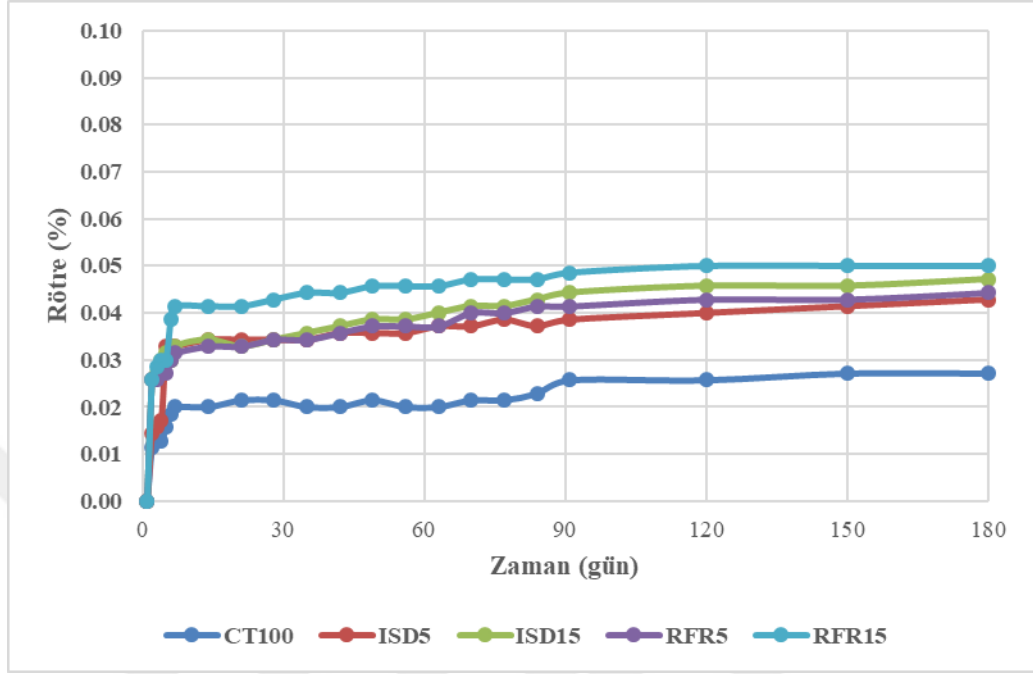
180 günlük karbonatlaşma derinlikleri ise CT100, ISD5, ISD15, RFR5 ve RFR15 gruplarında sırasıyla 13,8, 12,0, 10,3, 12,0 ve 9,2 mm ölçülmüştür.

Karbonatlaşma derinlikleri incelendiğinde CT100 grubu numunelerinin 30,90 ve 180 günlük karbonatlaşma değerlerinin kalsiyum alüminat çimentosu ilaveli numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. ISD ve RFR ilavesi arttıkça karbonatlaşma derinliği değerleri genel olarak azalmıştır.

### 3.9. Rötire Deney Sonuçları

Üretilen geopolimer harç numuneleri 90°C de 24 saat ısıtılarak kuru edilmiştir. Isıtıldıktan sonra numuneler oda sıcaklığına getirilip ölçüm yapılmıştır. Rötire deneyi kontrol grubu olan CT100 karışımı ile en düşük ve en yüksek KAÇ ilaveli harç grupları olan ISD5, ISD15, RFR5 ve RFR15 grubu 3'er adet numunelere uygulanmıştır. Numuneler deney süresi bitinceye kadar 23±2°C sıcaklık ve %50±4 bağıl nemde laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Büzümeye bağlı boyda meydana gelen değişimin hesaplanması için ASTM C157/C157M standardı referans alınarak ilk 14 gün boyunca her gün, 91. güne

kadar her hafta ve 6 ay boyunca her ay ölçüm yapılarak boydaki değişim belirlenmiştir (Şekil 3.15).



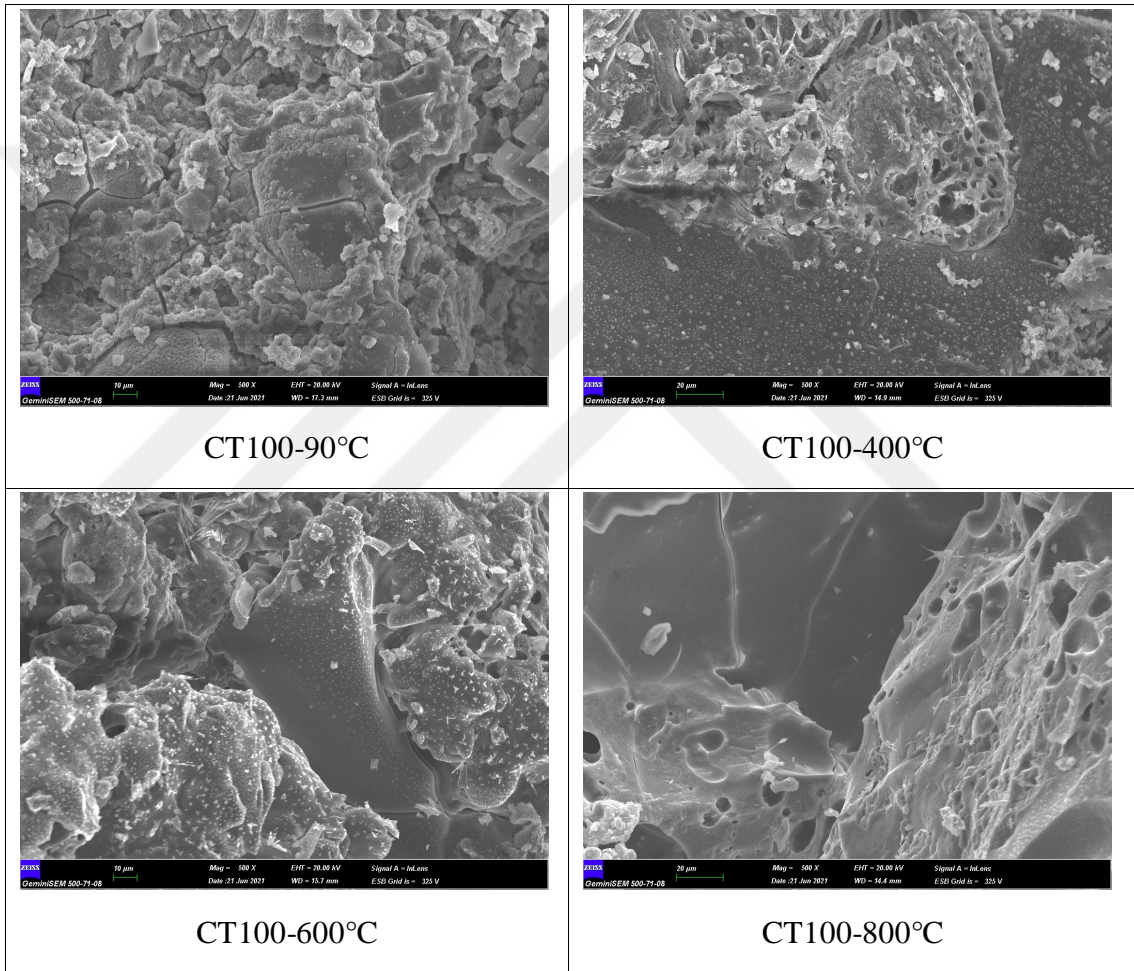
**Şekil 3. 15** Geopolimer numunelerin 180 günlük rötre ölçümleri

Alkali ile aktifleştirilmiş geopolimerlerde ilk 90 günlük ölçümlerde KAÇ ilavesine bağlı olarak boy değişiminde farklılıklar görülmüştür. Ancak ölçüm değişimi %0,01 gibi oldukça düşük değerler olduğu için farklılıklar önemli derecede değildir. 180 gün sonunda numunelerin boy değişimi birbiri ile yakın değerlere ulaşmıştır. En düşük boy değişimi kontrol grubu CT100 harçlarında tamamen cam tozu ile üretilen numunelerde görülmüştür. En fazla boy değişimi ise ISD15 ve RFR15 grubu numunelerinde görülmüştür. Genel olarak tüm harç gruplarında büyük boy değişimi farkı oluşmamıştır (yaklaşık %0,03-%0,05 aralığında). Bu sonuçlar ışığında %15'e kadar KAÇ ilavesinin boy değişiminde çok büyük etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 90°C de 24 saat ısıl kür uygulanan numuneler su kaybı ile önemli oranda büzülmesini tamamlamıştır.

### 3.10. SEM İnceleme Sonuçları

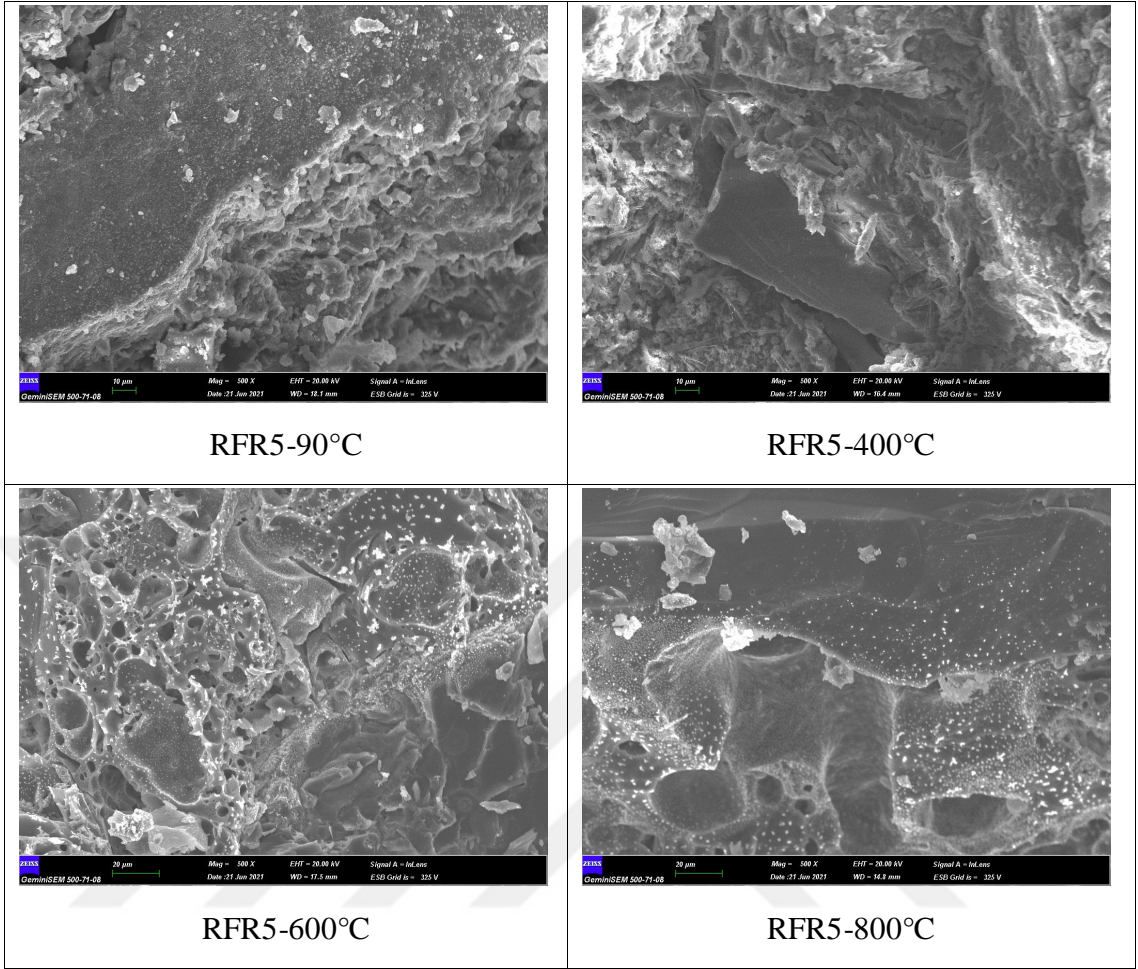
KAÇ ikamesinin atık cam tozu tabanlı geopolimer harç numunelerin içyapıları üzerindeki etkilerini araştırmak için alan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 500 büyültme incelemeler yapılmıştır. Çalışmada kontrol grubu CT100 ile yüksek dayanım sonuçları veren RFR tipi KAÇ ile üretilen RFR5 ve RFR15 grubu geopolimer harç numunelerinin içyapı incelemeleri Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de sunulmuştur.

İyi bir reaktif alüminyum kaynağı olarak KAÇ geopolimerizasyon işlemine katkı sunmaktadır. Yüksek miktarda alüminyum, alüminyum açısından daha zengin jellerin oluşumunu destekler. Ayrıca ek kalsiyum ve alüminyum ikame edilmesi kalsiyum silikat hidrat C-(A)-S-H ve C-S-H jeli oluşumunu desteklemektedir. Kalsiyum, sodyum, silis ve alüminyumun varlığı, C-A-S-H jelinin N-A-S-H jeli ile birlikte var olduğunu doğrulamaktadır [40].



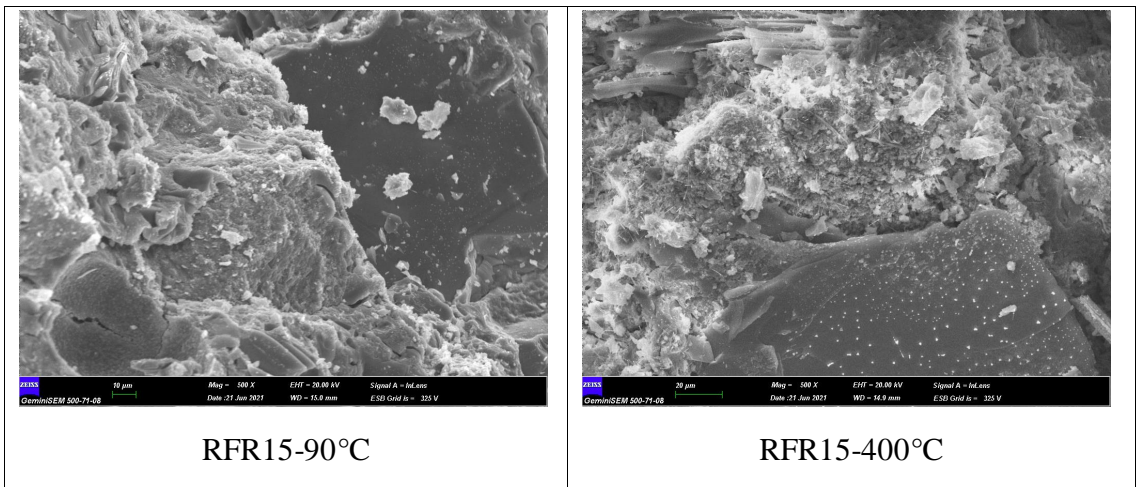
Şekil 3.16. CT100 numunelerinin 90, 400, 600 ve 800°C SEM görüntüleri

Şekil 3.16 incelendiğinde %100 cam tozu kullanılarak üretilen CT100 numunesinde sıcaklık artışı ile beraber cam tozundan gelen Si içeriğinin amorf yapı oluşumunu arttırdığı gözlemlenmektedir. CT100 numunesinin 90, 400 ve 600°C'deki mikroyapı görüntülerinde küresel kristallerin bütün mikroyapıda homojen bir dağılım sergilediği, 800°C'de ise bu kristallerin çözünerek amorf yapıya dahil olduğu görülmektedir.

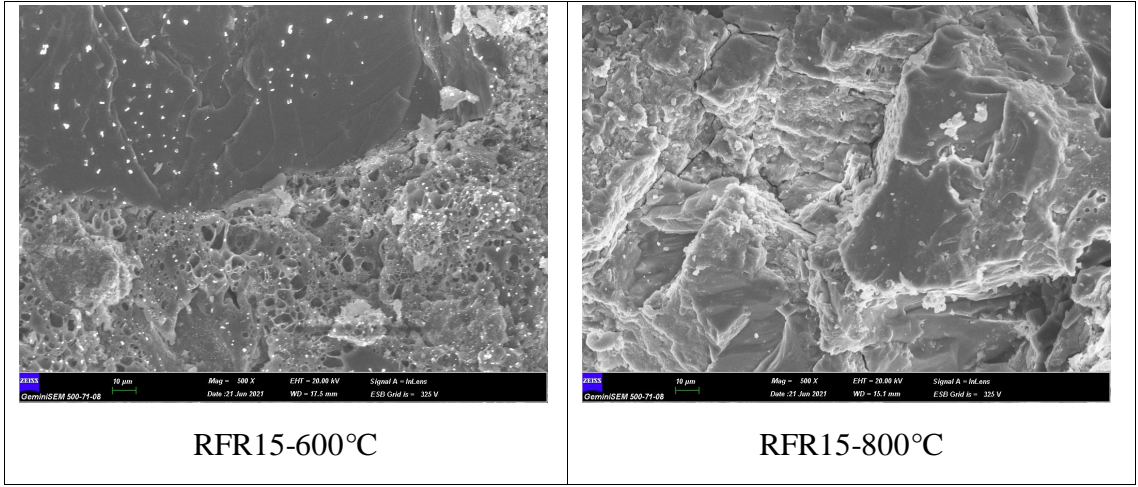


Şekil 3.17. RFR5 numunelerinin 90, 400, 600 ve 800°C SEM görüntüleri

Şekil 3.17’de RFR5 tipi harçlarda %5 oranında KAÇ ilavesi ile küresel kristallerin daha belirgin şekilde mikroyapılarda homojen dağılım sergilediği görülmektedir.







Şekil 3.18. RFR15 numunelerinin 90, 400, 600 ve 800°C SEM görüntüleri

Şekil 3.18’de RFR15 tipi harçlarda %15 oranında KAÇ ilavesi ile 90, 400 ve 600°C’deki mikroyapılarda küresel kristallerin daha belirgin şekilde yayılım gösterdiği 800°C’de bu küresel kristallerin camsı faza dahil olduğu görülmektedir.

## 4. BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 4.1. Yayılma Tablası Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Üretilen geopolimer harç numunelerinin yayılma çapı değerleri  $130\pm 10$  mm arasında ölçülmüştür.
- CT100 grubu numunelerinin yayılma çapı değeri 122 mm'dir.
- ISD grubu numunelerin yayılma çapı değerleri 123-130 mm arasında ölçülmüştür.
- RFR grubu numunelerin yayılma çapı değerleri 123-136 mm arasında ölçülmüştür.
- Elde edilen yayılma çapı değerleri incelendiğinde her iki tip KAÇ ilavesi ile yayılma çapı değerlerinde bir miktar artış görüldüğü söylenebilir.

#### 4.2. Birim Ağırlık Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- ISD5 grubunun birim ağırlığı  $2,09 \text{ g/cm}^3$ , ISD10 grubunun birim ağırlığı  $2,10 \text{ g/cm}^3$ , ISD15 grubunun birim ağırlığı  $2,15 \text{ g/cm}^3$  ölçülmüştür. Isıdac40 KAÇ ilavesi birim ağırlığı arttırmıştır.
- RFR5 grubunun birim ağırlığı  $2,06 \text{ g/cm}^3$ , RFR10 grubunun birim ağırlığı  $2,10 \text{ g/cm}^3$ , RFR15 grubunun birim ağırlığı  $2,10 \text{ g/cm}^3$  ölçülmüştür.
- CT100 grubu kontrol numunelerinin birim ağırlığı  $1,96 \text{ g/cm}^3$  ölçülmüştür. KAÇ ilavesi kontrol grubuna göre numunelerin birim ağırlığını arttırmıştır.

#### 4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- ISD5 grubunun 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 3,9 MPa, 4,3 MPa, 5,0 MPa ve 5,2 MPa ölçülmüştür. ISD15 grubunun 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri ise sırasıyla 5,0 MPa, 6,5 MPa, 7,5 MPa ve 7,7 MPa ölçülmüştür. Isıdac40 ilavesi ve kür süresi eğilme dayanımını genel olarak arttırmıştır.
- RFR5 grubunun 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 3,9 MPa, 5,3 MPa, 5,4 MPa ve 5,5 MPa ölçülmüştür. RFR15 grubunun 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri ise sırasıyla 4,9 MPa, 6,7 MPa, 6,7 MPa ve 7,2 MPa ölçülmüştür. Refro50 ilavesi ve kür süresi eğilme dayanımını genel

olarak arttırsa da ISD5-RFR15 gurubu harçların eğilme dayanımları yakın değerlerde elde edilmiştir.

- CT100 grubunun eğilme dayanımı 7, 28, 56 ve 90 günlük sırasıyla 4,9 MPa, 6,5 MPa, 6,8 MPa, 7,2 MPa ölçülmüştür. KAÇ ilavesi eğilme dayanımını genel olarak arttırmıştır.

#### **4.4. Basınç Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar**

- ISD5 grubu numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 34,1 MPa, 34,4 MPa, 37,6 MPa ve 38,7 MPa ölçülmüştür. ISD15 grubunun 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri ise sırasıyla 48,2 MPa, 48,7 MPa, 50,3 MPa ve 51,3 MPa ölçülmüştür. Isıdac40 ilavesi ve kür süresi basınç dayanımını genel olarak arttırmıştır.
- RFR5 grubu numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 28,3 MPa, 33,5 MPa, 36,1 MPa ve 36,2 MPa ölçülmüştür. RFR15 grubunun 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri ise sırasıyla 51,3 MPa, 52,1 MPa, 52,7 MPa ve 53,8 MPa ölçülmüştür. Refro50 ilavesi ve kür süresi basınç dayanımını genel olarak arttırmıştır.
- CT100 grubu numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları sırasıyla 30,6 MPa, 31,5 MPa, 32,6 MPa ve 35,1 MPa ölçülmüştür. KAÇ ilavesi ve kür süresinin kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında basınç dayanımını arttırdığı görülmüştür.

#### **4.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi ile İlgili Sonuçlar**

##### **4.5.1. Eğilme Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar**

- ISD5 grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 1,4 MPa, 2,0 MPa ve 4,7 MPa ölçülmüştür. ISD10 grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımı değerleri ise sırasıyla 1,6 MPa, 2,1 MPa ve 4,9 MPa ölçülmüştür. ISD15 grubu numunelerin ise 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 1,6 MPa, 1,8 MPa ve 5,2 MPa ölçülmüştür.
- RFR5 grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 1,1 MPa, 1,5 MPa ve 5,2 MPa ölçülmüştür. RFR10 grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımı değerleri ise

sırasıyla 1,2 MPa, 1,3 MPa ve 5,5 MPa ölçülmüştür. RFR15 grubu numunelerin ise 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 1,3 MPa, 1,3 MPa ve 5,8 MPa ölçülmüştür.

- CT100 kontrol grubu numunelerinin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 1,8 MPa, 2,2 MPa ve 3,7 MPa ölçülmüştür. Her iki tip KAÇ ilavesinin kontrol grubu numunelere göre 800 °C’de eğilme dayanımını iyileştirdiği gözlenmiştir.

#### **4.5.2. Basınç Dayanımı Deneyi ile İlgili Sonuçlar**

- ISD5 grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası basınç dayanımı değerleri sırasıyla 18,0 MPa, 18,1 MPa ve 24,9 MPa ölçülmüştür. ISD10 grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası basınç dayanımı değerleri ise sırasıyla 18,4 MPa, 20,3 MPa ve 27,7 MPa ölçülmüştür. ISD15 grubu numunelerin ise 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası basınç dayanımı değerleri sırasıyla 20,1 MPa, 21,4 MPa ve 31,5 MPa ölçülmüştür.
- RFR5 grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası basınç dayanımı değerleri sırasıyla 19,1 MPa, 19,5 MPa ve 29,7 MPa ölçülmüştür. RFR10 grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası basınç dayanımı değerleri ise sırasıyla 19,2 MPa, 21,7 MPa ve 31,0 MPa ölçülmüştür. RFR15 grubu numunelerin ise 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası basınç dayanımı değerleri sırasıyla 20,6 MPa, 22,7 MPa ve 31,8 MPa ölçülmüştür.
- CT100 kontrol grubu numunelerin 400 °C, 600 °C ve 800 °C sonrası basınç dayanımı değerleri sırasıyla 17,9 MPa, 16,1 MPa ve 24,1 MPa ölçülmüştür. KAÇ yüksek sıcaklığa karşı dayanım göstermiş ve kontrol grubuna göre 400 °C, 600 °C ve 800 °C’de numunelerin basınç dayanımını iyileştirmiştir.

#### **4.6. Su Emme ve Boşluk Oranı Deneyi ile İlgili Sonuçlar**

- ISD5 grubu numunelerinin su emme ve boşluk oranı değerleri sırasıyla %13,1 ve %6,3 bulunmuştur. ISD15 grubunun su emme ve boşluk oranı değerleri ise sırasıyla %11,4 ve %5,5 olarak ölçülmüştür.
- RFR5 grubu numunelerinin su emme ve boşluk oranı değerleri sırasıyla %12,5 ve %6,0 bulunmuştur. RFR15 grubunun su emme ve boşluk oranı değerleri ise sırasıyla %11,6 ve %5,4 olarak ölçülmüştür.

- CT100 grubu kontrol numunelerinin su emme ve boşluk oranı değerleri sırasıyla %13,9 ve %7,0 bulunmuştur. KAÇ ilavesi boşluk oranını azaltmış buna bağlı olarak su emme oranında da bir düşüş gerçekleşmiştir.

#### **4.7. Karbonatlaşma Deneyi ile İlgili Sonuçlar**

- ISD5 grubu numunelerinin karbonatlaşma derinliği 30,90 ve 180 gün sonunda sırasıyla 10 mm, 11,2 mm ve 12 mm ölçülmüştür. ISD15 grubunun karbonatlaşma derinliği ise 30,90 ve 180 gün sonunda sırasıyla 8,1 mm, 9,0 mm ve 10,3 mm ölçülmüştür.
- RFR5 grubu numunelerinin karbonatlaşma derinliği 30,90 ve 180 gün sonunda sırasıyla 10,2 mm, 11,0 mm ve 12,0 mm ölçülmüştür. RFR15 grubunun karbonatlaşma derinliği ise 30,90 ve 180 gün sonunda sırasıyla 7,8 mm, 8,1 mm ve 9,2 mm ölçülmüştür.
- CT100 kontrol grubu numunelerinin karbonatlaşma derinliği ise 30,90 ve 180 gün sonunda sırasıyla 11,0 mm, 13,1 mm ve 13,8 mm ölçülmüştür. Kontrol grubu numunelerinin karbonatlaşma derinliği KAÇ ilaveli numunelerin karbonatlaşma derinliğinden daha yüksektir. KAÇ ilavesinin boşluk oranını azaltması nedeniyle karbonatlaşma derinliklerinin azaldığı söylenebilir.

#### **4.8. Rötire Deneyi ile İlgili Sonuçlar**

- Rötire deneyi sonucunda en düşük büzülme değeri CT100 grubu kontrol harcında oluşurken en yüksek büzülme değeri ise ISD15 ve RFR15 grubu %15 KAÇ ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. Ancak genel olarak rötire değerleri yaklaşık %0,03-%0,05 aralığında değiştiği için yüksek farkla oluşmamıştır.
- KAÇ'ın %15'e kadar ilavesi cam tozu tabanlı geopolimer harçların rötire değerlerini büyük oranda etkilememiştir.

#### **4.9. SEM Analizi ile İlgili Sonuçlar**

- CT100 numunesinin 90, 400 ve 600°C'deki mikroyapı görüntülerinde küresel kristallerin bütün mikroyapıda homojen bir dağılım sergilediği, 800°C'de ise bu kristallerin çözünerek amorf yapıya dahil olduğu görülmüştür.
- RFR5 tipi harçlarda %5 oranında KAÇ ilavesi ile küresel kristallerin daha belirgin şekilde mikroyapılarda homojen dağılım sergilediği görülmüştür.

- RFR15 tipi harçlarda %15 oranında KAÇ ilavesi ile 90, 400 ve 600°C'deki mikroyapılarda küresel kristallerin daha belirgin şekilde yayılım gösterdiği 800°C'de bu küresel kristallerin camı faza dahil olduğu görülmüştür.



## KAYNAKÇA

- [1] Wang, Wei-Chien & Chen, Bo & Wang, Her-Yung & Chou, Hsien-Chih. (2016). A study of the engineering properties of alkali-activated waste glass material (AAWGM). *Construction and Building Materials*, 112, 962-969.
- [2] Vafaei, M., & Allahverdi, A. (2017). High strength geopolymer binder based on waste-glass powder. *Advanced Powder Technology*, 28(1), 215-222.
- [3] Jani, Y., & Hogland, W. (2014). Waste glass in the production of cement and concrete—A review. *Journal of environmental chemical engineering*, 2(3), 1767-1775.
- [4] Du, H., & Tan, K. H. (2017). Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, 75, 22-29.
- [5] Atabey, İ. İ., & Cemre, A. Y. (2021). Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Farklı Kür Koşullarında Atık Cam Tozu Esaslı Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 184-189.
- [6] I. B. Topçu and M. Canbaz, (2004). "Properties of concrete containing waste glass," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 2, pp. 267–274.
- [7] Vafaei, M., & Allahverdi, A. (2016). Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 114, 290-296.
- [8] Örklemes E. (2019). Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer Harçlarda Diatomit İkamemesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri
- [9] E. Najafi Kani, A. Allahverdi, and J. L. Provis, (2012). "Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 1, pp. 25–33.
- [10] Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- [11] Tho-In, T., Sata, V., Boonserm, K., & Chindaprasirt, P. (2018). Compressive strength and microstructure analysis of geopolymer paste using waste glass powder and fly ash. *Journal of cleaner production*, 172, 2892-2898.
- [12] Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.

- [13] Atabey İ.İ. (2017). F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri
- [14] Allahverdi, A., & Mahinroosta, M. (2020). Recycling Aluminosilicate Industrial Wastes Into Geopolymer: A Review.
- [15] Dehghani, A., Aslani, F., & Panah, N. G. (2021). Effects of initial SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molar ratio and slag on fly ash-based ambient cured geopolymer properties. *Construction and Building Materials*, 293, 123527.
- [16] Hlavacek, P. (2014). Engineering properties of alkali activated composites. *Czech Technical University in Prague*.
- [17] (<https://www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement/> Erişim tarihi 10.06.2021)
- [18] Zhang, S., Keulen, A., Arbi, K., & Ye, G. (2017). Waste glass as partial mineral precursor in alkali-activated slag/fly ash system. *Cement and Concrete Research*, 102, 29-40.
- [19] Lu, J. X., & Poon, C. S. (2018). Use of waste glass in alkali activated cement mortar. *Construction and Building Materials*, 160, 399-407.
- [20] Saltaş N. (2019). Farklı Oranlarda Çimentonun Yerine Kullanılan Atık Cam Tozunun Taze Betona ve Sertleşmiş Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli
- [21] (<https://camkumu.com/cam-tozu-nedir-nerelerde-ve-nasil-kullanilir/>) Erişim Tarihi: 10.06.2021
- [22] Zhang, L., & Yue, Y. (2018). Influence of waste glass powder usage on the properties of alkali-activated slag mortars based on response surface methodology. *Construction and Building Materials*, 181, 527-534.
- [23] Moghadam, M. J., Ajalloeian, R., & Hajiannia, A. (2019). Preparation and application of alkali-activated materials based on waste glass and coal gangue: A review. *Construction and Building Materials*, 221, 84-98.
- [24] R. Redden, N. Neithalath /Cement & Concrete Composites 45 (2014) 46–5647
- [25] Sucu, M., & Delibaş, T. (2015). Kalsiyum Alüminat Çimentosu Bazlı Tamir Betonları. *Hazır Beton*, 88-94.



[26](<https://www.cimsa.com.tr/tr/urun-hizmetler/cimento/kalsiyum-aluminat-cimentosu/kalsiyum-aluminat-cimentosu/i-659> / Erişim Tarihi 14.08.2021)

[27] Vafaei, M., & Allahverdi, A. (2016). Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 114, 290-296.

[28] Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 113-120

[29] Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., Damrongwiriyanupap, N., & Chindaprasirt, P. (2017). Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2202-2210.

[30] Si, R., Dai, Q., Guo, S., & Wang, J. (2020). Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118502.

[31] Hadi, M. N., Farhan, N. A., & Sheikh, M. N. (2017). Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 140, 424-431.

[32] Cao, Y. F., Tao, Z., Pan, Z., & Wuhrer, R. (2018). Effect of calcium aluminate cement on geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 191, 242-252.

[33] Vafaei, M., Allahverdi, A., Dong, P., & Bassim, N. (2018). Acid attack on geopolymer cement mortar based on waste-glass powder and calcium aluminate cement at mild concentration. *Construction and Building Materials*, 193, 363-372.

[34] He, P., Zhang, B., Lu, J. X., & Poon, C. S. (2020). A ternary optimization of alkali-activated cement mortars incorporating glass powder, slag and calcium aluminate cement. *Construction and Building Materials*, 240, 117983.

[35] Lloyd, N., & Rangan, V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. In *Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies* (pp. 1493-1504). UWM Center for By-Products Utilization.

- [36] Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Vazquez, T., Vallepu, R., Terai, T., & Ikeda, K. (2008). Alkaline activation of blends of metakaolin and calcium aluminate. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(4), 1231-1236.
- [37] <https://camkumu.com/urun/beyaz-cam-tozu/-13.06> Erişim Tarihi 13.06.2021
- [38] TS EN 1008, 2003. Beton karma suyu- Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [39] TS EN 1015-3., 2000. Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [40] Wang, Y., Hu, S., & He, Z. (2019). Mechanical and fracture properties of fly ash geopolymer concrete additive with calcium aluminate cement. *Materials*, 12(18), 2982.