

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KOLEMANİT ATIĞININ BAĞLAYICI MALZEME VE AGREGA  
OLARAK GEOPOLİMER ÜRETİMİNDE KULLANILMASI**

**TUĞÇE BEYZA BAŞTÜRK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Doç. Dr. Arın YILMAZ (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Fatma Nurhayat DEĞİRMENCİ  
Prof. Dr. Mücteba UYSAL

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2023**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Kolemanit Atığının Bağlayıcı Malzeme ve Agregası Olarak Geopolimer Üretiminde Kullanılması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Tuğçe Beyza BAŞTÜRK**

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2022/069 nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

### KOLEMANİT ATIĞININ BAĞLAYICI MALZEME VE AGREGA OLARAK GEOPOLİMER ÜRETİMİNDE KULLANILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TUĞÇE BEYZA BAŞTÜRK

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ARIN YILMAZ)

(EŞ DANIŞMAN: DOÇ. DR. YURDAKUL AYGÖRMEZ)

BALIKESİR, HAZİRAN - 2023

Bu tez çalışmasında, geopolimer harç üretiminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bağlayıcı olarak kullanılmış ve bu malzemelere ek olarak kolemanit atığının hem bağlayıcı hem de agrega yerine kullanılmasıyla üretilen geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Toplam 10 farklı harç serisi üretilmiştir. Sadece oda sıcaklığında kür yapılmıştır. 7., 28., 90. günlerde ultrases geçiş hızı basınç ve eğilme dayanımı sonuçları incelenmiştir. Yüksek sıcaklık testi 300, 600 ve 900 °C sıcaklıkta uygulanmıştır. Donma-çözülme testi 90 günlük numunelerde 15 çevrim olarak yapılmıştır. Çözelti etkisini incelemek için %10 derişimde magnezyum sülfat ( $MgSO_4$ ) ve sodyum sülfat ( $Na_2SO_4$ ) çözeltileri kullanılmıştır. Her seri çözeltilerde 2 ay ve 4 ay süreyle bekletilmiştir. Durabilite deneylerinden sonra ağırlık ultrases geçiş hızı ve dayanım kayıpları incelenmiştir. Yüksek sıcaklık deneyinden sonra kalan dayanımlarda düşüş meydana gelirken 900 °C'deki değerler 600 °C'ye göre yüksektir. Yüksek sıcaklık deneyinde kolemanit atığı katkılı 5KUK, 20KUK ve 25AK serilerinin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Donma-çözülme deneyinde kolemanit atığı katkılı 10KUK, 20KUK, 5AK, 15AK, 25AK serilerinin sonuçlarının daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Sülfat çözelti etkisinde ise sonuçlar değişkenlik göstermiş olup kolemanit atığı içeren 10KUK, 20KUK serilerinde dayanım kaybı oranları azalma göstermiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Basınç dayanımı, Polimer beton, Puzolanik mineraller, Bor mineralleri

## **ABSTRACT**

### **USING COLEMANITE WASTE AS BINDING MATERIAL AND AGGREGATE IN THE GEOPOLYMER PRODUCTION**

**MSC THESIS**

**TUĞÇE BEYZA BAŞTÜRK**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ARIN YILMAZ)**

**(CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. YURDAKUL AYGÖRMEZ)**

**BALIKESİR, JUNE - 2023**

In this thesis study, the mechanical and durability properties of geopolymer mortars produced using fly ash and blast furnace slag as binders, along with the utilization of colemanite waste as both binder and aggregate, were investigated. A total of 10 different mortar series were produced and cured only at room temperature. The results of ultrasonic pulse velocity, compressive strength, and flexural strength were examined at 7, 28, and 90 days. High-temperature testing was conducted at temperatures of 300, 600, and 900°C. Freeze-thaw testing was performed with 15 cycles on 90-day-old samples. To examine the solution effect, magnesium sulfate (MgSO<sub>4</sub>) and sodium sulfate (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) solutions with a concentration of 10% were used. Each series was immersed in the solutions for 2 and 4 months. After durability tests, weight, ultrasonic pulse velocity, and strength losses were examined. Following the high-temperature test, a decrease in remaining strength was observed, with the values at 900°C being higher than those at 600°C. It was observed that the series 5KUK, 20KUK, and 25AK, which contained colemanite waste as an additive, yielded better results in the high-temperature test. In the freeze-thaw test, it was determined that the series 10KUK, 20KUK, 5AK, 15AK, and 25AK, which contained colemanite waste as an additive, had better results. The results varied in the sulfate solution effect, and the series 10KUK and 20KUK, which contained colemanite waste, showed a decrease in strength loss rate.

**KEYWORDS:** Compressive strength, Polymer concrete, Pozzolanitic minerals, Boron minerals

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GENEL BİLGİLER</b> .....	<b>3</b>
2.1 Geopolimerin Tanımı .....	3
2.2 Geopolimerlerin Kimyası.....	3
2.3 Geopolimerin Türleri ve Kullanım Alanları .....	5
2.4 Malzemeler .....	7
2.4.1 Kolemanit (K).....	7
2.4.2 Uçucu Kül (UK) .....	8
2.4.3 Yüksek Fırın Cürufu (C).....	8
2.4.4 Sodyum Silikat .....	9
2.4.5 Sodyum Hidroksit.....	9
2.5 Konu ile İlgili Önceki Çalışmalar.....	9
<b>3. MALZEMELER VE DENEY YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>14</b>
3.1 Geopolimer Harçlarda Kullanılan Malzemeler.....	14
3.1.1 Kolemanit Atığı (K) .....	14
3.1.2 Uçucu Kül (UK).....	14
3.1.3 Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	15
3.1.4 Kuvars Kumu .....	16
3.1.5 Sodyum Silikat .....	17
3.1.6 Sodyum Hidroksit .....	18
3.2 Deneysel Çalışma.....	18
3.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi.....	21
3.2.2 Eğilme Dayanımı Deneyi .....	22
3.2.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi .....	23
3.2.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi .....	24
3.2.5 Donma-Çözülme Deneyi.....	25
3.2.6 Çözelti Etkisinin İncelenmesi .....	26
<b>4. DENEY SONUÇLARI</b> .....	<b>28</b>
4.1 Mekanik Özellikler .....	28
4.1.1 Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları .....	28
4.1.2 Ultrases Geçiş Hızı Testi Sonuçları .....	31
4.1.3 Basınç Dayanımı ve Ultrases Geçiş Hızı Sonuçlarının Korelasyon Faktörü.....	32
4.2 Dayanıklılık Özelliklerinin Belirlenmesi .....	33
4.2.1 Yüksek Sıcaklı Deneyleri .....	33
4.2.1.1 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonucunda Eğilme ve Basınç Dayanımı Değerleri .....	33
4.2.1.2 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonucunda Ultrases Geçiş Hızı Değerleri .....	38

4.2.1.3	Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonucunda Ağırlık Kaybı Değerleri .....	39
4.2.1.4	Yüksek Sıcaklık Testi Sonrası Görsel İnceleme .....	40
4.2.2	Donma Çözülme Etkisi .....	42
4.2.2.1	Donma Çözülme Etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları .....	42
4.2.2.2	Donma Çözülme Etkisinde Ultrases Geçiş Hızı Ağırlık Kaybı Sonuçları ve Görsel İnceleme .....	44
4.2.3	Sülfat Çözeltilerinin Etkisi .....	47
4.2.3.1	Sülfat çözeltisi etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları .....	48
4.2.3.2	Sülfat Çözeltisi Etkisinde Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları.....	54
4.2.3.3	Sülfat Çözeltisi Etkisinde Ağırlık Kaybı Sonuçları .....	57
4.2.3.4	Sülfat Çözeltisi Etkisinden Sonra Görsel İnceleme .....	58
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR</b> .....	<b>60</b>
5.1	Değerlendirme ve Öneriler .....	61
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>62</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	.....	<b>67</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Geopolimer malzemelerin oluşumunun şematik gösterimi [11].....	4
Şekil 2.2: Geopolimerizasyon işleminin aşamalarının görseli: (a) alüminosilikatın yeniden düzenlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşmasından jel oluşumu ve (c) polimerizasyon [11].....	4
Şekil 2.3: Geopolimer malzemenin kullanım alanları [12].....	6
Şekil 3.1: Kolemanit atığı .....	14
Şekil 3.2: Uçucu kül.....	15
Şekil 3.3: Yüksek fırın cürufu.....	16
Şekil 3.4: 0-800 µm kuvars kumu.....	17
Şekil 3.5: 800-2000 µm kuvars kumu.....	17
Şekil 3.6: Sodyum hidroksit.....	18
Şekil 3.7: Bağlayıcı ve alkali aktivatörün birleştirilmesi .....	20
Şekil 3.8: 50x50x50 mm küp kalıplar .....	20
Şekil 3.9: 40x40x160 mm prizma kalıp .....	21
Şekil 3.10: Basınç dayanımı deneyi cihazı .....	22
Şekil 3.11: Eğilme dayanımı deneyi cihazı.....	23
Şekil 3.12: Ultrases geçiş hızı deneyi .....	24
Şekil 3.13: Yüksek sıcaklık deney fırını .....	25
Şekil 3.14: Donma-çözülme deneyi .....	26
Şekil 3.15: Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinde bulunan çözeltiler.....	27
Şekil 4.1: Basınç dayanımı değerleri .....	30
Şekil 4.2: Eğilme çekme dayanımı sonuçları .....	31
Şekil 4.3: Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki.....	33
Şekil 4.4: Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanım değerleri .....	35
Şekil 4.5: Yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımı değerleri .....	37
Şekil 4.6: Yüksek sıcaklık etkisi sonucunda ultrases geçiş hızı değerleri .....	39
Şekil 4.7: Yüksek sıcaklık etkisi sonucunda ağırlık kaybı değerleri (%) .....	40
Şekil 4.8: KS serisi yüksek sıcaklık etkisi a) 300°C b) 600°C c) 900°C .....	41
Şekil 4.9: 5KC, 10KC, 20KC, 5KUK, 10KUK, 20KUK, yüksek sıcaklık etkisi a) 300°C b) 600°C c) 900°C.....	41
Şekil 4.10: 5KA, 15AK, 25AK, a) 300°C b) 600°C c) 900°C.....	42
Şekil 4.11: 15 çevrim donma-çözülme sonrası basınç dayanımı değerleri.....	44
Şekil 4.12: 15 çevrim donma-çözülme sonrası eğilme dayanımı değerleri .....	44
Şekil 4.13: 15 çevrim donma-çözülme etkisinden sonra ultrases geçiş hızı değerleri.....	45
Şekil 4.14: 15 çevrim donma-çözülme etkisinde ağırlık kaybı.....	46
Şekil 4.15: Donma çözülme etkisi 5AK, 15AK, 25AK .....	46
Şekil 4.16: Donma çözülme etkisi KS, 5KC, 20KC, 10KUK, 20KUK, 10KC, 5KUK.....	47
Şekil 4.17: Donma çözülme deneyinden sonra kolemanit atığı içeren serilerde görülen gevrek kırılma.....	47
Şekil 4.18: 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde basınç dayanımı .....	51
Şekil 4.19: 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde eğilme dayanımı.....	51
Şekil 4.20: 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımı .....	53
Şekil 4.21: 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımı .....	53
Şekil 4.22: 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri.....	56
Şekil 4.23: 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri .....	56
Şekil 4.24: 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat ağırlık kaybı değerleri (%) .....	57
Şekil 4.25: 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat ağırlık kaybı değerleri (%) .....	58



<b>Şekil 4.26:</b> 4 ay magnezyum sülfat etkisi a) 5AK, b) 15AK, c) 25AK.....	58
<b>Şekil 4.27:</b> 2 ay sodyum sülfat etkisi ile 25AK serisinde oluşan çiçeklenme.....	59
<b>Şekil 4.28:</b> a) 2 ay magnezyum sülfat etkisi, b) 2 ay sodyum sülfat etkisi .....	59

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1:</b> Kolemanit atığı kimyasal bileşimi .....	14
<b>Tablo 3.2:</b> Uçucu kül kimyasal bileşimi .....	15
<b>Tablo 3.3:</b> Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi .....	15
<b>Tablo 3.4:</b> Tane büyüklüğü dağılımı .....	16
<b>Tablo 3.5:</b> Sodyum silikatın kimyasal özellikleri .....	18
<b>Tablo 3.6:</b> Geopolimer harçların karışım oranları .....	19
<b>Tablo 4.1:</b> Basınç dayanımı sonuçları .....	29
<b>Tablo 4.2:</b> Eğilme dayanımı değerleri ve artış oranları .....	30
<b>Tablo 4.3:</b> Ultrases geçiş hızı sonuçları (m/s) .....	32
<b>Tablo 4.4:</b> Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanım değerleri ve azalma oranları .....	36
<b>Tablo 4.5:</b> Yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanım değerleri ve azalma oranları .....	37
<b>Tablo 4.6:</b> Ultrases geçiş hızı sonuçları ve azalma oranları .....	38
<b>Tablo 4.7:</b> 15 çevrim donma-çözülme deneyi sonrası basınç ve eğilme dayanımları azalma oranları .....	43
<b>Tablo 4.8:</b> 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde basınç dayanımı değerleri ve azalma oranları .....	50
<b>Tablo 4.9:</b> 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde eğilme dayanımı ve azalma oranları .....	50
<b>Tablo 4.10:</b> 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımı ve azalma oranları .....	52
<b>Tablo 4.11:</b> 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımı ve azalma oranları .....	52
<b>Tablo 4.12:</b> 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri ve azalma oranları .....	55
<b>Tablo 4.13:</b> 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri ve azalma oranları .....	55

## SEMBOLLER ve KISALTMALAR LİSTESİ

$\sigma$	: Basınç dayanımı
$\sigma_e$	: Eğilme çekme dayanımı
P	: Uygulanan kuvvet
A	: Kesit alanı
b	: Prizma kesitinin eni
d	: Prizma kesitinin yüksekliği
L	: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık
M	: Molarite
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
NaOH	: Sodyum hidroksit
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	: Sodyum silikat
°C	: Santigrad derece
K	: Kolemanit
UK	: Uçucu kül
C	: Yüksek fırın cürufu
GPÇ	: Geleneksel Portland çimentosu
AY	: Artış yüzdesi
MPa	: Megapaskal
MgSO <sub>4</sub>	: Magnezyum sülfat
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: Sodyum sülfat

## ÖNSÖZ

Bu sürece başlarken ve sonrasında her zaman yanımda olan, bana her konuda destek olan bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren değerli tez danışmanım sayın Doç. Dr. Arın YILMAZ'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez aşamamın başlangıcından sonuna kadar bana her yardımcı olan sorularımı yanıtızsız bırakmayıp zamanını ayıran eş danışmanım sayın Doç. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ders aşamasında geopolimer beton hakkında çalışma yapmaya yönlendiren bu konu hakkında bilgilerini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Fatma Nurhayat DEĞİRMENCİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Beni yüksek lisans için cesaretlendiren gerek ders aşamasında gerek yürüttüğüm tez çalışmam süresince her zaman beni destekleyen, maddi veya manevi olarak her an yanımda olan Yük. İnş. Müh. Mehmet Şeref KURT'a teşekkürlerimi sunarım. Arkadaşlığımızın baki olmasını diliyorum.

Hiçbir zaman maddi manevi desteklerini esirgemeyen hep yanımda olan annem Ülkü BAŞTÜRK ve babam Özcan BAŞTÜRK'e biricik kız kardeşim Asiye BAŞTÜRK NAR'a ve dünyaya getirdiği sevgili yeğenim Kerem Asaf NAR'a, bir anne gibi üzerime titreyen teyzem Asiye KAPLAN'a ve bu günleri görmesini çok istediğim her zaman aklımda, kalbimde olan merhum dayım Abdurrahman KAPLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

**Balıkesir, 2023**

**Tuğçe Beyza BAŞTÜRK**

# 1. GİRİŞ

Geleneksel Portland çimentosu (GPÇ) ile üretilen beton inşaat sektöründe çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Geleneksel Portland çimentosu, en yaygın kullanılan bağlayıcı malzemedir. Portland çimentosu üretimi sırasında yüksek enerji ihtiyacı oluşturan ve atık olarak yüksek miktarda karbondioksit (CO<sub>2</sub>) açığa çıkaran bir malzemedir [1].

Geleneksel Portland çimentosu üretiminin neden olduğu karbondioksit miktarı, küresel karbondioksit emisyonunun yaklaşık %10'unu oluşturmaktadır [2]. Üretilen çimento çeşidine göre değişiklik göstermekle birlikte, bir ton geleneksel Portland çimentosunun (GPÇ) üretiminde 0,6-1 ton arasında CO<sub>2</sub> oluşturulmaktadır. Yıllık GPÇ üretiminde ki artış oranının 2050'ye kadar yaklaşık %50 olması beklenmektedir [3].

Sanayi sektörü, toplam küresel enerji tüketiminin yaklaşık olarak %30 ile %70'inden sorumludur ve bunun önemli bir kısmı çimento endüstrisindeki tüketimden kaynaklanmaktadır. Çimento üretiminde tüketilen enerjinin %40 kadarı klinker öğütmeye yönelik olmak üzere yaklaşık 110 kWh/t elektrik enerjisi gerektirir [4]. Çimento üretimiyle sürdürülebilir enerji ihtiyacı ve karbondioksit salınımı doğrultusunda çevre kirliliği problemi de meydana gelmektedir. CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması küresel bir ihtiyaç oluşturmaktadır ve mevcut emisyon oranının devam etmesi halinde gelecek nesiller için gerçek bir tehdit meydana getirecektir [5].

Bunlar gibi çeşitli sebepler doğrultusunda, var olan beton talebini karşılamak ve CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmak için yeni, düşük CO<sub>2</sub> emisyonlu, düşük maliyetli, düşük enerji tüketimine sahip yeni bağlayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. İnorganik polimer betonlar veya “*Geopolimerler*”, çevresel açıdan sürdürülebilir bir yapı ve yapı ürünleri endüstrisinin önemli bir unsurunu oluşturma potansiyeline sahip yeni mühendislik malzemeleri olarak ortaya çıkmıştır [6].

Geopolimerler, dünya çapında birçok araştırmacı tarafından araştırılan, incelenen ve kullanılan yeni malzemelerdir. Terminolojik açıdan geopolimer çimento, geleneksel Portland çimentosu gibi oda sıcaklığında sertleşen bir bağlayıcı sistemdir. Geopolimer çimento ulaşım altyapısı, inşaat ve açık deniz uygulamalarında kullanım için geleneksel

Portland çimentosuna gerçek bir alternatiftir. Karbondioksit emisyonunu kayda değer biçimde azaltmak için kaolin vb. gibi az işlenmiş doğal malzemeler veya uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. gibi atık sanayi ürünlerin kullanılması sayesinde, evre dostu, düşük maliyetli ve düşük enerji tüketimini sağlayan yapı malzemesidir. Aynı zamanda geleneksel betonların dayanıklılık sorunlarının birçoğuna karşı direnç gösterir [7,8].

Bu çalışmada yüksek fırın cürufu, F sınıfı uçucu kül ve kolemanit atığı gibi puzolanik özelliklere sahip olan bağlayıcı malzemeler ile alkali silikatların aktive edilmesiyle geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Hazırlanan geopolimer harç numunelerinin uygulanan deneyler sonucunda mekanik özellikleri ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir.

## 2. GENEL BİLGİLER

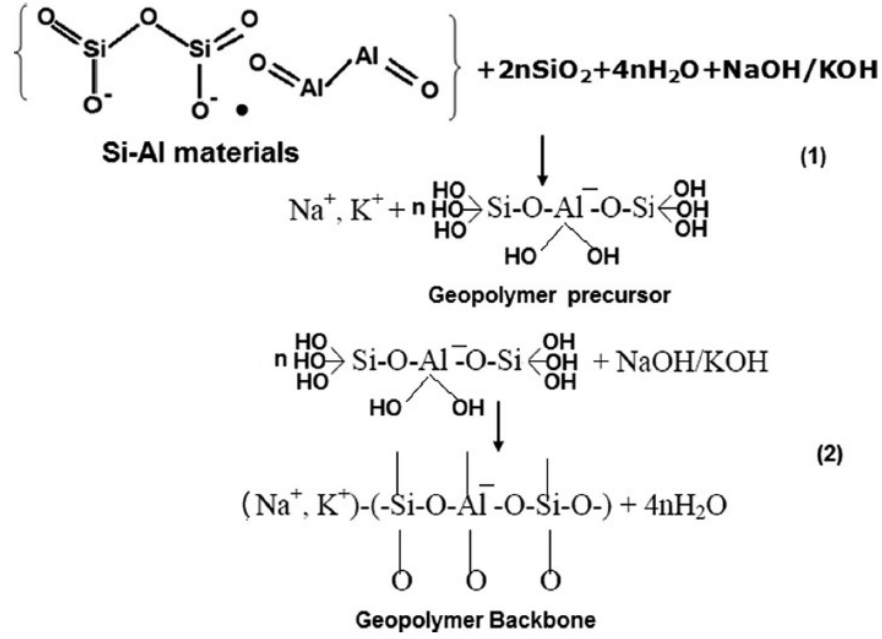
### 2.1 Geopolimerin Tanımı

Geopolimer olarak bilinen yeni bir bağlayıcı malzeme ilk olarak 1978 yılında Davidovits tarafından tanıtıldı. Alüminosilikat malzemelerin yüksek alkali çözeltilerle (hidroksitler, silikatlar) reaksiyonu sonucunda geopolimerler oluşur. Geopolimerler matris oluşumu ve mukavemeti için geleneksel Portland çimentosunun (GPC) oluşturduğu, kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jeli gerektirmez, ancak gerekli mukavemet seviyesini elde etmek için alüminat ve silikatın polikondensasyonunu kullanır. Bu durumda meydana gelen reaksiyon bir polimerizasyon süreci olduğundan, Davidovits bu bağlayıcıları temsil etmek için “*Geopolimer*” terimini icat etmiştir [9, 10].

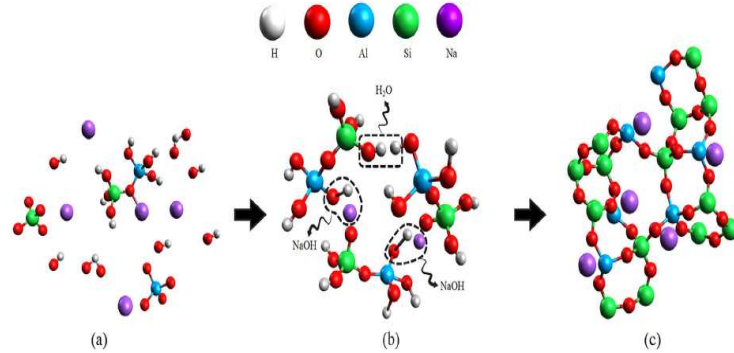
Geopolimerlerin iki ana bileşeni vardır, bu bileşenler kaynak malzemeler ve alkali sıvılardır. Alüminasilikat bazlı geopolimerler için kaynak malzemeler Silisyum (Si) ve Alüminyum (Al) açısından zengin olmalıdır. Bu malzemelere örnek kaolinit, killer vb. gibi doğal mineraller olabilir. Alternatif olarak uçucu kül, silis dumanı, cüruf, pirinç kabuğu külü vb. gibi yan ürün malzemeler bağlayıcı malzemeler olarak kullanılabilir. Alkali sıvılar, genellikle Sodyum veya Potasyum bazlı çözünür alkali metallere aittir. Geopolimer üretiminde kullanılan en yaygın alkali sıvılar, sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) veya potasyum hidroksit (KOH), potasyum silikat ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) kombinasyonudur [10].

### 2.2 Geopolimerlerin Kimyası

Geopolimer, alüminosilikat içeren bazı atık malzemenin alkalilerle polikondensasyon reaksiyonu sonucunda oluşan inorganik bir polimerdir. Bu reaksiyona verilen ad geopolimerizasyondur. Geopolimerler,  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  ve  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  tetrahedranın kombinasyonu ile oluşturulan yarı kristalli 3 boyutlu alüminosilikat çerçeve yapılarıdır. Geopolimerin priz alma ve sertleşme mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır. Geopolimerizasyon işlemi, alüminosilikat içeren hammaddelerin alkali çözeltilerde çözülmesiyle meydana gelebilir ve bu da alüminat ve silikat monomerlerinin oluşumuna yol açar. Bunlar daha sonra oligomerlere ve ardından geopolimerlere dönüştürülür. Su, çözünme sırasında kullanılır ve Şekil 2.1’de gösterilen denklemler (1-2) tarafından verilen polimerizasyonda serbest bırakılır. Şekil 2.2’de geopolimerizasyon şeması gösterilmektedir [11].



Şekil 2.1: Geopolimer malzemelerin oluşumunun şematik gösterimi [11]



Şekil 2.2: Geopolimerizasyon işleminin aşamalarının görseli: (a) alüminosilikatın yeniden düzenlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşmasından jel oluşumu ve (c) polimerizasyon [11]

Davidovits geopolimer hazırlama işleminin 6 kesin adım olduğunu ifade etmiştir. Aslında, alkali aktivasyon geopolimerizasyonun ilk adımıdır. Hazırlama işlemi kimyasal reaksiyonu takip eder ve her adım bir işlemle bağlanır:

1. Alkali-aktivasyon (alkalinasyon)
2. Silikatların depolimerizasyonu
3. Oligo-silikat jel oluşumu
4. Polikondansasyon
5. Ağ oluşturma
6. Geopolimer katılaşma [12].



Geopolimerler, hâlihazırda çeşitli endüstriyel gelişmelerde incelenen ve uygulanan aşağıdaki moleküler birimleri (veya kimyasal grupları) içerir:

- Si-O-Si-O- siloxo, poly(siloxo),
- Si-O-Al-O- sialate, poly(sialate),
- Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo),
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly(sialate-disiloxo),
- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone,
- Al-O-P-O- alumino-phospho, poly(alumino-phospho),
- Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O- ferro-sialate, poly(ferro-sialate [13]).

### 2.3 Geopolimerin Türleri ve Kullanım Alanları

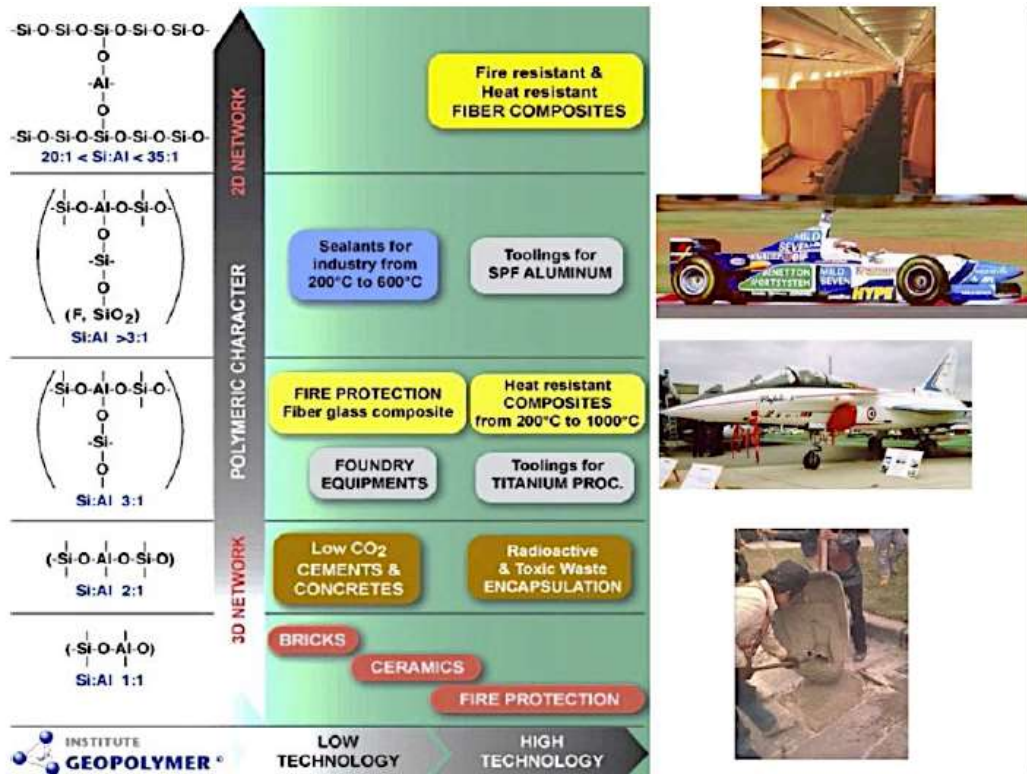
Bugüne kadar yapılan çalışmalar doğrultusunda tanımlanmış 9 farklı çeşit geopolimer malzeme aşağıda sırayla verilmiştir:

- 1- Camsuyu esaslı geopolimer, polisiloksonat (Si: Al= 1: 0)
- 2- Kaolin hidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat(Si: Al= 1: 1)
- 3- MK ( metakaolinit) esaslı geopolimer, poly(sialate-siloxo) (Si: Al= 2: 1)
- 4- Kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al= 1,2,3)
- 5- Kayaç esaslı geopolimer, poly(sialate-multisiloxo) (1< Si: Al<5)
- 6- Silika esaslı geopolimer, sialate ve siloxo bağlı poly(siloxonate) (Si: Al>5)
- 7- Fosfat esaslı geopolimer
- 8- Uçucu kül esaslı geopolimer
- 9- Organik maden esaslı geopolimer [14].

Davidovits'e göre geopolimer malzemeler, geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu uygulama alanları: yangına dayanıklı malzemeler, dekoratif taş eserler, ısı yalıtımı, ateşe dayanıklı ürünler, termal şok refrakterleri, döküm endüstrisi, çimento ve betonlar, altyapı onarımı ve güçlendirmesi için kompozit malzemeler, uçak içi ve otomobiller için yüksek teknolojili kompozitler, yüksek teknoloji reçine sistemleri, radyoaktif ve toksik atık muhafazası vb. şeklindedir. Geopolimer malzemelerin uygulama şekli, Si: Al oranı açısından kimyasal yapıya göre belirlenir [12].

Davidovits, Şekil 2.3'de görüldüğü gibi geopolimer malzemenin kullanım alanlarını şu şekilde sınıflandırmıştır:

- Si: Al = 1:1 Geopolimer seramikler ve düşük CO<sub>2</sub> emisyonlu üretim teknikleri.
- Si: Al = 2:1 Düşük CO<sub>2</sub> emisyonu ve düşük enerji talebi olan geopolimer çimentolar ve betonlar; toksik, radyoaktif ve nükleer atıkların ve maden atıklarının işlenmesi ve kontrol altına alınması.
- Si: Al = 3:1 Prototiplerin ve aletlerin üretimi için ateşe ve sıcaklığa dayanıklı bileşikler.
- Si: Al > 3:1 Korozyona ve sıcaklığa dayanıklı boyalar, kaplamalar ve harçlar için yüksek teknoloji ürünü geopolimer reçineler ve bağlayıcılar, Alüminyum endüstrisi için aletler.
- 35:1 > Si: Al > 20:1 İnşaat mühendisliği altyapısının onarımı ve güçlendirilmesi için havacılık ve otomotiv için ateşe ve ısıya dayanıklı, karbon fiber ve diğerlerinden yapılmış yüksek teknoloji kompozitler [12].



Şekil 2.3: Geopolimer malzemenin kullanım alanları [12]

Geopolimerin inşaat sektöründe kullanım alanları sıralanmıştır:

- Prefabrik yapı endüstrisi.
- Taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri üretimi.
- Zemin iyileştirmesi.
- Tehlikeli madde ve nükleer atıkların depolanması.
- Ağır iklim koşullarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi.
- Alt ve üst yapılarda güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin onarımı.
- Beton esaslı yol kaplamaları [14].

## 2.4 Malzemeler

### 2.4.1 Kolemanit (K)

Bor minerallerinin ve bor minerallerinden elde edilen ürünlerin geniş kullanım alanı bulunmakta ve bu kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Bor minerali ve ürünleri; seramik, cam, tarım, tekstil ve metalürji gibi pek çok sanayi kolunda kullanılmaktadır [15]. Türkiye bor oksit ( $B_2O_3$ ) bazında yaklaşık 851.000 milyon ton ile dünyanın en zengin ülkesidir. Türkiye toplam rezervde %72.3'lük orana sahiptir [16]. Dünya rezervlerinin büyük bir kısmının ülkemizde olmasından dolayı, bor mineralinin önemi herkes tarafından bilinmektedir. Bu sebeple bor mineralinin en uygun şekilde değerlendirilmesi gerekir. Ticari öneme sahip en önemli bor mineralleri boraks ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ), kolemanit ( $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$ ), üleksit ( $NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$ ) ve kernit ( $Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$ ) olarak sayılabilir [17].

Bor minerallerinin en yaygın olanı kolemanittir. Türkiye'de Emet, Bigadiç ve Kestel yataklarında bulunur. Kolemanit, mohs cetvelinde sertliği 4-4.5, özgül ağırlığı  $2.42 \text{ g/cm}^3$ 'dür. Suyun içerisinde yavaş bir şekilde, hidroklorik asit (HCl) içerisinde hızlı bir şekilde çözünen  $B_2O_3$  içeriği %50.8 olan bor mineralidir. [18].

Kolemanit mineralinin yüksek sıcaklıkta ( $80-90^\circ\text{C}$ ) sülfürik asitli çözeltilerde çözüdürerek, safsızlıkların ayrılması, süzülme, soğutulma, buharlaştırılma, kristallendirme ve kristallerin yıkanıp kurutulması gibi bir dizi işlemin ardından borik asit elde edilmektedir. Türkiye'de ham bor ürünlerinin elde edilmesinden sonra yoğun miktarda  $B_2O_3$  içerikli atık ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar atık havuzlarında depolanıp muhafaza edilmektedir. Balıkesir/Bigadiç bölgesinde tamamen dolmuş olan 4 adet atık

havuzu bulunmaktadır [19]. Ortaya çıkan bu atıkların farklı sektörlerde değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

#### 2.4.2 Uçucu Kül (UK)

Beton üretiminde kullanılan mineral katkılardan bir tanesi de uçucu küldür. Uçucu kül yapay puzolandır. Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmekte kullanılan kömürün yanması sonucunda oluşan atık külün %75-85'i baca gazları ile kazandan çıkar, oluşan atık külün adı uçucu küldür. Taşkömürünün %10-15'i, linyit kömürünün %20-50'si atık kül meydana getirir. Santrallerde baca gazlarından uçucu küllerin tutulması için elektroflitreler kullanılmaktadır. Boyutları 0.5-200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel yüzeyli parçacıklardır özgül ağırlığı 2.2-2.7 g/cm<sup>3</sup> arasındadır [20].

Uçucu küller, iki sınıfa ayrılmaktadır. Bu iki sınıf ASTM C 618'de yer almaktadır. Bu iki sınıftan biri, bitümlü kömürlerin kullanılmasıyla oluşan  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  oranı toplam % 70'in üzerinde olan F sınıfı uçucu küldür. Diğer uçucu kül sınıfı ise genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerin kullanılmasıyla oluşan  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$  oranı toplam % 50'in üzerinde olan C sınıfı uçucu küllerdir [21].

#### 2.4.3 Yüksek Fırın Cürufu (C)

Beton üretiminde kullanılan önemli mineral katkılardan bir diğeri ise granüle yüksek fırın cürufudur. Yüksek fırın cürufu da yapay puzolanlar arasında yer almaktadır. Yüksek fırın cürufu metalurji tesislerindeki fırınlarda demir filizi gangı, kok, kireç gibi maddelerin 1450-1550 °C arasında demirin üretilmesi esnasında ergimiş durumda atık madde olarak elde edilen ve ana ürün tipine ve üretim yöntemine göre farklı özellikte oluşan mineral katkıdır [22].

Türkiye'de 2006 yılı sonu itibariyle, yaklaşık 1244 milyon ton demir çelik üretimi yapılmıştır. Bu dünya demir çelik üretiminin %1.87'ne denk gelmektedir. Oldukça yüksek sıcaklıkta olan yüksek fırın cürufu çok hızlı bir şekilde soğutulduğunda, amorf yapıda granüle halde ince bir malzeme haline gelmektedir. Yüksek fırın cürufu yüksek miktarlarda  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$  içerdiğinden bağlayıcı özellik gösterir. Bağlayıcı özelliği sayesinde çimento üretiminde ve beton katkı maddesi olarak kullanılabilir. Yüksek fırın cürufunun depolanması zor olduğundan, beton sektöründe kullanılması ekonomik sürdürülebilirlik ve çevrenin korunması bakımından önem taşır [23].

#### **2.4.4 Sodyum Silikat**

Sodyum silikat su camı olarak da bilinen kimyasal bileşendir. Genel formu renksizdir ve formülü  $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n$ 'dur. Burada “n” ifadesi çeşitli endüstriyel alanlardaki kullanımına göre farklı değerler almaktadır. Genellikle deterjan ve sabun imalatı üzere, petrokimya endüstrisi, silika jel üretimi, tekstil, seramik, çimento, döküm, yalıtım malzemeleri, su arıtımı gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Sodyum silikat üretimi, 1300-1500 °C aralığında, kuvars kumu ile sodyum karbonatın ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ergitilmesiyle yapılmaktadır. Kuvars kumu genellikle %99,7  $\text{SiO}_2$  ile düşük miktarlarda magnezyum, demir, alüminyum ve kalsiyum oksitlerini içermektedir. Elde edilen katı formdaki sodyum silikatın uygun buhar basıncı ve sıcaklık altında yarı viskoz sıvıya çözdürülmesiyle sodyum silikat üretimi tamamlanmaktadır. Su camının tek başına puzolonik reaksiyonu başlatmak için yeterli aktivasyon potansiyeli yoktur. Sodyum silikat alkaliniteyi ve genel numune dayanımını arttırmak için NaOH veya KOH ile karıştırılır [24-25].

#### **2.4.5 Sodyum Hidroksit**

Halk arasında adı kostik olarak bilinen sodyum hidroksitin formülü NaOH'dur. Ucuz olması ve kolay temini alkali aktivatör olarak kullanımında önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Beyaz pul veya boncuk şeklindedir. Su ile ısı vererek çözünür. Saklama koşullarına dikkat edilmelidir nemden etkilenip bozulabilmektedir. Potasyum hidroksit ile aynı özellikleri göstermektedir fakat daha az yakıcı bir bazdır [26].

### **2.5 Konu ile İlgili Önceki Çalışmalar**

Durgun ve diğ. [27] yapmış oldukları çalışmada, ağırlıklı olarak  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  ve CaO içeren kolemanit atığı (CW) içeren harç karışımlarının taze ve bazı sertleşmiş harç özelliklerine polipropilen (PP) lif kullanım oranının etkisi araştırmışlardır. Geopolimer harç numunelerinin 28 ve 56 günde su emme kapasitesi, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı belirlenmiştir. 300 °C ve 600 °C'ye maruz kalan numunelerin dayanım azalması karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına göre, karışımlardaki CW ve PP elyaf miktarının artması ile hedef akış değerini sağlamak için katkı talebi ve karışımların 28 günlük su emme kapasitesi artarken, 28 günlük basınç dayanımları azalmıştır. Ancak, kolemanit atığı içeren numunelerin 56 günlük su emme kapasitesi ve basınç dayanım değerlerinde kayda değer bir değişiklik olmazken, lif ilavesi içeren numunelerde su emme kapasitesi artmış ve

basınç dayanımı azalmıştır. Hem kolemanit atığı hem de PP fiber içeren numuneler, yüksek sıcaklık dayanımı açısından daha iyi performans göstermiştir.

Uysal ve diğ. [28], yapmış oldukları çalışma kapsamında, bağlayıcı olarak metakaolin ve metakaolin ile belli oranlarda silis dumanı ve kolemanit atığını yer değiştirerek kullanılmıştır. Hazırlanan geopolimer harçların mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Üretilen geopolimer harçlarda polipropilen lif içeren ve içermeyen numunelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. Ultrases geçiş hızı, aşınma direnci, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, SEM, XRD analizi sonuçlarını elde etmiştir. Kolemanit atığı ve silis dumanı içeren numuneler kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında basınç dayanımında %2.02 ile %11.48 oranında artış, eğilme dayanımında %14.61 ile %29.44 oranında artış, aşınma direncinde ise %10.59 ile %20 oranında artış görülmüştür. Yapılan çalışma ile kolemanit atığının geopolimer malzeme üretiminde kullanılabilir bir malzeme olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Durgun ve Sevinç'in [29], çalışmalarında, öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBFS), atık cam tozu (GP) ve kolemanit cevheri atıkları (CW) ile üretilen betonların artık dayanımları araştırılmıştır. Ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında GGBFS ve GP, ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranında CW kullanılmıştır. 28 ve 90 günlük kürlenmiş numuneler 1 saat süreyle 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800°C ve 1000 °C'ye tabi tutulmuştur. Bu yüksek sıcaklık işleminden sonra test numuneleri su soğutma ve hava soğutma olmak üzere iki farklı soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Betonların kalan dayanımları basınç dayanım testleri ile tayin edilmiştir. Ayrıca ağırlık kayıpları ölçülüp ve ultrasonik darbe hızı (UPV) testleri yapılmıştır. Numunelerin yüzey çatlama görüntü işleme tekniği ile incelenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra numunelerin mikro yapıları SEM görüntüleri ile incelenmiştir. Sonuçlara göre kolemanit atığı içeren betonlar diğer serilere göre daha iyi performans sergilemiştir.

Lotti ve diğ. [30], yaptıkları çalışmada, radyasyon koruyucu betonlarda agrega olarak kullanılan sulu bir Ca-borat minerali olan kolemanitin dehidrasyon mekanizmasını yerinde DSC, TG ve XRD verileri yardımıyla karakterize etmişlerdir. Isotropik veya anizotropik, bir agrega olarak kullanılan belirli bir hidratlı bileşiğin termal hacim (ısıtma veya soğutma altında) genişmesi ve dehidrasyon mekanizması, bir betonun davranışını anlamak ve tahmin etmek için önemli parametrelerdir. Yapılan çalışma sonucunda kolemanitin

radasyon kalkanı olarak kullanılacak üretilecek betonlarda kullanılabileceği belirlenmiştir.

Aygörmez ve diğ. [31], çalışmalarında, geopolimer harç üzerinde dayanıklılık testleri gerçekleştirmişlerdir. Testler 365 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harç, metakaolin (ağırlıkça %90) ve kolemanit atığından (ağırlıkça %10) oluşturmaktadır. Çalışmada, dayanıklılık üzerinde ısı ve yaş-kuru kütleme yöntemlerinin ve poliolefin ve poliamid lif oranlarının (hacimce %0.5, 1.0 ve 1.5%) etkisi araştırılmıştır. Numuneler uzun süreli hidroklorik aside maruz kalma, donma-çözülme döngüleri ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, ıslak-kuru kütleme yönteminin geopolimerizasyonu ısı küründen daha fazla arttırdığını göstermektedir. Tüm dayanıklılık çalışmaları, geopolimerlerin kompakt yapısının, üretimden bir yıl sonra yapılan dayanıklılık testlerine dayandığını göstermiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ulaşılan sonuçları desteklemektedir.

Ali ve diğ. [32], çalışmasında, %30'a kadar kolemanit ikamesi ve farklı uzunluklarda bazalt lifi katkısının metakaolin esaslı geopolimer harçların mühendislik özelliklerini etkisini incelemiştir. Üretilen 10 seride ilk olarak 7. gün ve 28. gün basınç ve eğilme dayanımları, UPV, aşınma direnci testi, gözeneklilik, birim ağırlık ve su emme sonuçları incelenmiştir. Dayanıklılık testleri olarak 20 ile +20 C arasında 90 döngü donma-çözülme, 250, 500 ve 750 °C yüksek sıcaklık testleri uygulanmıştır. Ayrıca geopolimer numuneleri 3 ay boyunca %10 Hidrosülfürik asite (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) maruz bırakılmıştır. Dayanıklılık testleri sonunda Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), X-ışını Kırınımı (XRD), Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), Termogravimetrik/Diferansiyel Termal Analiz (TGA-DTA) analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, %10 kolemanit ikamesinin, basınç dayanımı sonuçlarını arttırdığını ve daha yüksek oranlarda düşürdüğünü göstermiştir. %10 kolemanit ikamesi ile 28 günlük basınç dayanımı sonuçları %1,71 oranında artarken, %20 ve %30 kolemanit ikamesi durumunda basınç dayanımında sırasıyla %13,64 ve %26,99 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Geopolimer numunelerin donma-çözülme, yüksek sıcaklıklar ve sülfürik asit etkilerinde kararlılığını koruduğu görülmüştür.

Aygörmez ve diğ. [33], çalışmasında, %20'ye kadar silis dumanı ve kolemanit atığının ilave edilmesi ile üretilen metakaolin esaslı geopolimer numuneler, 300°C, 600°C, 900 °C 'de yüksek sıcaklık etkilerine, 5, 15 ve 25 döngü ıslanma-kurutma etkisine ve 56 ve 300

döngü donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Testler sonunda basınç ve eğilme dayanımları, ultrasonik darbe hızı ve ağırlık değişimlerinin sonuçları incelenmiştir. Ek olarak mikro-bilgisayarlı tomografi (CT), XRD ve SEM analizleri ile mikroyapı özelliklerinin incelenmesi ve görsel inceleme yapılmıştır. Bağlayıcı olarak %100 metakaolin içeren geopolimer harç numuneleriyle bağlayıcı olarak silis dumanı ve kolemanit atığı içeren geopolimer harç numunelerinin deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Silis dumanı ve kolemanit atığı içeren numunelerin eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarında artış meydana gelmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık deneyinde geopolimer harç numunelerinin dayanımı Portland çimentosu harçlara göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Arslan ve diğ. [34], yaptıkları çalışmada, metakaolin ve kolemanit atığının bağlayıcı malzeme olarak kullanılması ile üretilen geopolimer harç numunelerinin kürlenme sistemlerinin etkisi altında mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. İki tür kürlenme yöntemi kullanılmıştır bu yöntemler ıslanma-kuruma ve ısı kürdür. Numunelerin ultrasonik darbe hızı, su emme, birim ağırlık değerleri eğilme ve basınç dayanımı ve aşınma testi sonuçları incelenmiştir. Numunelere 200°C, 400°C ve 600 °C'de yüksek sıcaklık deneyi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık deneyinden sonra mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Yüksek sıcaklık deney sonrasında, kalan dayanım (residual strength) değerleri yüksek bulunmuştur. SEM, FT-IR ve TGA-DTA analizlerinin sonuçları incelendiğinde yüksek sıcaklık deneylerinde geopolimer harç numunelerinin kararlı yapılarını muhafaza ettiği gözlemlenmiştir. Geopolimer numunelerinde 90 donma-çözülme döngüsüne rağmen dayanım değerleri yüksek ve ultrasonik darbe hızı sonuçlarındaki düşüş sınırlı kalmıştır.

Aygörmez ve diğ. [35], çalışmalarında, kür koşullarının kısa ve uzun vadeli etkileri birlikte incelenmiş ve %90 metakaolin ve %10 kolemanit atığı (ağırlıkça) içeren bir geopolimer numunesi kullanılmıştır. Ayrıca hacimce %0.5, %1.0 ve %1.5 olarak poliolefin ve poliamid lifleri kullanılmıştır. Isı küre ile kür için ıslatma-kurutma yöntemi uygulanmıştır. Si-O-Al bağları, ıslatma-kuruma kürlenme ile daha güçlü olacak şekilde kurulmuştur. 14, 56, 90 ve 365 günlük eğilme ve basınç dayanımları sonuçları belirlenmiştir. Ayrıca 365 gün sonra yüksek sıcaklık testi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık testi öncesi ve sonrasında SEM, TGA-DTA ve FTIR analizleri yapılmıştır. 14 günlük ve 90 günlük sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapıldığında, 90 günlük sonuçlar 14 güne göre dayanım azalması göstermiştir. 365 günün sonunda dayanımdaki azalmalar düşmüş ve 90 güne yakın



dayanım sonuçları elde edilmiştir. Kütleme için yüksek sıcaklıkların kullanılmasının, katı bağlayıcı malzemelerin çözünmesini ve reaksiyon ürünlerinin oluşumunu destekleyerek erken yaş mukavemetinin gelişmesine katkı sağladığı düşünülmektedir. Öte yandan hızla gelişen reaksiyon ürünlerinin kalitesi ve mikroyapısı üzerindeki olumsuz etkilerden dolayı dayanım düşüşleri gözlenmiştir. Tüm olumsuz etkilere rağmen geopolimerin yapısı korunmuştur.

Aygörmez ve Canpolat [36], yapmış oldukları çalışmada metakaolin, kolemanit atığı, silis dumanı ve cürufun bağlayıcı olarak kullanılması ile üretilen geopolimer harçların sülfat ve klorür dayanıklılık davranışlarını incelemiştir. Üretilen geopolimer harçlar % 10 derişimli magnezyum sülfat ( $MgSO_4$ ) çözeltisi, sodyum sülfat ( $Na_2SO_4$ ) çözeltisi ve sodyum klorür ( $NaCl$ ) çözeltisi ile 12 aya kadar maruz bırakılmıştır. Geopolimer harçların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, mikroyapı (X-ışını Kırınımı (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)), ağırlık değişimi ve görsel inceleme gibi özellikleri incelenmiş ve dayanıklılık davranışları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, %10 kolemanit atığı ve %20 silis dumanı ilavesiyle üretilen karışım tasarımı aralığında en yüksek basınç dayanımını gösterdiğini kanıtlamıştır. Geopolimer harçlarda, üç ay sonra sodyum klorür ve sodyum-magnezyum sülfat etkileri nedeniyle basınç dayanımında bir artış gözlemlenirken, altı ay sonra bir azalma gözlemlenmiştir.

Aygörmez [37], yapmış olduğu çalışmada bağlayıcı olarak kalsine edilmiş bentonit (metabentonit (MB)) ve kalsine edilmiş zeolit (metazeolit (MZ)) kullanmıştır, bentonit ve zeolit ağırlıkça dört farklı yüzde (25%, 50%, 75% ve 100%) birbirlerinin yerine kullanılmıştır. Ayrıca, standard kuma uçucu kül (FA) beş farklı oranda (15%, 30%, 45%, 60% ve 75%) ikame edilmiştir. 10 geopolimer serisi, 7., 28., ve 90. günde eğilme dayanımı ve ultrasonik darbe hızı (UPV) testlerine tabi tutulmuştur. Dayanıklılık koşulları sonrası etkileri görmek için geopolimer harçlara 450 döngü donma-çözülme testi ve yüksek sıcaklık testi (200°C, 500°C ve 800 °C) uygulanmıştır. Dayanıklılık testleri ile birlikte, değişen UPV, ağırlık ve dayanım sonuçları da elde edilmiştir. Sonuçlarda uçucu külün %30'a kadar agregaya ikame edilip kullanımı sonuçlara olumlu yansıyan puzolanik özelliği artırmıştır. Uçucu külün %30 oranında agregaya ikame edilmesiyle üretilen seri dayanıklılık ve durabilite testlerinde en iyi sonucu vermiştir.

### 3. MALZEMELER VE DENEY YÖNTEMLERİ

#### 3.1 Geopolimer Harçlarda Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1 Kolemanit Atığı (K)

Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan kolemanit atığı Bigadiç Eti Maden firmasından tedarik edilmiştir. Kolemanit atığı uçucu kül ve cüruflla belli oranlarda (%5, %10, %20) yer değiştirerek bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Özgül ağırlığı  $2.42 \text{ g/cm}^3$  olan kolemanit atığı için K kısaltması kullanılmıştır. Kolemanit atığının kimyasal özellikleri Tablo3.1’de verilmiştir. Şekil 3.1’ de kolemanit atığı görülmektedir.

**Tablo 3.1:** Kolemanit atığı kimyasal bileşimi

Kimyasal Özellikler %	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
K	29.34	0.59	0.19	0.02	21.34	16.22	0.06	0.27	7.67



**Şekil 3.1:** Kolemanit atığı

##### 3.1.2 Uçucu Kül (UK)

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Çanakkale Biga İçdaş firmasından tedarik edilmiştir. Karışımlarda farklı oranlarda bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül için UK kısaltması kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan F tipi uçucu külün kimyasal bileşimi Tablo 3.2’de görülmektedir. Şekil 3.2’de uçucu kül görülmektedir.

**Tablo 3.2:** Uçucu kül kimyasal bileşimi

Kimyasal Özellikler %	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
UK	54.94	20.90	10.91	-	3.59	1.87	1.99	2.41	-



**Şekil 3.2:** Uçucu kül

### 3.1.3 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Bu çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Balıkesir Altın Beton firmasından tedarik edilmiştir. Tablo 3.3’de yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi verilmiştir. Şekil 3.3’de yüksek fırın cürufu görülmektedir.

**Tablo 3.3:** Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi

Kimyasal Özellikler %	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
YFC	43.43	12.15	0.89	-	31.52	7.21	0.80	0.23	-



**Şekil 3.3:** Yüksek fırın cürufu

#### 3.1.4 Kuvars Kumu

Bu çalışmada Aydınlar Madencilik A.Ş.'den tedarik edilen kuvars kumu agrega olarak kullanılmıştır. Eşit miktarda 0-800  $\mu\text{m}$  ve 80-2000  $\mu\text{m}$  kuvars kumu karıştırılarak (%50-%50) oluşturulan kum karışımı kullanılmıştır. Agrega olarak kullanılan kuvars 1125 g olarak kullanılmıştır. Ayrıca kuvars ile kolemanit yer değiştirilerek kolemanitin agrega olarak kullanılması hedeflenmiştir. Hazırlanan kuvars kumu karışımının elek analizi sonuçları Tablo 3.4'de verilmiştir. Hazırlanan karışımın incelik modülü  $ik=2.91$ 'dir. Şekil 3.4'de 0-800  $\mu\text{m}$  kuvars kumu ve Şekil 3.5'de 800-2000  $\mu\text{m}$  kuvars kumu görülmektedir.

**Tablo 3.4:** Tane büyüklüğü dağılımı

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	Kap	0.125	0.25	0.5	1.0	2.0
Kalan (%)	100	99	94	74	24	0



**Şekil 3.4:** 0-800 µm kuvars kumu



**Şekil 3.5:** 800-2000 µm kuvars kumu

### **3.1.5 Sodyum Silikat**

Bu çalışmada kullanılan sodyum silikat Palkim Kimya firmasından satın alınmıştır. Özgül ağırlığı 1,526 g/cm<sup>3</sup>'dür. Sodyum silikatın kimyasal özellikleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

**Tablo 3.5:** Sodyum silikatın kimyasal özellikleri

Na <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Yoğunluk (g/ml) (20°)	Fe (%)	Ağır Metaller (Pb gibi) (%)
14.87	29.36	1.526	≤0.001	≤0.00005

### 3.1.6 Sodyum Hidroksit

Palkim Kimya firmasından tedarik edilen sodyum hidroksit bu çalışmada alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Geopolimer harç üretiminde kullanılmak için hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisi 12M'dir. Şekil 3.6'da katı sodyum hidroksit peletleri görülmektedir.



**Şekil 3.6:** Sodyum hidroksit

### 3.2 Deneysel Çalışma

Bu çalışma kapsamında oda sıcaklığındaki kür koşulları altında kolemanit atığı katkısının etkileri incelenmiştir. Bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kolemanit atığı kullanılmıştır. Alkali aktivatör çözeltisi ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanmıştır. Geopolimer harçların hazırlanmasından bir gün önce 12M sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanmıştır. Sodyum hidroksit peletleri 12M olacak oranda su ile birleştirilmiş soğumaya bırakılmıştır. Üretim günü bağlayıcı malzemeler sodyum silikat ve 12M sodyum hidroksit birleştirilmiştir. Karışımlarda ağırlıkça kum/bağlayıcı oranı 2.5, sodyum hidroksit/sodyum silikat oranı 1/2'dir. Bağlayıcı/alkali aktivatör oranı serilerde değişiklik göstermektedir. Karışım oranları Tablo 3.5'de gösterilmektedir. Kontrol serisi (KS)'dir bağlayıcı olarak uçucu kül ile cüruf kullanılmıştır. Kolemanitin

uçucu küle ikame edilip cüruf miktarının sabit kaldığı seriler (KC) olarak kodlanmış ikame oranı kodun önüne yazılmıştır. Aynı şekilde kolemanitin cürufa ikame edilip uçucu külün sabit kaldığı seriler (KUK) olarak kodlanmış kolemanitin ikame oranı kodun önüne yazılmıştır. 7. günde en yüksek basınç dayanımı sonucunu veren 5KUK serisinde kolemanit atığı kuvars kumuna ikame edilmiştir. Bu seriler (AK) olarak kodlanmış kolemanitin kuvars kumuna ikame oranı kodun önünde belirtilmiştir, Şekil 3.7’de bağlayıcı ile alkali aktivatör ile karışımı görülmektedir.

**Tablo 3.6:** Geopolimer harçların karışım oranları

No	Karışım	Agrega Kuvars Kumu (g)	Agrega Kolemanit (g)	Bağlayıcı Uçucu Kül (g)	Bağlayıcı Cüruf (g)	Bağlayıcı Kolemanit (g)	NaOH (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)
1.	KS	1125	-	225	225	-	105	210
2.	5KC	1125	-	202,5	225	22,5	105	210
3.	50KC	1125	-	180	225	45	105	210
4.	20KC	1125	-	135	225	90	105	210
5.	5KUK	1125	-	225	202,5	22,5	90	180
6.	10KUK	1125	-	225	180	45	90	180
7.	20KUK	1125	-	225	135	90	90	180
8.	5AK	1068,75	56,25	225	202,5	22,5	120	240
9.	15AK	956,25	168,75	225	202,5	22,5	120	240
10.	25AK	843,75	281,25	225	202,5	22,5	150	300



**Şekil 3.7:** Bağlayıcı ve alkali aktivatörün birleştirilmesi

Hazırlanan geopolimer harçlar dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. Oda sıcaklığında kür için bırakılmıştır. Basınç dayanımı için 50x50x50 mm küp numuneler kullanılmıştır. Kullanılan küp kalıpları Şekil 3.8’de görülmektedir. Eğilme dayanımı için ise 40x40x160 mm prizma şeklinde geopolimer harç numunelerinin üretimi yapılmıştır. Şekil 3.9’da kullanılan prizma kalıp görülmektedir. Üretilen geopolimer harçlar mekanik ve durabilite deneylerine tabii tutulmuştur. Uygulanan deneyler aşağıdaki başlıklar altında açıklanmıştır.



**Şekil 3.8:** 50x50x50 mm küp kalıplar





**Şekil 3.9:** 40x40x160 mm prizma kalıp

### **3.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi**

Deneyde başlıklara yerleştirilen numunelerin kalıba döküm sırasında kalıbın yan tarafına gelen yüzeyi başlığa dik şekilde yerleştirilmiştir. Eğilme deneyinden sonra prizma numuneler iki parçaya ayrılmış, bu iki parçaya 40x40 mm ölçülerindeki başlıkla 250 N/s yükleme hızıyla basınç deneyi uygulanmıştır. Küp numuneler için uygun başlıkla 375 N/s yükleme hızıyla deney uygulanmıştır. Her seride 2 küp numunene ve eğilme deneyinde kullanılan 2 prizma numunesinin parçaları basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Her bir seri için küp ve prizma numunelerin basınç dayanımının ortalaması o serinin basınç dayanımı sonucunu oluşturmuştur. Basınç dayanımı değerleri, numunelerin kırılma yükünün kesit alana bölünerek bulunmaktadır. Şekil 3.10’da küp numuneye ait basınç dayanımı deneyi görülmektedir.

$$\sigma = P/A \quad (3.1)$$

$\sigma$ : Basınç dayanımı, (N/mm<sup>2</sup>),

P: Numunenin kırılma anında üzerinde bulunan kuvvet, (N),

A: Basınç kuvvetine dik yüzey alanı.



Şekil 3.10: Basınç dayanımı deneyi cihazı

### 3.2.2 Eğilme Dayanımı Deneyi

Deney için üretilen prizma numunelerin ölçüsü 40x40x160 mm boyutlarındadır. Deney aletinde mesnet açıklığı 100 mm'dir ve tek noktadan yükleme yapmaktadır. Deney aletine yerleştirilen numunelerin kalıba döküm esnasında kalıp yüzeyine gelen yan yüzü mesnetlere dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyinde her seriden 2 prizma numunesi kullanılmıştır. 2 prizma numunenin deney sonucunun ortalaması serinin eğilme dayanımı sonucudur. Şekil 3.11'de eğilme dayanımı deneyi görülmektedir.

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

$\sigma_e$ : Eğilme çekme dayanımı, (N/mm<sup>2</sup>),

P: Numunenin kırılma anında üzerinde bulunan kuvvet, (N),

L: İki mesnet arası uzaklık, (mm),

d: Prizma numunenin kesit yüksekliği, (mm),

b: Prizma numunenin kesitinin eni, (mm).



**Şekil 3.11:** Eğilme dayanımı deneyi cihazı

### 3.2.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Geopolimer harç numunelerinin ultrases geçiş hızı değeri eğilme, basınç deneylerinden önce, durabilite deneylerinden önce ve sonra tayin edilmiştir. Ultrases geçiş hızının birimi m/s'dir. Şekil 3.12'de ultrases geçiş hızı deneyi görülmektedir. Her bir geopolimer harç numunesi için okunan iki değer ortalama okuma sonucu olarak kaydedilmiştir. Okuma yapılmadan önce verici ve alıcı uca jel sürülmüştür.

Ultrases geçiş hızı sonucu betonun bünyesine bağlı olarak değişim gösterir. Ses dalgaları boşluktan geçemez, etrafından dolaşır bu durumda geçiş süresi artar sonucu düşürür. Boşluklu bir numunede ultrases geçiş hızı değerinin düşük olması beklenir. Boşluklu bir numunenin basınç dayanımı da boşluk oranıyla orantılı olarak düşük çıkacağından ultrases geçiş hızı betonun eğilme, basınç dayanımı ve diğer durabilite özellikleri hakkında fikir verir.



**Şekil 3.12:** Ultrases geçiş hızı deneyi

### **3.2.4 Yüksek Sıcaklık Deneyi**

28 günlük prizma ve küp geopolimer harç numuneleri yüksek sıcaklık deneyinden önce 24 saat etüvde kurutulmuştur. Etüv sıcaklığı  $100 \pm 5$  °C'dir. Uygulanan deney sıcaklıkları sırasıyla 300°C, 600°C ve 900°C'dir. Her seri için iki prizma ve iki küp numune teste tabii tutulmuştur. Numuneler fırına yerleştirilmeden önce ağırlıkları ve ultrases geçiş hızları kaydedilmiştir. Yüksek sıcaklık fırınının sıcaklık artış hızı dakikada 5 °C olacak şekilde ayarı yapılmıştır. Numuneler test sıcaklığına ulaştınca yüksek sıcaklık fırını 1 saat süreyle deney sıcaklığında sabit tutulmuştur. Yüksek sıcaklık deneyi sonlanınca ani sıcaklık değişimi ile numunelerin zarar görmemesi için numunelerin fırın içinde fırının kapağı açık halde oda sıcaklığına gelmeleri beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen numunelerin ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı değerleri kaydedilmiş daha sonra basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.13'de yüksek sıcaklık deney fırını görülmektedir.



**Şekil 3.13:** Yüksek sıcaklık deney fırını

### **3.2.5 Donma-Çözülme Deneyi**

Her seri için iki küp ve iki prizma numunesi 90 gün sonra donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Deney cihazı 4 saat  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve 4 saat  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ortamı sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Toplam 8 saatlik bu döngüye 1 çevrim denilmektedir. Numuneler 15 çevrim süresince deney cihazında kalmıştır. Numuneler yüksek sıcaklık deneyinde olduğu gibi donma-çözülme deneyinden önce de ultrases geçiş hızı sonuçları ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Numuneler etüvde kurutulmadan deney cihazına yerleştirilmiştir. Şekil 3.14’de donma-çözülme deneyi için yerleştirilen geopolimer harç numuneleri görülmektedir. 15 çevrimini tamamlayan numunelerin ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı değerleri kaydedilmiş ve daha sonra basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Donma-çözülme deneyinde numunelerin fiziksel değişikliklerine de dikkat edilmiştir.



**Şekil 3.14:** Donma-çözülme deneyi

### 3.2.6 Çözelti Etkisinin İncelenmesi

Geopolimer harç numuneleri 28 gün sonunda %10 derişimli Sodyum Sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), %10 derişimli Magnezyum Sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) çözeltilerine 2 ay ve 4 ay süreyle maruz bırakılmıştır. Numuneler plastik saklama kutularında oda sıcaklığında ( $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) muhafaza edilmiştir. Çözeltilerin emilimini arttırmak numunelere daha iyi nüfuz etmesini sağlamak için geopolimer harç numuneleri çözeltilerle dolu plastik kaplara konulmadan önce 24 saat etüvde  $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta kurutulmuştur. Çözeltilerin konsantrasyonunun korunmasını sağlamak için 30 günde bir çözeltiler yenilenmiştir. Çözelti etkisi öncesi etüvden sonra ultrases geçiş hızları ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Deney süresini tamamlayan geopolimer harç numuneleri plastik kaplardan çıkarılıp oda sıcaklığında ( $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) kurutulmuştur. Sonraki aşamada numunelerin ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı değerleri kaydedilmiş daha sonra basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çözelti etkisinden sonra görsel incelemeler yapılmış, fiziksel değişime dikkat edilmiştir. Şekil 3.15’de plastik saklama kutusunda magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinde bulunan numuneler gösterilmiştir.



**Şekil 3.15:** Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinde bulunan çözeltiler

## 4. DENEY SONUÇLARI

### 4.1 Mekanik Özellikler

Bu çalışmadan üretilen kontrol serisi (KS) ve kolemanit atığı katkılı diğer serilerin mekanik özelliklerini incelemek için, basınç, eğilme ve ultrases geçiş hızı testleri 7., 28. ve 90. günlerde uygulanmıştır.

#### 4.1.1 Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları

7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sonuçlarına bakıldığında genel olarak 7. güne göre 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımı değerlerinde yükseliş görülmüştür. Elde edilen basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.1 de ve Şekil 4.1'de verilmiştir. 7 günlük basınç dayanımı sonuçları KS ile karşılaştırıldığında 5KC, 5KUK ve 10KUK'da %11.70 ile %29.24 oranlarında yükseliş görülmüştür. 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarında KS en yüksek dayanımı sağlamıştır. 90 günlük basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında ise kontrol serisine göre sadece 5KC serisi %2.34'lük bir artış göstermiştir.

7 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde genel olarak 7. güne nazaran 28. ve 90. günlerde eğilme dayanımı artış göstermiştir. Kolemanit atığı ikameli serilerde 7 günlük eğilme dayanımı değerlerinde KS'nin eğilme dayanımına kıyasla %60.75 ile %0.38 oranları arasında artış olmuş, fakat 10KC'de %-0.38 20KC'de %-10.57 oranında düşüş olmuştur. 28 günlük değerlerde KS'ye göre eğilme dayanımında %-2.01 ile %-23.49 arasında düşüş olmuştur. Kolemanit atığının agrega ile yer değiştirdiği serilerde %18.79 ile %3.36 oranları arasında yükseliş görülmüştür. 90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında kontrol serisine göre 5KC, 10KC, 20KC, 5KUK serilerinin dayanımında %-3.39 ile %-14.24 oranlarında düşüş olmuştur. Diğer serilerde kontrol numunesine oranla %2.37 ile %13.90 oranları arasında yükseliş görülmüştür. Tablo 4.2'de eğilme dayanımı değerleri ve artış oranları verilmiştir. Şekil 4.2'de eğilme dayanımlarına ait grafik gösterilmiştir. Tablo 4.1'de ve 4.2'de verilen artış oranı değerleri yüzde olarak  $[(\text{numune dayanımı} - \text{kontrol numunesi dayanımı}) / \text{kontrol numunesi dayanımı} * 100]$  formülü ile hesaplanmıştır.

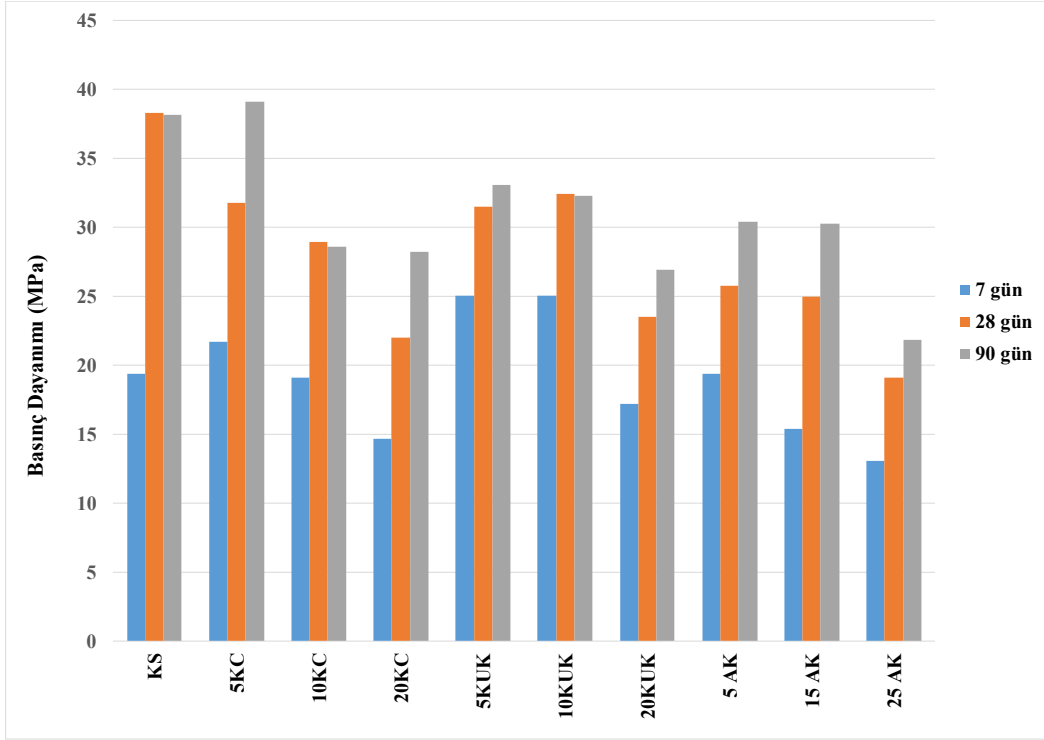
Kolemanit atığının %5 ve %10 oranında ikamesi durumunda basınç dayanımında artış görülmüştür. %20 ikame oranında basınç dayanımı düşmeye başlamıştır. Cürufle %10 ve %20 oranında kolemanit atığının yer değiştirdiği 10KUK ve 10KUK serisinde eğilme dayanımında artış görülmüştür. Bu sonuçlar Uysal vd. [28] bulguları ile de uyumludur.



Kolemanit atığının %10 oranına kadar bağlayıcıya ikame edilmesiyle, geopolimerik matrisin mikroyapısında iyileşme sağlanır. Bu sayede dayanım artışı yaşanır. % 10'dan fazla kolemanit atığının ikamesi, sistemde kararsız bor bileşiklerine neden olan bazı anyon ve kationların, reaksiyon ile çimento aktivasyon mekanizmasına müdahale ettiği düşünülmektedir. Kolemanit ikamesiyle yaşanan dayanım kayıpları bu sebebe dayandırılmıştır [38].

**Tablo 4.1:** Basınç dayanımı sonuçları

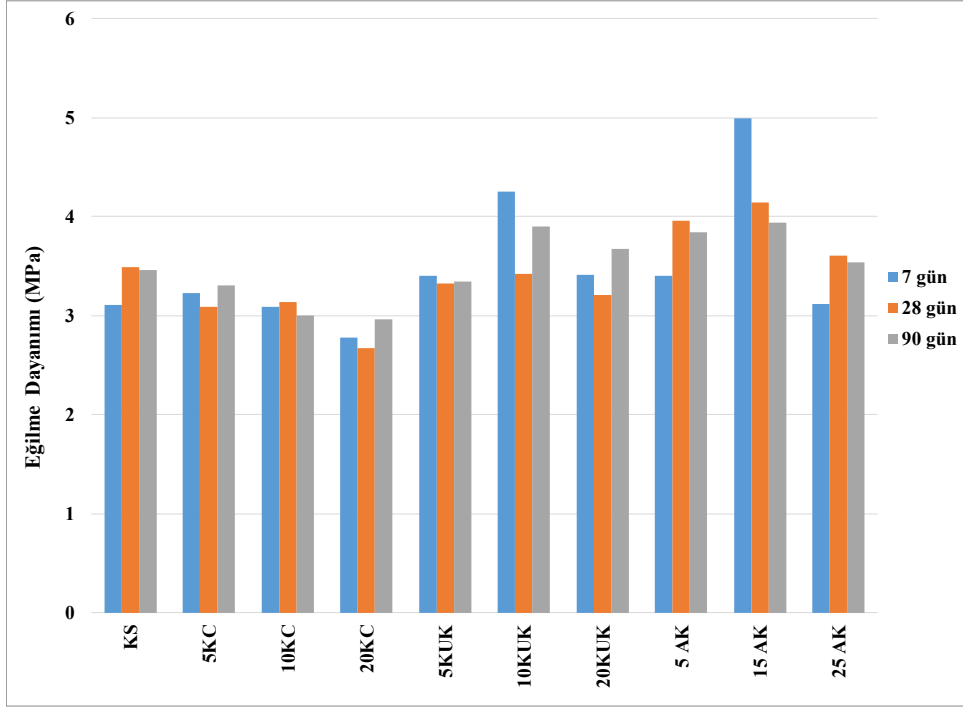
Karışım	7 gün		28 gün		90 gün	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Artış Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Artış Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Artış Oranı (%)
<b>KS</b>	19.39	-	38.32	-	38.17	-
<b>5KC</b>	21.66	11.70	31.75	-17.14	39.06	2.34
<b>50KC</b>	19.09	-1.53	28.94	-24.46	28.60	-25.06
<b>20KC</b>	14.67	-24.31	21.97	-42.66	28.21	-26.10
<b>5KUK</b>	25.06	29.20	31.47	-17.88	33.04	-13.44
<b>10KUK</b>	25.05	29.24	32.42	-15.38	32.24	-15.53
<b>20KUK</b>	17.18	-11.40	23.53	-38.60	26.91	-29.50
<b>5AK</b>	19.37	-0.06	25.75	-32.81	30.42	-20.30
<b>15AK</b>	15.37	-20.71	24.94	-34.92	30.21	-20.84
<b>25AK</b>	13.03	-32.79	19.05	-50.28	21.82	-42.82



Şekil 4.1: Basınç dayanımı değerleri

Tablo 4.2: Eğilme dayanımı değerleri ve artış oranları

Karışım	7 gün		28 gün		90 gün	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Artış Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Artış Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Artış Oranı (%)
KS	3.11	-	3.49	-	3.46	-
5KC	3.22	3.77	3.09	-11.41	3.30	-4.41
50KC	3.09	-0.38	3.14	-10.07	3.00	-13.22
20KC	2.78	-10.57	2.67	-23.49	2.96	-14.24
5KUK	3.40	9.43	3.33	-4.70	3.34	-3.39
10KUK	4.25	36.98	3.42	-2.01	3.90	12.88
20KUK	3.41	9.81	3.21	-8.05	3.68	6.44
5AK	3.40	9.43	3.96	13.42	3.84	11.19
15AK	4.99	60.75	4.15	18.79	3.94	13.90
25AK	3.12	0.38	3.61	3.36	3.54	2.37



Şekil 4.2: Eğilme çekme dayanımı sonuçları

#### 4.1.2 Ultrases Geçiş Hızı Testi Sonuçları

Hazırlanan 7, 28 ve 90 günlük numunelerin ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. Ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir. En yüksek değerler 7. günde elde edilmiş, 28 ve 90. günde ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. Artan gün sayısı ile birlikte ultrases geçiş hızı değerlerinin yükselmesi beklenirken tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. Eğilme dayanımı ve basınç dayanımı sonuçları ile ultrases geçiş hızı değerlerinin uyumlu olmadığı görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak dökümlere nisan ayında başlanması ve ilerleyen zamanla yaz aylarında artan ortam sıcaklığı ile birlikte numunelerdeki nemin azalması ve boşluk oranının artması olarak gösterilebilir.

7. günde ultrases geçiş hızı değerlerinde kontrol numunesine kıyasla kolemanit atığı katkılı 5KC, 10KC, 20KC, 5KUK serilerinde %-3.88 ile %-8.21 oranları arasında düşüş gözlemlenmiştir. Diğer serilerde ise kontrol numunesine kıyasla %0.60 ile %13.41 oranları arasında artış görülmüştür.

28. günde ultrases geçiş hızı değerlerinde kontrol numunesine kıyasla 20KC, 20KC, 5AK, 15AK serilerinde %-0.40 ile %-2.08 oranları arasında düşüş gözlemlenirken diğer serilerde kontrol numunesine kıyasla %0.66 ile %3.10 oranları arasında artış olmuştur.

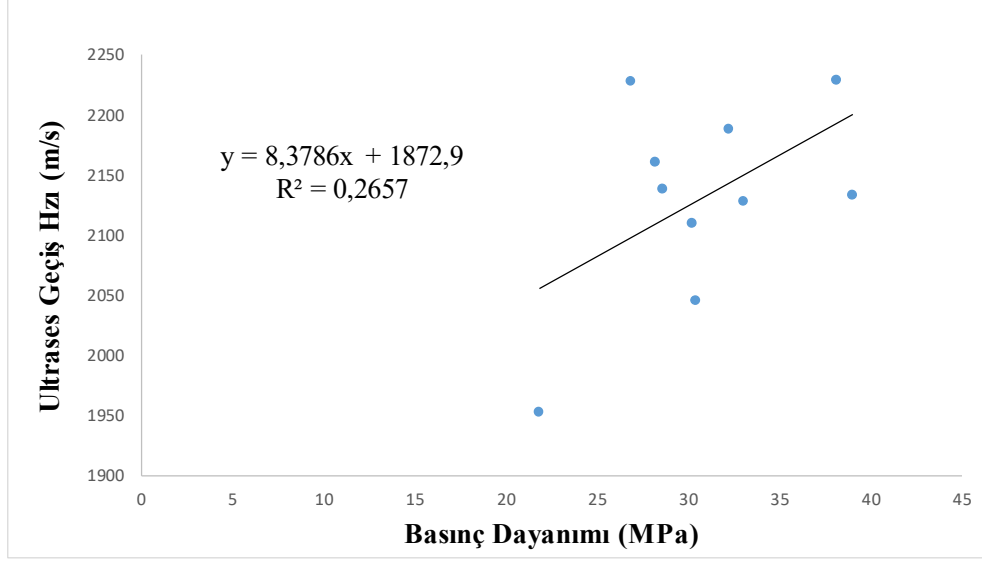
90 günlük ultrases geçiş hızı değerlerinde kontrol numunesi en yüksek ultrases geçiş hızına sahiptir. Kolemanit atığı katkılı serilerde %-0.04 ile %-12.37 oranları arasında azalma meydana gelmiştir.

**Tablo 4.3:** Ultrases geçiş hızı sonuçları (m/s)

	7 gün	28 gün	90 gün
<b>KS</b>	2422	2259	2229
<b>5KC</b>	2328	2321	2134
<b>50KC</b>	2277	2212	2138
<b>20KC</b>	2223	2250	2161
<b>5KUK</b>	2437	2280	2128
<b>10KUK</b>	2328	2274	2189
<b>20KUK</b>	2522	2329	2228
<b>5AK</b>	2520	2231	2110
<b>15AK</b>	2747	2226	2110
<b>25AK</b>	2578	2237	1953

#### 4.1.3 Basınç Dayanımı ve Ultrases Geçiş Hızı Sonuçlarının Korelasyon Faktörü

Elde edilen ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçlarının uyumluluğunu incelemek için, sonuçlardan yararlanarak korelasyon faktörü hesaplanmıştır. Korelasyon faktörü  $R^2$  ile ifade edilmektedir. Korelasyon faktörünün değerinin yüksek olması, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçlarının tutarlı olduğunu ifade eder. Korelasyon faktörünün 0.8 değerinden büyük olması iyi bir korelasyon seviyesini göstermektedir. Hesaplanan korelasyon faktörü, Şekil 4.3’de görülmektedir.  $R^2 = 0.266$ ’dür. İyi bir korelasyon elde edilememiştir. Bunun sebebi artan yaş ile ultrases geçiş hızı sonuçlarında yaşanan düşüş olmuştur. Bu korelasyon sonucu önceki çalışmalar ile uyumlu olmamıştır [28,39].



**Şekil 4.3:** Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

## 4.2 Dayanıklılık Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada dökümü yapılan 10 farklı geopolimer numune serilerinin dayanıklılık (durabilite) özelliklerini belirlemek için yüksek sıcaklık testi ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisi incelenmiştir. Deneylerden sonra ultrases geçiş hızı, ağırlık ve dayanım kaybı değerleri incelenmiştir.

### 4.2.1 Yüksek Sıcaklı Deneyleri

Geopolimer harç numuneleri 28. günde yüksek sıcaklık deneyinden önce kuru hale getirilmek için 24 saat  $100 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde tutulmuştur. Numuneler daha sonra  $300^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$  ve  $900^\circ\text{C}$ 'de yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık fırını her 1 dakikada sıcaklığı  $5^\circ\text{C}$  artacak şekilde ayarlanmıştır. Deney süresinin bitiminde fırının kapağı açılmış, numuneler soğumaya bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık deneyinden sonra numunelerin ultrases geçiş hızı, ağırlık kaybı, eğilme ve basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Basınç dayanımı değerleri  $50 \times 50 \times 50$  mm küp numunelerinden, eğilme dayanımı verileri  $40 \times 40 \times 160$  mm prizma numunelerinden elde edilmiştir.

#### 4.2.1.1 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonucunda Eğilme ve Basınç Dayanımı Değerleri

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de yüksek sıcaklık etkisi sonucunda elde edilen basınç ve eğilme dayanımı değerleri her seri için o seriye ait 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerleri ile birlikte verilmiştir. Ayrıca Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'de azalma oranları ile birlikte basınç ve eğilme dayanımı değerleri verilmiştir. Azalma oranı değerleri yüzde olarak [(numune

dayanımı-aynı serinin 28 günlük dayanımı) / aynı numunenin 28 günlük dayanımı\*100] formülü ile hesaplanmıştır.

300°C'de basınç dayanımı azalma oranı %46.31 ile %16.95 arasında olmuştur. En yüksek basınç dayanımı 24.32 MPa ile 5KUK'ya ait olduğu görülmüştür. 300°C'de eğilme dayanımı azalma oranı %52.35 ile %14.79 arasında meydana gelmiştir. 300°C'de en yüksek eğilme dayanımı 2.84 MPa ile yine 5KUK serisine ait olmuştur.

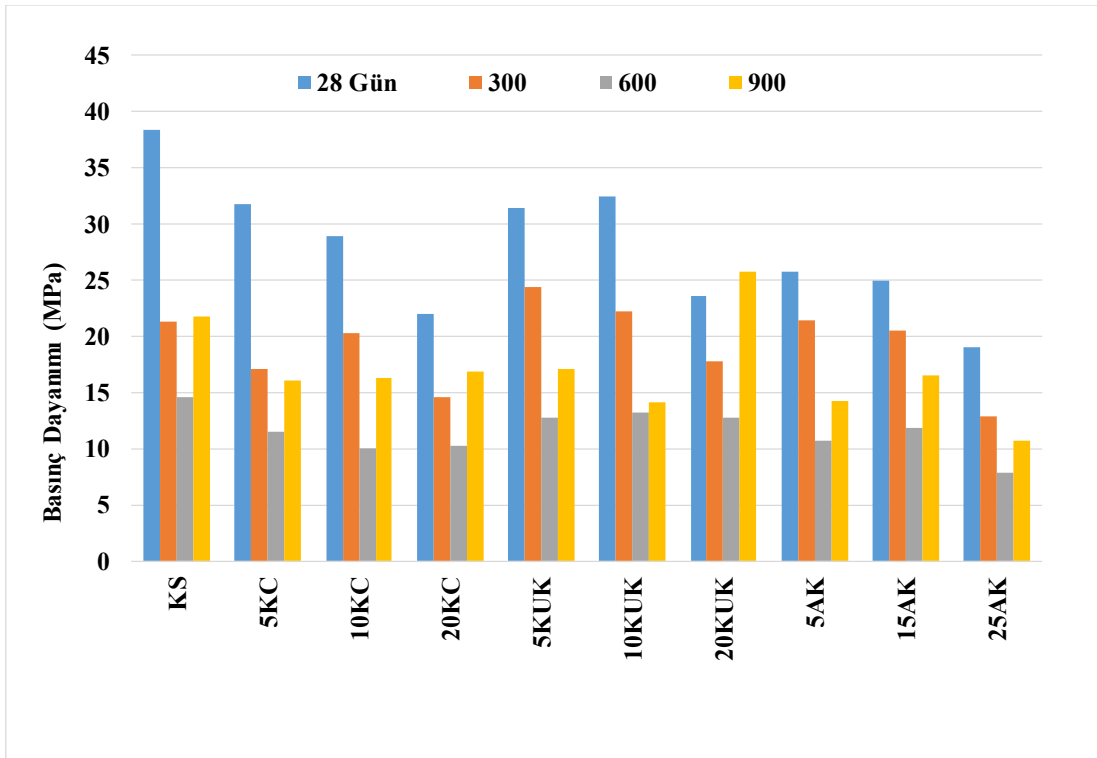
Basınç dayanımı kaybı en fazla 600°C'de meydana gelmiştir, basınç dayanımında azalma oranı %65.34 ile %45.90 arasında olmuştur. Eğilme dayanımında 600°C'de meydana gelen azalma oranı %67.46 ile %36.69 arasında olmuştur. Kontrol serisi (KS) 600°C' 14.63 MPa ile en yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur, en yüksek eğilme dayanımı 2.29 MPa ile 25AK serisine ait olmuştur.

900°C'de basınç dayanımı azalma oranı %56.51 ile %-9.31 değerleri arasındadır. En yüksek basınç dayanımı 25.72 MPa değer ile 20KUK olmuştur. 900°C'de eğilme dayanımında azalma oranı %82.53 ile %-32.47 arasında olmuştur. En yüksek eğilme dayanımı 4.78 MPa ile 25AK serisinde görülmüştür. Eğilme ve basınç dayanımı değerleri incelendiğinde kolemanit atığı ikamesinin yüksek sıcaklıklarda olumlu etki ettiği görülmüştür.

Yüksek sıcaklık deneyinde 600°C'de basınç dayanım değerleri 300°C'ye göre düşük bulunmuştur. Bunun sebebi N-(C)-A-S-H jelinin Na/Ca değişimi ile termal stabilitesinin azalması olarak açıklanmıştır [40].

Metakaolin tabanlı kolemanit katkılı geopolimer harç numunelerinde 600°C - 900°C sıcaklık aralığında, basınç ve eğilme dayanımının artan sıcaklıkla beraber düştüğü ifade edilmiştir. Dayanım sonuçlarında düşüşün sebebi ise artan sıcaklıkla geopolimer matrisinin dehidrasyona uğraması ve serbest suyun buharlaşması olarak açıklanmıştır [33,38]. Bu çalışmada farklı olarak 900°C'de 600°C'ye göre basınç ve eğilme dayanımında yükselen seriler görülmüştür.

Yüksek sıcaklık testinde, bağlayıcı olarak metakaolin kullanılan geopolimerin artan sıcaklık değeriyle (200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C) dayanımında azalma meydana gelmiştir. Fakat bağlayıcı olarak uçucu kül içeren geopolimerin artan sıcaklık değeriyle (200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C) dayanım sonuçlarında artış olmuştur. Uçucu külün geopolimer matrisi ile sinterlenmesi yoluyla geopolimerlerin termal kararlılığını artırarak geopolimer malzemenin performansını iyileştirdiği görülmüştür [41]. Bu çalışma sonucuna benzer olarak geopolimer harç numunelerinin 900°C’de artan dayanım sonuçlarının uçucu külün sinterleşmesi sebebiyle olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.4: Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanım değerleri

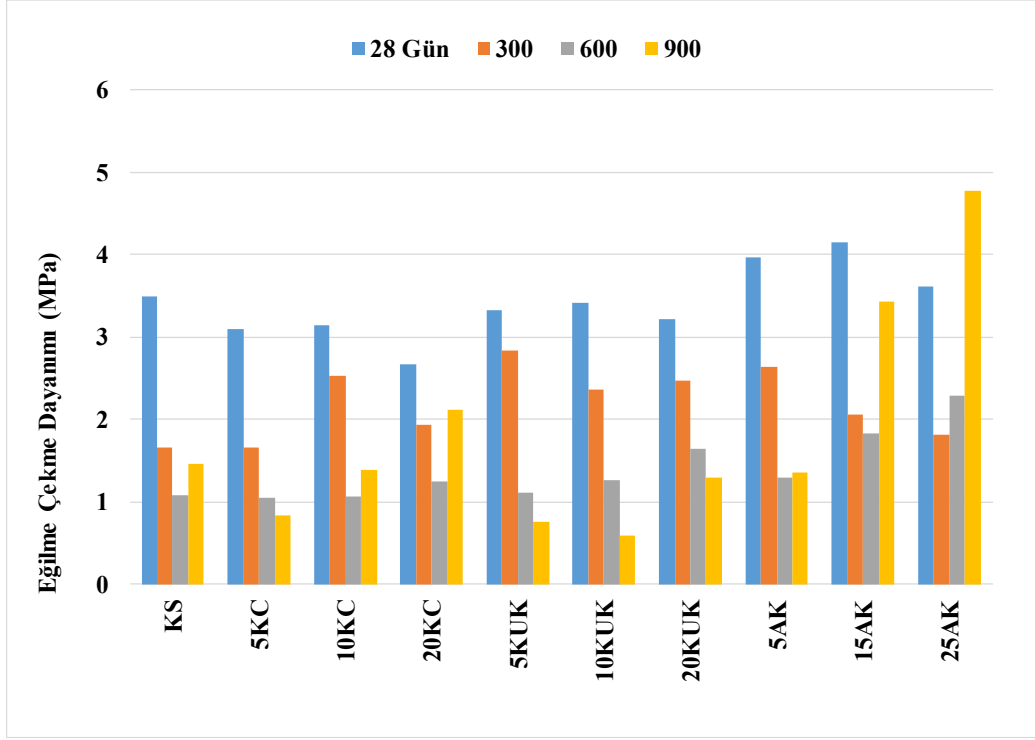
**Tablo 4.4:** Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanım değerleri ve azalma oranları

<b>Karışım</b>	<b>28 gün</b>	<b>300 °C</b>		<b>600 °C</b>		<b>900 °C</b>	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanım (MPa)	Azalma Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)
<b>KS</b>	38.32	21.34	44.30	14.63	61.82	21.71	43.34
<b>5KC</b>	31.75	17.05	46.31	11.55	63.62	16.01	49.59
<b>50KC</b>	28.94	20.22	30.15	10.03	65.34	16.23	43.92
<b>20KC</b>	21.97	14.62	33.46	10.31	53.07	16.91	23.06
<b>5KUK</b>	31.47	24.32	22.71	12.73	59.53	17.04	45.86
<b>10KUK</b>	32.42	18.77	42.11	13.21	59.26	14.10	56.51
<b>20KUK</b>	23.53	17.77	24.47	12.73	45.90	25.72	-9.31
<b>5AK</b>	25.75	21.38	16.95	10.67	58.55	14.25	44.65
<b>15AK</b>	24.94	20.50	17.79	11.88	52.38	16.49	33.89
<b>25AK</b>	19.05	12.86	32.50	7.89	58.56	10.69	43.91

Yüksek sıcaklık etkisiyle geopolimer harç numunelerinde meydana gelen eğilme dayanımı değerinde meydana gelen azalma oranının basınç dayanımına göre yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonucun sebebinin, yüksek sıcaklık etkisinde çatlakların artıp yayılması ve betonun gözeneklerinin genişlemesi gibi iç yapıdaki kusurların eğilme dayanımını daha fazla etkilemesi sebebiyle olmaktadır [42]. Eğilme dayanımı sonuçlarında kolemanitin kuvars kumuna ikame edildiği serilerde daha iyi sonuç alınmıştır.

Aygörmez [37], çalışmasında yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımında uçucu külün %30'a kadar agregaya ikame edilip kullanımının daha iyi sonuçlar verdiğini uçucu külün agregaya ikamesinin puzolonik etkiyi arttırdığını görmüştür. Kolemanit atığının agregaya ikame edilmesiyle benzer şekilde iyi sonuç elde edilmiştir.





Şekil 4.5: Yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımı değerleri

Tablo 4.5: Yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanım değerleri ve azalma oranları

Karışım	28 gün	300 °C		600 °C		900 °C	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)
KS	3.49	1.66	52.35	1.08	69.13	1.46	58.05
5KC	3.09	1.66	46.21	1.04	66.29	0.83	73.11
50KC	3.14	2.53	19.40	1.07	66.04	1.38	55.97
20KC	2.67	1.93	27.63	1.25	53.07	2.12	20.61
5KUK	3.33	2.84	14.79	1.11	66.55	0.76	77.11
10KUK	3.42	2.36	31.16	1.27	63.01	0.60	82.53
20KUK	3.21	2.47	22.99	1.64	48.91	1.29	59.85
5AK	3.96	2.64	33.43	1.29	67.49	1.35	65.98
15AK	4.15	2.06	50.28	1.83	55.93	3.43	17.26
25AK	3.61	1.82	49.68	2.29	36.69	4.78	-32.47

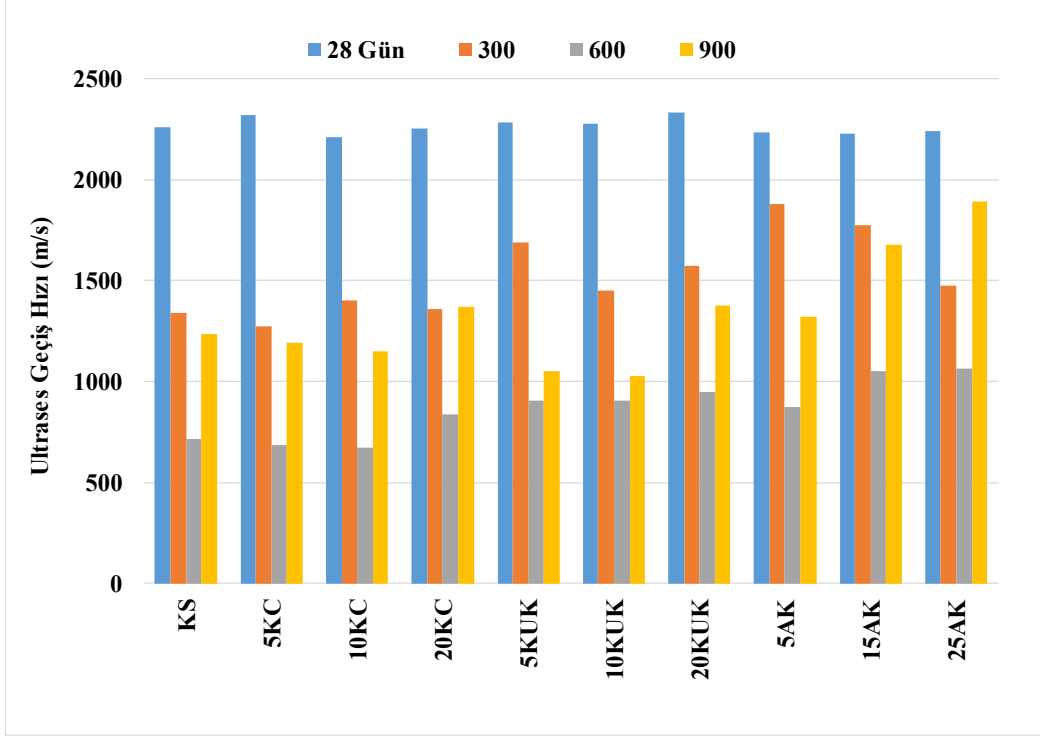
#### 4.2.1.2 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonucunda Ultrases Geçiş Hızı Değerleri

Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızındaki değerler 28 günlük değerler ile birlikte Tablo 4.6’da verilmiştir bu tabloda azalma oranları da yer almaktadır. Deneyde sıcaklık değerinin artması ile ultrases geçiş hızı değerlerinin düşmesinin sebebi geopolimer harç numunelerinin gözenekli yapısının artan sıcaklık değeri ile genişlemesi, harç numunelerinin bünyesindeki suyun buharlaşmasıdır. Buharlaşma kütle kaybı ve boşluklara neden olmaktadır [43].

Literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak 300°C’de yüksek sıcaklık testinde ultrases geçiş hızındaki azalma oranı %45.18 ile %15.70 değerleri arasında olmuştur. 600°C’de yüksek sıcaklık testinde ultrases geçiş hızındaki azalma oranı %70.55 ile %52.35 değerleri arasında olmuştur. 900°C’de yüksek sıcaklık testinde ultrases geçiş hızı testinde ultrases geçiş hızındaki azalma oranı %53.98 ile %15.55 değerleri arasında görülmüştür. Basınç dayanımları ile doğru orantılı olarak en çok ultrases geçiş hızı azalma oranı 600°C’de olmuştur. Her seriye ait 28 günlük ultrases geçiş hızlarıyla birlikte yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 4.6 ile Şekil 4.6’da verilmiştir.

**Tablo 4.6:** Ultrases geçiş hızı sonuçları ve azalma oranları

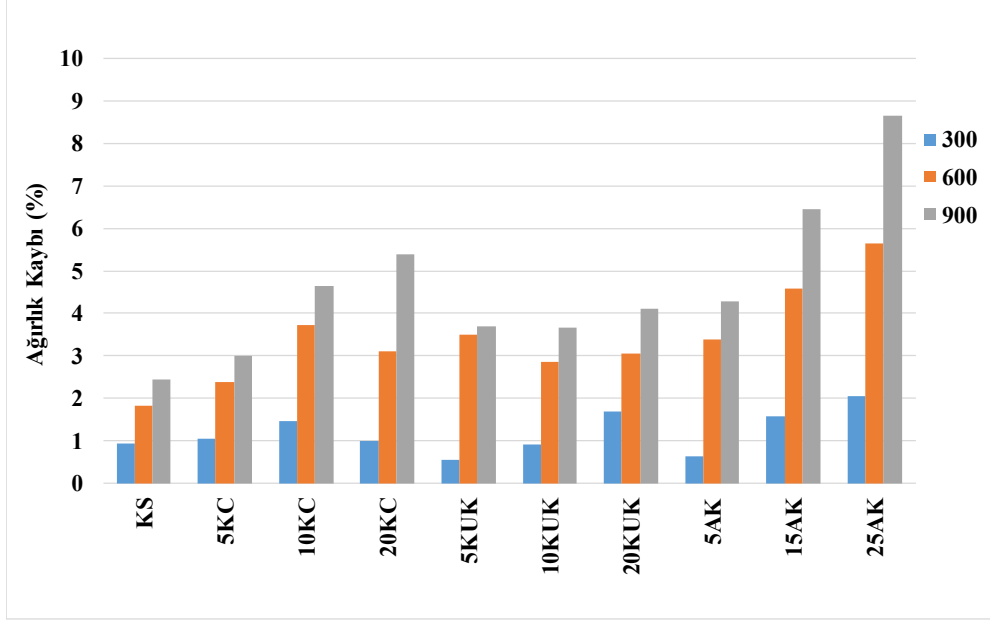
Karışım	28 gün		300°C		600°C		900°C	
	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Azalma Oranı (%)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Azalma Oranı (%)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Azalma Oranı (%)	
<b>KS</b>	2259	1343	40.56	713	68.42	1237	45.22	
<b>5KC</b>	2321	1272	45.18	684	70.55	1194	48.55	
<b>50KC</b>	2212	1404	36.51	673	69.57	1151	47.97	
<b>20KC</b>	2250	1355	39.75	835	62.87	1368	39.19	
<b>5KUK</b>	2280	1686	26.06	906	60.25	1050	53.96	
<b>10KUK</b>	2274	1451	36.20	907	60.12	1028	54.81	
<b>20KUK</b>	2329	1571	32.53	946	59.36	1379	40.79	
<b>5AK</b>	2231	1880	15.70	874	60.84	1320	40.82	
<b>15AK</b>	2226	1777	20.16	1050	52.82	1679	24.55	
<b>25AK</b>	2237	1474	34.09	1066	52.35	1889	15.55	



Şekil 4.6: Yüksek sıcaklık etkisi sonucunda ultrases geçiş hızı değerleri

#### 4.2.1.3 Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonucunda Ağırlık Kaybı Değerleri

Genellikle, geopolimer harç numunelerinde yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan en önemli ağırlık kaybı, oda sıcaklığı ile 200°C arasında meydana gelmektedir. Bunun sebebi geopolimer bünyesindeki serbest suyun ve bünyesinde kimyasal olarak bağlı suyun bir kısmının geopolimerden buharlaşmasıyla oluşmaktadır. İkinci ağırlık kaybı 300~650°C'de, Si-OH, Al-OH ve Ca-OH gruplarının dehidroksilasyonu sebebi ile meydana gelmektedir. Son ağırlık kaybı ise 750°C'nin üzerinde görülmektedir ve karbonat türlerinin ayrışmasından kaynaklanmaktadır [44]. Yüksek sıcaklık deneyinden sonra geopolimer numunelerdeki ağırlık kaybı değerleri Şekil 4.6'de verilmiştir. Literatüre uygun olarak 300°C'de ağırlık kaybı oranları %0.55 ile %2.04 olmuştur. 600°C'de %1.83 ile %5.64 değerleri arasında gerçekleşmiştir. 900°C'de %2.45 ile %8.64 oranları arasında olmuştur.



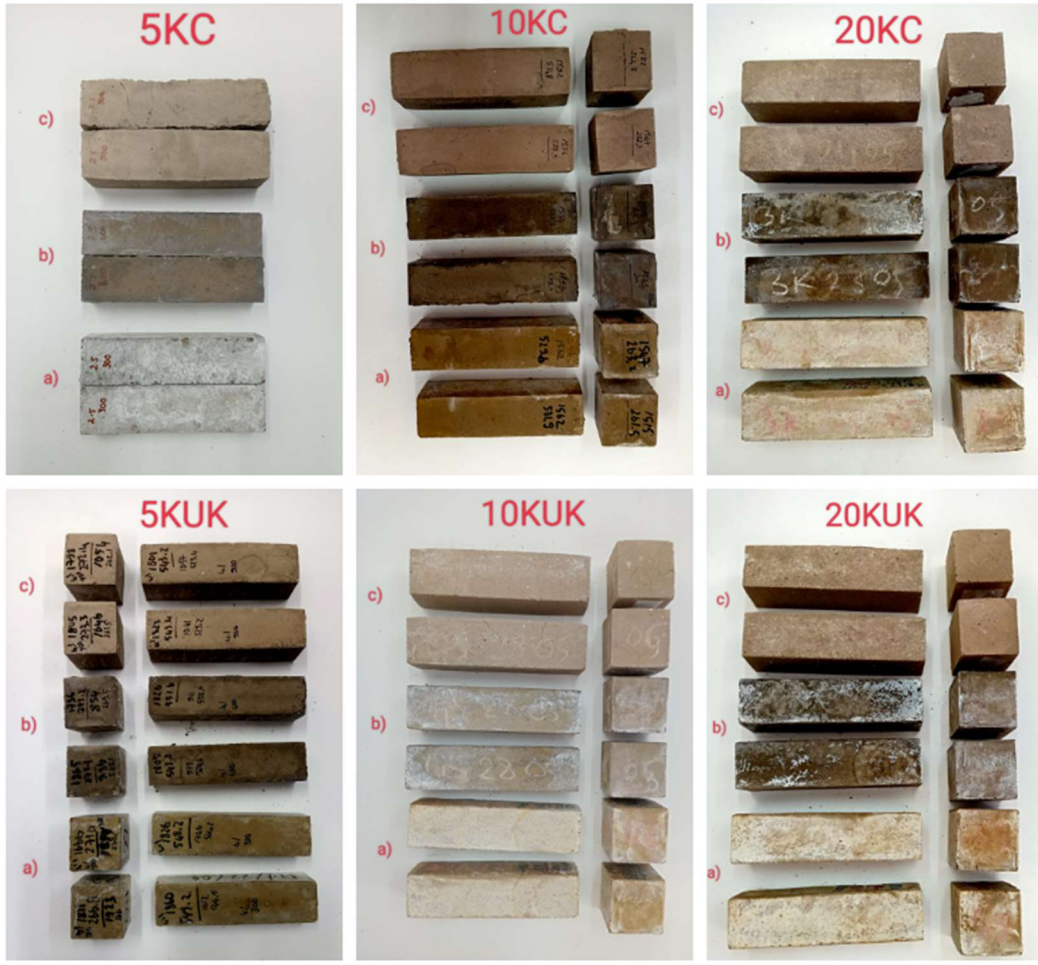
Şekil 4.7: Yüksek sıcaklık etkisi sonucunda ağırlık kaybı değerleri (%)

#### 4.2.1.4 Yüksek Sıcaklık Testi Sonrası Görsel İnceleme

Yüksek sıcaklık testi sonrasında numunelerin görselleri Şekil 4.8-4.9’da gösterilmiştir. Fotoğraflar numuneler soğuduktan sonra çekilmiştir. Kolemanit atığı içeren seriler 300°C, 600°C ve 900°C’de benzer renk değişimi ve deformasyona uğramışlardır. 300°C’de KS ve kolemanit atığı içeren serilerde renk değişimi ve çatlama çok görülmemiştir bu da basınç ve eğilme dayanımlarında daha az dayanım kaybını ifade etmektedir. 600°C’de KS ve kolemanit atığı içeren serilerde griye yakın bir ton elde edilmiştir. KS ve kolemanit atığı içeren serilerde en fazla çatlak 900°C’de meydana gelmiştir ve 900°C’de çatlaklar sebebiyle hacimsel bir artış da gözlemlenmiştir. Ayrıca 900°C’de numunelerde dağılma yaşanmamıştır. Kolemanit atığı içeren seriler toprak tonuna yakın bir görünüm kazanmıştır KS’de farklı olarak krem pembe bir görünüm elde edilmiştir ve hacimsel artış çok yaşanmamıştır.



Şekil 4.8: KS serisi yüksek sıcaklık etkisi a) 300°C b) 600°C c) 900°C



Şekil 4.9: 5KC, 10KC, 20KC, 5KUK, 10KUK, 20KUK, yüksek sıcaklık etkisi a) 300°C b) 600°C c) 900°C



Şekil 4.10: 5KA, 15AK, 25AK, a) 300°C b) 600°C c) 900°C

#### 4.2.2 Donma Çözülme Etkisi

Hazırlanan 10 farklı seri geopolimer numuneler 90 günün sonunda 15 çevrim donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. 1 çevrim 4 saat +20°C 4 saat -20°C olmak üzere 8 saat sürmüştür. Numuneler donma-çözülme cihazına girmeden ağırlıkları ve ultrases geçiş hızları kaydedilip 15 çevrimden sonrada ağırlık ve ultrases geçiş hız değerleri kaydedilip deney öncesi ve sonrası değerler karşılaştırılmıştır.

##### 4.2.2.1 Donma Çözülme Etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları

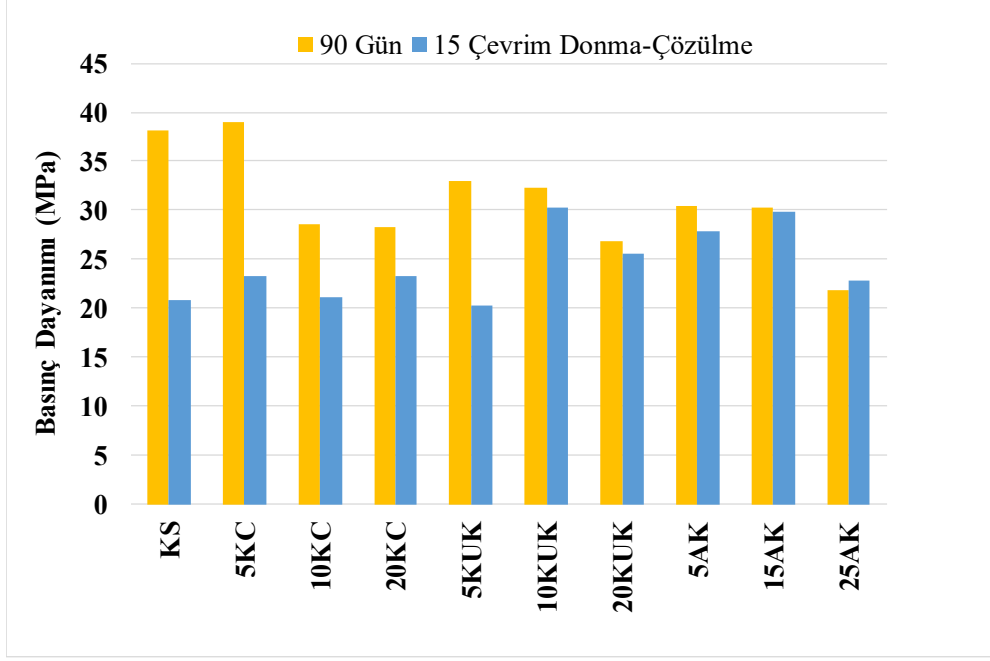
Donma çözülme etkisine maruz kalan numunelerin içinde bulunan su buza dönüşerek hacimce %9 oranında genişleme gösterebilmektedir. Numunelerin içindeki suyun genişlemesiyle birlikte matrisin sınırlarını zorlayıp mikro çatlaklıkların oluşmasına veya büyümesine yol açabilir. Oluşan bu mikro çatlakların sebebiyle eğilme dayanımı ve basınç dayanımında azalma meydana gelmektedir [45].

Donma-çözülme deneyinde çevrim sayısı arttıkça geopolimer matrisinin yapısında gelişme meydana gelmektedir. Matris ağında yaşanan gelişme sayesinde numuneler daha iyi sonuç vermektedir [24]. Donma-çözülme deneyinde artan basınç dayanımı bu sebebe dayandırılmıştır. Bu çalışmada kolemanit atığının ikame oranı arttıkça dayanım kaybı azalmıştır ve kolemanit agrega olarak kullanılması ile numunelerin daha dirençli olduğu görülmüştür.

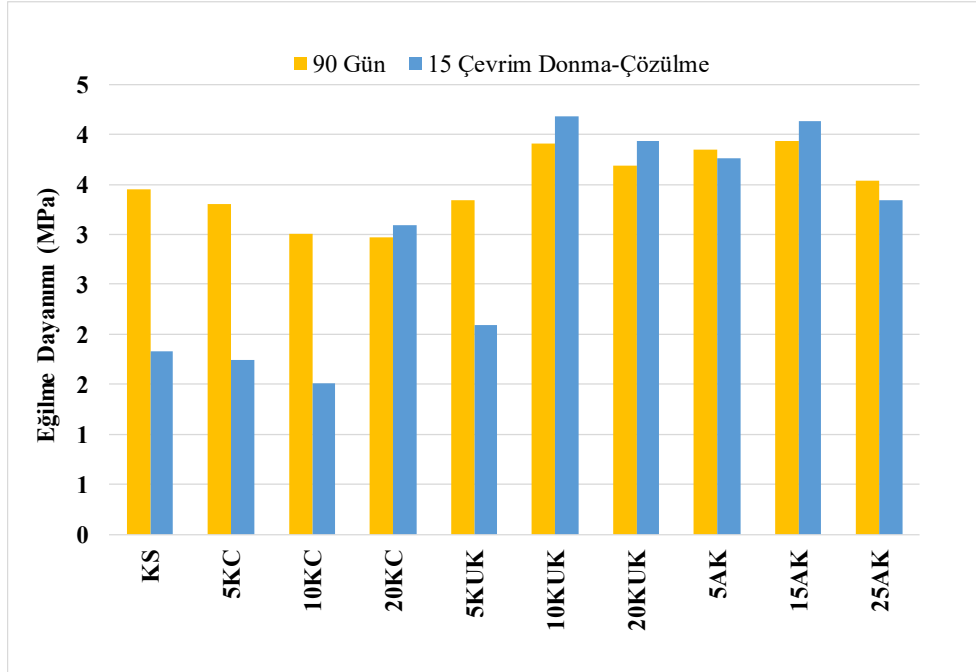
15 çevrim donma-çözülme deneyi sonunda en yüksek basınç dayanım değeri 29.81 MPa ile 15AK serisinde elde edilmiştir. En fazla basınç dayanımı azalma oranı %45.33 ile KS serisinin olmuştur. En yüksek eğilme dayanımı 4.13 MPa ile 15AK serisinde görülmüştür. Eğilme dayanımında en fazla azalma %49.61 azalma oranı ile 10KC serisindedir. Tablo 4.7’de basınç ve eğilme dayanımları, azalma oranları (%) olarak gösterilmektedir. Şekil 4.10’de basınç dayanımları, Şekil 4.11’de eğilme dayanımları her serinin kendi 90 günlük dayanım değerleri ile birlikte gösterilmiştir.

**Tablo 4.7:** 15 çevrim donma-çözülme deneyi sonrası basınç ve eğilme dayanımları azalma oranları

Karışım	90 gün	15 Çevrim		90 gün	15 çevrim	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanım (MPa)	Azalma Oranı (%)	Eğilmede Dayanım (MPa)	Eğilmede Dayanım (MPa)	Azalma Oranı (%)
<b>KS</b>	38,17	20,87	45,33	3,46	1,83	47,12
<b>5KC</b>	39,06	23,28	40,39	3,30	1,75	47,16
<b>50KC</b>	28,60	21,09	26,26	3,00	1,51	49,61
<b>20KC</b>	28,21	23,25	17,56	2,96	3,09	-4,35
<b>5KUK</b>	33,04	20,20	38,85	3,34	2,10	37,19
<b>10KUK</b>	32,24	30,35	5,87	3,90	4,18	-7,21
<b>20KUK</b>	26,91	25,54	5,06	3,68	3,94	-7,01
<b>5AK</b>	30,42	27,81	8,57	3,84	3,76	2,13
<b>15AK</b>	30,21	29,81	1,32	3,94	4,13	-4,76
<b>25AK</b>	21,82	22,89	-4,88	3,54	3,34	5,63



Şekil 4.11: 15 çevrim donma-çözülme sonrası basınç dayanımı değerleri



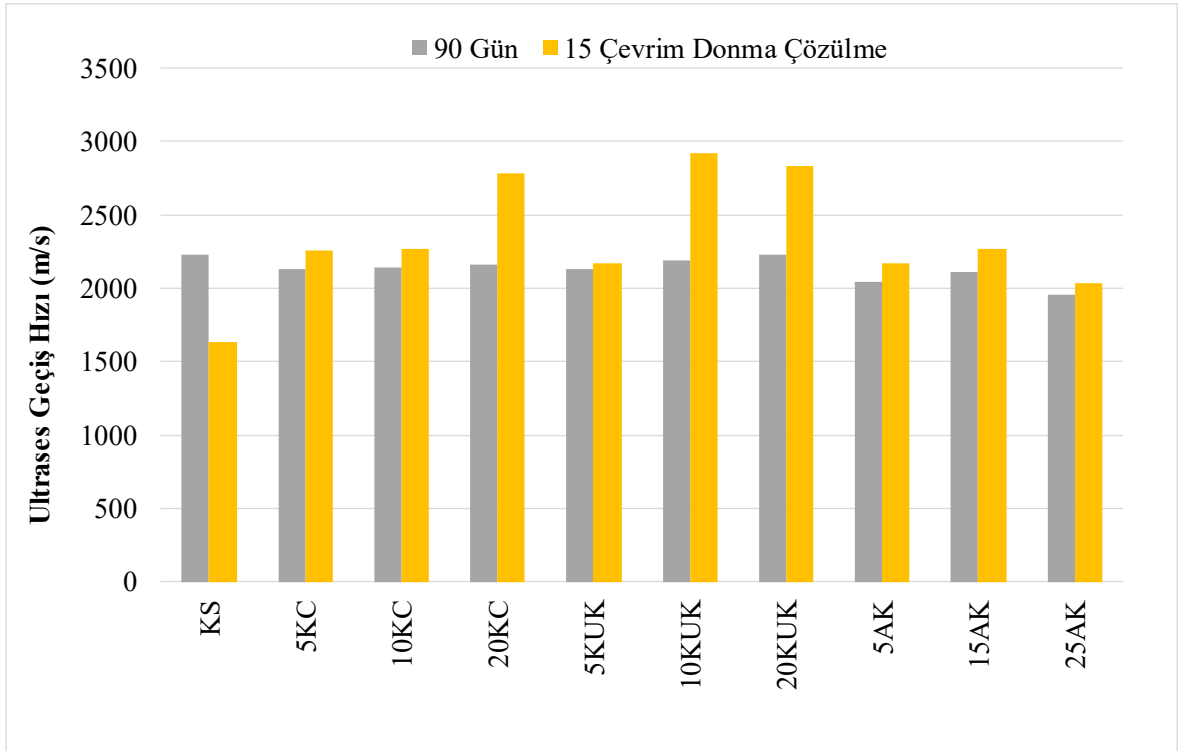
Şekil 4.12: 15 çevrim donma-çözülme sonrası eğilme dayanımı değerleri

#### 4.2.2.2 Donma Çözülme Etkisinde Ultrases Geçiş Hızı Ağırlık Kaybı Sonuçları ve Görsel İnceleme

Donma-çözülme deneyinin gerçekleştiği ortamın nemli olması ve bu nemin numunelerin iç yapısındaki boşluklara girmesi sebebiyle boşluklar dolmuştur. Dolan boşluklar sayesinde ultrases geçiş hızında yükselme meydana gelmiştir [24]. Kolemanit atığı katkılı serilerde

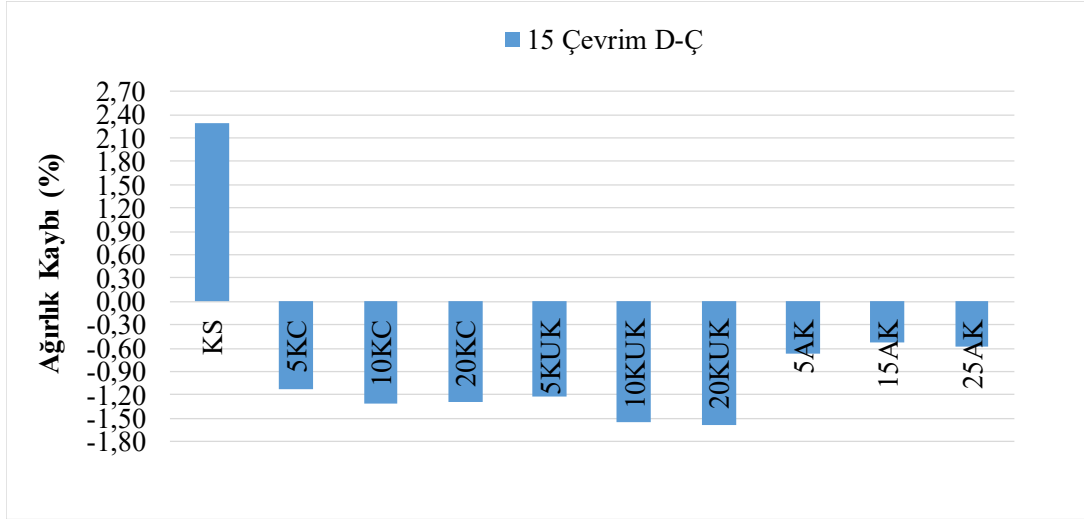


ultrases geçiş hızı değerlerinde artış görülmüştür. Şekil 4.12’de ultrases geçiş hızı değerleri gösterilmektedir.



**Şekil 4.13:** 15 evrim donma-çözülme etkisinden sonra ultrases geçiş hızı değerleri

15 evrim donma-çözülmeden sonra tek ağırlık kaybına uğrayan numuneler KS serisine ait olduğu grlmtr. Ağırlık kaybı oranı %2.30 olarak belirlenmiştir. Kolemanit atığı içeren tüm serilerin ağırlığında artış yaşanmıştır. Ultrases geçiş hızının artış sebebiyle uyumlu olarak deneyin yapıldığı nemli ortamda numunelerin içindeki boşlukların nem ile dolması sebebiyle ağırlık artışı yaŐanması olarak açıklanabilir. Bu artış oranı %1.58 ile %0.53 arasında olmuştur. En çok ağırlık artış oranı %1.58 ile 20KUK olmuştur. Şekil 4.13’de ağırlık kaybı grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.14:** 15 çevrim donma-çözülme etkisinde ağırlık kaybı

Görsel incelemede en fazla deformasyonun KS serisinde meydana geldiği görülmektedir. Kolemanit içeren diğer numunelerde kayda değer bir deformasyona rastlanmamıştır. Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de numunelerin donma-çözülmeden sonra çekilen fotoğrafları gösterilmiştir. Donma çözülme deneyinden sonra kolemanit atığı içeren numuneler daha gevrek kırılma eğilimi göstermişlerdir. Şekil 4.16’de gevrek kırılma etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 4.15:** Donma çözülme etkisi 5AK, 15AK, 25AK



**Şekil 4.16:** Donma çözülme etkisi KS, 5KC, 20KC, 10KUK, 20KUK, 10KC, 5KUK



**Şekil 4.17:** Donma çözülme deneyinden sonra kolemanit atığı içeren serilerde görülen gevrek kırılma

#### **4.2.3 Sülfat Çözeltilerinin Etkisi**

Üretilen 10 farklı seri geopolimer harç numuneleri 28 günün sonunda etüvde 100°C'de 24 saat kurutulduktan sonra hazırlanan %10 derişimli Sodyum Sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) ve Magnezyum Sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) çözeltilerine 2 ve 4 ay süreyle maruz bırakılmıştır.

#### 4.2.3.1 Sülfat çözeltisi etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımı Sonuçları

Magnezyum sülfat geopolimer harç numunesinde yeni kristal fazların oluşmasıyla mekanik özelliklerde kayba yol açmaktadır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu içeren geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı hem magnezyum sülfat hem de sodyum sülfatta dalgalanmalar göstermektedir. Magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımındaki düşüş fazla olduğu görülmüştür [46]. Magnezyum sülfat etkisinde dayanımdaki bu dalgalanmalar, Mg'nin, alkali iyonlarının numunelerden çözeltiye geçişi sırasında oluşan matrise difüzyonuna bağlı olmaktadır. Magnezyum sülfat çözeltisinde, geopolimerlerin yüzey tabakasında dayanım artıran Mg ve Ca difüzyonu oluşmuştur. Sodyum sülfat çözeltisinde dayanım kaybına sebep olan etrenjit oluşumu görülmüştür [47].

Magnezyum sülfat etkisindeki numunelerde sodyum sülfat etkisindeki numunelere göre daha fazla dayanım kaybı görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak magnezyum sülfatın daha düşük pH değerine sahip olması gözenekli bir matrise sahip olması gösterilmiştir [48].

Tablo 4.8'de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine 2 ay ve 4 ay süreyle maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları ve dayanım kaybı oranları verilmiştir. Tablo 4.9'da Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi altında eğilme dayanımları ve eğilme dayanım kaybı oranları verilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımları her seriye ait 28 günlük değerler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de basınç dayanımı ve eğilme dayanımı grafikleri gösterilmiştir.

Tablo 4.10'da MgSO<sub>4</sub> çözeltisi etkisinde 2 ve 4 ay süreyle kalan numunelerin basınç dayanımı ve dayanım kaybı oranları verilmiştir. Tablo 4.11'de eğilme dayanım değerleri ve dayanım kaybı oranları gösterilmiştir. Şekil 4.19 ve şekil 4.20'de basınç ve eğilme dayanımları sonuçlarının grafiği verilmiştir.

Çözeltilerin konsantrasyonunun sabit kalması için 30 günde bir yenilenmiştir. Deney süresi sonunda sülfat çözeltisinden çıkartılan numuneler oda sıcaklığında (25±2°C) kurutulmuştur. Numuneler kuruduktan sonra yüzeylerinde oluşan kalıntılar tel fırça ile temizlenmiştir.

Sodyum sülfat çözeltisinde 2 ay etki süresinde en yüksek basınç dayanımı kaybı oranları %46.59 ile 25AK serisi olmuştur. KS'nin azalma oranı ise %27.19 olmuştur. 4 ay etkisi süresinde en yüksek basınç dayanımı kaybı %49.76 oranla tekrar 25AK serisine ait olmuştur. KS'nin 4 aylık basınç dayanımı kaybı oranı %15.76 olmuştur ve 2 aylık süreye göre dayanım artışı göstermiştir fakat kendi 28 günlük değerinin altında kalmıştır. 2 aylık eğilme dayanımı kaybı %79.87 oranıyla 25AK serisine ait olmuştur. KS'nin 2 aylık dayanım kaybı oranı %30.54 olmuştur. 4 aylık etki süresinde en yüksek eğilme dayanımı kaybı %80.84 oranıyla 25AK serisine ait olmuştur. KS'nin eğilme dayanımı kaybı %22.41'dir ve 2 aylık etki süresine göre eğilme dayanımı artmıştır. 2 ay süredeki dayanım değerlerine kıyasla 4 aylık test süresinde dayanımlarındaki artışın nedeni testin yaz aylarına denk gelmesiyle ortam sıcaklığının artması ve geopolimerizasyonun devam etmesi olarak görülmektedir. Kolemanitin atığının %25 oranında agregaya ikamesi sodyum sülfatta en olumsuz sonucu vermiştir. Kolemanit atığının %5, %10, %20 oranında cürufa ikamesi sodyum sülfat etkisinde dayanım kaybı oranlarını KS'ye kıyasla azaltmıştır.

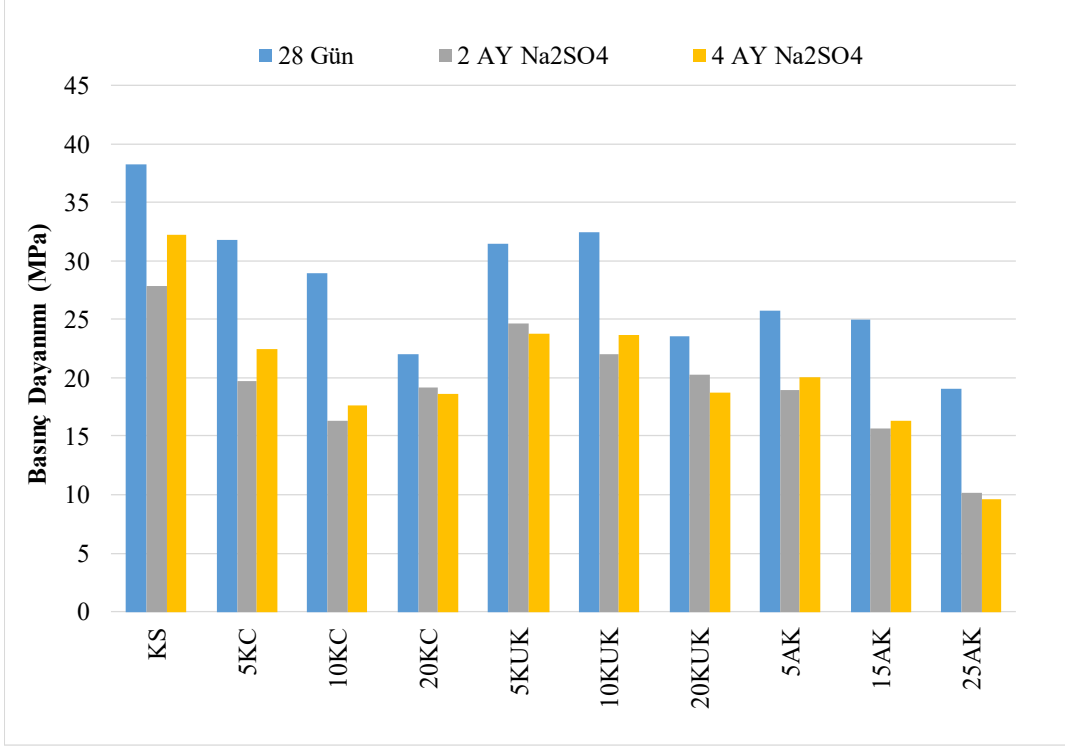
Magnezyum sülfat etkisinde 2 ay etki süresinde en fazla basınç dayanımı kaybı oranı %52.71 değeriyle 25AK serisine ait olmuştur. KS'nin azalma oranı %23.24 olmuştur. 4 aylık etki süresinde en fazla basınç dayanımı kaybı %42.17 ile 25AK serisine ait olmuştur. KS'nin 4 aylık basınç dayanımı kaybı %17.76 oranında olmuştur. 2 aylık etki süresinde en fazla eğilme dayanımı kaybı oranı %74.35 değeriyle 25AK serinin olmuştur. KS'nin 2 aylık etki süresinde eğilme dayanımı %1.34 oranında artmıştır. 4 aylık etkisi süresinde en fazla eğilme dayanımı kaybı %62.66 oranıyla 25AK serinin olmuştur. KS'nin eğilme dayanımı ise %8.39 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde magnezyum sülfat etkisinde 2 ay süredeki dayanım değerlerine kıyasla 4 aylık test süresinde dayanımlarındaki artışın nedeni testin yaz aylarına denk gelmesiyle ortam sıcaklığının artması ve geopolimerizasyonun devam etmesi olarak görülmektedir. KS, 5KUK ve 10KUK serilerinde eğilme dayanımının artışının sebebi magnezyum sülfat çözeltisinde, geopolimerlerin yüzey tabakasında dayanım artıran Mg ve Ca difüzyonunun oluşması gösterilebilir. Kolemanit ikamesinin %20 uçucu küle ve %5, %10, %20 oranında cürufa ikame edilmesinin magnezyum sülfat etkisinde olumlu etkisi görülmüştür. 2 ay sülfat etkisinde magnezyum sülfat, 4 ay etki süresinde sodyum sülfat daha zararlı etki göstermiştir.

**Tablo 4.8:** 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde basınç dayanımı değerleri ve azalma oranları

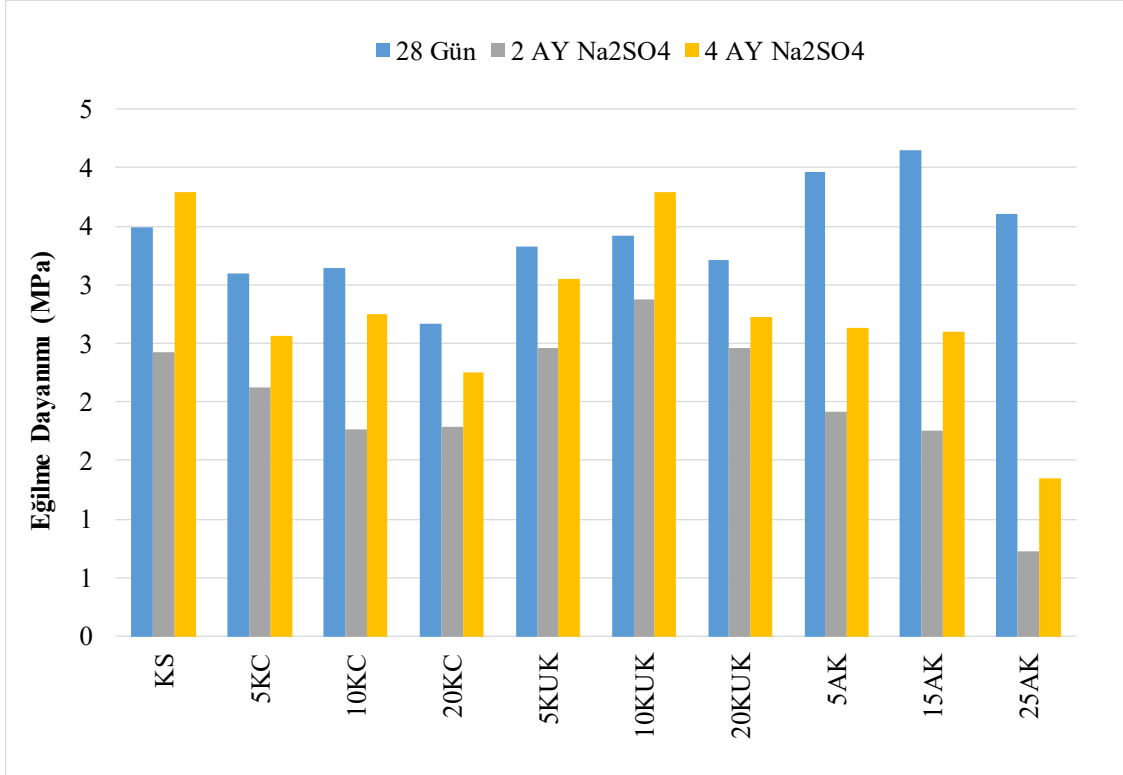
Karışım	28 gün	2 Ay Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		4 Ay Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)
KS	38.32	27.90	27.19	32.20	15.97
5KC	31.75	19.74	37.76	22.50	29.12
50KC	28.94	16.34	43.53	17.60	39.18
20KC	21.97	19.16	12.80	18.65	15.12
5KUK	31.47	24.67	21.61	23.77	24.46
10KUK	32,42	29,62	8,63	25,52	21,30
20KUK	23.53	20.24	13.97	18.78	20.18
5AK	25.75	18.92	26.52	20.03	22.21
15AK	24.94	15.69	37.07	16.35	34.45
25AK	19.05	10.18	46.59	9.57	49.76

**Tablo 4.9:** 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde eğilme dayanımı ve azalma oranları

Karışım	28 gün	2 Ay Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		4 Ay Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)
KS	3.49	2.43	30.54	2.71	22.41
5KC	3.09	2.12	31.44	2.12	31.59
50KC	3.14	1.77	43.66	1.76	44.03
20KC	2.67	1.79	32.89	2.12	20.61
5KUK	3.33	2.74	17.61	2.63	21.13
10KUK	3,42	3,73	-8,90	3,79	-10,62
20KUK	3.21	2.46	23.36	2.27	29.20
5AK	3.96	1.91	51.78	2.33	41.12
15AK	4.15	1.76	57.63	1.54	62.99
25AK	3.61	0.73	79.87	0.69	80.84



Şekil 4.18: 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde basınç dayanımı



Şekil 4.19: 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde eğilme dayanımı

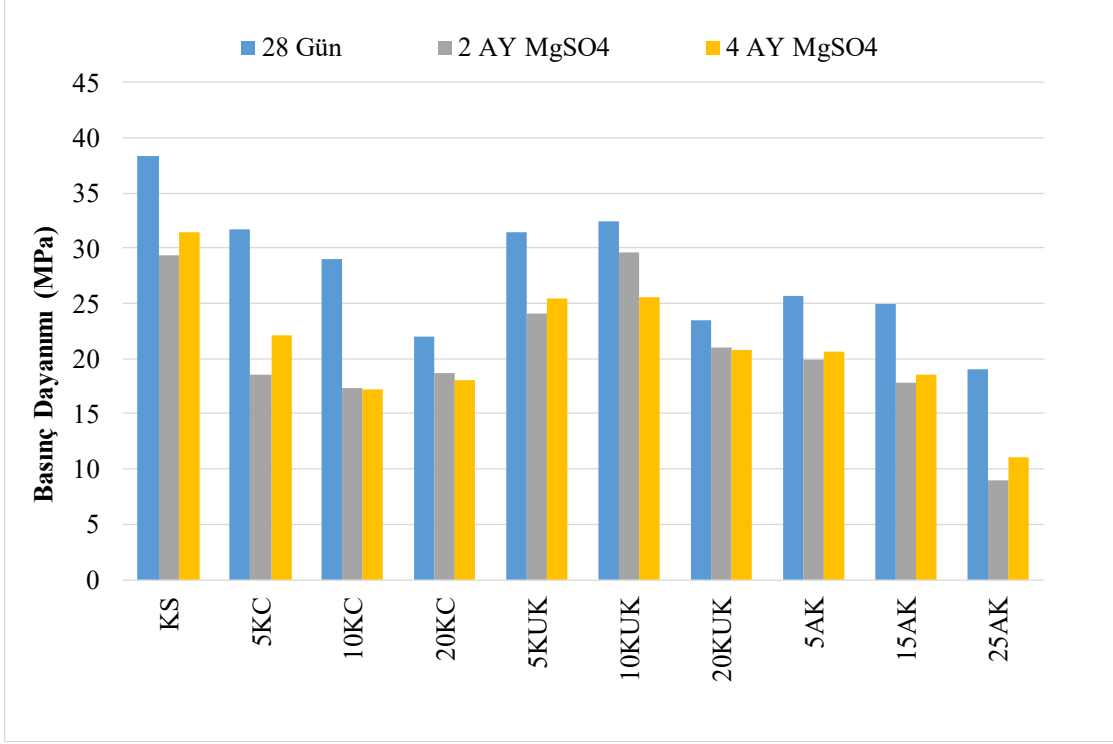
**Tablo 4.10:** 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımı ve azalma oranları

<b>Karışım</b>	<b>28 gün</b>	<b>2 Ay MgSO<sub>4</sub></b>		<b>4 Ay MgSO<sub>4</sub></b>	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)
<b>KS</b>	38.32	29.41	23.24	31.51	17.76
<b>5KC</b>	31.75	18.52	41.67	22.08	30.47
<b>50KC</b>	28.94	17.39	39.92	17.20	40.59
<b>20KC</b>	21.97	18.63	15.21	18.08	17.69
<b>5KUK</b>	31.47	24.11	23.39	25.40	19.29
<b>10KUK</b>	32,42	29,62	8,63	25,52	21,30
<b>20KUK</b>	23.53	21.06	10.50	20.78	11.69
<b>5AK</b>	25.75	19.93	22.61	20.65	19.80
<b>15AK</b>	24.94	17.77	28.76	18.59	25.45
<b>25AK</b>	19.05	9.01	52.71	11.02	42.17

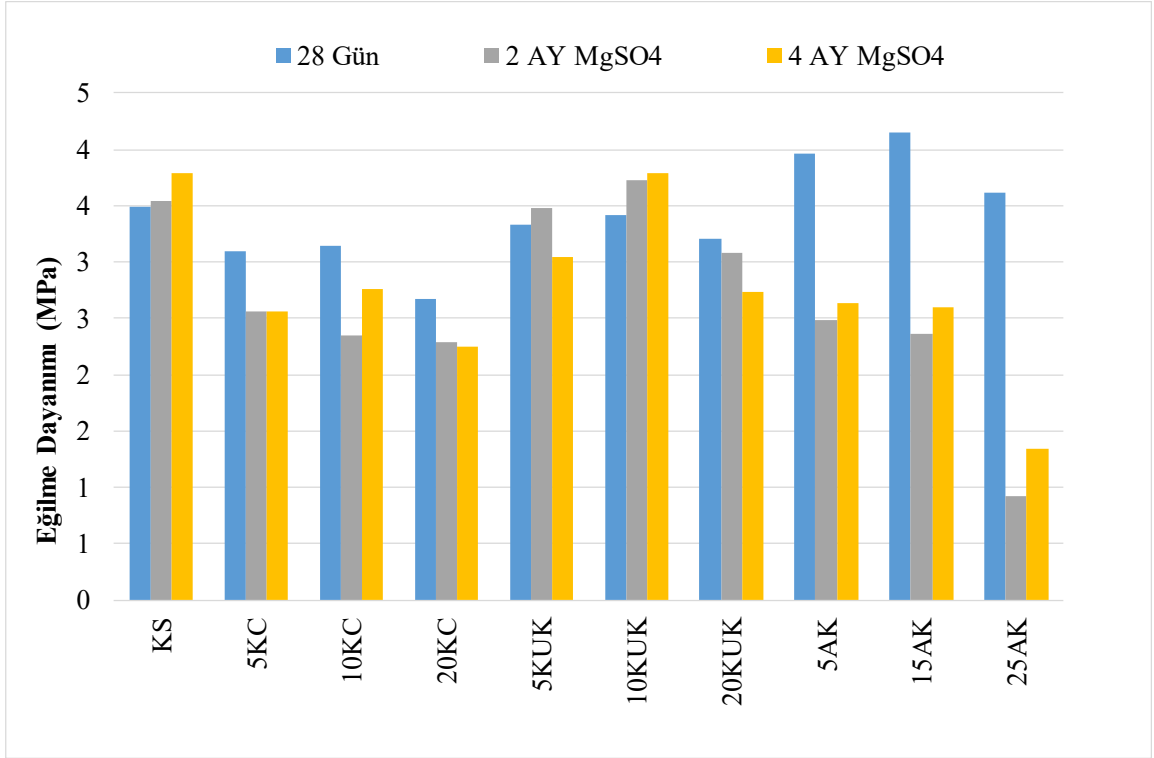
**Tablo 4.11:** 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımı ve azalma oranları

<b>Karışım</b>	<b>28 gün</b>	<b>2 Ay MgSO<sub>4</sub></b>		<b>4 Ay MgSO<sub>4</sub></b>	
	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Azalma Oranı (%)
<b>KS</b>	3.49	3.54	-1.34	3.79	-8.39
<b>5KC</b>	3.09	2.55	17.42	2.57	17.05
<b>50KC</b>	3.14	2.34	25.37	2.75	12.31
<b>20KC</b>	2.67	2.29	14.47	2.25	15.79
<b>5KUK</b>	3.33	3.48	-4.58	2.73	14.96
<b>10KUK</b>	3,42	3,73	-8,90	3,79	-10,62
<b>20KUK</b>	3.21	3.08	4.01	2.73	14.96
<b>5AK</b>	3.96	2.48	37.28	2.64	33.43
<b>15AK</b>	4.15	2.37	42.94	2.60	37.29
<b>25AK</b>	3.61	0.93	74.35	1.35	62.66





Şekil 4.20: 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımı



Şekil 4.21: 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde basınç dayanımı

#### 4.2.3.2 Sülfat Çözeltisi Etkisinde Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Sodyum sülfat çözeltisinin jel oluşumuna katkıda bulunduğu ve boşluk oranını azalttığı için ultrases geçiş hızı değerlerini arttırdığı bulunmuştur. Magnezyum sülfat çözeltisinde ultrases geçiş hızı değerlerinde azalarak daha gözenekli bir yapının oluştuğu görülmüştür [47]. Bu çalışmada her çözelti ve her seri farklı sonuç vermiştir ancak daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde magnezyum sülfat etkisinde ultrases hızında beklenildiği gibi çok fazla düşüş yaşanmıştır.

Sülfat çözeltilerinin etkisinde kalan geopolimer serilerinin ultrases geçiş hızı değerleri ve 28 günlük değerlere göre oranı Tablo 4.12 ve Tablo 4.13'de verilmiştir. Şekil 4.21 ve 4.22'de ultrases geçiş hızı sonuçlarının grafiği görülmektedir.

Sodyum sülfat etkisinde 2 ay sürede ultrases geçiş hızı azalma oranı %2.16 ile %55.38 değerleri arasında olmuştur. 4 ay sodyum sülfata maruz kalan geopolimer serilerinde ultrases geçiş hızı azalma oranı %7.03 ile %58.03 değerleri arasında olmuştur. En az azalma oranı KS serisinde meydana gelmiştir.

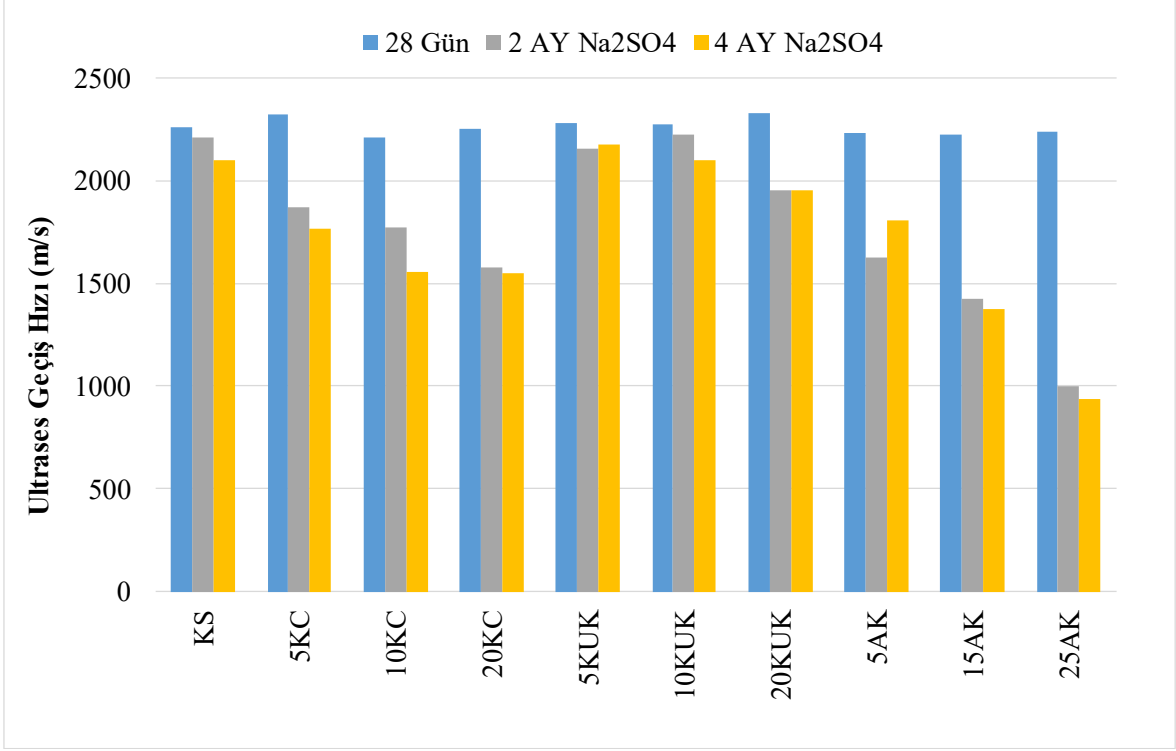
Magnezyum sülfat etkisinde ise 2 aylık etki süresinde ultrases geçiş hızındaki azalma oranı %33.73 ile %0.42 arasında olmuştur. 5KC, 10KC, 20KC, A-K, 15AK ve 2A-K serilerinde azalma meydana gelmiştir. KS, 5KUK, 10KUK ve 20KUK'da azalma değil artış görülmüştür. Bu artış oranları %0.77 ile %14.17 arasında olmuştur. 4 aylık sürede meydana gelen azalma oranı %31.55 ile %3.91 arasındadır. 4 aylık etki süresinde 5KC, 10KC, 20KC, 5AK ve 25AK serilerinin ultrases geçiş hızında azalma olmuştur. KS, 5KUK, 10KUK, 20KUK ve 15AK'da azalma değil artış görülmüştür. Bu artış oranları %0.77 ile %14.17 arasında olmuştur. En fazla artış oranı 4 ay etkide tekrar 10KUK serisinde meydana gelmiştir. Artışın sebebi numunelerdeki boşlukların çözelti etkisiyle sülfat tuzları ve hidratasyon ürünleri ile dolmasından kaynaklanmaktadır [47].

**Tablo 4.12:** 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri ve azalma oranları

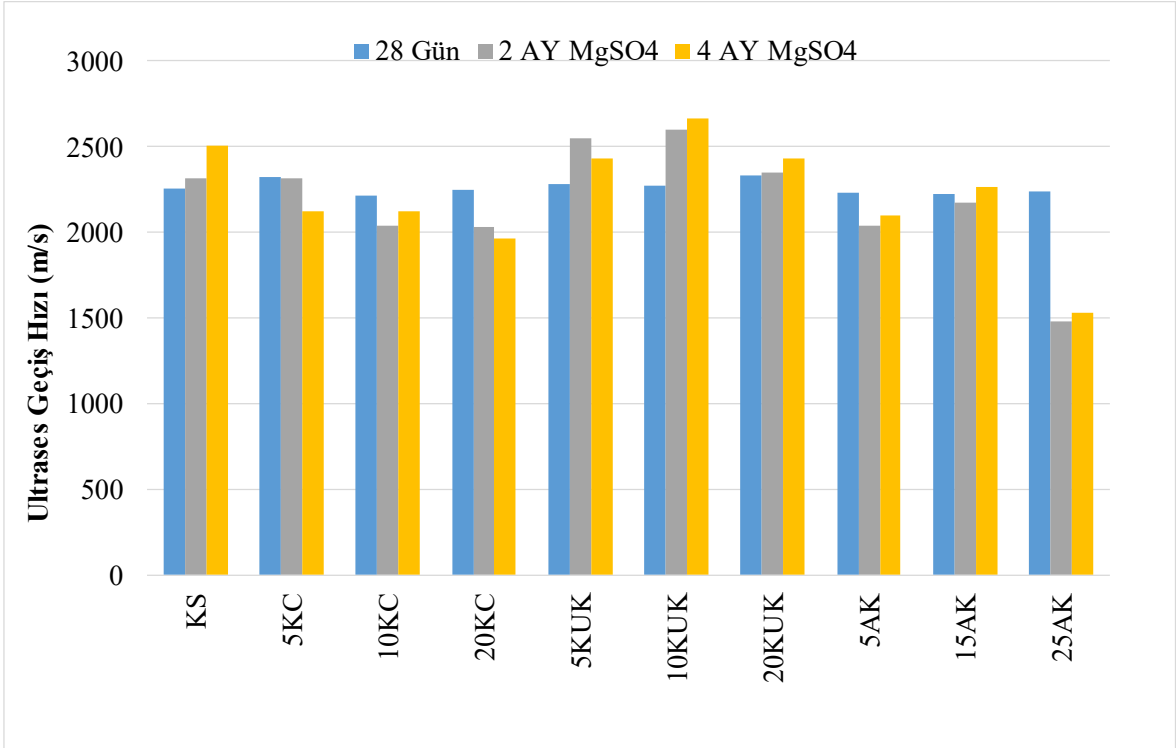
Karışım	28 gün		2 Ay Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		4 Ay Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Azalma Oranı (%)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Azalma Oranı (%)	
KS	2259	2210	2.16	2100	7.03	
5KC	2321	1872	19.36	1767	23.88	
50KC	2212	1775	19.74	1557	29.60	
20KC	2250	1575	29.98	1552	31.02	
5KUK	2280	2155	5.45	2177	4.51	
10KUK	2274	2223	2,24	2099	7,70	
20KUK	2329	1954	16.07	1955	16.03	
5AK	2231	1625	27.14	1804	19.13	
15AK	2226	1423	36.09	1377	38.12	
25AK	2237	998	55.38	939	58.03	

**Tablo 4.13:** 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde ultrases geçiş hızı değerleri ve azalma oranları

Karışım	28 gün		2 Ay MgSO <sub>4</sub>		4 Ay MgSO <sub>4</sub>	
	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Azalma Oranı (%)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Azalma Oranı (%)	
KS	2259	2317	-2.60	2508	-11.03	
5KC	2321	2311	0.42	2124	8.48	
50KC	2212	2040	7.77	2125	3.91	
20KC	2250	2032	9.69	1962	12.79	
5KUK	2280	2546	-11.67	2436	-6.84	
10KUK	2274	2596	-14,17	2667	-17,31	
20KUK	2329	2347	-0.77	2431	-4.38	
5AK	2231	2037	8.68	2098	5.96	
15AK	2226	2171	2.45	2268	-1.88	
25AK	2237	1482	33.73	1531	31.55	



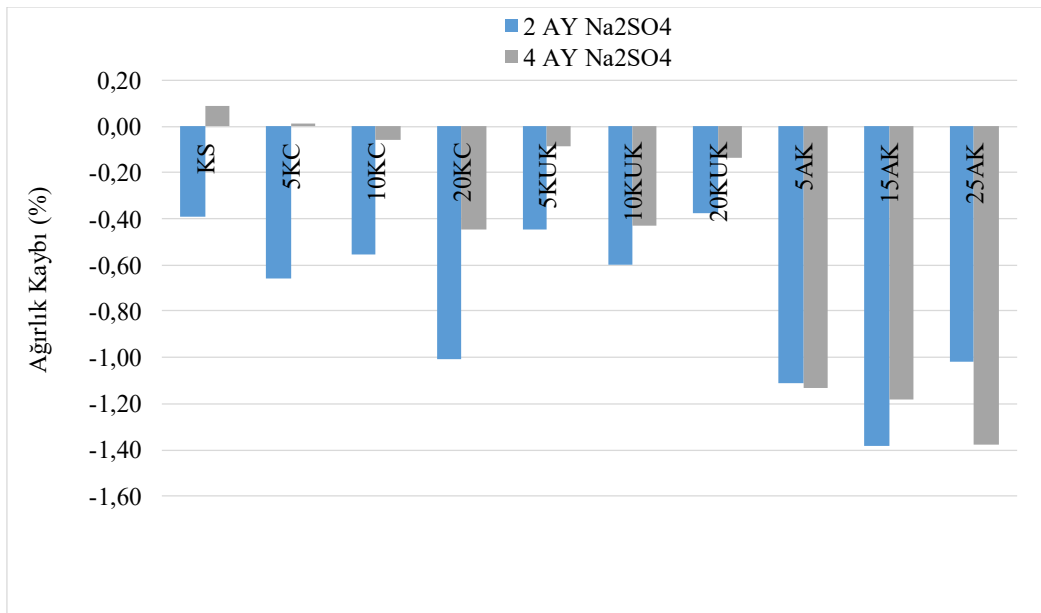
Şekil 4.22: 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat etkisinde ultrasres geçiş hızı değerleri



Şekil 4.23: 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat etkisinde ultrasres geçiş hızı değerleri

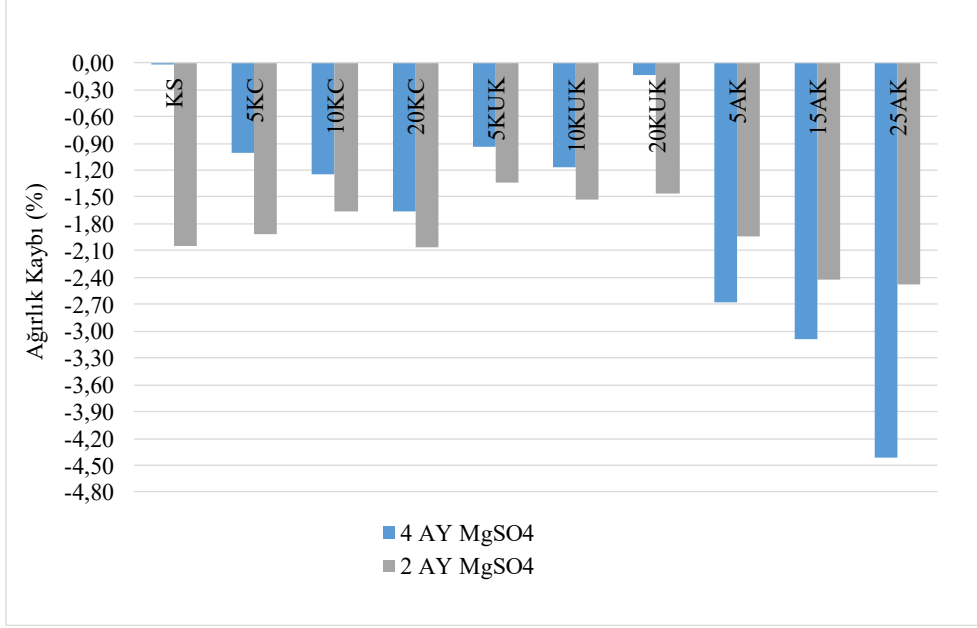
#### 4.2.3.3 Sülfat Çözeltisi Etkisinde Ağırlık Kaybı Sonuçları

Sodyum sülfat etkisinde 2 aylık etki sürecinde ağırlıkta kayıp değil artış yaşanmıştır. Artış oranları %1.37 ile %0.39 arasında olmuştur. 4 aylık süreçte ise sadece KS serisi ile 5KC serisi çok düşük ağırlık kaybı yaşamıştır. Bu değerler sırasıyla %0.09 ve %0.01 olmuştur. Diğer geopolimer serilerinde ki artış oranları ise %1.38 ile %0.06 arasında olmuştur. Şekil 4.23’de ağırlık kaybı grafiği gösterilmiştir. Bu da bize kolemanit atığı katkılı serilerde sodyum sülfat çözeltisinin numune boşluklarında kristalleşerek çözeltiden geopolimer harç içindeki yapıya emilim olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.24: 2 ay ve 4 ay süreyle sodyum sülfat ağırlık kaybı değerleri (%)

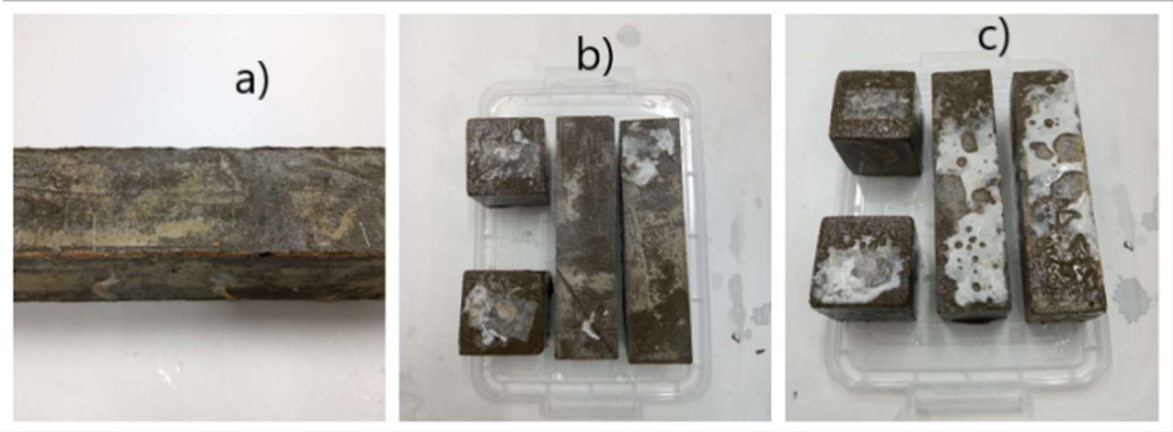
Magnezyum sülfat etkisinde de 2 aylık etki sürecinde ağırlıkta kayıp değil artış yaşanmıştır. Artış oranları %2.48 ile %1.33 arasında olmuştur. 4 aylık süreçte ise sadece Kontrol 1S serisinde ağırlık kaybı ya da artışı olmamıştır. Diğer geopolimer serilerinde ki artış oranları ise %4.41 ile %0.13 arasında olmuştur. Şekil 4.24’de ağırlık kaybı grafiği gösterilmiştir. Aynı şekilde kolemanit atığı katkılı serilerde magnezyum sülfat çözeltisinin numune boşluklarında kristalleşerek çözeltiden geopolimer harç içindeki yapıya emilim olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.25: 2 ay ve 4 ay süreyle magnezyum sülfat ağırlık kaybı değerleri (%)

#### 4.2.3.4 Sülfat Çözeltisi Etkisinden Sonra Görsel İnceleme

Magnezyum ve sodyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerin sülfat etkisinden sonra önemli bir deformasyon, çatlama vb. olmadığı görülmüştür. Magnezyum sülfat etkisinden sonra geopolimer numunelerde dış yüzeyde tuz kalıntıları oluşmuştur bu kalıntılar kolemanit ikame oranının artması ile artış göstermiştir. Şekil 4.25’de kolemanit ikamesinin artmasıyla artan tuz kalıntıları gösterilmiştir.

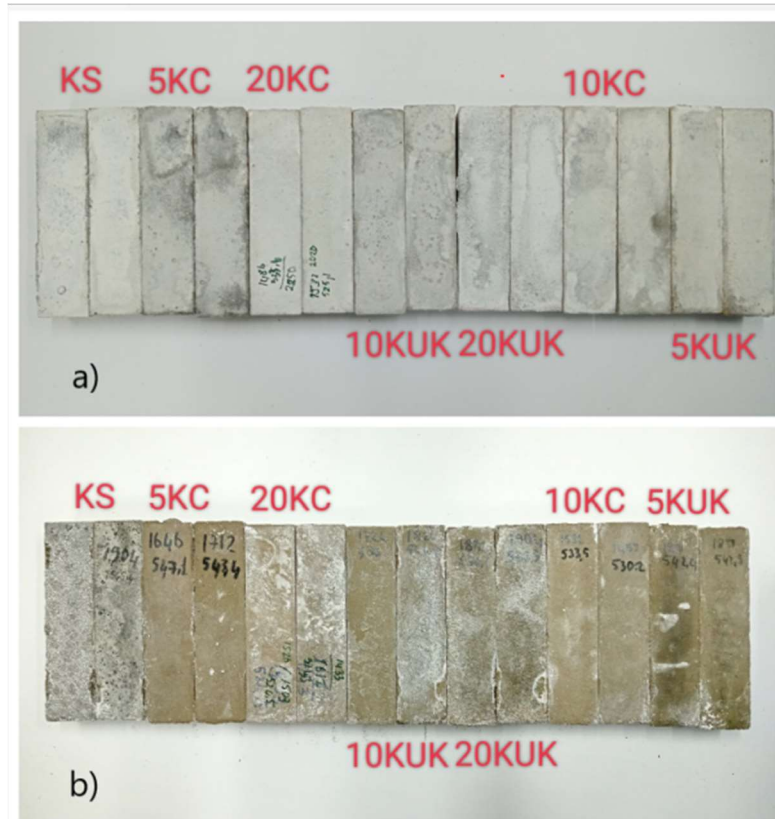


Şekil 4.26: 4 ay magnezyum sülfat etkisi a) 5AK, b) 15AK, c) 25AK

Sodyum sülfat etkisinden sonra ise geopolimer numuneler ıslakken dış yüzeyde tuz kalıntısı görülmemiştir fakat kurumaya başladığında dış yüzeyinde çiçeklenme etkisi görülmüştür. 25AK serisinde çiçeklenme etkisi Şekil 4.26’da gösterilmiştir. Şekil 4.27’de magnezyum sülfat ve sodyum sülfat etkisi sonrasında numunelerin görünümü verilmiştir.



Şekil 4.27: 2 ay sodyum sülfat etkisi ile 25AK serisinde oluşan çiçeklenme



Şekil 4.28: a) 2 ay magnezyum sülfat etkisi, b) 2 ay sodyum sülfat etkisi

## 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimer üretiminde kolemanit atığı bağlayıcıya ve agregaya ikame edilerek kullanılmıştır. Durabilite ve mekanik deney sonuçlarına göre kolemanit atığının kullanılabilirliğini araştırılmıştır. Geopolimer harç numuneleri oda sıcaklığında kür edilmiştir. 5KUK serisinde agrega ile kolemanit farklı oranlarda yer değiştirmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- 90 günlük basınç dayanımında %5 (5KC) oranında uçucu küle kolemanit ikamesi en yüksek sonucu vermiştir. 7 günlük basınç dayanımında %5 (5KUK) ve %10 (10KUK) kolemanit atığının erken dayanıma olumlu etkisi görülmüştür.
- Eğilme dayanımı sonuçlarında 15AK 7, 28 ve 90. günlerde en yüksek sonucu vermiştir. Kolemanit atığının % 15 oranında agregaya ikamesi eğilme dayanımı pozitif etkilemiştir.
- Yüksek sıcaklık etkisinde 300°C'de % 5 kolemanit atığı katkılı 5KUK serisi hem basınç hem eğilme dayanımında en iyi sonucu vermiştir. 600°C'de en yüksek basınç dayanımı kontrol serisine aittir fakat eğilme dayanımında 25AK en iyi sonucu vermiştir. 900°C'de 20KUK en yüksek basınç dayanımı 25AK en yüksek eğilme dayanımı sonucunu vermiştir. Ultrases geçiş hızı sonuçları bu sonuçlarla paralellik göstermiştir. Ağırlık kaybı artan test sıcaklığı ile artış göstermiştir. Kolemanit atığının %20 oranında bağlayıcıya ve %25 oranında agregaya ikamesi özellikle 300°C ve 900°C'de dayanımda olumlu etki göstermiştir.
- Donma-çözülmede kolemanit atığının %10, %20 oranında bağlayıcıya ikamesi basınç dayanımı dayanım kaybının azaltmıştır. %25 oranında agregaya ikamesi ise basınç dayanımını arttırmıştır. Eğilme dayanımında da %10 ve %20 bağlayıcıya kolemanit atığı ikamesinin olumlu etkisi görülmüştür. Ultrases geçiş hızı sonuçları dayanım sonuçları ile paralel olmuştur. Ağırlık kaybı yaşayan tek seri kontrol serisi olmuştur. Kolemanit atığı ikameli serilerin içine deney ortamındaki nem girmesiyle ağırlık artışı yaşanmıştır.
- Sodyum sülfat etkisinde 2 ay ve 4 ay etki sürelerinde 28 günlük basınç dayanım değerlerine göre düşüş yaşanmıştır. %20 kolemanit atığı ikameli serilerde 20KC 20KUK basınç dayanımında kayıp oranı azalmıştır. Eğilme dayanımında %10 ve %20 kolemanit atığı içeren 10KUK ve 20KUK serilerinde 2 aylık etki süresinde eğilme dayanımın kayıp azalmıştır.



- Magnezyum sülfat çözeltisine 2 ay ve 4 ay etki süresinde 20KC, 10KUK, 20KUK serilerinde basınç dayanımında azalma oranı KS'ye kıyasla azalmıştır. Eğilme dayanımında 5KUK, 10KUK, 20KUK serilerinde 2 aylık etkisi süresinde eğilme dayanımı artmıştır. Kolemanitin cürufa ikamesi daha iyi sonuç vermiştir. 4 aylık etki süresinde 10KUK serisinin eğilme dayanımı KS'ye eşit olup en yüksek sonucu vermiştir.
- Sülfat etkisinde 2 ay etki süresinde magnezyum sülfat çözeltisi, 4 ay etki süresinde sodyum sülfat çözeltisi etkisi daha zararlı olmuştur. Sülfat etkisinde en çok dayanım kaybı yaşayan seri 25AK serisi olmuştur.
- Araştırma sonuçlarında, kolemanit atığı katkılı numunelerden elde edilen dayanıklılık ve durabilite deney sonuçlarının olumlu olduğu görülmüştür. Bu deneysel çalışmanın sonuçlarına dayanılarak bor rezervine sahip Türkiye ve diğer ülkelerde, kolemanit atığının geopolimer harç üretiminde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

### **5.1 Değerlendirme ve Öneriler**

Bu çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu hem bağlayıcı hem agrega olarak kullanılan kolemanit atığı gibi endüstriyel atıkların geopolimer harç üretiminde kullanılması ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır. Bu atıkların depolanma, bertaraf edilme sorunları maliyete sebep olmaktadır. Atıkların kullanılıp azalmasıyla çevre kirliliği azaltılabilir. Kolemanit atıklarının diğer atıklarla birlikte geopolimer beton ve harç üretiminde kullanılması ile ilgili literatürde fazla çalışma bulunmamaktadır. Geopolimer malzemeler yüksek dayanım kazanmak için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada üretilen geopolimer harçların dayanım ve dayanıklılık özellikleri oda sıcaklığında denenmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda kolemanit atığı ile üretilen bu tür geopolimer harçların yüksek sıcaklıklarda kürlenme ile dayanım ve dayanıklılık özellikleri ve kür koşulları ayrıca kolemanitin agrega ikamesi oranları değiştirilerek araştırılmadır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Habert, G., De Lacaillerie, J. D. E. and Roussel, N., “An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends”, *Journal of cleaner production*, 19 (11), 1229-1238, (2011).
- [2] Zakka, W. P., Lim, N. H. and Khun, M. C., ‘‘A scientometric review of geopolymer concrete’’, *Journal of Cleaner Production*, 280 (1), (2021).
- [3] Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Jimenez, J. R., Fernandez-Roriguez, M. and Morales, D.S., ‘‘Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior’’, *Journal of Building Engineering*, 44, (2021).
- [4] Madlool, N. A., Saidur, R., Rahim, N. A. and Kamalisarvestani, M., ‘‘An overview of energy savings measures for cement industries’’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 18-29, (2013).
- [5] Nuruddin, M. F., Malkawi, A. B., Fauzi, A., Mohammed, B. S. and Almattarneh, H. M., ‘‘Geopolymer concrete for structural use: Recent findings and limitations’’, In *IOP conference series: materials science and engineering*, 133 (1), 012-021, June, (2016).
- [6] Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C. and van Deventer, J. S. J., ‘‘The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete’’, *Cement and Concrete Research*, 37 (12), 1590–1597, (2007).
- [7] Davidovits, J., ‘‘Geopolymer cement. A review’’, *Geopolymer Institute, Technical papers*, 21, 1-11, (2013).
- [8] Petrillo, A., Cioffi, R., Ferone, C., Colangelo, F. and Borrelli, C., ‘‘Eco-sustainable geopolymer concrete blocks production process’’, *Agriculture and agricultural science procedia*, 8, 408-418, (2016).
- [9] Okoye, F. N., Durgaprasad, J. and Singh, N. B., ‘‘Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete’’, *Ceramics International*, 42 (2), 3000-3006, (2016).
- [10] Rangan, B. V., ‘‘Geopolymer concrete for environmental protection’’, *The Indian concrete journal*, 88 (4), 41-59, (2014).
- [11] Singh, N. B. And Middendorf, B., ‘‘Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview’’, *Construction and Building Materials*, 237, 117455, (2020).

- [12] Davidovits, J., “Why Alkali-Activated Materials (AAM) are Not Geopolymers [online]”, (8 Ocak 2021), <https://www.geopolymer.org/library/technical-papers/25-why-alkali-activated-materials-aam-are-not-geopolymers/>, (2018).
- [13] Davidovits, J., “Geopolymer Chemistry and Applications 5th edition [online]”, (8 Ocak 2021), <https://www.geopolymer.org/shop/product/geopolymer-chemistry-applications/>, (2020).
- [14] Boyacı, Ö., “Farklı Kaolenlerin Metakaolen ve Spinel Yapılarda Geopolimer Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya, (2018).
- [15] Sertkaya, G. and Bayat, B., “Kolemanit Atıklardan Biyoliç Yöntemi İle Borik Asit Eldesi”, Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17 (7), (2007).
- [16] Yenmez, N., “Stratejik bir maden olarak bor minerallerin Türkiye için önemi”, Coğrafya Dergisi, 19, 59-94, (2009).
- [17] Koca, M. and Bentli, İ., “Emet kolemanit-3 mm konsantratör artığından dekrepitasyon ve briketleme yöntemleriyle satılabilir ürün eldesinin araştırılması” Journal Of Boron, 2 (1), 49 - 57, (2017).
- [18] Şenol Arslan, D., “Türkiye’de farklı yörelerde bulunan kolemanit minerallerinin fiziksel, kimyasal ve termal özelliklerinin tayini”, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11 (4), 1225-1234, (2021).
- [19] Yoğurtcuoğlu, E., “Sülfürik Asitli Ortamda Bor İçeren Atıkların Davranışı”, Karadeniz Chemical Science and Technology, (4), (2019).
- [20] Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü. And Mordoğan, H., “Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları”, 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, Türkiye, 419-423, (2005).
- [21] Aruntaş, H., “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21 (1), 93-204, (2006).
- [22] Şahin, Y. İ. and Koçak, Y., “Yüksek Fırın Cürufu İkameli Çimentoların Yapısal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10 (2), 802-814, (2022).
- [23] Yılmaz, Y., “Beton üretiminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmasının etkileri ve maliyet analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, (2014).
- [24] Aygörmez, Y., “Kolemanit Atığı ve Silis Dumanı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harcın Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi,

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2018).

- [25] Demir, S., “Kaolin ve Sodyum Silikat Esaslı İnorganik Bağlayıcının Basma Dayanımına Kimyasal Kompozisyonun Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, (2020).
- [26] Atabey, İ. İ., “F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, (2017).
- [27] Durgun, M. Y., Özen, S., Karakuzu, K., Kobya, V., Bayqra, S. H. and Mardani-Aghabaglou, A., “Effect of high temperature on polypropylene fiber-reinforced mortars containing colemanite wastes”, *Construction and Building Materials*, 316, 125827, (2022).
- [28] Uysal, M., Al-mashhadani, M. M., Aygörmez, Y. and Canpolat, O., “Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars”, *Construction and Building Materials*, 176, 271-282, (2018).
- [29] Durgun, M. Y. and Sevinc, A. H., “High temperature resistance of concretes with GGBFS, waste glass powder, and colemanite ore wastes after different cooling conditions”, *Construction and Building Materials*, 196, 66-81, (2019).
- [30] Lotti, P., Comboni, D., Gigli, L., Carlucci, L., Mossini, E., Macerata, E., et al., “Thermal stability and high-temperature behavior of the natural borate colemanite: An aggregate in radiation-shielding concretes”, *Construction and Building Materials*, 203, 679-686, (2019).
- [31] Aygörmez, Y., Canpolat, O. and Al-mashhadani, M. M., “Assessment of geopolymer composites durability at one year age”, *Journal of Building Engineering*, 32, 101453, (2020).
- [32] Ali, N., Canpolat, O., Aygörmez, Y. and Al-Mashhadani, M. M., “Evaluation of the 12–24 mm basalt fibers and boron waste on reinforced metakaolin-based geopolymer”, *Construction and Building Materials*, 251, 118976, (2020).
- [33] Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M. and Uysal, M., “Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites”, *Construction and Building Materials*, 235, 117502, (2020).

- [34] Arslan, A. A., Uysal, M., Yılmaz, A., Al-mashhadani, M. M., Canpolat, O., Şahin, F., et al., “Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites”, *Construction and Building Materials*, 225, 909-926, (2019).
- [35] Aygörmez, Y., Canpolat, O. and Al-mashhadani, M. M., “A survey on one year strength performance of reinforced geopolymer composites”, *Construction and Building Materials*, 264, 120267, (2020).
- [36] Aygörmez, Y., & Canpolat, O., “Research on Resistance to Sulfate and Chloride of Reinforced Metakaolin-Based Geopolymers”, *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13 (1), 87-101, (2022).
- [37] Aygörmez, Y., “Assessment of performance of metabentonite and metazeolite-based geopolymers with fly ash sand replacement”, *Construction and Building Materials*, 302, 124423, (2021).
- [38] Çelik, A., “Sentetik Liflerle Güçlendirilmiş Bor Atığı Katkılı Metakaolin Tabanlı Geopolimer Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Davranışı ve Mekanik Özellikleri”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, (2019).
- [39] Celik, A., Yılmaz, K., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M. M., Aygörmez, Y. and Uysal, M., “High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers”, *Construction and Building Materials*, 187, 1190-1203, (2018).
- [40] Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y. F., Wuhrer, R. and Murphy, T., “Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature”, *Cement and Concrete Composites*, 86, 9-18, (2018).
- [41] Rovnaník, P., & Šafránková, K. (2016). Thermal behaviour of metakaolin/fly ash geopolymers with chamotte aggregate. *Materials*, 9(7), 535.
- [42] Zhang, H.Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L. ve Qi, S.L., (2015). “Comparative thermal and mechanical performance of geopolymers derived from metakaolin and fly ash”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(2).
- [43] Topçu, İ. B. ve Demir, A., “Yüksek Sıcaklık Uygulama Süresinin Harç Özelliklerine Etkisi”, 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 455-463, (2007).
- [44] He, R., Dai, N., and Wang, Z., “Thermal and mechanical properties of geopolymers exposed to high temperature: A literature review”, *Advances in Civil Engineering*, 1-17, (2020).

- [45] Basheer, L., Kropp, J., Cleland, D. J., "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review." *Construction and building materials* 15.2-3 (2001): 93-103.
- [46] Valencia Saavedra, W. G., Angulo, D. E. and Mejía de Gutiérrez, R., "Fly ash slag geopolymer concrete: Resistance to sodium and magnesium sulfate attack", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (12), 04016148, (2016).
- [47] Bakharev, T. "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions" *Cement and concrete research*, 35 (6), 1233-1246, (2005).
- [48] Kaya, M., Köksal, F., Nodehi, M., Bayram, M., Gencel, O. and Ozbakkaloglu, T., "The Effect of Sodium and Magnesium Sulfate on Physico-Mechanical and Microstructural Properties of Kaolin and Ceramic Powder-Based Geopolymer Mortar", *Sustainability*, 14 (20), 13496, (2022).

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Tuğçe Beyza BAŞTÜRK

Doğum tarihi ve yeri : 23.04.1996/ANKARA

e-posta : tugcebeyzaa@hotmail.com

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2023
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2019
Lise	Tavşanlı Anadolu Lisesi	2014