

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

FİBER TAKVİYELİ ATIK BAZALT TOZU ESASLI
GEOPOLİMER HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Tezi Hazırlayan
Mehmet Berfun ÇAVUŞOĞLU

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Şubat 2024
NEVŞEHİR

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

FİBER TAKVİYELİ ATIK BAZALT TOZU ESASLI
GEOPOLİMER HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Tezi Hazırlayan
Mehmet Berfun ÇAVUŞOĞLU

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Şubat 2024

Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN danışmanlığında Mehmet Berfun ÇAVUŞOĞLU tarafından hazırlanan “**Fiber Takviyeli Atık Bazalt Tozu Esaslı Geopolimer Harçların Yüksek Sıcaklık Performansının Araştırılması**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

06/02/2024

JÜRİ

Başkan : Doç. Dr. Mehmet KAYA

Üye : Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN

Üye: : Doç. Dr. İsmail İsa ATABEY

ONAY

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetin Kurulu// 2024 tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... /..... / 2024
Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mehmet Berfun ÇAVUŞOĞLU



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, araştırma becerimi geliştiren, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen, ve tezimde büyük emeği olan değerli danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN'e ve eğitim hayatım boyunca her türlü ilgiyi ve desteğini sağlayan aileme teşekkür ederim.



FİBER TAKVİYELİ ATIK BAZALT TOZU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Berfun ÇAVUŞOĞLU

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2024

ÖZET

Bu tezde bazalt taşı kesim atığı sodyum silikat ile aktive edilerek harç karışımları oluşturulmuştur. Karışımlarda sodyum silikat içeriği bazalt atığı ağırlığının %10'u kadar Na_2O içerecek şekilde belirlenmiştir. Fibersiz karışımların yanında hacimce %0.5 ve %1 bazalt veya polipropilen lif içeren fiber takviyeli geopolimer harç karışımları oluşturulmuştur. Üretilen karışımlar $100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 8 saat ile 24 saat olmak üzere 2 farklı sürede ısıl küre tabi tutulmuştur. Harç karışımlarında ısıya dayanıklılığı nedeniyle bazalt kumu kullanılmıştır. Harç karışımlarından elde edilen 7, 28 ve 56 günlük numuneler üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Harçların dayanım değerlerine ısıl kür süresinin ve fiber içeriğinin etkileri irdelenmiştir. Ayrıca, geopolimer harçlar $600\text{ }^\circ\text{C}$, $800\text{ }^\circ\text{C}$ ve $1000\text{ }^\circ\text{C}$ olmak üzere 3 farklı sıcaklığa ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında harçlar üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisiyle harçlarda meydana gelen ağırlık kayıpları da belirlenmiştir. Bununla birlikte, seçilen harçlar üzerinde XRD ve SEM/EDX analizleri yapılarak harçların mikro yapılarında yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Harçların hiçbirinde $600\text{ }^\circ\text{C}$, $800\text{ }^\circ\text{C}$ ve $1000\text{ }^\circ\text{C}$ etkisi altında basınç dayanımı kaybı meydana gelmemiş, hatta deney öncesine göre farklı oranlarda dayanım artışı gözlenmiştir. Fiber takviyeli atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar olan sıcaklıklara dayanıklı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Atık bazalt tozu, geopolimer, harç, yüksek sıcaklık, mikro yapı.

Tez Danışman: Doç. Dr. Serhat ÇELİKTEN
Sayfa Adedi: 70 sayfa

INVESTIGATION OF THE HIGH TEMPERATURE PERFORMANCE OF FIBER REINFORCED WASTE BASALT POWDER BASED GEOPOLYMER MORTARS

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Berfun ÇAVUŞOĞLU

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

February 2024

SUMMARY

In this thesis, mortar mixtures were created by activating basalt stone cutting waste with sodium silicate. The sodium silicate content in the mixtures was determined to contain 10% Na₂O by weight of the basalt waste. In addition to fiber-free mixtures, fiber-reinforced geopolymer mortar mixtures containing 0.5% and 1.0% basalt or polypropylene fiber by volume have been manufactured. The produced mixtures were subjected to thermal curing at 100 °C for 2 different periods: 8 hours and 24 hours. Basalt sand was used in mortar mixtures due to its heat resistance. Flexural and compressive strength tests were carried out on 7, 28 and 56 day old specimens obtained from mortar mixtures. The effects of thermal curing time and fiber content on the strength values of mortars were examined. Additionally, geopolymer mortars were separately exposed to 3 different temperatures: 600 °C, 800 °C and 1000 °C. Flexural and compressive strength tests were carried out on the mortars after high temperature exposure. Weight losses in mortars due to high temperature were also determined. In addition, XRD and SEM/EDX analyzes were performed on the selected mortars to investigate the changes in the microstructure of the mortars due to high temperature. There was no loss of compressive strength in any of the mortars under the influence of 600 °C, 800 °C and 1000 °C, and even a strength increase at different rates was observed compared to before the experiment. It has been observed that fiber-reinforced waste basalt powder-based geopolymer mortars are resistant to temperatures up to 1000 °C.

Keywords: *Waste basalt dust, geopolymer, mortar, high temperature, micro structure.*

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serhat ÇELİKTEN

Number of Pages: 70 pages

İÇİNDEKİLER

ONAY VE KABUL SAYFASI	ii
TEZ BİDİRİM SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET	v
SUMMARY	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
2. BÖLÜM	
LİTERATÜR İNCELEMESİ.....	3
2.1. Bazaltın Tanımı ve Genel Özellikleri.....	3
2.2. Atık Bazalt Tozu	5
2.3. Bazalt ve Atık Bazalt Tozunun İnşaat Sektöründe Kullanımı Üzerine Yapılmış Çalışmalar	6
2.4. Geopolimerin Tanımı ve Üretimi.....	10
2.5. Geopolimer Üzerine Yapılmış Çalışmalar	12
3. BÖLÜM	
MATERYAL VE METOT	20
3.1. Materyal	20
3.1.1. Atık bazalt tozu	20
3.1.2. Kum.....	23
3.1.3. Sodyum silikat.....	24
3.1.4. Su.....	24
3.1.5. Bazalt ve polipropilen fiber.....	24
3.2. Metot	25
3.2.1. Eğilme dayanımı deneyi.....	27
3.2.2. Basınç dayanımı deneyi	28

3.2.3. Yüksek sıcaklık deneyi.....	29
3.2.4. SEM/EDX analizleri	31
3.2.5. XRD analizleri.....	31
4. BÖLÜM	
BULGULAR VE TARTIŞMA	32
4.1. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	32
4.2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	35
4.3. Yüksek Sıcaklık Etkisiyle Oluşan Ağırlık Kayıpları	40
4.4. SEM/EDX Analiz Sonuçları	41
4.5. XRD Analiz Sonuçları	57
5. BÖLÜM	59
SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR	62

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Uçucu kül esaslı geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar.....	13
Tablo 2.2. Metakaolin esaslı geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar.....	14
Tablo 2.3. Bazalt ve atık bazalt tozu esaslı geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar	16
Tablo 2.4. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bazalt lif takviyeli geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar	17
Tablo 2.5. Yüksek sıcaklık etkisine maruz polipropilen lif takviyeli geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar	18
Tablo 3.1. Atık bazalt tozunun kimyasal içeriği	20
Tablo 3.2. Bazalt kumunun elek analizi.....	23
Tablo 3.3. Harç karışım oranları, gr	27
Tablo 4.1. Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları	33
Tablo 4.2. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları	35
Tablo 4.3. Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları.....	37
Tablo 4.4. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları.....	39
Tablo 4.5. Harçların EDX analizi (25 °C).....	54
Tablo 4.6. Harçların EDX analizi (800 °C).....	55
Tablo 4.7. Harçların EDX analizi (1000 °C).....	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bazalt kayaçlarının görünümü	4
Şekil 2.2. Geopolimer özelliklerini etkileyen parametreler	11
Şekil 2.3. Geopolimer üretiminin şematik gösterimi	11
Şekil 2.4. Polipropilen lifin yerinde bıraktığı boşluğun gösterimi.....	19
Şekil 3.1. Atık bazalt tozunun görünümü	21
Şekil 3.2. Deneyleerde kullanılan atık bazalt tozunun toplam alkali içeriğine karşı silis diyagramında sınıflandırılması	22
Şekil 3.3. Atık bazalt tozunun XRD analizi	22
Şekil 3.4. Atık bazalt tozunun TGA/DTA analizi.....	23
Şekil 3.5. Bazalt kumunun görünümü.....	24
Şekil 3.6. Bazalt ve polipropilen fiber	25
Şekil 3.7. Kalıplarından çıkarılan harç numunelerinin görünümü.....	26
Şekil 3.8. Eğilme dayanımı deneyinin yapılışı.....	28
Şekil 3.9. Basınç dayanımı deneyinin yapılışı	29
Şekil 3.10. Kül fırını	30
Şekil 3.11. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası harçların görünümü	30
Şekil 4.1. Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları	34
Şekil 4.2. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları	35
Şekil 4.3. Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları	37
Şekil 4.4. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları	39
Şekil 4.5. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası ağırlık kayıpları.....	40
Şekil 4.6. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-500Xa).....	42
Şekil 4.7. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-500Xb)	42
Şekil 4.8. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-2000Xa).....	43
Şekil 4.9. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-2000Xb)	43
Şekil 4.10. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-5000Xa).....	44
Şekil 4.11. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-5000Xb)	44
Şekil 4.12. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-10000Xa).....	45
Şekil 4.13. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-10000Xb)	45
Şekil 4.14. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-500Xa).....	46
Şekil 4.15. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-500Xb)	46

Şekil 4.16. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-2000Xa).....	47
Şekil 4.17. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-2000Xb)	47
Şekil 4.18. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-5000Xa).....	48
Şekil 4.19. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-5000Xb)	48
Şekil 4.20. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-10000Xa).....	49
Şekil 4.21. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-10000Xb)	49
Şekil 4.22. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-500Xa).....	50
Şekil 4.23. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-500Xb)	50
Şekil 4.24. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-2000Xa).....	51
Şekil 4.25. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-2000Xb)	51
Şekil 4.26. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-5000Xa).....	52
Şekil 4.27. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-5000Xb)	52
Şekil 4.28. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-10000Xa).....	53
Şekil 4.29. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-10000Xb)	53
Şekil 4.30. Harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü (25 °C)	54
Şekil 4.31. Harçların EDX analizi grafiği (25 °C)	54
Şekil 4.32. Harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü (800 °C)	55
Şekil 4.33. Harçların EDX analizi grafiği (800 °C)	55
Şekil 4.34. Harçların EDX analizinin alındığı alan (1000 °C).....	56
Şekil 4.35. Harçların EDX analizi grafiği (1000 °C)	56
Şekil 4.36. Harçların XRD analizi (25°C).....	57
Şekil 4.37. Harçların XRD analizi (800°C).....	58
Şekil 4.38. Harçların XRD analizi (1000°C).....	58

SİMGE VE KISALTMALAR LİSTESİ

%	Yüzde
μ	Mikron
b	Prizmanın Kare Kesitinin Kenar Uzunluğu
Bd	Basınç Dayanımı
dk	Dakika
Ed	Eğilmede Dayanımı
EDX	X ışını Enerji Dağılım Spektrometresi
F	Prizmanın Ortasına Uygulanan Kuvvet
Fc	Kırılmadaki En Büyük Kuvvet
G	Gram
K	Kelvin
kg	Kilogram
km	Kilometre
kN	Kilonewton
L	Destek Silindirlerin Eksenleri Arasındaki Uzaklık
M	Molar
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
N	Newton
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-Işını Kırınım yöntemi
TGA	Termogravimetrik Analiz
°C	Santigrat Derece

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Son 50 yılda gözlemlenen küresel ısınmanın temel nedeni ısıyı hapseden gazların insan kaynaklı emisyonlarıdır. Bu emisyonlar esas olarak fosil yakıtların (kömür, petrol ve gaz) yakılmasından ve ormanların tahrip edilmesinden, tarımsal uygulamalardan ve diğer faaliyetlerden kaynaklanmaktadır [1]. Bu faaliyetlerden biri de Portland çimentosu üretimidir. Portland çimentosu üretimi atmosfere büyük miktarda CO₂ yayarken, bunun dünyadaki toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık %5-8'ini oluşturduğu rapor edilmiştir. Bu nedenle çimento endüstrisi çevre üzerindeki olumsuz etkileri ortadan kaldıracak yaklaşımları keşfetmeye çalışmaktadır [2].

Betonun çevresel etkisini azaltmak amacıyla, çimentonun daha çevre dostu bir bağlayıcıyla değiştirilmesi son yirmi yılda önemli bir araştırma konusu olmuştur. Uçucu kül, cüruf ve metakaolin gibi alüminosilikat öncüllerinin alkali çözeltilerle reaksiyonundan üretilen geopolimer bağlayıcıların, geleneksel Portland çimentosuna çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak önerilmiştir. Bu bakış açısına dayanarak, karışım tasarımları geliştirmek ve geopolimer betonların mekanik, dayanıklılık ve mikro yapı özelliklerini belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte, geopolimer bağlayıcıların karbon ayak izi değerlendirilirken hammadde kaynağının atık malzeme olup olmadığı, beton üretim tesisine yakınlığı, kür koşulları, kullanılan aktivatör türü ve miktarı da önem arz etmektedir. Bu nedenle üretilen her geopolimer bağlayıcının Portland çimentosuna göre daha çevreci malzeme olarak tanımlanması doğru olmayacaktır [3].

Yangın kazaları öngörülemez ve diğer felaketlere göre daha yüksek bir gerçekleşme olasılığına sahiptir. Bina yangınları toplam yangın sayısının yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır. Bir binanın yangına (yüksek sıcaklığa) maruz kalması, yapı malzemelerinin özelliklerinde önemli değişikliklere yol açan bir durumdur ve yapı

elemanlarının genel performansında değişiklikler beklenebilir. Yangın (yüksek sıcaklık) sonrasında betonun performans bozulması ve tahrip mekanizmasının araştırılması, mühendislik uygulamalarında büyük önem taşıyan binaların onarımı ve güçlendirilmesine temel oluşturabilir [4]. Bununla birlikte geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betonlar 300 °C üzerindeki sıcaklıklarda önemli yapısal değişikliklere uğramaktadır [5]. Bu nedenle araştırmacılar geleneksel betonların yüksek sıcaklık performansını artırmak ve yüksek sıcaklığa dayanıklı yenilikçi malzeme geliştirmek için çalışmaktadır.

Fiberler geleneksel betonların ve geopolimerlerin birçok özelliğini geliştirmek için kullanılmaktadır. Fiberlerin ve kullanıldıkları kompozitlerin matrislerinin sinerjik etkisi kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe direncinin yanı sıra süneklik ve tokluk gibi özelliklerinin gelişmesini sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, fiberlerin çatlakların gelişiminin kontrol edilmesi ile çatlak direncinin artırılması gibi fonksiyonları da vardır. Bazalt fiber de çevre kirliliğine neden olmayan mineral bir lif türüdür. Yüksek mukavemet ve elastisite modülü, korozyon ve donma dayanıklılığı gibi üstün özellikleri bulunmaktadır [6]. Polipropilen elyaf, üretiminde fazla işçilik gerektirmeyen, uygulaması kolay, yapay bir malzemedir. Polipropilen elyaf kimyasal olarak asitlere ve alkalilere karşı dayanıklıdır. Polipropilen fiber kullanıldığı kompozitin geçirgenliğini ve rötre çatlaklarını azaltmada, darbe, aşınma, donma-çözülme ve sülfat direncini artırmada etkili olduğu daha önce yapılan birçok çalışmada rapor edilmiştir [7]

Bu çalışmada bazalt taşı kesim atölyelerinde atık olarak ortaya çıkan bazalt çamurundan elde edilen atık bazalt tozu ile yüksek sıcaklığa dayanıklı geopolimer kompozitler elde edilmeye çalışılmıştır. Üretilen geopolimere eklenen bazalt ve polipropilen liflerin geopolimerlerin dayanım ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır.

2. BÖLÜM

LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. Bazaltın Tanımı ve Genel Özellikleri

Bazaltlar, bileşiminde % 45-52 arasında SiO₂ ihtiva eden volkanik lavlar ve bazı volkanik oluşumların çatlaklar, yarıklar veya bir volkan bacası aracılığıyla yeryüzüne çıkarak yayılması ile oluşan magmatik kayalardır. Yeryüzünün 2,5 milyon km²'den fazla yüzeyini bazaltlar örter. Bu yönden bazalt bol bulunan ucuz bir hammaddedir. Doğal kayaların içerisinde cam-seramik elde edilmesine en elverişli olanların kayaların başında bazalt gelmektedir [8]. Bazalt kayacının görünümü Şekil 2.1'de sunulmuştur. Bazaltların koyu renkli mineral oranı %40 ila %70 arasında olup açık renkli mineral olarak ise plajiyoklaz mineralinden meydana gelmektedir. El örneğinde ise griden siyaha kadar değişen renklere sahip olabilmektedir. Bazaltların içeriğinde volkan camı fazla ise, dokusu holohiyalindir ve kristalin fazla olduğu yani holokristalin dokulu bazaltlara göre daha siyah ve mat görünüme sahiptir. Bazaltların altere olmasına bağlı olarak yeşil renklere de görülebilmektedir [9].



Şekil 2.1. Bazalt kayaçlarının görünümü [10]

Genel olarak bazaltlar porfirik dokudan oluşmaktadır. Bazaltları oluşturan fenokristaller özşekilli veya yarı özşekilli durumda olmaktadır. Bazaltlar genellikle kristalli yapıda olup hamuru küçük taneli yapıya sahiptir. Pilotaksitik doku ise, feldispat mikrolitleri hamurun çoğunluğunu oluşturduğu zaman meydana gelmektedir. Ofitik doku, küçük feldispat minerallerinin boşluklarına yine küçük ojit minerallerinin dolması sonucu oluşmaktadır. Bazaltların yaygın görülen dokusal özelliklerinden biri de soğuma yüzeyine dik gelişen soğuma çatlakları oluşan sütun yapısıdır. Genellikle altı köşeli olup 10 cm ila 100 cm kalınlıklara sahip olabilmektedir [11].

Bazaltların ana bileşimini labrador bileşimindeki plajiyoklazlar oluşturur. Zonlu doku oluşması muhtemeldir. Hamurdaki plajiyoklaz mikrolitlerin anortit içeriği fenokristallere kıyasla daha azdır. Piroksen mineralleri koyu renkli minerallerin başında gelmektedir. Genellikle bazaltlarda piroksenlerin iki farklı türde olduğu bilinmektedir. Hornblend minerallerine ender olarak da olsa karşılaşılmakta olup biyotit ise kahverenginde olabilmektedir. Genellikle prizmatik iğnemsî halde bulunan apatit, manyetit ve ilmenit ise nispeten daha küçük olacak şekilde bulunur [9].

Bazaltlar genel olarak içerisinde bulunan olivin durumuna göre ikiye ayrılmaktadırlar. Ayrıca kimyasal bileşimlerine göre silisçe doymuş bazaltlar da toleyitik bazalt olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak bünyesinde olivin bulundurmayan genellikle kuvars ve hipersten içeren kayalardır. Magma içerisinde mevcut olan silis katılma sırasında olivinlerin ortopiroksene geçişini sağlayacak seviyededir. Fakat magmanın daha hızlı olarak soğuması, bu durumun oluşmasını engelleyebilir. Bazaltların diğer grubunu oluşturan silis doymuş olmayan bazaltlar da ise olivin minerali bulunur. Bu bazaltlara alkali bazalt da denmektedir. Ayrıca mineralojik bileşiminde anortit, albit bulunduran ve hamurunda oldukça yüksek oranda plajiyoklaz mineralleri bulunduran bazaltlara da yüksek alüminyumlu bazaltlar olarak tanımlanmaktadır [11].

Bazaltın yoğunluğu 2,5–2,9 g/cm³ aralığındadır; bu, çeliğin yoğunluğundan çok daha düşüktür ancak karbon veya cam elyafların yoğunluğuna daha yakındır. Ancak bazalt, karbon elyafından çok daha ucuzdur ve cam elyafından daha yüksek mukavemete sahiptir. Düşük ağırlıklı, daha ucuz ve sağlam kompozit malzeme için ideal bir malzemedir [12]. Bazalt malzemesi son derece serttir ve Mohr ölçeğine göre 5 ile 9 arasında sertlik değerlerine sahiptir, bu da daha iyi aşınma özellikleri sağlar. Bazaltın Brinell sertliği ise yaklaşık 420 MPa'dır [13]. Bazaltın ısı iletkenliği 0,034–0,04 W/(m·K) aralığındadır. [14]. Bazaltın ısıl genleşme katsayısı yaklaşık 8×10^{-6} (1/K)'dir. Bazalt lifleri mükemmel termal özelliklere sahiptir ve herhangi bir fiziksel hasara uğramadan saatlerce 1100 °C-1200 °C sıcaklığa kolaylıkla dayanabilir [15].

2.2. Atık Bazalt Tozu

Doğal taşların maden yataklarından çıkarılması, işlenmesi ve yüzey düzeltme işlemleri sırasında toz şeklinde atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Tane boyutu 100µ dan daha küçük olabilen bu atık tozlar; çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Bu nedenle, bu atık tozların geri dönüşümü ekonomik ve ekolojik açıdan değerlidir. Bazalt taşının kesimi sırasında ortaya çıkan atık bazalt tozu da kimyasal bileşimindeki SiO₂, CaO ve Al₂O₃ içeriği ve üstün fiziksel özellikleri nedeniyle inşaat sektöründe geri dönüşüm potansiyeline sahiptir. Volkanik bir kayaç olan bazalt; lif katkı, agrega, mineral katkı olarak kullanılabilirliği genel olarak araştırma alanlarını oluşturmaktadır. Ancak bu kayacın kesim atığı tozlarının agrega ve mineral katkı olarak kısmen kullanımının yanı

sıra tamamen atık toz bağlayıcı olarak kullanılan alkali aktivasyon yöntemi de uygun bir araştırma alanıdır [16].

2.3. Bazalt ve Atık Bazalt Tozunun İnşaat Sektöründe Kullanımı Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Bazalt inşaat sektöründe genellikle agrega, puzolan ve lif olarak kullanılmıştır. Aşağıda bu kullanım alanları ile ilgili yapılmış bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Konakova ve çalışma arkadaşları bazalt lifleri ve agregalarının çimento kompozitlerinin termal genişmesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Alüminli çimento bazlı dört farklı kompozit karışım tasarlanmış ve test edilmiştir. Silis kumu yerine bazalt agregaları kullanıldığında termal şekil değiştirmenin %50'den fazla daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Bazalt agregalı kompozitlere bazalt lifi eklendiğinde ise silis kumlu lifsiz kompozitlere göre yaklaşık %53 daha düşük termal genişme gözlenmiştir [17].

Cao ve çalışma arkadaşları, bazalt kaba ve ince agregalar; kireçtaşı kaba ve ince agregalar; bazalt kaba agregalar ve kireçtaşı ince agregaları olmak üzere 3 farklı agrega ile asfalt karışımları oluşturmuşlardır. Bazalt kaba ve ince agregalar ile üretilen asfalt karışımlarının en iyi tekerlek izi direncini gösterdiğini, bunu bazalt kaba agregalar ve kireçtaşı ince agregalarının izlediğini ve kireçtaşı kaba ve ince agregaların son sırada geldiğini belirtmişlerdir. Agrega tipinin asfalt karışımlarının tekerlek izi direnci üzerinde önemli bir etkisi olduğu, ancak düşük sıcaklıkta çatlama duyarlılığı veya nem duyarlılığı açısından önemli bir fark oluşturmadığı rapor edilmiştir. Ayrıca, çalışmada üç asfalt karışımı için dinamik modülü eğrileri oluşturulmuş ve bazalt kaba ve ince agregalar ile üretilen asfaltın en yüksek dinamik modülü gösterdiği, kireçtaşı kaba ve ince agregalar ile üretilen asfaltın da en düşük dinamik modülüne sahip olduğu gözlenmiştir [18].

Sevinç ve Durgun çalışmalarında çimento yerine %7.5 ve %15 oranlarında pomza, barit ve bazalt tozu kullanılarak harç numuneleri üretmişlerdir. Üretilen 90 günlük numuneler 100, 200, 300, 400, 500 ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında numunelere hava ve su olmak üzere iki farklı soğutma işlemi

uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinin harçların basınç dayanımı, ultrasonik darbe hızı ve kütle kaybı üzerine etkileri araştırılmıştır. Bazalt içeren numunelerin, diğer numunelere göre yüksek sıcaklık etkisinden daha az etkilendiği rapor edilmiştir. Bununla birlikte, hava ile soğutulan numunelerde basınç dayanımı kaybının daha fazla olduğu, su ile soğutulan numunelerde ise kütle kaybının daha fazla olduğu görülmüştür [19].

Lu ve çalışma arkadaşları, lifsiz geleneksel beton ile bazalt lifli betonun yüksek sıcaklıklar altındaki mekanik özellikleri yüksek sıcaklık etkisi sonrasında karbonatlaşma derinliği ve klorür iyonu penetrasyonu ölçümü ile araştırılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan beton için yanmış tabaka kavramı önerilmiş ve farklı sıcaklıklardaki beton için bu yanmış tabakanın kalınlığı ölçülmüştür. Sonuçlar, bazalt elyaf ilavesinin yüksek sıcaklıklarda betonun karbonizasyonunu engelleyebildiğini, yanmış tabakanın kalınlığını azaltabildiğini ve betonun klorür nüfuz etme direncini önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir [20].

Koçi ve çalışma arkadaşları bazalt ve polipropilen lifleri birlikte kullanılarak ürettikleri reaktif pudra betonlarının yüksek sıcaklık performansını araştırmışlardır. Araştırmacılar, bazalt ve polipropilen liflerin reaktif pudra betonunda birlikte kullanılmasının yüksek sıcaklık etkisinde reaktif pudra betonlarında meydana gelen kabuk atma ve çatlama azalttığını gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni olarak bazalt liflerinin termo-mekanik gerilmelere uyum sağlaması ve polipropilen liflerinin de yüksek sıcaklıkta yanıp yerine boşluk bırakması ile betonda oluşan su buharına kaçış yolları oluşturmasını göstermiştir [21].

Alaskar ve çalışma arkadaşları, yüksek sıcaklık etkisinde beton bileşenlerinin performansını arttırmak için betona bazalt lifleri eklenmesinin etkinliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu amaçla, ürettikleri beton numunelere hacimce %0.25, %0.5, %0.75 ve %1 dozajlarında bazalt lif ilave etmişler ve numuneleri 600 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklara maruz bırakmışlardır. Bazalt liflerin betonlarda dolgu maddesi görevi gördüğü, beton içindeki boşlukları ve mikro çatlakları kapattığı bu nedenle de bazalt lifle güçlendirilmiş betonun yüksek mukavemeti ve enerji emme kapasitesiyle sonuçlandığı belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda bazalt liflerinin, betonun

hidratasyon ürünleri ayrışmaya başladığında makro çatlakları yakalayarak agregaları ve çimento hamurunu yerinde tuttuğu gözlenmiştir. Bu nedenle, bazalt lifi takviyeli betondaki yüksek sıcaklık etkisi sonrasında belirlenen mukavemet, lif takviyesiz betona göre önemli ölçüde daha yüksek elde edilmiştir. Bununla birlikte, optimum düzeydeki lif ilavesinin hacimce 0.25%–0.5% aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu düzeyden daha fazla lif içeriğinin liflerin topaklaşmasına ve düzensiz bir şekilde beton matrisine dağılmasına yol açtığı rapor edilmiştir [22].

Ahmed ve çalışma arkadaşları, yaptıkları literatür tarama çalışmasında çelik, polipropilen ve bazalt fiber gibi çeşitli fiber malzeme türleri ile güçlendirilmiş geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen betonların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki mekanik performansı araştırılmıştır. Fiber takviyesinin geri dönüştürülmüş agregalı betonların zayıf matrisindeki çatlakların ilerlemesini sınırlayan etkiye sahip olması nedeniyle bu betonlarda fiber takviyesinin geleneksel betona kıyasla gelişmiş mekanik özellikler ve dayanıklılık elde etmede etkili bir yol olduğu belirlenmiştir. Betonların yüksek sıcaklık performansının fiber türüne ve hacmine önemli ölçüde bağlı olduğu rapor edilmiştir. Çelik ve bazalt gibi yüksek mukavemetli ve termal olarak stabil fiberlerin kullanılması, geri dönüştürülmüş agregalı betonlarda çatlak direncini ve mekanik özellikleri geliştirebilirken, polipropilen fiber gibi termal olarak düşük stabiliteye sahip fiberlerin eklenmesi, yüksek sıcaklıklarda betonlarda patlama ve dökülme olaylarının önüne geçebileceği belirtilmiştir. Polipropilen fiber, yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özellikleri açısından bakıldığında sınırlı kullanılabilirlik sunan ve düşük erime noktasına sahip bir malzemedir. Bununla birlikte, polipropilen liflerin, düşük erime noktası nedeniyle, su buharının kaçması için yollar oluşturduğu ve iç gözenek basıncı ve sıcaklık gradyanı nedeniyle mikro yapının hasar görmesi olasılığını azalttığı, böylece yüksek sıcaklıklarda dökülme olayını önlediği ifade edilmiştir. Yüksek sıcaklıkların olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için geri dönüştürülmüş agregalı betonlarda %0.5'e kadar polipropilen lif ilavesi etkili bir şekilde kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır. Bazalt fiberin ise yüksek çekme mukavemeti ve mükemmel termal stabiliteye sahip çevre dostu bir fiber türü olduğu belirtilmiştir. Oda sıcaklığında, hacimce %1,5'a kadar bazalt fiber dozajının geri dönüştürülmüş agregalı betonların çekme kapasitesini, eğilme mukavemetini ve kırılma dayanıklılığını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir [23].

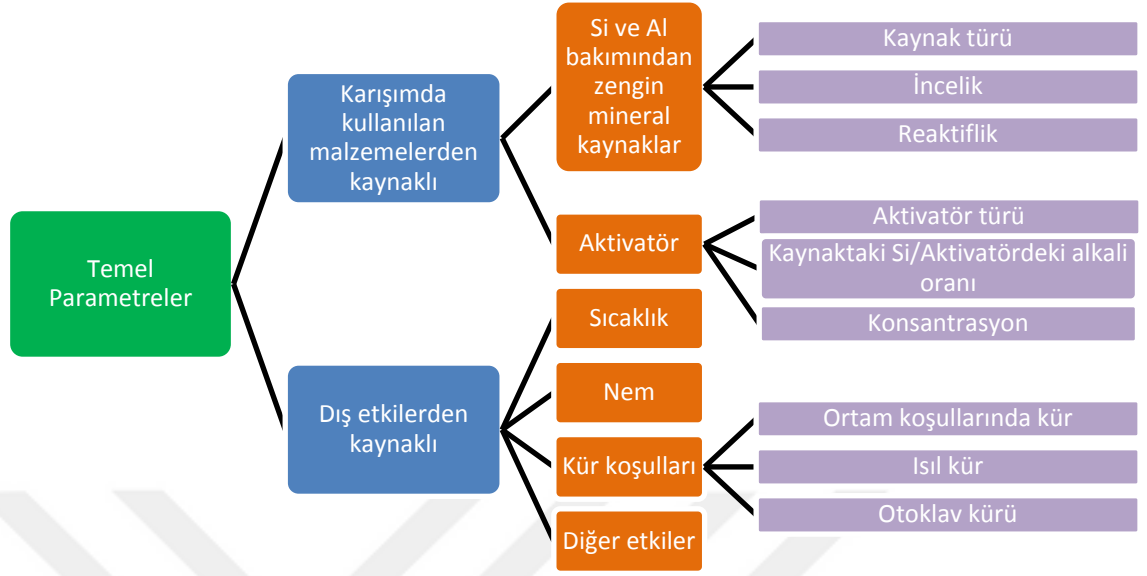
Dobiszewska ve Beycioğlu asfalt üretiminde kullanılan agreganın hazırlanması sırasında ortaya çıkan bazalt tozunun çimento hamuru ve harcının özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, CEM I, CEM II/A-S, CEM II/A-V ve CEM II/B-V çimentoları ile ürettikleri çimento harçlarında çimento yerine kütlece %1, %2, %3, %4, %6, %8 ve %10 bazalt tozu kullanarak harç karışımları oluşturmuşlardır. Bazalt tozunun harçların kıvamını önemli ölçüde etkilemediği belirlenmiştir. Bazalt tozu çimento pastalarının priz başlangıç ve bitiş sürelerini uzatmıştır. Çimento yerine bazalt tozu %8'e kadar bazalt tozu kullanılması, çimento harçlarının mekanik özelliklerini, yani 2 ve 28 günlük kür süresindeki eğilme ve basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. Bazalt tozu ikamesi harçların büzülmesinde artışa neden olmuştur. Asfalt tesisi atığı olan bazalt tozunun çimento harcında kısmen çimento ikamesi olarak dahil edilmesi çevre dostu ve ekonomik açıdan uygulanabilir bir yöntem olduğu rapor edilmiştir [24].

Dobiszewska ve çalışma arkadaşları asfalt tesisi atığı olarak ortaya çıkan atık bazalt tozunu geleneksel betonda ince agrega yerine kullanmışlardır. Sonuçlar, kum yerine bazalt tozu eklenmesinin betonun basınç ve eğilme dayanımını arttırdığı belirtilmiştir. Bunun temel nedeni olarak bazalt tozunun dolgu etkisi ve bazalt tozu ilaveli betondaki agrega-harç ara yüzey bölgesinin referans betona göre daha yoğun ve daha güçlü olması gösterilmiştir. Betondaki geniş gözeneklerin bazalt tozu ile dolduğu, bunun da çimento hamurunun daha iyi sıkıştırılmasına, yapısının yoğunlaşmasına ve bunun sonucunda da betonun mekanik özelliklerinin iyileşmesine yol açtığı ifade edilmiştir. Fiziksel olarak dolgu etkisinin yanında SEM/EDX analizlerinden elde edilen gözlemler, bazalt tozu ve gözenek çözeltisi arasında bazı kimyasal reaksiyonların mümkün olduğunu, yani bazalt tozu parçacıklarının yüzeyindeki minerallerin C-S-H fazına kademeli yerel dönüşümünün gerçekteşebileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, atık bazalt tozunun kum yerine kullanılması ile agrega-harç ara yüzey bölgesinin hem fiziksel hem de kimyasal yolla güçlendirilebileceği rapor edilmiştir [25].

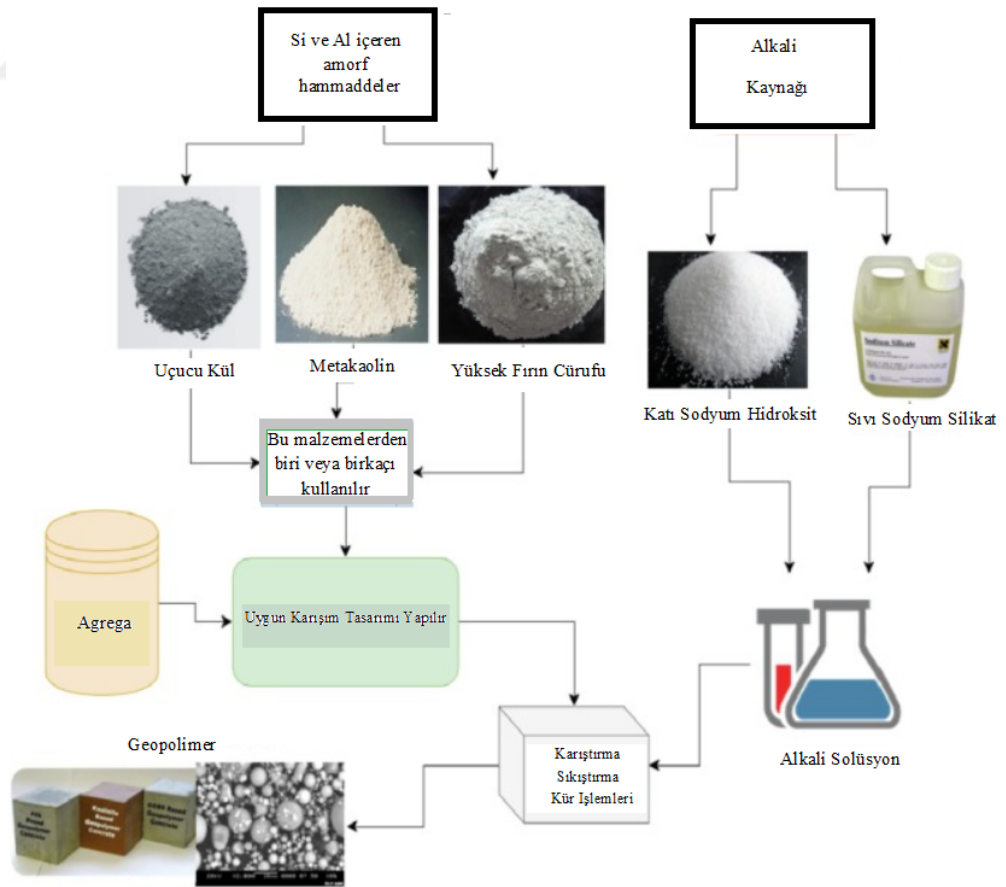
2.4. Geopolimerin Tanımı ve Üretimi

Beton üretiminin ana malzemesi olan geleneksel Portland çimentosunun üretiminin toplam küresel karbondioksit (CO₂) emisyonunun yaklaşık %10'undan sorumlu olduğu bilinmektedir. Betonun dünyada sudan sonra en çok kullanılan ikinci kaynak olması nedeniyle geleneksel Portland çimentosuna olan sürekli bağımlılık, atmosfere salınan CO₂ miktarını artırmaya devam edecektir. Araştırmacılar, gezegendeki CO₂ yükünün azaltılmasına yardımcı olmak amacıyla beton üretiminde alternatif bağlayıcılar bulmak için çaba sarf etmektedir. Geopolimer beton, geleneksel betonun yerini alma potansiyeli olan yeni bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Betona benzer özelliklerini korurken, çimento esaslı malzemelerle uygun şekilde tasarlanıp üretildiğinde, geleneksel Portland çimentosu üretiminin karbon ayak izini %80 oranında azaltma kapasitesine sahiptir. Geleneksel Portland çimentosu üretimi, atmosfere CO₂ salmanın yanı sıra kireçtaşı gibi yenilenemeyen kaynakları da tüketir. Bu nedenle kaynakları daha verimli kullanma adına da geopolimer bağlayıcılar geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak nitelendirilmiştir [26,27].

Geopolimerler Si ve Al açısından zengin amorf bir kaynak malzemenin yüksek derecede alkalın bir çözelti ile reaksiyona girmesi olarak adlandırılan geopolimerizasyon işlemi sonucunda amorf ila yarı kristalliği olan jel yapılarının oluşması ile elde edilirler [28]. Geopolimerizasyon süreci, araştırmacıların hala anlamaya çalıştığı karmaşık bir kimyasal süreçtir. Bununla birlikte, çeşitli araştırmalar geopolimer betonun mekanik özelliklerinin Si ve Al açısından zengin kaynakların bileşiminden, bunların kaynağından, kür rejiminden, alkalın çözelti türü ve konsantrasyonundan etkilendiğini belirtmişlerdir [29]. Geopolimer özelliklerini etkileyen parametreler ve örnek bir geopolimer üretim şeması sırasıyla Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de sunulmuştur. Burada, Si ve Al açısından zengin amorf kaynak doğal, yapay veya endüstriyel atık malzemeler olabilir. Alkali kaynağı olarak da sodyum hidroksit ve sodyum silikat dışında pH değeri yüksek birçok solüsyon tercih edilebilmektedir. Araştırmacılar kullandıkları kaynak malzeme için en uygun alkali içeriğini, karıştırma ve kür koşullarını elde etmeye çalışmışlardır [28].



Şekil 2.2. Geopolimer özelliklerini etkileyen parametreler [30]



Şekil 2.3. Geopolimer üretiminin şematik gösterimi [31]

Sanayileşmenin ve nüfus artışının istikrarlı bir şekilde artmasıyla birlikte uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve diğer endüstriyel atık ürünleri gibi endüstriyel atıklar çöp depolama alanlarına atılmaktadır. Bu endüstriyel atık ürünlerinin düzenli depolama alanlarına atılması, kirlilik kaynağı olduğundan çevreye zararlıdır. Geopolimer kompozitler yüksek Si ve Al içeren hammaddeler gerektirdiğinden, bu endüstriyel malzemelerin geopolimer üretiminde tüketilmesi çevre üzerindeki kirlilik yükünü azaltacaktır. Bu atıkların büyük bir arza sahip olması ve nüfus artışıyla birlikte uygun fiyatlı konutlara yönelik sürekli talebin artmaya devam etmesi nedeniyle bu atıkların değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevresel açıdan avantajlı olacaktır [32-34].

2.5. Geopolimer Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Literatür incelendiğinde, geopolimer ile ilgili yapılan çalışmaların özellikle uçucu kül ve metakaolin esaslı geopolimer kompozitler üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Bununla birlikte atık kayaç tozları, atık cam tozu, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı gibi malzemeler hakkında da birçok çalışma yapılmıştır. Uçucu kül ve metakaolin esaslı geopolimerlerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri ile ilgili yapılmış bazı çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de sunulmuştur. Bununla birlikte bazalt veya atık bazalt tozu ile ilgili literatürde çok kısıtlı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları Tablo 2.3’de özetlenmiştir. Bazalt ve polipropilen lifler ise çeşitli geopolimer karışımlarında kullanılmıştır. Her iki lifin de atık bazalt tozu esaslı geopolimerlerde kullanımı ile ilgili geçmişte yapılmış bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bazalt ve polipropilen lif takviyeli geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar sırasıyla Tablo 2.4 ve Tablo 2.5’de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Uçucu kül esaslı geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar

Araştırmacılar	Kullanılan Mineral Malzeme	Alkali Aktivatör	Araştırma Konusu	Bulgular
Gunasekara ve çalışma arkadaşları [35]	Farklı CaO içeriğine sahip F sınıfı uçucu küller	Na ₂ SiO ₃ ve NaOH	Uçucu külün reaksiyon aktivitesinin klorür difüzyon hızı üzerindeki etkisi	Geopolimerdeki klorür difüzyon hızı, öncü uçucu külün reaktivitesi tarafından yönetilen geopolimer matrisinin gözenekliliğine bağlıdır.
Kupwadepatil ve çalışma arkadaşları [36]	C ve F sınıfı uçucu küller	Na ₂ SiO ₃ ve NaOH	Geleneksel beton ile uçucu kül esaslı geopolimerlerin klorür difüzyon hızının karşılaştırılması. Uçucu kül türünün klorür difüzyon hızına etkisi	Uçucu küllü geopolimerlerin klorür korozyon direnci geleneksel betona göre daha iyidir. F sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimerlerde daha yüksek performans elde edilmiştir.
Bhutta ve çalışma arkadaşları [37]	F sınıfı uçucu kül	Na ₂ SiO ₃ ve NaOH	%5 sülfat solüsyonunda geleneksel beton ile geopolimer betonun dayanıklılığının karşılaştırılması	Uçucu küllü geopolimer betonlarda daha iyi sülfat dayanıklılığı elde edilmiştir.
Ismail ve çalışma arkadaşları [38]	F sınıfı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu	Na ₂ SiO ₃	%5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat solüsyonlarına dayanıklılık	Sodyum sülfatın kayda değer bir etkisi olmamıştır. Magnezyum sülfat ise yüksek fırın cürufu gibi Ca içeriği yüksek geopolimerlerin yapısını olumsuz etkilediği belirlenmiştir.
Badar ve çalışma arkadaşları [39]	Farklı CaO içeriklerine sahip 3 farklı F sınıfı uçucu kül	Na ₂ SiO ₃ ve NaOH	Uçucu külün CaO içeriğinin karbonatlaşma direncine etkisi	Yüksek CaO içeriği uçucu küllü geopolimerlerin karbonatlaşma direncini olumsuz etkilemiştir.
Sun ve çalışma arkadaşları [40]	F sınıfı uçucu kül	Na ₂ SiO ₃ ve NaOH	Uçucu kül esaslı geopolimer harçların donma-çözülme direncinin geleneksel harçla karşılaştırılması	Uçucu kül esaslı geopolimer harçların donma-çözülme direncinin çimento esaslı geleneksel harçtan daha iyi olduğu rapor edilmiştir.
Temuujin ve çalışma arkadaşları [41]	C ve F sınıfı uçucu küller	Na ₂ SiO ₃ ve NaOH	Uçucu külün CaO içeriğinin donma-çözülme direncine etkisi	Yüksek CaO içeriği uçucu küllü geopolimerlerin donma-çözülme direncini olumsuz etkilemiştir
Wallah ve çalışma arkadaşları [42]	F sınıfı uçucu kül	Na ₂ SiO ₃ ve NaOH	Uçucu kül esaslı geopolimerlerin sülfürik asit direnci	Uçucu kül esaslı geopolimerlerin sülfürik aside iyi derecede dirençli olduğu belirlenmiştir.
Jiang ve çalışma arkadaşları	C ve F sınıfı uçucu küller	Na ₂ SiO ₃ ve NaOH	Uçucu kül sınıfının geopolimerlerin yüksek	500 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda F sınıfı uçucu

arkadaşları [43]			sıcaklık performansına etkisi	küllü geopolimerlerin yüksek sıcaklığa daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir.
Zhang ve çalışma arkadaşları [44]	F sınıfı uçucu kül	Na_2SiO_3 ve NaOH	Otam kuru ve ısı kuru koşullarında üretilen geopolimer betonların yüksek sıcaklık performanslarının araştırılması	400 °C'de uçucu küllü geopolimerlerin dayanımlarında deney öncesine göre artış gözlenmiştir. Ortamda kürlenmiş geopolimer beton genellikle ısıyla kürlenmiş betona göre daha yüksek mukavemet artışı göstermiştir.
Çelikten ve çalışma arkadaşları [45]	F sınıfı uçucu kül	Na_2SiO_3 ve NaOH	Yüksek fırın çürüğü esaslı geopolimerlerin yüksek sıcaklık performansına uçucu külün etkisi	Yüksek fırın çürüğü yerine uçucu kül ikamesi, geopolimer harçların yüksek sıcaklık direncini artırmıştır. Harçların eğilme dayanımlarının basınç dayanımlarına oranı uçucu kül ikamesiyle artmıştır.
Chindaprasirt ve çalışma arkadaşları [46]	C sınıfı uçucu kül	Na_2SiO_3 ve NaOH	Polipropilen lif katkılu uçucu kül esaslı geopolimerlerin yüksek sıcaklık performansının araştırılması	En uygun polipropilen lif içeriği eğilme dayanımı için hacimce %1, basınç dayanımı bakımından ise %0.5 olarak belirlenmiştir. Bu oranlardaki polipropilen lif içeriği geopolimerlerin yüksek sıcaklık etkisinden dolayı dayanım kaybını azaltmıştır.

Tablo 2.2. Metakaolin esaslı geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar

Araştırmacılar	Kullanılan Mineral Malzeme	Alkali Aktivatör	Araştırma Konusu	Bulgular
Kong ve çalışma arkadaşları [47]	Farklı derecelerde kaolinin kalsine edilmesi ile elde edilen metakaolin	Na_2SiO_3 + NaOH ve Na_2SiO_3 + KOH	Kalsinasyon sıcaklığının, aktivatör/metakaolin oranının, kuru sıcaklığının ve alkali aktivatör türünün yüksek sıcaklık dayanıklılığına etkisi	Na_2SiO_3 + KOH ile aktive edilen geopolimer bağlayıcılar, Na_2SiO_3 + NaOH ile aktive edilen sistemlere göre daha iyi yüksek sıcaklık dayanıklılığı göstermiştir. Kalsinasyon sıcaklığının geopolimerlerin yüksek sıcaklık performansını önemli ölçüde etkilemediği belirlenmiştir.
Rovnanik [48]	Kaolinin 750 °C'de kalsine edilmesiyle elde edilen metakaolin	Na_2SiO_3 + NaOH	10 °C, 20 °C, 40 °C, 60 °C ve 80 °C olmak üzere 5 farklı kuru sıcaklığı ile üretilen geopolimerlerin	Daha yüksek kuru sıcaklıkları, erken yaş basınç ve eğilme dayanımlarını artırmış ve bu değerler 1 gün içinde neredeyse hedef değerlerine bile ulaşmıştır. Bununla birlikte, yüksek

			mekanik özelliklerine kür sıcaklığının etkisi	sıcaklıklarda kür edilen numunelerin 28 günlük dayanımları, ortam sıcaklığında veya düşük sıcaklıkta küre tabi tutulan numunelerle karşılaştırıldığında belirgin şekilde daha düşük elde edilmiştir.
Şahin ve arkadaşları [49]	Metakaolin (kalsinasyon sıcaklığı belirtilmemiş)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	Üç farklı agrega türü (Rilem kumu, bazalt kumu ve geri dönüştürülmüş atık beton) ile üretilen metakaolin bazlı geopolimer harçlara üç farklı bazalt elyaf içeriğinin (%0.4, %0.8 ve %1.2) etkisi	Bazalt lifi özellikle %0.8-1.2 oranında kullanıldığında olumlu etkiler göstermiştir. Bazalt lifi içeriği ile basınç dayanımı değerlerinde %25'e, eğilme dayanımı sonuçlarında ise %50'ye varan artışlar görülmüştür. Bazalt kumu ile daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.
Zhang ve arkadaşları [50]	Eşit miktarda metakaolin ve uçucu kül	$\text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{KOH}$	Geopolimer betonlar ile çimento esaslı geleneksel betonların 700 °C'ye varan yüksek sıcaklıklardaki performanslarının karşılaştırılması	Geopolimer betonlar yüksek sıcaklık etkisinde geleneksel betonlara göre daha iyi performans göstermiştir. Geopolimer betonlarda 700 °C civarında meydana gelen sinterleme reaksiyonu, geopolimer betonun gözenek hacmini ve geçirgenliğini arttırmıştır. Yüksek mukavemetli geopolimerlerde 500 °C etkisi sonrasında kabuk atma meydana gelmiştir.
Albidah ve arkadaşları [51]	Metakaolin (kalsinasyon sıcaklığı belirtilmemiş)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	Geopolimer betonların 600 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklık performansı	200 °C, 400 °C ve 600 °C etkisi sonrasında geopolimer betonların dayanımları yüksek sıcaklık etkisi öncesindeki dayanımlarının sırasıyla %56-%63'ü, %38-%51'i ve %28-%34'ü aralığında elde edilmiştir.
Chakkor ve arkadaşları [52]	Metakaolin ve kırmızı çamur	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	Silis kumu yerine ikame edilen kireçtaşı tozu, mermer tozu ve bazalt tozunun geopolimer betonların 800 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklık performansına etkisi	En iyi yüksek sıcaklık dayanıklılığı bazalt tozu ile üretilen geopolimer betonlarda elde edilmiştir. 600 °C ile 800 °C arasında geopolimer betonlarda belirgin dayanım kayıpları görülmüştür.

Tablo 2.3. Bazalt ve atık bazalt tozu esaslı geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar

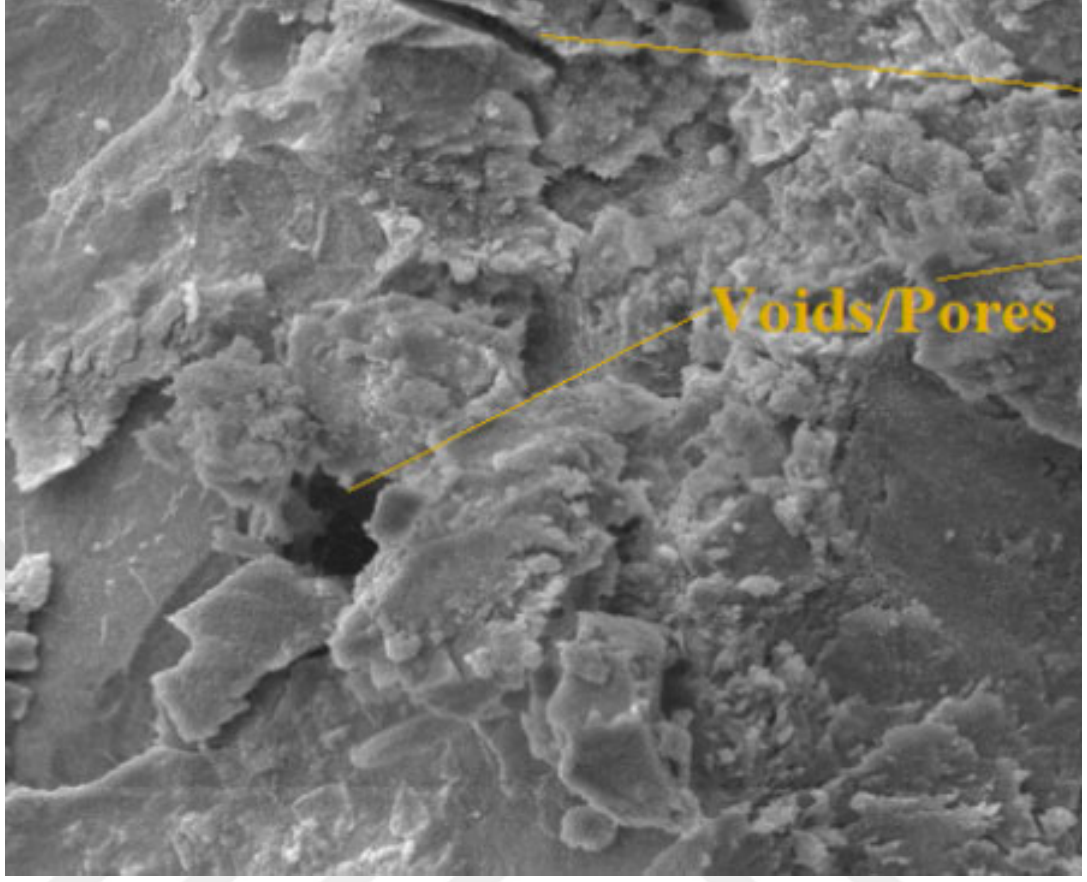
Araştırmacılar	Kullanılan Mineral Malzeme	Alkali Aktivatör	Araştırma Konusu	Bulgular
Saraya ve El-Fadaly [53]	Bazalt	NaOH	Aktivator dozajının (2.5, 5.0, 7.5, 10.0M) ve kür sıcaklığının (25 °C ve 45 °C) geopolimerlerin dayanım gelişimine etkisi	Kür sıcaklığının artışı geopolimerlerin dayanım gelişimini olumlu etkilemiştir. Geopolimerlerde reaksiyona girmemiş bazalt parçacıkları tespit edilmiştir. 10M NaOH içeriği ile üretilen geopolimerlerden dayanım sonucu alınamamıştır. En yüksek dayanım değerlerine 7.5 M NaOH ile üretilen geopolimerlerde ulaşılmıştır.
Çelik [54]	Uçucu kül, bazalt ve mermer tozu	NaOH	Uçucu kül yerine ağırlıkça %25, %50 ve %75 oranlarında ayrı ayrı ikame edilen bazalt ve mermer tozlarının dayanım özelliklerine etkisi	%25 bazalt veya mermer içeriğinin uçucu kül esaslı geopolimerlerde kullanımı önerilmiştir. Bazalt ve mermer ikamesi uçucu kül esaslı geopolimerlerin basınç dayanımlarında olumlu etki etmemiştir.
Akturk ve arkadaşları [55]	Bazalt ve bazalt ile yüksek fırın cürufunun eşit oranda kullanımı	Na ₂ SiO ₃ veya NaOH	Aktivator türü, mineral malzeme içeriği ve kür sıcaklığının dayanım gelişimine etkisi	Sadece bazalt ile üretilen geopolimerlerde en yüksek 28 günlük dayanım 80 °C'de kür edilen Na ₂ SiO ₃ ile aktive edilen karışımlarda 2.52 MPa olarak elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufu karışımlarda ise yaklaşık 40 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır.
Çelikten ve Atabey [16]	Atık bazalt tozu	Na ₂ SiO ₃	Su içeriğinin ve ısıl kür süresinin dayanım gelişimine etkisi	Su içeriği azaldıkça ve ısıl kür süresi arttıkça geopolimerlerin dayanımı artmıştır. 0.31 su/atık bazalt tozu oranı ve 24 saat ısıl kür ile üretilen harçlarda 28.6 MPa 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiştir.

Tablo 2.4. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bazalt lif takviyeli geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar

Araştırmacılar	Kullanılan Mineral Malzeme	Alkali Aktivatör	Araştırma Konusu	Bulgular
Ziada ve çalışma arkadaşları [56]	Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu karışımı	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$	Hacimce %4, %8 ve %12 oranlarında kullanılan bazalt lifinin geopolimerlerin yüksek sıcaklık dayanıklılığına etkisi	Bazalt lifi, geopolimerlerin basınç dayanımlarını %12'ye, eğilme dayanımlarını da %34'e varan oranlarda geliştirmiştir. Bazalt lif ilavesi geopolimerlerde yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen dayanım kayıplarını belirgin bir şekilde azaltmıştır.
Shaikh ve Haque [57]	Uçucu kül	$\text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{KOH}$	Hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında ayrı ayrı kullanılan bazalt ve karbon fiberlerin geopolimerlerin 800 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklık dayanıklılığına etkisi	Ağırlıkça %1 bazalt ve ağırlıkça %1 karbon fiber içeren geopolimerin, diğer fiber içeriklerine göre daha iyi basınç dayanımı, daha düşük büzülme ve kütle kaybı sergilemiştir. Bazalt fiberli geopolimerlerde 600 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda fibersiz geopolimerlere göre daha fazla ağırlık kaybı görülmüştür. SEM analizlerinde yüksek sıcaklık etkisi sonrası bütünlüğünü koruyan bazalt ve karbon fiberler gözlenmiştir.
Ali ve çalışma arkadaşları [58]	Metakaolin ve kolemanit	NaOH	Ağırlıkça %30'a kadar metakaolin yerine ikame edilen kolemanitin ve hacimce %1 bazalt lif içeriğinin yüksek sıcak dayanıklılığına etkisi	%10 kolemanit içeriğinin normal ve yüksek sıcaklıklarda olumlu etkisi olmuştur. Bazalt fiber takviyeli geopolimerlerde daha az dayanım kaybı görülmüştür.

Tablo 2.5. Yüksek sıcaklık etkisine maruz polipropilen lif takviyeli geopolimerler hakkında yapılan çalışmalar

Araştırmacılar	Kullanılan Mineral Malzeme	Alkali Aktivatör	Araştırma Konusu	Bulgular
Aygörmez ve çalışma arkadaşları [59]	Metakaolin (kalsinasyon sıcaklığı belirtilmemiş)	Na_2SiO_3 + NaOH	Hacimce %0.8 oranında kullanılan polipropilen lif içeriğinin yüksek sıcaklık performansına etkisi	Yüksek sıcaklık etkisiyle geopolimerlerin eğilme dayanımlarındaki kayıplar basınç dayanımı kayıplarından daha fazla olmuştur. Polipropilen lif içeriği geopolimerlerin performansını az da olsa geliştirmiştir.
Irshidat ve çalışma arkadaşları [60]	Uçucu kül	Na_2SiO_3 + NaOH	Uçucu kül ağırlığının %0.05, %0.1, ve %0.2 oranlarında kullanılan polipropilen lif içeriğinin yüksek sıcaklık performansına etkisi	Polipropilen lif içeriği geopolimerlerin yüksek sıcaklık sonrasındaki basınç dayanım kayıplarını azaltırken, eğilme dayanımlarında olumlu etkisi olmamıştır.
Farhan ve çalışma arkadaşları [61]	Yüksek fırın cürufu	Na_2SiO_3 + NaOH	Hacimce %0.15 ve %0.30 oranlarında kullanılan polipropilen lif içeriğinin yüksek sıcaklık performansına etkisi	Polipropilen lif içeren geopolimerlerde lif içermeyenlere göre daha az hasar ve kabuk atma gözlenmiştir. Fiber içeren geopolimerlerdeki ağırlık kayıpları daha fazla olmuştur. 150 °C ve 300 °C etkisi sonrasında geopolimerlerde dayanım artışları gözlenmiştir. 800 °C etkisi sonrasında polipropilen lifler erimiş ve yerinde boşluk bırakmıştır (Şekil 2.4)



Şekil 2.4. Polipropilen lifin yerinde bıraktığı boşluğun gösterimi [61]

3. BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

Bu tezde atık bazalt tozu, bazalt kumu, şehir şebeke suyu, sıvı sodyum silikat, bazalt ve polipropilen fiberler kullanılarak geopolimer harç karışımları oluşturulmuştur. Karışımlarda atık bazalt tozu ağırlığının %10'u kadar Na₂O içerecek şekilde aktivatör (sıvı sodyum silikat) kullanılmıştır. Üretilen harçlar 100 °C'de 8 veya 24 saat olmak üzere 2 farklı ısıl kür etkisine tabi tutulmuştur. Harçlara hacimce 2 farklı oranda fiber takviye edilmiştir. Harç üretiminde kullanılan materyaller ve uygulanan metotlar aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

3.1. Materyal

3.1.1. Atık bazalt tozu

Bu çalışmada kullanılan atık bazalt tozu Kayseri ilinde bulunan Devtaş Madencilik Şirketi'nden bazalt taşı kesim atığı olarak temin edilmiştir. Bazalt atığı kullanılmadan önce etüvde 24 saat boyunca 105 °C'de kurutulmuştur. Bazalt taşı kesim atığının kimyasal kompozisyonu ve görünümü sırasıyla Tablo 3.1 ve Şekil 3.1'de sunulmuştur. Bazalt tozunun SiO₂ ve Al₂O₃ içerikleri toplamı %68.98 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca yaklaşık %5.93 oranında CaO içermektedir. Bu oksit miktarları atık bazalt tozunun geopolimer üretimi için bir potansiyel taşıdığını göstermektedir

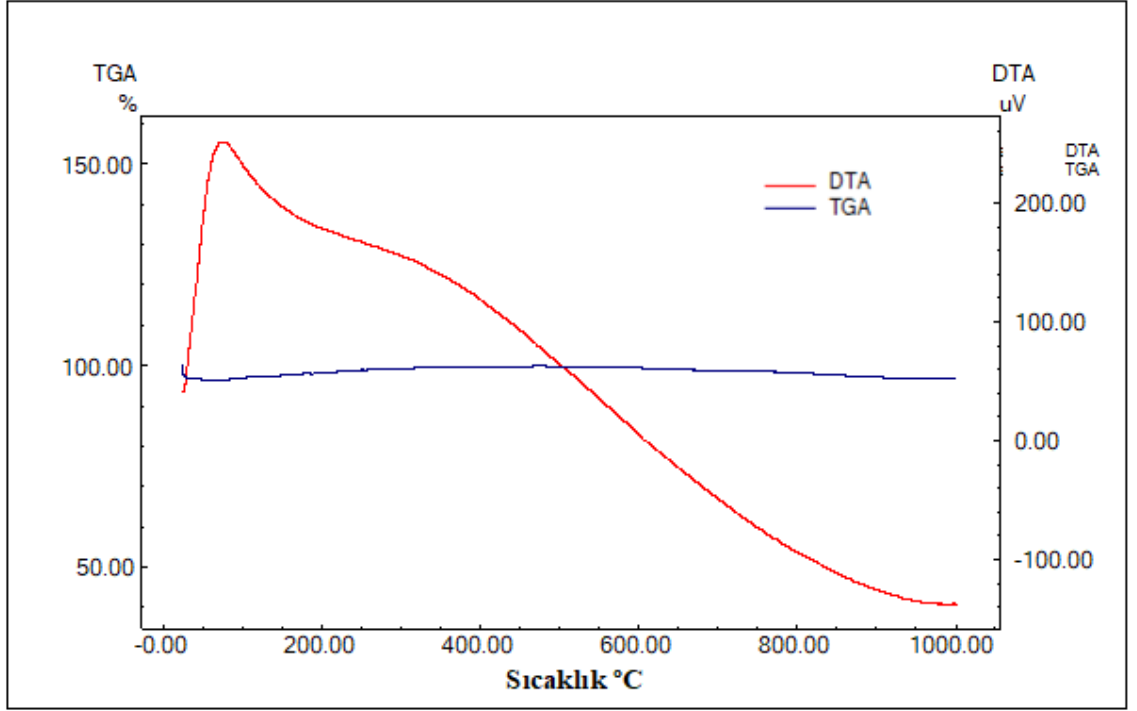
Tablo 3.1. Atık bazalt tozunun kimyasal içeriği

Oksit, %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
51.33	17.65	1.04	3.39	4.31	5.93	10.60	1.80



Şekil 3.1. Atık bazalt tozunun görünümü

Volkanik kayaçların kökenini bulmak amacıyla TAS (toplam alkali-silis) diyagramları kullanılmaktadır. Le Bas ve çalışma arkadaşları [62] tarafından önerilen TAS diyagramı kullanılarak temin edilen kayaç kesim atığı malzemenin bazalt kökenli magmadan oluştuğu belirlenmiş ve Şekil 3.2'deki TAS diyagramında işaretlenmiştir. Bazalt tozunun XRD ve TGA/DTA analizleri sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bazalt tozunda plajiyoklaz, albit, ilmenit ve olivin kristalleri tespit edilmiştir. Atık bazalt tozunun yüksek sıcaklık etkisinde 1000 °C'ye kadar önemli bir kütle kaybına uğramadığı TGA/DTA analizinde gözlenmiştir.



Şekil 3.4. Atık bazalt tozunun TGA/DTA analizi

3.1.2. Kum

Geopolimer harç karışımlarında 0-2 mm tane boyutu aralığında bazalt kumu kullanılmıştır. Bazalt kumunun su emme oranı ve doymuş kuru yüzey özgül ağırlığı sırasıyla %1.44 ve 2.7'dir. Kuma ait elek analizi sonuçları Tablo 3.2'de verilmiştir. Ayrıca kumun görünümü Şekil 3.5'de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Bazalt kumunun elek analizi

Kare göz açıklığı, mm	Elekte kalan yığılımlı, (%)
0.08	99.9
0.16	88.4
0.50	69.2
1.00	32.7
1.60	9.4
2.00	0



Şekil 3.5. Bazalt kumunun görünümü

3.1.3. Sodyum silikat

Çalışmada aktivatör olarak sıvı sodyum silikat kullanılmıştır. Sıvı sodyum silikatın ucuz olması ve kolay temin edilebilirliği önemli avantajıdır. Harç karışımlarında kullanılan sıvı sodyum silikat, Arkim Ltd. Şti.'den 50 kg'lık bidonlar halinde temin edilmiştir. Kullanılan sıvı sodyum silikatın yaklaşık %61'i sudur.

3.1.4. Su

Harç karışımlarında, Üniversite şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. TS EN 1008 [63] standardında karışım suyu olarak içilebilen suların harç karışımlarında kullanımının uygun olduğu belirtilmektedir.

3.1.5. Bazalt ve polipropilen fiber

Harç karışımlarında hacimce %0.5 ve %1.0 oranlarında ayrı ayrı bazalt ve polipropilen fiberler kullanılmıştır. Fiberlerin görünüşleri Şekil 3.6'da sunulmuştur. Fiberlerin boyu 12 mm'dir. Polipropilen fiberin özgül ağırlığı 0.91 gr/cm^3 , erime noktası yaklaşık 160 °C, yanma noktası yaklaşık 600 °C ve çekme dayanımı 450 MPa ile 700 MPa

arasındadır. Bazalt fiberin özgül ağırlığı 2.73 gr/cm^3 , erime noktası yaklaşık $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ ve çekme dayanımı 2800 MPa ile 3300 MPa arasındadır.



Şekil 3.6. Bazalt ve polipropilen fiber

3.2. Metot

Bu deneysel çalışmada atık bazalt tozu 2 farklı ısıl kür süresinde sodyum silikat ile aktive edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Fiber takviyesiz harçlarla birlikte, hacimce ayrı ayrı %0.5 ve %1.0 oranlarında bazalt ve polipropilen fiber takviyeli harç karışımları oluşturulmuştur. Harç karışımlarına 3 gözlü $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ prizma kalıplar için kullanılan malzeme miktarları Tablo 3.3'te verilmiştir. Harç karışımlarında sodyum silikat atık bazalt tozu ağırlığının %10'u kadar Na_2O içerecek şekilde kullanılmıştır. Karışımlarda kum/atık bazalt tozu ve su/atık bazalt tozu oranları sırasıyla 0.35 ve 2.5 olarak belirlenmiştir. Harç karışımlarına karılacak su ve sodyum silikat karışıma dökülmeden önce karıştırılmıştır. Karışım hazırlığına öncelikle hobart mikserine atık bazalt tozu ile sodyum silikat-su karışımı dökülmüş ve 30 saniye karıştırılmıştır. İlk karıştırma işleminin ardından bazalt kumu yavaşça 30 saniye içerisinde karışıma eklenmiştir. Daha sonra da 3 dakika daha hobart mikserinde karıştırılarak karışım hazırlanmıştır. Daha sonra karışımlar 3 gözlü $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ prizma kalıplara 3 tabaka halinde dökülmüş ve vibrasyon masası ile 30 saniye sıkıştırılmıştır. Kalıplarına yerleştirilen karışımlar daha sonra $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 8 veya 24 saat olmak üzere toplamda 2 farklı ısıl kür etkisine tabi tutulmuştur. Isıl kür sürelerinin tamamlanmasının ardından elde edilen harç numuneleri kalıplarından çıkarılmış ve deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Kalıplarından çıkarılan geopolimer görünüşleri Şekil 3.7'de

sunulmuştur. Fiber takviyesiz harçlar ısıtılma süresi (8 veya 24 saat) ve fiber içermedikleri için 0 ile isimlendirilmişlerdir. Fiber takviyeli harçlarda ise sırasıyla ısıtılma süresi, fiber türünün baş harfi ve hacimce fiber içeriğini ifade edecek şekilde kodlama yapılmıştır. Örneğin, 24-B0.5 kodu 100 °C’de 24 saat ısıtılma tabii tutulmuş ve hacimce %0.5 bazalt fiber içeren harç karışımını ifade etmektedir.

Harçlar üzerinde ısıtılma kütünden 7, 28 ve 56 gün sonra TS EN 196-1 [64] standardına uygun şekilde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. 56 günlük geopolimer harçlardan elde edilen 27’şer adet numune 600 °C, 800 °C ve 1000 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklığa ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Bu üç farklı sıcaklığa ayrı ayrı 1 saat boyunca maruz bırakılan numuneler yüksek sıcaklık fırını kapatılıp fırın içerisinde fırın içi sıcaklık yaklaşık 50 °C’ye düşünceye kadar yavaşça soğutulmuştur. Yüksek sıcaklık deneyinden 24 saat sonra soğuyan numuneler üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri ile yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış olan numunelerin değerleri kıyaslanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyi öncesi ve sonrasında numunelerin ağırlıkları alınmış ve yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklığın geopolimer harçların mikro yapılarında meydana getirdiği değişiklikler SEM/EDX analizleri ile incelenmiştir.



Şekil 3.7. Kalıplarından çıkarılan harç numunelerinin görünümü

Tablo 3.3.Harç karışım oranları, gr.

Seri Kodu	Karışım Kodu	Atık Bazalt Tozu	Kum	Sıvı Sodyum Silikat	Su	Bazalt Fiber	Polipropilen Fiber
8S	8-0	500	1250	253	21	0	0
	8-B0.5	500	1250	253	21	10.5	0
	8-B1.0	500	1250	253	21	21.0	0
	8-P0.5	500	1250	253	21	0	3.5
	8-P1.0	500	1250	253	21	0	7.0
24S	24-0	500	1250	253	21	0	0
	24-B0.5	500	1250	253	21	10.5	0
	24-B1.0	500	1250	253	21	21.0	0
	24-P0.5	500	1250	253	21	0	3.5
	24-P1.0	500	1250	253	21	0	7.0

3.2.1. Eğilme dayanımı deneyi

Geopolimer harçların eğilme altındaki çekme dayanımını belirlemek için TS EN 196-1 [64] standardına uygun olarak eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri Şekil 3.8’de görüldüğü gibi mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde tek noktadan yükleme suretiyle yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri 7, 28 ve 56 günlük geopolimer harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 56 günlük numuneler üzerinde yüksek sıcaklık (600 °C, 800 °C ve 1000 °C) etkisinden sonra eğilme deneyi yapılmış olup yüksek sıcaklık etkisindeki dayanım değişimi irdelenmiştir. Eğilmede çekme dayanımı (Ed) değeri Bağıntı 3.1. kullanılarak N/mm² cinsinden elde edilmiştir. Bir kalıptan çıkan 3 numuneye eğilme deneyi uygulanmıştır. Ortaya çıkan değerlerin aritmetik ortalaması eğilme dayanımı olarak alınmıştır.

$$Ed = 1,5 \times (F_r \times L) / b^3 \quad (\text{Bağıntı 3.1.})$$

Burada;

Ed: Eğilme dayanımı, N/mm²

b: Prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm

F_r: Prizma şekilli numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük, N

L: Mesnet silindirleri arasındaki mesafe, mm



Şekil 3.8. Eğilme dayanımı deneyinin yapılışı

3.2.2. Basınç dayanımı deneyi

Eğilme deneyi uygulanıp ortadan ikiye bölünmüş numunelerin düzgün kalıp yüzeylerine TS EN 196-1 [64] standardında belirtilen şekilde Şekil 3.9’da görüldüğü gibi basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı deneyi sonrası ortadan ikiye bölünmüş numuneler 40×40 mm cihaz başlığı arasına yerleştirilerek (2400 ± 200) N/s hızında yük uygulanarak kırılmıştır. Kırılma anındaki yük değeri yükün uygulandığı alana bölünerek basınç dayanım değeri Bağıntı 3.2 ile elde edilmiştir.

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

$$B_d = F/b^2$$

(Bağıntı 3.2.)

Burada;

B_d: Basınç dayanımı, N/mm²

b: Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F: Kırılmadaki en büyük yük, N



Şekil 3.9. Basınç dayanımı deneyinin yapılışı

3.2.3. Yüksek sıcaklık deneyi

56 günlük geopolimer harç numuneleri üzerinde yüksek sıcaklık deneyi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyleri 5 °C/dk ısınma ısısına sahip Şekil 3.10'da görülen kül fırınında gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımdan alınan üç adet harç numunesi yüksek sıcaklık fırını içine konulmuştur. Numuneler hedef sıcaklıklar olan 600 °C, 800 °C ve 1000 °C'ye bir saat boyunca ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Bir saat sonunda yüksek sıcaklık fırını kapatılarak numuneler yavaşça soğumaya bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası harçların görünümü Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Harç numunelerine eğilme ve basınç dayanım deneyleri uygulanarak referans numunelerle (yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan numuneler) aralarındaki farklar karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.10. Kül fırını



Şekil 3.11. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası harçların görünümü

3.2.4. SEM/EDX analizleri

8-0 kodlu geopolimer harçlar 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.

3.2.5. XRD analizleri

Yüksek sıcaklıklara maruz kalmayan (25 °C) ve 800 °C ile 1000 °C'ye ayrı ayrı maruz bırakıldıktan sonra yavaşça soğutulan 8-0 kodlu geopolimer harçlar üzerinde XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

4. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

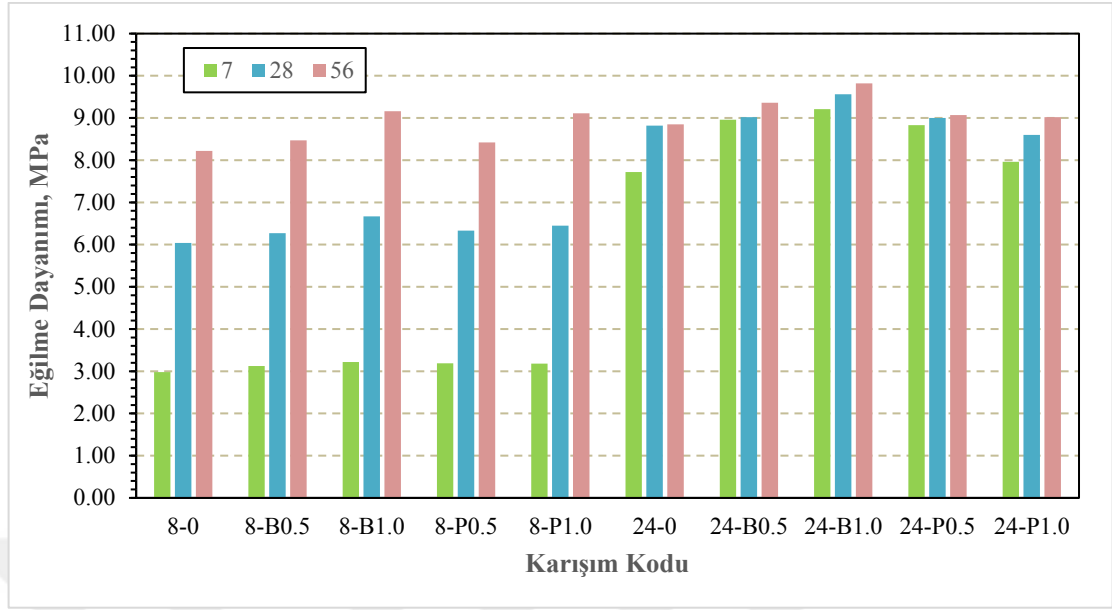
Bu tez çalışmasında 2 farklı seride toplamda 10 farklı geopolimer harç üretilmiştir. Üretilen harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları Tablo 4.1 ve Şekil 4.1’de sunulmuştur. 8S serisi harçların 7 günlük eğilme dayanımları 2.98 MPa ile 3.22 MPa arasında değişirken, 24S serisi harçlarda 7.72 MPa ile 9.21 MPa arasında 7 günlük eğilme dayanımları elde edilmiştir. Harçların 7 günlük eğilme dayanımlarında ısı kuru süresi artışı ile belirgin bir artış gözlenmiştir. 8S serisi harçların 28 günlük eğilme dayanımları 7 günlük eğilme dayanımlarına göre %98 ile %107 oranlarında daha yüksek elde edilmiştir. Benzer şekilde, bu serideki harçların 56 günlük eğilme dayanımları da 28 günlük dayanımlara göre %33 ile %41 arasında daha yüksektir. Diğer taraftan, 24S serisi harçların artan kuru yaşı ile eğilme dayanımlarındaki artış 8S serisindeki harçlara göre daha az olmuştur. Bu harçların eğilme dayanımları 7 günden 28 güne %1 ile %14 arasında, 28 günden 56 güne de %1 ile %5 arasında artış göstermiştir. Bu sonuçlar 24S serisi harçların nihai dayanımlarının %85 ve üzeri oranındaki dayanımı 7 günde kazandığını göstermektedir. Bu serideki harçlar, erken yaşta yüksek mukavemetleri sebebiyle prefabrik sektörü gibi erken yaşta kalıp sökümü ve seri üretim istenen sektörler için tercih sebebi olabilir. 8S serisi harçlarda ise fiber takviyesiz üretilen 8-0 kodlu harçlarda dahi 8 MPa üzerinde 56 günlük eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bu sonuçlar 8S serisi harçların elde edilen nihai dayanım/harcanan enerji açısından 24S serisi harçlara göre daha verimli olduğunu göstermektedir.

Geopolimer harçların eğilme dayanımları fiber içeriği ile genellikle artmıştır. %0.5 bazalt lifi içeriği 8S serisi harçların eğilme dayanımların %3 ile %5 arasında, 24S serisi harçların eğilme dayanımlarını da %2 ile %16 arasında artırmıştır. Bazalt lif içeriği %0.5’ten %1’e çıkarıldığında da harçların eğilme dayanımları daha da artmıştır. 8-B1.0 kodlu harçların eğilme dayanımları 8-0 kodlu harçlara göre %8 ile %12 arasında, 24-

B1.0 kodlu harçların da 24-0 kodlu harçlara göre %8 ile %20 arasında daha yüksek elde edilmiştir. %0.5 polipropilen lif içeriği 8S serisi harçların eğilme dayanımlarını %2 ile %7 arasında, 24S serisi harçların da %2 ile %15 arasında artırmıştır. Bununla birlikte, %1 polipropilen lif içeren harçların eğilme dayanımları %0.5 polipropilen lif içeren harçlara göre genellikle daha düşük elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak yüksek oranda polipropilen lif içeriğinin harçlarda üretim zorluğuna ve süreksizliğe yol açması gösterilebilir. Harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımı değerleri birlikte değerlendirildiğinde, üretilen harçlar içerisinde %1 bazalt ve %0.5 polipropilen lifi içeriğinin en uygun oranlardaki lif içerikleri olduğu söylenebilir. Her iki seride de en yüksek eğilme dayanımları hacimce %1 bazalt lifi içeren harçlarda görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı değerleri 24-B1.0 kodlu harçlarda elde edilmiştir.

Tablo 4.1. Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları

Seri Kodu	Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı, MPa		
		7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük
8S	8-0	2.98	6.04	8.22
	8-B0.5	3.13	6.27	8.47
	8-B1.0	3.22	6.67	9.16
	8-P0.5	3.19	6.33	8.42
	8-P1.0	3.18	6.45	9.11
24S	24-0	7.72	8.82	8.85
	24-B0.5	8.96	9.02	9.36
	24-B1.0	9.21	9.56	9.82
	24-P0.5	8.83	9.00	9.07
	24-P1.0	7.96	8.60	9.02

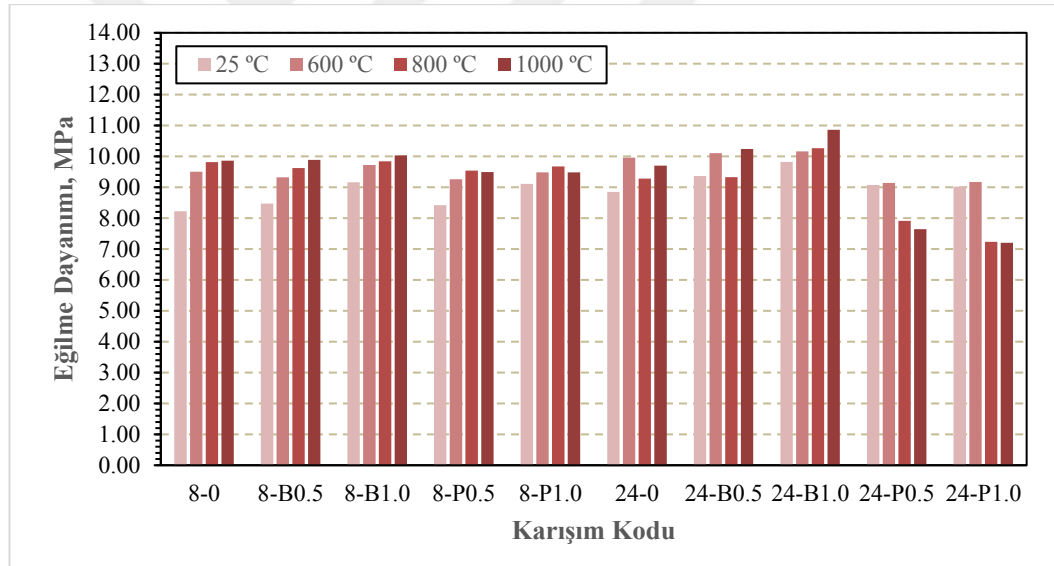


Şekil 4.1. Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları

Atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların 600 °C, 800 °C ve 1000 °C etkisi sonrası eğilme dayanımları Tablo 4.2 ve Şekil 4.2’de sunulmuştur. 600 °C etkisi sonrasında 8S serisi harçların eğilme dayanımları %4 ile %16 arasında artarken, 24S serisi harçların eğilme dayanımları %1 ile %13 arasında artmıştır. Fiber takviyesiz üretilen 8-0 ve 24-0 kodlu harçların eğilme dayanımlarındaki artış oranları fiber takviyeli üretilen harçlara göre daha fazladır. 600 °C etkisi sonrasında en düşük eğilme dayanımları polipropilen fiber ile üretilen harçlarda gözlenmiştir. 800 °C etkisi sonrasında ise 8S serisi harçların eğilme dayanımları deney öncesine göre %6 ile %19 arasında artış göstermiştir. 24S serisi harçlarda ise sadece polipropilen lif ile üretilen harçlarda deney öncesine göre daha düşük eğilme dayanımları elde edilmiştir. 1000 °C etkisi sonrasında 8S serisi harçların eğilme dayanımları deney öncesine göre %4 ile %20 arasında daha yüksek elde edilmiştir. 24S serisi harçlarda ise 24-0, 24-B0.5 ve 24-B1.0 kodlu harçlarda deney öncesine göre sırasıyla %10, %9 ve %11 oranlarında daha yüksek eğilme dayanımı elde edilirken, polipropilen lifle üretilen 24-P0.5 ve 24-P1.0 kodlu harçlarda deney öncesine göre sırasıyla %16 ve %20 eğilme dayanımı kaybı meydana gelmiştir. 1000 °C etkisi sonrasında en yüksek eğilme dayanımı değerleri her iki seride de %1 bazalt lifi içeriği ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. 8-B1.0 ve 24-B1.0 kodlu harçların 1000 °C etkisi sonrasındaki eğilme dayanım değerleri sırasıyla 10.03 MPa ve 10.86 MPa olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.2. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları

Seri Kodu	Karışım Kodu	Eğilme Dayanımı, MPa			
		25 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
8S	8-0	8.22	9.50	9.81	9.86
	8-B0.5	8.47	9.32	9.62	9.89
	8-B1.0	9.16	9.72	9.84	10.03
	8-P0.5	8.42	9.26	9.54	9.49
	8-P1.0	9.11	9.48	9.67	9.48
24S	24-0	8.85	9.96	9.28	9.70
	24-B0.5	9.36	10.10	9.33	10.24
	24-B1.0	9.82	10.16	10.27	10.86
	24-P0.5	9.07	9.14	7.91	7.64
	24-P1.0	9.02	9.17	7.23	7.20



Şekil 4.2. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası eğilme dayanımları

4.2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

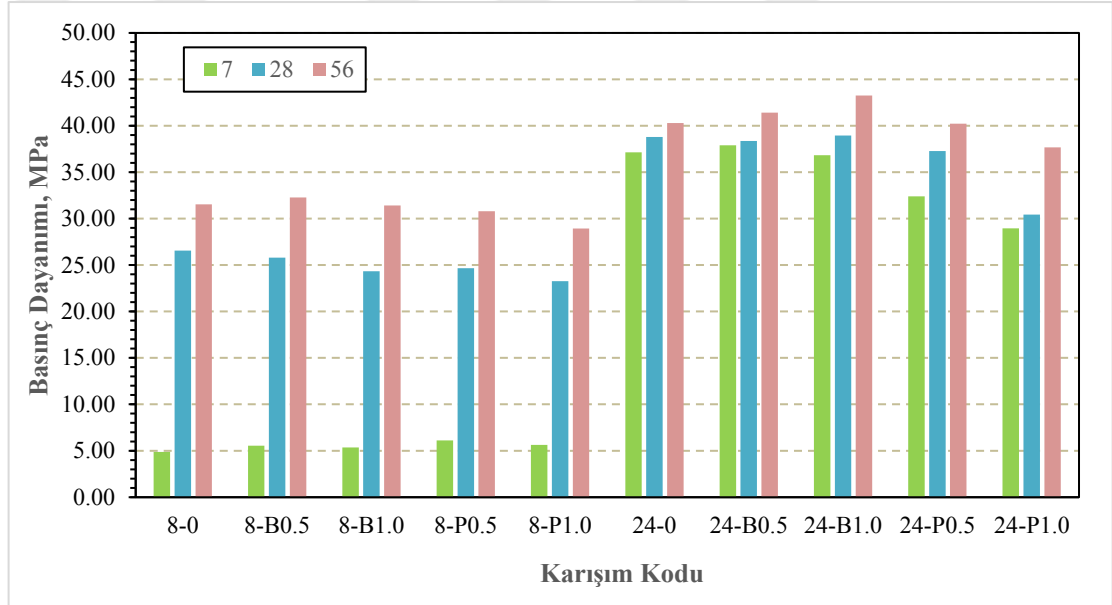
Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları Tablo 4.3 ve Şekil 4.3'de sunulmuştur. 8S serisi harçların 7 günlük basınç dayanımları 4.88 MPa ile 6.12 MPa arasında elde edilirken, 24S serisi harçların dayanımları 28.95 MPa ile 37.90 MPa arasında elde edilmiştir. Isıl kür süresinin 8 saatten 24 saate çıkmasıyla harçların erken yaştaki basınç dayanımı belirgin bir şekilde artmıştır. Bununla birlikte, 8S serisi harçların basınç dayanımları 7 günden 28 güne %303 ile %445 arasında oldukça yüksek

oranlarda artarken, 24S serisi harçların basınç dayanımlarında %1 ile %15 arasında artışlar kaydedilmiştir. Benzer şekilde, 8S serisi harçların basınç dayanımları 28 günden 56 güne %19 ile %29 arasında, 24S serisi harçların dayanımları ise %4 ile %24 arasında artmıştır. 24S serisi harçların erken yaş dayanımları yüksek iken, 8S serisi harçların artan kür yaşı ile birlikte dayanım gelişimleri daha iyi olmuştur. Bunun sebebi olarak ıslak kür süresinin artması ile birlikte 24S serisi harçlardaki serbest suyun daha çok buharlaşması gösterilebilir. Suyun bünyeyi tamamen terk etmesi veya kimyasal reaksiyon ile geopolimer jel oluşumuna katılması ile harç matrisinde serbest su miktarı yok denecek kadar az mertebeye inmiştir. Bu durum da, 24S serisi harçlarda iyonların atık bazalt tozundan çözünmesini ve sulu ortamda bileşik oluşturmasını zorlaştırmıştır.

Fiber içeriği geopolimer harçların basınç dayanımlarında farklı etkiler meydana getirmiştir. 8-0 serisi harçların 7 günlük basınç dayanımı 4.88 MPa gibi düşük sayılabilecek bir değer olduğu için fiber takviyesi harçların basınç dayanımları üzerinde olumlu etki meydana getirmiştir. Ancak, fiber içeriğinin %0.5 ten %1.0 oranına çıkarılmasıyla harçların basınç dayanımlarında düşüş eğilimi gözlenmiştir. 8S serisi harçlarda en yüksek 7 günlük basınç dayanımı 8-P0.5 kodlu harçlarda gözlenmiştir. Bu seride artan kür yaşı ile birlikte harçların basınç dayanımları da artmış, en çok artış 8-0 kodlu harçlarda görülmüştür. Bu sonuçlar fiber içeriğinin geopolimer harçların matrislerinde süreksizlik meydana getirmesiyle zamanla yeni geopolimer jel oluşumunu az da olsa kısıtladığını göstermektedir. Bu seride benzer şekilde 56 günlük basınç dayanımlarında %1.0 fiber içeren harçlarda daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir. Bununla birlikte fiber içeriğinin 8S serisi harçların 28 ve 56 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkisi sırasıyla %12 ve %8 oranlarıyla sınırlı kalmıştır. 24S serisinde ise fiber takviyeli harçlar arasında sadece 24-B0.5 kodlu harçların 7 günlük basınç dayanımı fiber takviyesiz üretilen 24-0 kodlu harçlardan yüksek elde edilebilmiştir. Polipropilen lifli harçlarla %0.5 polipropilen lif içeren 24-P0.5 kodlu harçların 28 günlük basınç dayanımları 24-0 kodlu harçların dayanımlarının ± 1.5 MPa aralığında iken, 24-P1.0 kodlu harçların basınç dayanımı 24-0 kodlu harçlara göre %21.5 oranında daha düşük elde edilmiştir. 24S serisi harçların 56 günlük dayanımlarında da fiber içeriğinin etkisi 28 günlük dayanımlarındaki etki ile benzer olmuştur. %1 polipropilen lif içeriği harçların matrislerinde süreksizlik meydana getirdiğinden 56 günlük basınç dayanımı 24-P1.0 kodlu harçlarda 24-0 harçlara göre %6.5 oranında daha düşük elde edilebilmiştir.

Tablo 4.3. Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları

Seri Kodu	Karışım Kodu	Basınç Dayanımı, MPa		
		7 Günlük	28 Günlük	56 Günlük
8S	8-0	4.88	26.56	31.53
	8-B0.5	5.55	25.80	32.28
	8-B1.0	5.35	24.33	31.42
	8-P0.5	6.12	24.66	30.80
	8-P1.0	5.63	23.26	28.93
24S	24-0	37.14	38.78	40.28
	24-B0.5	37.90	38.35	41.40
	24-B1.0	36.83	38.95	43.25
	24-P0.5	32.40	37.28	40.22
	24-P1.0	28.95	30.43	37.66



Şekil 4.3. Geopolimer harçların 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları

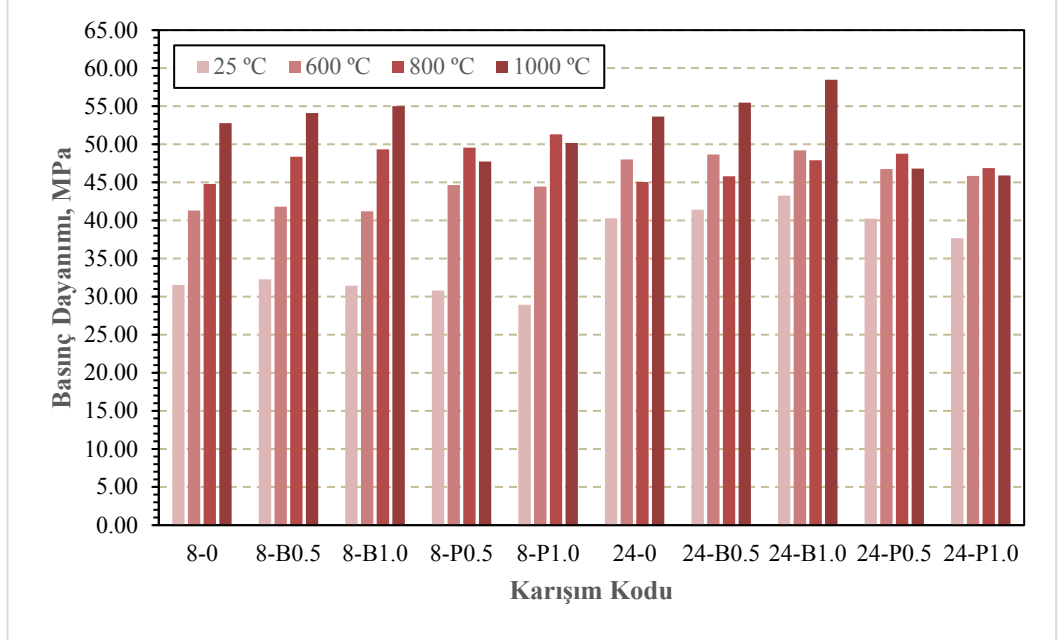
Atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların 600 °C, 800 °C ve 1000 °C etkisi sonrası basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler Tablo 4.4 ve Şekil 4.4'de sunulmuştur. 600 °C etkisi sonrasında 8S serisi harçların basınç dayanımları yüksek sıcaklık etkisi öncesindeki (25 °C'deki) dayanımlarına göre %30 ile %54 arasında artarken, 24S serisi harçların dayanımlarında %14 ile %22 arasında artış gözlenmiştir. Geopolimer bağlayıcılarda yüksek sıcaklık etkisiyle görülen dayanım artışlarının bir nedeni olarak yüksek sıcaklık ile ısıtılma etkisi meydana gelmesi ve henüz reaksiyona girmemiş atık bazalt tozu parçacıklarının geopolimer jel üretimine katılması

gösterilebilir. Bununla birlikte, 8S serisinde daha fazla dayanım artışı görülmesinin sebebi de bu serideki harçların üretimi sırasında daha az ısıl kür uygulanmasına bağlanabilir. Bu sıcaklıkta her iki seride de en fazla dayanım artışı polipropilen lif ile üretilen harçlarda gözlenmiştir. 600 °C etkisi sonrasında 8S serisi harçlarda en yüksek basınç dayanımı 8-P0.5 kodlu harçlarda görülürken, 24S serisi harçlarda 24-B1.0 kodlu harçlarda gözlenmiştir. Bununla birlikte, 600 °C etkisi sonrasında 8S serisi harçların basınç dayanımları 43 ± 2 MPa iken, 24S serisi harçların dayanımları 47 ± 2 MPa olarak elde edilmiştir. 800 °C etkisi sonrasında 8S serisi harçların basınç dayanımları deney öncesine göre %42 ile %77 arasında, 600 °C’deki dayanımlarına göre de %8.5 ile %20 arasında daha yüksek elde edilmiştir. Bu serideki fiber takviyeli harçlarda görülen dayanım harçları 8-0 kodlu harçlara göre daha fazla olmuştur. 800 °C etkisi sonrasında 24S serisi harçların basınç dayanımları deney öncesine göre %10 ile %24 arasında yüksek elde edilmiştir. Ancak, bu serideki harçların 800 °C ve 600 °C’deki basınç dayanımları kıyaslandığında, 24-0 ve 24-B0.5 kodlu harçlarda sırasıyla %6.2 ve %5.9 azalma görülmüştür. Benzer şekilde, 24-B1.0 kodlu harçların 800 °C etkisi sonrasındaki basınç dayanımı 600 °C’deki basınç dayanım değerine göre %2.7 daha düşük elde edilmiştir. Bu sonuçlar bazalt fiber içeriğinin 24S serisi harçlarda 800 °C etkisi sonrasında 600 °C’deki basınç dayanımlarına göre meydana gelen dayanım düşüşünü azaltmada etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 24-P0.5 ve 24-P1.0 kodlu geopolimer harçların 800 °C etkisi sonrasındaki basınç dayanımları 600 °C’deki basınç dayanımlarına göre sırasıyla %4.3 ve %2.2 daha yüksek elde edilmiştir. 800 °C etkisi sonrasında 8S serisinde en yüksek basınç dayanımı 8-P1.0 kodlu harçlarda, 24S serisinde ise 24-P0.5 kodlu harçlarda elde edilmiştir. 1000 °C etkisi sonrasında 8S serisi harçların basınç dayanımları deney öncesine göre %55 ile %75 arasında daha yüksek elde edilmiştir. 24S serisi harçların 1000 °C etkisi sonrasındaki basınç dayanım değerlerinin deney öncesine göre %16 ile %35 arasında daha yüksek olduğu görülmüştür. 1000 °C etkisi sonrasında en yüksek basınç dayanımı değerleri her iki seride de %1 bazalt lifi içeriği ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. 8-B1.0 ve 24-B1.0 kodlu harçların 1000 °C etkisi sonrasındaki basınç dayanım değerleri sırasıyla 55.0 MPa ve 58.47 MPa olarak elde edilmiştir. Her iki seride de en düşük basınç dayanımları polipropilen lif ile üretilen harçlarda görülmüştür. Lifsiz ve bazalt lifi ile üretilen harçların 1000 °C etkisi sonrasındaki basınç dayanım değerleri 800 °C’deki basınç

dayanımlarına göre %11 ile %22 arasında daha yüksek iken, polipropilen lifle üretilen harçların dayanımları %2 ile %4 arasında daha düşük elde edilmiştir.

Tablo 4.4. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları

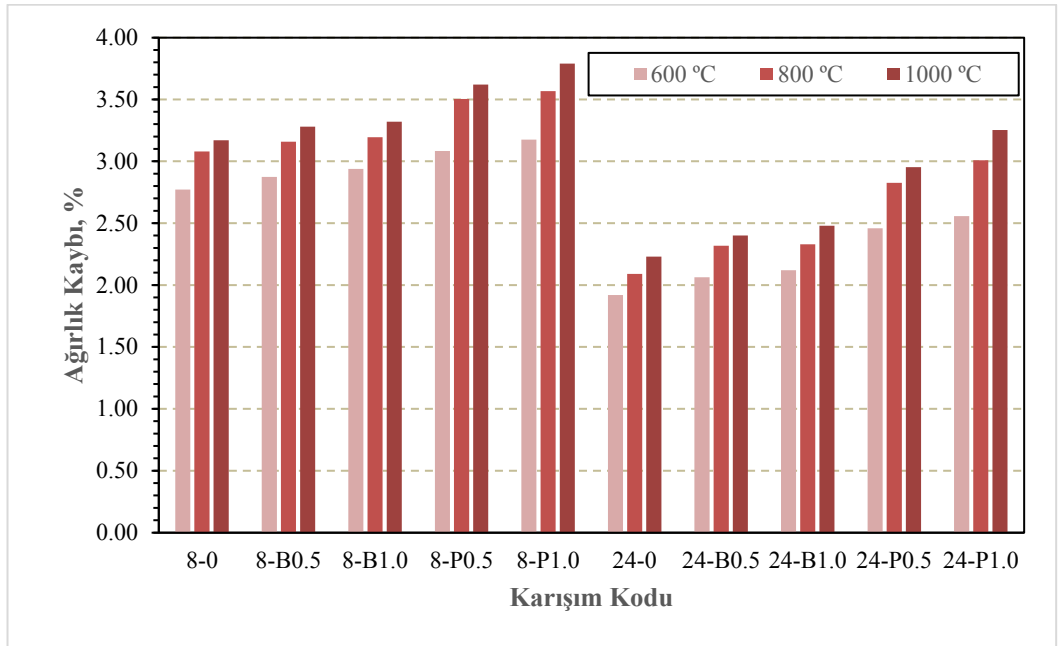
Seri Kodu	Karışım Kodu	Basınç Dayanımı, MPa			
		25 °C	600 °C	800 °C	1000 °C
8S	8-0	31.53	41.30	44.80	52.77
	8-B0.5	32.28	41.80	48.37	54.10
	8-B1.0	31.42	41.20	49.33	55.00
	8-P0.5	30.80	44.65	49.57	47.73
	8-P1.0	28.93	44.45	51.30	50.17
24S	24-0	40.28	48.00	45.03	53.63
	24-B0.5	41.40	48.65	45.80	55.47
	24-B1.0	43.25	49.21	47.90	58.47
	24-P0.5	40.22	46.75	48.77	46.80
	24-P1.0	37.66	45.85	46.87	45.90



Şekil 4.4. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımları

4.3. Yüksek Sıcaklık Etkisiyle Oluşan Ağırlık Kayıpları

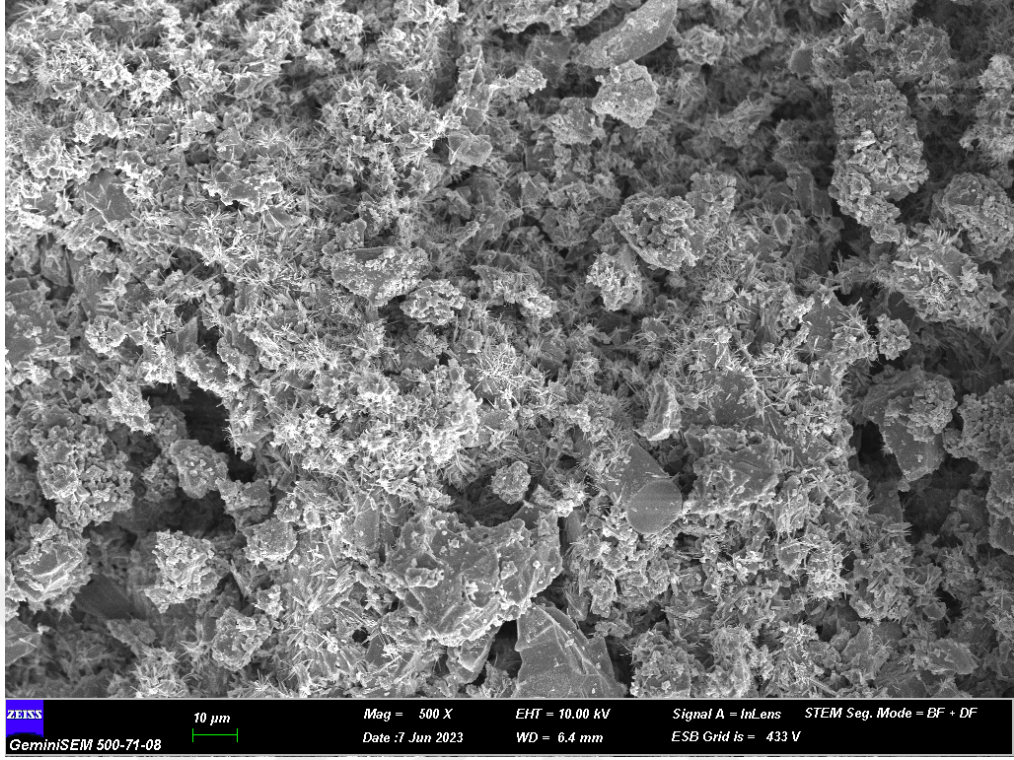
Atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçlarda 600 °C, 800 °C ve 1000 °C etkisi sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları Şekil 4.5’de sunulmuştur. 600 °C etkisi sonrasında 8S serisi harçların ağırlık kayıpları %2.77 ile %3.17 arasında değişirken, 24S serisi harçlarda %1.92 ile %2.56 arasında elde edilmiştir. 24S serisinde daha düşük ağırlık kaybı görülmesinin nedeni olarak bu serideki harçların daha uzun süre ısı kütlesiyle bünyelerindeki bağlı suyu üretim aşamasında 8S serisine göre daha fazla kaybetmesi gösterilebilir. Bununla birlikte, sıcaklık artışı ile birlikte harçlarda meydana gelen ağırlık kayıpları da beklendiği şekilde kademeli olarak artmıştır. Ancak bu artış her iki seride de 600 °C’den 800 °C’ye %0.5 ile, 800 °C’den 1000 °C’ye de %0.2 ile sınırlı kalmıştır. Bu sonuçlar harçlardaki özellikle fiziksel bağlı suyun 600 °C etkisi sonrasında buharlaştığını göstermektedir. Ayrıca, geopolimer harçlarda en yüksek ağırlık kayıpları polipropilen lifli harçlarda gözlenmiştir. Lifsiz üretilen harçlarda meydana gelen ağırlık kaybı ile bazalt lifli harçlardaki ağırlık kayıpları arasındaki fark 8S ve 24S serilerinde sırasıyla %6 ve %11 ile sınırlı kalırken, polipropilen lifli harçlar ile lifsiz üretilen harçlardaki ağırlık kaybı farkı 8S ve 24S serilerinde sırasıyla %19 ve %46 seviyelerinde olmuştur.



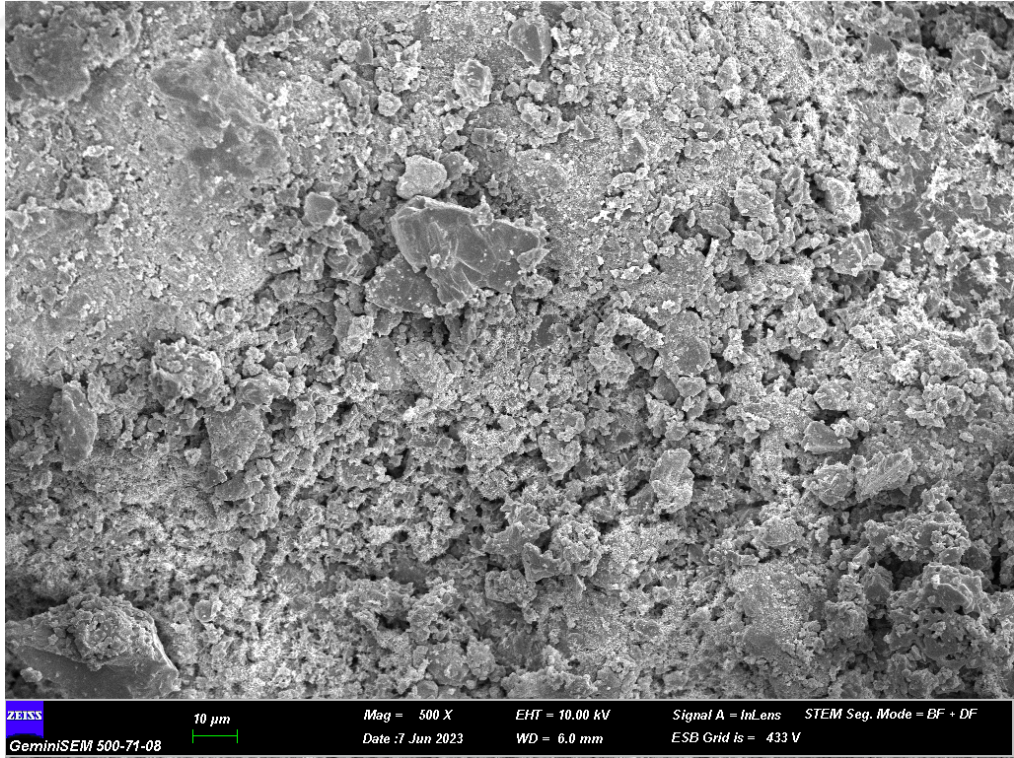
Şekil 4.5. Geopolimer harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası ağırlık kayıpları

4.4. SEM/EDX Analiz Sonuçları

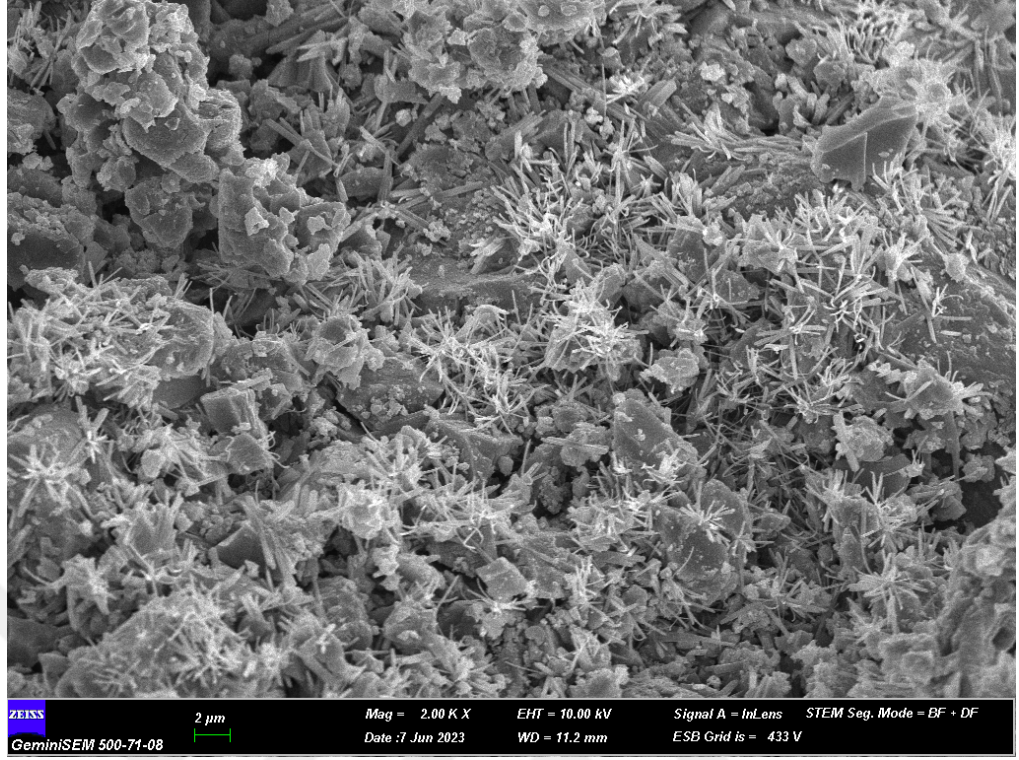
Yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrasında 8-0 kodlu harçlar üzerinde gerçekleştirilen SEM analizlerinden elde edilen görüntüler Şekil 4.6 ile Şekil 4.29 arasında sunulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi öncesinde (25 °C) harçların nispeten boşluklu ve heterojen yapısı dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, XRD analizlerinde tespit edilen albit, anortit, nefelin ve plajiyoklaz kristalleri belirgin bir şekilde SEM analizlerinde de görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisiyle harçlardaki kristaller iç içe geçip bölgesel yoğunluğa sahip yapılar oluşmasına neden olmuştur. Bu durum hem harçlarda yüksek sıcaklık etkisiyle görülen dayanım artışını hem de XRD analizlerinde bazı kristal yapıların yoğunluklarının düşmesi durumunu açıklayabilir. EDX analizleri Şekil 4.30, Şekil 4.32 ve Şekil 4.34 üzerinde gösterilen bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Şekil 4.31, Şekil 4.33 ve Şekil 4.35’de sunulmuştur. Harç matrislerinde bulunan elementlerin ağırlıkça ve atomik olarak oranları Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’de sunulmuştur. Harçların matrislerinden elde edilen EDX analizlerinde kullanılan hammaddelerden gelen Ca, Na, Al, O, K ve Si elementleri tespit edilmiştir. Geopolimer bağlayıcıların bağ yapılarını ve dayanımlarını belirleyen parametrelerden biri de harçların matrislerindeki jel yapılarının sahip oldukları element oranlarıdır. Al/Si içeriğinin oranı, geopolimer matrisindeki büzülme veya çatlama gibi termal davranışlar üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Daha önce yapılan bir çalışmada, geopolimer kompozitlerde Al(OH)₃ içeriği arttıkça dayanım değerlerinin de arttığı rapor edilmiştir. Bunun nedeni, daha yüksek Al/Si oranının oluşması ve bunun da daha çapraz bağlı bir alüminosilikat yapısının oluşmasına yol açmasıdır [65]. Bu tezde de 8-0 kodlu harçların yüksek sıcaklık etkisi öncesinde (25 °C) Al/Si oranı yaklaşık 0.15 olarak belirlenmiştir. Bu değer yüksek sıcaklık etkisiyle yükselmiş ve 0.2 ile 0.3 arasında elde edilmiştir. Harçlarda yüksek sıcaklıkla beraber görülen dayanım artışları EDX analizlerinden elde edilen sonuçlar ve önceki yapılan çalışmalarla Al/Si oranının artmasına bağlanabilir. Bununla birlikte, 8-0 kodlu harç matrislerinin Na/Al oranı ağırlıkça 1.62 iken 800 °C etkisi sonrasında 0.78’e, 1000 °C etkisi sonrasında da 0.42 değerine düşmüştür. Yüksek sıcaklık etkisiyle geopolimerlerde dayanım artışının görüldüğü başka bir çalışmada da yüksek sıcaklık etkisiyle harç matrislerinde Na/Al oranında düşüşler kaydedilmiştir [66,67].



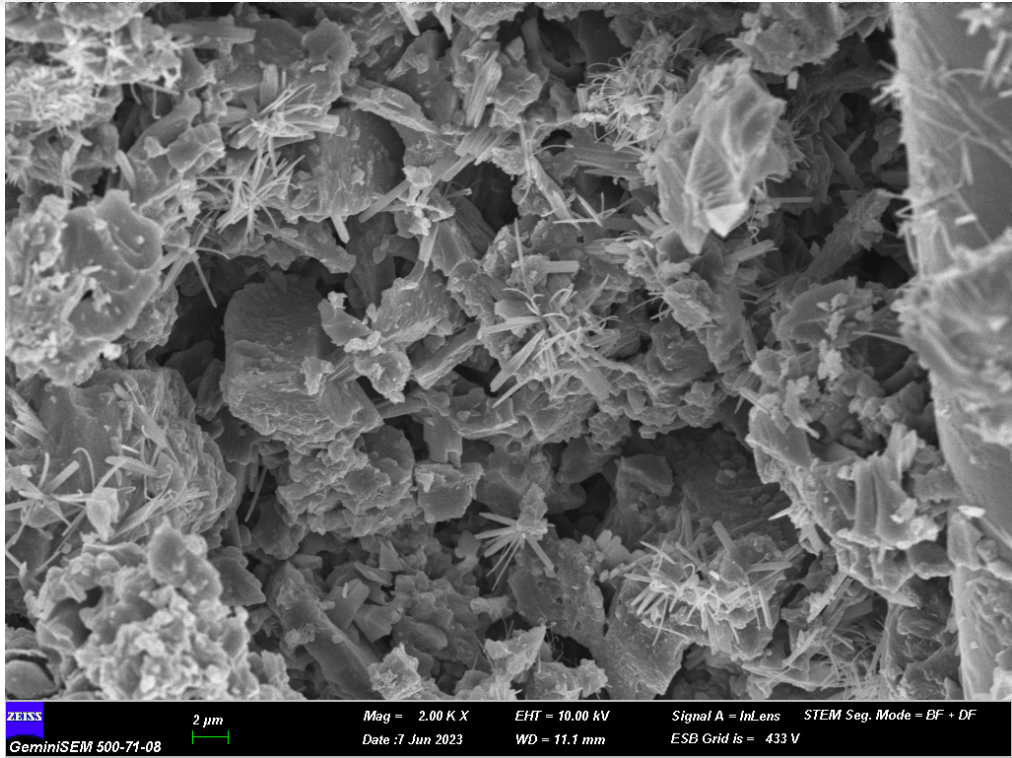
Şekil 4.6. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-500Xa)



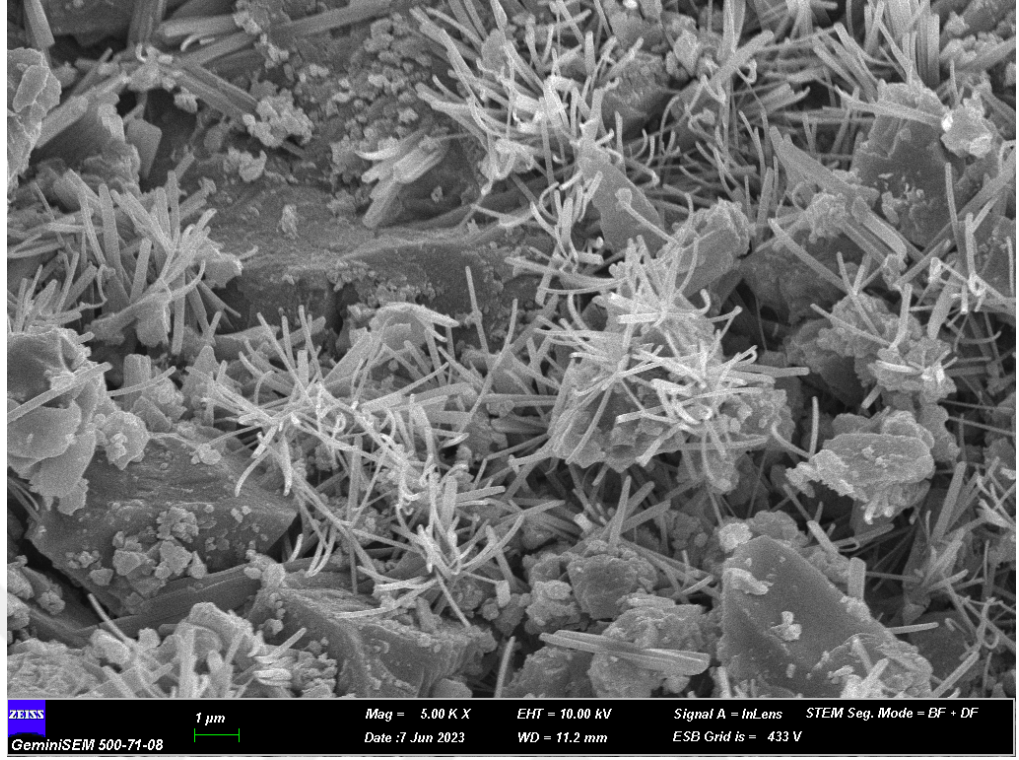
Şekil 4.7. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-500Xb)



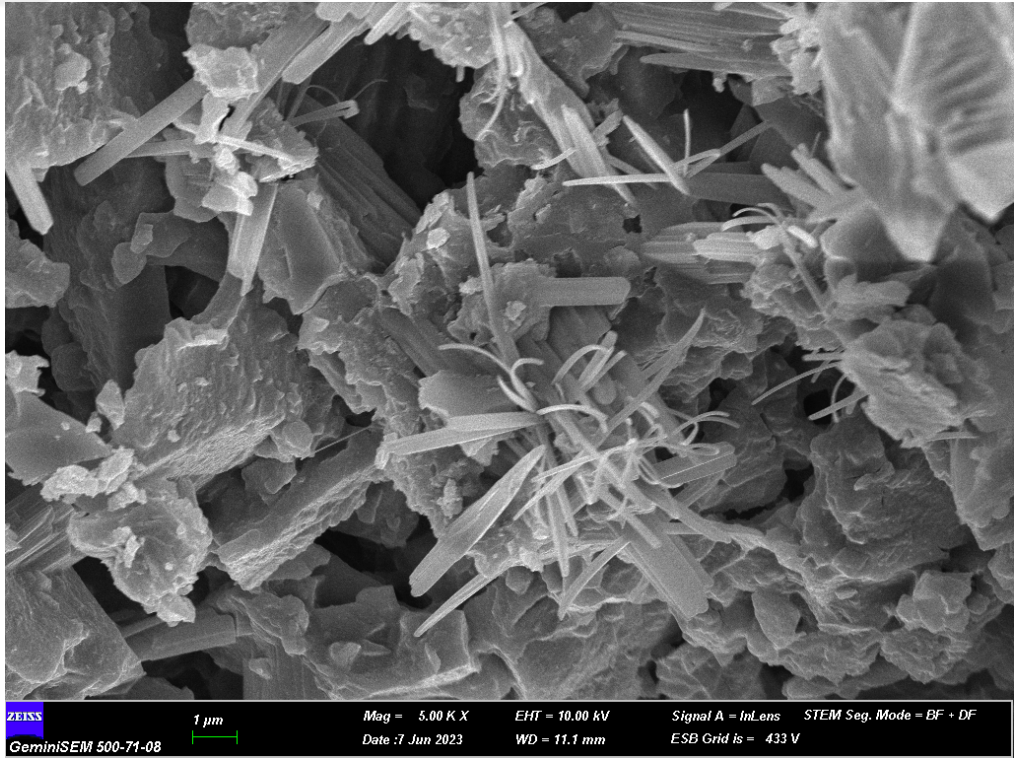
Şekil 4.8. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-2000Xa)



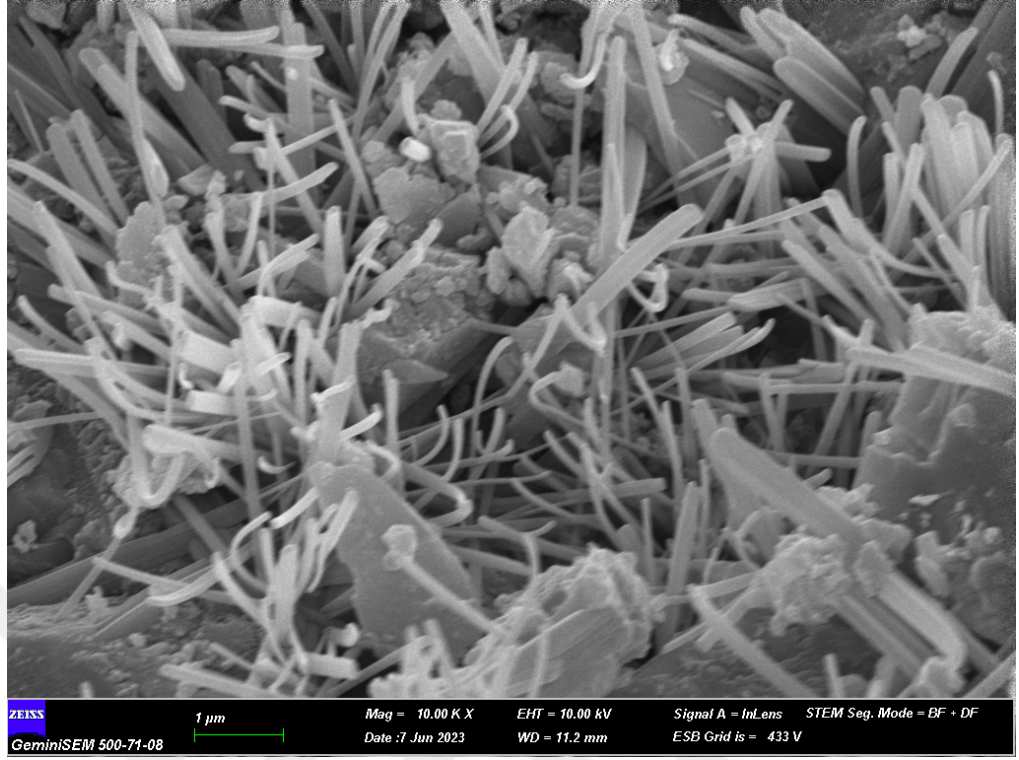
Şekil 4.9. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-2000Xb)



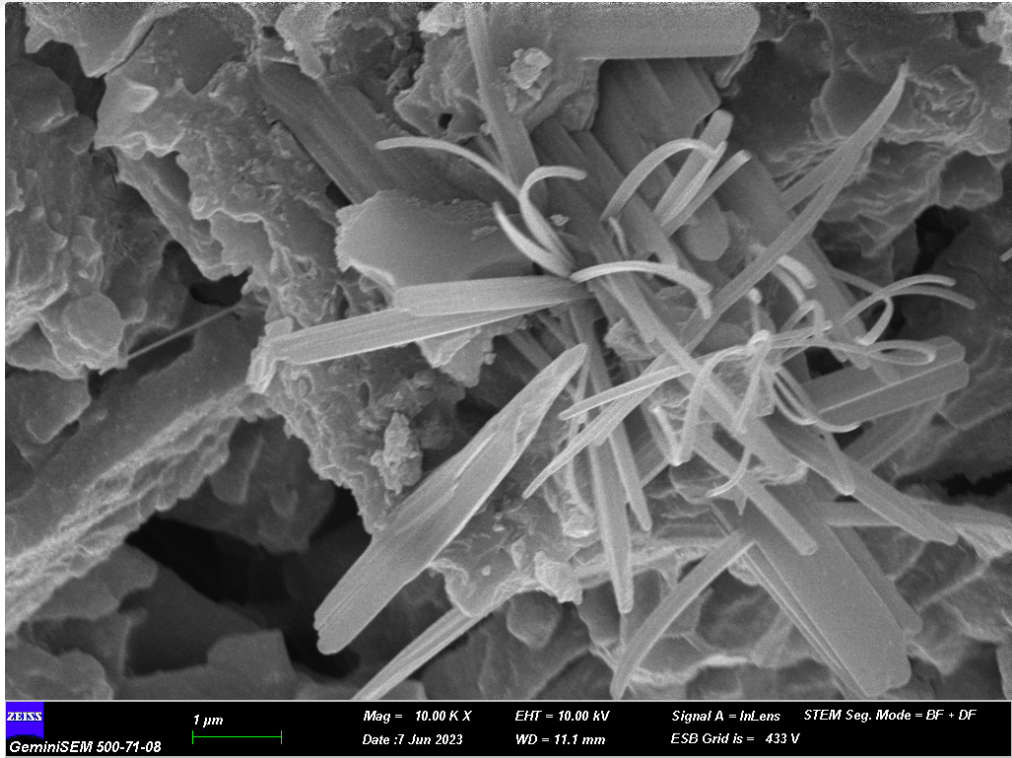
Şekil 4.10. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-5000Xa)



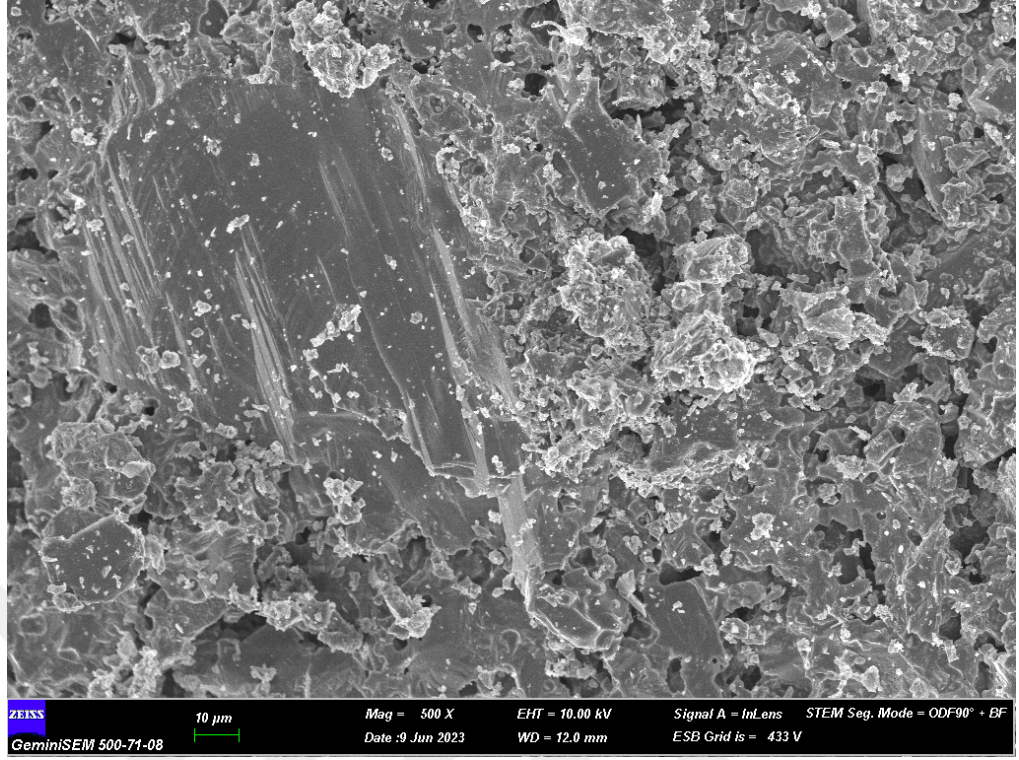
Şekil 4.11. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-5000Xb)



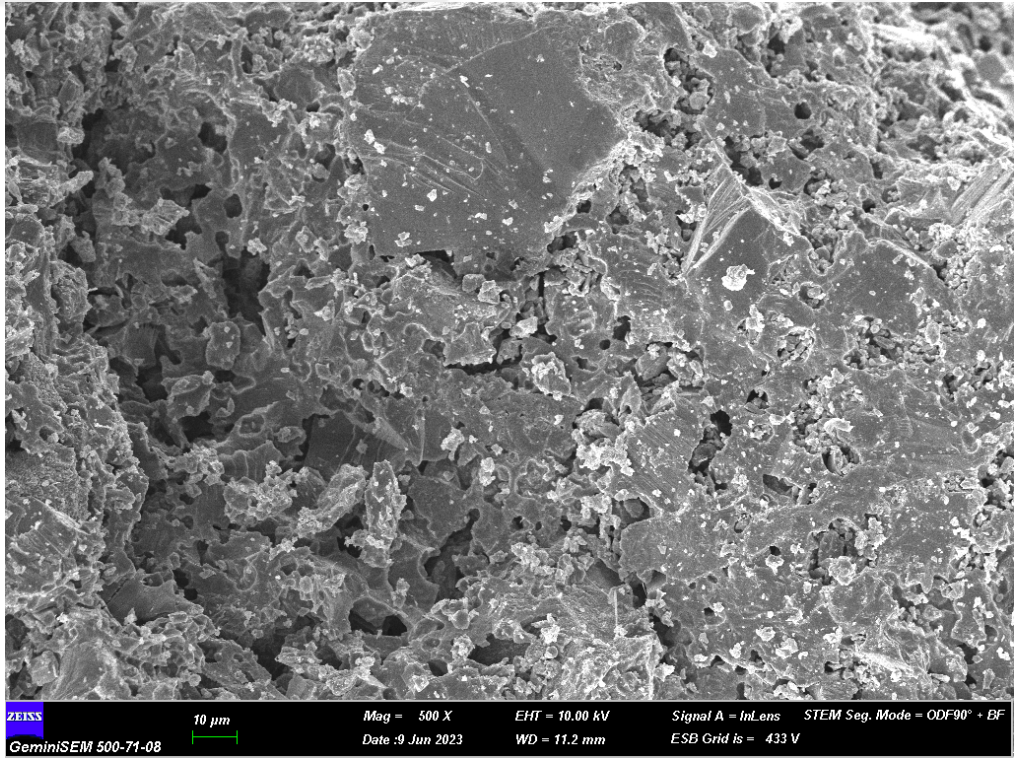
Şekil 4.12. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-10000Xa)



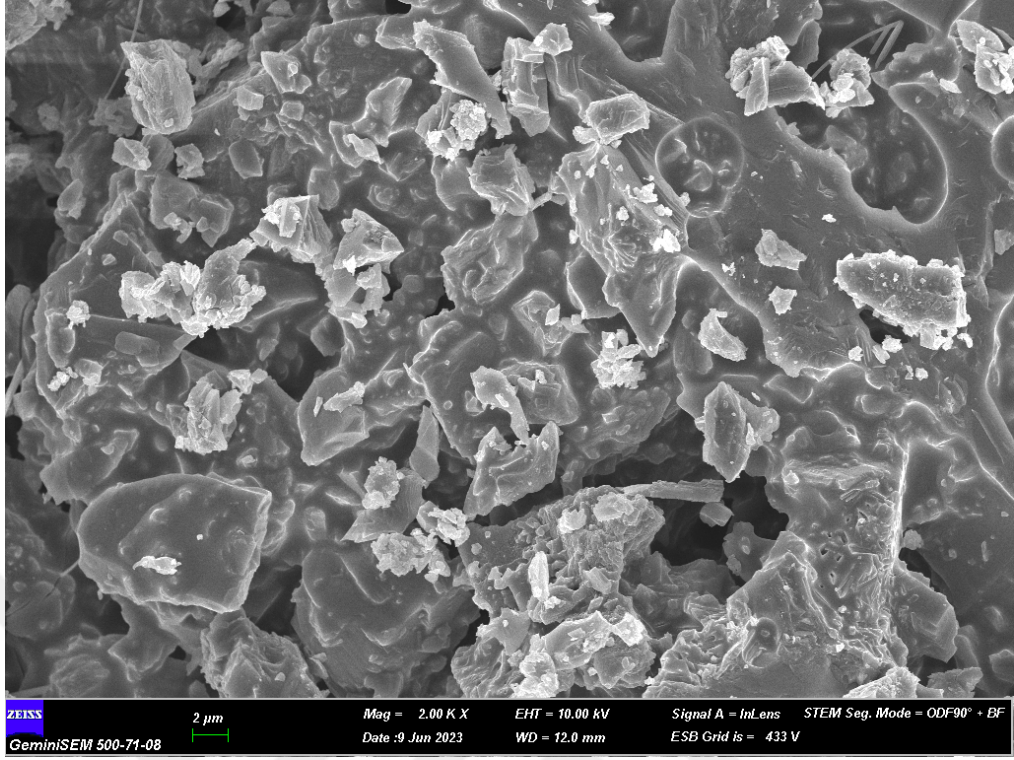
Şekil 4.13. Harçların SEM görüntüsü (25 °C-10000Xb)



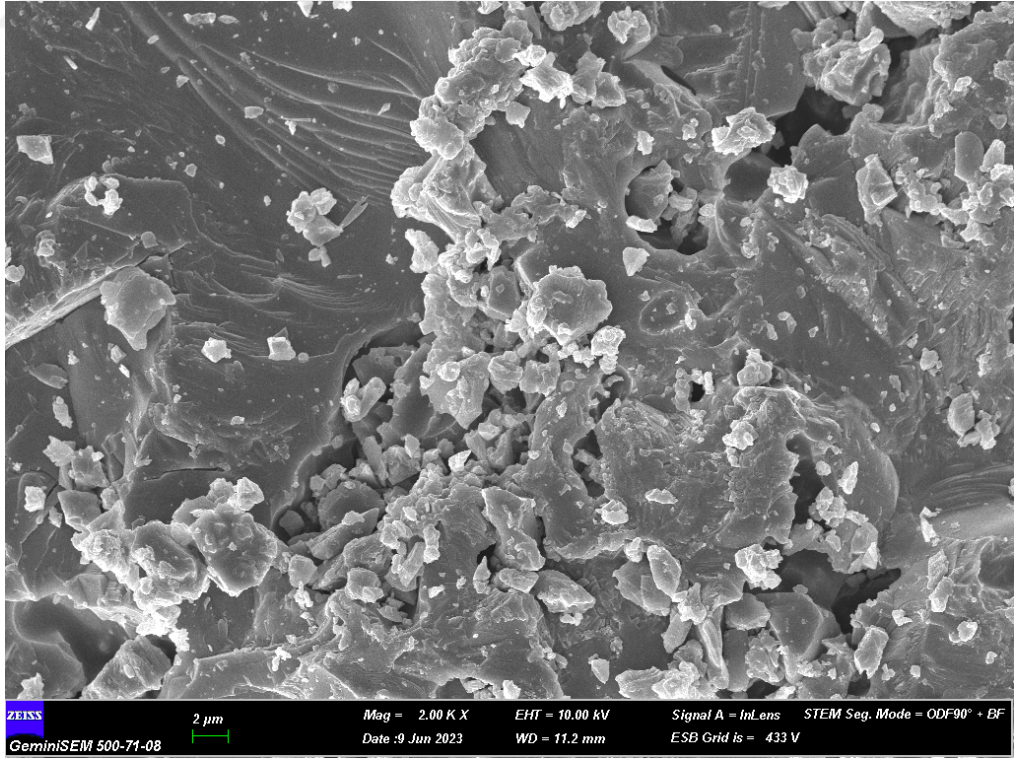
Şekil 4.14. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-500Xa)



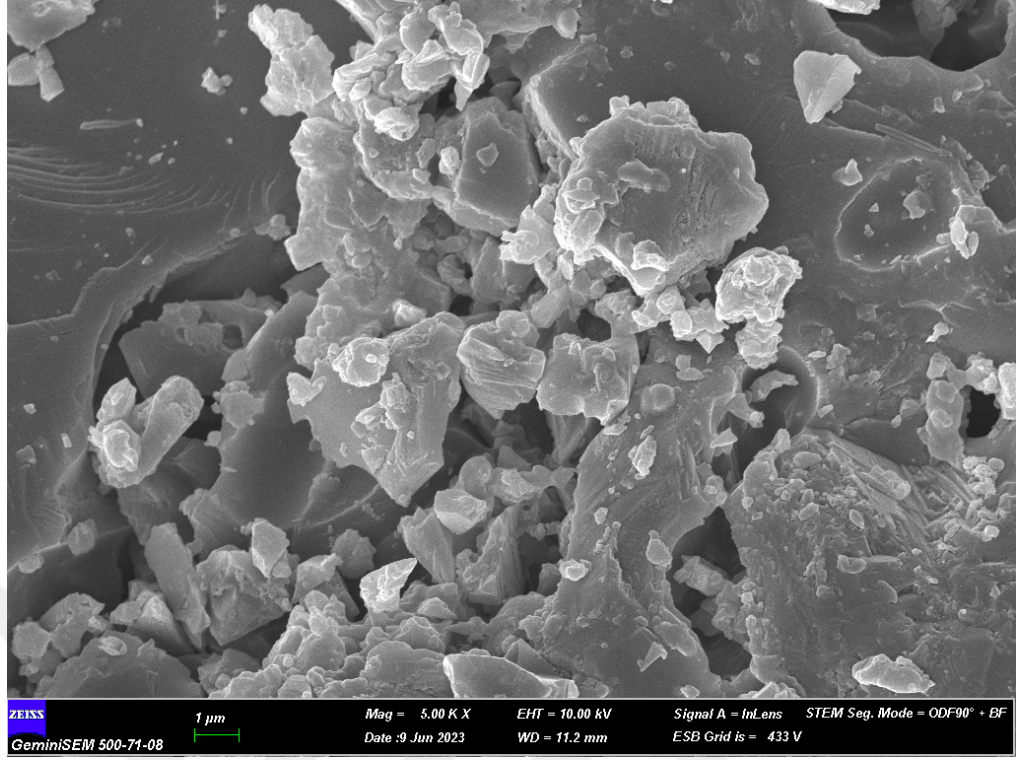
Şekil 4.15. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-500Xb)



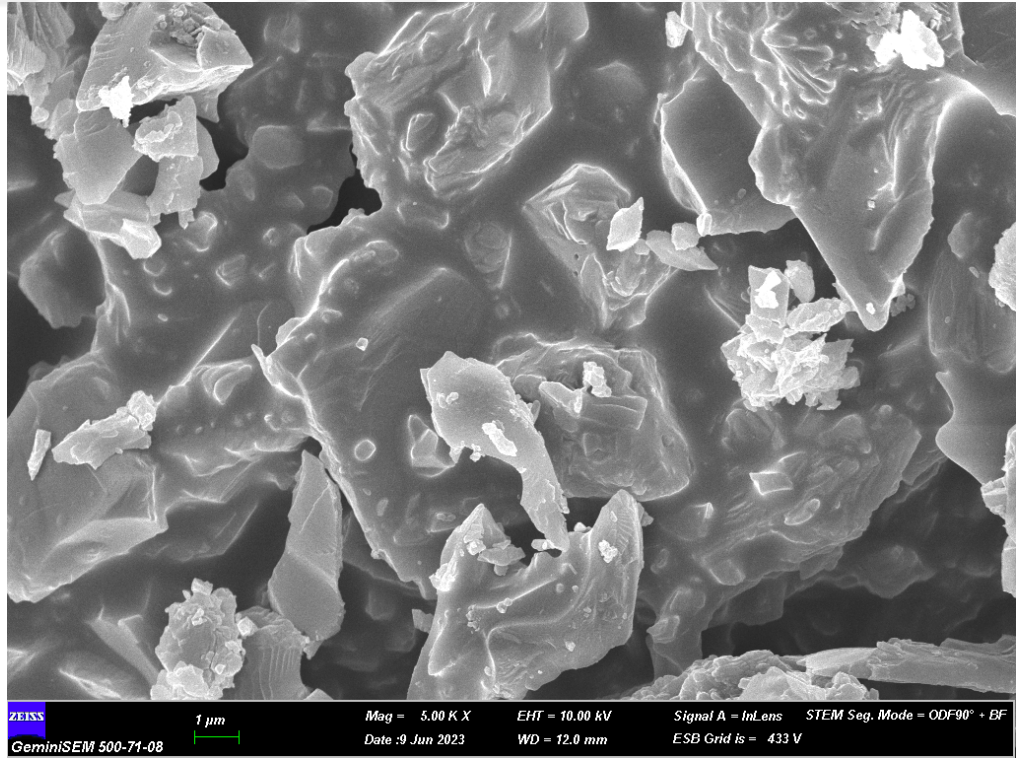
Şekil 4.16. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-2000Xa)



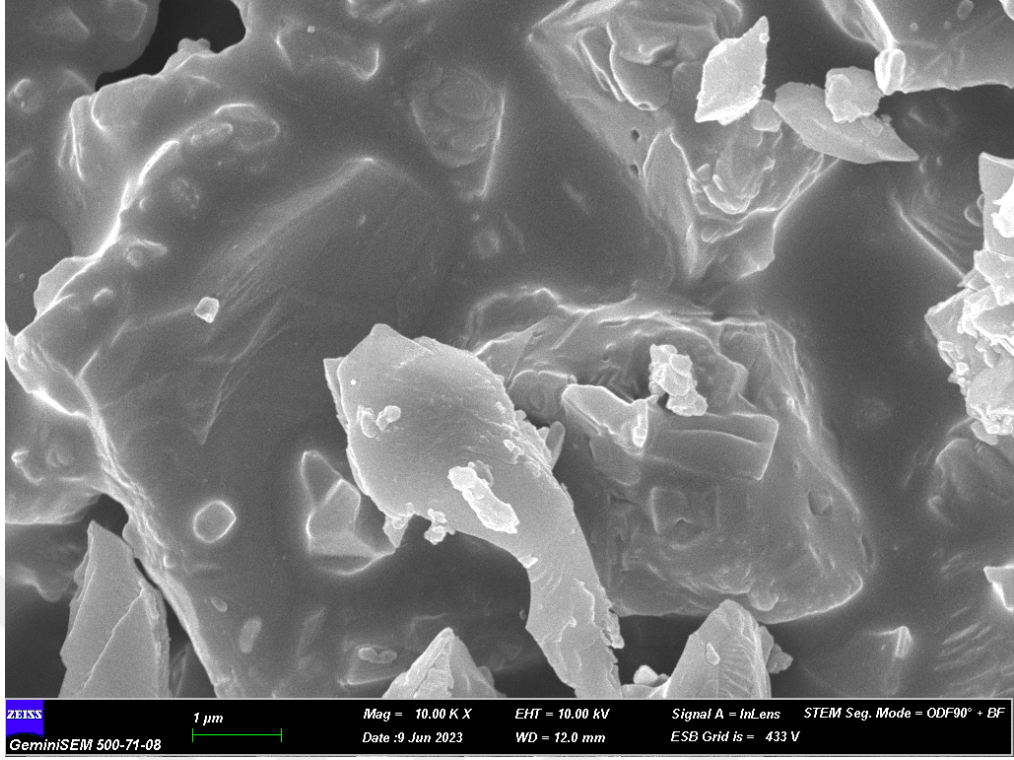
Şekil 4.17. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-2000Xb)



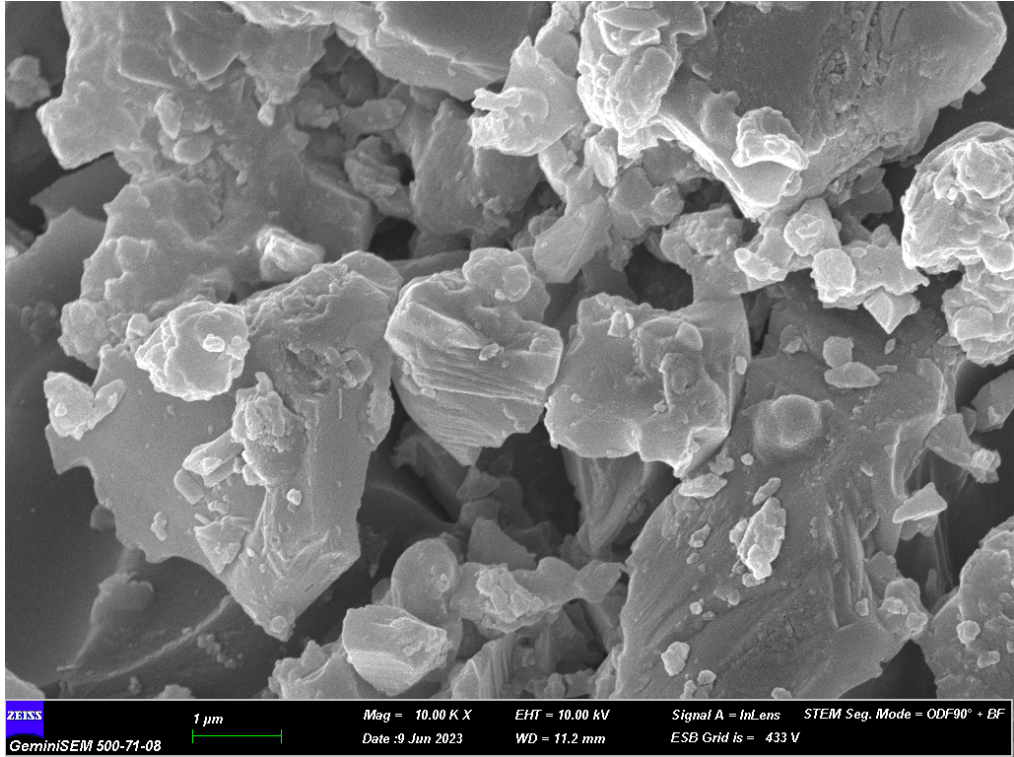
Şekil 4.18. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-5000Xa)



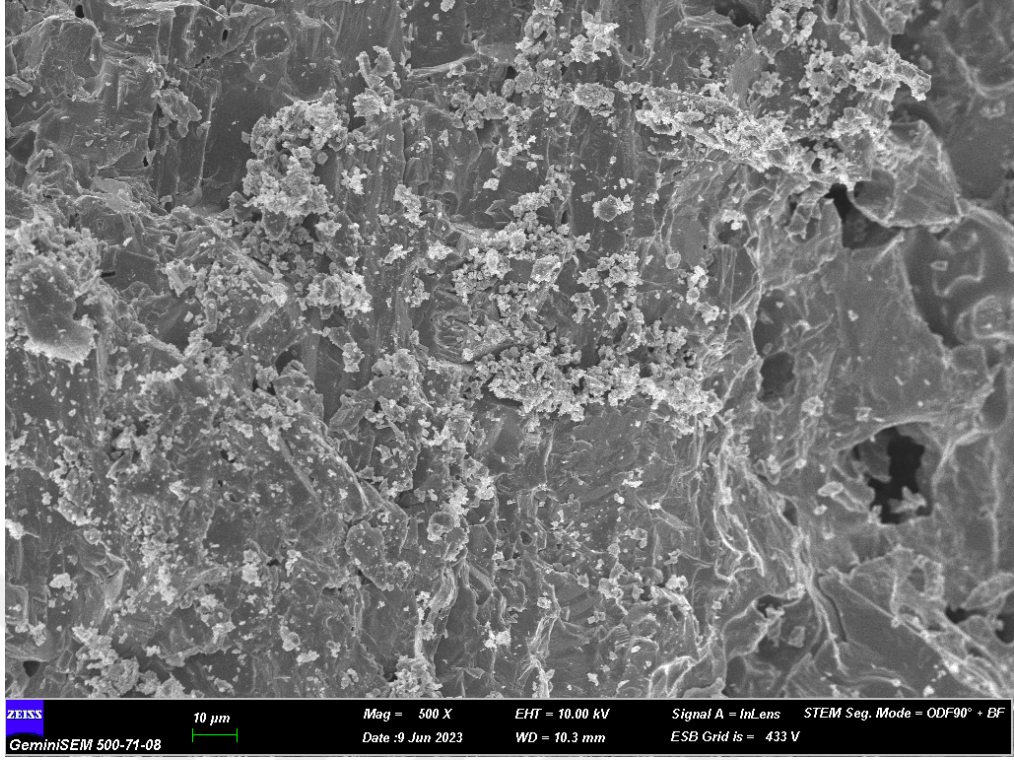
Şekil 4.19. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-5000Xb)



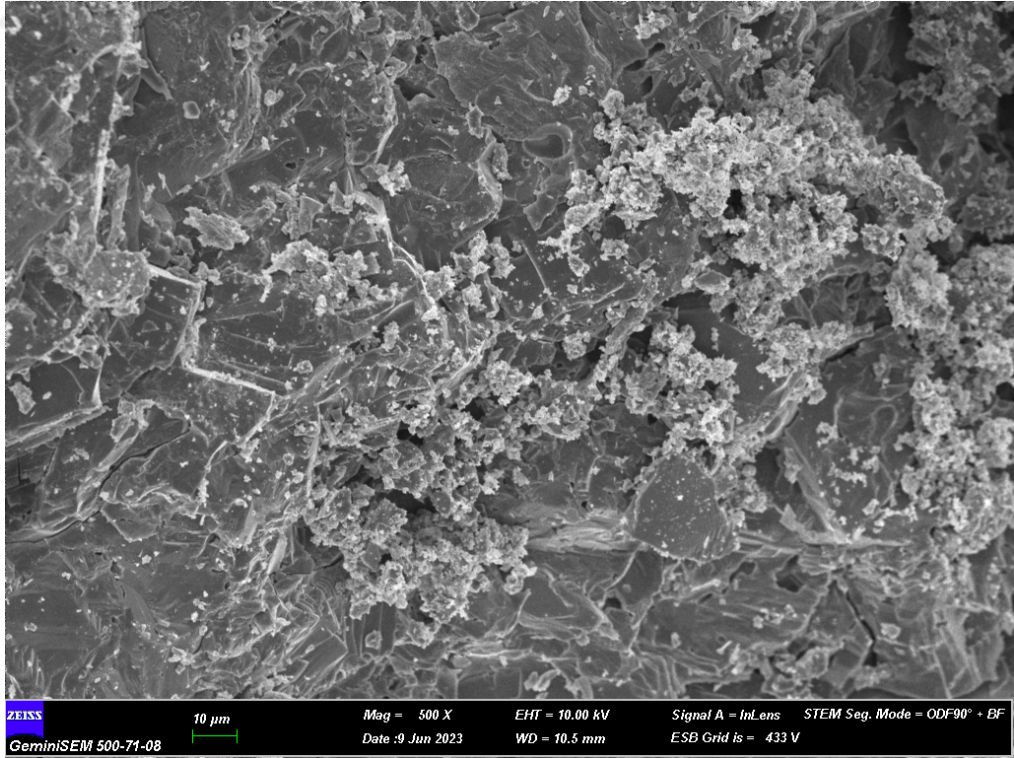
Şekil 4.20. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-10000Xa)



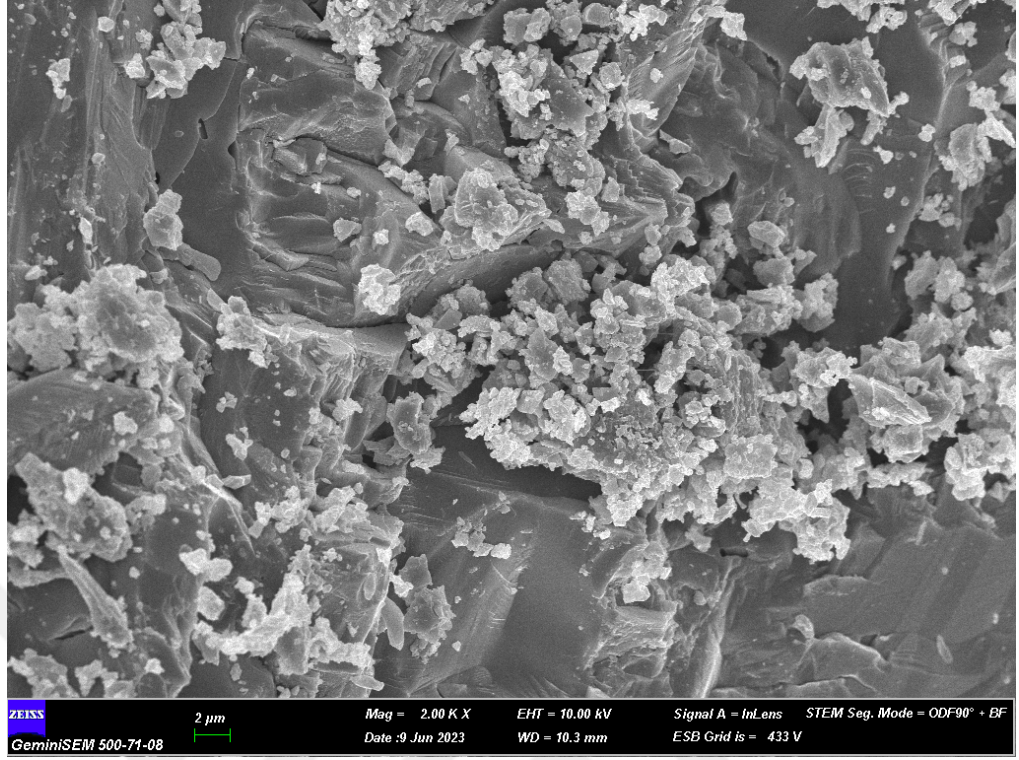
Şekil 4.21. Harçların SEM görüntüsü (800 °C-10000Xb)



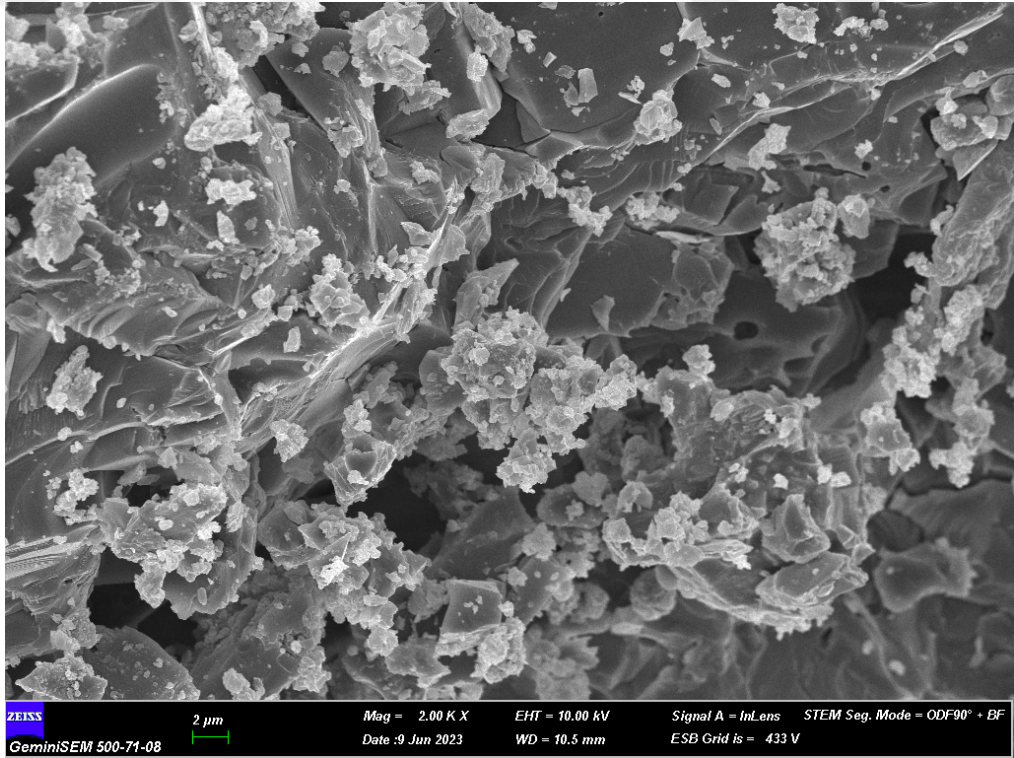
Şekil 4.22. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-500Xa)



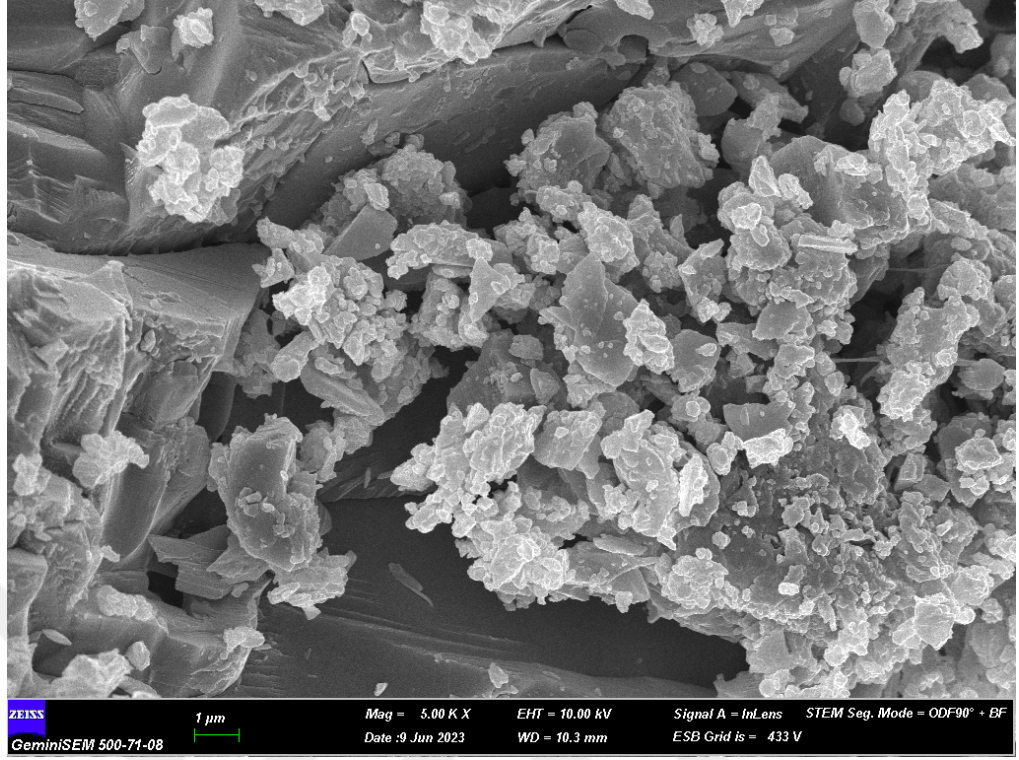
Şekil 4.23. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-500Xb)



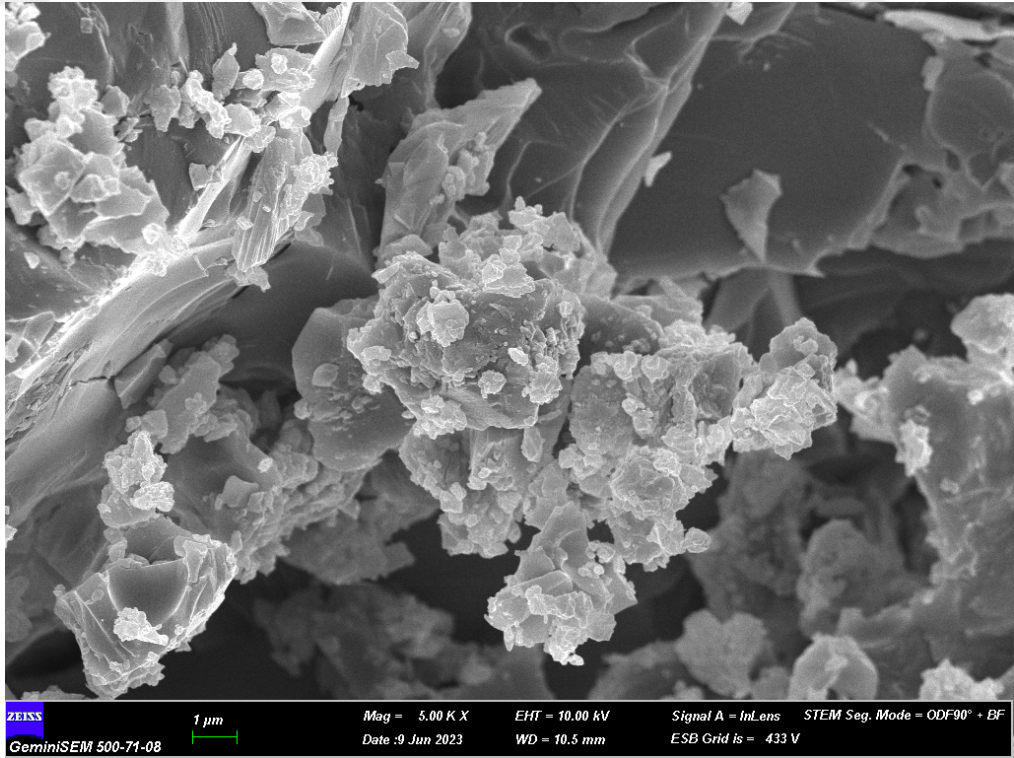
Şekil 4.24. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-2000Xa)



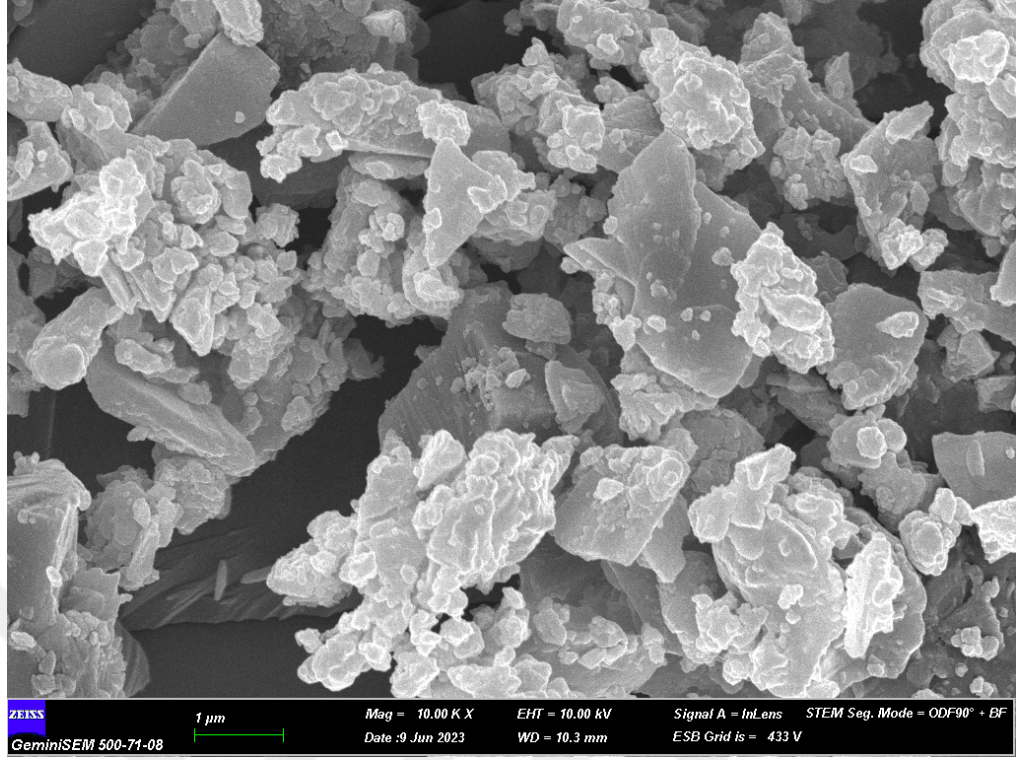
Şekil 4.25. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-2000Xb)



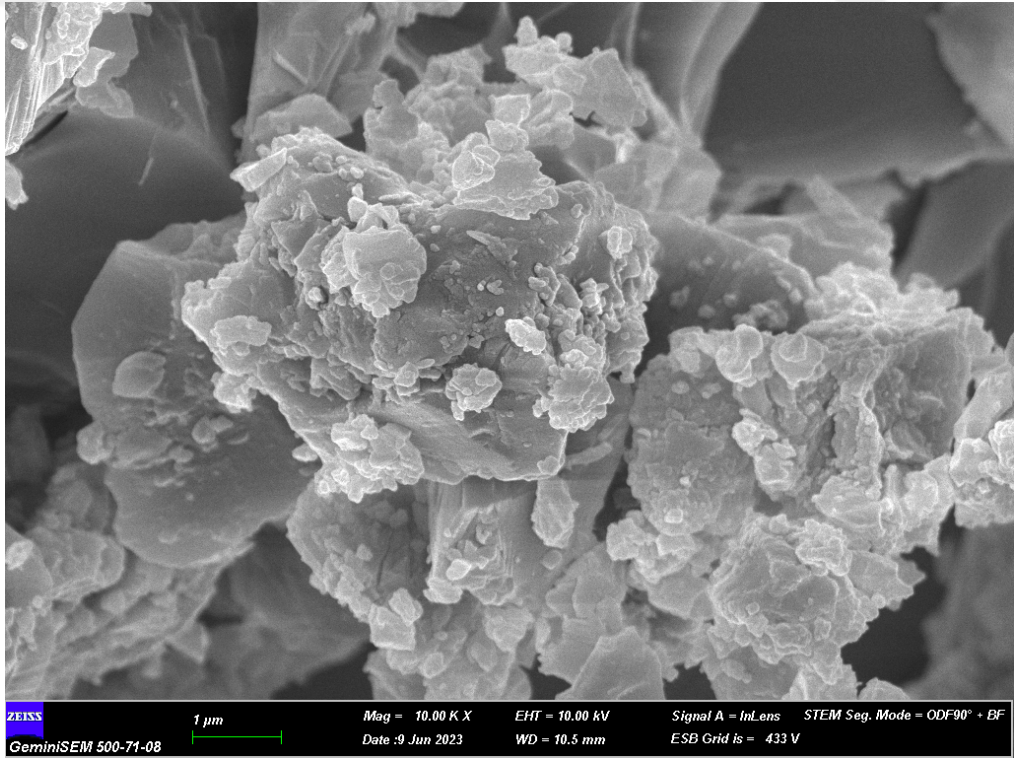
Şekil 4.26. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-5000Xa)



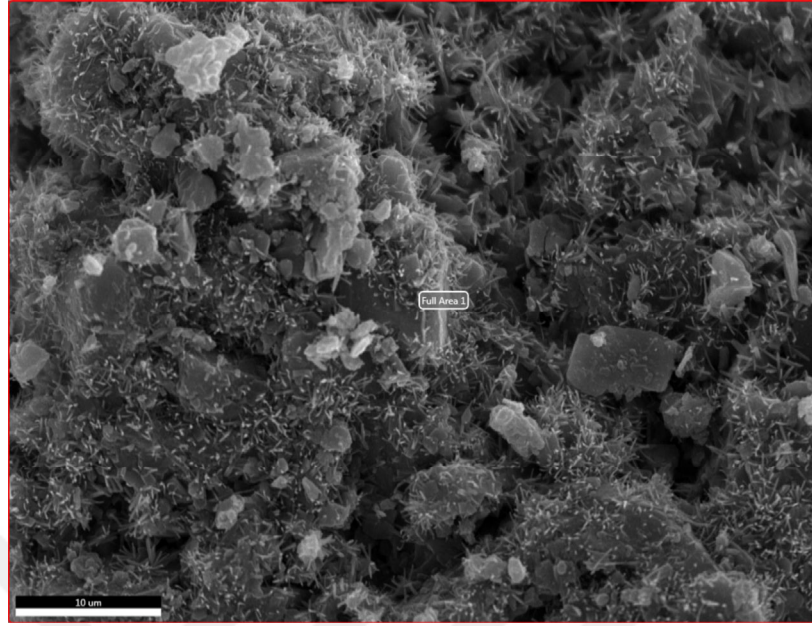
Şekil 4.27. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-5000Xb)



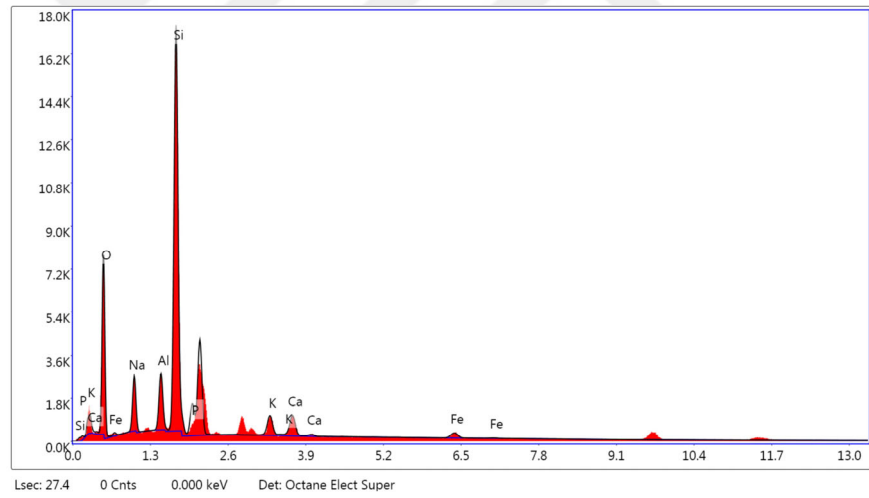
Şekil 4.28. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-10000Xa)



Şekil 4.29. Harçların SEM görüntüsü (1000 °C-10000Xb)



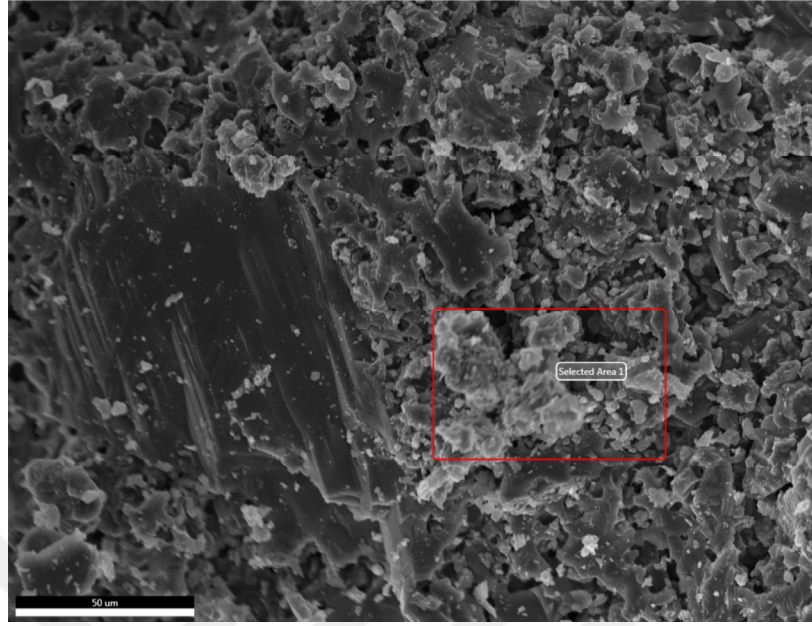
Şekil 4.30. Harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü (25 °C)



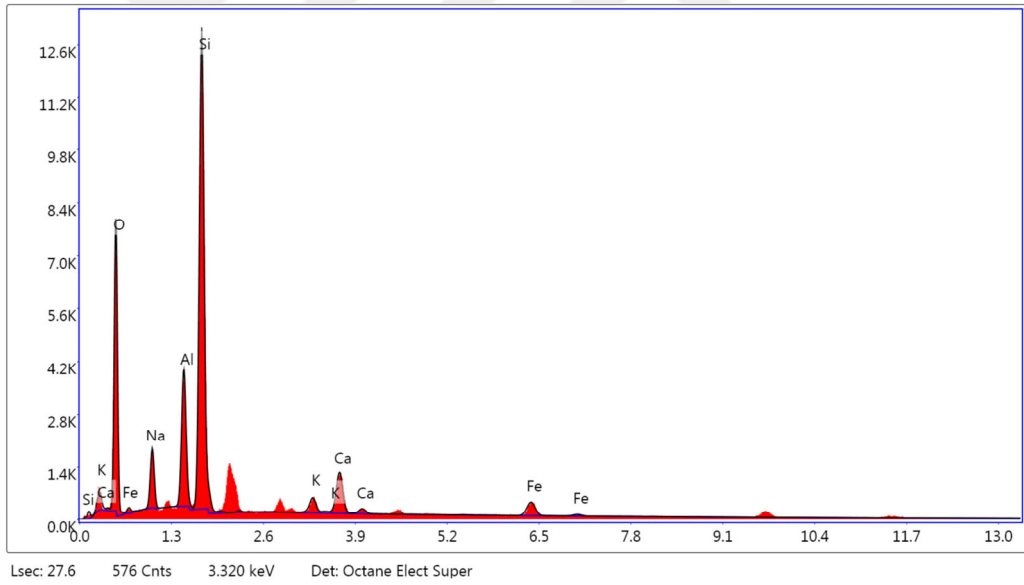
Şekil 4.31. Harçların EDX analizi grafiği (25 °C)

Tablo 4.5. Harçların EDX analizi (25 °C)

Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	37.12	51.55
Na	8.59	8.3
Al	5.28	4.34
Si	34.87	27.59
K	3.48	1.98
Ca	4.26	2.36



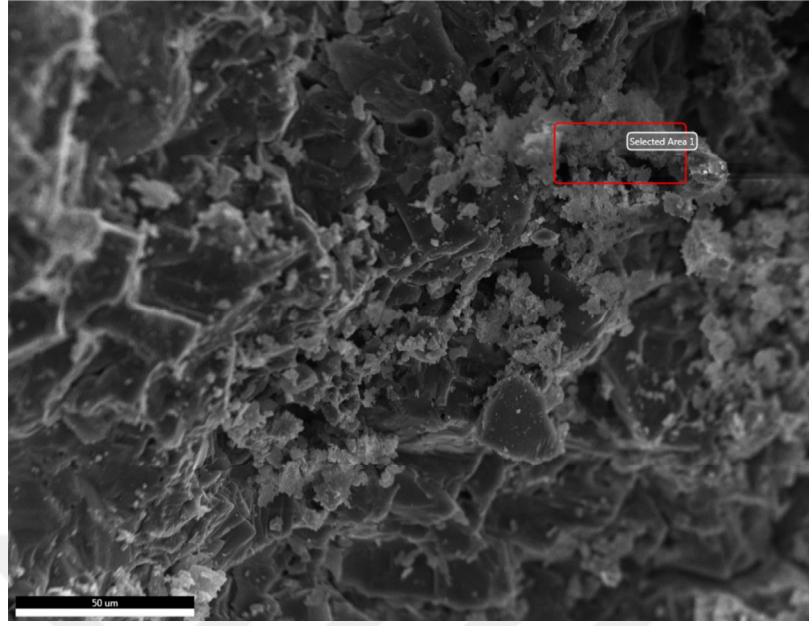
Şekil 4.32. Harçların EDX analizinin alındığı alanın görünümü (800 °C)



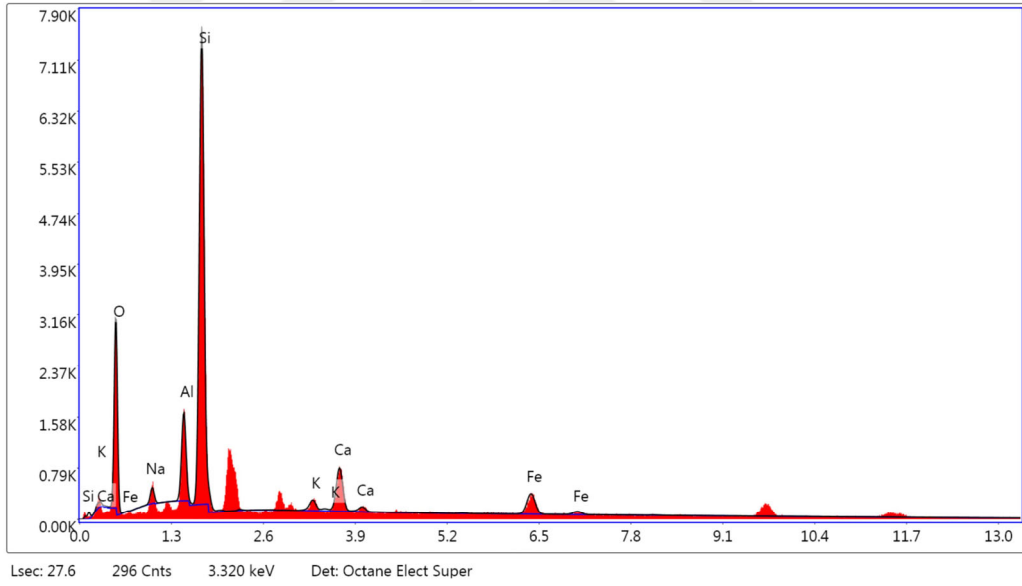
Şekil 4.33. Harçların EDX analizi grafiği (800 °C)

Tablo 4.6. Harçların EDX analizi (800 °C)

Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	39.96	54.96
Na	7.17	6.86
Al	9.24	7.54
Si	31.31	24.53
K	1.84	1.03
Ca	6.02	3.31



Şekil 4.34. Harçların EDX analizinin alındığı alan (1000 °C)



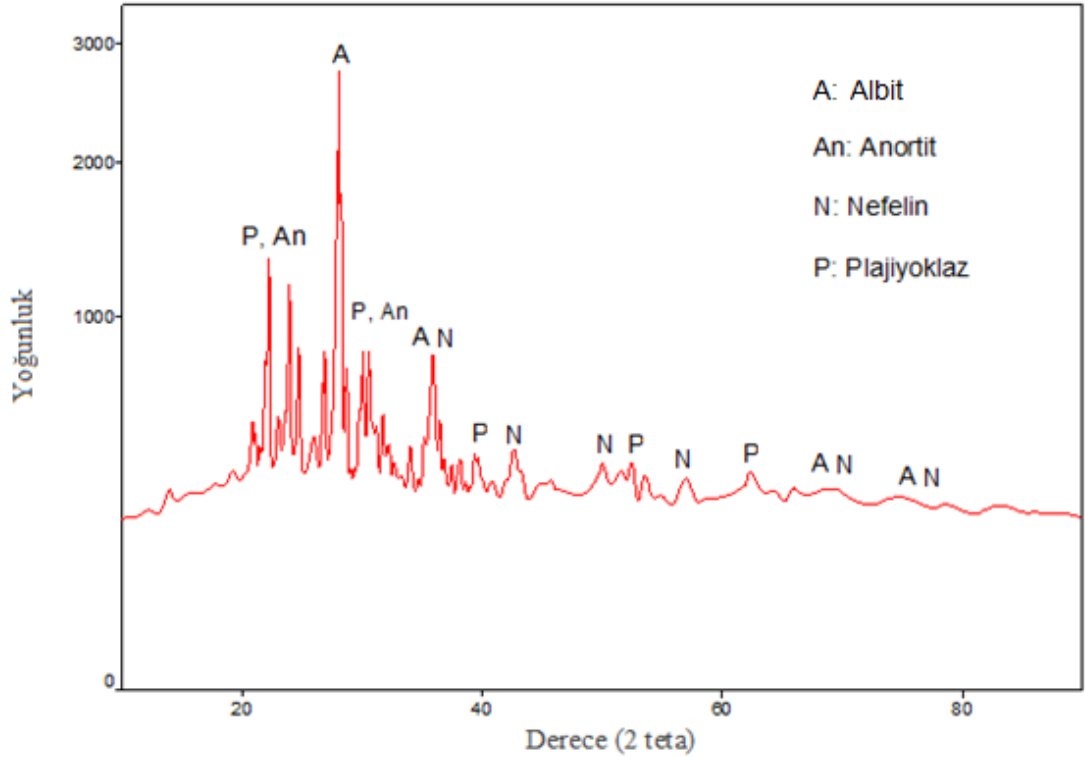
Şekil 4.35. Harçların EDX analizi grafiği (1000 °C)

Tablo 4.7. Harçların EDX analizi (1000 °C)

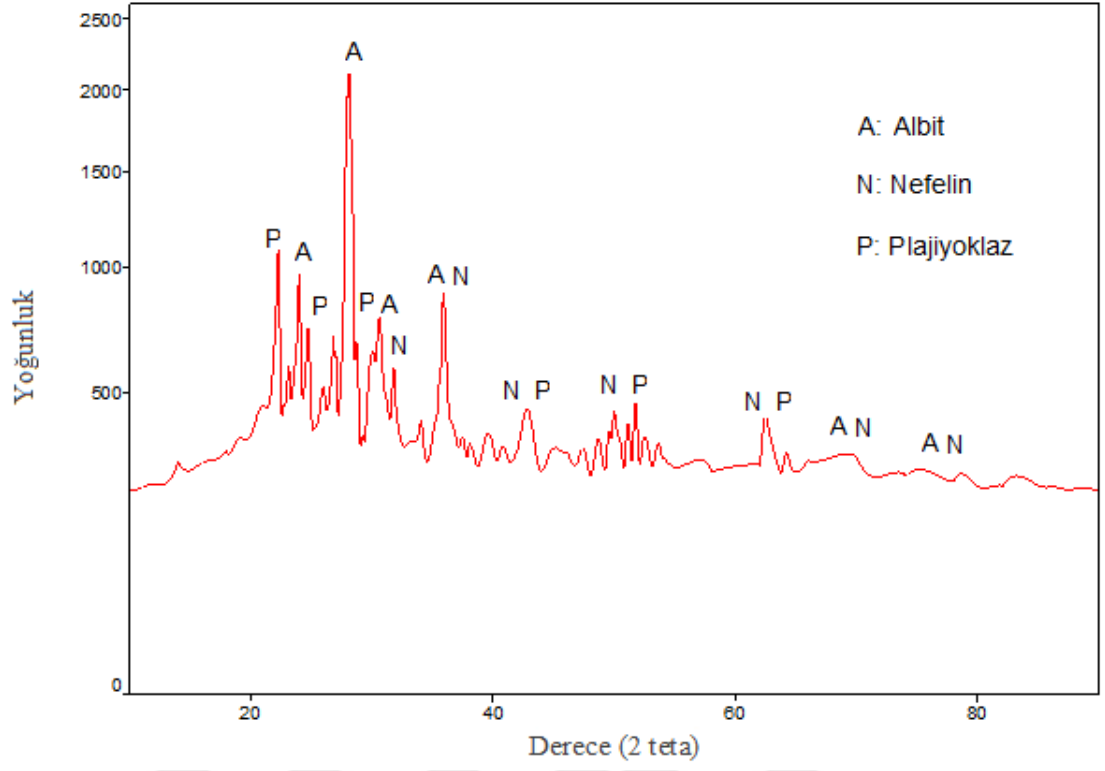
Element	Ağırlıkça Yüzdesi	Atomik Yüzdesi
O	36.11	52.14
Na	3.03	3.04
Al	7.26	6.22
Si	36.55	30.6
K	1.5	0.88
Ca	7.58	4.37

4.5. XRD Analiz Sonuçları

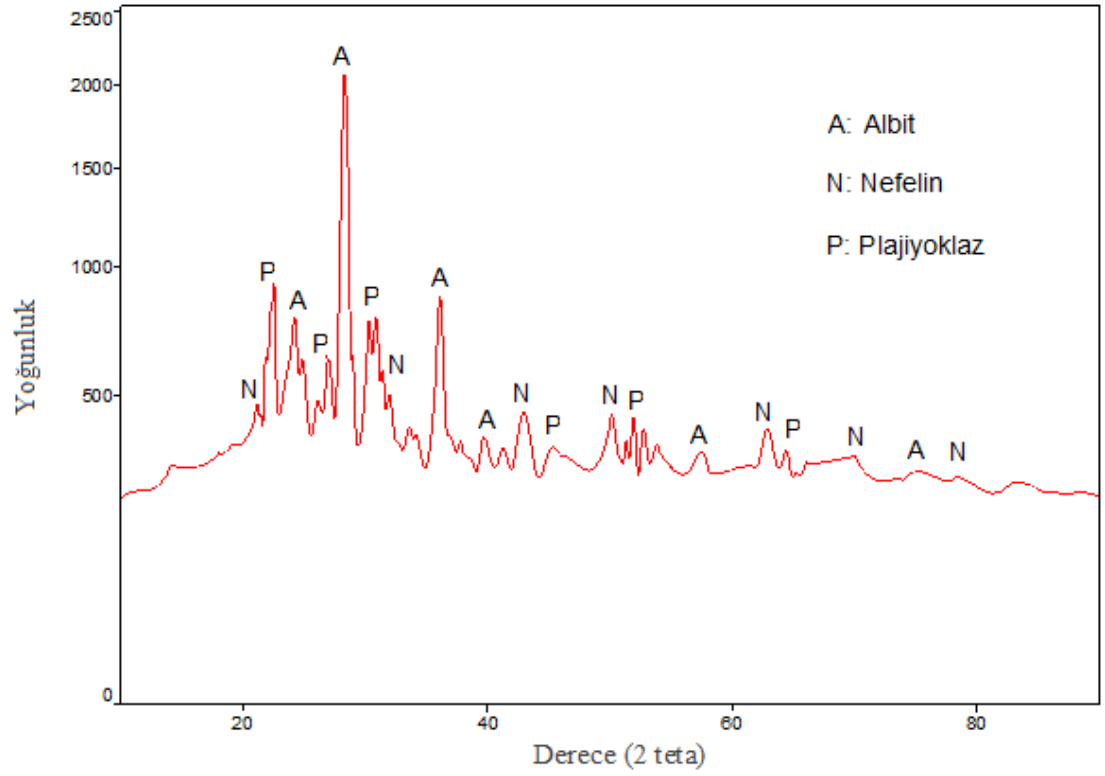
8-0 kodlu geopolimer harçlar üzerinde yüksek sıcaklık öncesi (25°C), 800 °C ve 1000 °C etkisi sonrası yapılan XRD analizlerinin sonuçları sırasıyla Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de sunulmuştur. Harçlarda albit, anortit, nefelin ve plajiyoklaz fazları tespit edilmiştir. Atık bazalt tozunun mineralojik yapısından kaynaklı olarak plajiyoklaz fazlarının yoğunluğu fazladır. Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında harçlarda 20θ ile 30θ arasında görülen fazların yoğunlukları azalırken, 36θ’da görülen albit ve nefelin fazlarının yoğunluğu artmıştır. Bununla birlikte, özellikle 50θ ile 70θ arasında görülen nefelin pikleri daha belirgin hale gelmiştir. Yüksek sıcaklık etkisiyle kristal faz yoğunluğunun azalması ile birlikte harçlarda dayanım artışının görülmesi, yoğunluğu azalan kristal fazların yüksek sıcaklık etkisinde yarı amorf veya amorf hale dönüştüğünü göstermektedir. XRD analizlerinde görülen pikleri SEM analizlerinden elde edilen görüntüler de doğrulamaktadır.



Şekil 4.36. Harçların XRD analizi (25°C)



Şekil 4.37. Harçların XRD analizi (800°C)



Şekil 4.38. Harçların XRD analizi (1000°C)

5. BÖLÜM

SONUÇLAR

Bu tezde elde edilen deneysel bulgular ve tartışmalara dayalı olarak, sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Geopolimer harçların 7 günlük eğilme ve basınç dayanımları ısıtılma süresinin 8 saatten 24 saate çıkması ile genellikle artarken, 8 saat ısıtılma maruz harçların küre yaşına göre dayanım artışı 24 saat ısıtılma ile üretilen harçlara göre genellikle daha fazla olmuştur.
- En yüksek 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları 24-B1.0 kodlu harçlarda sırasıyla 9.21 MPa, 9.56 MPa ve 9.82 MPa olarak elde edilmiştir. 8S serisinde ise en yüksek 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımları 8-B1.0 kodlu harçlarda sırasıyla 3.22 MPa, 6.67 MPa ve 9.16 MPa olarak elde edilmiştir.
- Harçların nihai (56 günlük) dayanım değerleri bakımından incelendiğinde, 8 saat ısıtılma süresinin 24 saat ısıtılma süresine göre harçlara verilen birim enerjiye karşılık elde edilen dayanım açısından daha verimli olduğu görülmüştür.
- Bazalt fiber içeriği, harçların eğilme dayanımlarını %20'ye varan oranlarda artırmıştır. Bazalt fiber içeriği arttıkça harçların eğilme dayanımları da genellikle artmıştır. %0.5 polipropilen fiber içeriği harçların eğilme dayanımlarını %2 ile %14 arasında geliştirmiştir. Ancak %1 polipropilen fiber içeriği ile üretilen harçların eğilme dayanımları %0.5 polipropilen lif içeren harçlara göre genellikle daha düşük elde edilmiştir.
- En yüksek 7 günlük basınç dayanımı 24-B0.5 kodlu harçlarda 37.90 MPa olarak elde edilirken, en yüksek 28 ve 56 günlük basınç dayanımları 24-B1.0 harçlarda sırasıyla 38.95 MPa ve 43.25 MPa olarak elde edilmiştir.

- 7 günlük 8S serisi harçlar hariç, %1 polipropilen fiber içeriği harçların basınç dayanımlarını olumsuz etkilemiştir.
- 600 °C etkisi sonrasında harçların eğilme dayanımlarında %1 ile %16 arasında artış kaydedilmiştir. Fiber takviyesiz olan harçlarda dayanım artış oranı daha fazla olmuştur. 600 °C etkisi sonrasında en düşük eğilme dayanımları polipropilen fiber ile üretilen harçlarda gözlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımları ise %1 bazalt fiber içeriği ile üretilen harçlarda elde edilmiştir.
- 800 °C ve 1000 °C etkisi sonrasında, 8S serisi harçların eğilme dayanımları deney öncesine göre %10'a varan oranlarda daha yüksek elde edilmiştir. 24S serisi harçlarda ise sadece polipropilen lifle üretilen harçların eğilme dayanımları deney öncesine göre daha düşüktür. Her iki seride de 800 °C ve 1000 °C etkisi sonrasında en yüksek eğilme dayanımları %1 bazalt fiber ile üretilen harçlarda elde edilmiştir.
- 1000 °C etkisi sonrasında %1 bazalt fiber ile üretilen harçların eğilme dayanımları 10 MPa üzerindedir.
- 600 °C etkisi sonrasında harçların basınç dayanımlarında %14 ile %54 arasında artış kaydedilmiştir. 8S serisi harçlardaki dayanım artışı 24S serisi harçlara göre genellikle daha fazla olmuştur. 600 °C etkisi sonrasında en yüksek dayanım artışları polipropilen fiberle üretilen harçlarda gözlenmiştir.
- 800 °C etkisi sonrasında harçların basınç dayanımlarında %11 ile %77 arasında artış kaydedilmiştir. Fiberli harçlarda 8S serisi harçların 800 °C etkisi sonrasındaki basınç dayanımları 24S serisi harçlara göre daha yüksek elde edilmiştir. Her iki seride de en yüksek dayanımlar polipropilen fiberli harçlarda elde edilmiştir. Bazalt fiberli harçların basınç dayanımları da fibersiz üretilen harçlara göre daha yüksektir.
- 1000 °C'ye maruz bırakılan harçlarda ise en yüksek basınç dayanımları %1 bazalt fiberle üretilen harçlarda, en düşük dayanımlar ise polipropilen fiberle

üretileen harçlarda gözlenmiştir. 1000 °C etkisi sonrasında 8-B1.0 ve 24-B1.0 kodlu harçlarda sırasıyla 55.0 MPa ve 58.47 MPa basınç dayanımı değerleri kaydedilmiştir.

- Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında 24S serisinde 8S serisine göre daha fazla ağırlık kaybı görülmüştür. En yüksek ağırlık kayıpları polipropilen fiberle üretileen harçlarda gözlenmiştir.
- SEM analizlerinde yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan harçlarda boşluklu bir yapı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında SEM analizlerinde harçların matrislerinin eriyik hale gelip, yoğunlaşp iç içe geçtiği gözlemlenmiştir. Harç matrislerinde iğne ve prizmatik yapılar gözlenmiştir. Bu yapılar XRD analizlerinde tespit edilen albit, anortit, nefelin ve plajiyoklaz kristalleri ile ilişkilendirilmiştir.
- EDX analizlerinde harçların matrislerinin yüksek sıcaklık etkisi sonrasında Al/Si oranları daha yüksek elde edilmiştir. Harç matrislerinin Na/Al oranları ise yüksek sıcaklık etkisiyle kademeli olarak düşmüştür.
- Bu tezde 1000 °C'ye kadar yüksek sıcaklığa dayanıklı fiber takviyeli çevre dostu geopolimer harçlar üretilebilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and structures*, 47(6), 1055-1065.
2. Zhao, Y., Qiu, J., Xing, J., & Sun, X. (2020). Chemical activation of binary slag cement with low carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 267, 121455.
3. Shobeiri, V., Bennett, B., Xie, T., & Visintin, P. (2021). A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126669.
4. Zhu, Q., Yuan, Y. X., Chen, J. H., Fan, L., & Yang, H. (2022). Research on the high-temperature resistance of recycled aggregate concrete with iron tailing sand. *Construction and Building Materials*, 327, 126889.
5. Masse, S., Vetter, G., Boch, F., & Haehnel, C. (2002). Elastic modulus changes in cementitious materials submitted to thermal treatments up to 1000 C. *Advances in Cement Research*, 14(4), 169-177.
6. Li, Y., Zhang, J., He, Y., Huang, G., Li, J., Niu, Z., & Gao, B. (2022). A review on durability of basalt fiber reinforced concrete. *Composites Science and Technology*, 225, 109519.
7. Latifi, M. R., Biricik, Ö., & Mardani Aghabaglou, A. (2022). Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 36(4), 345-369.
8. Ercenk, E., Bayrak, G., Şen, U., Yılmaz, Ş. (2014). Bazalt Esaslı Cam ve Cam-Seramik Kaplamaların Mekanik Özellikleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(3), 17-24.

9. Bilen Atay, H., “Sorgun (Yozgat) bazaltlarının yapı taşı olabilirliğinin incelenmesi”, Yozgat Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Yozgat, 2020
10. Kolay, E., Bilen, H., & Kadioğlu, y. K. (2021). Sorgun (Yozgat) Bazaltlarının Petrografik Sorunlarının Yapı Taşı Olabilirlik Açısından İncelenmesi. Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 3(2), 169-179.
11. Erkan, Y., Magmatik Petrografi, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları:93, Ankara, 2006.
12. Raj, S., Kumar, V. R., Kumar, B. B., & Iyer, N. R. (2017). Basalt: Structural insight as a construction material. Sādhanā, 42(1), 75-84.
13. Artemenko, S. E., & Kadykova, Y. A. (2008). Polymer composite materials based on carbon, basalt, and glass fibres. Fibre Chemistry, 40(1), 37-39.
14. Bhat, T., Chevali, V., Liu, X., Feih, S., & Mouritz, A. P. (2015). Fire structural resistance of basalt fibre composite. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 71, 107-115.
15. Landucci, G., Rossi, F., Nicolella, C., & Zanelli, S. (2009). Design and testing of innovative materials for passive fire protection. Fire Safety Journal, 44(8), 1103-1109
16. Çelikten, S., & Atabey, İ. İ. (2021). Su içeriği ve ısı kūr süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1), 328-332.
17. Koňáková, D., Špedlová, V., Čáchová, M., Vejmelková, E., & Černý, R. (2014). Influence of basalt fibres and aggregates on the thermal expansion of cement-based composites. Advanced Materials Research, 1054, 17-21.

18. Cao, W., Liu, S., & Feng, Z. (2013). Comparison of performance of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates. *Construction and Building Materials*, 41, 474-479.
19. Sevinç, A. H., & Durgun, M. Y. (2023). Elevated temperature performance of cementitious mortars containing pumice, barite, and basalt powder. *Journal of Building Engineering*, 78, 107552.
20. Lu, L., Han, F., Wu, S., Qin, Y., Yuan, G., & Doh, J. H. (2022). Experimental study on durability of basalt fiber concrete after elevated temperature. *Structural Concrete*, 23(2), 682-693.
21. Kočí, V., Vejmelková, E., Koňáková, D., Pommer, V., Grzeszczyk, S., Matuszek-Chmurowska, A., ... & Černý, R. (2023). Basic physical, mechanical, thermal and hygric properties of reactive powder concrete with basalt and polypropylene fibers after high-temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 374, 130922.
22. Alaskar, A., Albidah, A., Alqarni, A. S., Alyousef, R., & Mohammadhosseini, H. (2021). Performance evaluation of high-strength concrete reinforced with basalt fibers exposed to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 35, 102108.
23. Ahmed, W., Lim, C. W., & Akbar, A. (2022). Influence of elevated temperatures on the mechanical performance of sustainable-fiber-reinforced recycled aggregate concrete: a review. *Buildings*, 12(4), 487.
24. Dobiszewska, M., & Beycioğlu, A. (2017, October). Investigating the influence of waste basalt powder on selected properties of cement paste and mortar. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, No. 2, p. 022027). IOP Publishing.

25. Dobiszewska, M., Schindler, A. K., & Pichór, W. (2018). Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition. *Construction and Building Materials*, 177, 222-229.
26. Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
27. Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., ... & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
28. Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679.
29. Zakka, W. P., Lim, N. H. A. S., & Khun, M. C. (2021). A scientometric review of geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124353.
30. Zhao, J., Tong, L., Li, B., Chen, T., Wang, C., Yang, G., & Zheng, Y. (2021). Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127085.
31. Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner production*, 223, 704-728.
32. Van Deventer, J. S., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89-104.
33. Jindal, B. B. (2019). Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review. *Construction and building materials*, 227, 116644.

34. Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2020). Mechanical behaviour and microstructural investigation of geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 3843-3861.
35. Gunasekara, C., Law, D., Bhuiyan, S., Setunge, S., & Ward, L. (2019). Chloride induced corrosion in different fly ash based geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 200, 502-513.
36. Kupwade-Patil, K., & Allouche, E. N. (2013). Examination of chloride-induced corrosion in reinforced geopolymer concretes. *Journal of materials in civil engineering*, 25(10), 1465-1476.
37. Bhutta, M. A. R., Hussin, W. M., Azreen, M., & Tahir, M. M. (2014). Sulphate resistance of geopolymer concrete prepared from blended waste fuel ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(11), 04014080.
38. Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. (2013). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and structures*, 46, 361-373.
39. Badar, M. S., Kupwade-Patil, K., Bernal, S. A., Provis, J. L., & Allouche, E. N. (2014). Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 79-89.
40. Sun, P., & Wu, H. C. (2013). Chemical and freeze–thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars. *Fuel*, 111, 740-745.
41. Temuujin, J., Minjigmaa, A., Davaabal, B., Bayarzul, U., Ankhtuya, A., Jadambaa, T., & MacKenzie, K. J. D. (2014). Utilization of radioactive high-calcium Mongolian flyash for the preparation of alkali-activated geopolymers for safe use as construction materials. *Ceramics International*, 40(10), 16475-16483.

42. Wallah, S. E., Hardjito, D., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2005, January). Sulfate and acid resistance of fly ash-based geopolymer concrete. In Australian Structural Engineering Conference 2005 (pp. 733-742). Sydney, NSW: Engineers Australia.
43. Jiang, X., Zhang, Y., Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., ... & Huang, B. (2020). A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122500.
44. Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. K., & Shi, X. (2020). Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength. *Construction and Building Materials*, 262, 120924.
45. Çelikten, S., Sarıdemir, M., & Deneme, İ. Ö. (2019). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 217, 50-61.
46. Chindaprasirt, P., Boonbamrung, T., Poolsong, A., & Kroehong, W. (2021). Effect of elevated temperature on polypropylene fiber reinforced alkali-activated high calcium fly ash paste. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00554.
47. Kong, D. L., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. (2008). Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. *Journal of Materials Science*, 43, 824-831.
48. Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and building materials*, 24(7), 1176-1183.
49. Şahin, F., Uysal, M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Cosgun, T., & Dehghanpour, H. (2021). Effect of basalt fiber on metakaolin-based geopolymer mortars containing

- rilem, basalt and recycled waste concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 301, 124113.
50. Zhang, H. Y., Qiu, G. H., Kodur, V., & Yuan, Z. S. (2020). Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103483.
51. Albidah, A., Alqarni, A. S., Abbas, H., Almusallam, T., & Al-Salloum, Y. (2022). Behavior of Metakaolin-Based geopolymer concrete at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 317, 125910.
52. Chakkor, O., Altan, M. F., & Canpolat, O. (2022). Elevated Temperature, Freezing–Thawing and Mechanical Properties of Limestone, Marble, and Basalt Powders Reinforced Metakaolin–Red Mud-Based Geopolymer Mortars. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(4), 3241-3258.
53. Saraya, M. E. S. I., & El-Fadaly, E. (2017). Preliminary study of alkali activation of basalt: effect of NaOH concentration on geopolymerization of basalt. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 5(11), 58-76.
54. Çelik, A. İ. (2023). Mechanical Performance of Geopolymer Concrete Based on Basalt and Marble Powder. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-15.
55. Akturk, B., Kızıllkanat, A. B., Kabay, N., & Akyuncu, V. (2021). Utilization of basalt powder as geopolymeric binder. In *Int. Conf. “Cement-Based Mater. Tailored A Sustain. Futur.*
56. Ziada, M., Erdem, S., Tammam, Y., Kara, S., & Lezcano, R. A. G. (2021). The effect of basalt fiber on mechanical, microstructural, and high-temperature properties of fly ash-based and basalt powder waste-filled sustainable geopolymer mortar. *Sustainability*, 13(22), 12610.

57. Shaikh, F., & Haque, S. (2018). Behaviour of carbon and basalt fibres reinforced fly ash geopolymer at elevated temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1-12.
58. Ali, N., Canpolat, O., Aygörmez, Y., & Al-Mashhadani, M. M. (2020). Evaluation of the 12–24 mm basalt fibers and boron waste on reinforced metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 251, 118976.
59. Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M., & Uysal, M. (2020). Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 235, 117502.
60. Irshidat, M. R., Al-Nuaimi, N., & Rabie, M. (2022). Thermal behavior and post-heating fracture characteristics of polypropylene microfiber-reinforced geopolymer binders. *Construction and Building Materials*, 332, 127310.
61. Farhan, K. Z., Johari, M. A. M., Demirboğa, R., & Shihata, A. S. (2023). Performance of Polypropylene Fiber Reinforced GGBFS-based Alkali Activated Composite under Elevated Temperatures. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 21(7), 523-535.
62. Bas, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.
63. 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 2003, Ankara, Türkiye.
64. TS EN 196-1, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü 2016, Ankara, Türkiye.

65. Rattanasak, U., Chindapasirt, P., & Suwanvitaya, P. (2010). Development of high volume rice husk ash alumino silicate composites. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 17, 654-659.
66. Celikten, S., & Erdoğan, G. (2022). Effects of perlite/fly ash ratio and the curing conditions on the mechanical and microstructural properties of geopolymers subjected to elevated temperatures. *Ceramics International*, 48(19), 27870-27877.
67. Topçu, İ. B., Toprak, M. U., & Uygunoğlu, T. (2014). Durability and microstructure characteristics of alkali activated coal bottom ash geopolymer cement. *Journal of Cleaner Production*, 81, 211-217.