

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

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ KALAN PERLİT  
VE UÇUCU KÜL ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN  
MEKANİK VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan  
Gülay ERDOĞAN**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Haziran 2022  
NEVŞEHİR**

## TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalıőmamın her aşamasında bana yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, eleőtirileriyle çalışmalarına yön veren, güler yüzünü hiç eksik etmeyen, akademik kariyerindeki yoğunluğa rağmen tezim için her türlü fedakârlığı yapan ve bir öğretmenden ziyade bir abi gibi destek olan değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN'e, en derin duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca yanımda olduklarını bana hissettiren, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen babam Ahmet BOZDAĞLI, annem Birgül BOZDAĞLI, kardeşim Aslı BOZDAĞLI, ablam Meltem ÖZASLAN, eniőtem Metin ÖZASLAN, yeğenim Kıvanç ÖZASLAN, yakın arkadaşlarım Özge YANDI ve Esra EROĞLU'ya çok teşekkür ederim.

Bu alıőma Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından ABAP21F7 numaralı proje ile desteklenmiştir. Maddi desteği için Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Gülay ERDOĞAN

Haziran, 2022

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ KALAN PERLİT VE UÇUCU KÜL  
ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE MİKROYAPI  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Gülay ERDOĞAN**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2022**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında, ince öğütülmüş ham perlit (HP) ve F Sınıfı uçucu kül (UK) kullanılarak geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen harçların fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerine kür koşullarının, HP/UK kütle oranının ve yüksek sıcaklıkların etkileri araştırılmıştır. Geopolimer harçlar, 10M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiştir. Geopolimer harçların HP/UK kütle oranları 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 ve 0/100 olarak belirlenmiştir. Üretilen harçlar 90 °C'de 4, 8 ve 24 saat olmak üzere üç farklı sürede ısı küre tabi tutulmuştur. Taze haldeki harçlar üzerinde yayılma deneyi gerçekleştirilmiştir. Sertleşmiş harçlar üzerinde 7., 28. ve 90. günlerde eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. 90 günlük harçların su emme ve boşluk oranları belirlenmiştir. 90 günlük geopolimer harçlar 400 °C, 600 °C ve 800 °C'ye ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık performansları yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kaybı, dayanım kaybı ve mikro yapılarda meydana gelen değişiklikler açısından belirlenmiştir. Ortam sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda en iyi performans 25/75 HP/UK kütle oranı ile üretilen geopolimer harçlarda gözlenmiştir. Deney sonuçları, HP/UK esaslı harçlar için 90 °C'de en optimum ısı küre süresinin 8 saat olduğunu göstermiştir.

***Anahtar Kelimeler: Perlit, uçucu kül, geopolimer harç, kür koşulları, yüksek sıcaklık.***

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN**

**Sayfa Sayısı: 74**

**INVESTIGATION OF MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL  
PROPERTIES OF PERLITE AND FLY ASH-BASED GEOPOLYMER  
MORTARS SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURE**

**(M. Sc. Thesis)**

**Gülay ERDOĞAN**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAS VELI UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOLL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**June 2022**

**ABSTRACT**

In this thesis, geopolymer mortars were produced by using finely ground raw perlite (HP) and Class F fly ash (UK). The effects of curing conditions, HP/UK mass ratio and high temperatures on the physical, mechanical and microstructural properties of the produced mortars were investigated. Geopolymer mortars were activated with 10M NaOH solution. HP/UK mass ratios of geopolymer mortars were determined as 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, and 0/100. The produced mortars were subjected to thermal curing at 90 °C for three different periods of 4, 8, and 24 hours. Flow table test was carried out on fresh mortars. Flexural strength and compressive strength tests were carried out on the hardened mortars at 7th, 28th, and 90th days. Water absorption and void ratios of 90-day mortars were determined. 90-day geopolymer mortars were exposed to 400 °C, 600 °C, and 800 °C, separately. High temperature performances of geopolymer mortars were determined in terms of mass loss, strength loss, and changes in microstructures after high temperature effect. The best performance at ambient and high temperatures was observed in geopolymer mortars produced with a mass ratio of 25/75 HP/UK. The test results showed that the optimum thermal curing time at 90 °C for HP/UK based mortars was 8 hours.

***Keywords: Perlite, fly ash, geopolymer mortar, curing conditions, elevated temperature.***

**Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serhat ÇELİKTEN**

**Page Number : 74**

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
RESİMLER LİSTESİ .....	xii
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	xiii
<b>BÖLÜM 1</b>	
<b>GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM 2</b>	
<b>PERLİT.....</b>	<b>3</b>
2.1. Perlitin Tanımı.....	3
2.2. Ham Perlit .....	3
2.3. Genleştirilmiş Perlit.....	4
2.4. Perlitin Kimyasal Özellikleri.....	6
2.5. Perlitin Kullanım Alanları .....	7
2.6. Dünyada Perlit Rezervleri .....	8
2.7. Türkiye’de Perlit Rezervleri.....	9
<b>BÖLÜM 3</b>	
<b>UÇUCU KÜL.....</b>	<b>11</b>
3.1. Uçucu Külün Tanımı .....	11

3.2.	Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri.....	11
3.3.	Uçucu Kül Sınıfları ve Kimyasal Özellikleri .....	12
3.4.	Türkiye’de Uçucu Kül Üretimi .....	14
3.5.	Uçucu Külün Kullanım Alanları .....	15

## **BÖLÜM 4**

### **GEOPOLİMER.....17**

4.1.	Geopolimerin Tanımı .....	17
4.2.	Neden Geopolimer?.....	18
4.3.	Geopolimerlerin Kullanım Alanları .....	19
4.4.	Geopolimerlerin Kimyası.....	20
4.5.	Geopolimerlerin Dayanımına Etkiyen Faktörler.....	21
4.6.	Uçucu Kül Esaslı Geopolimerler Hakkında Yapılmış Çalışmalar.....	21
4.7.	Perlit Esaslı Geopolimerler Hakkında Yapılmış Çalışmalar .....	23

## **BÖLÜM 5**

### **MATERYAL ve METOT.....25**

5.1.	Materyal .....	25
5.1.1.	Perlit .....	25
5.1.2.	Uçucu kül.....	26
5.1.3.	Kum.....	27
5.1.4.	Sodyum hidroksit (NaOH).....	28
5.1.5.	Su .....	29
5.2.	Metot .....	29
5.2.1	Yayılma tablası deneyi.....	35
5.2.2.	Eğilme dayanımı deneyi.....	36
5.2.3.	Basınç dayanımı deneyi.....	37

5.2.4. Su emme-boşluk oranı deneyi.....	38
5.2.5. Yüksek sıcaklık deneyi.....	38
5.2.6. SEM/EDX analizleri..	39
5.2.7. XRD analizleri.....	39
<b>BÖLÜM 6</b>	
<b>BULGULAR ve TARTIŞMA .....</b>	<b>40</b>
6.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları .....	40
6.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	41
6.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları .....	47
6.4. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kütle Kayıpları .....	54
6.5. Su Emme-Boşluk Oranı Deney Sonuçları.....	55
6.6. SEM/EDX Analiz Sonuçları.....	56
6.7. XRD Analiz Sonuçları.....	61
<b>BÖLÜM 7</b>	
<b>SONUÇLAR... ..</b>	<b>64</b>
KAYNAKLAR.....	67
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER. ....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	75

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Perlitin fiziksel özellikleri.....	4
Tablo 2.2.	Perlitin içinde bulunan kimyasal grupların yüzde olarak miktarları.....	6
Tablo 2.3.	Ülkeler ve bölgeler için perlit rezervleri.....	8
Tablo 2.4.	Türkiye’de perlit rezervi dağılımı.....	10
Tablo 5.1.	Öğütülmüş ham perlitin özellikleri.....	25
Tablo 5.2.	Sugözü uçucu külünün kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	27
Tablo 5.3.	Dere kumunun elek analizi .....	27
Tablo 5.4.	Deneme çalışması karışım oranları.....	30
Tablo 5.5.	Harç karışım oranları .....	34
Tablo 6.1.	Geopolimer harçların EDX analizleri.....	59



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Türkiye’de perlit yatakları .....	9
Şekil 3.1.	Uçucu kül partikülü görüntüsü .....	13
Şekil 3.2.	Türkiye’de uçucu kül sınıfının yüzde dağılımı .....	15
Şekil 4.1.	Geopolimer beton üretim süreci .....	17
Şekil 4.2.	Geoolimer oluşumunda bağ görüntüsü .....	20
Şekil 5.1.	Deneme çalışmasında üretilen harçların eğilme dayanımları .....	30
Şekil 5.2.	Deneme çalışmasında üretilen harçların basınç dayanımları .....	31
Şekil 6.1.	Harçların yayılma değerleri .....	40
Şekil 6.2.	4 saat serisi harçların eğilme dayanımları .....	41
Şekil 6.3.	8 saat serisi harçların eğilme dayanımları .....	42
Şekil 6.4.	24 saat serisi harçların eğilme dayanımları .....	43
Şekil 6.5.	Tüm serilerdeki harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları .....	44
Şekil 6.6.	4 saat serisi harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları .....	45
Şekil 6.7.	8 saat serisi harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları .....	47
Şekil 6.8.	24 saat serisi harçların yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları .....	47
Şekil 6.9.	4 saat serisi harçların basınç dayanımları .....	48
Şekil 6.10.	8 saat serisi harçların basınç dayanımları .....	49
Şekil 6.11.	24 saat serisi harçların basınç dayanımları .....	50
Şekil 6.12.	Tüm serilerdeki harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları .....	50
Şekil 6.13.	4 saat serisi harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları .....	51
Şekil 6.14.	8 saat serisi harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları .....	52
Şekil 6.15.	24 saat serisi harçların yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları .....	53
Şekil 6.16.	Yüksek sıcaklık etkisi sonrası 4 saat serisi harçlardaki kütle kaybı .....	54
Şekil 6.17.	Yüksek sıcaklık etkisi sonrası 8 saat serisi harçlardaki kütle kaybı .....	55

Şekil 6.18.	Yüksek sıcaklık etkisi sonrası 24 saat serisi harçlardaki kütle kaybı. ....	55
Şekil 6.19.	Harçların su emme ve boşluk oranları. ....	57
Şekil 6.20.	Geopolimer harçların SEM analizleri .....	58
Şekil 6.21.	HP100-8 kodlu geopolimer harçların EDX analizleri .....	60
Şekil 6.22.	HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların EDX analizleri.....	60
Şekil 6.23.	UK100-8 kodlu geopolimer harçların EDX analizleri.....	61
Şekil 6.24.	HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların XRD analizi (25°C) .....	62
Şekil 6.25.	HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların XRD analizi (600°C) .....	62
Şekil 6.26.	HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların XRD analizi (800°C) .....	63

## RESİMLER LİSTESİ

Resim 2.1.	Ham perlit kayacı.....	4
Resim 2.2.	Genleştirilmiş perlit .....	5
Resim 5.1.	Öğütülmüş ham perlit malzemesinin görünümü.....	26
Resim 5.2.	F sınıfı uçucu kül malzemesinin görünümü.....	26
Resim 5.3.	Dere kumunun görünümü .....	28
Resim 5.4.	NaOH malzemesinin görünümü .....	28
Resim 5.5.	Geopolimer harç üretimi için malzeme hazırlıkları.....	32
Resim 5.6.	Perlit, uçucu kül ve aktivatörün mikser kabında görünümü .....	32
Resim 5.7.	HP50UK50-4 kodlu karışımın harç kalıbında taze haldeki görünümü...	33
Resim 5.8.	Geopolimer harçların kür fırınındaki görünümü.....	33
Resim 5.9.	Kalıplarından çıkarılan harç numunelerinin görünümü.....	34
Resim 5.10.	Yayılma tablası deneyi .....	35
Resim 5.11.	Eğilme dayanımı deneyi.....	36
Resim 5.12.	Basınç dayanımı deneyi .....	37
Resim 5.13.	Yüksek sıcaklık deneyi sonrası numune kesitlerinin görünümü.....	39

## SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b>%</b>	Yüzde
<b>μ</b>	Mikron
<b>b</b>	Prizmanın Kare Kesitinin Kenar Uzunluğu
<b>Bd</b>	Basınç Dayanımı
<b>Cal</b>	Kalori
<b>cm<sup>2</sup></b>	Santimetre Kare
<b>dk</b>	Dakika
<b>Ed</b>	Eğilmede Dayanımı
<b>EDX</b>	X ışını Enerji Dağılım Spektrometresi
<b>F</b>	Prizmanın Ortasına Uygulanan Kuvvet
<b>Fc</b>	Kırılmadaki En Büyük Kuvvet
<b>G</b>	Gram
<b>HP</b>	Ham perlit
<b>kg</b>	Kilogram
<b>km</b>	Kilometre
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>L</b>	Destek Silindirlerin Eksenleri Arasındaki Uzaklık
<b>M</b>	Molar
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>mm</b>	Milimetre
<b>MPa</b>	Megapaskal
<b>MW</b>	Megavat
<b>N</b>	Newton
<b>N</b>	Normalite
<b>°C</b>	Santigrat Derece
<b>SEM</b>	Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>sn</b>	Saniye
<b>UK</b>	Uçucu Kül
<b>XRD</b>	X-Işını Kırınım yöntemi
<b>λ</b>	Isıl iletkenlik katsayısı

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Geleneksel Portland çimentosu inşaat endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan bağlayıcı malzemedir. Öte yandan, yıllık yaklaşık 1.5 milyar ton CO<sub>2</sub> emisyonundan ve küresel enerji tüketiminin %36'sından sorumlu olması nedeniyle Portland çimentosunun tüketimi onlarca yıldır tartışılmaktadır. Portland çimentosunun tüketimiyle ilgili bu çevresel kaygılar, araştırmacıları çimento bazlı bağlayıcılara sürdürülebilir alternatifler keşfetmeye teşvik etmiştir. Geopolimerler bu alternatiflerden biridir. Üretimleri yalnızca daha düşük CO<sub>2</sub> emisyonuna sahip olmakla kalmaz aynı zamanda daha ekonomik ve çevresel olarak sürdürülebilirdir. Çünkü kullanılan hammaddeler veya öncüler genellikle uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklardır [1].

Uçucu kül termik santrallerde enerji üretmek için linyit ve taşkömürünün yakılmasıyla bacalarda filtreler sayesinde tutulan atık malzemelerdir. Yakılan kömürün cinsi, santral tipi ve yanma biçimi gibi faktörler uçucu kül üretimini etkiler. Termik santrallerde elektrik enerjisi üretilirken taş kömürünün %10-15'i, linyit kömürünün ise %20-50'si kül olmaktadır. Ortaya çıkan bu küllerin yaklaşık %80'i baca gazları ile kazandan ayrılmakta olup bu malzemeler uçucu kül olarak karşımıza çıkmaktadır. Termik santrallerde uçucu küllerin tutulması için yüksek standartlı elektro-filtreler kullanılmaktadır [2]. Yakılan kömürün cinsine göre F ve C sınıfı olmak üzere iki farklı sınıfta uçucu küller elde edilebilmektedir. F sınıfı uçucu küller kömürden üretilir. SiO<sub>2</sub>+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller bu gruba girmektedir. Uçucu kül içerisindeki CaO miktarı %10'un altında ise düşük kireçli kül olarak da isimlendirilirler. Bu sınıftaki küller puzolanik özellik göstermektedir. C sınıfı uçucu küller ise yarı bitümlü kömürden veya linyitten üretilir. SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yüzdesi %50'den fazla olan küller bu gruba girmektedir. Bu sınıftaki küllerin CaO miktarı %10'dan fazla olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da isimlendirilirler. Hem puzolanik hem de bağlayıcı özellik gösterirler [3].

Asidik karakterli volkanik bir cam olan perlit, “inci” anlamına gelen “perle” kelimesinden türemiştir. Bu adı, bazı perlit tiplerinin kırılması sonucu oluşan inci parlaklığında elde edilen küçük kürelerden alır. Perlit, ısıyla genleşen, genleştiğinde de çok hafif ve gözenekli hâl alan bir kayadır. Perlit kelimesi hem ham perlit hem de bunun genişletilmesiyle elde edilen malzeme için kullanılır. Perlit kayaları, yapı ve renk olarak birbirinden farklı olabilmektedir. Doğada saydam açık griden parlak siyaha kadar farklı renklerde görülür. Genleştiğinde rengi tamamen beyaza döner. Perlitin en çok dikkat çeken özelliği, bünyesindeki %2 ile %6 arasında bileşik hâlinde su bulundurmasıdır ve bu su, perlitin kararlılığını sağlamaktadır. Perlit, 750-1200 °C arasında ani olarak ısıtıldığında bünyesinden çıkan buharın etkisiyle hacmini arttırır ve camsı tanelerden oluşan bir köpük agregasına dönüşür. Bu dönüşüm ile perlitin hacmi ilk hacminin 20 katına kadar artabilir ve elde edilen bu malzemeye de genişletilmiş perlit denir. Perlit, özel dokulu, iç yapısında belli oranda su içeren, asit bileşimli volkanik bir camdır yani fibrik yapılı değildir. Nitrat fosfor, sülfat, radyoaktif element, organik madde ve ağır metal içermez. Bu nedenle kimyasal yapısı oldukça saftır [4].

Uçucu kül ile geopolimer üretimi ve bu geopolimerlerin yüksek sıcaklık performansları hakkında literatürde birçok çalışma vardır [5]. Ancak, halen literatürde perlit esaslı geopolimer bağlayıcıların mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında, F sınıfı uçucu kül ve ince öğütülmüş ham perlit ayrı ayrı ve birlikte kullanılarak geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen harçların fiziksel, mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerine ham perlitin uçucu külün, kür koşullarının ve yüksek sıcaklığın etkileri araştırılmıştır.

## BÖLÜM 2

### PERLİT

#### 2.1. Perlitin Tanımı

Perlit, magmanın asit fazında oluşan lavların soğuyup belirgin bir halde kırılmasıyla oluşan kılcal çatlaklardan su emerek meydana gelen ve içerisinde su damlacıkları bulunduran volkanik bir tür camdır. Doğada özkütlesi  $2200 \text{ kg/m}^3$  civarlarında olan fakat yüksek sıcaklıkla ısıtılıp genişlediğinde patlayarak özkütlesinin  $45-110 \text{ kg/m}^3$  dolaylarına kadar düştüğü özel saf bir kayadır [6].

Perlit adı, bazı perlit türlerinin kırıldıklarında inci ferinde ufak küreler ortaya çıkarması sebebi ile inci manasındaki perle kelimesinden türetilmiştir. Perlit, ısıya maruz kaldığında genişleme özelliğine sahip olan, genişletildiğinde belli belirsiz ve gözenekli bir duruma geçen bir kayadır. Muhtelif perlit kayalarının yapıları ve renkleri birbirlerinden çok değişik olabilir. Bu sebeple perlit gözle ayırt etmek hayli zordur. Perlitin rengi berrak açık griden parlak siyaha değin değişmektedir ve perlit genişlemeye maruz bırakıldığında rengi tümüyle beyazlaşır. Perlitin en ilgi çekici özelliği içeriğinde %2 ile %6 arasında su bulundurmasıdır ve bu miktardaki su perlit kararlılığını sağlamaktadır [7].

#### 2.2.Ham Perlit

Ham perlit, perlitin ana kayayı terk ettikten sonra boyutlandırma işlemi sonrasında elde edilmiş halidir. Perlitin bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de sunulmuştur. Perlitin yapısında bulunan su, perlitin genel fiziksel özelliklerini etkilemiştir. [7]. Ayrıca, Resim 2.1.'de ham perlit kayacı gösterilmiştir.

Tablo 2.1.Perlitin fiziksel özellikleri [8]

Tanım	Konkoidal, sferidal kırıklı camı volkanik kayac
Renk	Beyaz, gri ve tonları, genişince tümüyle beyaz
Sertlik (mohs)	5-6
Ph	6.5-8
Özgül Isı	0.2 cal/g °C
Yumuşama Noktası	871-1093 °C
Gevşek Yoğunluk	32-400 kg/m <sup>3</sup>
Isıl İletkenliği	0.04
Ergime Noktası	1260-1343 °C



Resim 2.1. Ham perlit kayacı [9]

### 2.3.Genleştirilmiş Perlit

Perlit kaya durumunda çıkarıldıktan sonra farklı boyutlara ayrılarak bölümlendirilir. Birçok perlit bünyesinde çoğunlukla %70'ten fazla silika bulundurur ve adsorban hususiyetine sahiptir. Farklı aralıklı eleklerden geçirilip boyutlandırılarak oluşturulan perlit şekline elenmiş-kırılmış perlit denir. Elenmiş ve kırılmış perlit 760 °C ile 1000



arasındaki sıcaklıklara maruz bırakıldığında içeriğindeki suyu kaybedip patlar ve bu patlama sonucunda tane hacmi 20 katına kadar büyür. Bu büyümüş haline genleştirilmiş perlit denir [10]. Genleştirilmiş perlit hareketsiz ve yanmayan bir moleküldür. Genleştirilmiş perlitin rengi beyazdır [11]. Kapalı ve açık olarak birçok küçük hava kabarcığı bulunduran genleştirilmiş perlit, gözenekli ve hafiftir. İçinde bulundurduğu gözenekler sayesinde genleştirilmiş perlit yalıtım kabiliyetine sahiptir. Genleşmiş perlit, harika bir akustik ve termal yalıtım malzemesi, ateşe karşı mukavemetli ve ağırlığı çok düşük olan bir malzemedir. Resim 2.2' de genleştirilmiş perlit gösterilmiştir.

Genleştirilmiş perlit malzemesinin bazı fiziksel özellikleri şöyledir; [12]

- Isı iletkenlik ( $\lambda$ ) değeri 0.40-0.45 arasındadır.
- Erime sıcaklığı 1200-1400 °C arasındadır.
- Yoğunluğu 50-110 kg/m<sup>3</sup> aralığındadır.
- Tane çapı 0-3.6 mm arasındadır.
- Su emmesi yüksektir.



Resim 2.2. Genleştirilmiş perlit.

## 2.4.Perlitin Kimyasal Özellikleri

Farklı kaynaklardan elde edilmiş ve farklı fiziksel durumdaki perlitler (genleşmiş-genleşmemiş) bileşimlerinde buldukları farklılıklar nedeniyle değişik niteliklere sahiptirler. Genellikle sülfat, nitrat, ağır metal, fosfor, radyoaktif element ve organik madde içermezler. Bu sebeplerden dolayı perlit kimyasal anlamda oldukça saftır [13]. Perlitin kimyasal özellikleri Tablo 2.2’de sunulmuştur.

Tablo 2.2. Perlitin içinde bulunan kimyasal grupların yüzde olarak miktarları [13]

Perlitin İçinde Bulunan Kimyasal Gruplar	% Miktarları
SiO <sub>2</sub>	71.0 - 75.0
AlO <sub>3</sub>	12.5-18
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9 - 4.0
CaO	0.05 - 0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1 - 1.5
K <sub>2</sub> O	0.5 - 5.0
Diğerleri	0.05-1.48

Perlit agregasının asit ve bazlara karşı dayanıklılığı şu şekildedir:

Bazlarda çözünürlük;

- Sodyum hidroksit (0,1 N sıcak) : % 2.64 çözünür,
- Sodyum hidroksit ( 1 N sıcak) : % 8.77 çözünür,
- Sodyum hidroksit (doygun sıcak çözelti) : % 9.13 çözünür.

Asitlerde çözünürlük;

- Hidroklorik asit (1/10’luk sıcak) : % 3.32 çözünür,
- Hidroklorik asit (1/10 N sıcak) : % 2.55 çözünür,
- Hidroflorik asit (sıcak derisik) : % 94.94 çözünür [13].

## 2.5.Perlitin Kullanım Alanları

Perlitin en yaygın olarak kullanıldığı alan inşaat sektörüdür. Perlit; asitlere dayanıklı olduğundan kanalizasyon borularının üretiminde, iç ve dış inşaat sıvalarında, çatı ve teras su izolasyonlarında, hafif yapı malzemesi karakterinde olduğu için ısı izolasyonunda sıva olarak veya briket gibi izolasyonlu hafif yapı elemanları üretiminde, demiryollarında patinaj kumu olarak, abrasif sanayinde aşındırıcı olarak, filtre kumu ve çakıllı olarak su arıtma tesislerinde, yol yapımında asfalt dolgu malzemesi olarak, dökümcülükte metalurjik flaks olarak, döküm kumuna katkı malzemesi olarak, potadaki ergimiş metalin korunmasında, dövmede veya haddeye giden sıcak metal ingotların ısı kayıplarını azaltmada, demir-çelik sanayinde ergimiş metalin cüruf kontrolünde, yalıtıcı refrakterlerin üretiminde, seramik bağlayıcılı perlit refrakter tuğlalarda, alüminyum fosfat bağlayıcılı perlit refrakter tuğla veya beton üretiminde, alçı ve yapı kimyasalları üretiminde kullanılır [9]. Ayrıca, perlit geleneksel betonda mineral katkı olarak [14, 15] ve hafif beton üretiminde agrega olarak [16] kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Genleştirilmiş perlit; sanayi, inşaat ve tarım sektöründe geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarının başında inşaat sektöründe; perlit agregalı hafif yapı elemanları, perlit agregalı hafif yalıtım betonu (çimento veya alçı bağlayıcılı), perlitli sıvalar, ısı ve ses yalıtıcı olarak yüzey döşemelerinde, ısı ve ses yalıtıcı gevşek dolgu maddesi, çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan özel amaçlı perlit betonları olarak kullanılmaktadır. Genleştirilmiş perlit sanayi sektöründe ise ilaç, gıda ve diğer kimyasal maddeler üretiminde yardımcı madde, metalürji, seramik ve cam sanayiinde katkı maddesi, sanayide ısı yalıtımı, sondajlarda çimento döküm işlemini kolaylaştırıcı katkı maddesi, ilaç ve kimya sanayiinde dolgu maddesi, petrol artıklarından veya diğer yağlı atıklardan gelen su kirliliğini önlemede, gemi dipleri kaplama ve yalıtımı, baraj göllerinde, açık su rezervuarlarında buharlaşmayla su kaybı önleyici, ambalajlama için dolgu maddesi, plastik köpüklere ve plakalara katkı dolgu maddesi, yangına karşı özellikle çelik konstrüksiyonlarda yalıtım amaçlı ucuz ve hafif plastik mobilya yapımında dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır Tarım sektöründe; bahçe tarımı ve seracılıkta, (kültür tarımı, fide yetiştiriciliği vb.) çimli spor alanlarında ve tarla tarımında kullanılmaktadır [17].

## 2.6.Dünyada Perlit Rezervleri

Perlit rezervleri dünyada çoğunlukla volkanik bölgelerde yoğun bir şekilde bulunmaktadır. Türkiye, Yunanistan, ABD ve Macaristan gibi volkanik kuşak içinde yer alan bölgelerde oldukça zengin perlit yatakları bulunmaktadır. Dünyada bulunan görünür perlit yataklarının rezervi 700 milyon ton olup, toplam rezerv miktarı ise 7.700 milyon ton civarındadır. Türkiye’de belirlenen perlit rezervi 5.700 milyon ton civarındadır. Bu miktar dünyadaki toplam rezerv miktarının yaklaşık olarak %74’üne denk gelir. Ülkeler ve bölgeler için perlit rezervleri Tablo 2.3’de verilmiştir [18].

Tablo 2.3. Ülkeler ve bölgeler için perlit rezervleri [18]

Ülkeler	Perlit Rezervi, (Ton)	Toplam Rezerv İçindeki Payı, (%)
Türkiye	5 700 000 000	74
Yunanistan	300 000 000	3.8
Macaristan	200 000 000	2.6
Amerika	10 000 000	0.2
Diğer Ülkeler	1 500 000 000	19.4
Dünya Toplamı	7 700 000 000	100.0

Türkiye, 2003 yılı itibariyle dünya perlit rezervleri zenginliği sıralamasındaki yerini üretimde ABD’ye, ihracat konusunda ise Yunanistan’a bırakmış durumdadır. Nitekim 2002 yılı itibariyle 1.6 milyon ton kadar olan dünya perlit üretimi %31.6’sını dünya perlit rezervlerinin sadece %2.6’sına sahip durumdaki ABD gerçekleştirmiştir. Avrupa perlit ticaretini elinde bulunduran Yunanistan ise, 2002 yılı perlit üretiminin %21.9’unu karşılamaktadır. En ilginç ise dünya perlit rezervlerinin %0.2’sine sahip Japonya’nın 250 bin tonluk üretim yapmasıdır (%15.2). Türkiye, 2003 yılı itibariyle 150 bin tonluk üretimi ile dünya üretiminde %15.1’lik bir paya sahiptir [18]. Bununla birlikte, Türkiye’deki Perlit üretimi son yıllarda sürekli olarak artmıştır. 2003 yılında 150 bin ton olan üretim [18], 2010 yılında 546 bin tona ve 2013 yılında 900 bin tona ulaşmıştır [19].

## 2.7. Türkiye’de Perlit Rezervleri

Batı Anadolu’da bulunan perlit yatakları Türkiye’de işletilen perlit ocaklarının önemli bir çoğunluğunu oluşturur. Bunların geneli İzmir-Balıkesir-Manisa ve Çanakkale illeri civarında yoğunlaşmıştır. Ülkemizde bulunan hatırı sayılır perlit rezervleri Tersiyer-Erken orta Kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde yoğunlaşmıştır. Türkiye’deki önemli perlit rezervleri çoğunlukla riyolitik volkanizmalarla ilgilidir. Ege bölgesi perlitleri Karaburun ve Menderes Masifleri arasında bulunan mesozoik bir kıvrımın, miyosen riyolitik volkanizmaları ile alakalıdır. Perlit lav akıntılarıyla oluşmuştur. Bu akıntılar sırasında bölgeyi perlit, riyolit, volkanik tortular ve riyolitik tüfler kaplamıştır. Cumaovası mevkiindeki perlit cevherleşmesi, Murattepe’nin kuzey yamaçlarından başlayıp yaklaşık 10 km boyunca Murattepe, Aktaş, Güllüktepe, Mezarkaya ve Karadağ’a kadar devam etmektedir. Perlit cevheri bütünüyle satıhta olup bazı bölümlerde 1.5 metreye yaklaşan nebati örtü tabakasıyla kaplıdır. Bazı yataklarda ve yatakların bazı bölümlerinde perlit üstünde riyolitik tüfler ve perlitik breşler bulunur. Cevher yataklarının derinliği 90 metreye kadar ulaşabilmektedir [7]. Ülkemizdeki perlit yatakları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Türkiye’de perlit yatakları [7]

Türkiye perlit rezervi 4.5 milyar ton seviyelerindedir. Bu rakam aşağı yukarı dünya rezervlerinin hatırı sayılır bir bölümünü oluşturur. Türkiye perlit rezervinin dağılımı Tablo 2.4.'de verilmiştir. Tablo 2.4.'de belirtilen rezervlerden ayrı olarak Kars-Göle civarında önemli ölçüde perlit varlığı bilinmektedir [7].

Tablo 2.4. Türkiye’de perlit rezervi dağılımı [7]

Bölge	Rezerv (Bin Ton)
Bitlis-Adilcevaz-Tatvan-(Van-Ercis)	1400000
Kars –Sarıkamış	1500000
Erzurum-Pasinler	100000
Nevşehir Derinkuyu (Niğde Gölcük)	350000
Balıkesir-Evrindi	25000
İzmir-Menderes (Cuma Ovası)	60000
Nevşehir-Acıgöl	862000
Çankırı-Orta	30000
Çanakkale-Biga	3400
İzmir-Bergama	16500
Ankara- Çamlıdere	8000
Erzincan-Merkez	27000
Ankara- Kızılcahamam	34200
Eskişehir-Seyitgazi	20000
İzmir-Foça	16500
Manisa Saruhanlı	18000
İzmir-Dikili	8000
Manisa-Demirci-Soma	18600
Ankara-Çubuk	32000
Balıkesir- Savaştepe-Sındırğa	47000
Toplam	4576200

## **BÖLÜM 3**

### **UÇUCU KÜL**

#### **3.1. Uçucu Külün Tanımı**

Uçucu kül, kömür ile çalışan elektrik üretim tesislerinin yanma işlemi sonucunda ortaya çıkan bir malzemedir. Yanma odalarına öğütülmüş şekilde üflenen kömür yanarken, daha ağır kül partikülleri (cüruf veya alt kül) bölmenin alt kısmına düşer ve çok daha hafif kül partikülleri (uçucu kül) egzoz gazı ile dışarı nüfuz eder ve bu şekilde uçucu kül oluşur. Uçucu külü kütleden ayrılmadan evvel toplamak amacıyla elektrostatik çöktürücüler, torba yuvalar veya farklı metotlar kullanılmaktadır [20]. Termik santrallerde kömürden enerji üretilmesinde atık olarak üretilen uçucu küller hava, su ve toprak kirliliği oluşturarak insan sağlığı ve çevre kirliliği üzerinde önemli etki oluşturmaktadır [21]. Bu nedenle uçucu küllerin geri dönüştürülmesi çevreye ve ülke ekonomisine katkı sağlar.

#### **3.2. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri**

Uçucu kül, koyu gri renkte, genellikle ince taneli bir puzolandır. Renkleri açık gri ve koyu gridir. Renginin açıklığı ve koyuluğu elde edildiği kömüre ve kömürün yanma şartlarına bağlıdır. Yanmanın tam olarak gerçekleşmediği durumda oluşan uçucu küle siyah renk veren içindeki yanmamış karbondur. İyi yanma sonucu oluşan uçucu kül diğerine göre daha açık renktedir. Daha çok demir içerenler açık gri renkte, daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renktedir [22].

Uçucu külün inceliği öncelikle yakılan kömürün öğütülme durumuna bağlıdır. İnceliğe etki eden ikinci faktör, küllerin mümkün olduğu kadar bacadan uçmasına mani olunarak tutulmasıdır. Bacadan uçan kısım azaldıkça genellikle külün inceliği artar. Uçucu küllerin tanecik boyutları genellikle 0.5 ile 200 mikron arasında değişir. Uçucu küller, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Özgül yüzeyleri 1800-5000 cm<sup>2</sup>/gr arasında değişmekle birlikte, genellikle 3000 cm<sup>2</sup>/gr dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu 2.2-2.7 (ortalama 2.4) gr/cm<sup>3</sup> arasındadır [22-24]

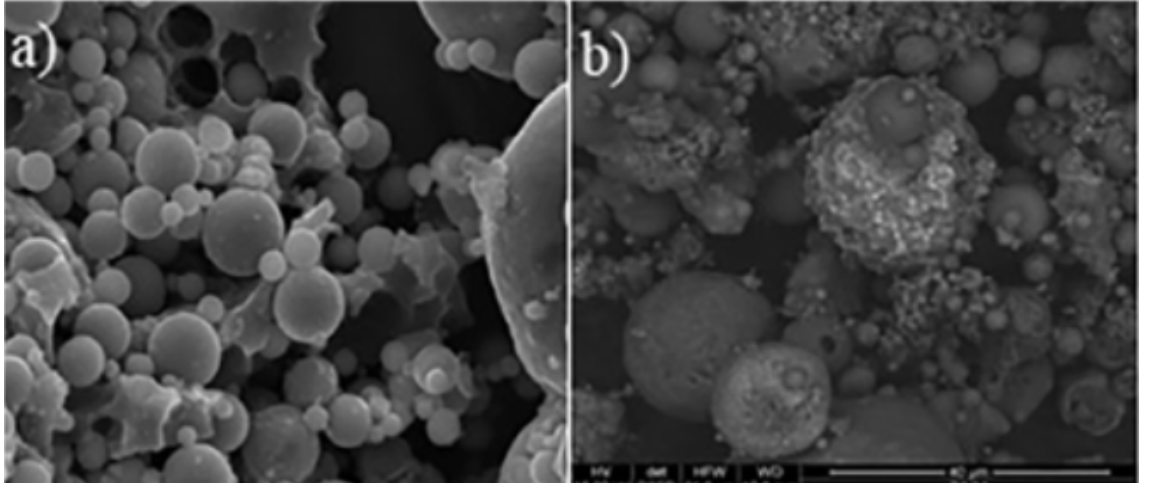
### 3.3. Uçucu Kül Sınıfları ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu külden bulunan başlıca bileşenler; silika ( $\text{SiO}_2$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) olup bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Uçucu kül yapısında bulunan karbon miktarı kömür türüne ve yakma metoduna göre değişiklikler göstermektedir. Ayrıca  $\text{MgO}$  ve  $\text{SO}_3$  gibi alkali oksitler de ikincil bileşenler olarak uçucu külden bulunmaktadır. Uçucu külün kimyasal yapısı kömürün farklı yerlerden elde edilmesinden dolayı farklılıklar göstermektedir. Buna rağmen uçucu külün temel bileşikleri silis ve alüminadır [23, 25-27].

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, ASTM C 618 [28] ve TS EN 197-1 [29] standartları esas alınmaktadır. Bu standartlar uçucu külü kimyasal bileşen yüzdesine göre sınıflandırmaktadır. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı küller, bitümlü kömürden üretilirler ve toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller olarak tanımlanırlar. Aynı zamanda bu F sınıfı küllerde  $\text{CaO}$  yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da ifade edilirler. F sınıfı uçucu küller, incelik ve özgül yüzeyine de bağlı olarak genellikle puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürün yakılmasıyla ortaya çıkan küllerdir. C sınıfı uçucu küllerin toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı % 50'den fazladır. Bununla birlikte, bu küllerde  $\text{CaO}$  yüzdesi %10'un üzerindedir. Bu nedenle bu küller de yüksek kireçli uçucu kül olarak sınıflandırılmıştır. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra kendi başlarına da sınırlı düzeyde bağlayıcı özelliğe de sahiptirler [28]. TS EN 197-1'e göre yapılan sınıflandırmada uçucu küller, silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden oluşan ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ) oranının %10'dan az, reaktif  $\text{SiO}_2$  miktarının % 25'den fazla olması gerekmektedir. W sınıfı küller ise, hidrolik bağlayıcılık ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ), reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan; geri kalanı demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. W sınıfı küllerde,  $\text{CaO}$  oranının % 10'dan fazla, reaktif  $\text{SiO}_2$  miktarının da % 25'den fazla olması gerekmektedir [29].



Uçucu kül parçacıkları egzoz gazlarında asılı dururken katılaşıp ve soğuma zamanlarında elektrostatik filtreler yardımıyla bacadan toplanır. Uçucu küllerin parçacık ebatı çoğunlukla 0.5 µm ila 200 µm arasındadır. Uçucu küller silikon dioksitten ( $\text{SiO}_2$ ) oluşurlar;  $\text{SiO}_2$ 'nin iki formu vardır. Birinci formu keskin, tehlikeli ve sivri olan kristal ve pürüzsüz, ikinci formu yuvarlak şekilsiz kristaldir. Uçucu küller genellikle heterojendir. Demir oksitler ve kuvars gibi farklı kristal evrelere sahip cama benzer parçacık karışımından meydana gelirler [27,28]. C sınıfı ve F sınıfı uçucu kül, ASTM C618 [28] tarafından tanımlanan iki ana sınıftır. Bu sınıflandırma, örneğin küldeki kalsiyum, silika, alümina ve demir içeriğini içeren kimyasal bileşimin miktarına dayanmaktadır. Normalde bitümlü kömür yakılarak elde edilen F sınıfı uçucu kül veya antrasittir ve bunlar sahip olduğu az miktarda kireç  $\text{CaO}$  (%10'dan az) nedeniyle genellikle bağlayıcılık değeri çok azdır veya hiç yoktur. C sınıfı uçucu kül ise genellikle %20'den fazla kireç içeren alt bitümlü linyit kömürünün yakılması yoluyla üretilir. Bağlayıcı ve puzolanik malzeme olarak sınıflandırılan bu sınıf su ile reaksiyona girerek zamanla dayanım kazanır [28]. Polonya'da bulunan termik santrallerden alınan F ve C sınıfı uçucu küllerin SEM görüntüleri Şekil 3.1'de sunulmuştur.

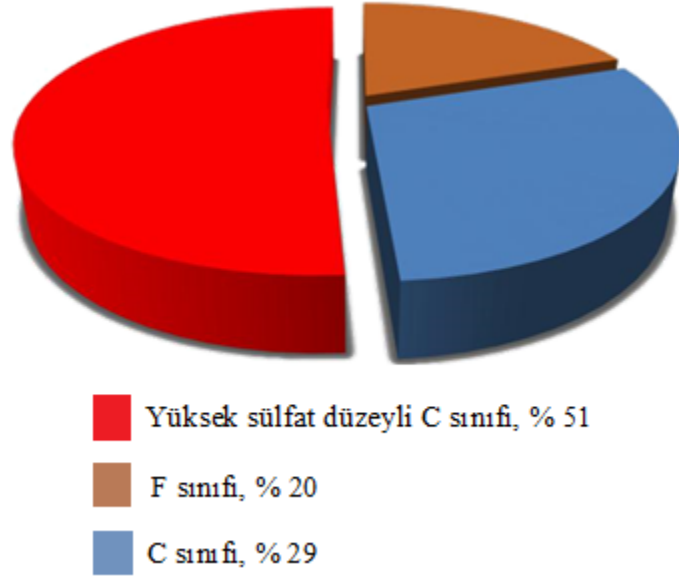


Şekil 3.1 Uçucu kül partikülü görüntüsü: a) F sınıfı, b) C sınıfı uçucu kül [30]

### 3.4. Türkiye’de Uçucu Kül Üretimi

Türkiye’de enerji ihtiyacının önemli bir kısmı termik santraller tarafından karşılanmaktadır. 31 Mayıs 2016 sonu itibariyle Türkiye’de toplam kurulu enerji gücü 75.082 MW’dır. Bunun 42.941 MW’ı termik, 695 MW’ı jeotermal, 26.232 MW’ı hidrolik, 4.770 MW’ı rüzgar ve 443 MW’ı güneş kaynaklıdır. Türkiye’de bulunan termik santral sayısı 2016 yılı Mayıs ayına ait verilere göre 367’dir [31].

2020 yılında, termik santrallerde 10000 tonu tehlikeli olmak üzere toplam 24.4 milyon ton atık meydana gelmiştir. Toplam tehlikesiz atığın %79.5’ini cüruf ve kül atıkları, %20,5’ini ise metal, kâğıt, plastik atıklar, atıksu arıtım çamurları ile evsel ve benzeri atıklardan oluşmaktadır. Toplam atığın yaklaşık %86’sı kül barajı, kül dağı veya düzenli depolama tesislerinde toplanırken, yaklaşık %13’ü lisanslı tesislere gönderilmiş ve maden/taş ocaklarının geri doldurulmasında kullanılmaktadır. Geriye kalan %0.9’u ise diğer yöntemlerle bertaraf edilmektedir [32]. Türkiye’de önemli ölçüde uçucu kül çıkışı olan en önemli sayılabilecek 12 termik santral vardır. Bunlar; Sugözü, Tunçbilek, Afşin-Elbistan, Soma, Çayırhan, Kangal, Orhaneli, Çatalağzı, Kemerköy, Seyitömer, Yatağan ve Yeniköy’dür. Türkiye’de daha önce bahsedilen 11 termik santraldeki toplam kül üretimi şöyledir; Çatalağzı F sınıfı 803.703 ton/yıl, Orhaneli F sınıfı 357.391 ton/yıl, Seyitömer F sınıfı 1.989.000 ton/yıl, Tunçbilek F sınıfı 591.854 ton/yıl olmak üzere toplam F sınıfı kül üretimi Türkiyede yaklaşık olarak 3.741.948 ton/yıl olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında C sınıfı olarak Soma’da 2.373.439 ton/yıl, Yatağan’da 1.320.570 ton/yıl, Çayırhan’da 1.907.912 ton/yıl olmak üzere toplamda 5.601.921 ton/yıl kül üretilmiştir. Kangal’da yüksek sülfat seviyeli C sınıfı olarak 1.322.832 ton/yıl uçucu kül, Kemerköy’de 1.585.195 ton/yıl, Yeniköy’de 713.847 ton/yıl ve Afşin Elbistan’da 6.141.137 ton/yıl olmak üzere toplamda 9.763.011 ton/yıl C sınıfı kül üretilmiştir. Ülkemizde üretilen bu toplam külün %75-80’lik kısmını uçucu kül, geriye kalanlarını ise dip külü oluşturmaktadır. Bu sebeple, ülkemizde en fazla üretilen uçucu kül türü, yüksek miktarda sülfat içeren C sınıfı uçucu küldür (Şekil 3.2). Bu malzemeler beton endüstrisinde kriterleri karşılayamadığından kullanılmamaktadır. Atık malzemelerin toprak stabilizasyonunda kullanılacak uygunluğunun araştırılması gerekir. Bu atık malzemelerin çökeltme sorunları, buna bağlı olarak çevresel kaygılar sebebiyle ekstra önem kazanmaktadır [33].



Şekil 3.2. Türkiye'de uçucu kül sınıfının yüzde dağılımı

### 3.5. Uçucu Külün Kullanım Alanları

Uçucu külün endüstriyel uygulanabilirliği ve geri dönüşümü için çok çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. İlk olarak ortaya atılan yaklaşımların bir tanesi toprak iyileştirme uygulamalarıdır [34,35]. Uçucu kül esas olarak zeminlerin veya alt sınıfların stabilizasyonu, geri dolgular, şev stabilitesini arttırmak ve yanal toprak basınçlarını düşürmek gibi jeoteknik uygulamalarda stabilizasyon için kullanılabilir, çünkü toprağın basınç ve kesme mukavemetini geliştirir. Uçucu kül ile değiştirilen toprakların basınç dayanımı, sıkıştırmanın nem içeriğine, katkı oranına ve yerindeki toprak özelliklerine bağlıdır. Bentlerde stabilize edici olarak kullanılan kireç-uçucu kül karışımı ile büzülme ve şişme gibi toprak özelliğini yönetmek ve daha iyi sıkıştırma için bir kurutma malzemesi olarak kullanılır [36]. Uçucu kül, plastik toprakların hacimsel genişlemesini azaltır. Toprak parçacıklarını birbirine yapıştırarak genişleyen toprakların büzülme-şişme özelliklerini yönetir. Toprak parçacıklarını birbirine bağlayarak toprak parçacık hareketleri sınırlandırılır [37]. Avrupa'da uçucu kül birkaç yıldır dolgu veya yapısal dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, diğer birçok ülkede dolgu malzemesi olarak nispeten sınırlı bir şekilde kullanılmış olsa da, dolgu uygulamasında kullanımı daha geniş ölçüde kabul görmektedir [38].

Çimento üretimi maliyetinde azalma elde etmek için uçucu küllerin kullanılması, bilinen en tipik endüstriyel yöntemdir. F sınıfı küller genellikle puzolanik özelliğe sahip olduklarından dolayı yapı malzemelerinde çimento yerine ikame malzeme olarak kullanılabilir [39]. Fakat bu kullanımlar yaygın olmaktan oldukça uzaktır. Kömüre bağlı enerji talebinin artması ve atık yönetimi bakımından, uçucu kül ile alakalı bazı düzenlemelerin sıklaştırılması ile uçucu külün atık kullanımının en aza indirgenmesi ve bunun yanında sürdürülebilir ve yenilikçi uygulama alanları üzerinde çalışma çabaları son yıllarda tekrar hız kazanmıştır [40].

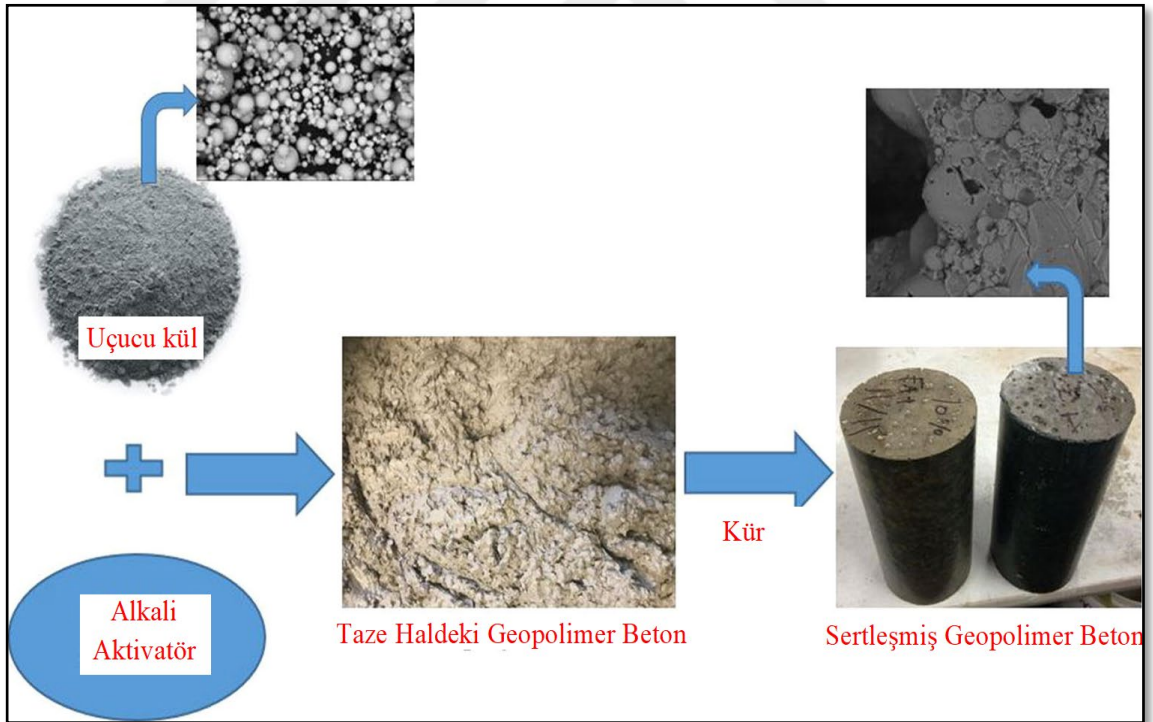
Uçucu küllerin kullanım alanıyla ilgili son yıllarda birçok çalışma yapılmaktadır. Uçucu külün içerdiği demir oranı [41] yardımıyla karbon nanotüp üretiminde katalizör olarak kullanılması, alkali aktivasyon yönteminin kullanılması ve ağır metallerin atık suların ayrıştırılması gibi yenilikçi yaklaşımlar önerilmiştir [42,43]. Bunların yanında uçucu külün içerdiği oldukça fazla miktardaki alümina silis ile zeolit üretiminde hammadde olarak kullanılabilceği fikri öne çıkmıştır [44]. Fakat çevresel uygulamalar bakımından fazlaca yenilikçi yaklaşımlar sunulsa da bu çalışmalar endüstriyel ölçeğe taşınmamıştır.

## BÖLÜM 4 GEOPOLİMER

### 4.1. Geopolimerin Tanımı

1979 senesinde Davidovits tarafından ilk defa ortaya atılan geopolimer kelimesi alümina silikat kaynaklı malzemelerin alkali silikatlar ile aktivasyonu ile beraber ortaya çıkan alkali alümina silikat bağlayıcı yapılar şeklinde tanımlanmıştır [45].

En basit haliyle geopolimerler Şekil 4.1'deki gibi elde edilmektedir. Burada uçucu kül yerine başka bir alümina silikat kaynağı kullanılabilir. Davidovits aracılığıyla belirtildiğinden şimdiye dek, bu malzemeler için çok çeşitli tanımlar da kullanılmıştır. Sıcaklığı düşük olan alümino silikatlar, alkali ile aktive edilmiş çimentolar, alkali ilişkili seramikler, hidroseramik ve inorganik polimer beton gibi tanımlar en fazla kullanılanlardandır [46].



Şekil 4.1. Geopolimer beton üretim süreci [47]

## 4.2. Neden Geopolimer?

Geopolimerler; uçucu kül ve metakaolin gibi serbest silis ve alümin barındıran malzemelerin sodyum silikat, potasyum hidroksit ve sodyum hidroksit gibi alkalilerle aktivasyonu ile oluşmuş alüminosilikat esaslı bağlayıcı malzeme grubudur. Bu bağlayıcıların etkili derecede performansla kullanılabilmesi, çevre şartlarına karşı dayanıklı olması ve Portland çimentosuna sürdürülebilir bir seçenek olmaları sebebiyle üstünde çalışmalar artarak devam etmektedir [48,49].

Özellikle son yıllarda, geopolimer malzemeler düşük karbondioksit salınımına, yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere ve çok iyi durabilite gibi özelliklere sahip olması sebebiyle oldukça ilgi çekmiştir. Bu gibi özellikler üretim aşamasında kullanılan alümino silikat malzemenin özelliklerine ve aktivasyon koşullarına bağlıdır. Geopolimer üretimi esnasında en fazla yararlanılan alümino silikatlardan bazıları uçucu kül, metakaolin, kırmızı çamur, cüruf, taban külü, pirinç kabuğu külü ve silis dumanıdır. En fazla kullanılan aktivatörler ise potasyum veya sodyum hidroksit (KOH, NaOH) ile potasyum cam suyu ( $n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$ ) veya sodyum cam suyu ( $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ ) karışımlarıdır [50].

Geopolimerlerin kullanımındaki avantajlardan bir tanesi onlardan meydana gelen nihai bağlayıcı malzemenin dış etkilere karşı gösterdiği yüksek performansdır. Geopolimerlerdeki alkali agrega tepkimesi kalsiyum içeriğinin düşük oranda olmasına bağlı olarak çok fazla etkili olmamaktadır. Yine aynı sebepten dolayı geopolimerler deniz suyuna ve sülfat atağına karşı geleneksel bağlayıcılara göre daha yüksek dayanıklılığa sahiptir. Si/Al oranı 1'e yakın olan matrislerde dış etkenler etkisinde ve zor atmosferik şartlar altında ayrışma meydana gelmemektedir [51].

Geopolimerler, prizin ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının yaklaşık % 70'ini kazanabilirler. Uzun seneler boyunca dayanımından çok fazla kayıp vermeden çevre şartlarına ve dış etkilere karşı dayanabilmektedirler. Geopolimer malzemelerin avantajlarından bir diğeri ise yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi ve düşük ısıl iletkenlik göstermesidir. Isıl iletkenlikleri ise diğer yapı malzemelerine göre düşük olup 0.24 ~ 0.3 arasındadır [52].

### 4.3.Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Geopolimerler kuvvetli kimyasal ve fiziksel yapısı yardımıyla prefabrik yapıların üretiminde, taşıyıcı olan ve taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında, yol kaplamalarında, süsleme işlerinde, nükleer ve zehirli atık depolanmasında, kaldırım kaplamalarında ve yangına dirençli yapı elemanı imalatında kullanılabilir [53,54].

Mısırdaki bulunan piramitlerin ve Roma'daki bulunan amfi tiyatrosunun mikro yapısı incelendiğinde, katılmış geopolimerik malzemelerin mikroyapısı ile birbirine benzediği görülmektedir. Bu sebeple eski yapılarda doğal malzemelerden geopolimerizasyon esasına dayanan imalatın yapıldığı düşünülmektedir. Konuyu daha iyi açıklayabilmek adına, sayısız bilim adamı, eski dönemlerde geopolimer kuramlarının varlığını ve eski yapıların bu kuramlar üzerine kurulup kurulmadığını saptamak üzere çalışmalarına devam etmektedirler [52].

Son dönemlerde geopolimer tipi mantolama kaplama materyalleri araştırmacılarca çalışılmaktadır. Bilhassa yangına karşı dayanıklı kaplama materyalleri, çimento esaslı malzemeler, lifli malzemeler ve boyalar yangına karşı dayanımı artırır. Ancak bu alanda en çok boyalar ve çimento gibi malzemeler yangın dayanımını artırmada kullanılır. Çimento tipi malzemeler çoğunlukla inorganiktir ve ateşle temas ettiği zaman yanmamaktadır. Dahası bu tip malzemeler dayanıklı, ucuz ve dirençlidirler. Ancak sıradan Portland çimentosundan elde edilirler ve yangına maruz kaldıkları zaman kaplamadan etkilenerek dayanımlarını kaybederler. Ayrıca çimento esaslı malzemelerin yangın esnasında yeterince koruyucu olmaları için ağır ve kalın olmaları gerekir. Yangına karşı dayanımı artıran boyalar ise alev ısı ile tepkimeye girerek şişen kaplama tipindeki boyalardır. Geopolimerler ise hafif, pürüzsüz, estetik ve ince bir kaplama ile kullanılabilirler. Bu malzemenin en yaygın olanı ise sodyum silikat temelli olan boyadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada araştırmacılar bu iki malzemeyi birleştirerek üstün özellikli bir materyal üretmek istemişler ve çelik yüzeylere uygulanabilen metakaolin ve sodyum silikat çözeltisi ile geopolimer tipi kaplama mantolama malzemesini üretmişlerdir [55].





Si/Al oranı 1 olduğunda zeolit kristaline benzer yangın koruyucu malzemeler, seramik ve tuğla benzeri ürünler ortaya çıkabilir. Oran 2 olduğunda seramik amorf yapı oluşur ve çimento gibi bağlayıcı yapı elde edilebilir. Si/Al oranı 3 olduğunda ise akışkan polimerik karakteri oldukça artmakta olup gelişmiş teknolojiler ile yangından koruyucu kaplamalar için yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı malzemeler üretilebilmektedir [59].

#### **4.5. Geopolimerlerin Dayanımına Etkiyen Faktörler**

Geopolimerlerin dayanımı genellikle su içeriği, alkali aktivatörün konsantrasyonu, kür koşulları ve bağlayıcı malzemenin kimyasal ve mineralojik bileşimi gibi birçok değişkene bağlıdır. Geopolimerlerin basınca karşı dayanımlarına aktivatör konsantrasyonu önemli ölçüde etki yapmaktadır. Geopolimerlerde en yüksek dayanım değerlerine ideal bir aktivatör konsantrasyonunda ulaşılabilmektedir. Bu ideal konsantrasyonun ötesinde malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilecek alkali aktifleştirilmiş matrisde bulunan serbest gezinen OH iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde bazı kayıplar da oluşabilmektedir. Ayrıca, kür sıcaklığı ve kür süresinin geopolimerlerin özellikleri üzerinde etkili olabilmesi için geopolimerizasyon süresi boyunca ortamda yeterli aktivatör yoğunluğu bulunmalıdır [60]. Bunun yanında, bazı geopolimerik ürünler oda sıcaklığında priz alarak dayanım kazanabilmektedir. Örnek olarak; oda sıcaklığında 4 saatte 20 MPa dayanıma ulaşan geopolimer örnekler mevcuttur. Ancak geopolimerli karışımların Portland çimentolu sistemlerle mukayese edebilen dayanımlara erişebilmesi için 40 °C ila 80 °C’de 6 saat veya daha fazla kür gerektiği belirtilen çalışmalar literatürde daha yoğun bulunmaktadır [52].

#### **4.6. Uçucu Kül Esaslı Geopolimerler Hakkında Yapılmış Çalışmalar**

Uçucu kül ile üretilen geopolimerlerin dayanım, dayanıklılık ve mikroyapı özellikleri üzerinde literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [61]. Bu özellikler üzerine aktivatör türünün ve dozajının, kür koşullarının, çeşitli fiber ilavesinin ve diğer bazı puzolanik malzeme ikamesinin etkileri birçok çalışmada rapor edilmiştir [62, 63]. Bununla birlikte, F sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimerlerin yüksek sıcaklık performansı üzerine de çalışmalar halen devam etmektedir [64]. Uçucu küllü geopolimerler hakkında yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Zhang ve çalışma arkadaşları, F sınıfı uçucu kül ile ortam koşullarında ve 80 °C'de 24 saat ısıtma kür koşullarında ürettikleri geopolimer betonların yüksek sıcaklık performansını araştırmışlardır. Geopolimer betonlarda aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikati 2 farklı oranda kullanmışlardır. Ürettikleri beton numuneler 5 °C/dk ısıtma hızıyla 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C ve 1000 °C'ye kadar ayrı ayrı ısıtmışlardır. Bu sıcaklıklara 2 saat boyunca maruz bırakılan betonlar üzerinde yüksek sıcaklığın etkisini; görsel inceleme, kütle kaybı, çatlamanın boyutu, dayanım ve mikro yapıdaki değişimleri inceleyerek ortaya koymuşlardır. Ortam sıcaklığında kür edilen betonlarda yüksek sıcaklık etkisiyle daha fazla kütle kaybı meydana geldiğini belirtmişlerdir. Beton yüzeylerinin iç bölgelere kıyasla daha fazla çatlak bulundurduğu ve bunun nedeninin de yüzeydeki betonun daha hızlı soğuması olduğunu rapor etmişlerdir. Kür koşulları fark etmeksizin F sınıfı uçucu küllü betonlarda 600 °C'ye kadar basınç dayanımı kaybı oluşmadığını belirtmişlerdir. Isıtma kür ile üretilen geopolimer betonların yüksek sıcaklık performanslarının ortam küründe üretilenlere göre daha iyi olduğunu rapor etmişlerdir [65].

Başka bir çalışmada, yüksek sıcaklıkların (1200 °C'ye kadar) C Sınıfı ve F Sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer pastalar üzerindeki etkisine ilişkin ayrıntılı bir çalışma sunulmuştur. Geopolimerlerin yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ve sonra termo-fiziksel davranışı, mekanik performansı ve mikro yapıları incelenmiştir. Bulgular, F Sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer pastaların, sıcaklık 500 °C'nin altında olduğunda daha iyi mekanik ve termo-fiziksel performansa sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan, C sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer pastaların, 800 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda daha iyi termal performansa sahip oldukları rapor edilmiştir [66].

Junru ve çalışma arkadaşları 400 °C, 600 °C, 800 °C ve 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile üretilen geopolimer betonların özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, geopolimer betonların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç ve yarmada çekme dayanımlarını belirlemiş ve geleneksel Portland çimentosu ile üretilen kontrol betonları ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, 400 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra geopolimer betonların basınç ve yarmada çekme dayanımlarının sırasıyla yaklaşık olarak %14 ve %9 arttığını göstermiştir. Daha yüksek

sıcaklıklarda ise geopolimer betonlardaki mukavemet kaybının geleneksel Portland çimentosu ile üretilen kontrol betonlarınkine göre daha az olduğu bildirilmiştir [67].

Başka bir çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz bırakılan (1000 °C'ye kadar) geopolimer harçların mikroyapısı ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Sadece uçucu kül içeren kontrol karışımı ile birlikte, uçucu kül yerine ağırlıkça %10, %30 ve % 50 oranlarında cüruf ikame edilerek 4 farklı karışım oluşturulmuştur. Yüksek sıcaklık performansını değerlendirmek için; ultrases geçiş hızı, taramalı elektron mikroskobu, cıva intrüzyon porozimetrisi, termal gerinim ölçümleri, diferansiyel termal analiz ve termogravimetri analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada cüruf ikamesinin uçucu kül esaslı geopolimer harçların mekanik performansını önemli ölçüde iyileştirmesine rağmen (basınç mukavemeti 100 MPa'nın üzerinde), yüksek sıcaklık performansını olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca, 1000 °C'de başlangıç dayanımının yaklaşık %90'ına sahip olan kontrol geopolimer harçların (sadece uçucu kül ile üretilen) yüksek sıcaklığa maruz kalabilecek yapı elemanlarında kullanımı önerilmiştir [68].

#### **4.7. Perlit Esaslı Geopolimerler Hakkında Yapılmış Çalışmalar**

Yapılan bir çalışmada, öğütülmüş ham perlit, sodyum hidroksit (NaOH), su ve standart kum kullanılarak geopolimer harçlar üretilmiş ve bu harçların dayanım özellikleri ile mikro yapıları incelenmiştir. Bu çalışmada, NaOH molaritesinin, ısıl kür sıcaklığının ve ısıl kür süresinin perlit esaslı geopolimer harçların dayanım gelişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Harç numuneleri, dökümden 24 saat sonra fırına yerleştirilerek farklı sıcaklık ve sürelerde tutulmuş, daha sonra numuneler dayanım test gününe kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Isıl kür işlemi sonrasında harçların birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca harç numuneleri üzerinde SEM/EDX analizleri yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Araştırmacılar harçların mekanik özelliklerinin ısıl kür sıcaklığı, ısıl kür süresi ve NaOH molaritesi ile arttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca, harçların birim ağırlıklarının artan NaOH molaritesi ile arttığı, artan ısıl kür sıcaklığı ve süresi ile azaldığı belirtilmiştir. En yüksek ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri (sırasıyla 3.22 km/sn, 5.33 MPa ve 41.59 MPa) 16 M NaOH çözeltisi ile 120 °C'de 48 saat boyunca ısıl küre tabi tutulan numunelerde elde edilmiştir [69].

Güzelküçük ve Demir, öğütülmüş perlitli NaOH ile aktive ederek 50×50×50 mm boyutlarında çimentosuz perlit esaslı kompozit küp numuneler elde etmişlerdir. Harç karışımları 11.6 M, 7.7 M ve 15.5 M NaOH çözeltileri kullanılarak oluşturulmuştur. Üretilen karışımlar 90 °C ile 110 °C kür sıcaklığında 24 ve 48 saat boyunca ayrı ayrı bekletilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, NaOH miktarının ve kür sıcaklığının artırılması ile basınç dayanımının arttığı belirlenmiştir. Kür sıcaklığındaki artış ile erken yaşlardaki dayanımların çok daha fazla artış gösterdiğini ve ilerleyen yaşlarda reaksiyon süresinin artması ile kür sıcaklığı artışının nihai dayanımın azalmasına sebep olduğu belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı dayanımı 15.5 NaOH ile üretilen ve 110 °C’de 24 saat ısıtılı küre tabi tutulan harçlardan elde edilmiştir [70].

Diğer bir çalışmada, öğütülmüş ham perlit, NaOH ve/veya sodyum silikat çözeltileri kullanılarak üretilen geopolimer karışımların oda sıcaklığında veya ısıtılı kür koşullarında dayanım gelişimi, termal stabilitesi ve asit direnci araştırılmıştır. Oda sıcaklığında, sodyum silikat ile aktive edilen karışımların dayanım gelişimleri NaOH ile aktive edilenlere göre daha iyi olduğu gözlenmiştir. Her iki aktivatörle de 100°C’de ısıtılı kür ile yüksek mukavemetli geopolimerler elde edilmiştir. Bununla birlikte, sodyum silikatla aktive edilen numunelerin, NaOH çözeltisiyle aktive edilenlere göre yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı olduğu, sülfürik asit çözeltisine ise daha az dirençli olduğu rapor edilmiştir [71].

Literatür incelendiğinde uçucu kül esaslı geopolimerlerin dayanım gelişimi ve yüksek sıcaklık performansları ile ilgili birçok çalışma olduğu görülmüştür. Ancak ham perlit esaslı geopolimerler hakkında literatürde çok az çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle bu tez çalışmasında uçucu kül ve perlit ayrı ayrı ve birlikte NaOH ile aktive edilerek dayanım gelişimleri ve yüksek sıcaklık performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böylece ham perlit esaslı geopolimerler ile ilgili literatüre katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

## BÖLÜM 5

### MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında ince öğütülmüş ham perlit (HP), F Sınıfı uçucu kül (UK), dere kumu, musluk suyu ve NaOH kullanılarak beş farklı geopolimer harç karışımı oluşturulmuştur. Üretilen harçlar 90 °C’de üç farklı sürede ısı küre tabii tutulmuştur. Harç üretiminde kullanılan materyaller ve uygulanan metotlar aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

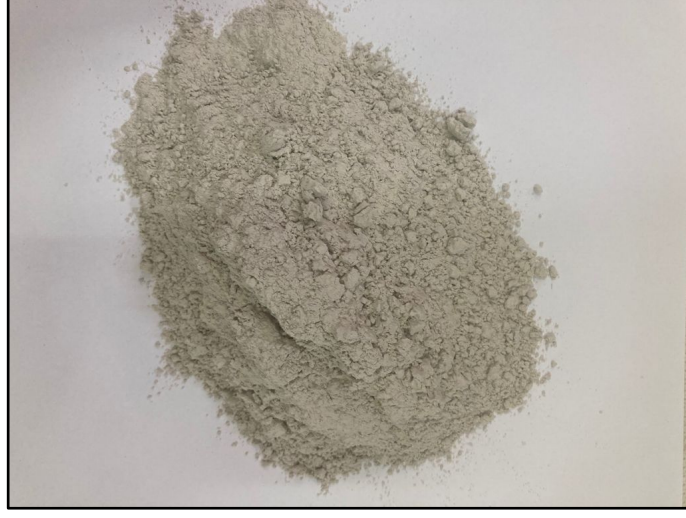
#### 5.1. Materyal

##### 5.1.1. Perlit

Çalışmada kullanılan öğütülmüş ham perlit (HP) malzemesi Kütahya’da bulunan Genper Maden San. Tic. Ltd. Şti.’den temin edilmiştir. Üretici, açık madencilik yöntemleriyle patlatarak perlit cevheri elde etmektedir. Daha sonra üretici tarafından perlit cevherinin ezilmesi, öğütülmesi ve derecelendirilmesinden sonra HP elde edilmiştir. Tablo 5.1, perlitin kimyasal ve fiziksel özelliklerini göstermektedir. Resim 5.1.’de HP malzemesi gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Öğütülmüş ham perlitin özellikleri

Kimyasal Bileşim, %							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
71.36	13.08	5.42	3.21	0.12	0.96	0.78	0.11
Diğer Özellikler							
pH		Kızdırma Kaybı			Kütle Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )		
7.71		2.12			1152		



Resim 5.1. Öğütülmüş ham perlit malzemesinin görünümü.

#### **5.1.2. Uçucu Kül**

Geopolimer harç karışımlarında, F sınıfı uçucu kül (UK) kullanılmıştır. UK malzemesi Sugözü (Yumurtalık, Adana) Termik Santrali'nden temin edilmiştir. UK malzemesi ithal kömürün yakılması sonucu meydana gelmiştir. Temin edilen malzeme laboratuvarında 125  $\mu\text{m}$ 'lik elekten elenerek kullanılmıştır (Resim 5.2.). Sugözü UK'nın 28 günlük puzolanik dayanım aktivite endeksi %87'dir.



Resim 5.2. F sınıfı uçucu kül malzemesinin görünümü.

UK malzemesinin, CaO oranı %10'dan az ve SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı kütlece %70'den fazla olduğu için ASTM C618 [28]'e göre düşük kireçli F sınıfı uçucu kül sınıfında yer almaktadır. Aynı zamanda bu UK, TS EN 197-1 [29]'e göre CaO içeriği %10'dan az oldukları için V (Silissi) uçucu kül sınıfında yer almaktadır. UK malzemesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Sugözü uçucu külünün kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim, %							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
60.51	21.69	2.58	0.92	1.65	1.52	7.85	0.53
Diğer Özellikler							
> 45 Mikron (%)			Kızdırma Kaybı			Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	
18.47			2.42			2290	

### 5.1.3. Kum

Geopolimer harç karışımlarında 0-4 mm tane boyutu aralığında dere kumu kullanılmıştır. Dere kumunun su emme oranı ve doymuş kuru yüzey özgül ağırlığı sırasıyla % 1.94 ve 2.67'dir. Kuma ait elek analizi sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir. Ayrıca kumun görünümü Resim 5.3.'te sunulmuştur.

Tablo 5.3. Dere kumunun elek analizi

Elek Çapı, mm	Geçen, %
0.063	0.8
0.125	4.1
0.25	9.8
0.50	21.1
1.00	40.5
2.00	65.4
4.00	99.2



Resim 5.3. Dere kumunun görünümü.

#### 5.1.4. Sodyum hidroksit (NaOH)

Çalışmada aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Genellikle kostik olarak bilinen NaOH'ın, ucuz olması ve kolay temin edilebilirliği önemli avantajdır. Boncuk veya beyaz pul şeklindedir. NaOH, su ile ısı vererek çözünür. Nemli ortamdan etkilenip bozulabilmektedir. KOH ile aynı özellik gösterir fakat daha az yakıcı bir bazdır. Harç karışımlarında kullanılan NaOH, Arkim Ltd. Şti.'den 25 kg'lık torbalar halinde pul şeklinde temin edilmiş olup, Resim 5.4'te gösterilmiştir. Kullanılan NaOH'ın saflığı yaklaşık %98'dir.



Resim 5.4. NaOH malzemesinin görünümü.



### 5.1.5. Su

Harç karışımlarında, Nevşehir şehir şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. TS EN 1008 [72] standardında karışım suyu olarak içilebilen suların harç karışımlarında kullanımının uygun olduğu belirtilmektedir.

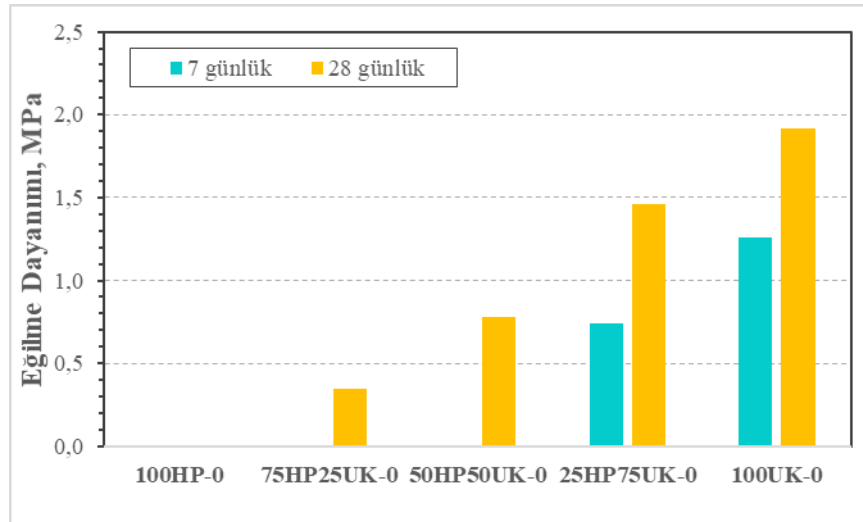
### 5.2. Metot

Geopolimer karışımlarına uygulanacak kür koşulları ile ilgili öncelikle bir deneme çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneme çalışmasında, HP ve UK malzemelerinin tekli ve ikili karışımları 10 M NaOH solüsyonu ile aktive edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen harçlar herhangi bir ısıtma işlemi olmadan, laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Deneme çalışması kapsamında üretilen harçlara HP ve UK malzeme içeriğine ve ısıtma süresine göre kodlamalar yapılmış ve bu kodlamalar Tablo 5.4’de sunulmuştur. Bu harçlara ısıtma uygulanmadığı için kodlama sonunda ısıtma süresi 0 olarak belirtilmiştir. Harçlar üzerinde 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanım değerleri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. 100HP-0, 75HP25UK-0 ve 50HP50UK-0 kodlu harçlarda 7 günlük eğilme dayanımı elde edilememiştir. Ayrıca, 100HP-0 kodlu harçlarda 28 günlük eğilme dayanımları da yine sıfır olmuştur. Bununla birlikte, en yüksek eğilme dayanımı değerlerine 100UK-0 kodlu karışımlarda ulaşılmıştır. 100UK-0 kodlu harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 1.26 MPa ve 1.92 MPa olmuştur. Harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Harçlarda en düşük 7 ve 28 günlük basınç dayanımları 100HP-0 kodlu harçlarda görülürken, en yüksek dayanımlar ise 100UK-0 kodlu harçlarda elde edilmiştir. 100UK-0 kodlu harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları 100HP-0 kodlu harçlara göre sırasıyla yaklaşık olarak %111 ve %43 oranlarında daha yüksek elde edilmiştir. 100UK-0 kodlu harçların 28 günlük basınç dayanımları 8.3 MPa iken, 100HP-0 kodlu harçlarda 28 günlük basınç dayanımı 5.8 MPa olmuştur. Harçların eğilme dayanımları ile basınç dayanımları değerleri benzerlik göstermiştir. Harçların eğilme ve basınç dayanımları UK içeriği ile birlikte artmıştır.

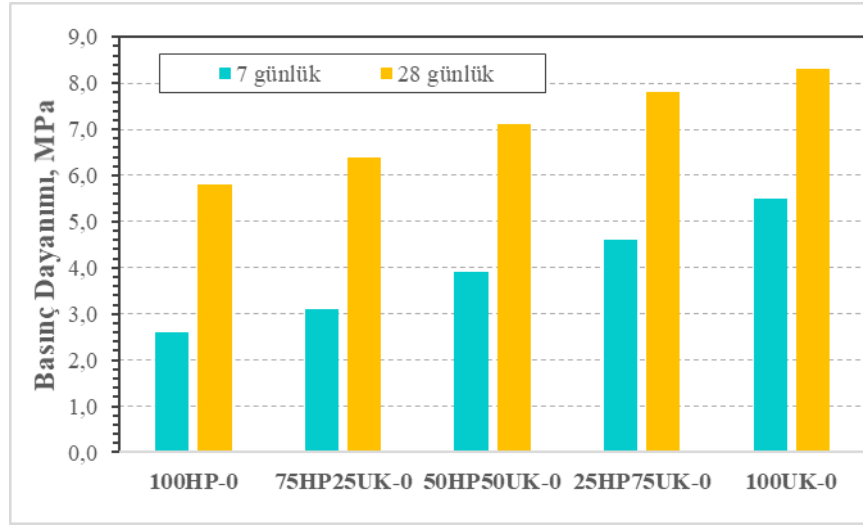
Deneme çalışmasında elde edilen bulgulara göre geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları ortam küründe oldukça düşük seviyelerdedir. Elde edilen sonuçlar HP ve UK malzemelerinin 10 M NaOH solüsyonu ile ortam kürü koşullarında aktive olmaya elverişli olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, HP ve UK malzemelerinin tekli ve ikili karışımlarından daha yüksek dayanım değerlerinin ısıtılma kür uygulaması ile elde edilebileceği düşünülmüştür. Daha önce yapılan bir çalışmada, HP malzemesi kullanarak üretilen geopolimer harçların dayanım değerlerinin kür sıcaklığının ve süresinin artması ile birlikte yükseldiğini rapor edilmiştir [69]. Enerji tüketimi de göz önünde bulundurularak kür sıcaklığı 100 °C'nin altında tutulmuş ve 90 °C seçilmiştir. Kür süresi olarak da 4, 8 ve 24 saat belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Deneme çalışması karışım oranları, gr

Karışım Kodu	Perlit	Uçucu Kül	NaOH	Kum	Su
100HP-0	450	0			
75HP25UK-0	337,5	112,5			
50HP50UK-0	225	225	72	1300	180
25HP75UK-0	112,5	337,5			
100UK-0	0	450			



Şekil 5.1. Deneme çalışmasında üretilen harçların eğilme dayanımları



Şekil 5.2. Deneme çalışmasında üretilen harçların basınç dayanımları

Bu deneysel çalışmada kütlece %100/0, %75/25, %50/50, %25/75 ve %0/100 HP/UK oranı ile 5 farklı geopolimer harç karışımı oluşturulmuştur. Harçlarda 3 gözlü 40×40×160 mm<sup>3</sup> prizma kalıp için kullanılan malzeme miktarları Tablo 5.5'te sunulmuştur. Harçlara uygulanan ısıl kür süresine göre 4S (4 saat), 8S (8 saat) ve 24S (24 saat) olmak üzere 3 farklı seride geopolimer harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, her bir serideki harç karışımına içeriğinde bulunan HP ve UK malzeme miktarlarının kütlece oranına ve ısıl kür süresine göre kod tanımlanmıştır. Tablo 5.5'te HP100, HP75UK25, HP50UK50, HP25UK75 ve UK100 kodlamaları sırasıyla %100/0, %75/25, %50/50, %25/75 ve %0/100 HP/UK kütle oranını ifade etmektedir. Ayrıca, harçlara uygulanan ısıl kür süresi de kodlamanın sonunda belirtilmiştir. Örneğin, HP25UK75-8 kodlu karışımlar kütlece %25/75 HP/UK kütle oranı ile üretilmiş ve 8 saat ısıl küre tabi tutulmuştur. Karışımlar 0.4 su/(HP+UK) oranı ile üretilmiştir. NaOH molaritesi ise 10M olarak belirlenmiştir. Katı NaOH peletleri 10 molar aktivatör solüsyonu elde edilecek şekilde karışım suyunda eritilmiştir. Solüsyon hazırlama işlemi karışım işlerinden önce tamamlanmıştır. Malzeme tartımlarının ve hazırlanan solüsyonun görünümü Resim 5.5'de sunulmuştur. Karışımlarda öncelikle HP, UK ve aktivatör solüsyonu Resim 5.6'daki Hobart mikseri kabına yerleştirilmiş, kum daha sonra TS EN 196-1 [73] standardında olduğu şekilde 30 sn içinde ilave edilmiştir. Üretilen karışımlar 3 gözlü prizma kalıplara döküldükten sonra 1 gün laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Kalıba yerleştirilen HP50UK50-4 kodlu karışımın taze haldeki görünümü Resim 5.7'de sunulmuştur. Karışımlara daha sonra 90 °C'de 4 (4S serisi), 8 (8S serisi) ve 24 (24S serisi)

saat olmak üzere 3 farklı sürede Resim 5.8'deki fırında ısıl kür uygulanmıştır. Isıl kürden sonra harç numuneleri kalıplarından çıkarılmış ve deney gününe kadar laboratuvar koşullarında Resim 5.9'daki gibi bekletilmiştir. Taze harçlara TS EN 1015-3 [74], standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi gerçekleştirilerek yayılma değerleri belirlenmiştir. Harçlar üzerinde ısıl kürden 7, 28 ve 90 gün sonra TS EN 196-1 [73] standardına göre eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. 90 günlük geopolimer harçlardan elde edilen 3'er adet numune 400 °C, 600 °C ve 800 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklığa ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık performansları, yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kaybı, dayanım kaybı ve mikro yapılarda meydana gelen değişiklikler açısından belirlenmiştir.



Resim 5.5. Geopolimer harç üretimi için malzeme hazırlıkları.



Resim 5.6. Perlit, uçucu kül ve aktivatörün mikser kabında görünümü.



Resim 5.7. HP50UK50-4 kodlu karışımın harç kalıbında taze haldeki görünümü.



Resim 5.8. Geopolimer harçların kür fırınındaki görünümü.



Resim 5.9. Kalıplarından çıkarılan harç numunelerinin görünümü.

Tablo 5.5: Harç karışım oranları, gr

Seri Kodu	Karışım Kodu	Perlit	Uçucu Kül	Kum	NaOH	Su	Kür Koşulu
4S	HP100-4	450	0	1300	72	180	4 SAAT 90 °C
	HP75UK25-4	337.5	112.5	1300	72	180	
	HP50UK50-4	225	225	1300	72	180	
	HP25UK75-4	112.5	337.5	1300	72	180	
	UK100-4	0	450	1300	72	180	
8S	HP100-8	450	0	1300	72	180	8 SAAT 90 °C
	HP75UK25-8	337.5	112.5	1300	72	180	
	HP50UK50-8	225	225	1300	72	180	
	HP25UK75-8	112.5	337.5	1300	72	180	
	UK100-8	0	450	1300	72	180	
24S	HP100-24	450	0	1300	72	180	24 SAAT 90 °C
	HP75UK25-24	337.5	112.5	1300	72	180	
	HP50UK50-24	225	225	1300	72	180	
	HP25UK75-24	112.5	337.5	1300	72	180	
	UK100-24	0	450	1300	72	180	



### 5.2.1. Yayılma tablası deneyi

Taze haldeki geopolimer harç karışımları üzerinde TS EN 1015-3 [74] standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyde yayılma tablası ve kalıp, tokmak, çap ölçer cetvel ve mala ekipmanları kullanılmıştır.

Yayılma tablası dikkatlice temizlenmiş, sonrasında da kurutulmuştur. Yayılma tablası deneyi için kullanılacak kalıp tablanın merkezine yerleştirilmiştir. Hazırlanmış olan harçtan yaklaşık 25 mm kalınlıkta olacak şekilde iki tabaka halinde kalıbın içerisine doldurulmuş ve 20 kere tokmaklanarak sıkıştırılmıştır. Tokmaktama işlemi harcın kalıp içerisinde homojen olarak dağılmasını sağlayacak şekilde yapılmıştır. Daha sonra, kalıbın kalan kısmı harç ile doldurularak ilk katmanda yapıldığı gibi tokmaklanarak sıkıştırılmıştır. Kalıbın üzeri mala yardımıyla düzeltilmiştir. Kalıp yavaşça sıkıştırılan harca zarar vermeden düşey yönde çekilerek çıkarılmıştır. Yayılma tablası 15 saniyede 15 kez düşürülmüştür. Cetvel yardımıyla harcın 4 farklı tarafından çap ölçümleri yapılmıştır. Aynı işlem her karışım için 3 kez tekrarlanmıştır. Kütlece %50/50 HP/UK oranıyla üretilen harçlar üzerinde yapılan yayılma tablası deneyi Resim 5.10'da sunulmuştur.



Resim 5.10. Yayılma tablası deneyi.

### 5.2.2. Eğilme dayanımı deneyi

Geopolimer harçların eğilme altındaki çekme dayanımını belirlemek için TS EN 1015-11 [75] standardına uygun olarak eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri Resim 5.11’de görüldüğü gibi mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde tek noktadan yükleme suretiyle yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri 7, 28 ve 90 günlük geopolimer harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 90 günlük numuneler üzerinde yüksek sıcaklık (400 °C, 600 °C ve 800 °C) etkisinden sonra eğilme deneyi yapılmış olup yüksek sıcaklık etkisindeki dayanım değişimi irdelenmiştir. Eğilmede çekme dayanımı (Ed) değeri Bağıntı 5.1. kullanılarak N/mm<sup>2</sup> cinsinden elde edilmiştir. Bir kalıptan çıkan 3 numuneye eğilme deneyi uygulanmıştır. Ortaya çıkan değerlerin aritmetik ortalaması eğilme dayanımı olarak alınmıştır.

$$Ed = 1,5 \times ( P \times L ) / a^3 \quad ( \text{Bağıntı 5.1.} )$$

Burada ;

Ed : Eğilme dayanımı, N/mm<sup>2</sup>

a : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, 40 mm

P: Prizmanın ortasına uygulanan kuvvet, N

L: Mesnet açıklığı, 100 mm



Resim 5.11. Eğilme dayanımı deneyi.



### 5.2.3. Basınç dayanımı deneyi

Eğilme deneyi uygulanıp ortadan ikiye bölünmüş numunelerin düzgün kalıp yüzeylerine TS EN 1015-11 [75] standardında belirtilen şekilde Resim 5.12’de görüldüğü gibi basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı deneyi sonrası ortadan ikiye bölünmüş numuneler 40×40 mm cihaz başlığı arasına yerleştirilerek 500 N/s hızında yük uygulanarak kırılmıştır. Kırılma anındaki yük değeri yükün uygulandığı alana bölünerek basınç dayanım değeri Bağlantı 5.2 ile elde edilmiştir.

6 yarım numuneye uygulanan basınç dayanımı deneyi sonucu ortaya çıkan değerlerin aritmetik ortalaması basınç dayanım değeri olarak alınmıştır.

$$Bd = F/b^2 \quad (\text{Bağlantı 5.2.})$$

Burada;

Bd: Basınç dayanımı, N/mm<sup>2</sup>

b: Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F: Kırılmadaki en büyük kuvvet, N



Resim 5.12. Basınç dayanımı deneyi.

#### 5.2.4. Su emme-boşluk oranı deneyi

90 günlük geopolimer harçların su emme ve boşluk oranı belirlenmiştir. Öncelikle harçların etüv kurusu ağırlıkları, kuru yüzey doymun ağırlıkları ve su içindeki ağırlıkları ölçülmüştür. Bu üç değerin yardımıyla su emme ve boşluk oranları hesaplanmıştır. Geopolimer harçlarının su emme ve boşluk oranı değeri aşağıda verilen Bağlantı 5.3 ve Bağlantı 5.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Boşluk Oranı (\%)} = (A_{KYD} - A_{FK}) / (A_{KYD} - A_{SU}) \times 100 \quad (\text{Bağlantı 5.3.})$$

$$\text{Su Emme Oranı (\%)} = (A_{KYD} - A_{FK}) / A_{FK} \times 100 \quad (\text{Bağlantı 5.4.})$$

Burada;

$A_{FK}$ : Fırın kurusu ağırlığı (g)

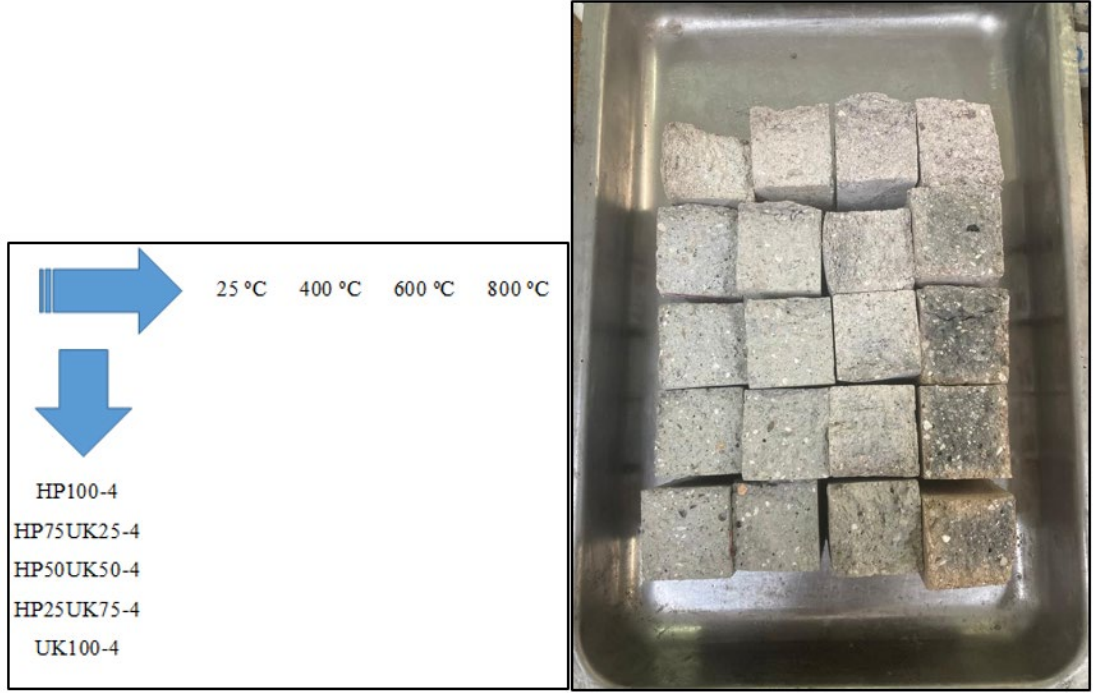
$A_{KYD}$ : Kuru yüzey doymun ağırlığı (g)

$A_{SU}$ : Su içindeki ağırlığı (g)

#### 5.2.5. Yüksek sıcaklık deneyi

90 günlük geopolimer harç numuneleri üzerinde yüksek sıcaklık deneyi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyleri 5 °C/dk ısınma ısısına sahip yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımdan alınan üç adet harç numunesi yüksek sıcaklık fırını içine konulmuştur. Numuneler hedef sıcaklıklar olan 400 °C, 600 °C ve 800 °C'ye bir saat boyunca ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Bir saat sonunda yüksek sıcaklık fırını kapatılarak numuneler yavaşça soğumaya bırakılmıştır.

Yüksek sıcaklık deneyinden önce ve sonra numunelerin ağırlıkları belirlenmiştir. Bu değerler ile numunelerin yüzde olarak ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Son olarak, harç numunelerine eğilme ve basınç dayanım deneyleri uygulanarak referans numunelerle (yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan numuneler) aralarındaki farklar karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklığın 4S serisi harçların kesit görünümüne etkisi Resim 5.13.'de sunulmuştur. 8S ve 24S serisi harçların da kesit görünümüleri 4S serisiyle benzerlik göstermiştir. Resim 5.13.'de de görüldüğü gibi özellikle 800 °C'ye maruz bırakılan harçların görünümünde belirgin değişiklikler meydana gelmiştir.



Resim 5.13. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası numune kesitlerinin görünümü.

### 5.2.6. SEM/EDX analizleri

HP100-8, HP25UK75-8, UK100-8 geopolimer harç karışımları mekanik ve yüksek sıcaklık performansları nedeniyle SEM/EDX analizleri için seçilmiştir. Bu karışımlardan elde edilen numunelerden yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası küçük parça halinde örnekler alınmıştır. Örneklerden daha iyi görüntü alınabilmesi için örnekler altınla kaplanmıştır. Örnekler üzerinde SEM/EDX analizi LEO 440 model elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yüksek sıcaklığın geopolimer harçların mikroyapılarında meydana getirdiği değişimler irdelenmiştir.

### 5.2.7. XRD analizleri

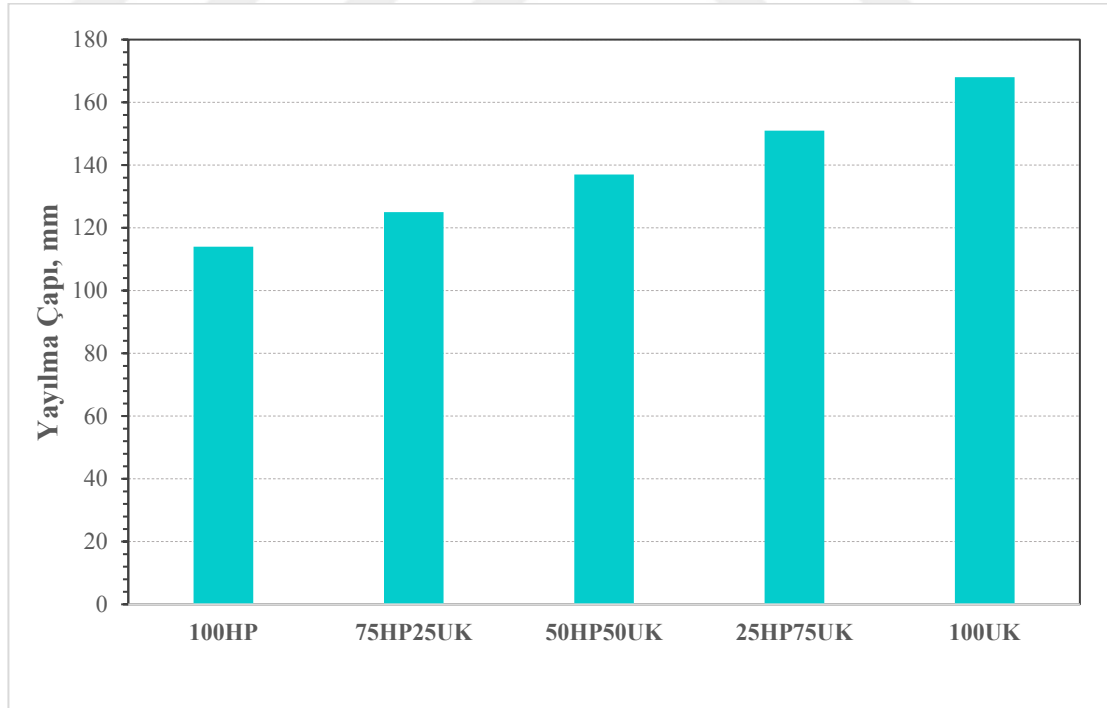
Yüksek sıcaklıklara maruz kalmayan (25 °C) ve 600 °C ile 800 °C'ye ayrı ayrı maruz bırakılan HP25UK75-8 kodlu harçlar üzerinde XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM 6

### BULGULAR ve TARTIŞMA

#### 6.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları

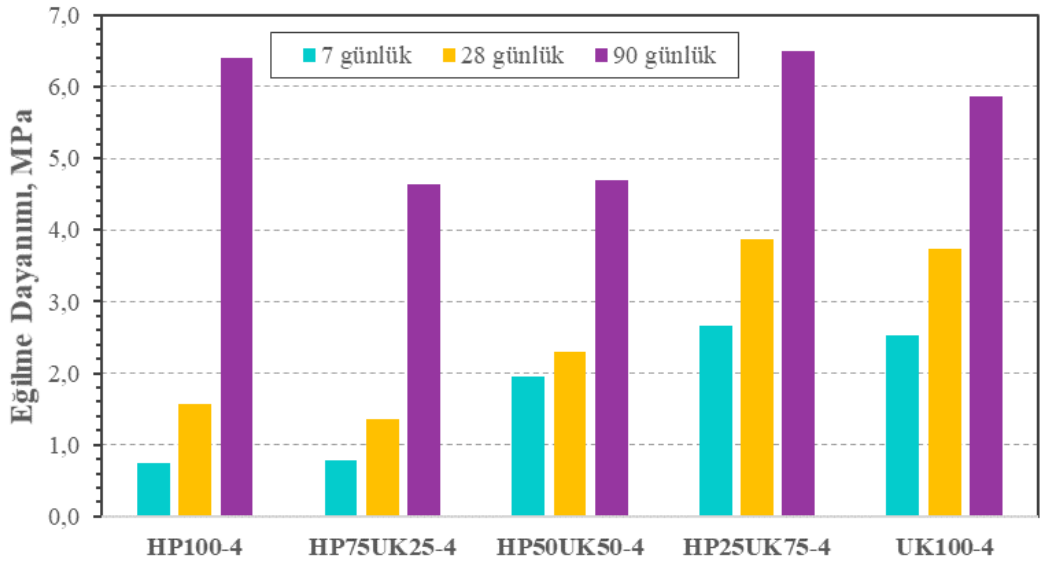
Harçlara uygulanan yayılma tablası deneyinin sonuçları Şekil 6.1.'de sunulmuştur. Şekil 6.1 incelendiğinde en düşük yayılma değeri 100HP karışımında görülürken, en yüksek yayılma değeri ise 100UK karışımında gözlenmiştir. 100HP karışımının ortalama yayılma çapı 114mm iken, 100UK karışımının ortalama yayılma çapı 168 mm ölçülmüştür. Ayrıca geopolimer karışımlarındaki UK içeriği ile birlikte harçların yayılma çapları kademeli olarak artmıştır. Öyle ki 100UK karışımının yayılma değeri 100HP karışımının yayılma değerine göre yaklaşık olarak %47 daha yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak uçucu külün yuvarlak ve az pürüzlü tanecik yapısı gösterilebilir. Daha önce yapılan bir çalışmada kullanılan F ve C sınıfı uçucu küllerin SEM görüntüleri Şekil 3.1'de sunulmuştur. UK malzemesi de F sınıfı UK olduğundan benzer tanecik yapısına sahip olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 6.1. Harçların yayılma değerleri

## 6.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

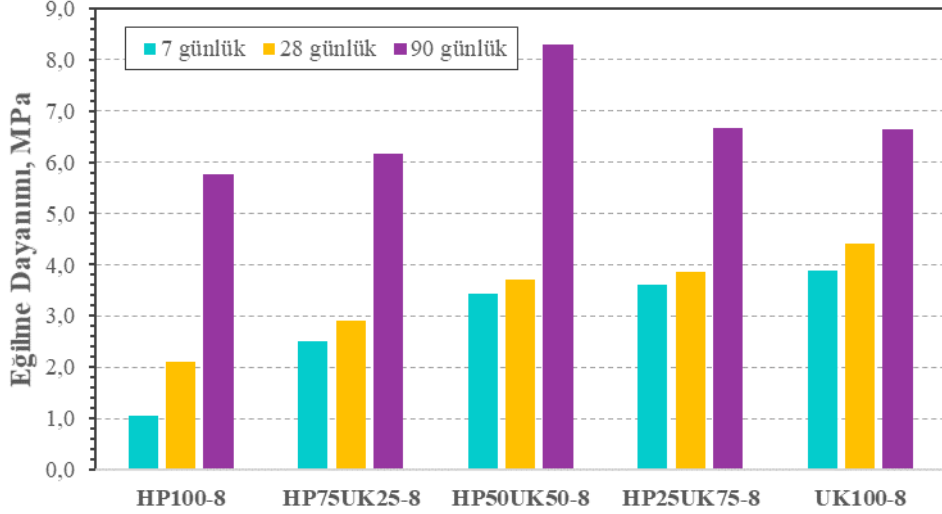
4S serisi geopolimer harçların eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 6.2’de verilmiştir. 4S, 8S ve 24S harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 0.75 ile 2.67 MPa, 1.35 ile 3.87 MPa ve 4.64 ile 6.49 MPa arasında elde edilmiştir. 4S serisi harçlarda en yüksek 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerlerine HP25UK75-4 kodlu harçlarda ulaşılmıştır. En düşük 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri HP100-4 kodlu harçlardan elde edilirken, en düşük 90 günlük eğilme dayanımı HP75UK25-4 kodlu harçlardan 4.64 MPa olarak elde edilmiştir. 4S Serisi harçların eğilme dayanımı değerleri 7. günden 28. güne %17 ile 108 arasında ve 28. günden 90. güne %57 ile 310 arasında artışlar göstermiştir. 4S serisi harçlardaki kür yaşı ile birlikte eğilme dayanımı değerlerindeki artış, HP içeriği ile daha belirgin olmuştur.



Şekil 6.2. 4 saat serisi harçların eğilme dayanımları.

8S serisi geopolimer harçların eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 6.3’de sunulmuştur. 8S serisi harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 1.05 MPa ile 3.88 MPa, 2.11 MPa ile 4.40 MPa ve 5.76 MPa ile 8.29 MPa arasında değişmektedir. 8S serisi harçlarda en düşük erken yaş (7 günlük) eğilme dayanımları 4S serisi harçlarda olduğu gibi 100/0 HP/UK kütle oranıyla üretilen harçlarda görülmüştür. Ayrıca, UK100-8 kodlu harçlar tüm 8S serisi harçlar içinde 7 ve 28 günde en yüksek eğilme dayanımı değerlerine sahiptir. 90 günde ise en yüksek eğilme dayanımı değeri HP50UK50-8 kodlu

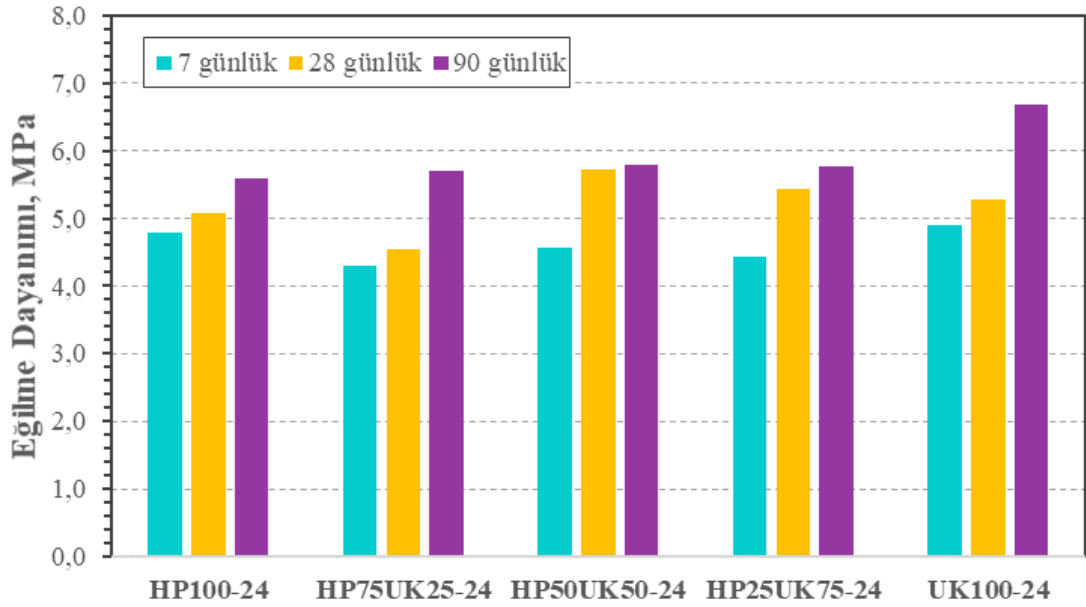
harçlarda gözlenmiştir. 8S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri 7 günden 28 güne %7 ile %101 arasında, 28 günden 90 güne %50 ile %173 arasında artışlar göstermiştir. Harçlardaki HP içeriği arttıkça, kür yaşı ile harçlardaki eğilme dayanımı artışı daha fazla olmuştur.



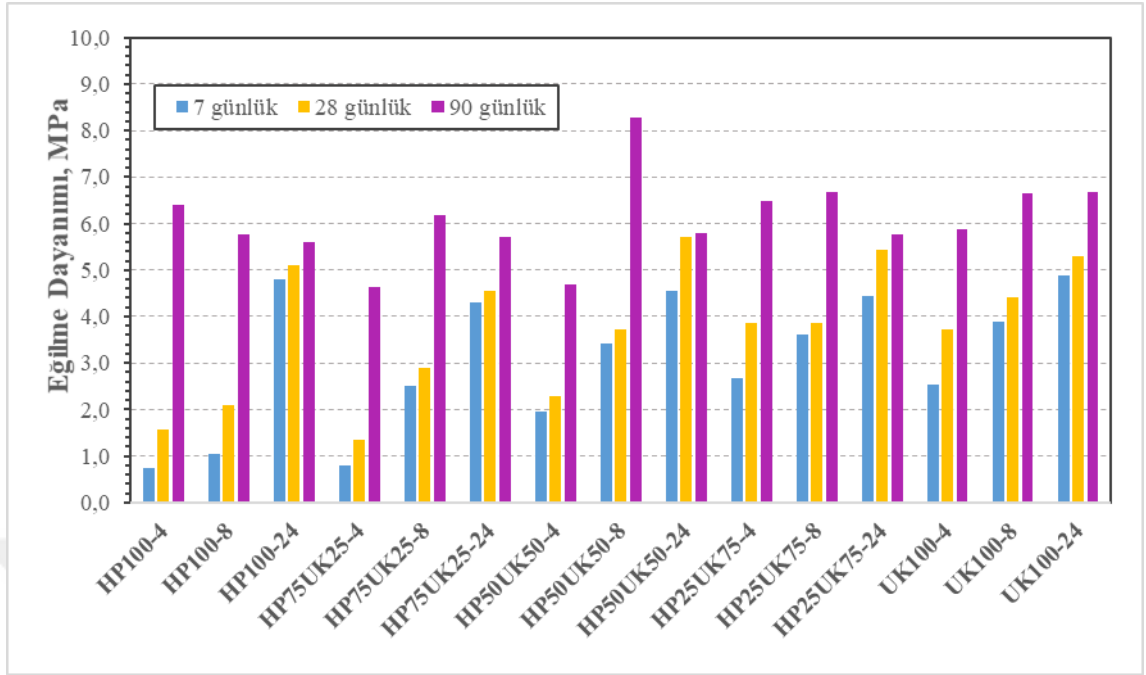
Şekil 6.3. 8 saat serisi harçların eğilme dayanımları.

24S serisi geopolimer harçların eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 6.4’te verilmiştir. Ayrıca, tüm serilerdeki harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 6.5’de sunulmuştur. 24S serisi harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 4.31 MPa ile 4.90 MPa, 5.09 MPa ile 5.72 MPa ve 5.60 MPa ile 6.69 MPa arasında değişmektedir. Diğer serilerden farklı olarak, 24S serisi harçların eğilme dayanımındaki farklar oldukça azalmıştır. Bu durum, ısıl kür etkisinde daha uzun süre kür edilen HP malzemesinin erken yaşlarda aktive olmasıyla açıklanabilir. Öyle ki HP100-4 kodlu harçlara göre HP100-8 kodlu harçların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla yaklaşık olarak %40 ve %35 daha yüksektir. Benzer şekilde, HP100-8 kodlu harçlara göre HP100-24 kodlu harçların eğilme dayanımları sırasıyla yaklaşık olarak %358 ve %141 daha yüksektir. Daha önceki bir çalışmada, daha uzun süreyle ısıl kür uygulanan UK esaslı geopolimer harçların yüksek erken eğilme dayanımı, geopolimerik kimyasal reaksiyonun kinetiği ile açıklanmıştır. Daha uzun ısıl kür süresi kimyasal süreci hızlandırmakta ve alkali ortamda amorf alümina ve silika arasında daha fazla reaksiyona

neden olmaktadır [76]. Bu çalışmada, HP ve UK esaslı geopolimer harçlar için benzer davranış gözlemlenmiştir. Öte yandan, daha yüksek ısı kütür süresi, harçların kütür yaşı ile birlikte eğilme dayanımı gelişimi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Isıl işlemin geopolimerlerin yüksek erken dayanım kazancı üzerindeki olumlu etkisi önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir [77,78]. Ancak bu çalışmalarda, uygulanan ısı kütür rejiminin, alümina ve silika türlerinin çözünmesi ve çökmesi için uygun bir ortam sağlayacak şekilde optimum sıcaklıkta ve sürede olması gerektiği de vurgulanmıştır. Bu tez çalışması sonucunda da HP ve UK gibi öncülerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin geopolimerler için ideal kütür koşulu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu da vurgulanabilir. Bununla birlikte, 24S Serisi harçların eğilme dayanımı değerleri 7 günden 28 güne %5 ile %25 arasında ve 28 günden 90 güne %1 ile %26 arasında artış göstermiştir.



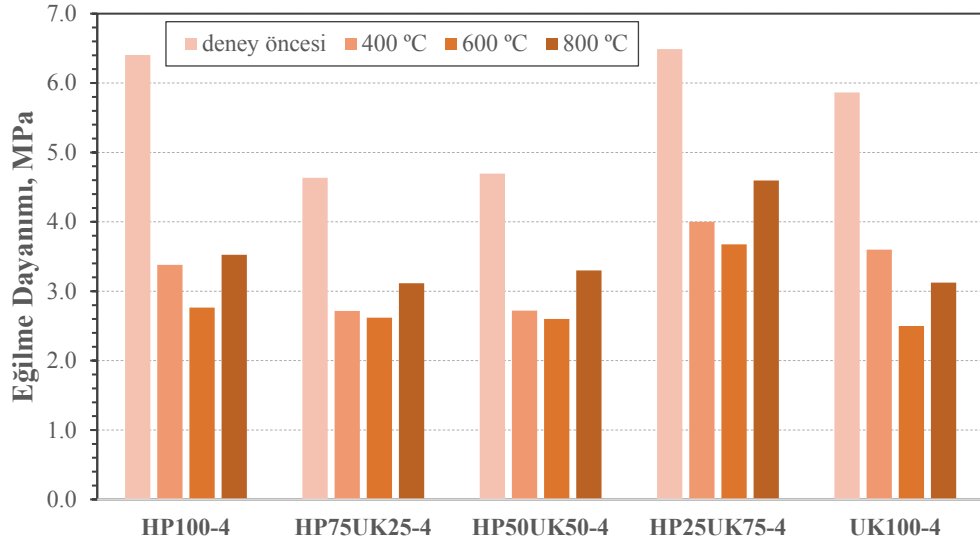
Şekil 6.4. 24 saat serisi harçların eğilme dayanımları.



Şekil 6.5. Tüm serilerdeki harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları.

Şekil 6.6 4S serisi geopolimer harçların 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce (deney öncesi) ve sonra eğilme dayanımı değerlerinin değişimini göstermektedir. 400 °C’de 4S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri başlangıçtaki dayanımlarına göre %35 ile %47 arasında azalmıştır. Bu derecede, en fazla eğilme dayanımı kaybı HP100-4 kodlu harçlarda görülürken, en az kayıp HP25UK75-4 kodlu harçlarda gözlenmiştir. Sıcaklık 600 °C’ye çıktığında, 4S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri başlangıç değerlerine göre %43 ile %58 arasında azalmıştır. Bu sıcaklıkta ise en fazla eğilme dayanımı kaybı UK100-4 kodlu harçlarda gözlenmiştir. En düşük eğilme dayanımı kaybı ise 400 °C’de olduğu gibi HP25UK75-4 kodlu harçlarda görülmüştür. 800 °C’de harçların davranışı 400 °C ve 600 °C’ye göre tamamen değişmiştir. 800 °C’ye tabi tutulduktan sonra 4S Serisi harçların eğilme dayanımı değerleri 600 °C’deki eğilme dayanımı değerlerine göre %18 ile %28 arasında artmıştır. 800 °C’de başlangıç dayanımına göre en fazla eğilme dayanımı kaybı UK100-4 kodlu harçlarda görülürken en iyi performans HP25UK75-4 kodlu harçlarda elde edilmiştir. Ayrıca, HP25UK75-4 kodlu harçlar 800 °C’de başlangıç dayanımlarının yaklaşık %70’ini korumuştur.





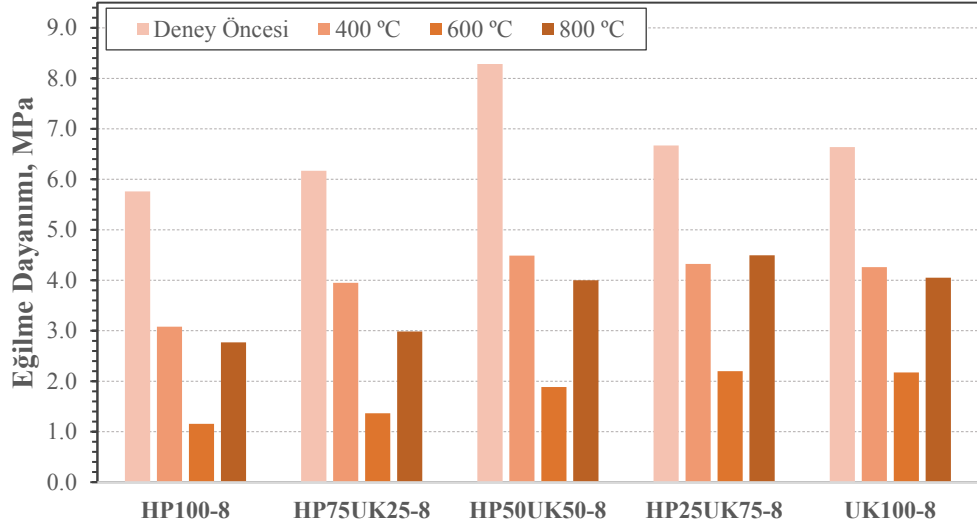
Şekil 6.6. 4 saat serisi harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları.

8S serisi harçların yüksek sıcaklık etkisindeki eğilme dayanımları Şekil 6.7’de sunulmuştur. Bu seride 400 °C’de %35 ile %47 arasında, 600 °C’de ise %67 ile %80 arasında eğilme dayanımı kayıpları meydana gelmiştir. Bu sıcaklıklarda en yüksek kayıplar HP100-8 kodlu harçlarda görülürken, en düşük kayıplar HP25UK75-8 kodlu harçlarda elde edilmiştir. Sıcaklık 800 °C’ye çıktığında ise 4S serisi harçlarda olduğu gibi harçların yüksek sıcaklık etkisindeki eğilme dayanımı kayıpları devam etmemiş, aksine 600 °C’deki değerlere göre daha yüksek eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, HP100-8 kodlu harçlarda 800 °C’de eğilme dayanımı kaybı deney öncesine göre yaklaşık %52 iken, HP25UK75-8 kodlu harçlarda eğilme dayanımı kaybı yaklaşık %32 olmuştur.

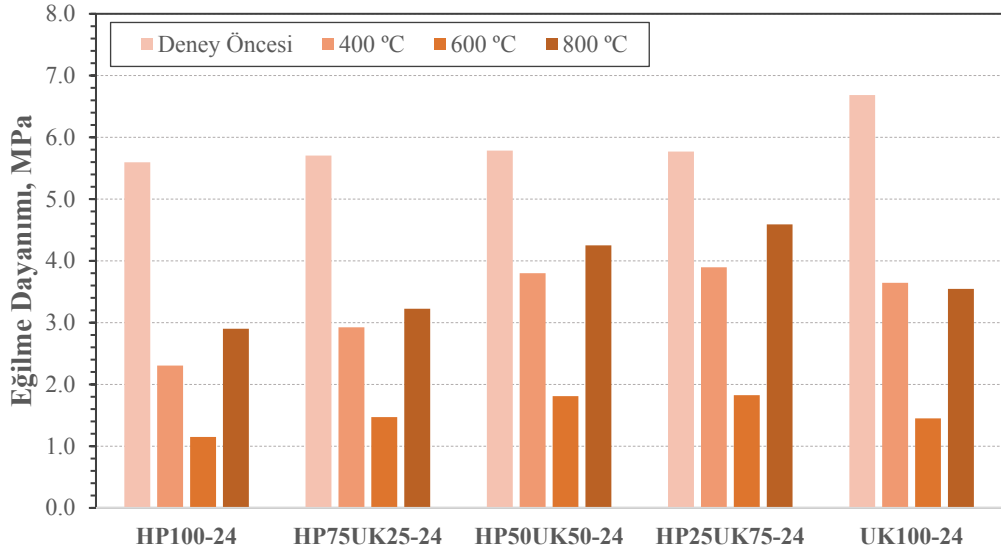
Şekil 6.8 24S serisi geopolimer harçların 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce (deney öncesi) ve sonra eğilme dayanımı değerlerinin değişimini göstermektedir. 400 °C’de 24S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri başlangıçtaki dayanımlarına göre %32 ile %59 arasında azalmalar göstermiştir. Bu derecede, en yüksek kayıp HP100-24 kodlu harçlarda görülürken, en az eğilme dayanımı kaybı HP25UK75-24 kodlu harçlarda gözlenmiştir. Sıcaklık 600 °C’ye çıktığında, 24S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri başlangıç değerlerine göre %68 ile %80 arasında azalma göstermiştir. Bu sıcaklıkta ise en fazla eğilme dayanımı kaybı HP100-24 kodlu harçlarda gözlenmiştir. En düşük eğilme dayanımı kaybı ise 400 °C’de olduğu gibi HP25UK75-24

kodlu harçlarda görülmüştür. 800 °C’de ise 24S serisi harçların eğilme dayanımı değerleri diğer serilerde olduğu gibi 600 °C’deki değerlere göre daha yüksek elde edilmiştir. 800 °C’de başlangıç dayanımına göre en fazla eğilme dayanımı kaybı, HP100-24 kodlu harçlarda görülürken en iyi performans HP25UK75-24 kodlu harçlardan elde edilmiştir. Ayrıca, HP25UK75-24 kodlu harçlar 800 °C’de başlangıç dayanımlarının yaklaşık %80’ini korumuştur.

Tüm seriler birlikte değerlendirildiğinde, 600°C’ye kadar sıcaklık artışıyla birlikte geopolimer harçlarda eğilme dayanımı kayıpları gözlenirken, bu dereceden sonra harçların eğilme dayanımlarındaki düşüş devam etmemiştir. Bu sonuçlar 800 °C’de harçlarda faz dönüşümüne ve harç matrislerindeki bağların farklılaşmasına işaret etmektedir. Bu durum harç numunelerinin Resim 5.13’deki kesit görünümüne, SEM görüntülerine ve kırılma davranışlarına yansımıştır. Harç matrislerinde yapılan EDX analizleri de bu durumu desteklemektedir. Harçlar üzerinde gerçekleştirilen EDX analizleri Tablo 6.1’de sunulmuştur. Bununla birlikte, özellikle 400 °C ve 600 °C’de 4S serisi harçlarda diğer serilere göre daha az eğilme dayanımı kaybı meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, ısıl kür süresinin uzamasının harçların yüksek sıcaklık performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Ancak, 800 °C’de harçlarda meydana gelen dayanım artışı ile birlikte faz dönüşümü nedeniyle ısıl kür süresinin dayanım kayıplarına etkisi azalmıştır. Ayrıca, geopolimer bağlayıcılarda kullanılan hammaddeden (HP ve UK gibi) çözünen Al ve Si iyonlarının geopolimerik jel oluşturma performansları hammaddelerin türüne, inceliğine ve diğer fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle kullanılan hammaddelerin en uygun kütle oranında bir araya getirilmesi elde edilecek bağlayıcının mekanik ve durabilite performansını etkileyecektir [79,80]. Bu tez çalışmasında üretilen harçlar arasında yüksek sıcaklık etkisinde en iyi eğilme dayanımı performansı 25/75 HP/UK kütle oranı ile yapılan geopolimer harçlardan elde edilirken, en düşük performanslar 100/0 ve 0/100 HP/UK kütle oranıyla üretilen geopolimer harçlarda görülmüştür. Bu durum HP ve UK malzemelerinin 25/75 HP/UK kütle oranında birlikte kullanımı ile mevcut aktivatör içeriği ve kür koşullarında daha iyi çözünme, çökeltme ve geopolimerik jel oluşturma performansı elde edildiğine işaretir.



Şekil 6.7. 8 saat serisi harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları.

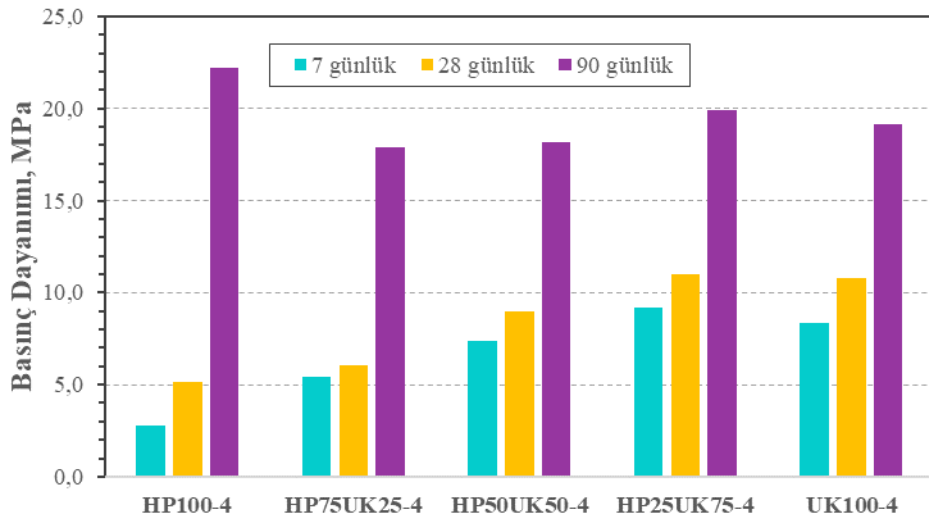


Şekil. 6.8. 24 saat serisi harçların yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları.

### 6.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

4S serisi harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 6.9’da sunulmuştur. Harçların 7 günlük basınç dayanımları 2.8 MPa ile 9.20 MPa arasındadır. En düşük 7 günlük basınç dayanımı HP100-4 kodlu harçlarda en yüksek değerler ise HP25UK75-4 kodlu harçlardan elde edilmiştir. Harçların basınç dayanımları 7 günden 28 güne %11 ile %83 arasında artış göstermiştir. En fazla artış HP100-4 kodlu harçlarda görülmüştür.

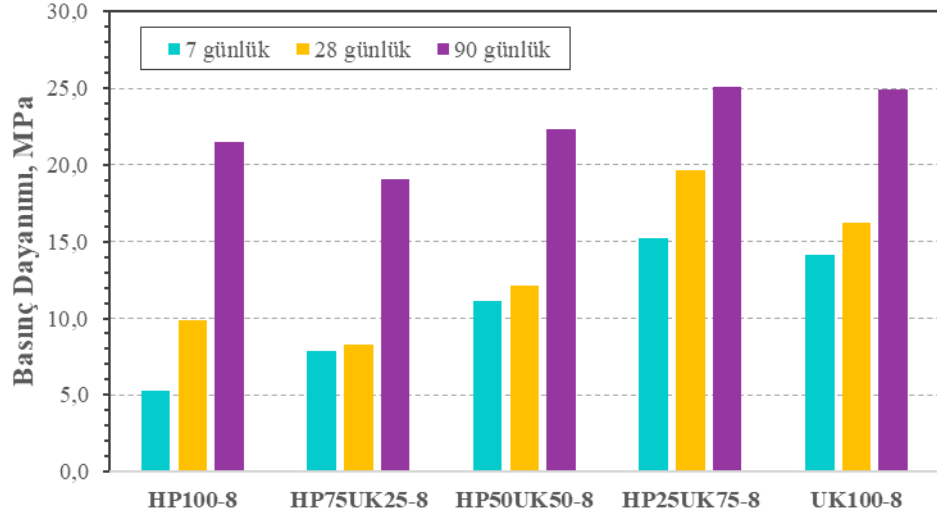
Harçların 28 günlük basınç dayanımları 5.13 MPa ile 10.98 MPa arasındadır. En düşük 28 günlük basınç dayanımları HP100-4 kodlu harçlarda ve en yüksek basınç dayanımları ise HP25UK75-4 kodlu harçlarda elde edilmiştir. Harçların 90 günlük basınç dayanımı değerleri ise 17.88 MPa ile 22.18 MPa arasında elde edilmiştir. 4S serisi harçlarda HP100-4 kodlu harçlar en düşük 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerine sahipken, 90 günde en yüksek basınç dayanımı değerlerine sahiptir. UK100-4 kodlu harçların 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre yaklaşık %77 oranında artış gösterirken, HP100-4 kodlu harçların 90 günlük basınç dayanımları 28 günlük basınç dayanımlarına göre yaklaşık %332 oranında artış göstermiştir. Kısa süre ısıtma etkisinde sentezlenen HP esaslı geopolimer harçların kür yaşına göre dayanım gelişimleri, UK esaslı geopolimerlere göre daha iyi olmuştur.



Şekil 6.9. 4 saat serisi harçların basınç dayanımları.

8S serisi harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Şekil 6.10 incelendiğinde, harçların 7 günlük basınç dayanımlarının 5.30 MPa ile 15.20 MPa arasında olduğu görülmektedir. 4S serisi harçlarda olduğu gibi, en düşük 7 günlük basınç dayanımı değerleri HP100-8 kodlu harçlarda görülürken, en yüksek değerler HP25UK75-8 kodlu harçlardan elde edilmiştir. HP100-8 kodlu harçların 28 günlük basınç dayanımları 7 günlük değerlere göre yaklaşık %86 oranında artış gösterirken, bu serideki diğer harçların basınç dayanımları %5 ile %30 arasında artış göstermiştir. Harçların 90 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, değerlerin birbirine erken

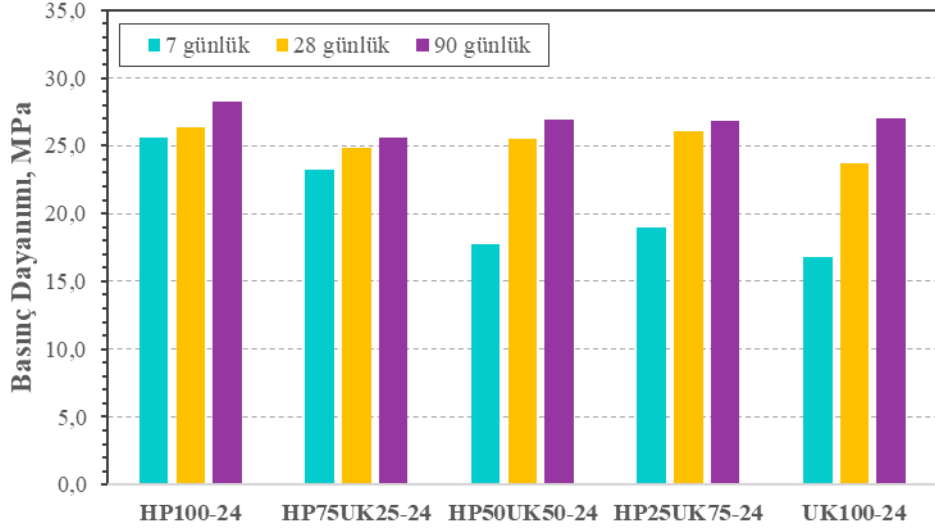
yaşlara göre daha çok yakın olduğu görülmüştür. En düşük 90 günlük basınç dayanımı HP75UK25-8 kodlu harçlardan elde edilirken, en yüksek değerler 7 ve 28 günde olduğu gibi HP25UK75-8 kodlu harçlardan elde edilmiştir.



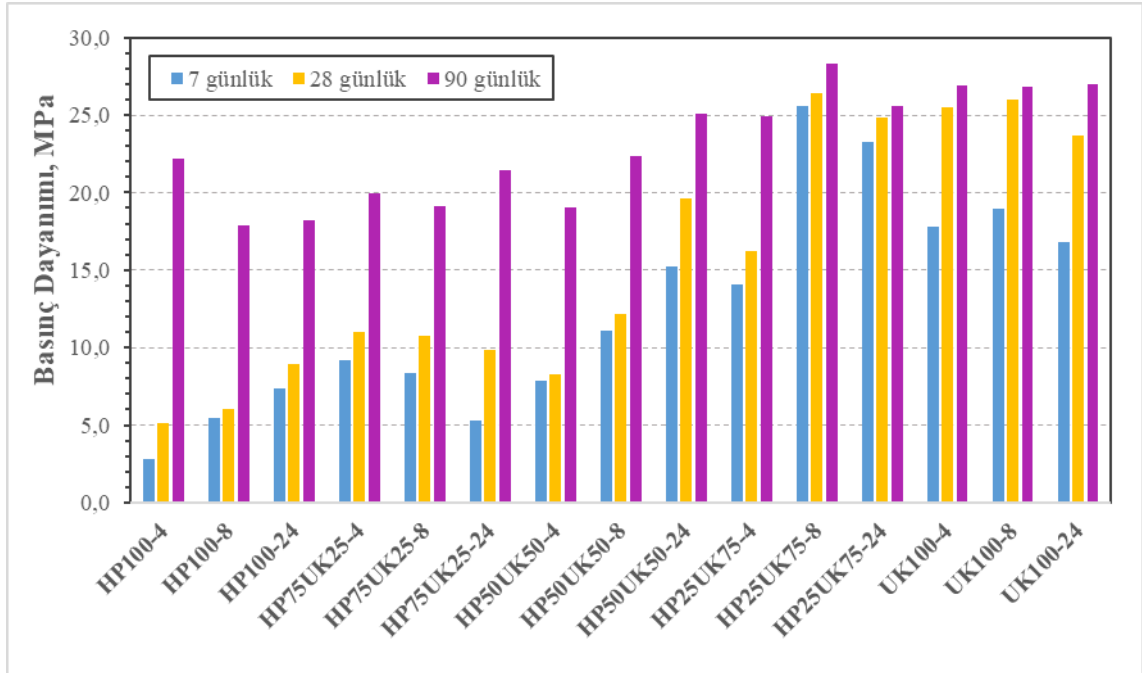
Şekil 6.10. 8 saat serisi harçların basınç dayanımları.

24S serisi harçların basınç dayanımı gelişimleri Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Bu serideki harçların 7 günlük basınç dayanımları 16.8 MPa ile 25.6 MPa arasında elde edilmiştir. Bu seride diğer serilerden farklı olarak en yüksek 7 günlük basınç dayanımı değerleri HP100-24 kodlu harçlardan elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı değerleri 7 günlük basınç dayanımı değerlerine göre %3 ile %43 arasında artış gösterirken, 90 günlük basınç dayanımı değerleri de 28 günlük değerlere göre %3 ile %14 arasında artış göstermiştir. En yüksek 28 ve 90 günlük değerler de HP100-24 kodlu harçlardan elde edilmiştir. Ayrıca, HP100-24 kodlu harçların 28 günlük basınç dayanımı değerleri, HP25UK75-24 kodlu harçlara göre sadece %1.3 oranında yüksektir. Tüm serilerdeki harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 6.12’de sunulmuştur. Bu çalışmada 3 seride üretilen geopolimer harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri birlikte değerlendirildiğinde, HP esaslı geopolimer harçların (100/0 HP/UK kütle oranı ile üretilenler) erken yaşlarda basınç dayanımı gelişimi için 90 °C’de 24 saat veya daha fazla ısıtma süresine ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, 4 ve 8 saat gibi kısa süre ısıtma koşullarında üretilen HP esaslı geopolimer harçların kür yaşıyla birlikte dayanım artışı, UK esaslı geopolimer harçlara göre daha fazla olmuştur. Bu artış da göz

önünde bulundurularak, 8 saat ısıtma süresinin HP ve UK malzemelerinin karışımı ile üretilen geopolimer harçlar için mevcut kür sıcaklığı ve aktivatör içeriği için en uygun kür süresi olduğu kanaatine varılmıştır. Ayrıca ekonomik ve teknik açıdan tüm geopolimer harçlar içinde en iyi basınç dayanımı sonuçlarını HP25UK75-8 kodlu harçlar vermiştir.

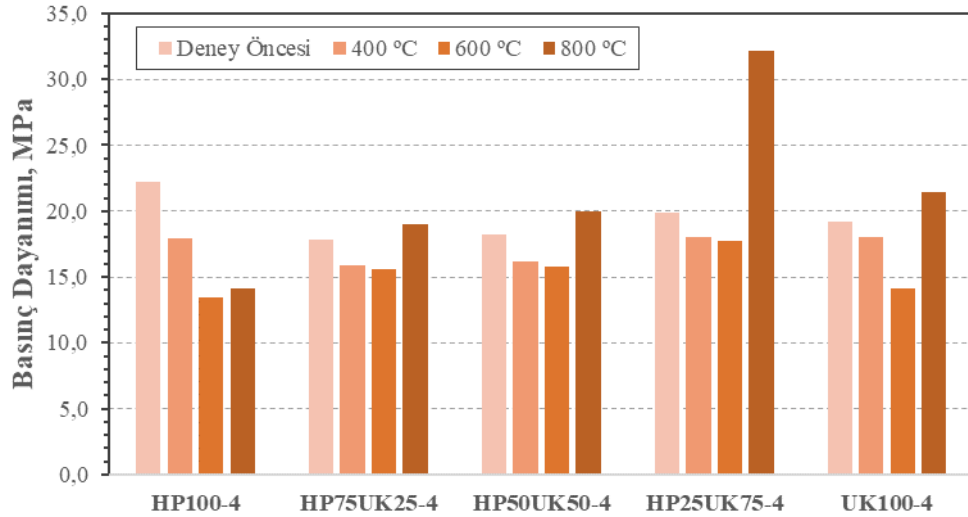


Şekil 6.11. 24 saat serisi harçların basınç dayanımları.



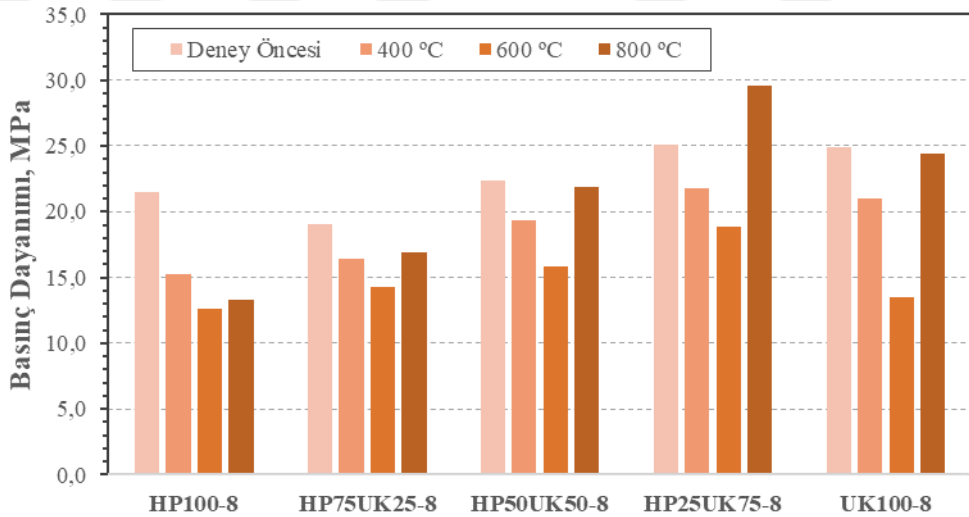
Şekil 6.12 Tüm serilerdeki harçların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları.

4S serisi harçların yüksek sıcaklık etkisindeki basınç dayanımı değişimi Şekil 6.13’de sunulmuştur. 4S serisi harçlar 400 °C’ye maruz bırakıldıklarında basınç dayanımlarında %5 ile %20 arasında kayıplar oluşmuştur. Basınç dayanımındaki kayıplar, harçlardaki HP içeriği ile birlikte artmıştır. Sıcaklık 600 °C’ye yükseldiğinde harçlardaki basınç dayanımı kayıpları farklı oranlarda artmaya devam etmiştir. Bu sıcaklıkta en fazla kayıp 400 °C’de olduğu gibi HP100-4 kodlu harçlarda görülmüştür. 400 °C’den farklı olarak 600 °C’de harçların basınç dayanımı kayıpları HP/UK kütle oranına göre kademeli bir değişim göstermemiştir. 600 °C’de en fazla basınç dayanımı kaybı HP100-4 kodlu harçlarda görülürken, en az kayıp HP25UK75-4 kodlu harçlarda gözlenmiştir. 800 °C’de harçların yüksek sıcaklık davranışları belirgin bir şekilde değişmiştir. Harçların basınç dayanımları 600 °C’deki değerlerine göre değişen oranlarda artmıştır. En fazla artış HP25UK75-4 kodlu harçlarda meydana gelmiştir. 800 °C’de deney öncesi basınç dayanımı değerine göre daha düşük basınç dayanımı sadece HP100-4 kodlu harçlarda görülmüştür. Bu serideki diğer harçlarda 800 °C’de deney öncesine göre %6 ile %62 oranları arasında basınç dayanımı artışı meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde en yüksek basınç dayanımı değerlerine HP25UK75-4 kodlu harçlarda ulaşılmıştır. Bu harçların 400 °C, 600 °C ve 800 °C’deki basınç dayanımı değerleri sırasıyla yaklaşık olarak 18 MPa, 17.7 MPa ve 32.2 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.13. 4 saat serisi harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları.

Şekil 6.14 8S serisi geopolimer harçların 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce (deney öncesi) ve sonra basınç dayanımı değerlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 6.14 incelendiğinde, 400°C’de harçların basınç dayanımlarının deney öncesine göre %13 ile %29 arasında azaldığı görülmüştür. Bu azalma HP/UK kütle oranına göre düzenli değişim göstermemiştir. En az kayıp HP25UK75-8 kodlu harçlarda meydana gelmiştir. Sıcaklık 600 °C’ye çıktığında ise harçlarda meydana gelen basınç dayanımı kaybı artmaya devam etmiştir. Bu sıcaklıkta basınç dayanımı kayıpları %25 ile %46 arasında olmuştur. Sıcaklık 800 °C’ye çıktığında ise 4S serisinde olduğu gibi harçlar basınç dayanımı kayıplarını farklı oranlarda geri kazanmışlardır. 800 °C’de HP50UK50-8 kodlu ve UK100-8 kodlu harçların basınç dayanımları deney öncesiyle yaklaşık aynıken, HP25UK75-8 kodlu harçların basınç dayanımları deney öncesine göre %18 daha fazla elde edilmiştir. HP100-8 ve HP75UK25-8 kodlu harçlarda ise deney öncesine göre sırasıyla yaklaşık olarak %38 ile %11 oranlarında basınç dayanımı kaybı görülmüştür. Bu seride tüm sıcaklıklarda en yüksek basınç dayanımı değerlerine HP25UK75-8 kodlu harçlarda ulaşılmıştır.



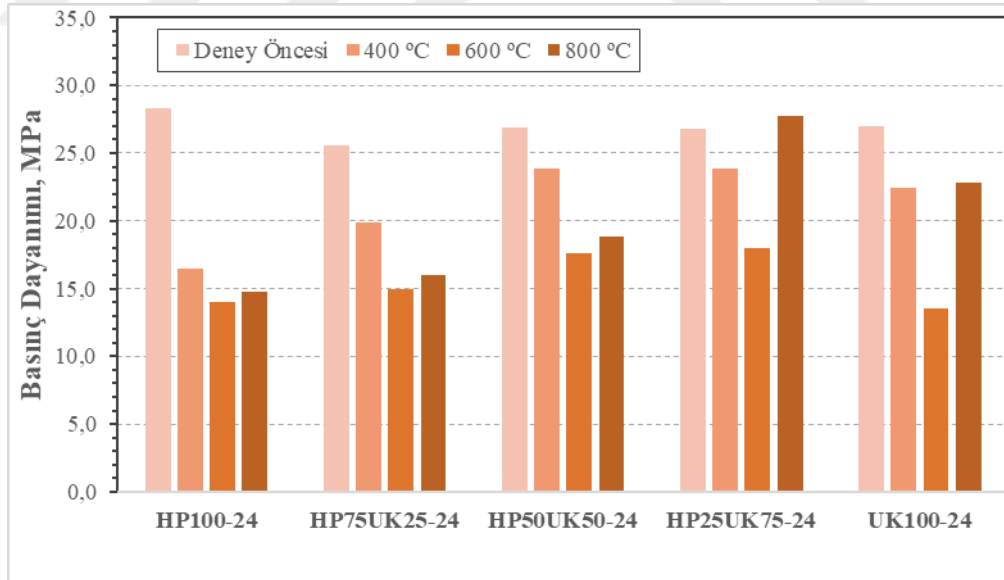
Şekil 6.14. 8 saat serisi harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları.

Şekil 6.15 24S serisi geopolimer harçların 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarına maruz bırakılmadan önce (deney öncesi) ve sonra basınç dayanımı değerlerinin değişimini göstermektedir. Bu seride 400 °C etkisi sonrası meydana gelen basınç dayanımı kayıpları %11 ile %42 arasındadır. 600 °C’de ise deney öncesine göre %33 ile %51 arasında



dayanım kaybı meydana gelmiştir. Bu sıcaklıklarda en çok dayanım kaybı HP100-24 kodlu harçlarda görülürken, en az kayıp HP25UK75-24 kodlu harçlarda rastlanmıştır. 800 °C’de ise diğer serilerde olduğu gibi harçların basınç dayanımları 600°C’deki değerlerine göre farklı oranlarda artmıştır. Bu sıcaklıkta HP25UK75-24 kodlu harçlar deney öncesine göre yaklaşık %3.5 daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Diğer harçlarda ise 800 °C’de deney öncesine göre %15 ile %48 arasında basınç dayanımı kayıpları meydana gelmiştir.

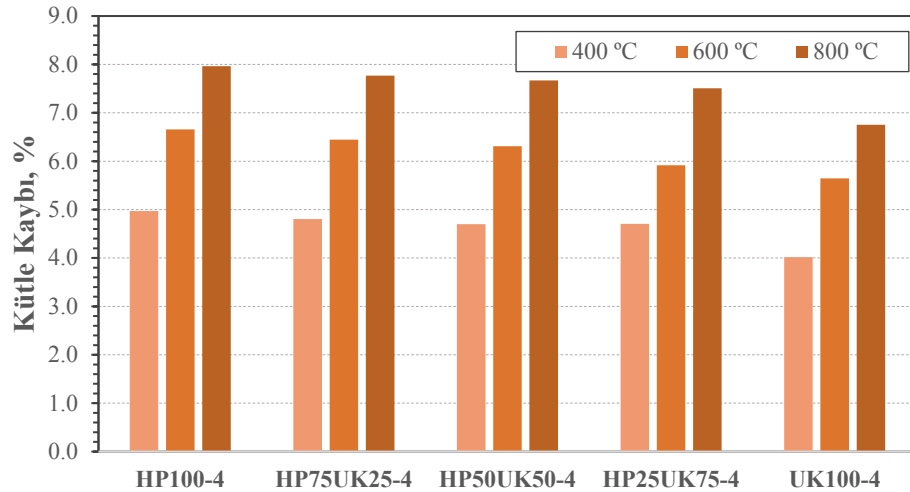
Tüm seriler birlikte değerlendirildiğinde yüksek sıcaklık etkisinde en iyi performans 25/75 HP/UK kütle oranı ile üretilen harçlardan elde edilirken, en düşük performans 100/0 HP/UK kütle oranıyla üretilen harçlarda görülmüştür. Ayrıca tüm serilerde sıcaklık 800 °C’ye ulaştığında dayanım kaybının geri kazanımı görülmüştür. Bu kazanım UK içeriği fazla olan harçlarda daha belirgin olmuştur. Bunun nedeni olarak, reaksiyona girmemiş UK partiküllerinin sinterleme reaksiyonu gösterilebilir [81-83]. Bu durumu SEM analizi sonucu elde edilen görüntüler de desteklemektedir.



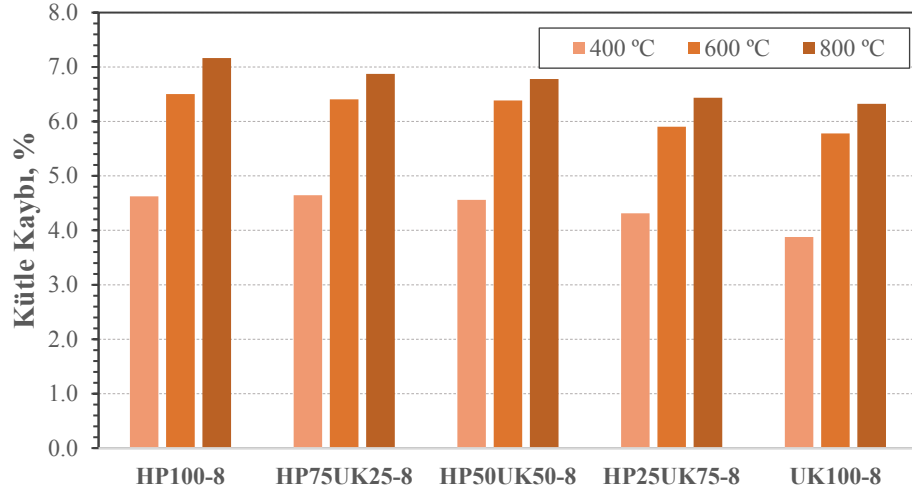
Şekil 6.15. 24 saat serisi harçların yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları.

#### 6.4. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kütle Kayıpları

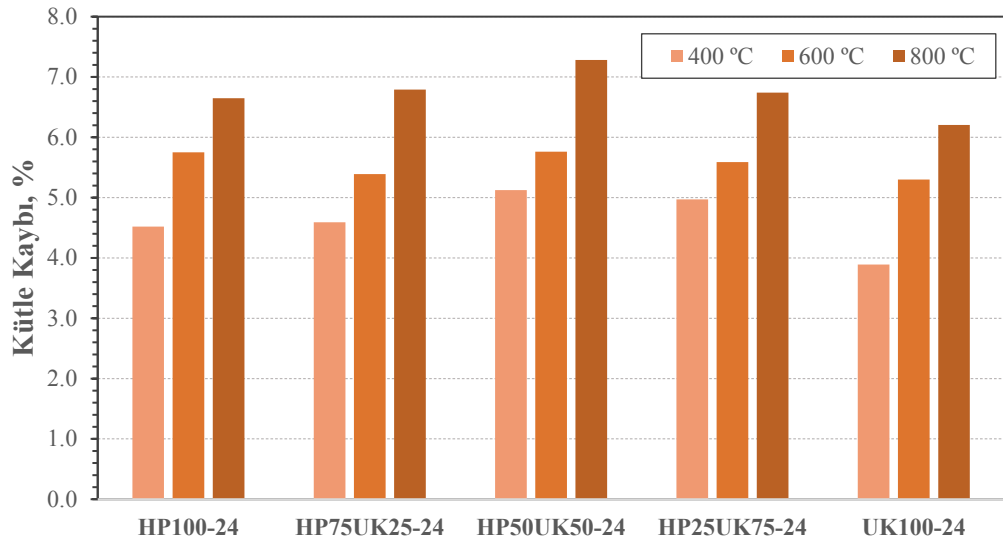
Bu çalışmada, geopolimer harçlardan yüksek sıcaklık etkisiyle buharlaşan fiziksel ve kimyasal olarak bağlı su miktarını belirlemek için kütle kayıpları hesaplanmıştır. 400 °C, 600 °C ve 800 °C'ye ayrı ayrı maruz bırakılan harçlardaki kütle kayıpları sırasıyla Şekil 6.16, 6.17 ve 6.18'de sunulmuştur. 400 °C'ye maruz bırakılan 4S serisi harçlarda kütle kaybı %4 ile %5 arasında gerçekleşmiştir. Sıcaklık 600 °C'ye çıktığında ise kütle kayıpları %5.6 ile %6.7 arasına çıkmıştır. 800 °C'de ise %6.8 ile %8 arasında kütle kayıpları gözlenmiştir. 8S serisi harçlarda 400 °C, 600 °C ve 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra sırası ile %3.9 ile %4.7 , %5.8 ile % 6.5 ve %6.3 ile %7.2 arasında kütle kayıpları gözlenmiştir. 24S serisi harçlarda ise 400 °C, 600 °C ve 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra sırası ile %3.9 ile %4.7 , %5 ile % 5.9 ve %6.2 ile %7.2 arasında kütle kayıpları meydana gelmiştir. Şekil 6.16, 6.17 ve 6.18 birlikte incelendiğinde, geopolimer harçların kütle kayıplarının genel olarak HP içeriği ile birlikte arttığı gözlenmiştir. Bu duruma HP malzemesinin UK malzemesine göre bünyesinde daha fazla su bulundurması yol açmıştır. Ayrıca geopolimer harçların kütle kaybı oranları sıcaklık artışı ile birlikte artmıştır. 24S serisi harçlar, diğer serilere göre en düşük kütle kayıplarını sergilemiştir. Bunun nedeni olarak ısıl kür süresinin artmasıyla yüksek sıcaklık deneylerinden önce harçlarda daha fazla suyun buharlaşması gösterilebilir.



Şekil 6.16. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası 4 saat serisi harçlardaki kütle kaybı.



Şekil 6.17. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası 8 saat serisi harçlardaki kütle kaybı.



Şekil 6.18. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası 24 saat serisi harçlardaki kütle kaybı.

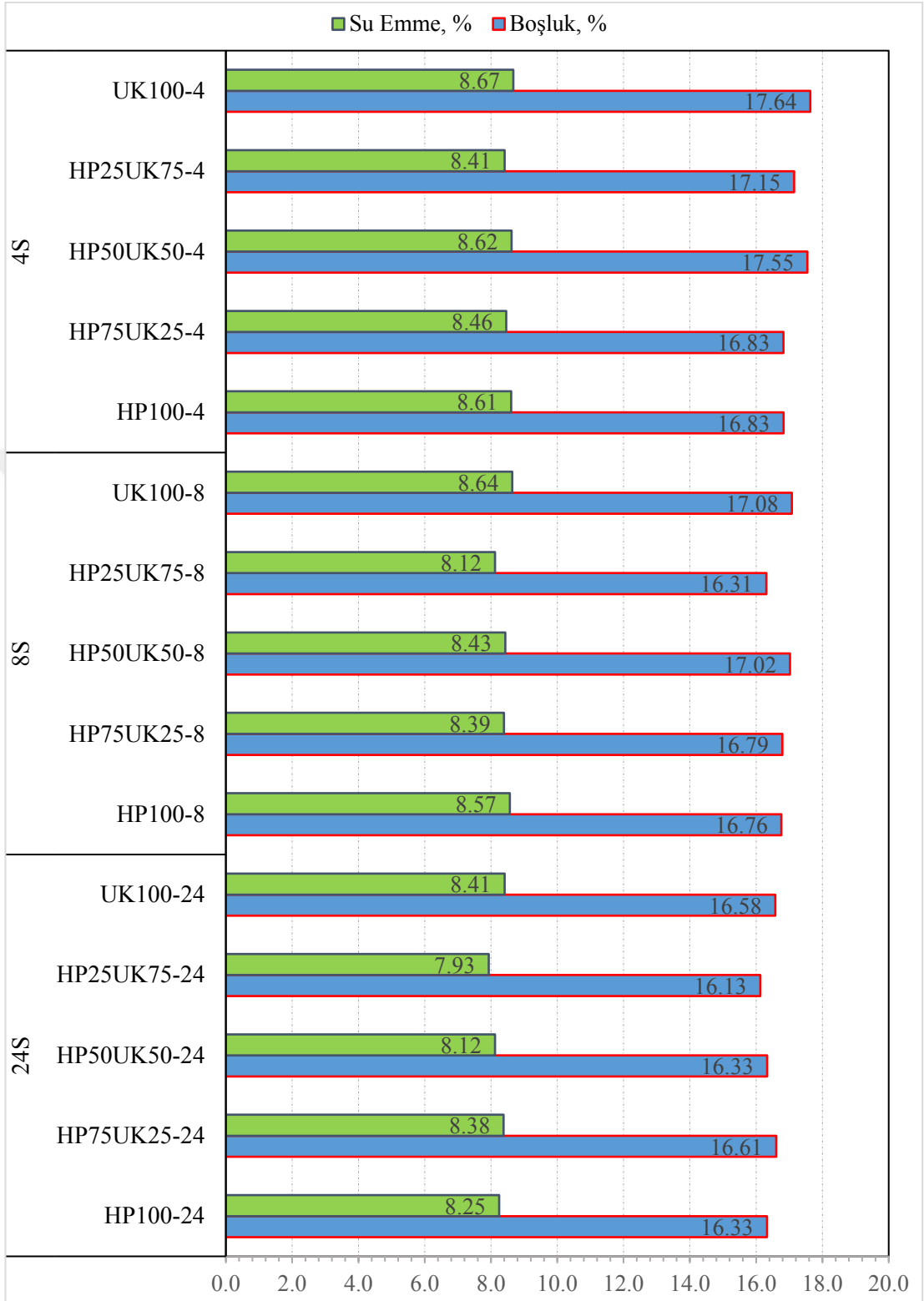
### 6.5. Su Emme-Boşluk Oranı Deney Sonuçları

Harçların su emme ve boşluk oranları Şekil 6.19’da sunulmuştur. 4S serisi harçların su emme oranları %8.4 ile %8.7 arasındayken, 8S serisi harçların su emme değerleri %8.1 ile % 8.7 arasındadır. 24S serisi harçların su emme değerleri de %7.9 ile %8.4 arasında elde edilmiştir. Tüm serilerde en yüksek su emme değerleri 0/100 HP/UK kütle oranıyla üretilen harçlarda görülmüştür. En düşük su emme değerleri ise 25/75 HP/UK kütle oranıyla üretilen harçlarda görülmüştür. 4S serisi harçların boşluk oranları %16.8 ile %17.7 arasında elde edilmiştir. 8S ve 24S serisi harçların boşluk oranları da sırasıyla

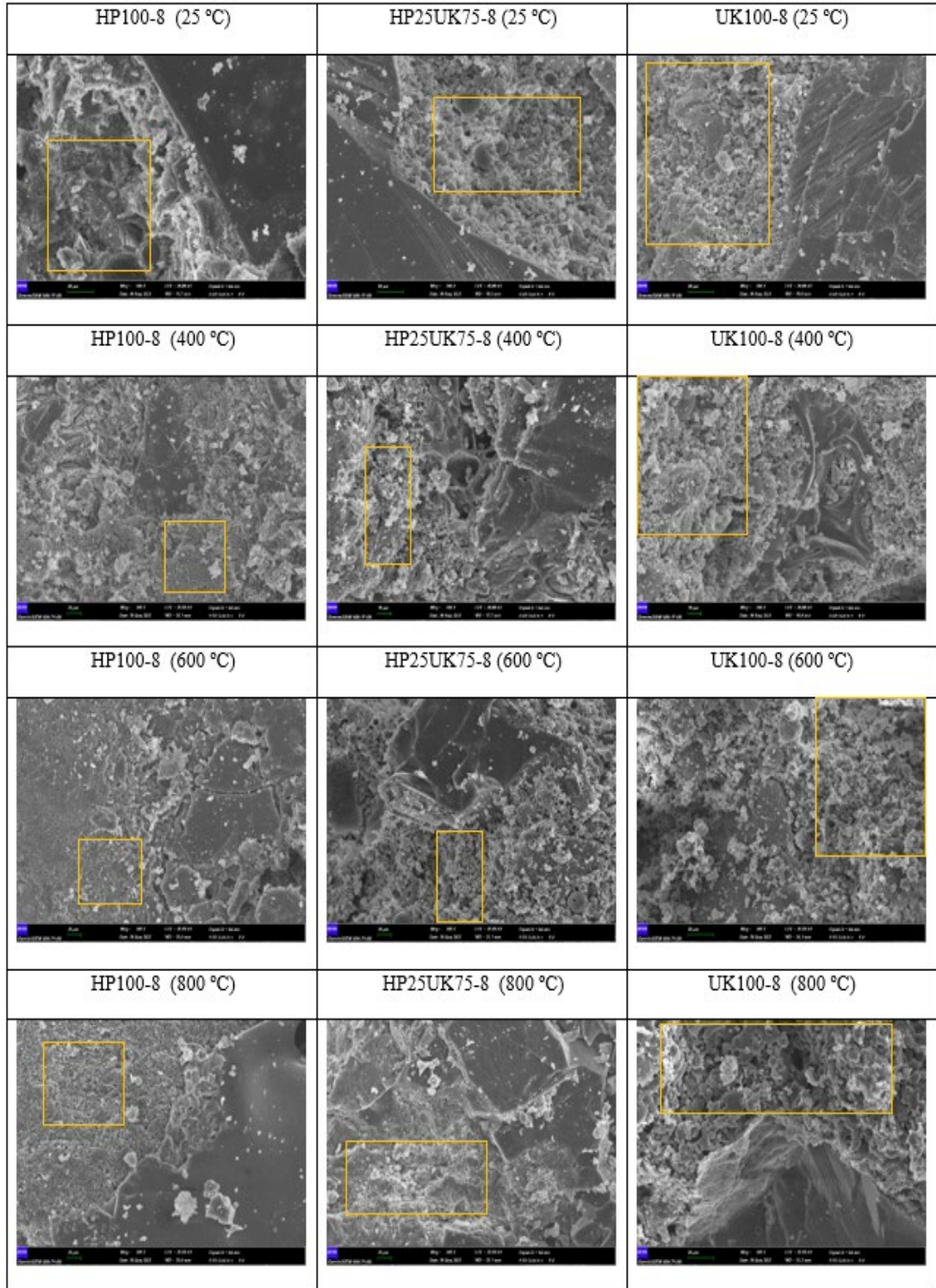
%16.3-%17.1 ve %16.2-%16.6 arasında elde edilmiştir. Harçların boşluk oranları ile su emme değerleri arasında genel itibariyle uyum vardır. 0/100 HP/UK kütle oranı ile üretilen geopolimer harçların su emme ve boşluk oranı değerleri 100/0 kütle oranıyla üretilen harçlara göre daha yüksek su emme ve boşluk oranına sahiptir. Dayanım değerlerinden bağımsız olarak, mevcut aktivatör içeriği ve kür koşullarında, sadece UK malzemesi ile üretilen geopolimer harçların sadece HP malzemesi ile üretilenlere göre daha yüksek su emme ve boşluk oranına sahip olduğu gözlenmiştir.

#### **6.6. SEM/EDX Analiz Sonuçları**

Mikro analiz çalışmaları için seçilen geopolimer harçlar (HP100-8, HP25UK75-8, UK100-8) üzerinde yapılan SEM analizlerinin sonuçları Şekil 6.20'de görülmektedir. Geopolimer harçların matrislerinin, yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce (25 °C) sıkı ve nispeten homojen olduğu gözlenmiştir. Bu sıkı mikro yapı 600 °C'de korunmamıştır. 600 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra harç matrislerinde bozulma ve mikro çatlaklar tespit edilmiştir. Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımı değerlerindeki azalma bu mikro çatlaklara ve bozulmalara bağlanabilir. Ayrıca, başlangıçta HP25UK75-8 ve UK100-8 kodlu harçların SEM görüntülerinde reaksiyona girmemiş UK partikülleri görülmüştür. Bu parçacıklar 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de gözlenmemiştir. Bu gözlemler, parçacıkların kür sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta reaksiyona girebileceğini ve yüksek sıcaklıklarda geopolimer jeller oluşturabileceğini göstermiştir. Bu gözlemler ayrıca HP25UK75-8 ve UK100-8 kodlu harçların eğilme ve basınç dayanımı değerlerinde HP100-8 kodlu harçlara göre yüksek sıcaklık etkisinde daha az düşüş olmasını desteklemektedir. Harçların matrisleri 800 °C'de yoğunlaşmış ve iç içe geçmiştir. Ayrıca, 800 °C'ye maruz HP25UK75-8 kodlu harçlarda 25 °C ve 600 °C'de görülmeyen yeni kristal fazlar görülmüştür. 800 °C'ye maruz bırakıldıktan sonra geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımı değerlerinde görülen artış bu değişimlerle açıklanabilir.



Şekil 6.19. Harçların su emme ve boşluk oranları.

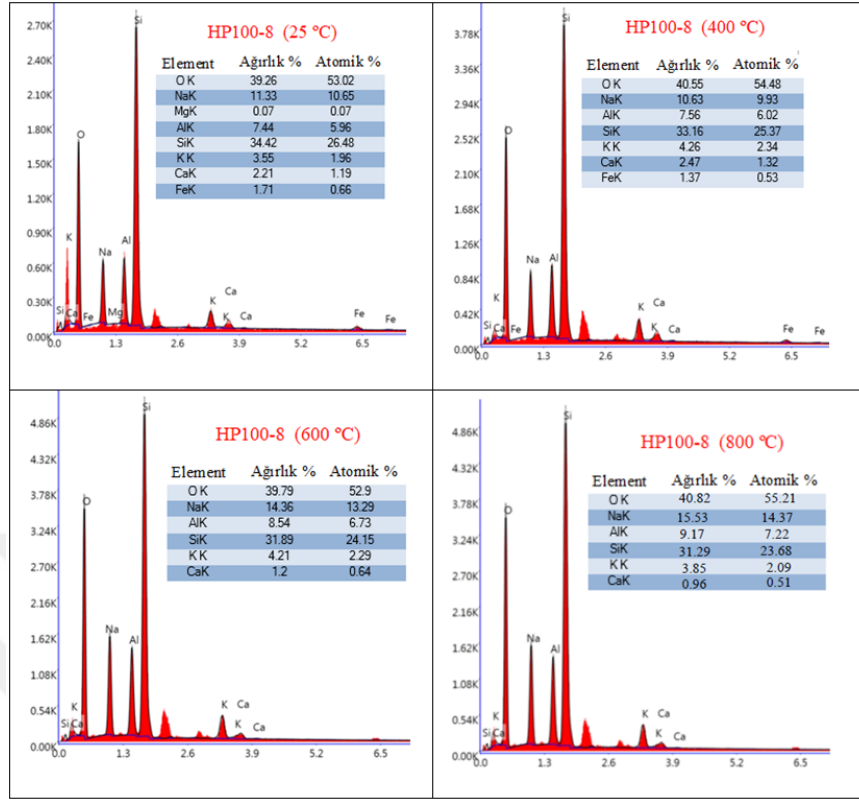


Şekil 6.20. Geopolimer harçların SEM analizleri.

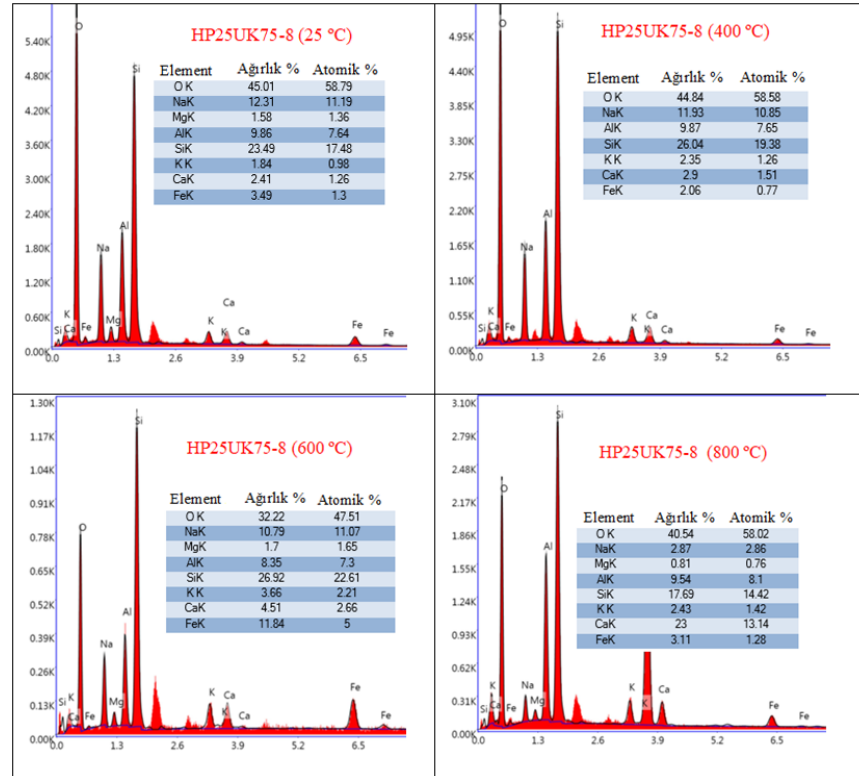
EDX analizleri Şekil 6.20'deki SEM analizlerinde işaretlenen alanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. HP100-8, HP25UK75-8 ve UK100-8 kodlu harçlar üzerinde gerçekleştirilen EDX analizlerinin sonuçları sırasıyla Şekil 6.21, 6.22 ve 6.23'de verilmiştir. Ayrıca, harçların matrislerinin element analizi sonucu ortaya çıkan Al/Si ve Na/Al element oranları Tablo 6.1.'de sunulmuştur. HP25UK75-8 ve UK100-8 kodlu harçların Al/Si element oranları, HP100-8 kodlu harçlara göre önemli ölçüde yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar, eğilme ve basınç dayanımı değerleri yüksek olan geopolimer harçların Al/Si element oranlarının da daha yüksek olduğunu göstermiştir. Rattanasak ve arkadaşları [84], geopolimer kompozitlerde  $Al(OH)_3$  içeriği arttıkça basınç dayanımının arttığını rapor etmişlerdir. Bunun nedenini,  $Al(OH)_3$  ilavesinin bir sonucu olarak geopolimer matrislerinde daha yüksek Al/Si oranı meydana gelmesiyle ve bu durumun da daha çapraz bağlı bir alüminosilikat yapının oluşmasıyla açıklamışlardır. Ayrıca, tüm geopolimer harçların Al/Si element oranlarının, 800 °C'ye maruz kalmadan önceki ilk oranlardan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, harçlardaki UK içeriğinin artmasıyla geopolimer harçların Na/Al element oranları azalmıştır. 400 °C'de geopolimer harçların Na/Al element oranları başlangıç değerlerinden daha düşük olmuştur. Öte yandan sıcaklık 400 °C'nin üzerine çıktığında harçların Na/Al element oranlarında artış gözlenmiştir.

Tablo 6.1. Geopolimer harçların EDX analizleri.

Element Oranları	Sıcaklık	Karışım Kodları		
		HP100-8	HP25UK75-8	UK100-8
Al/Si	25°C	0.216	0.419	0.382
	400 °C	0.228	0.379	0.342
	600 °C	0.267	0.310	0.396
	800 °C	0.293	0.538	0.421
Na/Al	25°C	1.522	1.248	1.053
	400 °C	1.406	1.208	1.164
	600 °C	1.681	1.292	1.215
	800 °C	1.694	1.321	1.267

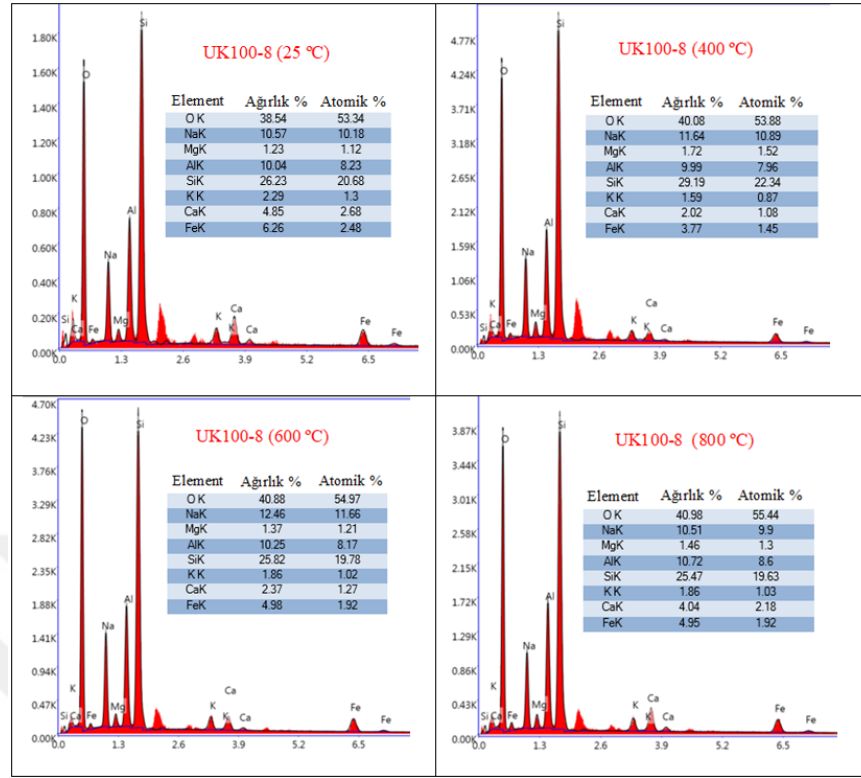


Şekil 6.21. HP100-8 kodlu geopolimer harçların EDX analizleri.



Şekil 6.22. HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların EDX analizleri.

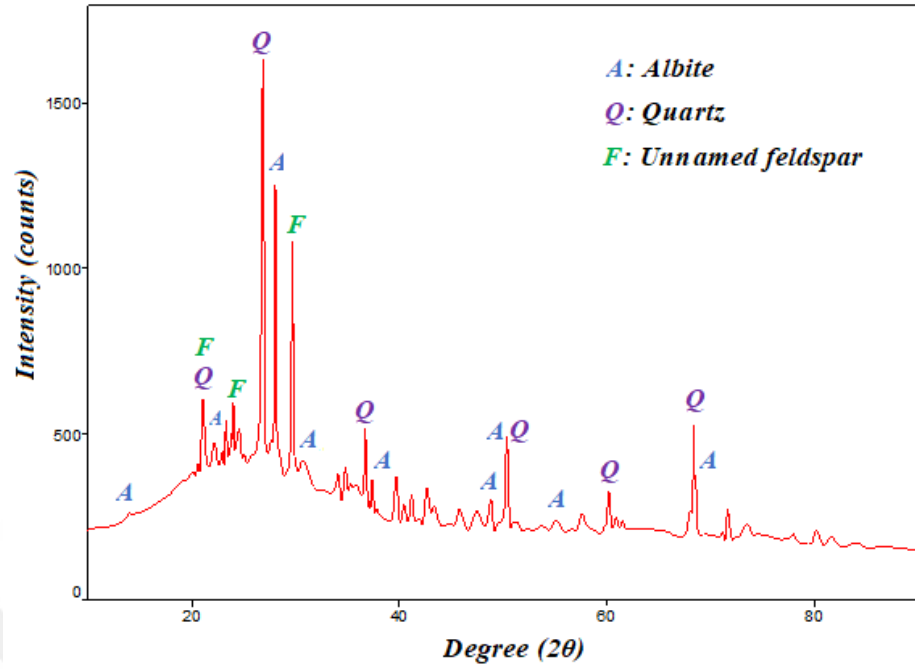




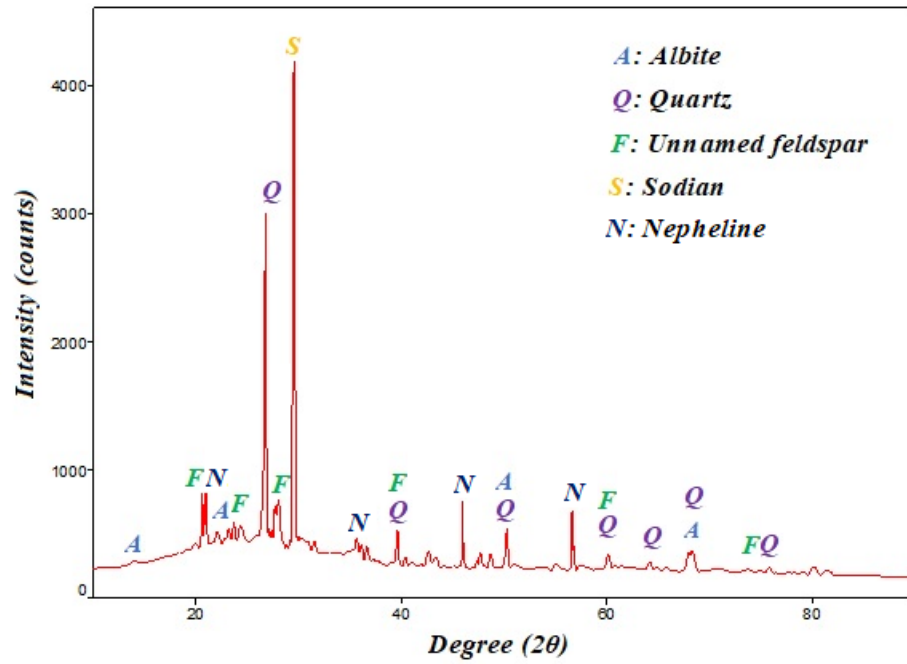
Şekil 6.23. UK100-8 kodlu geopolimer harçların EDX analizleri.

## 6.7. XRD Analiz Sonuçları

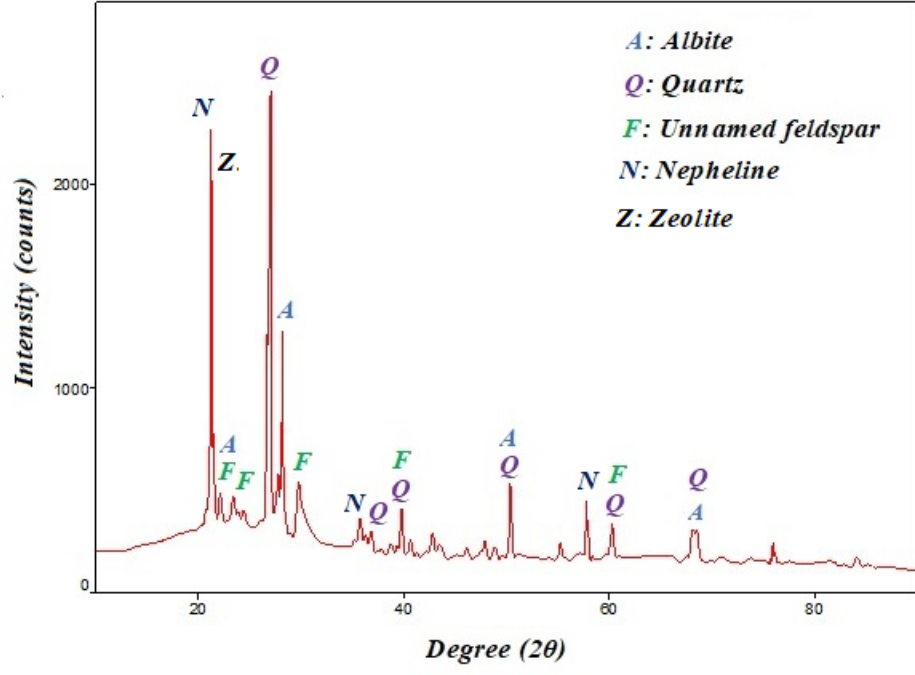
HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların XRD analiz sonuçları Şekil 6.24, 6.25 ve 6.26 da sunulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan harçlarda (25 °C) albit feldispat ve quartz fazları tespit edilmiştir. 600 °C'ye maruz bırakılan harçlarda ise sodian ve düşük yoğunlukta nefelin fazları görülmüştür. 800 °C'de ise albit feldispat ve quartz ek olarak yüksek yoğunlukta nefelin ve zeolit fazları tespit edilmiştir. Bu fazlar harçlarda 800 °C'de görülen dayanım artışının sebebi olarak gösterilebilir.



Şekil 6.24. HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların XRD analizi (25°C).



Şekil 6.25. HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların XRD analizi (600°C).



Şekil 6.26. HP25UK75-8 kodlu geopolimer harçların XRD analizi (800°C).

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu tez çalışmasından elde edilen bulgular ve tartışmalara dayalı olarak, sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Geopolimer harçların yayılma çapları harçlardaki UK içeriği ile birlikte kademeli olarak artmıştır.
- 4S serisi harçlarda HP100-4 kodlu harçlar 7. ve 28. günde en düşük eğilme ve basınç dayanımı değerlerine sahipken, 90 günde en yüksek basınç dayanımı değerlerine sahiptir. Bu seride 7. ve 28. günde en yüksek eğilme ve basınç dayanımları HP25UK75-4 kodlu harçlardan elde edilmiştir. Bu harçların 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla 3.87 MPa ve 10.98 MPa olarak elde edilmiştir.
- 8S serisi harçlarda 7. günde en düşük eğilme ve basınç dayanımı değerleri HP100-8 kodlu harçlarda görülmüştür. Bu seride 7. ve 28. günde en yüksek erken yaş eğilme dayanımları (3.88 ve 4.40 MPa) UK100-8 kodlu harçlardan, 7., 28. ve 90. günde en yüksek basınç dayanımları (15.20 MPa, 19.63 MPa ve 25.10 MPa) da HP25UK75-8 kodlu harçlardan elde edilmiştir. 90. günde en düşük eğilme dayanımı HP100-8 kodlu harçlarda, 90. günde en yüksek eğilme dayanımı ise HP50UK50-8 kodlu harçlarda gözlenmiştir.
- 24S serisi harçlarda diğer serilerden farklı olarak 7., 28. ve 90. günde en yüksek basınç dayanımları (25.60 MPa, 26.38 MPa ve 27.00 MPa) 100/0 HP/UK kütle oranıyla üretilen HP100-24 kodlu harçlarda elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımları ise UK100-24 kodlu (7 ve 90 günlük) ve HP50UK50-24 kodlu (28 günlük) harçlardan elde edilmiştir.
- Harçların eğilme ve basınç dayanımları ısıtılma süresinin artması ile birlikte farklı oranlarda artmıştır. Bu artış, HP içeriği %50'den fazla olanlarda (100/0 ve 75/25 HP/UK kütle oranı ile üretilenler) daha belirgin olmuştur.
- Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımları kür yaşıyla birlikte farklı oranlarda artmıştır. Isıtılma süresi arttıkça harçlar nihai dayanımlarının önemli bir bölümünü kazandığından, kür yaşıyla meydana gelen artış da ısıtılma süresiyle

birlikte azalmıştır. Ayrıca, özellikle 4S ve 8S serisi harçlardaki kür yaşı ile meydana gelen eğilme ve basınç dayanımı artışı HP içeriği ile daha fazla olmuştur.

- HP esaslı geopolimer harçların erken yaşlarda (7 ve 28 günlük) basınç dayanımı gelişimi için 90 °C’de 24 saat veya daha fazla ısı kur süresine ihtiyaç vardır.
- Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımı değerleri 600 °C’ye kadar kademeli olarak farklı oranlarda azalmıştır. Sıcaklık 800 °C’ye ulaştığında ise harçlarda eğilme ve basınç dayanım kaybında geri kazanım görülmüştür. Bu kazanım UK içeriği fazla olan harçlarda daha belirgin olmuştur.
- Yüksek sıcaklık etkisinde tüm serilerde en fazla eğilme ve basınç dayanımı kaybı genellikle 100/0 HP/UK kütle oranıyla üretilen harçlarda görülürken, en az kayıp 25/75 HP/UK kütle oranı ile üretilen harçlardan elde edilmiştir.
- Geopolimer harçlarda yüksek sıcaklık etkisiyle kütle kayıpları gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde geopolimer harçlarda meydana gelen kütle kayıpları genel olarak HP içeriği ile birlikte artmıştır. 24S serisi harçlarda, diğer serilere göre daha düşük kütle kayıpları gözlenmiştir.
- Harçlarda en yüksek su emme ve boşluk oranları 0/100 HP/UK kütle oranıyla üretilen harçlardan, en düşük su emme ve boşluk oranları ise 25/75 HP/UK kütle oranıyla üretilen harçlardan elde edilmiştir. Bu sonuçlar dayanım değerleriyle de uyumludur.
- Yüksek sıcaklığın etkisiyle harçların SEM görüntülerinde mikro çatlak oluşumu ve bozunmalar gözlenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan HP25UK75-8 ve UK100-8 kodlu harçlardan alınan örneklerin SEM görüntülerinde reaksiyona girmemiş UK partikülleri görülmüştür. Bu partiküller yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan harçlardan alınan örneklerde görülmemiştir.
- Harçların eğilme ve basınç dayanımları ile EDX analizlerinden elde edilen Al/Si element oranları arasında uyum vardır. Harçların matrislerinin Al/Si element oranları 800 °C etkisi sonrası deney öncesine göre belirgin şekilde artmıştır.
- Harçlarda 800 °C etkisi sonrası yeni kristal faz oluşumları tespit edilmiştir. 800 °C’de tespit edilen bu kristal fazların özellikle HP25UK75-8 kodlu harçlarda 800 °C’de görülen dayanım artışının temel sebebi olduğu düşünülmektedir.

- 8 saat ısıtıl kr süresinin HP ve UK malzemelerinin karışımı ile üretilen geopolimer harçlar için mevcut kür sıcaklığı ve aktivatör içeriği için en uygun kr süresi olduğu kanaatine varılmıştır.
- HP ve UK malzemeleriyle geopolimer harç üretimi için 90 °C 'de 4 saat, 8 saat ve 24 saat ısıtıl kr koşulunda 25/75'lik optimum bir HP/UK kütle oranı önerilebilir.
- Ekonomik ve teknik açıdan tüm geopolimer harçlar içinde en iyi eğilme ve basınc dayanımı sonuçlarını HP25UK75-8 kodlu harçlar vermiştir.



## KAYNAKLAR

1. Çelikten, S., Sarıdemir, M., Deneme, İ. Ö. “Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature”, *Constr. Build. Mater.*, 217, 50-61, 2019.
2. Morrison, R.E., “A Review of Ash Specifications”, *Symposium on Fly Ash Utilization*, s. 24-31, Pittsburgh,1970.
3. Feng, X. ve Clark, B. “Evaluation of the physical and chemical properties of fly ash products for use in Portland cement concrete” In World of Coal Ash (WOCA) Conference Vol. 2011, s. 1-8, 2011.
4. Anonim, Perlit, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü) <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/perlit>, (Erişim Tarihi: 17.10.2019))
5. Amran, M., Debbarma, S., Ozbakkaloglu, T., Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Constr. Build. Mater.*, 270, 121857, 2021.
6. Köktürk, U., “Endüstriyel Hammaddeler”, *D.E.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Basım Ünitesi*, s. 256 , İzmir, 1997.
7. Devlet Planlama Teşkilatı, “Yapı Malzemeleri III (Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer) 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı ÖİK Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyon Raporu” *DPT*, Ankara, s. 24-49, 2004.
8. İnternet: USBM “Mineral Yearbooks 1995”, <http://minerals.usgs.gov>.
9. Yeşilyurt, E., “Isıl İşlem Görmüş Ham Perlit İle Yeni Nesil Yapı Malzemesi Geliştirilmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Doktora Tezi*, 2013.
10. Alkan, M., Doğan, M., “Adsorption of Copper(II) onto Perlite”, *J. Colloid Interface Sci.*, 243, 280-291, 2001.
11. Öztürk, M., “Pomza ve Perlit İçerikli Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi”, *Namık Kemal Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Tekirdağ, 2012.
12. Çiçek, Y. E., “Pişmiş Toprak Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton Ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal Ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi”, *İTÜ ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 2002.

13. Elmas, A., “Çinkonun Perlit Ve Kitosan Modifiye Perlit İle Adsorpsiyonu Ve Adsorpsiyon Özelliklerinin Karşılaştırılması”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul, 2014.
14. Erdoğan, S. T., Sağlık, A. Ü., “Early-age activation of cement pastes and mortars containing ground perlite as a pozzolan”, *Cem. Concr. Compos.*, 38, 29–39, 2013.
15. Vosoughi, V., Mahmoud, S., Crin, M., Eisapour, S., “Evaluation of perlite powder performance in concrete to replace part of the cement”, *Cumhuriyet Science J.*, 36, 2015.
16. Rashad, A. M., “A synopsis about perlite as building material - A best practice guide for civil engineer”, *Constr. Build. Mater.*, 121, 338-353, 2016.
17. USGS, (2015), Minerals year book-Perlite (advance release), <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/perlite/myb1-2015-perli.pdf>( yayım yeri yok)
18. Sevindi, C., “Kars İli Perlit Yataklarının Ekonomik Önemi Ve Değerlendirilme Olanakları”, *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(30), 2003.
19. Yener Levent, Perlit: Sihirli Popcorn Yatırımcısını Arıyor, Sektörden Haberler Bülteni 57, Türkiye Madencilik Derneği, Ağustos 2015
20. Rossow, M. (2003). Fly ash facts for highway engineers. New York NY Continuing Education and Development.
21. Savaş E., “Termik Santral Külü ve Fritin Seramik Bünyede Birlikte Kullanımının Bazı Fiziksel Özelliklere ve Mikroyapıya Etkisi”, *V.Uluslararası Seramik, Cam, Emaye, Sır ve Boya Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 13-15 Ekim, s.129-136, 2021,
22. Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S., Demir, İ. “Uçucu Kül bölüm II: Kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 33-42, 2009.
23. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H., “Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları”, *Türkiye 19. Uluslar arası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, 419-423, İzmir, 2005.
24. Erdoğan, T. Y., 2007, “Beton”, Metu Press, 2. Baskı, Ankara.
25. Gikunoo, E., 2004, “Effect of Fly Ash Particles on the Mechanical Properties and Microstructure of Aluminium Casting Alloy A534, Master of Science, University of



Saskatchewan, The College of Graduate Studies and Research, Saskatchewan, Canada.

26. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2003, “Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, TÇMB, Ankara.
27. Satapathy, L.N., “A Study on The Mechanical, Abrasion and Microstructural Properties of Zirconia-Flyash Material”, *Ceram. Int.*, 26, 39-45, 2000.
28. ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. American society for testing and materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2003.
29. TS EN 197-1 Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2012).
30. Z. Giergiczny, Fly Ash in Cement and Concrete Composition, Wydawnictwo Politechniki Slaskie, Gliwice, 2013.
31. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Sektörel Atık Kılavuzları Termik Santraller, 2016, Ankara.
32. İnternet: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198>
33. Ozmen, E., “Termik santral küllerinin yönetimi”, *Atık Yönetimi Sempozyumu*, Antalya, 2011.
34. Dermatas, D., Meng, X., “Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils”, *Eng. Geol.*, 70(3-4), 377-394, 2003.
35. Pandey, V. C., Singh, N., “Impact of fly ash incorporation in soil systems”, *Agric Ecosyst Environ.*, 136(1-2), 16-27, 2010.
36. Ferguson, G., Levorson, S. M. (1999). Soil and pavement base stabilization with self-cementing coal fly ash. American Coal Ash Association.
37. Nicholson, P. G., Kashyap, V. (1993). Flyash for Soil Improvement Geotechnical Special Publication. 36. ASCE.
38. Baykal, G., Edinçlıler, A., Saygılı, A., “Highway embankment construction using fly ash in cold regions”, *Resour. Conserv. Recycl*, 42(3), 209-222, 2004.
39. Ahmaruzzaman, M., “A review on the utilization of fly ash”, *Prog Energ Combust*, 36(3), 327-363, 2010.
40. Blissett, R. S., Rowson, N. A., “A review of the multi-component utilisation of coal fly ash”, *Fuel*, 97, 1-23, 2012.

41. Dunens, O. M., MacKenzie, K. J., Harris, A. T., “Synthesis of multiwalled carbon nanotubes on fly ash derived catalysts”, *J. Environ. Sci. Technol.*, 43(20), 7889-7894, 2009.
42. Bankowski, P., Zou, L., Hodges, R., “Reduction of metal leaching in brown coal fly ash using geopolymers”, *J. Hazard. Mater.*, 114(1-3), 59-67, (2004).
43. Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W.H., Wang, H., “Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications”, *J. Clean. Prod.*, 125, 253-267, 2016.
44. Moreno, N., Querol, X., Plana, F., Andres, J. M., Janssen, M., Nugteren, H., “Pure zeolite synthesis from silica extracted from coal fly ashes”, *J. Chem. Technol.*, 77(3), 274-279, 2002.
45. Boyacı, Ö., “Farklı Kaolenlerin Metakaolen ve Spinel Yapılarda Geopolimer Davranışı”, *Dumlupınar Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya*, 2018.
46. Yonar, Y., “Geopolimer Çimentolu ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı”, *Fırat Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ*, 2014.
47. Farhan, N. A., Sheikh, M. N., Hadi, M. N., “Investigation of engineering properties of normal and high strength fly ash based geopolymer and alkali-activated slag concrete compared to ordinary Portland cement concrete”, *Constr Build Mater.*, 196, 26-42, 2019.
48. Topçu, İ.B., Toprak, M.U, “Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi”, *ESOGÜ Müh Mim Fak Derg*, 22 (2), 153-164, 2009.
49. Aydın, S. “Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi”, *Dokuz Eylül Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir*, 2010.
50. Bingöl, Ş., “Alkali İle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması”, *Erciyes Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri*, 2018.
51. Luga, E., “Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri”, *Erciyes Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri*, 2015.

52. Gümüş, A., “Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Afyon, 2016.
53. Görür, E. B., “Alkali ile Aktifleştirilmiş Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması”, *Erciyes Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Kayseri, 2015.
54. Kaya, M., “Farklı Tür Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, Sakarya, 2016.
55. Temuujin, J., Rickard, W., Lee, M., van Riessen A., “Preparation and Thermal Properties of Fire Resistant Metakaolin-Based Geopolymer-Type Coatings”, *J Non Cryst Solids*, 357 (5), 1399-1404, 2011.
56. Xu, H., Van Deventer, J.S.J., “The geopolymerisation of alumino-silicate minerals”, *Int. J. Miner. Process.*, 59(3), 247-266, 2000.
57. Hardjito, D., Rangan, B.V., “Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete”, *Research report GC 1, Curtin University of Technology*, 2005.
58. Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T., “Alkali-activated fly ashes: A cement for the future”, *Cem. Concr. Res.*, 29(8), 1323-1329, 1999.
59. Davidovits, J. , 2008. Geopolymer Chemistry and Applications, 4th Edition, Geopolymer Institute, United States, 644 s.
60. Girgin, S., “NaOH İle Aktifleştirilmiş Metakaolin Katkılı Geopolimer Malzeme Özelliklerinin Araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Afyon, 2016.
61. Meesala, C. R., Verma, N. K., Kumar, S., “Critical review on fly-ash based geopolymer concrete”, *Struct. Concr.*, 21(3), 1013-1028, 2020.
62. Ojha, A., Aggarwal, P., “Fly ash based geopolymer concrete: a comprehensive review”, *Silicon*, 1-20, 2021.
63. John, S. K., Nadir, Y., Giriya, K. “Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review”, *Constr. Build. Mater.*, 280, 122443, 2021.

64. Klima, K. M., Schollbach, K., Brouwers, H. J. H., Yu, Q., “Thermal and fire resistance of Class F fly ash based geopolymers–A review”, *Constr. Build. Mater.*, 323, 126529, 2022.
65. Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. K., Shi, X., “Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength”, *Constr. Build. Mater.* 262, 120924, 2020.
66. Jiang, X., Zhang, Y., Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., Yun, B., Huang, B., “A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures”, *J. Clean. Prod.*, 270 (2020): 122500.
67. Junru, R., Huiguo, C., Ruixi, D., Tao, S. (2019, May). Behavior of combined fly ash/GBFS-based geopolymer concrete after exposed to elevated temperature. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 267, No. 3, p. 032056). IOP Publishing.
68. Hager, I., Sitarz, M., Mróz, K., “Fly-ash based geopolymer mortar for high-temperature application–Effect of slag addition”, *J. Clean. Prod.*, 316, 128168, 2021.
69. Celikten, S., Isikdag, B., “Strength development of ground perlite-based geopolymer mortars”, *Adv. Concr. Constr.*, 9(3), 227-234, 2020.
70. Güzelküçük, S., Demir, İ. “Perlit Esaslı Geopolimer Kompozitlere Kür Süresi Ve Sıcaklığın Etkisi”, *UMAGD*, 11(2), 730-737, 2019.
71. Erdogan, S. T., “Properties of ground perlite geopolymer mortars”, *J. Mater. Civ. Eng.* 27(7), 04014210, 2015.
72. TS EN 1008, 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, 2003.
73. TS EN 196 -1, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2016.
74. TS EN 1015-3, Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayıma tablası ile) Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
75. TS EN 1015-11, Kagir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.

76. İlkentapar, S., Atiş, C. D., Karahan, O., Avşaroğlu, E. G., “Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class F fly ash geopolymer mortar”, *Constr. Build. Mater.* 151, 363-369, 2017.
77. Khater, H. M., “Effect of calcium on geopolymerization of aluminosilicate wastes”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 24(1), 92-101, 2012.
78. Part, W. K., Ramli, M., Cheah, C. B., “An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products”, *Constr. Build. Mater.*, 77, 370-395, 2015.
79. Dehghani, A., Aslani, F., Panah, N.G., “Effects of initial  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar ratio and slag on fly ash-based ambient cured geopolymer properties”, *Constr. Build. Mater.*, 293, 123527, (2021).
80. Juengsuwattananon, K., Winnefeld, F., Chindaprasirt, P., Pimraksa, K., “Correlation between initial  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  ratios on phase and microstructure of reaction products of metakaolin-rice husk ash geopolymer”, *Constr. Build. Mater.*, 226, 406–417, 2019.
81. Kong, D. L., Sanjayan, J. G., Sagoe-Crentsil, K., “Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures”, *Cem. Concr. Res.*, 37(12), 1583-1589, 2007.
82. Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., Qi, S. L. (2016). Comparative thermal and mechanical performance of geopolymers derived from metakaolin and fly ash. *J. Mater. Civ. Eng.* 28(2), 04015092.
83. Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y. F., Wuhner, R., Murphy, T., “Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature”, *Cem. Concr. Compos.*, 86, 9-18, 2018.
84. Rattanasak, U., Chindaprasirt, P., Suwanvitaya, P., “Development of high volume rice husk ash aluminosilicate composites”, *Int. J. Miner. Metall.*, 17(5), 654-659, 2010.

## TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale ve 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Çelikten, S., Erdoğan, G., “Effects of perlite/fly ash ratio and the curing conditions on the mechanical and microstructural properties of geopolymers subjected to elevated temperatures”, *Ceramics International*, 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.089>

Çelikten, S., Erdoğan, G., “Investigation of Strength Development of Perlite and Fly Ash Based Geopolymer Mortars at Ambient Curing”, *The 3<sup>rd</sup> International Symposium of Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences 2021 (IEACES2021)*, Karabük, Turkey, 22-24.10.2021. ISBN: 978-605-9554-62-6