

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



**METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARA FARKLI  
KÜR KOŞULLARININ ETKİSİNİN İNCELEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AHMET ALİ ARSLAN**

**BALIKESİR, HAZİRAN- 2019**

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



**METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARA FARKLI**  
**KÜR KOŞULLARININ ETKİSİNİN İNCELEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**AHMET ALİ ARSLAN**

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Arın YILMAZ (Tez Danışmanı)**

**Prof. Dr. FatmaNurhayat DEĞİRMENCİ**

**Doç. Dr. Orhan CANPOLAT**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Ahmet Ali ARSLAN tarafından hazırlanan "METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARA FARKLI KÜR KOŞULLARININ ETKİSİNİN İNCELEMESİ" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 17.06.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Doç. Dr. Arın YILMAZ

Üye  
Prof. Dr. Fatma Nurhayat DEĞİRMENÇİ

Üye  
Doç. Dr. Orhan CANPOLAT

  
.....  
  
.....  
  
.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
Koordinatörlüğü tarafından FBA-2017-3081 nolu proje ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARA FARKLI KÜR  
KOŞULLARININ ETKİSİNİN İNCELEMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
AHMET ALİ ARSLAN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ARIN YILMAZ)  
(EŞ DANIŞMAN: DOÇ. DR. MÜCTEBA UYSAL)  
BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

Bu çalışmada, kürleme sistemlerinin etkisiyle, bazalt ve polivinil alkol lif katkılı, metakaolin ve kolemanit bağlayıcı malzemeler kullanılarak hazırlanan geopolimer kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan 7 seri için ıslanma-kuruma ve ısı kürü olmak üzere iki farklı kür koşulu uygulanmıştır. Geopolimer numunelerin mekanik özellikleri olarak 7 ve 28 günlük dayanım ve ultrases geçiş hızı, su emme, birim ağırlık, gözeneklilik sonuçları araştırılmıştır. Aşınma testi uygulandıktan sonra ağırlık kaybı ve boy değişimi incelenirken ve 200, 400 ve 600 °C' lik yüksek sıcaklık testleri uygulandıktan sonra dayanım, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı sonuçları bulunmuştur. Sonuçlar yüksek sıcaklık testleri sonrasında kalan dayanım (residual strength) değerlerinin yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan SEM, FTIR ve TGA-DTA analizleri sonucunda yüksek sıcaklık sonrası geopolimer numunelerin stabil yapısını koruduğu gözlenmiştir. Islanma-kuruma kürü uygulandığında FTIR sonuçlarında Si – O – Al bağlarının daha yüksek oranda olduğu görülmüştür. Bu durum geopolimerizasyonun daha yüksek oranda gerçekleştiğini ve dayanım değerlerinin yükseldiğini göstermiştir. TGA-DTA sonuçlarına göre de benzer davranışlar görülmüş ve sıcaklıkla beraber ağırlık kaybının ıslanma-kuruma uygulanan numunelerde daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca bazalt ve polivinil alkol lif oranındaki artışın dayanım sonuçları üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Bu durumun ana nedeninin bazalt ve polivinil alkol liflerinin etkisiyle dayanıklı bir tabaka oluştuğu düşünülmektedir. Geopolimerik matrisin kompakt yapısı iyi bir yapışma derecesi sağlamaktadır. Bu, geopolimer numunelerinin donma-çözölmeye karşı direnç göstermesini sağlamıştır. Geopolimer numunelerinde, 90 çevrime rağmen, kalan dayanımın yüksek olduğu ve ultrases geçiş hızı sonuçlarındaki düşüşün sınırlı olduğu görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELER:** Geopolymer, metakaolin, bor, kolemanit, ıslatma-kurutma kürü, ısı kürü, yüksek sıcaklık, donma-çözünme.

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT TYPES OF CURE CONDITIONS ON METAKAOLIN-BASED GEOPOLYMER MORTARS**

**MSC THESIS**

**AHMET ALİ ARSLAN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

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

**(CO-SUPERVISOR: ASSOC.PROF.DR. MÜCTEBA UYSAL )**

**BALIKESİR, JUNE 2019**

In this study, mechanical and durability properties of geopolymer composites prepared using metakaolin and colemanite binding materials with basalt and polyvinyl alcohol fibers were investigated under the influence of curing systems. For the 7 series prepared, two different curing conditions have been applied: wetting-drying and heat curing. The mechanical properties of geopolymer samples were investigated for 7 and 28 days strength and ultrasonic pulse velocity results, water absorption, unit weight and porosity. After the abrasion test, weight loss and length change were examined and after the high temperature tests of 200, 400 and 600 °C, the results of strength, ultrasonic pulse velocity and weight loss were found. The results showed that the residual strength values were high after high temperature tests. As a result of SEM, FTIR and TGA-DTA analyzes, it was observed that high temperature post-geopolymer samples retained their stable structure. When the wetting-drying curing was applied, it was observed that the Si-O-Al bonds were higher in the FTIR results. This showed a higher rate of geopolymerization and increased strength values. Similar behaviors were observed according to TGA-DTA results, and weight loss with temperature was found to be lower in samples applied to wetting-drying curing. Also, there was a positive effect on the strength results with the increase in basalt and polyvinyl alcohol fibers ratio. It is consider that the main reason for this situation is the formation of a resistant layer with the effect of basalt and polyvinyl alcohol fibers. The compact structure of the geopolymeric matrix brings along a good degree of adhesion. This allows geopolymer samples to resist freezing-thawing. In geopolymer samples, despite the 90 cycles, the residual strength were high and the decrease in the ultrasonic pulse velocity rate results were limited.

**KEYWORDS:** Geopolymer, metakaolin, boron, colemanite, wetting-drying curing, heat curing, high temperature, freezing-thawing.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ .....	vii
SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENEL BİLGİLER .....</b>	<b>3</b>
2.1 Geopolimerler.....	3
2.1.1 Geopolimer nedir? .....	3
2.1.2 Geopolimerlerin Kimyası .....	4
2.1.3 Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri.....	6
2.1.4 Geopolimer türleri.....	7
2.1.5 Geopolimerin kullanım alanları .....	7
2.2 Konu İle İlgili Önceki Çalışmalar .....	8
<b>3. MALZEMELER VE YÖNTEMLER.....</b>	<b>13</b>
3.1 Kullanılan Malzemeler .....	13
3.1.1 Metakaolin .....	13
3.1.2 Kolemanit.....	14
3.1.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu .....	15
3.1.4 Standart Rilem Kumu .....	16
3.1.5 Sodyum Silikat.....	17
3.1.6 Sodyum Hidroksit .....	18
3.1.7 Polivinil Alkol.....	19
3.1.8 Bazalt Lif .....	20
3.2 Deneysel Çalışma .....	21
3.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi .....	25
3.2.2 Eğilme Dayanımı Deneyi.....	25
3.2.3 Su Emme, Birim Ağırlık ve Boşluk Oranı Deneyleri.....	26
3.2.4 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.....	27
3.2.5 Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	28
3.2.6 Yatay (Böhme) Aşınma Deneyi.....	29
3.2.7 Çekme Dayanımı Deneyi.....	29
3.2.8 Donma-Çözünme Deneyi .....	30
<b>4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....</b>	<b>31</b>
4.1 Geopolimer Numunelerin Mekanik Özellikleri.....	31
4.1.1 Eğilme ve Basınç Dayanımı Sonuçları .....	31
4.1.2 Çekme Dayanımı Sonuçları .....	35
4.1.3 Su Emme, Birim Ağırlık ve Boşluk Oranı Sonuçları .....	37
4.1.4 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları .....	39
4.1.5 Yatay (Böhme) Aşınma Deneyi Sonuçları .....	41
4.1.6 Çalışılan Parametrelerle İlgili Korelasyon İlişkisi.....	43
4.2 Geopolimer Numunelerin Durabilite Özellikleri.....	43
4.2.1 Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	44

4.2.1.1	Yüksek Sıcaklık Etkisinde Eğilme ve Basınç Dayanımı Sonuçları.	44
4.2.1.2	Yüksek Sıcaklık Etkisinde Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları.....	50
4.2.1.3	Yüksek Sıcaklık Etkisinde Ağırlık Kaybı Sonuçları.....	53
4.2.1.4	Analizler ve Görsel İnceleme.....	54
4.2.2	Donma-Çözünme Deneyi Sonuçları .....	61
<b>5.</b>	<b>SONUÇLAR.....</b>	<b>65</b>
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>67</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: Metakaolin.....	14
Şekil 3.2: Yüksek fırın cürufu .....	16
Şekil 3.3: Sodyum hidroksit .....	18
Şekil 3.4: Polivinil alkol lifleri .....	19
Şekil 3.5: Bazalt lif .....	20
Şekil 3.6: Basınç dayanımı deneyi.....	25
Şekil 3.7: Eğilme dayanımı deneyi.....	26
Şekil 3.8: Ultrases geçiş hızı cihazı.....	28
Şekil 3.9: Yüksek sıcaklık uygulanan numuneler.....	28
Şekil 3.10: Yatay böhme aşınma deneyi.....	29
Şekil 3.11: Çekme dayanımı deneyi.....	30
Şekil 3.12: Donma-çözünme deneyi.....	30
Şekil 4.1: Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdeler artışı değerleri.....	33
Şekil 4.2: Basınç dayanımı değerleri.....	34
Şekil 4.3: Eğilme dayanımı değerleri.....	35
Şekil 4.4: Çekme dayanımı değerleri.....	36
Şekil 4.5: Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdeler değerleri.....	36
Şekil 4.6: Boy değişimi oranları.....	42
Şekil 4.7: Ağırlık kaybı oranları.....	42
Şekil 4.8: Basınç dayanımı ve UGH arasındaki ilişki.....	43
Şekil 4.9: Yüksek sıcaklık etkisindeki basınç dayanımı sonuçları.....	45
Şekil 4.10: Yüksek sıcaklık etkisindeki eğilme dayanımı sonuçları.....	45
Şekil 4.11: Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdeler oranları.....	49
Şekil 4.12: Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdeler oranları.....	50
Şekil 4.13: Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızları.....	52
Şekil 4.14: Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdeler değerleri.....	52
Şekil 4.15: Yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kaybı oranları.....	54
Şekil 4.16: Yüksek sıcaklık etkisi ile ısı kürü uygulanmış geopolimer örnekleri.....	55
Şekil 4.17: Yüksek sıcaklık etkisinde ıslatma-kurutma ile kürlenmiş geopolimer.....	55
Şekil 4.18: 600°C öncesi ve sonrasında Kontrol-S ile WD örneklerinin FTIR sonuçları.....	56
Şekil 4.19: 200°C sonrası kontrol numunelerinin 200X SAM görüntüleri.....	57
Şekil 4.20: 200°C sonrası kontrol numunelerinin 500X SAM görüntüleri.....	57
Şekil 4.21: 600°C sonrası kontrol numunelerinin 200X SAM görüntüleri.....	58
Şekil 4.22: 600°C sonrası kontrol numunelerinin 500X SAM görüntüleri.....	58
Şekil 4.23: 600°C öncesi Kontrol-S numunesinin TGA-DTA sonuçları.....	59
Şekil 4.24: 600°C sonrası Kontrol-S numunesinin TGA-DTA sonuçları.....	60
Şekil 4.25: 600°C öncesi Kontrol-İK numunesinin TGA-DTA sonuçları.....	60

<b>Şekil 4.26:</b> 600°C sonrası Kontrol-IK numunesinin TGA-DTA sonuçları.....	61
<b>Şekil 4.27:</b> Donma-çözünme etkisinde kalan basınç dayanımı sonuçları.....	62
<b>Şekil 4.28:</b> Donma-çözünme etkisinde kalan basınç dayanımı sonuçları.....	62
<b>Şekil 4.29:</b> Donma-çözünme etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları.....	63
<b>Şekil 4.30:</b> Donma-çözünme etkisinde ağırlık kaybı oranları.....	64
<b>Şekil 4.31:</b> Donma-çözünme uygulanan geopolimer numuneler.....	64

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1:</b> Metakaolinin kimyasal bileşimi.....	14
<b>Tablo 3.2:</b> Kolemanitin kimyasal bileşimi.....	15
<b>Tablo 3.3:</b> Yüksek fırın cürufu kimyasal bileşimi.....	16
<b>Tablo 3.4:</b> Tane büyüklüğü dağılımı ve sınır değerleri.....	17
<b>Tablo 3.5:</b> Sodyum silikatın kimyasal özellikleri.....	18
<b>Tablo 3.6:</b> Polivinil alkol lifinin özellikleri.....	19
<b>Tablo 3.7:</b> Bazalt lifinin özellikleri.....	20
<b>Tablo 3.8:</b> Standart geopolimer harç karışım miktarları.....	21
<b>Tablo 3.9:</b> Geopolimer harç karışım yüzdeleri.....	24
<b>Tablo 4.1:</b> 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları.....	34
<b>Tablo 4.2:</b> Çekme dayanımı sonuçları.....	37
<b>Tablo 4.3:</b> Su emme, boşluk oranı ve birim ağırlığı sonuçları.....	39
<b>Tablo 4.4:</b> UGH sonuçları (m/s).....	41
<b>Tablo 4.5:</b> Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımları ve azalma oranları.....	47
<b>Tablo 4.6:</b> Yüksek sıcaklık etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları ve azalma oranları.....	48
<b>Tablo 4.7:</b> Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları ve azalma oranları.....	51
<b>Tablo 4.8:</b> Yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kaybı oranları.....	53
<b>Tablo 4.9:</b> Donma-çözünme etkisinde basınç ve eğilme dayanımı sonuçları.....	63

## SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

$\sigma$	: Basınç dayanımı
$\sigma_e$	: Eğilme dayanımı
<b>P</b>	: Uygulanan kuvvet
<b>A</b>	: Kesit alanı
<b>b</b>	: Prizma kesitinin eni
<b>d</b>	: Prizma kesitinin yüksekliği
<b>L</b>	: Mesnet silindirlere arasındaki uzaklık
<b>A</b>	: Numunenin kuru haldeki ağırlığı
<b>B</b>	: Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı
<b>C</b>	: Numunenin su içindeki ağırlığı
<b>R<sup>2</sup></b>	: Korelasyon faktörü
<b>M</b>	: Molarite
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbondioksit
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum Dioksit
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	: Sodyum Oksit
<b>NaOH</b>	: Sodyum hidroksit
<b>KOH</b>	: Potasyum hidroksit
<b>°C</b>	: Santigrad derece
<b>MK</b>	: Metakaolin
<b>K</b>	: Kolemanit
<b>AY</b>	: Artış yüzdesi
<b>MPa</b>	: Megapaskal
<b>N</b>	: Newton
<b>ÖGYFC</b>	: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>TGA-DTA</b>	: Termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz
<b>FTIR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>kWh</b>	: Kilowattsaat
<b>GJ</b>	: GigaJoule
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>WD</b>	: Islatma-kurutma kürü
<b>H</b>	: Isı kürü
<b>PVA</b>	: Polivinil alkol lif
<b>B</b>	: Bazalt lif
<b>UGH</b>	: Ultrases geçiş hızı

## ÖNSÖZ

Akademik kariyerime başladığım günden beri bilgi ve tecrübesiyle bana ışık tutan, samimiyetini ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen, her zaman yol gösterici olan, danışman hocam olması nedeniyle kendimi hep şanslı hissettiğim değerli hocam Doç. Dr. Arın YILMAZ'a en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Tez konusunun belirlenmesinden tezin son aşamasına gelinceye kadar çalışmalarına yön veren, çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak her türlü desteği sağlayan ikinci danışman hocam Doç. Dr. Mücteba UYSAL'a, ve laboratuvar çalışmalarımızı maddi, manevi ve teknik anlamda sürekli destekleyen, yoğun iş temposu arasında değerli vakitlerini ayırarak bana destek veren Doç. Dr. Orhan CANPOLAT'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde ve tamamlanmasında yardımlarını benden esirgemeyen, deneysel çalışmaların planlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı Arş.Gör.Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Balıkesir, 2019

Ahmet Ali ARSLAN

# 1. GİRİŞ

Beton, günümüzde hala en çok kullanılan yapı malzemesi olma durumunu devam ettirmektedir. Dünya çapında yıllık üretimi on milyar tonu geçen beton, sudan sonra insan tarafından en çok kullanılan ikinci maddedir [1]. Bileşenlerinin kolay temin edilebilmesi, ekonomik olması ve alternatifinin fazla olmaması gibi nedenlerle çok kullanılan beton, olumlu özelliklerinin yanında birçok olumsuz özelliğiyle sürdürülebilirliği uzun zamandır tartışılır hale gelmiştir.

Betonda bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosunun üretimi aşamasında, her bir ton çimento üretimi için, atmosfere neredeyse bir ton karbondioksit (CO<sub>2</sub>) salındığı bilinmektedir. Çimento endüstrisinin, dünya genelinde üretilen tüm CO<sub>2</sub>'nin yaklaşık yüzde 6 ila 7'sinden sorumlu olduğu tahmin edilmektedir. Beton üretimi açısından bakılacak olursa, 1 m<sup>3</sup> beton üretiminde 400 kg CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmektedir [1,2]. Ayrıca endüstriyel alanda tüketilen enerjinin %12-15 arası çimento üretimi endüstrisinde tüketilmektedir. Çimento üretimi işleminde, öğütme için tüketilen termal enerjinin 2,72 GJ/ton ve yakma için tüketilen elektrik enerjisinin 65 kWh/ton olduğu düşünülmektedir [3]. Çimento üretimi sürdürülebilir enerji ihtiyacı ve karbondioksit salınımı sonucu ortaya çıkan çevre kirliliği sorunlarını da beraberinde getirmektedir.

Bahsedilen ekonomik ve çevresel problemler, ileride yaşanabilecek daha büyük problemlerin önüne geçebilmek adına, Portland çimentosuna alternatif olabilecek bir bağlayıcı madde üretimini zorunlu hale getirmektedir. Bu kapsamdaki alternatif arayışları pek çok çalışmaya öncü olmuştur. Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan en çok ilgi çekenini ise geopolimerler olmuştur [4,5].

Birçok araştırma çalışması, alkali aktive edilmiş çimento veya "Geopolimer" olarak bilinen alüminasilikat malzemelerin alkali çözeltilerle aktive edilerek sentezlenen bağlayıcıların beton üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuştur [6].

1979 yılında Davidovits tarafından ilk kez kullanılan geopolimer terimi aslında alümina silikat esaslı malzemelerin alkali silikatlarla aktive edilmesiyle oluşan alkali alümina silikat bağlayıcı yapıları olarak tanımlanmıştır. Geopolimerler Portland çimentosuna kıyasla çok düşük CO<sub>2</sub> salınımı yapmaktadırlar. Çevre kirliliğini önlemeye yönelik sağladıkları bu katkı nedeniyle çevre koruyucu yeni mühendislik malzemeleri olarak tanımlanmaktadırlar [5].

Geopolimerlerin kullanımındaki itici güç, yan ürün stoklarını azaltma, doğal kaynakların daralmasına olan bağımlılığı azaltma ve çimento üretiminden karbondioksit emisyonlarında net bir azalma sağlama potansiyeline sahip, sentezinde mevcut olan endüstriyel yan ürünleri tüketme kabiliyeti olmuştur [6].

Alkali ile aktive edilerek üretilen geopolimerler, atmosfere salınan kirliliğin gazların düşük mertebelerde kalmasını ve doğal kaynaklar yerine atıklar kullanılarak çevrenin daha az zarar görmesini sağlamaktadır. Ayrıca, atık malzemelerin kullanılmasıyla depolama problemlerinin de azalmasına katkı sağlamaktadırlar. Geopolimerlerle üretilen betonlar, normal Portland çimentolu betonlara göre enerji tasarrufu, erken ve daha yüksek dayanım, daha düşük hidrasyon ısı, agresif kimyasallara ve donma-çözülme etkilerine karşı daha iyi dayanıklılık, daha güçlü agrega-matris aderansı göstermektedirler [7].

Bugün gelinen noktada ise bütün bu özellikleri ile geopolimerler, normal portland çimentolarına iyi bir alternatif olarak ortaya çıktıkları görülmektedir [5].

Bu çalışmada metakaolin ve kolemanit bağlayıcı gibi puzolanik karakteristiklere sahip olan malzemeler ile alkali silikatlarla aktive edilmesiyle geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu numunelere, lif katkısının etkisini incelemek için, bazalt ve polivinil alkol lifleri eklenerek geopolimer kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Geopolimer malzemelerin mekanik ve durabilite özellikleri üzerinde kür koşullarının çok etkili olması nedeniyle örneklere, farklı kür koşulları uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Geopolimerler

#### 2.1.1 Geopolimer nedir?

İlk defa 1979 yılında Davidovits tarafından ortaya atılan geopolimer terimi aslında alümina silikat esaslı malzemelerin alkali silikatlarla aktive edilmesiyle oluşan alkali alümina silikat bağlayıcı yapılar olarak tanımlanmıştır [5]. Davidovits tarafından dile getirildiğinden bu yana, bu malzemeler için farklı isimler de kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklı alümino silikatlar, alkali aktive edilmiş çimentolar, alkali bağlı seramikler, inorganik polimer beton ve hidroseramik, gibi isimler en çok kullanılanlardandır [8].

Geopolimer malzemeler özellikle son yıllarda, hem düşük karbondioksit salınımı hem de yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere ve çok iyi durabilite özelliklerine sahip olmasından dolayı ilgi çekmiştir. Bu özellikler doğrudan doğruya üretimde kullanılan alümino silikat malzemeye ve onun özelliklerine bağlıdır. Geopolimer üretiminde en fazla kullanılan alümino silikatlara örnek olarak uçucu kül, metakaolin, kırmızı çamur, cüruf, taban külü, pirinç kabuğu külü, silis dumani verilebilir. Bu amorf karakterli endüstriyel atık malzemeler bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülmektedir. En çok kullanılan aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (NaOH, KOH) ile sodyum cam suyu ( $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ ) veya potasyum cam suyu ( $n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$ ) karışımlarıdır [7]. Bu malzemelerin değerlendirilmesi, temel reaksiyonlarının incelenmesi, mekanik ve uzun süreli durabilite özelliklerinin incelenmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır [9-14].

Geopolimerleşme sürecinde kullanılan ana malzeme tek veya birkaç farklı malzeme kombinasyonundan oluşabilir. Düşük kalsiyum içerikli örneklerde geopolimer ismi tercih edilirken, cüruf gibi daha yüksek kalsiyum içerikli örneklerde alkali aktive ismi kullanılmaktadır. Ancak başka metal cürufları kullanılabildiği gibi, asit çözeltileri veya başka aktivatörler kullanan geopolimerler de mevcuttur [15].



Geopolimerlerle üretilen betonlar, normal Portland çimentolu betonlara göre erken ve daha yüksek dayanım, daha düşük hidratasyon ısısı, agresif kimyasallara ve donma-çözülme etkilerine karşı daha iyi dayanıklılık, daha güçlü agrega-matris aderansı göstermektedir [7].

Mısır'daki piramitlerin ve Roma'daki amfi tiyatronun mikroyapısı ele alındığında sertleşmiş geopolimerik malzemelerin mikroyapısıyla benzediği görülmektedir. Bu yüzden eski yapılarda doğal malzemelerden ziyade geopolimerizasyon esasına dayanan üretimin olduğu düşünülmektedir. Konuyu aydınlatmak için, birçok bilim adamı, eski zamanlarda geopolimer teorilerinin olup olmadığını ve eski yapıların bu teoriler üzerine kurulup kurulmadığını belirlemek için araştırmalar yapmaya devam etmektedirler [15].

### 2.1.2 Geopolimerlerin Kimyası

Geopolimerizasyon heterojen bir kimyasal reaksiyondur. Alümina Silikat Hidratlarının ısıya maruz bırakılması ile OH<sup>-</sup> iyonları su oluşturarak ayrışır ve Si-O-Al bağlarının oluşumunu gerçekleştirir [5]. Bu reaksiyon katı alüminosilikat oksitler ve alkali metal silikat çözeltileri arasında yüksek alkali koşullarda ve orta ısılarında, Si-O-Al ve Si-O-Si bağlarını içeren amorf yarı-kristal polimerik yapıları meydana getirir [7].

Si, 4 elektron ve 1 metaloid verme eğiliminde olan iyonizasyon enerjisi C'a oranla daha az olan bir katyondur. Bu yüzden Si 'un O ve diğer elementlerle kuracağı bağlar daha karardır. Bu kararlı hal geopolimer kimyasının temelini oluşturur. Geopolimer kimyasının temelindeki bu özelliklerden yola çıkılarak silikat moleküllerinin (AlO<sub>4</sub>) alüminat molekülleri ile O<sub>2</sub> atomlarının e-1 'larını paylaşmasıyla elde edilen polisilikatlar ve yine silika moleküllerinin zincir bağlarından meydana gelen siloksonların keşifleri gerçekleştirilmiştir. Bu keşiflerle geopolimer kimya çalışmalarının yapı taşları oluşturulmuştur [5]. Geopolimer, özetle fırınlanmış kil içinde bulunan alüminatlarla silikatların oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile kovalent bağlı bileşik oluşturması olayıdır [7].

Geopolimer prosesi bir füzyon sinterleme ya da eritme işlemi değil polimerleşme sürecidir. Özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral moleküllerini

içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondensasyonu sonucu oluşan kovalent kompleks zincir bağlı polimerler kurması ile oluşur. 750 °C'de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen çözeltisinin, düşük ısıda (40–100 °C) fırınlanmasıyla elde edilen ürünler geopolimer malzemelerin en iyi özelliklerini gösterdiği şartlardır [15,16].

Geopolimerizasyon olayı yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi atık malzemelerin, volkanik tüf, doğal başkalaşım kayaları, kaolinit kili gibi alkali silikat ve tuzların düşük ısıda tepkime yapmasıyla başlamaktadır. Oluşacak ürünün fiziksel özellikleri; katı malzemenin yapısı, ısıl kür veya kalsinasyon ısısı ve süresine göre oluşan molekül yapısına bağlı olarak değişmektedir [7].

Geopolimerler, zeolit kayalarına benzer tanecik yapısına ulaşan, ancak zeolit kristallerinden farklı olarak amorf üç boyutlu hegzagonal moleküler bağ yapıda olan alumino silikat toprak malzemelerdir. Geopolimeri zeolitlerden ayıran bir diğer faktör de 80 °C'de sentezlenebiliyor olmasıdır. Bundan dolayı geopolimer, yapısında su moleküllerinin bir kısmını da tutmaktadır. Zeolit ise 150–250 °C de yapısı içinde boşluklar bırakarak kristalleşmektedir [16,17].

Geopolimerin basınç dayanımını kazandığı süreçte pH düzeyinin düşüşü de önemlidir. Geopolimer hamurunun pH düzeyi ortalama 10–12 arasındadır. Geopolimer hamurunun pH düzeyinde, ısıl işlem sıcaklığının yükselmesiyle düşüş gerçekleşmektedir. 85°C'de pH 10,5 iken 700 °C'lik ısıl işlem gördüğünde geopolimer hamuru pH'ı 7,5'e düşmektedir. K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> molar oranı ısıl kür sıcaklığının yüksek olduğu işlemlerde pH düzeyini dengelemek için arttırılmaktadır. Geopolimer hamurunun genel pH düzeyi 10–12 arasındadır. Kullanıcıya zarar vermeyen karışımlar elde edebilmek bugünkü bilimsel araştırmaların ve standartların zorunlu kıstaslarındandır. pH düzeyi düşük geopolimer formüller geliştirmek doğa ve insan sağlığı açısından geopolimerin yaygın kullanımını arttıracaktır [16,17].

Kullanılan toz bağlayıcı, aktivatör ve kür koşullarına bağlı olarak asit ve başka kimyasallara portland çimentosu hamuruna kıyasla daha iyi dayanabilen, içyapı bozulmaları göstermeden 1000-1200 °C sıcaklığa maruz kalabilen, alkali agrega genişemesi düşük, donma-çözülme, sülfat ve korozyon dayanıklılığı yüksek geopolimerler yapmak mümkündür [15,18].

### 2.1.3 Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri

Geopolimerlerin basınç dayanımlarına aktivatör konsantrasyonu önemli etki yapmaktadır. İdeal aktivatör konsantrasyonu geopolimerin dayanımında artış gerçekleştirmektedir. Bu ideal konsantrasyonun ötesinde malzemenin geopolimer yapısını değiştirebilecek alkali aktifleştirilmiş matris de bulunan serbest OH-iyonlarından dolayı malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar da oluşabilmektedir. Geopolimerlerin yaşı ve kür sıcaklığı da örneklerin basınç dayanımında etkili olan diğer değişkenlerdir. Bununla birlikte bu değişkenlerin etkili olabilmesi için geopolimerizasyon süresinde ortamda yeterli aktivatör konsantrasyonu bulunmalıdır [19].

Geopolimerler, priz in ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının yaklaşık % 70'ini kazanabilirler. Uzun seneler dayanımından çok fazla kayıp vermeden dış etkilere ve çevre şartlarına karşı dayanabilmektedirler. Geopolimer malzemelerin avantajlarından diğeri ise yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi ve düşük ısı iletkenlik göstermesidir. 1200 °C'ye kadar önemli bir zarar görmeden dayanabilirler. Isıl iletkenlikleri ise diğeri yapı malzemelerine göre düşük olup 0.24 W/mK ~ 0.3 W/mK arasındadır [15].

Geopolimerlerin içeriğindeki Si:Al oranına göre dayanım ve elastik modülü değişkenlik göstermektedir. Örneğin; 100 MPa civarında dayanıma sahip veya oda sıcaklığında 4 saatte 20 MPa dayanıma ulaşan örnekler mevcuttur. Ayrıca, bazı geopolimerik ürünler oda sıcaklığında priz alabilmekte ve dayanım kazanabilmektedir. Ancak geopolimerli karışımların portland çimentolu sistemlerle mukayese edebilen dayanımlara erişebilmesi için 40 ila 80 °C'de 6 saat veya daha fazla kür gerektiren çalışmalar, literatürde daha yoğun bulunmaktadır [15].

Geopolimerlerin kullanımındaki avantajlardan bir tanesi onlardan meydana gelen nihai bağlayıcı malzemesinin dış etkilere karşı yüksek performansdır. Bu da geopolimerlerin, özellikle çok düşük C-S-H olan geopolimer bileşimlerde boyut stabilitesine bağlıdır. Geopolimerlerdeki alkali agrega reaksiyonu kalsiyum içeriğinin düşük oranına bağlı olarak çok etkili olmamaktadır. Yine aynı sebepten dolayı geopolimerler sülfat atağı ve deniz suyuna karşı geleneksel bağlayıcılara göre daha

dayanıklıdır. Si/Al oranı bire yakın olan matrislerde, zor atmosferik şartlar altında ve dış etkenler etkisinde ayrışma meydana gelmektedir [4].

#### **2.1.4 Geopolimer türleri**

Si/Al oranına göre literatürde tanımlanmış farklı geopolimerler göze çarpmaktadır. Bunlardan bazıları; Camsuyu esaslı geopolimer, polisiloksonat (Si: Al=1:0), kaolin hidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat (Si: Al=1:1), metakaolinit esaslı geopolimer, poly(sialate-siloxo) (Si: Al=2:1), kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al=1, 2, 3), kayaç esaslı geopolimer, poly(sialate-multisiloxo) ( $1 < \text{Si: Al} < 5$ ), silika esaslı geopolimer, sialate ve siloxo bağlı poly(siloxonate) (Si: Al>5) ve uçucu kül esaslı geopolimerlerdir [17].

Geopolimer malzeme özelliklerini iyileştirmek için alkali tuz ile birlikte uçucu kül içerisinde bulunan ana bileşenlerin daha düzenli çözünebilmesi için camsuyu sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) veya sodyum alüminat ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ilave edilmektedir. Ayrıca kimyasalların çözünmesi için kullanılan su miktarının fazla olması ürünün basınç dayanımını azaltmaktadır. Çökelti halindeki sodyum iyonu bu tür karışımlarda daha fazladır. Bunun nedeni sodyumlardan ayrılan alüminat ve silikatların beraber reaksiyon vermesidir. Uçucu kül gibi içeriğinde yoğun olarak Al-Si içeren bu kimyasallardan sodyum alüminat tetrahedral alüminyum bağ yapısı oluşumunu kolaylaştırırken, cam suyunun çapraz bağlı silikat molekülleri arttırdığı, nükleer manyetik rezonans ile gözlemlenmektedir [15].

#### **2.1.5 Geopolimerin kullanım alanları**

Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcılar, düşük enerji giderleri, düşük kirletici gaz emisyonları ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  vb.) ve çevrenin daha az tahribi (doğal kaynaklar yerine atıkların kullanımı ile) gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama problemleri de azalmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek dayanım daha düşük hidrasyon ısısı, agresif kimyasallara ve donma-çözülme etkilerine karşı daha iyi dayanıklılık, daha güçlü

agrega-matris aderansı gibi birçok önemli teknik avantaja sahiptir. Bu bağlayıcıların kullanımının önündeki en büyük engel yüksek kuruma büzülmesidir [4].

Genel olarak geopolimerler, bol ham madde kaynağına, düşük CO<sub>2</sub> yayımına, düşük enerji tüketimine, düşük üretim fiyatına, yüksek erken dayanıma ve hızlı dayanım kazanma özelliğine sahiptir. Geopolimer göstermiş olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde, prefabrik yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, heykelcilik ve süsleme sanatları, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, uçak ve yarış arabası endüstrisi ve nükleer santrallerde kullanılabilir. Kullanılan teknolojinin gelişmişlik düzeyine, seçilen kimyasal oranlara göre ve toprak esaslı hammaddede yapılan fiziksel iyileştirmelerle geopolimere pek çok seramik malzeme de olduğu gibi istenilen fiziksel özellikler kazandırılabilir [15,16,17].

## **2.2 Konu İle İlgili Önceki Çalışmalar**

Bingöl [7], çalışmasında farklı oranlarda sodyum içeren yüksek fırın cürufu, sodyum meta silikat ile aktive edilerek üretilen harçların, mekanik ve durabilite özelliklerini araştırmıştır. Mekanik deneyler sonucunda optimum sodyum oranlarını belirlemiş, üretilen harç karışımlarını 1 gün etüvde (75 °C’de), 28 gün suda ve 28 gün havada kür ederek durabilite deneyleri uygulamıştır. Sonuçları karşılaştırmak için Portland çimentosuyla kontrol numunesi üretmiştir. Sodyum meta silikat toz halde temin edilerek karışıma direk ve karışım suyunda eritilerek iki farklı şekilde katılmış ve bu durumun dayanımı etkilemediğini görmüştür. Sodyum oranının %1’den %4’e kadar artırılmasıyla dayanım artışı yaşanmakta, %5 ve %6 sodyum oranlarında dayanım hızla azalmaktadır. Geopolimer harçların, eğilme ve basınç dayanımı, hidroklorik asit, sülfirik asit ve baz etkileri, yüksek sıcaklık uygulaması, aşınma, hızlı klor geçirimsizliği, ıslanma-kuruma, karbonatlaşma, boşluk oranı ve su emme oranı özellikleri yönünden Portland çimentolu kontrol harçlarından daha iyi performans gösterdiğini belirlemiştir. Çimentolu harçlar kılcal su emme ve rötre özellikleri bakımından geopolimer harçlara kıyasla düşük seviyelerde üstünlük gösterdiğini belirtmiştir.

Aygörmez [6], metakaolin tabanlı geopolimerler ile ilgili çalışmasında, metakaoline %40 oranına kadar silis dumanı ve kolemanit ilave edilerek elde edilen geopolimer kompozitlerin mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Çalışmanın ilk adımında, birim hacim ağırlık, ağırlıkça su emme ve boşluk oranı değerleri araştırılmış, daha sonra polipropilen lifli ve lifsiz numunelerin basınç ve eğilme davranışı, aşınma direnci ve ultrases geçiş hızı deneyleri ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırma amacıyla CEM I 42.5R çimentosundan üretilen numuneleri kullanmıştır. Basınç ve eğilme dayanımı açısından %100 metakaolin tabanlı geopolimer numuneler ile kolemanit ve silis dumanı katkılı numuneler karşılaştırılmış, kolemanit ve silis dumanı katkılı numunelerin sonuçlarında artış olduğu görülmüştür. Polipropilen lif takviyeli numunelerin eğilme dayanımında önemli bir iyileşme elde edilmiş, fakat basınç dayanımında önemli bir artış görülmemiştir. Polipropilen liflerin eklenmesi genellikle, numunelerin eğilme dayanımının ve aşınma direncinin geliştirilmesine yardımcı olduğu söylenmiştir. 300°C, 600°C ve 900°C, olmak üzere yüksek sıcaklık deneylerine tabi tutulan polipropilen lifli ve lifsiz numunelerin deney sonunda ağırlık kaybı, basınç ve eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçlarına bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklıklarda geopolimer harçlar Portland çimentosu harçlarından daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

Uysal [20], yaptığı çalışmada, metakaolin yerine kısmen iki atık madde olan kolemanit ve silis dumanı konularak üretilen geopolimer kompozitlerin fiziksel özelliklerini incelemiştir. Ürettiği lifsiz numuneler ile polipropilen fiber takviyeli numuneler arasında ultrases geçiş hızı, aşınma direnci, eğilme ve basınç dayanımı testleri ile taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) analizleri arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Genel olarak sonuçlar atık maddelerin kullanımının yararlı olduğunu kanıtlamıştır. Kontrol numunesi ile karşılaştırdığında, kolemanit ve silis dumanı numuneleri, bükülme mukavemetinde % 14,61 ve % 29,44, basınç dayanımında % 2,02 ve % 11,48, aşınma direncinde % 10,59 ve % 20'lik bir gelişme sağladığını görmüştür. Polipropilen liflerinin eklenmesi genellikle numunelerin bükülme mukavemeti ve aşınma direncinin geliştirilmesine yardımcı olduğu belirtilmiştir. Kolemanit, özellikle dünyanın en büyük bor rezervine sahip olan Türkiye'de, geopolimer teknolojisinde kullanılabilir potansiyel bir materyal olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Rovnanik [21], geopolimerizasyon için kür sıcaklığı olarak 10 ile 80 °C arasındaki sıcaklıkları dikkate alırken farklı kür sürelerini de denemiştir. Kürlenme sıcaklığının ve zamanın, basınç ve eğilme dayanımları, alkali aktif metakaolin malzemesinin gözenek dağılımı ve mikroyapıları üzerindeki etkilerini analiz etmeyi amaçlamıştır. Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, mikroyapısal analizler, gözenek özelliklerinin incelenmesi, basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre yapılmıştır. Uygulanan mekanik testler, geopolimer harcın hem erken hem de son mekanik özelliklerinin büyük ölçüde kürleme sıcaklığına ve süresine bağlı olduğunu göstermiştir. Daha yüksek kür sıcaklıkları, 1 gün içinde bile hedef değerlerine ulaşabilen, erken basınç ve eğilme dayanımlarını artırır. Bununla birlikte, 28 günlük dayanımlar, düşük sıcaklıkta işlem görmüş numunelere kıyasla belirgin şekilde daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun muhtemel nedeninin sert yapının hızlı bir şekilde oluşmasına bağlanmıştır. Çalışma, mekanik özelliklere yansıyan artan sıcaklığın, gözenek büyüklüğünü ve biriken gözenek hacmini artırma eğilimi gösterdiğini ve bu durumun mekanik özellikleri etkilediği belirtilmiştir.

Burciaga-Díaz ve diğ. [22], silikat çözeltisiyle cüruf ve metakaolin bağlayıcılarını karıştırarak üretilen harca değişik kür sıcaklıkları uygulanması durumunda geopolimer kompozitlerin uzun vadeli özellikleri ve reaksiyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. 20, 60 ve 70 °C kür sıcaklıklarının uygulanması durumunda üretilen harçların dayanım ve mikroyapısal analizlerini mukayese yapmıştır. Taze pastaların yüksek sıcaklıklarda işlenmesi, erken yaşlarda mukavemet gelişimini hızlandırdığı, ancak uzun vadede 20° C'de kürlemenin daha avantajlı olduğunu görmüştür. % 100 cüruf pastaları için, kürleme sıcaklığının 20° C'den 60° C'ye yükseltilmesi, cüruf partiküllerinin yoğun bir şekilde çözülmesini ve 100MP'ye ulaşan güçlü bir mikro yapı oluşturduğunu görmüştür.

Mangat ve diğ. [23] suda, oda sıcaklığı ve ıslanma/kuruma olmak üzere üç farklı kür koşullarını alkali aktive edilmiş harçlara (AAH) ve Portland çimentosu harçlarına uygulamıştır. En uygun kür koşullarının Portland çimentosu harçları için suda kür olurken alkali aktive edilmiş harçlar için ıslanma/kuruma kür yönteminin ideal olduğu görülmüştür. Ayrıca geciktirici katkıların alkali aktive edilmiş harçların gözenek yapısını iyileştirerek dayanım özelliklerini etkilediği görülmüştür. AAH'lere büzülme azaltıcı ve geciktirici katkının dahil edilmesi mukavemeti artırır ve özellikle ıslanma/kuruma ve kuru kürleme altında daha rafine bir gözenek yapısı

oluşturur. Islanma/kuruma kürü uygulanan AAH harcında en düşük gözeneklilik ve gözenek hacmi görüldüğü ve bu durumun dayanımı etkileyen temel bir faktör olduğu görülmüştür. AAH karışımlarının gözenekliliği, her kürlenme koşulu için PÇ harcına göre çok daha düşük olmuştur.

Zhang ve diğ. [24] metakaolin ve uçucu kül bağlayıcıları kullanarak elde edilen geopolimer numuneleri yangına dayanıklılık testine maruz bırakmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır. % 50 metakaolin ve % 50 uçucu kül ile yapılan geopolimer bağlayıcılar, hem ortam sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra eğilme ve basınç dayanımı için optimum sonuç sağlamıştır. Geopolimer pasta, harç ve beton için sıcaklığın artmasıyla 100°C'ye kadar eğilme ve basınç dayanımının arttığı, 100°C'den sonra azaldığı görülmüştür. Termogravimetrik analiz incelenmesi ve dayanım değerlerine göre geopolimer numuneleri, yüksek sıcaklık için dirençli olduğu görülmüştür.

Yunsheng ve diğ. [25] 20 döngüden oluşan donma çözülme testi için polivinil alkol katkılı geopolimer numuneler üretmiştir. Üretilen numunelerde darbe dayanımı ve sertlik testleri sonuçları etkilenme olmadığı göstermiştir. Çalışmada, ekstrüzyon tekniği çelik elyaf takviyeli geopolimer beton (ÇETGB) ile üretilen PVA kısa elyaf takviyeli uçucu kül-jeopolimer kompozitler geliştirilmiştir. Uçucu kül içeriğinin ve lif hacminin fraksiyonunun ÇETGB reolojik ve darbe davranışları üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. ÇETGB 'nin dayanıklılığını incelemek için donma - çözünme döngüleri ve sülfürik asit saldırı testleri de yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, normal olarak ÇETGB'nin kürlenmesi için, PVA fiber ilavesinin, ÇETGB 'nin sünekliğini büyük ölçüde arttırdığını, özellikle de yüksek hacimli fiber fraksiyonu durumunda, darbe başarısızlık modunun kırılğan desenden sünek formuna geçmesine neden olduğunu göstermektedir. Çalışma sonucunda, yüksek lif içeriğine sahip ÇETGB'de darbe dayanıklılığında büyük bir artış görülmüştür. Uçucu külün eklenmesi, reolojik ve darbe davranışları üzerinde belirgin bir etki sergilemektedir. Uçucu külün küresel şekli, taze ÇETGB pastalarının ekstrüde edilebilirliğini büyük ölçüde artırabilir. Uçucu kül yüzdesi düşük olan ÇETGB çok yüksek darbe dayanımına ve sertliğine sahiptir. Bununla birlikte, çok fazla uçucu kül dahil edildiğinde, ÇETGB'nin darbe direnci hızla azalır. ÇETGB donma-çözülme



döngüleri ve 1 aylık sülfürik asit çözeltisi saldırısı sonrası, darbe dayanımında sadece % 5 veya daha az kayıp görülmüştür.

Ayrıca lif takviyesinin etkisiyle numunede oluşan mekanik özellikleri artırmak mümkündür. Üretilen numunelerde matraste oluşan reaksiyon işlemi lif etkisiyle güçlendirilmektedir. Dokuma kumaş, karbon, bazalt ve cam lifler takviye edilerek farklı çalışmalar yapılmıştır [26-28]. Son zamanlarda geopolimer numunelerde farklı lifler kullanılmıştır [29,30]. Dias ve Thaumaturgo [31] liflerin hacimsel kesiminin, bazalt liflerle takviye edilmiş geopolimerik çimento betonlarının kırılma tokluğu üzerindeki etkisini araştırmıştır. Kırılma tokluğu değerleri, kritik gerilme şiddeti faktörü ve kritik çatlak ağzı açıklığı deplasmanı, üç noktalı bükülme ile test edilen 18 çentikli kiriş üzerinde ölçülmüştür. Deney sonuçları, geopolimerik betonların geleneksel Portland çimentosundan daha iyi kırılma özelliklerine sahip olduklarını ve çatlakların varlığına karşı daha az hassas olduklarını göstermiştir.

Li ve diğ. [32], ekstrüzyon yöntemini kullanarak üretilen kısa polivinil alkol (PVA) elyaflarıyla güçlendirilmiş geopolimer numunelerini araştırmıştır. Kısa elyaf takviyeli geopolimer kompozitlerinin ek reolojik modifiye edici olmadan ekstrüzyona sokulabildiği gösterilmiştir. 6 mm kalınlığında ince plakalardan üretilen ekstrüde numunelerin mekanik özelliklerini incelemek için eğilme testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, PVA fiber ilavesinin, ÇETGB'lerin sünekliğini büyük ölçüde artırabileceğini ve bunun sonucunda, kırılmalardan sünekliğe dönüşen fiber kırılma modlarının ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Uçucu kül miktarını değiştirmenin çeşitli ÇETGB'lerin eğilme davranışına etkileri de incelenmiştir. Az miktarda uçucu kül içeren ÇETGB'ler daha yüksek eğilme mukavemeti gösterirken, daha küçük sapmalar gösterir, fazla miktarda uçucu kül içeren ÇETGB'ler eğilme mukavemeti daha düşük olmakla birlikte, daha büyük sapmalara sahip olmuştur.

### 3. MALZEMELER VE YÖNTEMLER

#### 3.1 Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1 Metakaolin

Metakaolinin çimento harcında puzolan amaçlı olarak kullanımı 1960'lı yıllara dayanır. 1990'lı yıllardan itibaren ise sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır [8].

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin kilinin yüksek sıcaklıklarda kalsinasyonu ile üretilen beyaz renkli, puzolanik özellikleri yüksek olan bağlayıcı bir alüminosilikat malzemedir [33]. 100–200 °C civarında kil mineralleri adsorbe sularını kaybederler. Kaolin kilinin dehidrolize olarak suyunu kaybettiği sıcaklık ise 500–800 °C (diğer bir kaynağa göre 700–900 °C) aralığındadır. Bu sıcaklıkta kaolin bağlı suyunun yaklaşık %10-14'ünü kaybeder ve metakaoline dönüşür. Dönüşüm sonucunda, alümina ve silika tabakaları, kristal yapılarındaki düzeni kaybeder, böylece kaolin, amorf ve kimyasal olarak reaktif bir yapı kazanır. Başarılı bir ısıl işlem uygulanması halinde yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip amorf fazlı metakaolin elde edilir [8].

Metakaolin alkali aktivatör olarak kullanılan çözeltilerle güçlü bir reaksiyon göstererek yüksek mukavemetli geopolimer numuneler oluşturmaktadır [34-36]. Davidovits, geopolimer üretiminde ana bileşen olarak birçok puzolanik malzemeyi incelemiş, sonuçlara göre, metakolin-cüraf esaslı geopolimerlerin çevre dostu olmalarının yanı sıra kabul edilebilir mekanik ve dayanıklılık performansı açısından en iyi üretilen kompozitler olduğu kabul edilmektedir [6]. Metakaolin ile oluşan geopolimerizasyon, aktivatör ve metakaolin tipine ve miktarına ve kür sistemine bağlıdır [37-39].

Bu çalışma için, Kaolin EAD firmasından temin edilen ve özgül ağırlığı 2.54 g/cm<sup>3</sup> olan metakaolin, bağlayıcı malzeme olarak kullanılarak geopolimer ürünler

üretimiştir. Metakaolinin MK kısaltması kullanılmış olup kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de, görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Metakaolinin 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>
MK	50.13	46.20	0.85	0.55	0.16	0.19	0.54	0.21	-



**Şekil 3.1:** Metakaolin

### 3.1.2 Kolemanit

Türkiye, bor yatakları bakımından dünyanın en zengin ülkesidir ve %72'sini bulundurmaktadır. Aynı zamanda 2 milyon tona yakın bor minerali ve bileşiminin Türkiye'de üretimi gerçekleşmektedir [40]. Bunlar arasında en önemli olanlarına örnek olarak kolemanit, üleksit ve tinkal verilebilir. Tüm dünya ülkeleri, kolemanit üretimi yönünden tamamen, üleksit üretimi yönünden ise kısmen Türkiye'ye bağımlıdır [41]. Bir kalsiyum borat minerali olan saf kolemanitin konsantrasyon işleminden sonra çok sayıda yan ürün meydana gelir. Atık malzeme oluşumuyla

beraber çevreye zarar veren bu durumun önüne geçebilmek için kolemanit atıkları, çimento sektörü gibi farklı alanlarda değerlendirilir [40-42].

Kula ve diğ. [43] uçucu ve taban külü ikame malzemelerinin yanı sıra portland çimentosu harcına bor atığı kolemanit katkısı koyarak oluşan mekanik özellikleri araştırmıştır. Kolemanit atığının, ikame oranı olarak % 10'a kadar kullanılmasının, mekanik özellikleri arttırdığını görmüştür [44].

Mineral bakımından oldukça zengin bir bor çeşidi olan Kolemanit ( $2\text{CaO}.3\text{B}_2\text{O}_3.5\text{H}_2\text{O}$ ); mono klinik sistemde kristallenir. Mohs sertlik sınıflandırmasına göre sertliği 4-4,5 olan ve açık ocaktan çıkarılan kolemanit cevherinin  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriği % 27 – 32 aralığındadır. Bor bileşiklerinde en yaygın bulunanıdır. Killer içinde cevher boşluklarında iri, parlak, saydam kristaller halinde bulunur. Saf Kolemanit suda yavaş,  $\text{HCl}$ ' de hızlı çözünür [45].

Bu çalışmada kullanılan kolemanit, Eti Maden firmasından temin edilerek, metakaolin ile birlikte ikame edilmiştir. İkame oranı olarak %90 Metakaolin, %10 kolemanit kullanılmıştır.  $2.42 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığa sahip olan kolemanit için K kısaltması kullanılmış olup kimyasal bileşimi Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.2:** Kolemanitin kimyasal bileşimi.

Kimyasal özellikler %	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{B}_2\text{O}_3$
K	6.00	0.40	0.08	-	26.00	3,00	-	0.50	40.00

### 3.1.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Beton içerisinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan yapay puzolanlardan birisi olan granüle yüksek fırın cürufları, demir-çelik fabrikalarında pik demirin üretimi sırasında meydana gelen endüstriyel atıklardır. Yüksek fırından yaklaşık  $1500^\circ\text{C}$  sıcaklıkta eriyik bir durumda atık malzeme olarak dışarı alınan cüruf, herhangi bir amaçla kullanımı, ancak soğutulmasından sonra mümkün olmaktadır. Yüksek oranda silis ve alümin içeren ve amorf yapıya sahip olan yüksek fırın cürufları, uygulanan soğutma tekniğine göre değişik yapısal karakteristikler göstermektedirler. Genellikle bol miktarda suda, çok hızlı soğutulma işlemine tabi

tutulan cüruflar, kum taneleri gibi (en büyük boyutu yaklaşık 4 mm) parçacıklar oluşturduklarından, “granüle yüksek fırın cürufu” olarak anılmaktadır. Eriyik cürufun çok hızlı soğutulması işlemi, cürufa hem granüle hem de amorf (camsı) yapı kazandırmaktadır [46]

Bu çalışmada kullanılan cüruf, Bolu Çimento Sanayii A.Ş. firmasından alınmış ve karışımda sabit oranda (60g) kullanılan cüruf,  $2.88 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığa sahiptir. Kullanılan cüruf için C kısaltması kullanılmış olup kimyasal bileşimi Tablo 3.3'te, görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.3:** Yüksek fırın cürufu 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>
C	42.53	10.85	1.15	0.70	35.57	5.88	0.69	0.78	-



**Şekil 3.2:** Yüksek fırın cürufu

### 3.1.4 Standart Rilem Kumu

Bu çalışmada geopolimer harçların hazırlanması için Trakya Limak Çimento Firmasından BS EN 196-1'e uygun rilem kumu alınmış ve karışıma bağlayıcı malzemeye göre sabit bir oranda katılmıştır.  $2.563 \text{ g/cm}^3$  özgül ağırlığa ve  $352 \text{ kg/m}^3$

birim ağırlığa sahip standart kumun elek analizi sonucunda belirlenen tane büyüklüğü dağılımı ve sınır değerleri Tablo 3.4'de verilmiştir.

**Tablo 3.4:** Tane büyüklüğü dağılımı ve sınır değerleri.

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,5	1,0	1,6	2,0
<b>Kalan (%)</b>	99	87	72	34	6	0
<b>Sınır %</b>	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0

### 3.1.5 Sodyum Silikat

Cam suyu olarak bilinen sodyum silikat,  $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$  formülüne sahip bir kimyasal bileşendir. Sodyum silikatlar,  $1000^\circ\text{C}$ 'yi aşan sıcaklıklarda sodyum veya potasyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  veya  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) ile kumun ( $\text{SiO}_2$ ) kaynaştırılması ve yüksek basınçlı buhar ile ürünün su-camı olarak adlandırılan yarı-viskoz bir sıvıya çözülmesiyle üretilir [47,6].

Genel biçimi renksiz haldedir ancak ticari olarak kullanılan türevlerinde yabancı maddelerle birlikte yeşil veya mavi renk alabilirler. Sodyum karbonat ve silikon dioksit maddelerinin tepkimesi sonucu ortaya çıkabilen sodyum silikat, silika jellerin ham maddesidir. Suyla karıştırıldığında şuruba benzer bir yapı alır. Farklı gruplardaki bazı sodyum silikatlar suda kolay çözünmeyebilir. Sodyum silikat, çimento sektöründe, tekstilde, kereste işleme sanayinde, otomobillerde ve refrakter özellikli malzemelerde sıklıkla kullanılır [47].

Su camı, bağımsız bir aktive edici birim olarak nadiren kullanılır, çünkü tek başına puzolanik reaksiyonu başlatmak için yeterli aktivasyon potansiyeline sahip değildir. Daha ziyade, alkaliniteyi arttırmak ve genel numune dayanımını arttırmak için bir takviye maddesi olarak sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) veya potasyum hidroksit ( $\text{KOH}$ ) ile karıştırılır. Geopolimerizasyonda kullanılan en yaygın alkali sıvı, sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit ve sodyum silikat veya potasyum silikatın bir kombinasyonudur [6]. Sodyum silikatın kimyasal özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

**Tablo 3.5:** Sodyum silikatın kimyasal özellikleri.

Na <sub>2</sub> O (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Yoğunluk (g/ml) (20°C)	Fe (%)	Ağır metaller (Pb gibi) (%)
8.2	27.0	1.360	< 0.005	< 0.005

### 3.1.6 Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit (NaOH), beyaz renkte nem çekici bir maddedir. Suda ısı yayarak çözünür ve yumuşak kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. Sodyum hidroksit, laboratuarda CO<sub>2</sub> gibi asidik gazları yakalamak için kullanılır. Endüstride birçok kimyasal maddenin yapımında, yapay ipek, sabun, kâğıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinelerinde kullanılır. Ucuz olması, kolay ve istenilen miktarlarda temin edilebilmesi avantajlarındandır. Geopolimer üretiminde alkali aktivatör olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [4].

Bu çalışmada, Merck firmasından temin edilen ve 12M olarak hazırlanan sodyum hidroksit ve SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O=3.29 oranına sahip sodyum silikat karışımı aktivatör olarak kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin görüntüsü Şekil 3.3'te verilmiştir.



**Şekil 3.3:** Sodyum hidroksit

### 3.1.7 Polivinil Alkol

PVA (polivinil alkol) lifler ilk olarak 50 yıl önce Japonya’da üretilen organik liflerdir. Bu noktadan itibaren PVA lifler çeşitli endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılmıştır. PVA lifler yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahip oldukları gibi, UV ışınları, kimyasal etkiler ve hava koşullarına karşı mükemmel direnci ile öne çıkarlar. 1980’li yıllardan itibaren asbest kökenli liflerin sağlığa karşı tehlikelerinin üzerinde giderek daha fazla durulması PVA liflerin asbest liflerin yerini almaya başlamasına neden olmuştur. Çelik, karbon, Kevlar ve fiberglas lifler gibi, PVA lifler de eğilmeye karşı betonun çok daha dayanıklı olmasını sağlayan yüksek elastisite modülüne sahip olup çimentolu kompozitlerin direncini arttırmırlar. Diğer liflerden farklı olarak PVA lifler hidrofil özelliğini gösterirler ve bu durum hidrasyon ve kür aşamalarında matrisle arasında moleküler bağ kurulmasını sağlar. Bağ direnci, eğilme dayanımı ve yüksek elastisite modülü PVA lif katkı betonların eğilme ve çekme dayanımı açısından yüksek performans göstermesini sağlar [8].

Bu çalışma için polivinil alkol lifleri kütlece %0.8, %1.6 ve %2.4 oranında karışıma katılarak oluşan sonuçlar incelenmiştir. Kullanılan polivinil alkol lifinin özellikleri Tablo 3.6’da, görüntüsü Şekil 3.4’te verilmiştir.

**Tablo 3.6:** Polivinil alkol lifinin özellikleri.

Lif Türü	Boy (mm)	Çap (µm)	Özgül Ağırlık	Nominal Çekme Dayanımı (Mpa)
PVA	8	39	1.3	1620



**Şekil 3.4:** Polivinil alkol lifleri



### 3.1.8 Bazalt Lif

Bazalt lifler ve epoksi reçine kullanılarak betonarme yapılarda kullanılan çelik formunda üretilen bazalt lifli donatı Amerika, Rusya ve Ukrayna gibi ülkeler başta olmak üzere birçok ülkede, bazı yapı elemanlarında donatı çeliğine alternatif olarak kullanılan ürünlerdendir. Lifli donatı, özellikle korozyon bulunan yapı elemanlarında donatı çeliği için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Donatı çeliğinden daha yüksek dayanıma sahip olan bazalt lifli donatı, çelik donatıya oranla yaklaşık üç kat daha hafiftir. Aynı zamanda termal genişleme katsayısı da betonun genişleme katsayısına oldukça yakındır. Alkali reaksiyonlara karşı yüksek direnci de dikkate alındığında, birçok alanda donatı çeliğine alternatif olma potansiyeli bulunmaktadır [48].

Farklı boyutlarda üretilebilme olanağı vardır. 20 mikron çapında liflerden oluşan ve genellikle 5 mm ile 100 mm arasında uzunluğa sahip olarak üretilen lifler beton içerisinde üç boyutlu olarak donatı etkisi oluşturmaktadır [48].

Bu çalışma için bazalt lifleri kütlece %0.8, %1.6 ve %2.4 oranında karışıma katılarak oluşan sonuçlar incelenmiştir. Kullanılan bazalt lifi için B kısaltması kullanılmış olup özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir.

**Tablo 3.7:** Bazalt lifinin özellikleri.

Lif Türü	Boy (mm)	Çap (µm)	Özgül Ağırlık	Nominal Çekme Dayanımı (Mpa)
B	12	20	2.73	4100



**Şekil 3.5:** Bazalt lif

### 3.2 Deneysel Çalışma

Metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerde farklı sayıda ikame malzemeleri kullanmak mümkündür. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak bor atığı kolemanit ile beraber polivinil alkol ve bazalt lifleri kullanılmıştır. Ayrıca fırın kürünün yanında bu çalışmada farklı olarak ıslanma-kuruma kürü yöntemi de uygulanmıştır. Üretilen geopolimer numunelerin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve basınç dayanımı sonuçları ile beraber su emme, birim ağırlık ve porozite sonuçları da bulunmuştur. Ayrıca geopolimer kompozitlerin 200, 400 ve 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonrası ağırlık kaybı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı sonuçları bulunmuştur. Benzer şekilde aynı özellikler 90 döngüden oluşan donma-çözülme testi sonrası da hesaplanmıştır. Ayrıca geopolimer numunelerinin 600 °C öncesi ve sonrası FTIR ve TGA-DTA analizleri yapılmıştır. 600 °C sıcaklık ve 90 döngüden oluşan donma çözülme testi sonrası numunelerin görsel incelemesi de yapılmıştır. Son olarak aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları da hesaplanmıştır.

Geopolimer karışımı hazırlanırken kolemanit ve metakaolinden oluşan bağlayıcı malzemeler, sodyum silikat ve karışım gününden bir gün önce hazırlanan sodyum hidroksitten oluşan aktivatör karışımı ile 1/1 oranında karıştırılmıştır. Aktivatör karışımının üçte birini sodyum hidroksit ve üçte ikisini sodyum silikat oluşturmaktadır. Agregat malzemesi olarak toplam bağlayıcı malzemenin 2.5 katı kadar standart kum karışıma ilave edilmiştir. Kalsiyum oranını artırmak için %13 oranında (sabit) yüksek fırın cürufu karışıma katılmıştır. Hazırlanan karışım oranlarının belirlenmesinde literatürden yararlanılmıştır [22,49,50]. Tablo 3.8'de standart karışım miktarları gösterilmektedir.

**Tablo 3.8:** Standart geopolimer harç karışım miktarları.

<b>MK (g)</b>	<b>K (g)</b>	<b>Kum (g)</b>	<b>Cüruf (g)</b>	<b>NaOH (12M) (g)</b>	<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (g)</b>
<b>405</b>	45	1125	60	150	300

Geopolimer harç karışımının daha detaylı açıklaması olarak belirtilen yöntem takip edilmiştir: Öncelikle bir gün önce hazırlanan sodyum hidroksit çözeltisi (12M)

oda koşullarında soğumaya bırakılmış ve deneyden önce sodyum silikat ile karıştırılmıştır. Metakaolin (450 g), standart geopolimer karışımı için ana bağlayıcı malzeme olarak toplam 450 g aktivatör çözeltisi ile karıştırıcı matkap kullanılarak karıştırılmıştır. Bu karışım sırasında 1/1 oranı kullanılmıştır. Daha sonraki aşamada kalsiyum oranını yükseltmek ve priz süresini kısaltmak için %13 oranında yüksek fırın cürufu (60 g) karışıma katılmıştır. Son olarak standart kum bağlayıcı malzemenin iki buçuk katı olarak eklenmiştir. Kalıplara konulan numunelere titreşim uygulanarak, kalıba iyice yerleşmesi sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında iki farklı kür yöntemi uygulanmıştır. İki kür yönteminde başlangıç aşamaları aynıdır. 2 saat kalıpta tutulma süresinden sonra numuneler 1 gün oda sıcaklığı koşullarında bekletilmiştir. Daha sonra yanmaz fırın poşetlerinin içine konulan numuneler bu şekilde 3 gün boyunca (72 saat) etüvde 60°C sıcaklıkta tutulmuştur [51,52]. Yanmaz fırın poşetinin kullanım amacı numune yapısındaki bulunan suyun buharlaşmasını önlemek ve böylece reaksiyonun daha sonra da devam etmesini sağlamaktır. Bu aşamadan sonra iki farklı yöntem uygulanmıştır. 1. yöntemde numuneler bu aşamadan sonra plastik saklama kutularında deney gününe kadar tutulmuştur. 2. yöntemde numuneler 1 çevrim ıslanma-kuruma kürüne tabi tutulmuştur [23]. 1 çevrim, 3 gün suda bekletilme daha sonra 3 gün etüvde 60°C sıcaklıkta tutulmayı kapsamaktadır. Daha sonraki aşamada 2. yöntemdeki numuneler benzer şekilde deney gününe kadar plastik saklama kutularında tutulmuştur. Ancak 7 günlük test sonuçlarına bakılacak ıslanma kuruma çevrimi uygulanan numuneler, 3 gün suda bekletildikten sonra tekrar fırına konulmadan teste tabi tutulmuştur.

Çalışma kapsamında iki farklı kür yöntemi uygulanmak üzere 7 farklı seri üretilmiştir. Her bir seri için hem ıslanma-kuruma kürü hem de fırın kürü uygulanmıştır. Bütün serilerde bağlayıcı malzeme olarak %90 metakaolinden ve %10 kolemanitten oluşan karışım kullanılmıştır [53,54]. Birinci seride (kontrol numunesi) herhangi bir lif kullanılmadan diğer malzemeler ile lifsiz karışım üretilmiştir. Kontrol karışımına sırasıyla kütlece %0.8, %1.6 ve %2.4 oranında polivinil alkol ve bazalt lifleri eklenerek diğer seriler üretilmiştir.

Üretilen geopolimer numunelerin 28 gün sonunda su emme, birim ağırlık ve porozite sonuçları bulunmuştur. 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve basınç dayanımı sonuçları hesaplanmıştır. Basınç dayanımı testi

küp numunelerde (ASTM C 109 [55])'a göre yapılırken eğilme dayanımı testleri prizma numunelerde (ASTM C 348 [56])'a göre yapılmıştır. Numunelerin ayrıca 7 ve 28 günlük çekme dayanımı sonuçları ASTM C1583 [57]'e göre bulunmuştur.

Aşınma direnci testi için  $71\pm 1.5$  mm küp numuneler üretilmiştir. Böhme aşındırma testi ASTM C779 [58]'a göre yapılmıştır. Numuneler aşınma ve yüksek sıcaklık testi öncesi 1 gün  $105^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta etüvde tutulmuştur. Yüksek sıcaklık testi için fırının sıcaklık artış hızı  $5^{\circ}\text{C}/\text{dak}$  olarak ayarlanmış ve 200, 400 ve  $600^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklar uygulanmıştır. Test sonrası numuneler fırının içinde soğuması için bırakılmış ve daha sonra eğilme ve basınç dayanımı, ağırlık kaybı ile ultrases geçiş hızı testleri yapılmıştır.

Numunelere 90 çevrimden oluşan donma-çözülme testi de uygulanmıştır. 1 çevrim donma-çözülme testi, 12 saat  $-20$  derecede tutulma ve 12 saat  $+20$  derecede tutulmayı kapsamaktadır. 90 çevrim sonrasında numunelere, yüksek sıcaklık testi sonrası uygulanan testler yapılmıştır. Donma-çözülme ve  $600^{\circ}\text{C}$  yüksek sıcaklık testleri sonrası numunelerin görsel incelemesi yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası FTIR and TGA-DTA analizleri de yapılmıştır. Sadece ısı kürü için H kısaltması ve ıslanma-kuruma kürü için WD kısaltması kullanılmıştır. Karışımında kullanılan malzemeler ve kısaltmalar Tablo 3.9'da gösterilmiştir.

**Tablo 3.9:** Geopolimer harç karışım yüzdeleri.

No	Karışım	Kum (g)	Bağlayıcı	Cüruf (g)	Sodyum Hidroksit NaOH	Sodyum Silikat Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Lif
1.	Kontrol-S	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	–
2.	PVA0.8-S	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	% 0,8
3.	PVA1.6-S	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	% 1,6
4.	PVA2.4-S	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	%2,4
5.	B0.8-S	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	%0,8
6.	B1.6-S	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	%1,6
7.	B2.4-S	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	%2,4
8.	Kontrol-IK	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	–
9.	PVA0.8-IK	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	% 0,8
10.	PVA1.6-IK	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	% 1,6
11.	PVA2.4-IK	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	%2,4
12.	B0.8-IK	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	%0,8
13.	B1.6-IK	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	%1,6
14.	B2.4-IK	1125	%10 K %90 MK	60	150	300	%2,4

### 3.2.1 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç deneyi uygulanan geopolimer prizma numuneler 40x40x160 mm boyutlarında, küp numuneler 50x50x50 mm boyutlarında üretilmiştir. Eğilme deneyi uygulanması sonucu iki parça haline gelen prizma numunelerine ve küp numunelere direkt olarak uygulanan basınç dayanımı deneyi, otomatik test cihazında 40x40mm metal kırma başlığı ile yükleme hızı 500 N/s olacak şekilde uygulanmıştır (Şekil 3.1). Numunenin kalıba dökümü sırasında üste gelen yüzey uygulanan basınç kuvvetine paralel olarak yerleştirilmiştir. Her bir seri için ikişer numune kullanılmıştır. İki deney numunesinin ortalama basınç dayanımı, o koddaki numunenin basınç dayanımı olarak hesaplanmıştır. Basınç dayanımı, numunenin kırılma yükü kesit alanına bölünerek (3.1) denklemine göre bulunmaktadır.

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

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

P: Numunenin kırıldığı andaki uygulanan kuvvet (N),

A: Kesit alanı



Şekil 3.6: Basınç dayanımı deneyi.

### 3.2.2 Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyi uygulanan geopolimer prizma numuneler 40x40x160 mm boyutlarında üretilmiştir Otomatik test makinesinde 100 mm mesnet açıklığı kullanılarak numunelere tek noktadan yükleme yapılmıştır (Şekil 3.2). Numuneler,

mesnet silindirlerinin eksenine dik olarak, mesnet silindirlerinin üzerine yerleştirilmiştir. Numunenin kalıba dökümü sırasında üste gelen yüzey uygulanan basınç kuvvetine paralel olarak yerleştirilmiştir. İki deney numunesinin ortalama eğilme dayanımı, o koddaki numunenin eğilme dayanımı olarak alınmıştır. İki parçaya ayrılan prizma basınç testine tabi tutulmak üzere muhafaza edilir. Eğilme dayanımı, (3.2) denklemine göre bulunmaktadır.

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

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

b: Prizma kesitinin eni (mm),

d: Prizma kesitinin yüksekliği (mm),

P: Numunenin kırıldığı andaki uygulanan kuvvet (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm) dir.



Şekil 3.7: Eğilme dayanımı deneyi.

### 3.2.3 Su Emme, Birim Ağırlık ve Boşluk Oranı Deneyleri

Deneyler kapsamında üretilen 50x50x50 mm boyutlarındaki geopolimer harçlara ait birim ağırlığı, su emme ve boşluk oranları tayini 3 gün etüvde sıcak kür işleminden sonra yapılmıştır. Numuneler 48 saat süre boyunca etüvde değişmez

ağırlığa gelinceye kadar bekletilip fırın kurusu ağırlığı (A) hesaplanmıştır. Sonrasında 48 saat boyunca oda sıcaklığındaki suda bekletilip doymun kuru yüzey ağırlığı (B) bulunmuştur. Daha sonra Arşimed terazisi yardımıyla su içindeki ağırlıkları (C) tespit edilmiştir. Bu üç değerin yardımıyla birim hacim ağırlıkları, boşluk oranları ve su emme oranları hesaplanmıştır. Numunelerin su içindeki ağırlığı ile kuru haldeki ağırlığı arasındaki fark hacmine eşittir. Kuru ağırlık/hacim oranı ise g/cm<sup>3</sup> cinsinden birim hacim ağırlığını (BHA) vermektedir (Eşitlik (3.3)). Boşluk oranı (BO) ve su emme oranı (SEO) sırasıyla (3.4) ve (3.5) eşitlikleri ile belirlenmiştir.

$$BHA = A / (A-C) \quad (3.3)$$

$$BO = [(B-A)/(B-C)] \times 100 \quad (3.4)$$

$$SEO = [(B-A)/(A)] \times 100 \quad (3.5)$$

A= Numunenin kuru haldeki ağırlığı

B= Numunenin doymun kuru yüzey ağırlığı

C= Numunenin su içindeki ağırlığı

### 3.2.4 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Deneyler kapsamında üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma geopolimer harçlara basınç, eğilme deneyi, donma çözünme ve yüksek sıcaklık deneyi uygulanan numunelere TS EN 12504-4'e göre ultrases geçiş hızı deneyi uygulanmıştır (Şekil 3.3). Bulunan bu ses üstü dalga hızı sayesinde betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki elde edilmektedir. Deneyde kullanılan transduserler numunenin boyu doğrultusunda yerleştirilmiştir. Transduser yerleştirilen pürüzlü olan yüzeylere vazelin sürülmüştür. Her numune için alınan iki okuma değerinin ortalaması alınarak ultrases geçiş hızı m/sn cinsinden bulunmuştur.





Şekil 3.8: Ultrases geçiş hızı cihazı.

### 3.2.5 Yüksek Sıcaklık Deneyi

40x40x160 mm boyutlarında prizma ile 50x50x50 mm boyutlarında küp geopolimer numuneler kür işleminden sonra deney öncesinde kuru hale getirmek için  $105\pm 5$  °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulduktan sonra fırında 200°C, 400°C ve 600°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır (Şekil 3.4). Fırının sıcaklık artış hızı 5°C/dak olarak ayarlanmıştır. Hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonra numuneler bir saat bu sıcaklıkta bekletilmiştir. Numunelerin ani sıcaklık değişimi ile zarar görmesini engellemek için test bitiminde numuneler fırın içerisinde soğumaya bırakılmıştır. Çıkarılan numunelerin ultrases geçiş hızları, ağırlık kaybı, basınç ve eğilme dayanımındaki değişimleri ölçülmüştür.



Şekil 3.9: Yüksek sıcaklık uygulanan numuneler.

### 3.2.6 Yatay (Böhme) Aşınma Deneyi

Böhme aşınma deneyi 71x71x71 mm boyutlarındaki geopolimer numunelere uygulanarak belirlenmiştir. Numuneler kür sürelerini tamamladıktan sonra test öncesi üç ayrıntının ölçümleri 0.01 hassasiyette elektronik kumpas ile alınarak aşınma öncesi ağırlıkları belirlenmiştir. Numuneler, dakikada 30 devir hızla dönen 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş döner çelik disk üzerine Şekil 3.5'te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Deneyde sürtünme yolu üzerine standart aşındırıcı olarak 20 gr korundum tozu dökülmüştür. Aşınma esnasında, numuneye  $294 \pm 3$  N düşey yük uygulamaktadır. Cihaz 22 devirden sonra otomatik olarak duracak şekilde ayarlanmıştır ve böylece 1 periyot tamamlanmış olur. Her bir periyot sonunda numune saat yönünde  $90^\circ$  döndürülür, numune ve disk temizlenerek aşındırıcı toz yenilenir. 4 periyot sonunda 1 döngü, yüzey tamamlanmış olur. Her numune toplamda 5 döngü sonunda (20 periyotta) 440 devir aşınmaya maruz kalmaktadır. Deney sonunda numune temizlenerek her bir kenarında üç noktadan ve ortada bir noktadan yükseklik ölçümleri alınmış ve son ağırlığı belirlenmiştir. Böylece deney sonrası numunenin kütledeki ve hacmindeki azalma belirlenir.

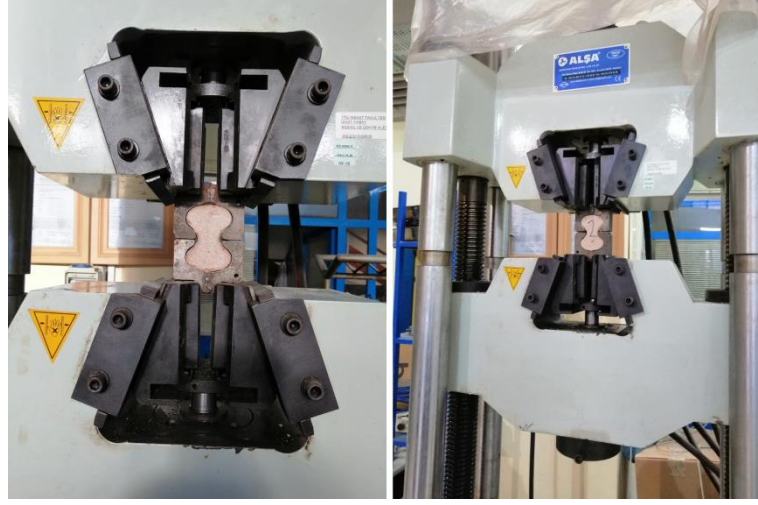


Şekil 3.10: Yatay böhme aşınma deneyi.

### 3.2.7 Çekme Dayanımı Deneyi

Geopolimer numunelerin çekme dayanımı sonuçlarını davranışını incelemek için Şekil 3.deki numuneler üretilmiştir. Hazırlanan numunelere çekme kuvveti uygulayabilmek için çekme başlıkları kullanılmıştır (Şekil 3.6). Numuneler çekme cihazına yerleştirilerek uygulanan yük kademeli olarak artırılmıştır. Numunenin

kırıldığı andaki kuvvet kaydedilmiştir. İki deney numunesinin ortalama çekme dayanımı, o numunenin çekme dayanımı olarak alınmıştır.



Şekil 3.11: Çekme dayanımı deneyi.

### 3.2.8 Donma-Çözünme Deneyi

40x40x160 mm boyutlarında prizma geopolimer numuneler kür işleminden sonra donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.7). 1 çevrim donma-çözülme testi, 12 saat -20 derecede tutulma ve 12 saat +20 derecede tutulmayı kapsamaktadır. 90 çevrimden oluşan test tamamlandıktan sonra, numuneler, donma çözülme öncesi ve sonrası olarak analiz edilmiş ve fiziksel ve mekanik değişiklikler dikkate alınmıştır. Ayrıca basınç, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı sonuçlarına bakılmıştır.



Şekil 3.12: Donma-çözünme deneyi.

## 4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

### 4.1 Geopolimer Numunelerin Mekanik Özellikleri

Bu çalışmada hazırlanan lifsiz kontrol numunesiyle farklı oranlardaki polivinil alkol ve bazalt lifli geopolimer numunelere mekanik özelliklerini incelemek amacıyla eğilme, basınç, çekme testleri, ultrases geçiş hızı testi, aşındırma testleri uygulanmış ve su emme, birim ağırlık ve boşluk oranı hesaplanmıştır. Test ve deneyler numunelere 7 ve 28 gün sonunda uygulanmıştır. Sonuçlar arasındaki uygunluk oranını incelemek için test sonuçlarından yararlanarak korelasyon faktörü hesaplanmıştır.

#### 4.1.1 Eğilme ve Basınç Dayanımı Sonuçları

Sonuçlar, karışımların hepsinde 7 günlük sonuçlara göre 28 günlük sonuçlarda artış olduğunu göstermiştir. Polivinil alkol katkılı numuneler ile bazalt lif katkılı numuneler, lifsiz kontrol numunesine göre daha yüksek, birbirine göre yaklaşık sonuçlar vermiştir. Ayrıca lif oranındaki artış ile beraber dayanım sonuçlarında olumlu etki görülürken bu durum önceki sonuçlarla uyumludur [53,54]. Ayrıca ıslanma kuruma kürü uygulanan numuneler sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre eğilme ve basınç dayanımlarında daha yüksek sonuç vermiştir.

7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, sadece sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %6.48 ile %18.17 arasında artış gösterirken, bazalt katkılı numuneler %4.96 ile %15.86 arasında artış göstermiştir.

28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, sadece sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %9.15 ile %19.79 arasında artış gösterirken, bazalt katkılı numuneler %8.56 ile %18.94 arasında artış göstermiştir. Polivinil alkol lifindeki artış oranları, bazalt lif katkılı numunelerine göre az miktarda daha yüksek olmuştur [44, 59].

Eğilme dayanımı sonuçları basınç dayanımı sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir. 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında sadece sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %16.73 ile %25.50 arasında artış gösterirken, bazalt katkılı numuneler %17.44 ile %22.88 arasında artış göstermiştir.

28 günlük eğilme dayanımlarına bakıldığında, sadece sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %17.23 ile %25.41 arasında artış gösterirken, bazalt katkılı numuneler %16.26 ile %22.01 arasında artış göstermiştir.

Aynı ürünlerin ıslanma-kuruma çevrimine maruz bırakılmış serileri de incelenmiştir. Islanma-kuruma çevrimi sayesinde geopolimerizasyonun devamı ve yeni kristalli geopolimerizasyon ürünlerinin oluşması sağlanmıştır. Böylece ıslanma-kuruma kürü sayesinde eğilme ve basınç dayanımında artış görülmüştür [23].

7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, ıslanma-kuruma kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %12.10 ile %24.85 arasında artış gösterirken, bazalt katkılı numuneler %8.78 ile %22.43 arasında artış göstermiştir.

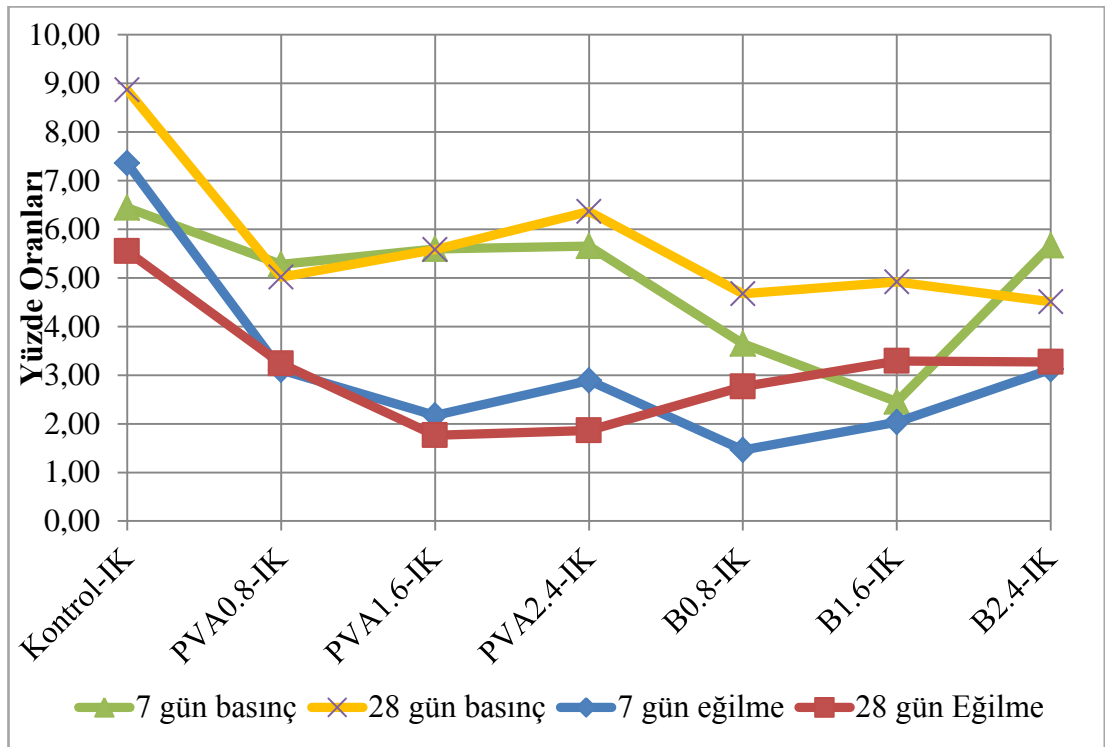
28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, ıslanma-kuruma kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %14.63 ile %27.41 arasında artış gösterirken, bazalt katkılı numuneler %13.63 ile %24.30 arasında artış göstermiştir.

7 günlük eğilme dayanımlarına bakıldığında, ıslanma-kuruma kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %20.36 ile %29.13 arasında artış gösterirken, bazalt katkılı numuneler %19.15 ile %26.71 arasında artış göstermiştir. 28 günlük eğilme dayanımlarında, ıslanma-kuruma kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin kontrol numunesine göre %21.03 ile %27.75 arasında artış gösterirken, bazalt katkılı numuneler %19.47 ile %26.00 arasında artış göstermiştir.

Numunelerin basınç dayanımları kür şartlarına göre incelendiğinde, 7 günlük basınç dayanımlarında ıslanma-kuruma kürü uygulanan polivinil alkol ve bazalt katkılı numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre

%2.45 ile %5.67 arasında artış gösterirken, 28 günlük basınç dayanımlarında ise bu oran %4,51 ile %6,36 arasında olmuştur. Lifsiz kontrol numunesi Kontrol-IK ise Kontrol-S'a göre 28 günlük basınç dayanımında %8.87 oranında artış göstermiştir.

7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarında ise ıslanma-kuruma kürü uygulanan polivinil alkol ve bazalt katkıli numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre %1.46 ile %3.29 arasında artış göstermiştir. Lifsiz kontrol numunesi Kontrol-IK ise Kontrol-S'a göre 28 günlük eğilme dayanımında %5,55, 7 günlük eğilme dayanımında ise %7,36 oranında artış göstermiştir. Islanma-kuruma kürü etkisi basınç dayanımları üzerinde daha etkili olmuştur.

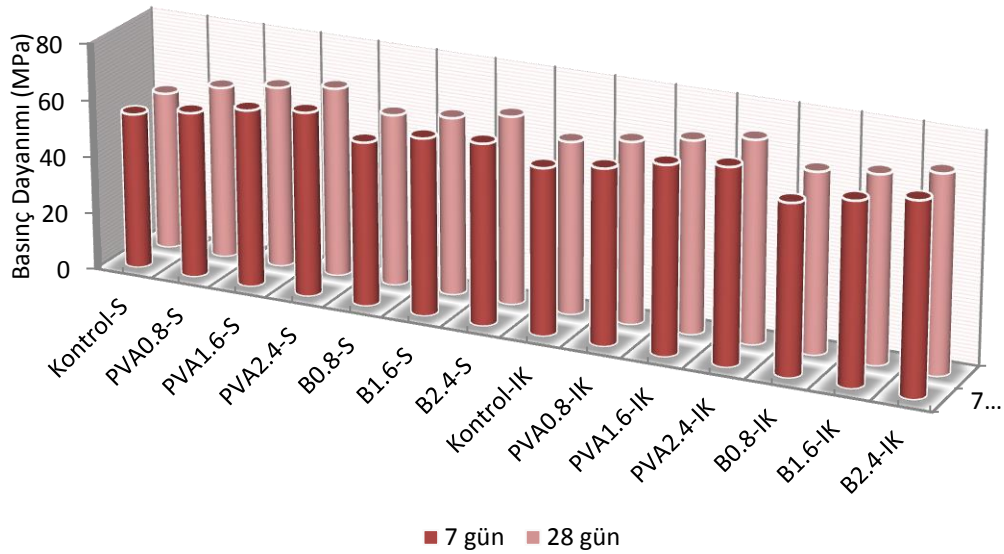


**Şekil 4.1:** Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdeler artış değerleri.

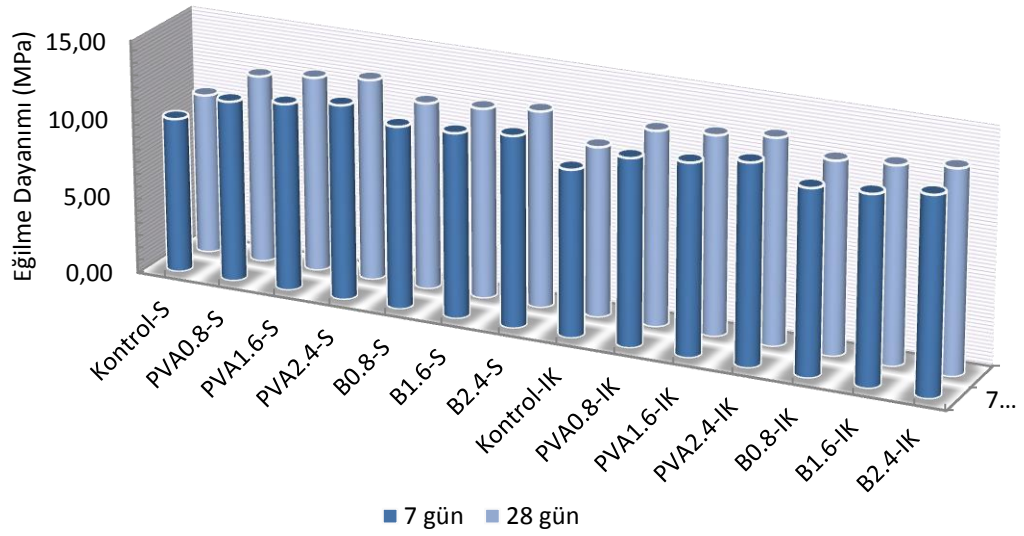
Şekil 4.1’de eğilme ve basınç dayanımlarında, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdesi gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, ıslanma kuruma kürü en fazla 28 günlük harçların sonuçlarını iyileştirmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı sonuçları, Tablo 4.1 ile Şekil 4.2 ve 4.3’de gösterilmektedir. AY ile ifade edilen “Artış Yüzdesi”, [(numune dayanımı – kontrol numunesi dayanımı)/ kontrol numunesi dayanımı× 100] olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 4.1:** 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları.

	Basınç Dayanımı				Eğilme Dayanımı			
	7 Gün		28 Gün		7 Gün		28 Gün	
	Dayanım (MPa)	AY (%)	Dayanım (MPa)	AY (%)	Dayanım (MPa)	AY (%)	Dayanım (MPa)	AY (%)
Kontrol-S	54.65	-	55.38	-	9.92	-	10.27	-
PVA0.8-S	58.19	6.48	60.45	9.15	11.58	16.73	12.04	17.23
PVA1.6-S	62.24	13.89	63.59	14.82	11.97	20.67	12.49	21.62
PVA2.4-S	64.58	18.17	66.34	19.79	12.45	25.50	12.88	25.41
B0.8-S	57.36	4.96	60.12	8.56	11.65	17.44	11.94	16.26
B1.6-S	61.95	13.36	62.25	12.41	11.80	18.95	12.15	18.31
B2.4-S	63.32	15.86	65.87	18.94	12.19	22.88	12.53	22.01
Kontrol-IK	58.17	6.44	60.29	8.87	10.65	7.36	10.84	5.55
PVA0.8-IK	61.26	12.10	63.48	14.63	11.94	20.36	12.43	21.03
PVA1.6-IK	65.72	20.26	67.14	21.24	12.23	23.29	12.71	23.76
PVA2.4-IK	68.23	24.85	70.56	27.41	12.81	29.13	13.12	27.75
B0.8-IK	59.45	8.78	62.93	13.63	11.82	19.15	12.27	19.47
B1.6-IK	63.47	16.14	65.31	17.93	12.04	21.37	12.55	22.20
B2.4-IK	66.91	22.43	68.84	24.30	12.57	26.71	12.94	26.00



**Şekil 4.2:** Basınç dayanımı değerleri.



Şekil 4.3: Eğilme dayanımı değerleri.

#### 4.1.2 Çekme Dayanımı Sonuçları

Elde edilen sonuçlara göre çekme dayanımı üzerindeki etken faktörler liflerin varlığı ve ıslanma kuruma kürüdür. Islanma kuruma kürü etkisiyle geopolimerizasyonun devamı sağlanmış ve çekme dayanımı artmıştır. Liflerin varlığı da çekme dayanımı sonuçlarını artırmıştır ancak polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçlarındaki artış oranı daha fazla olmuştur [23].

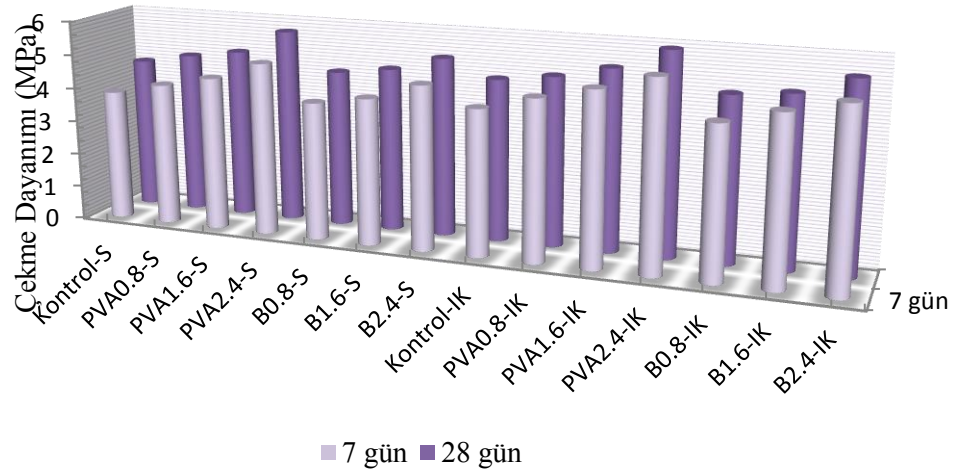
7 günlük çekme dayanımı sonuçlarına göre, sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %8.59 ile %31.25 arasında artış gösterirken, ıslanma kuruma kürü etkisiyle bu oran artmış ve %21.61 ile %42.97 arasında olmuştur. Bazalt lif katkılı numunelerde ise, sıcaklık kürü uygulanan numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %4.69 ile %24.48 arasında artış gösterirken ıslanma kuruma kürü etkisiyle bu oran artmış ve %14.58 ile %34.90 arasında olmuştur.

28 günlük çekme dayanımı sonuçlarına göre, sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %6.03 ile %26.79 arasında artış gösterirken, ıslanma kuruma kürü etkisiyle bu oran artmış ve %10.04 ile %31.70 arasında olmuştur. Bazalt lif katkılı numunelerde ise, sıcaklık kürü uygulanan numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %2.46 ile %16.52

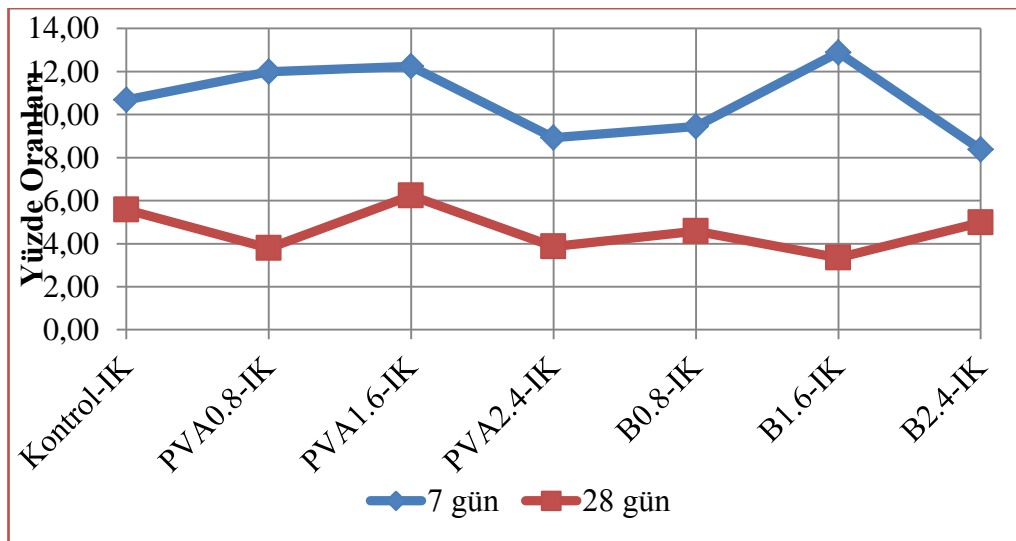


arasında artış gösterirken ıslanma kuruma kürü etkisiyle bu oran artmış ve %7.14 ile %22.32 arasında olmuştur. Lifsiz kontrol numunesi Kontrol-IK ise Kontrol-S'a göre %5,58 oranında artış göstermiştir.

Numunelerin çekme dayanımları kür şartlarına göre incelendiğinde, 7 günlük çekme dayanımlarında ıslanma-kuruma kürü uygulanan numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre %8.37 ile %12.88 arasında değişen oranlarda artış gösterirken, 28 günlük basınç dayanımlarında ise bu oran %3.34 ile %6.24 arasında olmuştur. 7. ve 28. günlerdeki geopolimer numunelerin çekme dayanımı sonuçları, Şekil 4.4 ve 4.5 ile Tablo 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Çekme dayanımı değerleri.



Şekil 4.5: Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdelik değerleri.

Çekme dayanımı değerlerinde, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların, sadece sıcaklık kürü uygulanan harçlara daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir (bkz. Şekil 3.5). Şekilden de anlaşılacağı gibi, ıslanma kuruma kürü 7 günlük harçların sonuçlarını ortalama %10,65 oranında daha fazla iyileştirmiştir.

**Tablo 4.2:** Çekme dayanımı sonuçları.

	Çekme Dayanımı			
	7 Gün		28 Gün	
	Dayanım (MPa)	AY (%)	Dayanım (MPa)	AY (%)
Kontrol-S	3,84	-	4,48	-
PVA0.8-S	4,17	8,59	4,75	6,03
PVA1.6-S	4,49	16,93	4,97	10,94
PVA2.4-S	5,04	31,25	5,68	26,79
B0.8-S	4,02	4,69	4,59	2,46
B1.6-S	4,27	11,20	4,79	6,92
B2.4-S	4,78	24,48	5,22	16,52
Kontrol-IK	4,25	10,68	4,73	5,58
PVA0.8-IK	4,67	21,61	4,93	10,04
PVA1.6-IK	5,04	31,25	5,28	17,86
PVA2.4-IK	5,49	42,97	5,9	31,7
B0.8-IK	4,40	14,58	4,8	7,14
B1.6-IK	4,82	25,52	4,95	10,49
B2.4-IK	5,18	34,90	5,48	22,32

#### 4.1.3 Su Emme, Birim Ağırlık ve Boşluk Oranı Sonuçları

Kolemanit katkılı metakaolin tabanlı geopolimer matrisin yapısına eklenen polivinil alkol ve bazalt lifinin, uygulanan ısı kürü ve ıslanma-kuruma kürü etkisi

altında, matrisin fiziksel özelliklerine etkisi incelenerek boşluk oranı, su emme ve birim ağırlık belirlenmiştir.

Bulunan sonuçlara göre, lif etkisiyle beraber boşluk oranı ve su emmede bir miktar düşüş görülmüştür. Polivinil alkol ve bazalt lifinin su emme oranı karakteristik özelliklerine bağlı olarak yüksektir. Lif katkısı ile beraber geopolimerik matrisin su emme oranı ile boşluk oranı azalmıştır [54]. İslanma-kuruma kürünün uygulanması durumunda suyun etkisiyle beraber, reaksiyonun devamı sağlanarak daha fazla alüminosilikat jeli oluşmakta ve böylece boşluk oranı ve su emme oranı azalmaktadır [23]. Su emme ve boşluk oranının azalmasıyla beraber birim ağırlık değerlerinde artış görülmüştür.

Polivinil alkol lif katkılı numunelerin birim ağırlığı kontrol numunesine göre %1.26 ile %3.36 arasında artış gösterirken, ıslanma-kuruma kürünün etkisiyle beraber bu oran artmış ve %2.52 ile %5.46 arasında olmuştur. Bazalt lifi etkisinde ise birim ağırlık artışı oranı %0.84 ile %2.52 arasında olurken ıslanma-kuruma kürünün etkisiyle beraber bu oran artmış ve %2.10 ile %4.62 arasında olmuştur.

Polivinil alkol lif katkılı numunelerin su emme kapasitesi kontrol numunesine göre %6.45 ile %10.23 arasında azalış gösterirken, ıslanma-kuruma kürünün etkisiyle beraber bu azalma daha da büyümüş ve %14.36 ile %18.07 arasında olmuştur. Bazalt lifi etkisinde ise su emme azalış oranı %3.55 ile %7.22 arasında olurken ıslanma-kuruma kürünün etkisiyle beraber bu azalma oranı artmış ve %13.44 ile %17.07 arasında olmuştur.

Polivinil alkol lif katkılı numunelerin boşluk oranı kontrol numunesine göre %3.05 ile %8.01 arasında azalış gösterirken, ıslanma-kuruma kürünün etkisiyle beraber bu azalma oranı artmış ve %16.96 ile %24.36 arasında olmuştur. Bazalt lifi etkisinde ise boşluk oranı azalış oranı %1.83 ile %6.51 arasında olurken ıslanma-kuruma kürünün etkisiyle beraber bu oran artmış ve %15.13 ile %19.74 arasında olmuştur.

Numunelerin birim ağırlığı kür şartlarına göre incelendiğinde, ıslanma-kuruma kürü uygulanan numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre %1,24 ile %2.05 arasında değişen oranlarda artış göstermiştir. Su emme kapasitesinde ise, ıslanma-kuruma kürü uygulanan numunelerin sonuçları,

sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre %8,46 ile %12.24 arasında değişen oranlarda azalış göstermiştir. Boşluk oranına bakıldığında, ıslanma-kuruma kürü uygulanan numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre %12,55 ile %17,77 arasında değişen oranlarda azalış göstermiştir. Su emme, boşluk oranı ve birim ağırlığı sonuçları Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.3:** Su emme, boşluk oranı ve birim ağırlığı sonuçları.

	Birim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Su Emme (%)	Boşluk Oranı (%)
<b>Kontrol-S</b>	2.38	25.90	14.74
<b>PVA0.8-S</b>	2.41	24.23	14.29
<b>PVA1.6-S</b>	2.43	23.87	13.82
<b>PVA2.4-S</b>	2.46	23.25	13.56
<b>B0.8-S</b>	2.40	24.98	14.47
<b>B1.6-S</b>	2.42	24.56	14.03
<b>B2.4-S</b>	2.44	24.03	13.78
<b>Kontrol-IK</b>	2.41	22.73	12.89
<b>PVA0.8-IK</b>	2.44	22.18	12.24
<b>PVA1.6-IK</b>	2.47	21.69	11.66
<b>PVA2.4-IK</b>	2.51	21.22	11.15
<b>B0.8-IK</b>	2.43	22.42	12.51
<b>B1.6-IK</b>	2.45	21.91	12.14
<b>B2.4-IK</b>	2.49	21.48	11.83

#### 4.1.4 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Geopolimer numunelerde, polivinil alkol ve bazalt lifleri ile kür koşullarının, ultrases geçiş hızı değerlerine etkisi araştırılmıştır. Polivinil alkol ve bazalt lifinin etkisiyle ultrases geçiş hızı sonuçlarında artış görülmüştür. Islanma kuruma kürü uygulanan numunelerin test sonuçlarında artış miktarı daha fazla olmuştur. Ultrases geçiş hızı sonuçlarında etkin faktör boşluk oranının azalmasıdır. Lif etkisiyle beraber

boşluk oranı azalmaktadır. Ayrıca benzer şekilde ıslanma kuruma kürü de boşluk oranının azalmasına etki ettiği görülmüştür. Boşluk oranının azalması ile ultrases dalgalarının geçiş süresi kısılacak ve ultrases geçiş hızı artacaktır [23, 54].

7 günlük numunelerde ultrases geçiş hızı sonuçları incelendiğinde, sadece sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %1.11 ile %2.92 arasında artış gösterirken, ıslanma kuruma kürü etkisiyle bu oran artmış ve %3.49 ile %5.22 arasında olmuştur. Bazalt lif katkılı numunelerde ise, sıcaklık kürü uygulanan numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %0.79 ile %2.41 arasında artış gösterirken ıslanma kuruma kürü etkisiyle bu oran artmış ve %2.72 ile %4.34 arasında olmuştur.

28 günlük numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçlarına bakıldığında, sadece sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %0.82 ile %2.65 arasında artış gösterirken, ıslanma kuruma kürü etkisiyle bu oran artmış ve %3.24 ile %5.09 arasında olmuştur. Bazalt lif katkılı numunelerde ise, sıcaklık kürü uygulanan numunelerin sonuçları kontrol numunesine göre %1.01 ile %2 arasında artış gösterirken ıslanma kuruma kürü etkisiyle bu oran artmış ve %2.79 ile %4.28 arasında olmuştur.

Numunelerin ultrases geçiş hızı kür şartlarına göre incelendiğinde 7 günlük numunelerde, ıslanma-kuruma kürü uygulanan numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre %1,88 ile %2.58 arasında değişen oranlarda artış göstermiştir. 28 günlük numunelerde ise, ıslanma-kuruma kürü uygulanan numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre %1,76 ile %2.60 arasında değişen oranlarda artış göstermiştir.

Elde edilen sonuçlar, ultrases geçiş hızı için ıslanma kuruma kürü uygulanan numunelerin, sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre çok büyük olmamakla birlikte daha iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı sonuçları Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

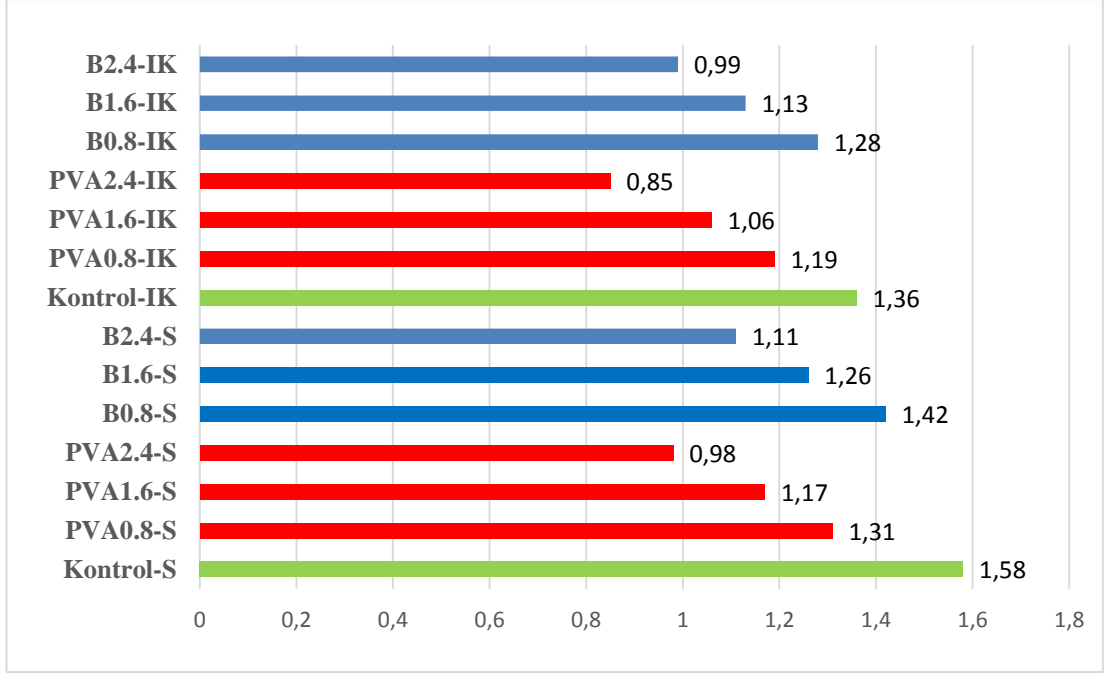
**Tablo 4.4:** UGH sonuçları (m/s).

Karışım	7 Gün	28 Gün	Karışım	7 Gün	28 Gün
<b>Kontrol-S</b>	3526	3553	<b>Kontrol-İK</b>	3617	3645
<b>PVA0.8-S</b>	3565	3582	<b>PVA0.8-İK</b>	3649	3668
<b>PVA1.6-S</b>	3608	3619	<b>PVA1.6-İK</b>	3688	3713
<b>PVA2.4-S</b>	3629	3647	<b>PVA2.4-İK</b>	3710	3734
<b>B0.8-S</b>	3554	3589	<b>B0.8-İK</b>	3622	3652
<b>B1.6-S</b>	3582	3597	<b>B1.6-İK</b>	3664	3683
<b>B2.4-S</b>	3611	3624	<b>B2.4-İK</b>	3679	3705

#### 4.1.5 Yatay (Böhme) Aşınma Deneyi Sonuçları

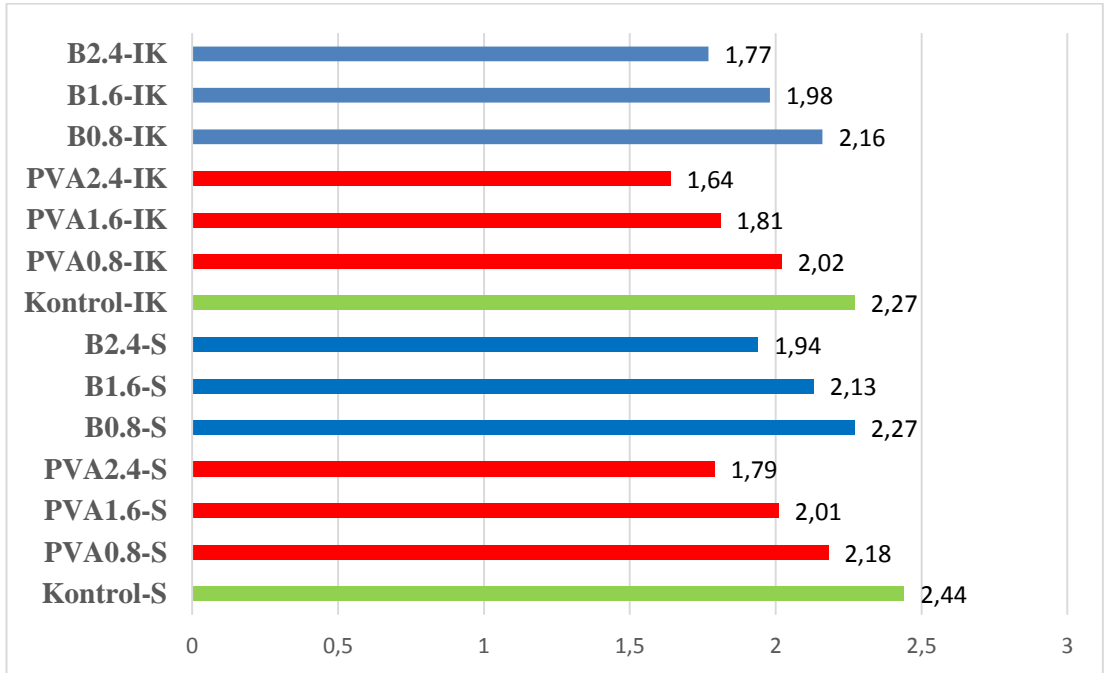
Harçlarda Kolemanit atığı kullanımının aşınmaya etkisinin olumlu olduğu Mücteba ve diğ. [53] tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir. Bu çalışmada kolemanit atığı ikamesi bütün numunelerde kullanılmış, sonuçlara diğer faktörlerin etkisi incelenmiştir. Elde edilen aşınma davranışı sonuçları, dayanım artışı sonuçları ile benzerlik göstermiştir. Sonuçlar incelendiğinde 16 g'dan ve 2 mm'den az ağırlık kaybı ve boy değişimi görülmüştür. Lif içeriği arttıkça boy değişimi ve ağırlık kaybı bakımından iyileşme olmuştur. Bu durumun temel nedeni lif etkisiyle beraber dirençli bir tabaka oluşmasıdır. Bu çalışmada bulunan sonuçlar önceki sonuçlarla uyumludur [9, 53,54]. Ayrıca ıslanma kuruma kürünün etkisiyle geopolimerizasyon reaksiyonu sonucunda aşınmaya karşı direncin arttığı görülmüştür.

Üretilen 71×71×71 mm boyutlarındaki numunelerin boy değişimi oranları incelendiğinde, ıslanma kuruma kürü uygulanan %2,4 oranında polivinil alkol katkılı numunenin en az boy değişimine uğrayan numune olduğu, sadece sıcaklık kürü uygulanan kontrol numunesinin ise en fazla boy değişimine uğrayan numune olduğu görülmektedir (Şekil 4.6).



**Şekil 4.6:** Boy değişimi oranları.

Ağırlık kaybı oranları incelendiğinde benzer sonuçlar görülmektedir. Islanma kuruma kürü uygulanan %2,4 oranında polivinil alkol katkıli numunenin en az ağırlık kaybına uğrayan numune olduğu, sadece sıcaklık kürü uygulanan kontrol numunesinin ise en fazla ağırlık kaybına uğrayan numune olduğu görülmektedir (Şekil 4.7).

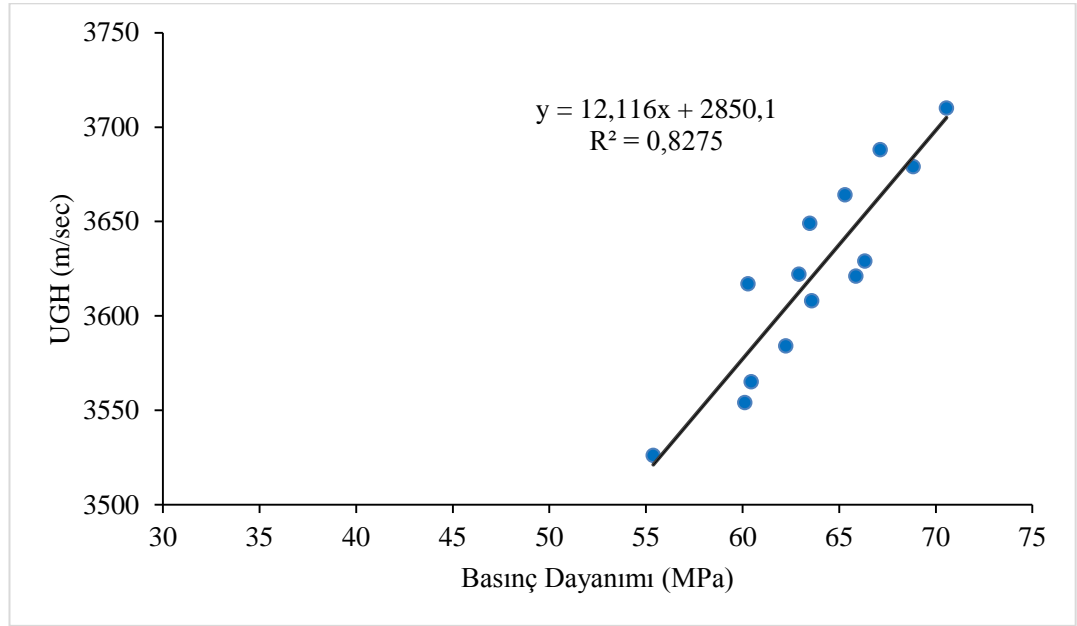


**Şekil 4.7:** Ağırlık kaybı oranları.

#### 4.1.6 Çalışılan Parametrelerle İlgili Korelasyon İlişkisi

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar arasındaki uygunluk oranını incelemek için test sonuçlarından yararlanarak korelasyon faktörü hesaplanmıştır. Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı (UGH) arasında ve eğilme dayanımı ile ağırlık kaybı arasında korelasyon faktörü bulunmuştur.  $R^2$ , korelasyon faktörü değerini gösterirken bu değer yüksek olması uygunluk derecesini arttırmaktadır. 0.80'den büyük değerler tatmin edici görülmektedir. Hesaplanan her iki korelasyonda da 0.80'den daha büyük değerler çıkmıştır. Basınç dayanımı ve UGH arasındaki korelasyon faktörü 0.83 iken, eğilme dayanımı ve ağırlık kaybı arasında 0.82'dir. Bu sonuçlar önceki çalışmaların sonuçları ile uyumludur [9, 53,54].

Şekil 4.8'deki basınç dayanımı ve UGH arasındaki ilişki incelendiğinde, basınç dayanımı arttıkça UGH'nin de arttığı, basınç dayanımı ve UGH arasında pozitif yönlü  $R^2=0,8275$  değerinde güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8: Basınç dayanımı ve UGH arasındaki ilişki.

#### 4.2 Geopolimer Numunelerin Durabilite Özellikleri

Bu aşamada, hazırlanan 7 seri geopolimer numuneler, durabilite özelliklerini incelemek amacıyla, yüksek sıcaklık ve donma çözünme deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonrası numunelerin eğilme ve basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve



ağırlık kayıplarına bakılmıştır. Ayrıca 600 °C uygulanan numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrası FTIR, TGA-DTA, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri ve görsel incelemesi yapılmıştır.

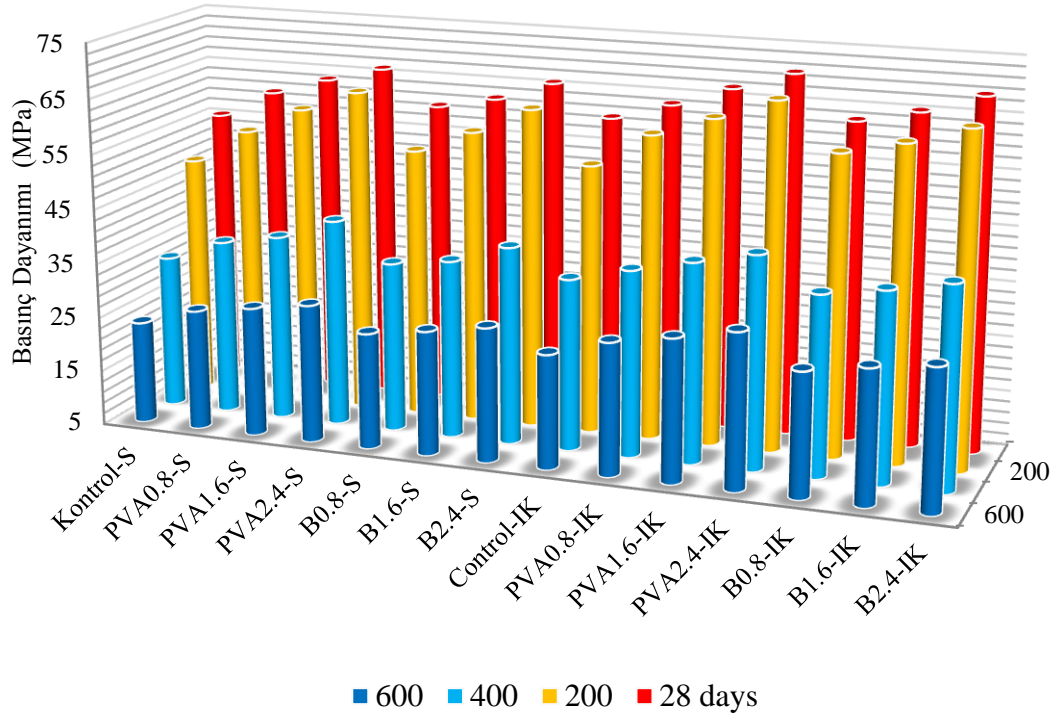
#### **4.2.1 Yüksek Sıcaklık Deneyi**

##### **4.2.1.1 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Eğilme ve Basınç Dayanımı Sonuçları**

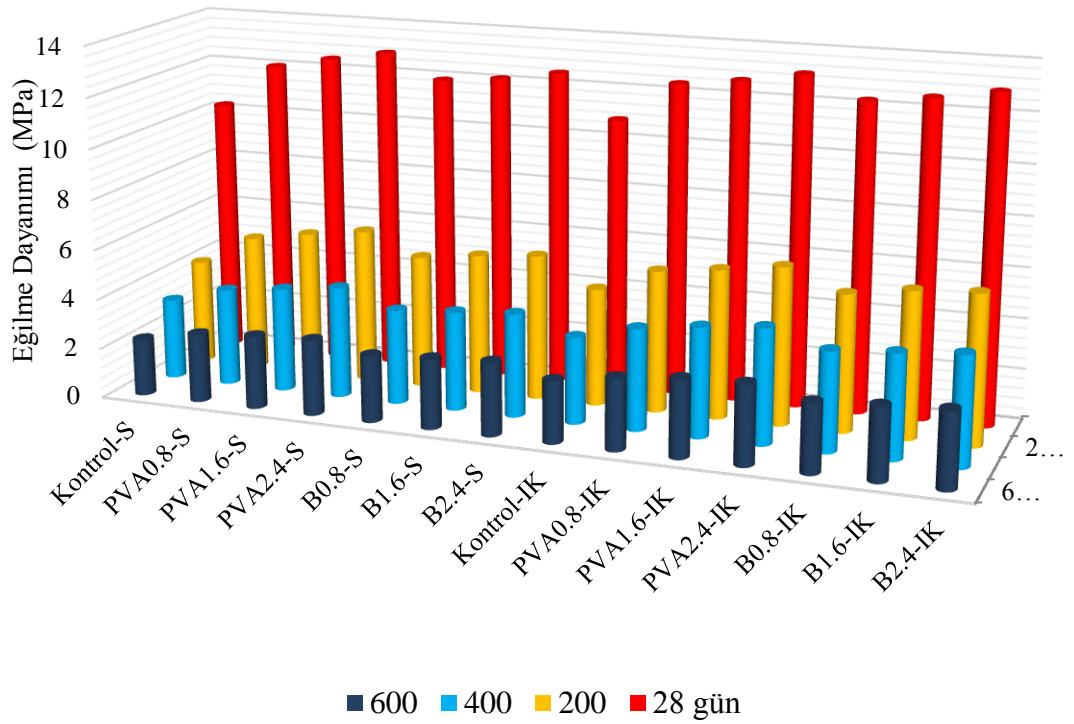
200, 400 ve 600 °C sıcaklık testi sonrası geopolimer numunelerde oluşan fiziksel ve yapısal değişiklikler araştırılmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisinde kontrol numunesi kolemanit atığı ikameli numunenin özelliklerine polivinil alkol ve bazalt liflerinin etkisi ve kür koşullarının etkisi incelenmiştir. Deney öncesi ve sonrası dayanım sonuçları karşılaştırılarak irdelemeler yapılmıştır.

Geopolimer numuneler, 400°C'den sonra maruz kaldığı termal reaksiyonlar sonucunda oluşan dehidrasyon ve matrisindeki suyun buharlaşması sebebiyle dayanım kaybı yaşamıştır. Yüksek sıcaklık sonrası dayanım sonuçları, sıcaklık etkisi öncesi sonuçlarla benzerlik göstermiştir. Kontrol numunesine göre bazalt ve polivinil alkol lifli numuneler daha iyi performans göstermiştir. Bu durumun temel nedeni bazalt ve polivinil alkol liflerin yüksek sıcaklık etkisi altında mekanik bütünlüğünü koruması olmuştur. Lifli malzemelerin kristal fazlarının homojen olması ve ince dağılıma sahip olması fiziksel ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir [54].

Islanma-kuruma döngüsü, yeni kristal geopolimerizasyon ürünlerinin oluşumu ve geopolimerizasyonun sürekliliği sayesinde yüksek sıcaklık sonrası dayanım sonuçlarını iyileştirmiştir [23]. Eğilme ve basınç dayanımlarındaki azalma oranları incelendiğinde eğilme dayanımı sonuçlarında azalma oranının daha fazla olduğu görülmüştür. Sıcaklıkla beraber gözenekli yapılarda büyüme ve çatlak yayılması sonucunda oluşan kusurlara karşı eğilme dayanımındaki hassasiyet daha fazladır [59]. Yüksek sıcaklık etkisindeki basınç ve eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.10 ve 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Yüksek sıcaklık etkisindeki basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 4.10: Yüksek sıcaklık etkisindeki eğilme dayanımı sonuçları.

600°C sıcaklık etkisindeki basınç dayanımı sonuçlarına göre, sadece sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçlarının kontrol numunesine göre azalma oranları %54.52 ile %55.42 arasında olurken ıslanma kuruma döngüsü sayesinde bu oranlar azalmış ve %52.88 ile %54.10 arasında olmuştur. Eğilme dayanımı sonuçlarında ise ıslanma kuruma kürünün sonuçları çok fazla etkilemediği görülmüştür.

200°C sıcaklık etkisindeki sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı sonuçları 48,89 MPa ve 64,02 MPa aralığında olmuştur. Islanma-kuruma döngüsü sayesinde basınç dayanımı sonuçları artmış ve 53,95 MPa ve 67,95 MPa aralığında olmuştur. 200°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde eğilme dayanımı sonuçları ise 4,17 MPa ve 6,12 MPa aralığında olmuştur. Islanma-kuruma döngüsü sayesinde eğilme dayanımı sonuçları artmış ve 4,68 MPa ve 6,27 MPa aralığında olmuştur.

600°C sıcaklığa maruz kalan polivinil alkol katkılı numunelerde basınç dayanımı sonuçları 26.95 MPa ve 30.17 MPa aralığında olmuştur. Islanma-kuruma döngüsü sayesinde 600°C sıcaklıkta basınç dayanımı sonuçları artmış ve 29.14 MPa ve 33.25 MPa aralığında olmuştur. 600°C sıcaklığa maruz kalan polivinil alkol katkılı numunelerde eğilme dayanımı sonuçları ise 2.74 MPa ve 3.02 MPa aralığında olmuştur. Islanma-kuruma döngüsü sayesinde 600°C sıcaklıkta eğilme dayanımı sonuçları artmış ve 2.85 MPa ve 3.18 MPa aralığında olmuştur.

600°C sıcaklığa maruz kalan bazalt lif katkılı numunelerde basınç dayanımı sonuçları 26.12 MPa ve 29.43 MPa aralığında olmuştur. Islanma-kuruma döngüsü sayesinde 600°C sıcaklıkta basınç dayanımı sonuçları artmış ve 27.63 MPa ve 30.79 MPa aralığında olmuştur. 600°C sıcaklığa maruz kalan bazalt lif katkılı numunelerde eğilme dayanımı sonuçları ise 2.66 MPa ve 2.93 MPa aralığında olmuştur. Islanma-kuruma döngüsü sayesinde 600°C sıcaklıkta eğilme dayanımı sonuçları artmış ve 2.75 MPa ve 3.04 MPa aralığında olmuştur. Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.5'te, eğilme sonuçları Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

**Tablo 4.5:** Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımları ve azalma oranları.

	Öncesi	200°C		400°C		600°C	
	Dayanım (MPa)	Dayanım (MPa)	Oran (%)	Dayanım (MPa)	Oran (%)	Dayanım (MPa)	Oran (%)
Kontrol-S	55,38	48,89	11.72	32,98	40.45	23,68	57.24
PVA0.8-S	60,45	55,23	8.64	36,91	38.94	26,95	55.42
PVA1.6-S	63,59	60,08	5.52	38,84	38.92	28,54	55.12
PVA2.4-S	66,34	64,02	3.50	42,77	35.53	30,17	54.52
B0.8-S	60,12	54,1	10.01	35,95	40.20	26,12	56.55
B1.6-S	62,25	58,33	6.30	37,39	39.94	27,67	55.55
B2.4-S	65,87	63,23	4.01	40,90	37.91	29,43	55.32
Kontrol-IK	60,29	53,95	10.52	36,20	39.96	25,82	57.17
PVA0.8-IK	63,48	60,3	5.01	38,85	38.80	29,14	54.10
PVA1.6-IK	67,14	63,98	4.71	41,28	38.52	31,02	53.80
PVA2.4-IK	70,56	67,95	3.70	43,64	38.15	33,25	52.88
B0.8-IK	62,93	59,62	5.26	37,82	39.90	27,63	56.09
B1.6-IK	65,31	62,13	4.87	39,56	39.43	29,38	55.01
B2.4-IK	68,84	65,51	4.84	41,75	39.35	30,79	55.27

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ıslanma kuruma kürü uygulanan %2,4 oranında polivinil alkol katkılı numunenin bütün sıcaklıklarda en az dayanım kaybı olan numune olduğu, sadece sıcaklık kürü uygulanan kontrol numunesinin ise en fazla dayanım kaybına uğrayan numune olduğu görülmektedir.

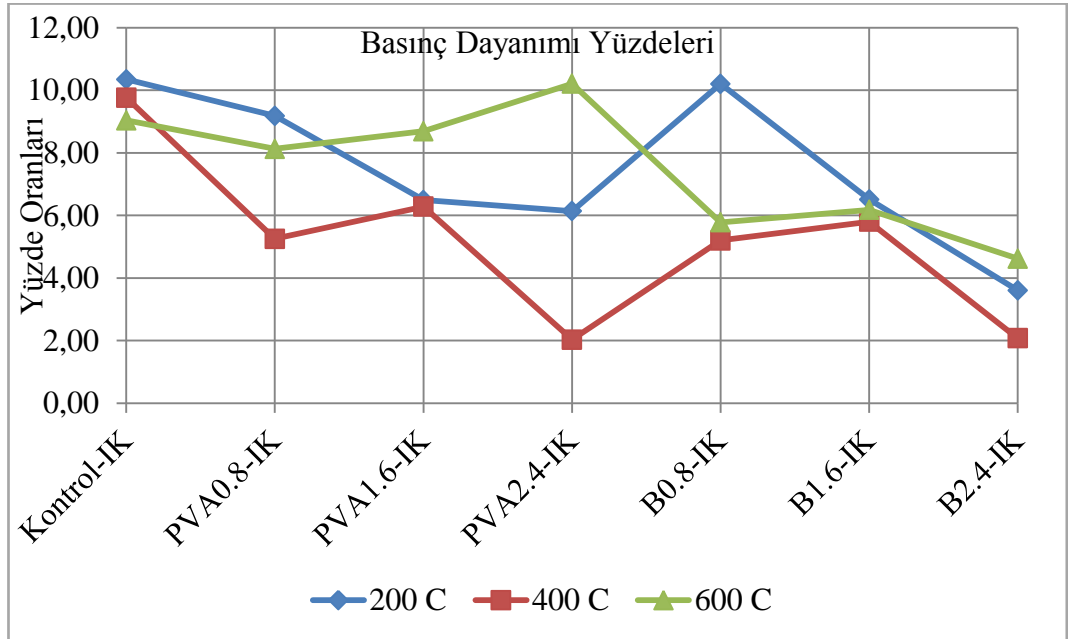
**Tablo 4.6:** Yüksek sıcaklık etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları ve azalma oranları

	Öncesi	200°C		400°C		600°C	
	Dayanım (MPa)	Dayanım (MPa)	Oran (%)	Dayanım (MPa)	Oran (%)	Dayanım (MPa)	Oran (%)
Kontrol-S	10,27	4,17	59.40	3,21	68.74	2,28	77.80
PVA0.8-S	12,04	5,4	55.15	3,87	67.86	2,74	77.24
PVA1.6-S	12,49	5,79	53.64	4,15	66.77	2,91	76.70
PVA2.4-S	12,88	6,12	52.48	4,44	65.53	3,02	76.55
B0.8-S	11,94	5,28	55.78	3,77	68.43	2,66	77.72
B1.6-S	12,15	5,57	54.16	3,94	67.57	2,8	76.95
B2.4-S	12,53	5,78	53.87	4,12	67.12	2,93	76.62
Kontrol-IK	10,84	4,68	56.83	3,45	68.17	2,48	77.12
PVA0.8-IK	12,43	5,63	54.71	4,05	67.42	2,85	77.07
PVA1.6-IK	12,71	5,92	53.42	4,36	65.70	3,09	75.69
PVA2.4-IK	13,12	6,27	52.21	4,59	65.02	3,18	75.76
B0.8-IK	12,27	5,45	55.58	3,96	67.73	2,75	77.59
B1.6-IK	12,55	5,82	53.63	4,14	67.01	2,91	76.81
B2.4-IK	12,94	5,96	53.94	4,35	66.38	3,04	76.51

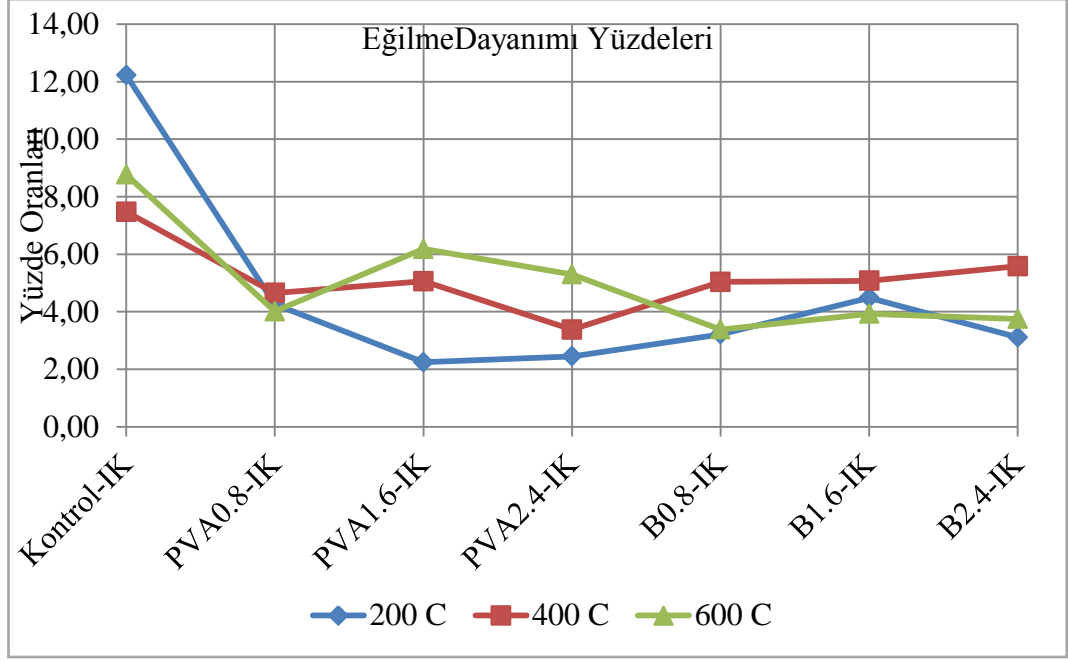
Yüksek sıcaklık etkisinde basınç ve eğilme dayanımı azalma oranlarına yüzdeler olarak bakıldığında (bkz. Tablo 4.5 ve 4.6), ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların, sadece sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre bütün sıcaklıklarda daha düşük azalma oranlarına sahip oldukları görülmektedir. Sadece sıcaklık kürü uygulanan harçların basınç dayanımı ortalama azalma oranı, 200°C 400°C ve 600°C’de sırasıyla %7,1, %38,8 ve %55,7 iken, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçlarda bu oran sırasıyla %5,6, %39,2 ve %54,9 olmuştur. Sadece sıcaklık kürü uygulanan harçların eğilme dayanımı ortalama azalma oranı, 200°C 400°C ve 600°C’de sırasıyla %54,9, %67,4 ve %77,1 iken, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçlarda bu oran sırasıyla %54,3, %66,8 ve %76,7 olmuştur.

Sıcaklık etkisinde basınç ve eğilme dayanımı değerleri için, uygulanan farklı kür koşullarındaki numuneler karşılıklı incelendiğinde, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların basınç dayanımı sonuçları sadece sıcaklık kürü uygulanan harçların sonuçlarına göre 200°C 400°C ve 600°C’de sırasıyla ortalama %7,50, %5,20 ve %7,52 daha yüksek olmuştur. Islanma kuruma kürü uygulanan harçların eğilme dayanımı sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan harçların sonuçlarına göre 200°C 400°C ve 600°C’de sırasıyla ortalama %4,57, %5,18 ve %5,05 daha yüksek olmuştur. Bu sonuçlar, basınç ve eğilme dayanımı için ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.

Şekil 4.12 ve 4.13’te basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarında, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdesi gösterilmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, ıslanma kuruma kürü en fazla Kontrol-IK numunesinin sonuçlarını iyileştirmiştir.



Şekil 4.11: Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdelik oranları.



**Şekil 4.12:** Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdeler oranları.

#### 4.2.1.2 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalma durumunda gözenek yapısındaki büyüme ve dehidrasyon ile matriste oluşan su kaybı sonucu kütle kaybı beraberinde ek boşluklar oluşur. Boşluk miktarının artmasıyla ses dalgalarının numune içinde geçiş zamanı artacak ve ultrases geçiş hızı azalacaktır [60].

600°C sıcaklık etkisindeki ultrases geçiş hızı sonuçlarına göre, sadece sıcaklık kürü uygulanan polivinil alkol katkılı numunelerin sonuçlarının kontrol numunesine göre azalma oranları % 69,51 ile % 70,21 arasında değişirken, bu oranlar ıslatma-kurutma kürüyle birlikte düşerek % 68,24 ile % 68,78 arasında olmuştur. Bazalt lif katkılı geopolimer numunelerde ise bu oranlar %70.12 ile %70.72 arasında olurken ıslanma kuruma döngüsü sayesinde bu oranlar azalmış ve 68.37 ile %68.98 arasında olmuştur. Test sonrası oluşan ultrases geçiş hızı değerleri ve azalma oranları Tablo 4.7 ve Şekil 4.14’de gösterilmiştir.

600°C sıcaklığa maruz kalan polivinil alkol katkılı örneklerde ultrases geçiş hızı sonuçları 1067 m/s ile 1112 m/s arasında ölçülürken, ıslatma-kurutma küründen dolayı sonuçlar artmış ve 1145 m/s ve 1186 m/s aralığında olmuştur. Bazalt lif katkılı

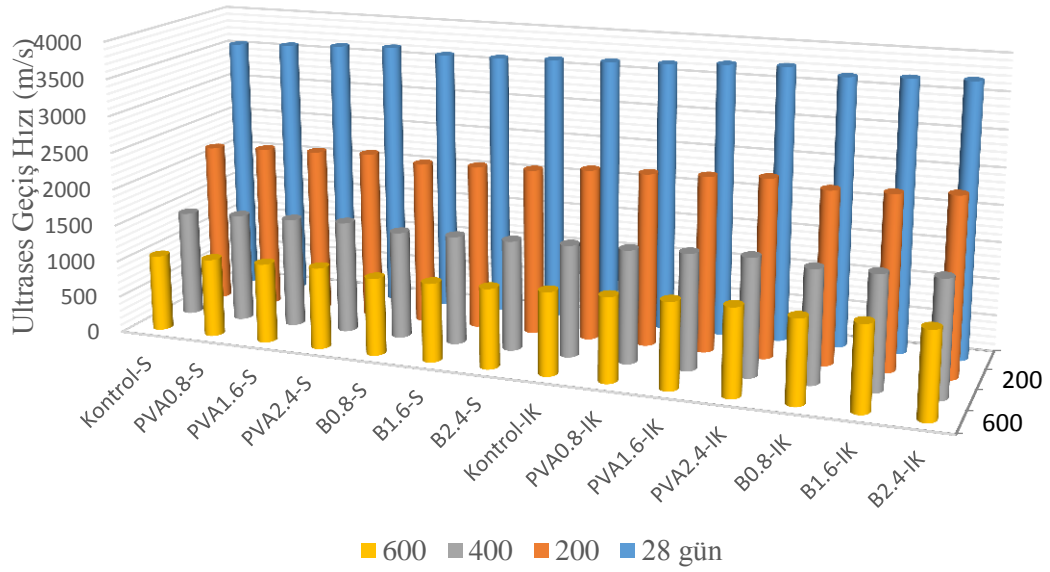
örneklerin sonuçları ise 1051 m/s ile 1083 m/s arasında ölçülürken, ıslatma-kurutma küründen dolayı sonuçlar artmış ve 1113 m/s ve 1172 m/s aralığında olmuştur.

**Tablo 4.7:** Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları ve azalma oranları.

	Öncesi	200°C		400°C		600°C	
	Hız (m/s)	Hız (m/s)	Oran (%)	Hız (m/s)	Oran (%)	Hız (m/s)	Oran (%)
Kontrol-S	3553	2200	38.08	1439	59.50	1039	70.76
PVA0.8-S	3582	2239	37.49	1476	58.79	1067	70.21
PVA1.6-S	3619	2264	37.44	1493	58.75	1084	70.05
PVA2.4-S	3647	2296	37.04	1523	58.24	1112	69.51
B0.8-S	3589	2223	38.06	1461	59.29	1051	70.72
B1.6-S	3597	2248	37.50	1482	58.80	1068	70.31
B2.4-S	3624	2268	37.42	1497	58.69	1083	70.12
Kontrol-IK	3645	2335	35.94	1518	58.35	1124	69.16
PVA0.8-IK	3668	2351	35.91	1533	58.21	1145	68.78
PVA1.6-IK	3713	2383	35.82	1568	57.77	1169	68.52
PVA2.4-IK	3734	2428	34.98	1595	57.28	1186	68.24
B0.8-IK	3652	2340	35.93	1527	58.19	1133	68.98
B1.6-IK	3683	2362	35.87	1546	58.02	1154	68.67
B2.4-IK	3705	2415	34.82	1572	57.57	1172	70.76

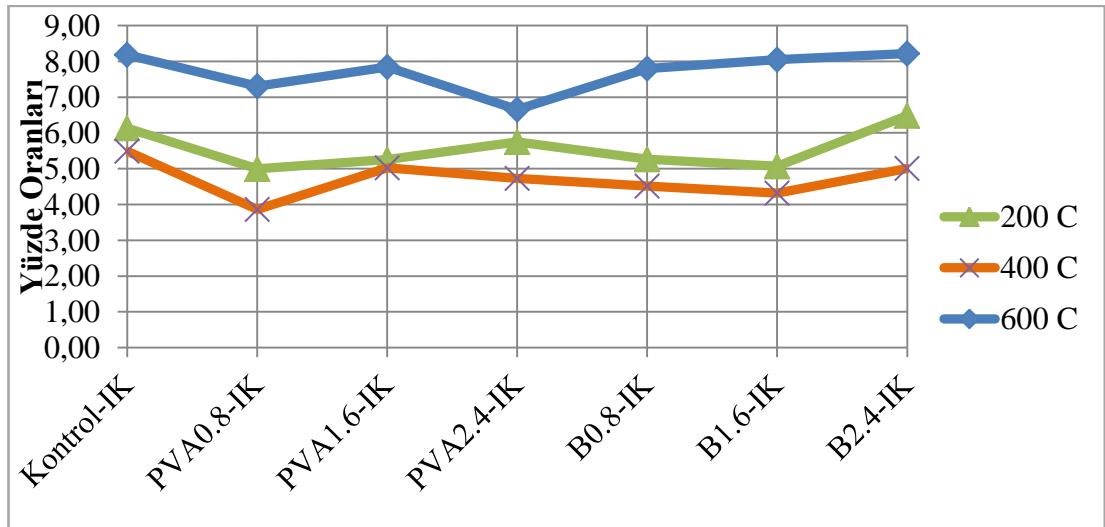
Ultrases geçiş hızı azalma oranlarına yüzdeler olarak bakıldığında (Tablo 3.7), ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların, sadece sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre bütün sıcaklıklarda daha düşük azalma oranlarına sahip oldukları görülmektedir. Sadece sıcaklık kürü uygulanan harçların ultrases geçiş hızı ortalama azalma oranı, 200°C 400°C ve 600°C’de sırasıyla %37,58, %58,87 ve %70,24 iken, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçlarda bu oran sırasıyla %35,61, %57,91 ve %68,67 olmuştur.





Şekil 4.13: Yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızları

Ultrases geçiş hızı değerleri için, uygulanan farklı kür koşullarındaki numuneler karşılıklı incelendiğinde, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların sonuçları sadece sıcaklık kürü uygulanan harçların sonuçlarına göre 200°C 400°C ve 600°C’de sırasıyla ortalama %5,57, %4,71 ve %7,72 daha yüksek olmuştur. Bu sonuçlar, ultrases geçiş hızı için ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre daha iyi bir performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4.14: Islanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdelerik değerleri.

Şekil 4.15’te ultrases geçiş hızı sonuçlarında, ıslanma kuruma kürü uygulanan harçların, sıcaklık kürü uygulanan harçlara göre yüzdesi gösterilmektedir. Şekilden

de anlaşılacağı gibi, ıslanma kuruma kuru en fazla 600°C sıcaklık etkisindeki harçların sonuçlarını iyileştirmiştir.

#### 4.2.1.3 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Ağırlık Kaybı Sonuçları

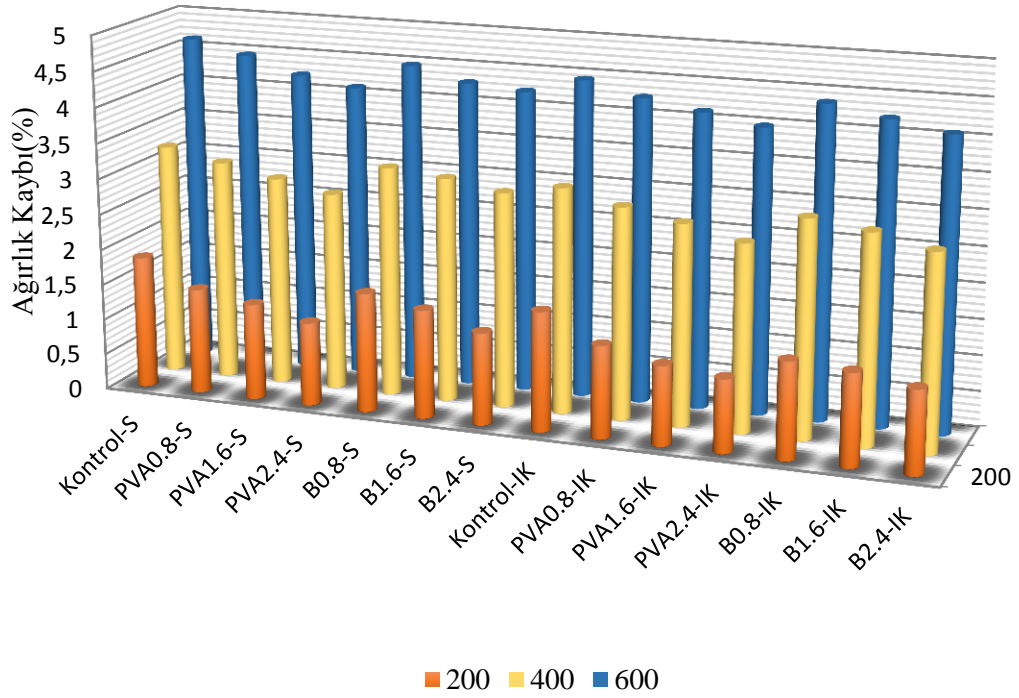
Polivinil alkol katkıli numunelerde ağırlık kayıpları 200°C'de %1.17 ile %1.48 arasında, 400°C'de %2.78 ile %3.09 arasında ve 600°C'de %4.11 ile %4.46 arasında olmuştur. Islanma-kuruma döngüsü ile polivinil alkol katkıli numunelerde ağırlık kayıpları 200°C'de %1.02 ile %1.29 arasında, 400°C'de %2.62 ile %2.96 arasında ve 600°C'de %3.99 ile %4.26 arasında olmuştur.

Bazalt lif katkıli numunelerde ağırlık kayıpları 200°C'de %1.29 ile %1.67 arasında, 400°C'de %3.01 ile %3.22 arasında ve 600°C'de %4.23 ile %4.48 arasında olmuştur. Islanma-kuruma döngüsü ile bazalt lif katkıli numunelerde ağırlık kayıpları 200°C'de %1.16 ile %1.35 arasında, 400°C'de %2.74 ile %3.03 arasında ve 600°C'de %4.08 ile %4.37 arasında olmuştur.

Sıcaklık artışıyla, geopolimer numunelerde dehidrasyon meydana gelerek nem kaybı oluşur. Bu durum mikroyapıda iç hasarına ve sonuç olarak ağırlık kaybına neden olur [61]. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin ağırlık kaybı oranları ve grafiksel gösterimi sırasıyla Tablo 4.8 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

**Tablo 4.8:** Yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kaybı oranları.

Karışım	200°C (%)	400°C (%)	600°C (%)	Karışım	200°C (%)	400°C (%)	600°C (%)
Kontrol-S	1,86	3,25	4,64	Kontrol-IK	1,67	3,15	4,45
PVA0.8-S	1,48	3,09	4,46	PVA0.8-IK	1,29	2,96	4,26
PVA1.6-S	1,35	2,93	4,23	PVA1.6-IK	1,11	2,81	4,13
PVA2.4-S	1,17	2,78	4,11	PVA2.4-IK	1,02	2,62	3,99
B0.8-S	1,67	3,22	4,48	B0.8-IK	1,35	3,03	4,37
B1.6-S	1,52	3,14	4,29	B1.6-IK	1,29	2,92	4,22
B2.4-S	1,29	3,01	4,23	B2.4-IK	1,16	2,74	4,08

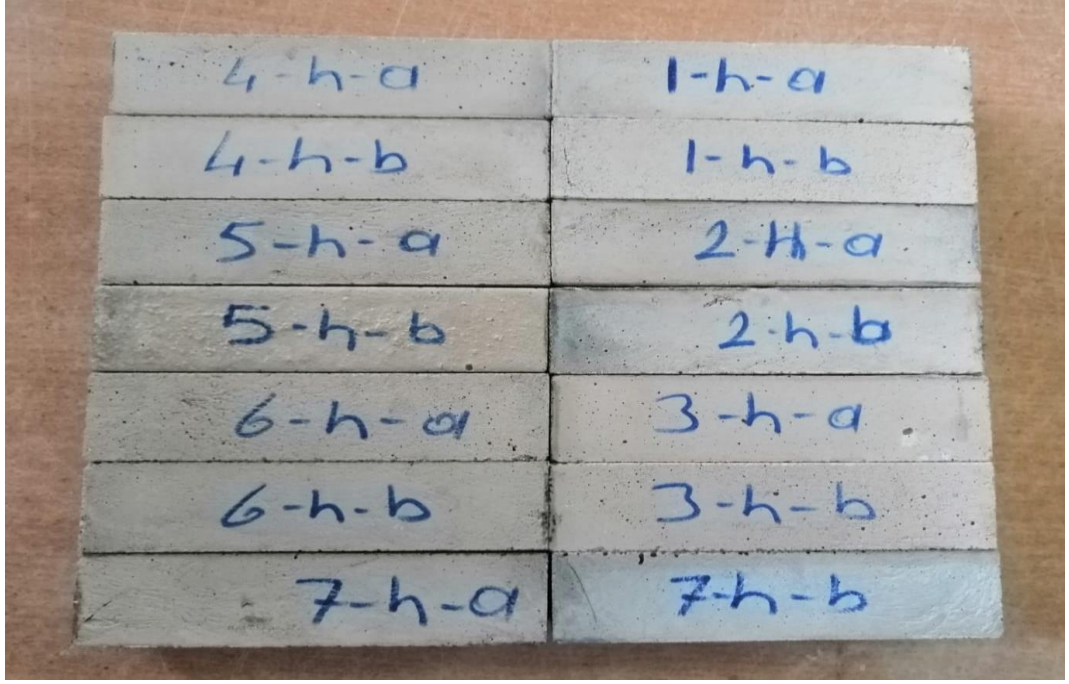


Şekil 4.15: Yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kaybı oranları.

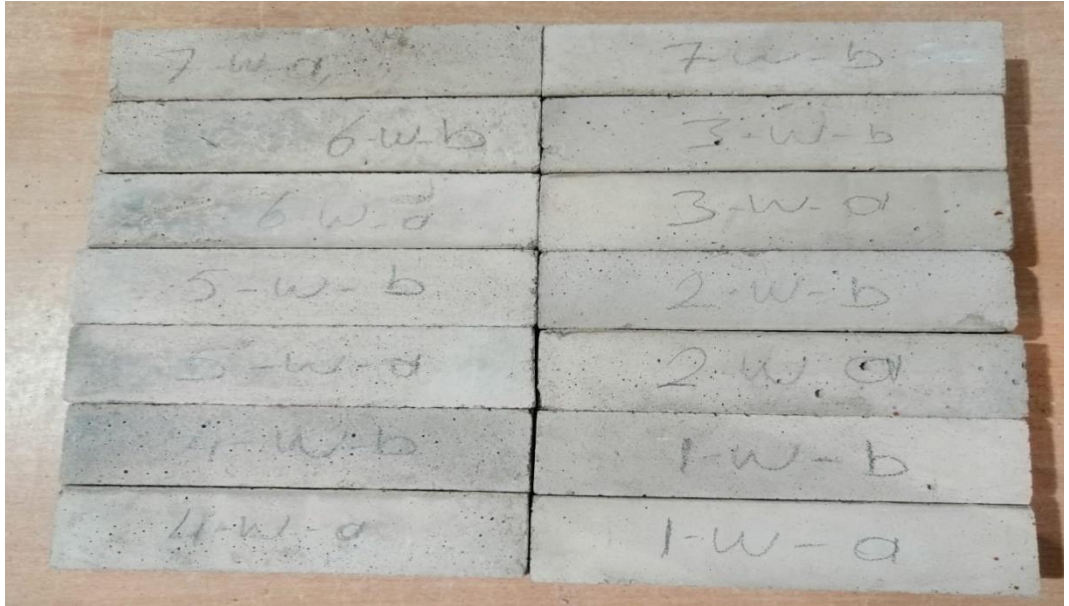
#### 4.2.1.4 Analizler ve Görsel İnceleme

600°C sıcaklıkta numuneler üzerinde belirgin bir renk değişimi görülmemiş olup çatlaklar sınırlı kalmıştır ve numune stabilitesini korumuştur. Numunelerin yüzeyi bir miktar kaba olma eğilimi göstermiştir [54].

200 °C sıcaklık etkisi sonrası numunenin mikroyapısında önemli derecede çatlak gözükmediği anlaşılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinden önce, alümino-silikat jelinden oluşan homojen ve yoğun matrisin genel mikroyapısı testten sonra korunmuştur [62]. Fakat geopolimer numunelerde geopolimerizasyonda oluşan iyi bağ ve matris sürekliliği sayesinde yapının korunduğu anlaşılmıştır. Şekil 4.17 ve 4.18, 600°C yüksek sıcaklık etkisi sonrası numuneleri göstermektedir.



**Şekil 4.16:** Yüksek sıcaklık etkisi ile ısı kürü uygulanmış geopolimer örnekleri.



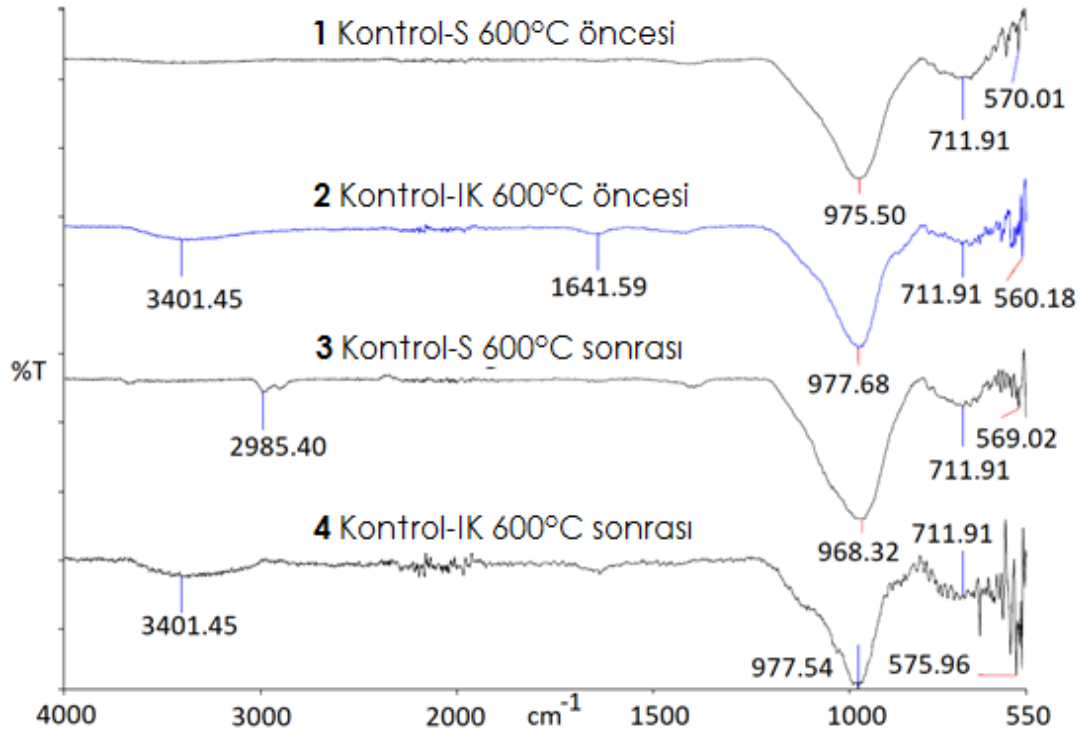
**Şekil 4.17:** Yüksek sıcaklık etkisinde ıslatma-kurutma ile kürlenmiş geopolimer.

Şekil 4.19 kontrol karışımının iki farklı kür koşulu altında 600°C sıcaklık öncesi ve sonrası FTIR spektrumlarını göstermektedir. 1 numaralı numune sadece sıcaklık kürü uygulanan numuneyi gösterirken, 2 numaralı numune ıslanma-kuruma döngüsüne maruz kalmış numuneyi göstermektedir. Aynı şekilde 3 numaralı numune sadece sıcaklık kürü uygulanan 600°C sıcaklığa maruz kalmış numuneyi gösterirken, 4 numaralı numune ıslanma-kuruma döngüsüne maruz kalmış 600°C sıcaklığa maruz kalmış numuneyi göstermektedir. 1 numaralı numune için  $975.5 \text{ cm}^{-1}$ , 2 numaralı numune için  $977.68 \text{ cm}^{-1}$ , 3 numaralı numune için  $968.32 \text{ cm}^{-1}$ , 4 numaralı numune

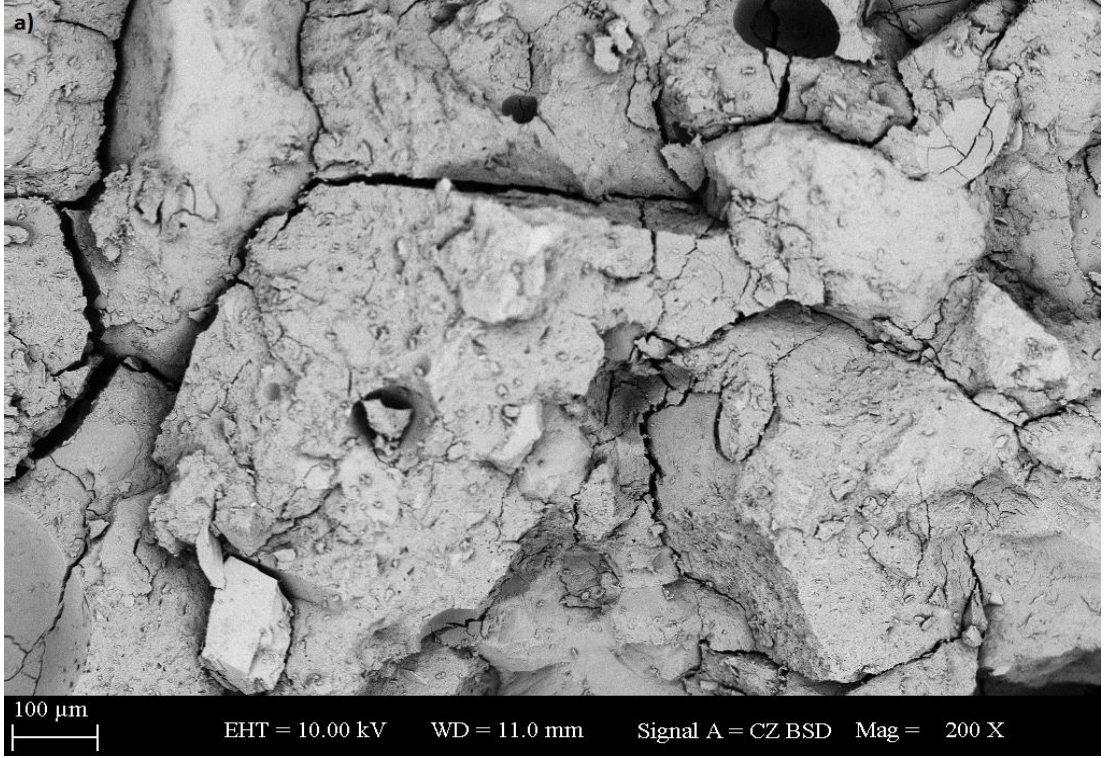
için  $977.54 \text{ cm}^{-1}$ 'de geniş bir omuz görülmektedir. Bu durum asimetrik germe titreşimlerine karşılık gelen Si–O–Al bağlarının varlığını gösterir.

Islanma-kuruma döngüsü uygulanan numunelerde sıcaklık etkisi sonrası bu durum kendini korurken, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelerde bir miktar azalma görülmüştür. Ayrıca ıslanma-kuruma döngüsü sayesinde eklenen suyun varlığı, bantların yoğunluğunu yaklaşık  $3400$  ve  $1650 \text{ cm}^{-1}$  artırır [63,64].

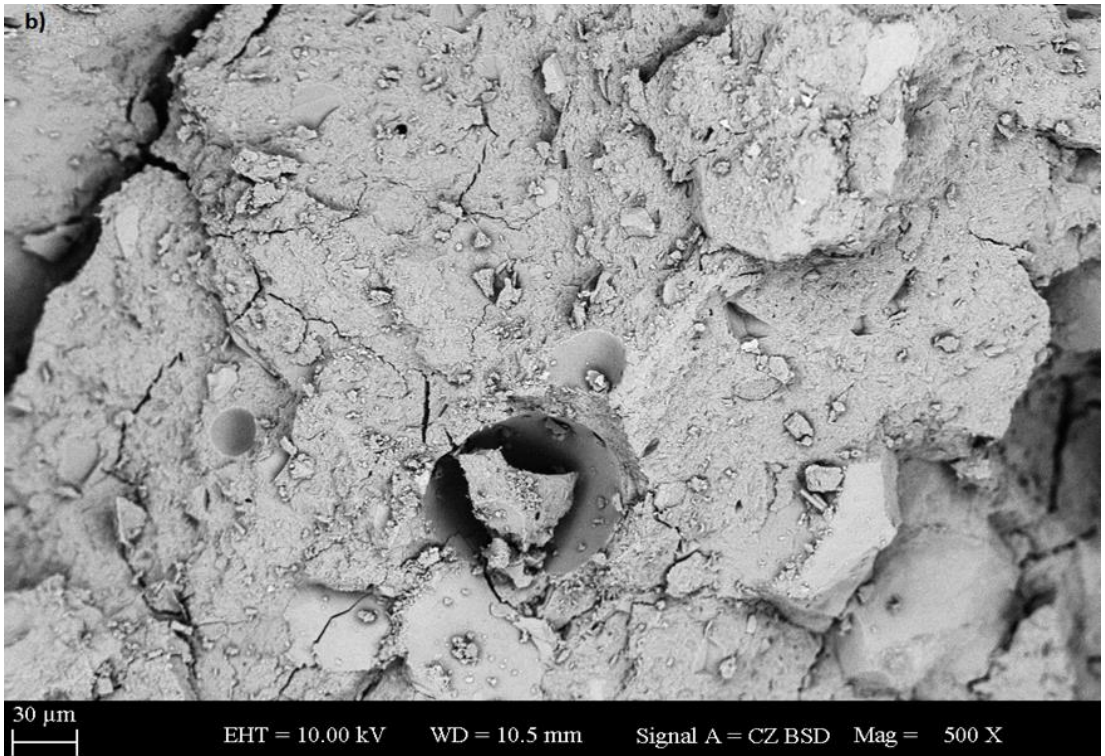
$200$  ve  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık etkisi sonrası SEM analizi görüntüleri Şekil 4.20-4.23'te gösterilmiştir.



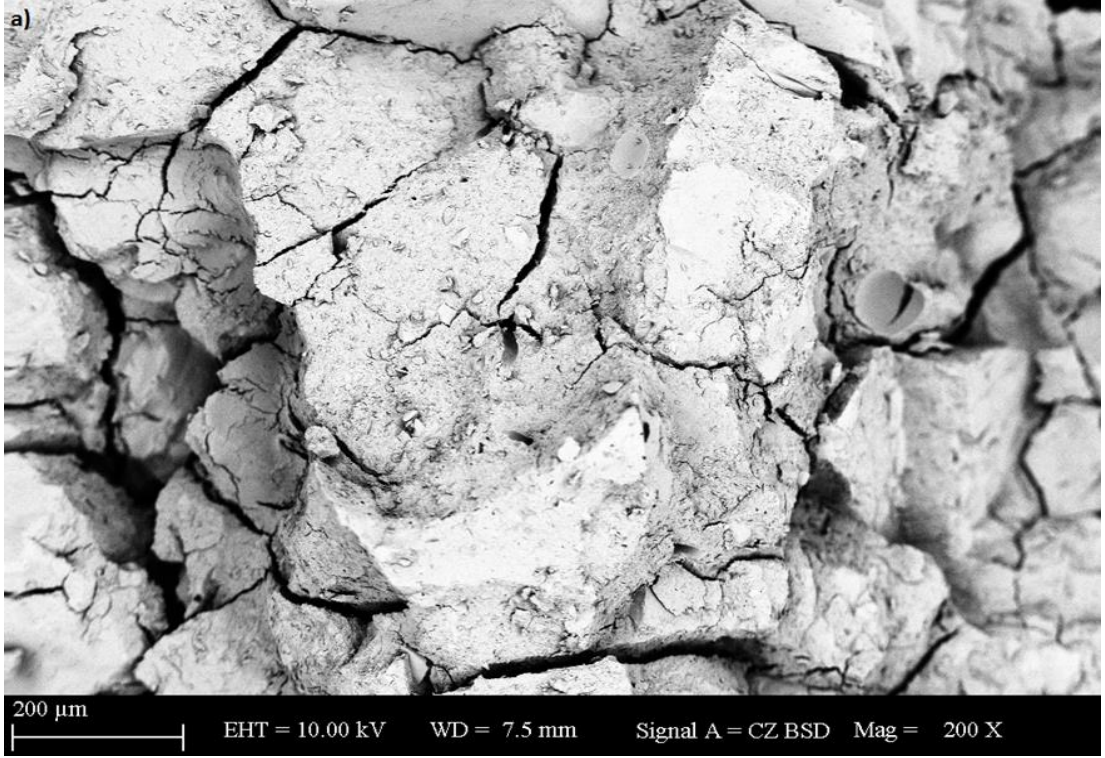
**Şekil 4.18:**  $600^\circ\text{C}$  öncesi ve sonrasında Kontrol-S ile WD örneklerinin FTIR sonuçları.



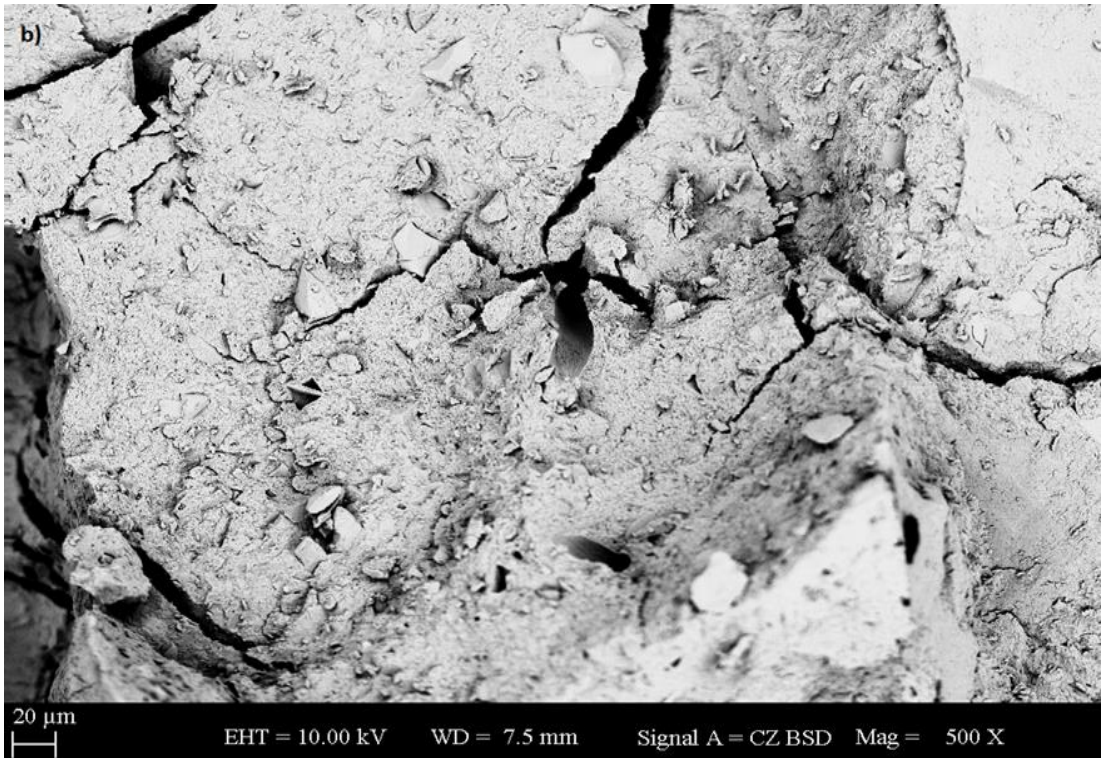
**Şekil 4.19:** 200°C sonrası kontrol numunelerinin 200X SAM görüntüleri.



**Şekil 4.20:** 200°C sonrası kontrol numunelerinin 500X SAM görüntüleri.

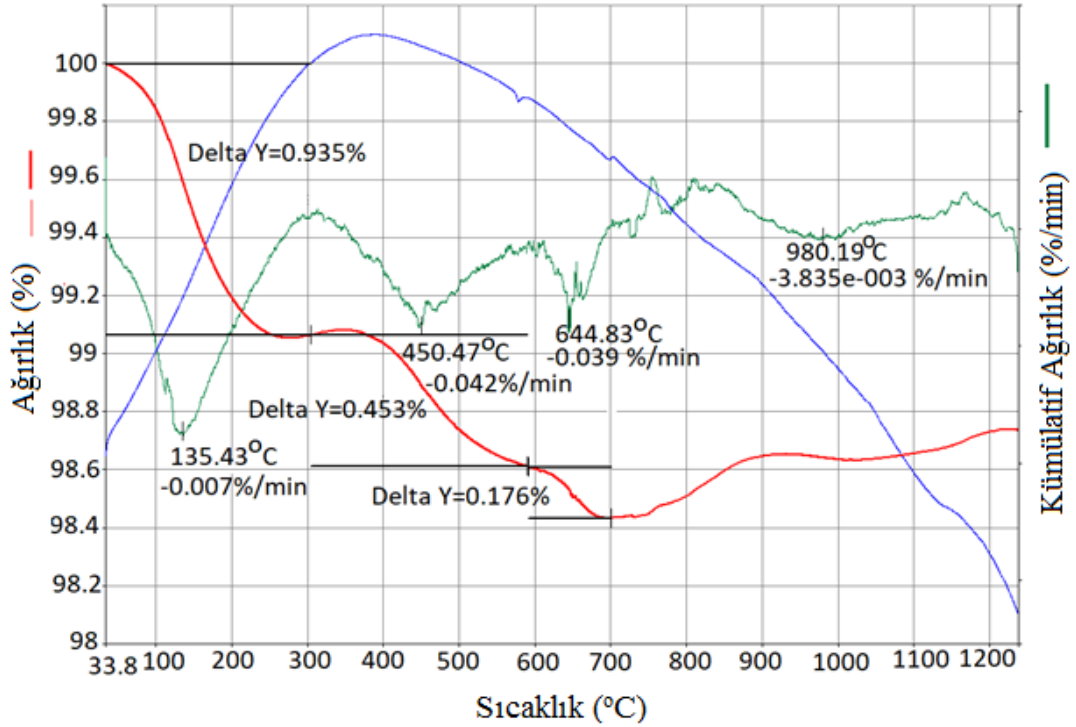


Şekil 4.21: 600°C sonrası kontrol numunelerinin 200X SAM görüntüleri.



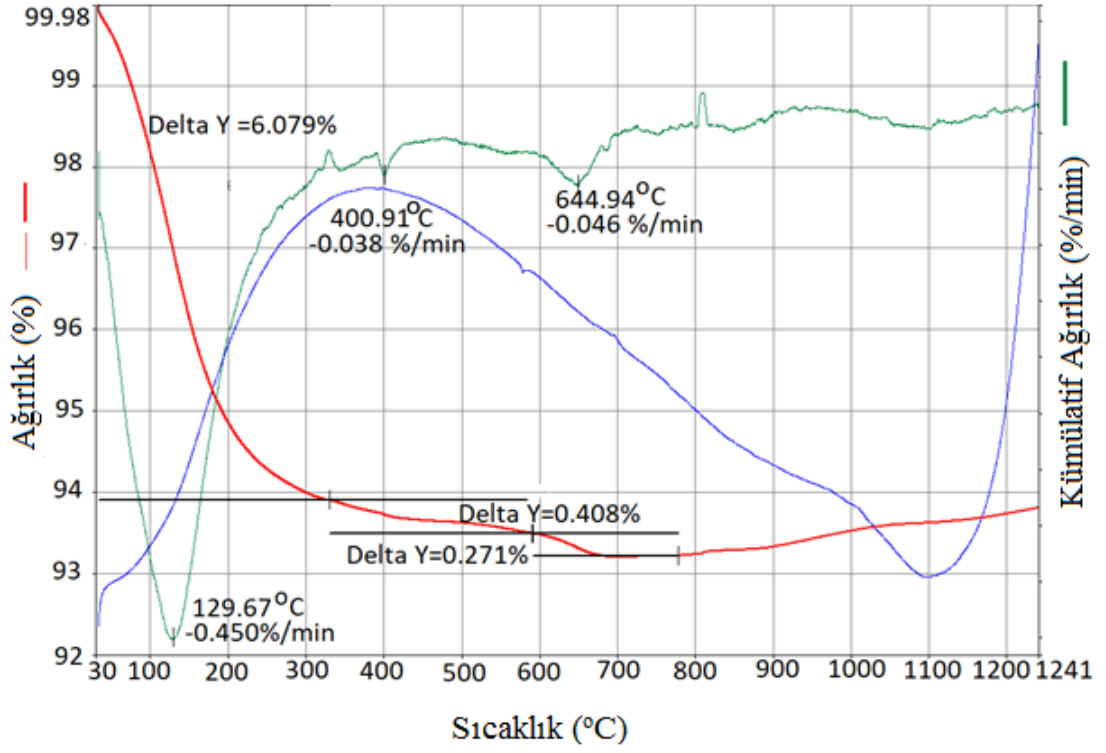
Şekil 4.22: 600°C sonrası kontrol numunelerinin 500X SAM görüntüleri.

Bu çalışmada üretilen kontrol numunelerinin Şekil 24-27’de TGA/DTA eğrileri gösterilmiştir. Kırmızı eğriler ağırlık kayıplarını göstermektedir. Kontrol-S numunesinde 600°C sıcaklık etkisi öncesi TGA analizinde %1.564 oranında azalma görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası bu oran artmış ve %6.758 olmuştur. Kontrol-IK numunesinde ise 600°C sıcaklık etkisi öncesi TGA analizinde %1.058 oranında azalma olmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası bu oran artmış ve %3.896 olmuştur. Görüldüğü üzere yüksek sıcaklık etkisi sonrası bu oranların artışı sınırlı kalmıştır. Bu durum geopolimer kompozitlerin stabilitesini koruduğunu göstermiştir. Islanma-kuruma döngüsü ile matriste su miktarı artışı ağırlık kaybını azaltmıştır. Ağırlık kaybı yüksek oranda 0-300 °C aralığında gözükürken, bu durum serbest suyun ve matriste bulunan bağlanmış suyun buharlaşması ile olmuştur. Bu aralıkta oluşan endotermik tepeler DTA eğrilerinde gözükmektedir. Ağırlık kaybı 700°C sıcaklıktan sonra stabil olmuştur. Bu, geopolimere ve hidroksil gruplarına (OH) kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşmasından kaynaklanmaktadır [65,66].

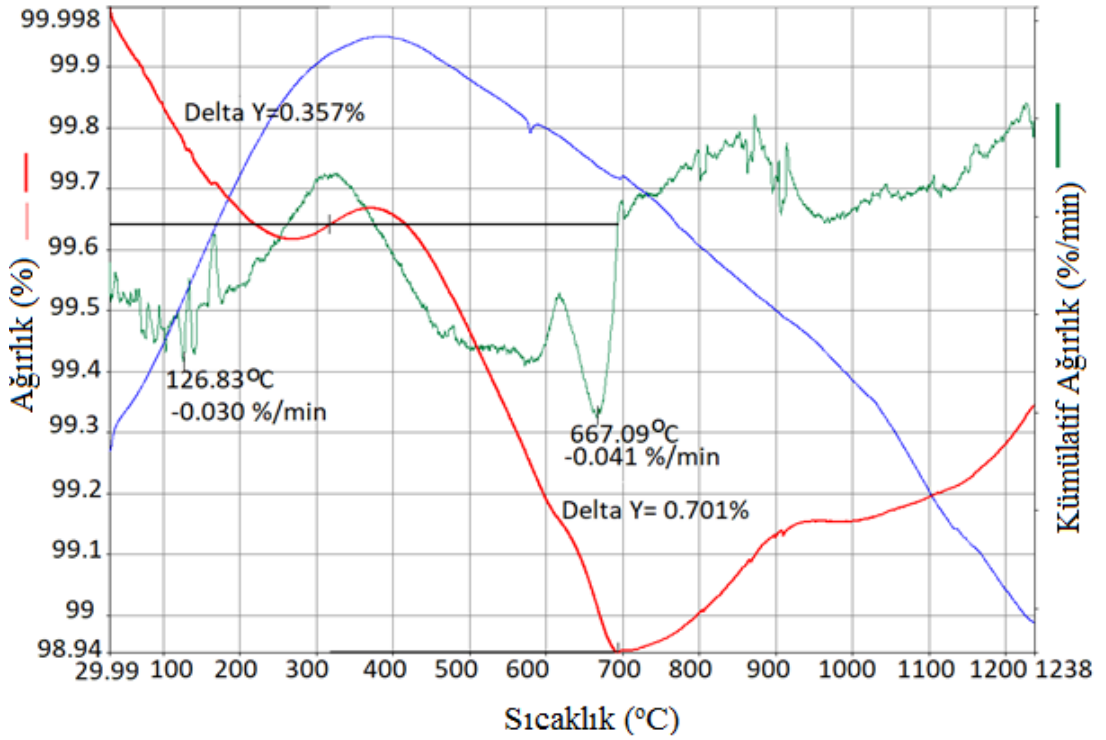


Şekil 4.23: 600°C öncesi Kontrol-S numunesinin TGA-DTA sonuçları.

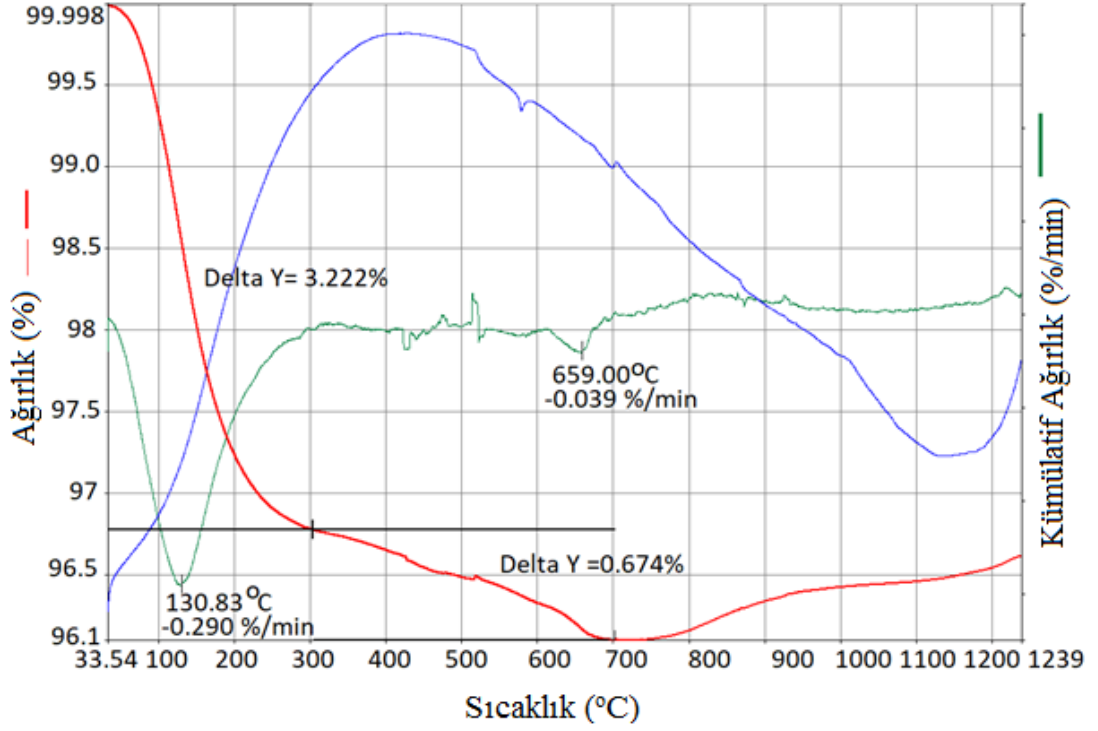




Şekil 4.24: 600°C sonrası Kontrol-S numunesinin TGA-DTA sonuçları.



Şekil 4.25: 600°C öncesi Kontrol-IK numunesinin TGA-DTA sonuçları.



Şekil 4.26: 600°C sonrası Kontrol-İK numunesinin TGA-DTA sonuçları.

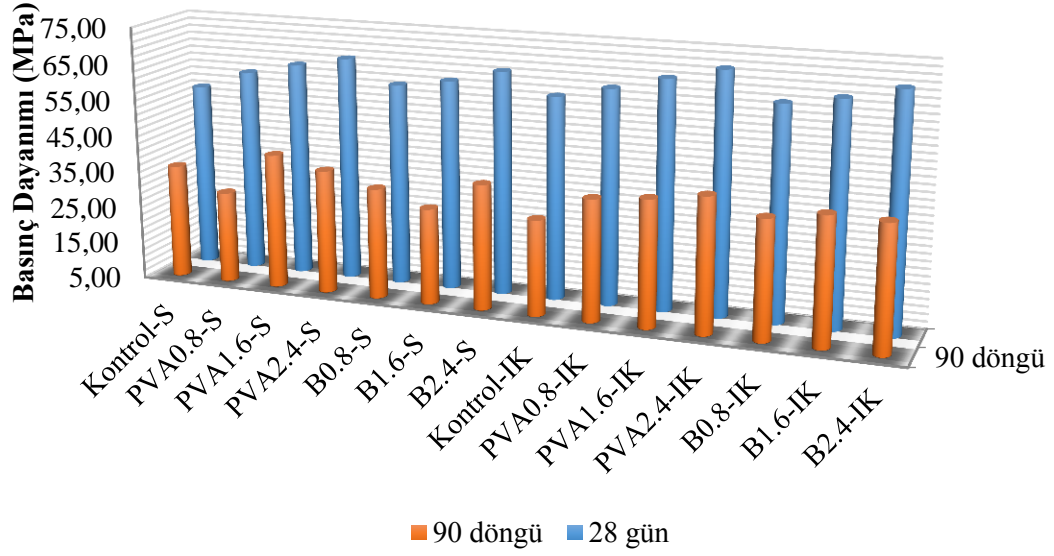
#### 4.2.2 Donma-Çözünme Deneyi Sonuçları

Üretilen geopolimer numuneler ıslanma-kuruma ve sıcaklık kürü uygulanarak 28 gün sonunda 90 döngüden oluşan donma-çözünme deneyine tabi tutulmuş ve numunelerin kalan eğilme ve basınç dayanım sonuçları, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kayıpları sonuçlarına bakılmıştır.

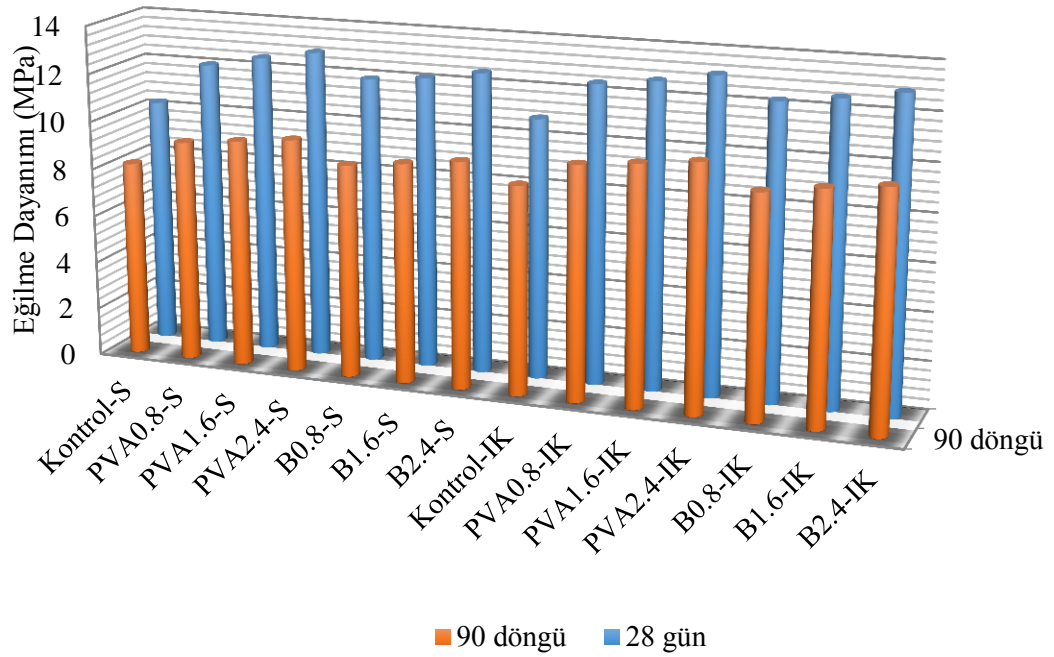
Geopolimerik matriste oluşan kompakt yapı beraberinde iyi bir adezyon derecesini getirir. Bu durum geopolimer numunelerin donma-çözölmeye karşı direnç göstermesini sağlar. Geopolimer numunelerde 90 döngüye rağmen kalan dayanım değerlerinde azalma sınırlı olmuştur. Lifli kompozitlerin davranışı test öncesi davranışa benzerdir. Ağırlık kaybı ise çok sınırlı olmuştur.

Deneyin yapıldığı nemli ortam ağırlık kaybını azaltmıştır. Bulunan sonuçlar, donma-çözölmeye deneyi yapılan önceki çalışmalarla uyumludur [67,68]. Donma-çözünme testi sonrası en yüksek kalan basınç dayanımı 51.56 MPa ile PVA2.4-İK numunesinde olurken en düşük kalan dayanım 41.01 MPa ile Kontrol-S numunesinde olmuştur. En yüksek kalan eğilme dayanımı 10.22 MPa ile PVA2.4-İK numunesinde olurken en düşük kalan eğilme dayanımı 8.16 MPa ile Kontrol-S

numunesinde olmuştur. Donma-çözünme etkisinde basınç ve eğilme dayanımı sonuçları Tablo 4.9'da, 28 günlük sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 4.28 ve 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.27: Donma-çözünme etkisinde kalan basınç dayanımı sonuçları.

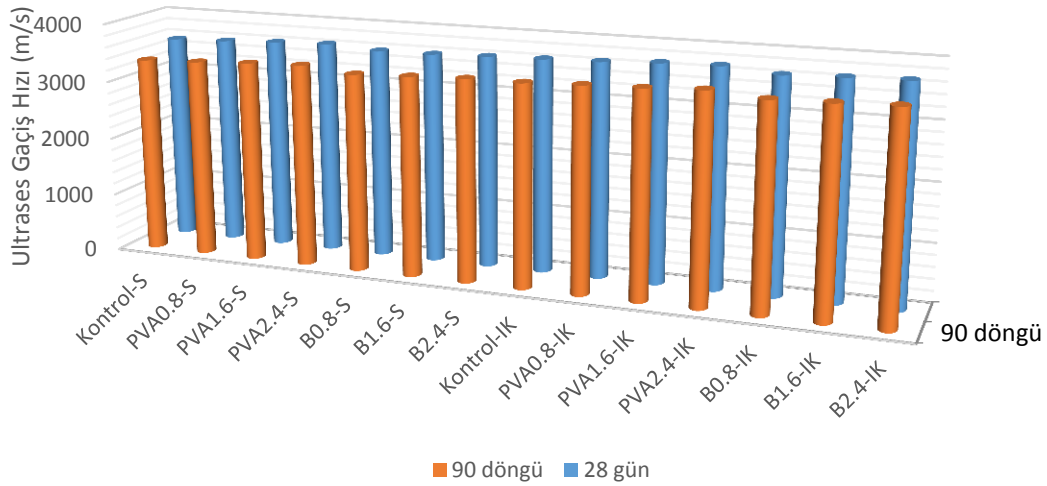


Şekil 4.28: Donma-çözünme etkisinde kalan basınç dayanımı sonuçları.

**Tablo 4.9:** Donma-çözünme etkisinde basınç ve eğilme dayanımı sonuçları.

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
Kontrol-S	36,09	8,16	Kontrol-IK	30,93	8,67
PVA0.8-S	29,85	9,25	PVA0.8-IK	37,94	9,71
PVA1.6-S	41,75	9,49	PVA1.6-IK	39,33	9,95
PVA2.4-S	38,66	9,74	PVA2.4-IK	41,56	10,22
B0.8-S	35,06	8,88	B0.8-IK	37,27	9,25
B1.6-S	31,01	9,15	B1.6-IK	39,61	9,59
B2.4-S	38,96	9,43	B2.4-IK	39,16	9,87

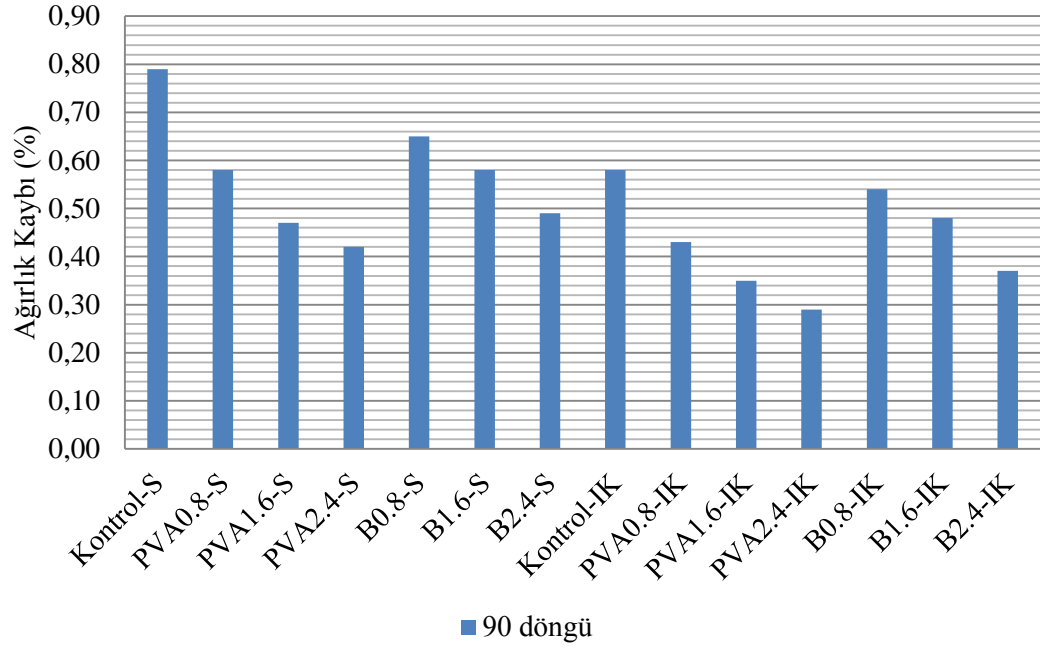
Donma-çözülme testi sonrası ölçülen en yüksek ultrases geçiş hızı 3353 m/s ile PVA2.4-IK numunesinde olurken en düşük kalan dayanım 3542 m/s ile Kontrol-S numunesinde olmuştur. Donma-çözünme etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları Şekil 4.30'da,



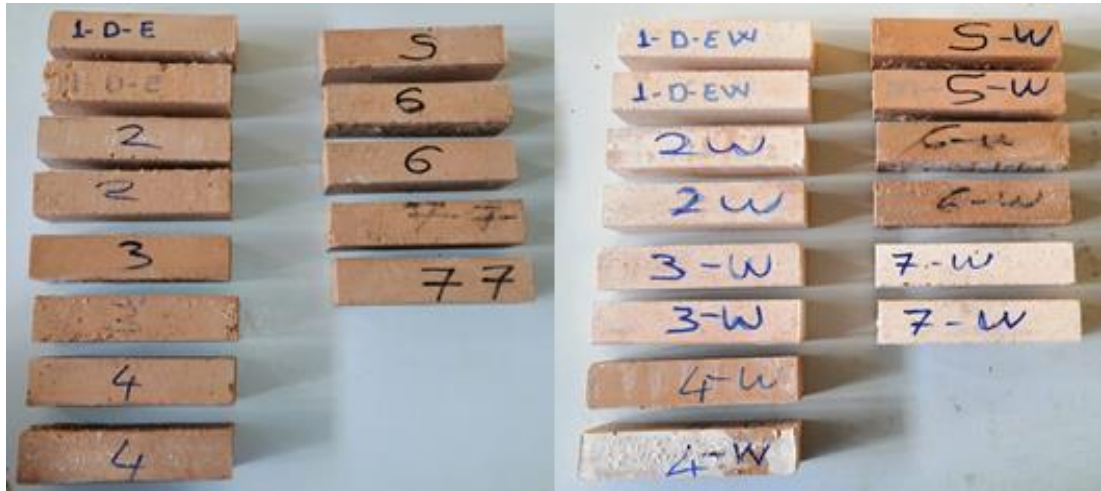
**Şekil 4.29:** Donma-çözünme etkisinde ultrases geçiş hızı sonuçları.

Ağırlık kaybı oranları en yüksek %0.79 ile Kontrol-S numunesinde olurken en düşük oran %0.29 oranıyla PVA2.4-IK numunesinde olmuştur. Islanma-kuruma kürü sayesinde ağırlık kaybı azalmıştır. 90 donma-çözülme döngüsü yapıldıktan sonra görsel incelemeler yapıldığında numunelerin dış yapısında önemli değişiklik

görülmemiştir. Donma-çözünme etkisinde ağırlık kaybı oranları Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Numunelerin test sonrası görsel incelemesi Şekil 4.31 ve 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.30: Donma-çözünme etkisinde ağırlık kaybı oranları.



Şekil 4.31: Donma-çözünme uygulanan geopolimer numuneler.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kütleme sistemlerinin etkisiyle, bazalt ve polivinil alkol lifleriyle metakaolin ve kolemanit bağlayıcı malzemeler kullanılarak hazırlanan geopolimer kompozitlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Kür sıcaklığının metakaolin tabanlı geopolimerler üzerindeki etkisi bilinmekle birlikte, bu çalışmayla beraber ıslatma-kurutma kürünün etkisi de ortaya konulmuştur. Alınan sonuçlar ıslatma-kurutma kürünün, metakaolin tabanlı geopolimerlerin mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sonuçları, bütün karışımlarda 7 güne göre artış göstermiştir. Ayrıca, lif oranındaki artışın dayanım sonuçları üzerinde olumlu bir etkisi olmuştur. Islatma-kurutma kürü sayesinde, geopolimerizasyonun devamı ve yeni kristalli geopolimerizasyon ürünlerinin oluşumu sağlanmıştır. Bu sayede ıslatma-kurutma kürü dayanım sonuçlarına pozitif etki etmiştir.
- Çekme dayanımı üzerindeki etkin faktörler, elyafların varlığı ve ıslatma-kurutma kür yöntemi olmuştur. Geopolimerizasyon sağlanmış ve ıslatma-kurutma kürü etkisiyle çekme dayanımı artmıştır. Ayrıca liflerin varlığı da çekme dayanımı sonuçlarını pozitif etkilemiştir.
- Numunelerin basınç dayanımları kür şartlarına göre incelendiğinde, 7 günlük basınç dayanımlarında ıslanma-kuruma kürü uygulanan numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre %2.45 ile %6,44 arasında daha yüksek gelirken, 28 günlük basınç dayanımlarında ise bu oran %4,51 ile %8.87 arasında olmuştur. Eğilme dayanımlarında ise ıslanma-kuruma kürü uygulanan numunelerin sonuçları, sadece sıcaklık kürü uygulanan numunelere göre ortalama %3-4 kadar daha yüksek sonuç vermiştir. Islatma kurutma kürü basınç dayanımlarında daha yüksek sonuç vermiştir.
- Islatma-kurutma ile kütleme yönteminin uygulanması sayesinde, suyla birlikte reaksiyon devam eder ve daha fazla alüminosilikat jeli oluşur, böylece boşluk oranı ve su emilimi azalır. Birim ağırlık değerleri, su emilimi ve boşluk oranındaki

azalma ile yükselmiştir. Liflerin etkisiyle boşluk oranı ve su emiliminde hafif bir azalma olmuştur.

- Ultrases geçiş hızına etki eden en önemli faktör boşluk oranıdır. Lifli numunelerde boşluk oranında düşüş görülmüştür. Aynı şekilde, ıslatma-kurutma kürünün etkisiyle de boşluk oranı azalmıştır. Boşluk oranının azalmasıyla, ultrases dalgalarının geçiş süresi kılalacak ve hızı artacaktır. Sıkıştırma kuvveti ile UGH arasındaki korelasyon faktörü 0,83 ve eğilme dayanımı ile ağırlık kaybı arasındaki korelasyon 0,82 olarak hesaplanmıştır. Değerlerin 0,80'den büyük olması tatmin edicidir.

- Aşınma sonuçları incelendiğinde, ağırlık kaybı ve boy değişimi sırasıyla 16 g ve 2 mm'den az olduğu görülür. Lif içeriği arttıkça, boy değişimi ve ağırlık kaybında bir iyileşme olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeninin, lifin dirençli bir tabaka oluşturduğu düşünülmektedir.

- Geopolimer numuneleri, 400<sup>0</sup>'den sonra, oluşan termal reaksiyonlardan kaynaklanan matristeki dehidrasyon ve suyun buharlaşmasından dolayı daha fazla dayanım kaybına uğramıştır. Islatma-kurutma kürü, yeni kristal geopolimerizasyon ürünlerinin oluşumunu ve geopolimerizasyonun sürekliliğini sağlamış ve yüksek sıcaklık sonuçlarını iyileştirmiştir.

- Yüksek sıcaklık etkisinden önce alümino-silikat jelinden oluşan homojen ve yoğun matrisin genel mikro yapısı testten sonra korunmuştur. 200<sup>0</sup>C sıcaklık etkisinden sonra numunenin mikro yapısında önemli derecede çatlak olmadığı görülmüştür. 600<sup>0</sup>C'lik sıcaklıktan sonra çatlak oluşumunda artış gözlenmiştir. Geopolimerik matrisin kompakt yapısı iyi bir adezyon derecesi sağlayarak geopolimer numunelerinin donma-çözünmeye karşı direnç göstermesini sağlamıştır. 90 çevrime rağmen, kalan dayanım yüksek olmuş ve ultrases geçiş hızı sonuçlarındaki düşüş sınırlı kalmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Meyer C., “The greening of the concrete industry”, *Cement and Concrete Composites*, 31 (8), 601-605, (2009).
- [2] Provis, J. L. and Van Deventer, J. S. J. “Alkali activated materials”, *Rilem Tc* 224, (2014).
- [3] Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S. and Rahim, N. A. "A critical review on energy use and savings in the cement industries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (4), 2042–2060, (2011).
- [4] Luga, E., "Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri", Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (2015).
- [5] Boyacı, Ö., "Farklı Kaolenlerin Metakaolen ve Spinel Yapılarda Geopolimer Davranışı", Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, (2018).
- [6] 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*, İstanbul, (2018).
- [7] Bingöl, Ş., “Alkali İle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (2018).
- [8] Yonar, Y., "Geopolimer Çimentolu ve Polivinil Alkol Fiberli Betonların Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı", Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2014).



- [9] Al-mashhadani, M. M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Uysal, M. and Erdem, S. "Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites", *Construction and Building Materials*, 167, 505–513, (2018).
- [10] Kumar, A., and Kumar, S. "Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization", *Construction and Building Materials*, 38, 865–871, (2013).
- [11] Diaz, E. I., Allouche, E. N., and Eklund, S. "Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers", *Fuel*, 89 (5), 992–996, (2010).
- [12] Zhang, M., El-Korchi, T., Zhang, G., Liang, J., and Tao, M. "Synthesis factors affecting mechanical properties, microstructure, and chemical composition of red mud-fly ash based geopolymers", *Fuel*, 134, 315–325, (2014).
- [13] Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Mohd Tahir, M., and Aziah, N. "Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete", *Construction and Building Materials*, 43, 80–86, (2013).
- [14] Helmy, A. I. I. "Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar", *Construction and Building Materials*, 110, 54–64, (2016).
- [15] Gümüş, A., "Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2016).
- [16] Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications*, 3rd edition, St. Quinten, Institut Geopolymere, (2008).
- [17] Zeybek, O., "Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2009).

- [18] Erdoğan, S.T., "Jeopolimerler Çevre Dostumudur?", *Çimento ve Beton Dünyası*, 107, 50-55, (2014).
- [19] Girgin, S., "Naoh İle Aktifleştirilmiş Metakaolin Katkılı Geopolimer Malzeme Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2016).
- [20] 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).
- [21] Rovnanik, P. "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer", *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183, (2010).
- [22] Burciaga-Díaz, O., Gómez-Zamorano, L. Y. and Escalante-García, J. I. "Influence of the long term curing temperature on the hydration of alkaline binders of blast furnace slag-metakaolin", *Construction and Building Materials*, 113, 917–926, (2016).
- [23] Mangat, P. S. and Ojedokun, O. O. "Influence of curing on pore properties and strength of alkali activated mortars", *Construction and Building Materials*, 188, 337–348, (2018).
- [24] Zhang, H. Y., Kodur, V., Qi, S. L., Cao, L. and Wu, B. "Development of metakaolin-fly ash based geopolymers for fire resistance applications", *Construction and Building Materials*, 55, 38–45, (2014).
- [25] Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin, L., Xiangming, Z., Eddie, and Chungkong, C. "Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber", *Construction and Building Materials*, 22(3), 370–383, (2008).

- [26] Assaedi, H., Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., and Low, I. M. "Characterisation of mechanical and thermal properties in flax fabric reinforced geopolymer composites", *Journal of Advanced Ceramics*, 4(4), 272–281, (2015).
- [27] Amuthakkannan, P., Manikandan, V., Jappes, J. T. W., and Uthayakumar, M. "Effect of Fibre Length and Fibre Content on Mechanical Properties of Short Basalt Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites", *Materials Physics and Mechanics*, 16, 107-117, (2013).
- [28] Menna, C., Asprone, D., Ferone, C., Colangelo, F., Balsamo, A., Prota, A., Manfredi, G. "Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members", *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1667–1676, (2013).
- [29] Ricciotti, L., Roviello, G., Tarallo, O., Borbone, F., Ferone, C., Colangelo, F. and Cioffi, R. "Synthesis and characterizations of melamine-based epoxy resins", *International Journal of Molecular Sciences*, 14(9), 18200–18214, (2013).
- [30] Sun, P. and Wu, H. C. "Transition from brittle to ductile behavior of fly ash using PVA fibers", *Cement and Concrete Composites*, 30(1), 29–36, (2008).
- [31] Dias, D. P. and Thaumaturgo, C. "Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers", *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 49–54, (2005).
- [32] Li, Z., Zhang, Y. and Zhou, X. "Short Fiber Reinforced Geopolymer Composites Manufactured by Extrusion", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(6), 624–631, (2005).
- [33] Duxson, P., Lukey, G. C. and Van Deventer, J. S. J. "Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000°C", *Journal of Materials Science*, 42(9), 3044–3054, (2007).

- [34] Thavorniti, P., Chindaprasirt, P., Balyore, P., Tippayasam, C., Chaysuwan, D., Leonelli, C. and Kamseu, E. "Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer", *Construction and Building Materials*, 104, 293–297, (2015).
- [35] Yang, T., Zhu, H. and Zhang, Z. "Influence of fly ash on the pore structure and shrinkage characteristics of metakaolin-based geopolymer pastes and mortars", *Construction and Building Materials*, 153, 284–293, (2017).
- [36] Belmokhtar, N., Ammari, M., Brigui, J. and Ben allal, L. "Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from Metakaolin and an industrial sludge", *Construction and Building Materials*, 146, 621–629, (2017).
- [37] Roviello, G., Menna, C., Tarallo, O., Ricciotti, L., Ferone, C., Colangelo, F. and Cioffi, R. "Preparation, structure and properties of hybrid materials based on geopolymers and polysiloxanes", *Materials and Design*, 87, 82–94, (2015).
- [38] Zhou, W., Yan, C., Duan, P., Liu, Y., Zhang, Z., Qiu, X. and Li, D. "A comparative study of high- and low-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature", *Materials and Design*, 95, 63–74, (2016).
- [39] Rieger, D., Kovářík, T., Říha, J., Medlín, R., Novotný, P., Bělský, P. and Holba, P. "Effect of thermal treatment on reactivity and mechanical properties of alkali activated shale-slag binder", *Construction and Building Materials*, 83, 26–33, (2015).
- [40] Sevim, U. K. "Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength", *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44 (1), 187–193, (2011).
- [41] Helvacı, C., "Türkiye Borat Yatakları", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5 (1), (2003).

- [42] Gencil, O., Brostow, W., Ozel, C. and Filiz, M. "An investigation on the concrete properties containing colemanite", *International Journal of Physical Sciences*, 5 (3), 216–225, (2010).
- [43] Kula, İ., Olgun, A. ve Erdoğan, Y. "Effects of Colemanite Waste, Coal Bottom Ash and Fly Ash on the Properties of Cement and Concrete", *Proceedings of the 1st International Boron Symposium*, 31, 202–206, (2002).
- [44] Özdemir, M. ve Öztürk, N. U. "Utilization of clay wastes containing boron as cement additives", *Cement and Concrete Research*, 33 (10), 1659–1661, (2003).
- [45] "kolemanit [online]", (15 Nisan 2019), <http://www.etimaden.gov.tr/kolemanit>
- [46] Bilim, C. ve Atış, C.D., "Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri", *Politeknik Dergisi*, 14 (2), (2011).
- [47] "sodyum silikat [online]", (05 Nisan 2019), <https://www.sodyum.gen.tr/sodyum-silikat.html>
- [48] Araz, N.G., Aksoy, A., İskender, E. ve Sayın, A., "Beton Üretiminde Bazalt Fiber Kullanımının Değerlendirilmesi", *9. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu*, (2018).
- [49] Lahoti, M., Narang, P., Tan, K. H. and Yang, E. H. "Mix design factors and strength prediction of metakaolin-based geopolymer", *Ceramics International*, 43(14), 11433–11441 (2017).
- [50] Görhan, G., Aslaner, R. and Şinik, O. "The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash-based geopolymer paste", *Composites Part B: Engineering*, 97, 329–335, (2016).

- [51] Kaya, K. and Soyer-Uzun, S. "Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud-metakaolin based geopolymer systems", *Ceramics International*, 42 (6), 7406–7413, (2016).
- [52] Rivera, O. G., Long, W. R., Weiss, C. A., Moser, R. D., Williams, B. A., Torres-Cancel, K. and Allison, P. G. "Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders", *Cement and Concrete Research*, 90, 43–51, (2016).
- [53] 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).
- [54] Celik, A., Yilmaz, 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).
- [55] ASTM C109. "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) 1", *Annual Book of ASTM Standards*, i(C), 1–9, (2010).
- [56] ASTM C348. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, 04.02, 98(Reapproved), 98–100, (2019).
- [57] ASTM C1583. "Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)", *Annual Book of ASTM Standards*, i(C), 1–4, (2013).

- [58] ASTM C779. "Independent Testing Confirms Duro-Nox Abrasion Resistance Independent Testing Confirms Duro-Nox Abrasion Resistance", *Annual Book of ASTM Standards*, i(C), 1–7, (2012).
- [59] Zhang H. Y., Kodur V., P.E., ASCE., F.; Wu., B., Cao L. and Liang Sh. Qi, "Comparative Thermal and Mechanical Performance of Geopolymers derived from Metakaolin and Fly Ash", *J. Mater. Civ. Eng.*, 28 (2), (2016).
- [60] Topçu, I. B. and Karakurt, C. "Properties of reinforced concrete steel rebars exposed to high temperatures", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2008 (814137), (2008).
- [61] Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G. and Sagoe-Crentsil, K. "Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures", *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1583–1589, (2007).
- [62] Behera, P., Baheti, V., Militky, J. and Louda, P. "Elevated temperature properties of basalt microfibril filled geopolymer composites", *Construction and Building Materials*, 163, 850–860, (2018).
- [63] Burciaga-Diaz O., Escalante-Garcia, J.I., and Magallanes-Rivera R.X., "Compressive strength and microstructural evolution of metakaolin geopolymers exposed to high temperature", *ALCONPAT Journal*, 5(1), 52-66, (2015).
- [64] Sarkar, M., Dana, K. and Das, S. "Microstructural and phase evolution in metakaolin geopolymers with different activators and added aluminosilicate fillers", *Journal of Molecular Structure*, 1098, 110–118, (2015).
- [65] Louati, S., Fakhfakh, Z., Douiri, H., Arous, M. and Baklouti, S. "Enhanced dielectric performance of metakaolin–H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> geopolymers", *Materials Letters*, 164 (November 2017), 299–302, (2015).

- [66] Guerra, R. R. de S., Rocha, T. da S., Dias, D. P., Marques, L. R. da C. de O. and França, F. C. C. "Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na + and K +)", *Construction and Building Materials*, 178, 453–461, (2018).
- [67] Degirmenci, F. N. "Freeze-Thaw and Fire Resistance of Geopolymer Mortar Based On Natural and Waste Pozzolans", *Ceramics-Silikáty*, 62(1), 41–49, (2018).
- [68] Slavik, R., Bednarik, V., Vondruska, M. and Nemeč, A. "Preparation of geopolymer from fluidized bed combustion bottom ash", *Journal of Materials Processing Technology*, 200, 265–270, (2008).
- [69] Pilehvar, S., Szczotok, A. M., Rodríguez, J. F., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R. and Kjøniksen, A. L. "Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials", *Construction and Building Materials*, 200, 94–103, (2019).