

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



FARKLI LİF VE MİNERAL KATKI İÇEREN GEOPOLİMER
KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

BAYRAM SEÇKİN ERGÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

BALIKESİR, HAZİRAN - 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Farklı Lif ve Mineral Katkı İçeren Geopolimer Kompozitlerin Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi**” başlıklı tezde;

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

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

Bayram Seçkin ERGÜN

ÖZET

FARKLI LİF VE MİNERAL KATKI İÇEREN GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAYRAM SEÇKİN ERGÜN

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ARIN YILMAZ)

(EŞ DANIŞMAN: PROF. DR. MÜCTEBA UYSAL)

BALIKESİR, HAZİRAN 2023

Günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan malzeme betondur. Bileşimindeki malzeme temininin kolaylıkla sağlanabilmesi, maliyetinin düşük olması ve farklı bir seçeneğinin bulunmaması gibi sebeplerden ötürü tercih edilen beton, belirtilen olumlu özelliklerinin yanı sıra bazı olumsuz özelliklerinin varlığı kullanılabilirlik açısından tartışma konusudur. Doğaya salınan toplam karbondioksit emisyonunun yaklaşık %7'si çimento üretimi aşamalarında meydana geldiği bilinmektedir. Bunun yanında endüstri alanındaki faaliyetlerde kullanılan enerjinin yaklaşık %15'i çimento üretimi esnasında harcanılmaktadır. Çimento üretimi kaynaklı çevresel ve ekonomik sorunlar, gelecekte yaşanması muhtemel olan büyük sorunların önüne geçmek adına alternatif bir bağlayıcı bulunmasını kaçınılmaz bir hale getirmiştir. Bu noktada, geopolimer, Portland çimentosuna alternatif olabilecek iyi bir yapı malzemesi olarak ön plana çıkmaya başlamıştır. Geopolimerik kimyasal reaksiyonlarda karbondioksit açığa çıkmaz ve Portland çimentosuna göre üretimde gerekli enerji bakımından daha tasarruflu ve çevre dostu oldukları bilinmektedir. Geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak %40 metakaolin + %20 mineral katkı (uçucu kül, yüksek fırın cürufu) ile belli oranda kırmızı çamur kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak 12M sodyum hidroksit ile sodyum silikat solüsyonu kullanılmıştır. Sodyum hidroksit/Sodyum silikat oranı ağırlıkça 1:2 olarak belirlenmiştir. Agregat olarak eşit oranlarda geri dönüşüm agregası ve mermer tozu kullanılmıştır. Liflerin harçlara etkisini incelemek adına çeşitli lif ve lif oranları kullanılarak mekanik ve durabilite deneyleri yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Geopolimer, mineral katkılar, polipropilen lif, poliamid lif, çelik lif.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF GEOPOLYMER COMPOSITES WHICH INCLUDE DIFFERENT FIBER AND MINERAL ADDITIVES

MSC THESIS

BAYRAM SEÇKİN ERGÜN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: DOÇ. DR. ARIN YILMAZ)

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

BALIKESİR, JUNE - 2023

In today's times, concrete is the most used material in the construction industry. Concrete is widely used because of readily availability of its components, being economical and not having many alternatives, has become debatable with its positive features as well as some negative features. It is known that approximately 7% of the total carbon dioxide emission in the world is caused by cement production. In addition, 12-15% of the energy consumed in the industrial field during cement production. Economic and environmental problems arising from cement production necessitate the production of a binder that can be an alternative to Portland cement in order to prevent major problems that may occur in the future. At this point, geopolymer has come forward as a good building material that can be an alternative to Portland cement. Carbon dioxide is not released in geopolymeric chemical reactions and it is known that they are more efficient and environmentally friendly in terms of energy required in production compared to Portland cement. In the production of geopolymer, 40% metakaolin + 20% mineral additive (fly ash, blast furnace slag) and a certain amount of red mud were used as binding material. 12M sodium hydroxide and sodium silicate solution were used as alkali activator. Sodium hydroxide/Sodium silicate ratio was determined as 1:2. Recycled aggregate and marble powder was used in equal proportions as aggregate. In order to examine the effect of fibers on mortars, mechanical and durability tests were carried out using various fiber and fiber ratios.

KEYWORDS: Geopolymer, mineral additives, polypropylene fiber, polyamide fiber, steel fiber.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLO LİSTESİ.....	vii
SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Geopolimer	3
2.2 Geopolimerizasyon	4
2.3 Geopolimer Tarihi	6
2.4 Geopolimer Bileşenleri	7
2.4.1 Metakaolin	7
2.4.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu	8
2.4.3 Uçucu Kül	10
2.4.4 Kırmızı Çamur	11
2.4.5 Mermer Tozu	12
2.4.6 Alkali Aktivatörler	13
2.4.6.1 Sodyum Hidroksit	14
2.4.6.2 Sodyum Silikat	15
2.5 Geopolimer Özelliklerini Etkileyen Unsurlar	15
2.5.1 SiO ₂ / Na ₂ O Oranı	15
2.5.2 Su İçeriği	16
2.5.3 Kür Süresi ve Sıcaklık	17
2.5.4 Alkali Aktivatör Oranları	18
2.6 Geopolimerin Genel Özellikleri	19
2.6.1 İşlenebilirlik	19
2.6.2 Basınç Dayanımı	20
2.6.3 Eğilme Dayanımı	23
2.6.4 Donma Çözülme Etkisi	25
2.6.5 Sülfat Etkisi	27
2.6.6 Yüksek Sıcaklık Etkisi	29
3. MALZEMELER VE DENEY YÖNTEMLERİ.....	31
3.1 Malzemeler	31
3.1.1 Metakaolin	31
3.1.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu	32
3.1.3 Uçucu Kül	32
3.1.4 Kırmızı Çamur	33
3.1.5 Mermer Tozu	34
3.1.6 Alkali Aktivatörler	35
3.1.7 Kullanılan Lifler	35
3.2 Deneysel Çalışmalar	36

3.2.1 Basınç Dayanımı	36
3.2.2 Eğilme Dayanımı	37
3.2.3 Yarmada Çekme Dayanımı	37
3.2.4 Boşluk Oranı, Su Emme ve Birim Hacim Ağırlık Deneyleri	38
3.2.5 Böhme Aşınma Dayanımı	39
3.2.6 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	40
3.2.7 Yüksek Sıcaklık Etkisi	40
3.2.8 Donma Çözülme Etkisi	41
3.2.9 Sülfat Etkisi	42
3.2.10 SEM ve EDS Analizleri	43
3.2.11 XRD Analizi	43
3.3 Geopolimer Harçların Üretimi	43
3.3.1 Üretim Aşamaları	44
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ.....	46
4.1 Boşluk Oranı, Su Emme ve Birim Hacim Ağırlık Değerleri	46
4.2 Basınç Dayanımları	47
4.3 Eğilme Dayanımları	49
4.3.1 Eğilme Dayanımı-Deplasman İlişkisi	51
4.4 Yarmada Çekme Dayanımları	54
4.5 Ultrases Geçiş Hızı	55
4.6 Aşınma Dayanımı	57
4.7 XRD Analizleri	58
4.8 SEM Analizleri	60
4.9 Yüksek Sıcaklık Deneyleri	67
4.9.1 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımı Gelişimi	67
4.9.2 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Ultrases Geçiş Hızları	71
4.9.3 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Ağırlık Değişimleri	72
4.10 Donma Çözülme Deneyi	73
4.10.1 Donma Çözülme Etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımı Gelişimi	73
4.10.2 Donma Çözülme Etkisinde Ultrases Geçiş Hızları	76
4.10.3 Donma Çözülme Etkisinde Ağırlık Değişimleri ve Analizleri	78
4.11 Sülfat Etkisi Deneyleri	81
4.11.1 Sülfat Etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımları	81
4.11.2 Sülfat Etkisinde Ultrases Geçiş Hızları	86
4.11.3 Sülfat Etkisinde Ağırlık Kaybı ve Analizleri	87
5. SONUÇ VE ÖNERİ.....	92
5.1 Sonuç	92
5.2 Öneri	94
6. KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ.....	103

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Malzeme içeriğine göre geopolimerlerin gruplandırılması [10].....	3
Şekil 2.2: Geopolimerizasyon süreci [15].....	5
Şekil 2.3: Geopolimer oluşumunun denklemleri [15].....	6
Şekil 2.4: ABD’de Cürufun kullanım alanları [24].....	9
Şekil 2.5: Farklı SiO ₂ /Na ₂ O oranına sahip numunelerin basınç dayanımları [44].....	16
Şekil 2.6: Kurlama süresinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi [52].....	18
Şekil 2.7: Geopolimer betonun basınç dayanımının kür sıcaklığı ile değişimi [62].....	21
Şekil 2.8: Geopolimer betonun basınç dayanımının sıcaklık kür süresi ile değişimi [62]..	22
Şekil 2.9: Çeşitli NaOH molaritesi ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları [62]...	22
Şekil 2.10: Geopolimer betonun basınç mukavemetinin sodyum silikat/sodyum hidroksit oranıyla değişimi [62].....	23
Şekil 2.11: Uçucu kül esaslı geopolimer beton (şekilde GPC) ve geleneksel Portland çimentolu beton (şekilde OPC) yük-deplasman eğrisi altındaki davranış farkları [63].....	23
Şekil 2.12: Farklı kurlama süreleri ve sıcaklıklarında kürlenmiş geopolimerlerin eğilme dayanımları [66].....	24
Şekil 2.13: Geopolimerlerin farklı kür sıcaklıklarında eğilme dayanımı gelişimi [66]	25
Şekil 3.1: Metakaolin	32
Şekil 3.2: Kırmızı çamur	34
Şekil 3.3: Mermer tozu.....	34
Şekil 3.4: Basınç dayanımı uygulaması	36
Şekil 3.5: Eğilme dayanımı deneyi	37
Şekil 3.6: Yarmada Çekme Deneyi	38
Şekil 3.7: Böhme aşınma deneyi	39
Şekil 3.8: Ultrases geçiş hızı testinde kullanılan cihaz	40
Şekil 3.9: Kül fırınına yerleştirilen numuneler	41
Şekil 3.10: Donma-çözülme deneyi	42
Şekil 3.11: Sülfat etkisindeki numuneler	42
Şekil 3.12: Üretilen tüm geopolimer harçları	45
Şekil 4.1: Basınç dayanımı sonuçları	49
Şekil 4.2: Yük-deplasman kontrolü	49
Şekil 4.3: Eğilme Dayanımı Sonuçları	51
Şekil 4.4: Eğilme dayanımı-deplasman grafikleri.....	53
Şekil 4.5: Yarmada çekme dayanımı sonuçları	55
Şekil 4.6: Ultrases geçiş hızları sonuçları	56
Şekil 4.7: Serilerinin aşındırma sonrası ağırlık kayıpları	57
Şekil 4.8: Serilerinin aşınma nedeniyle ortalama boy kayıpları	58
Şekil 4.9: %1,00 çelik lif içerikli numunenin XRD grafiği	59
Şekil 4.10: %0,25 poliamid lif içerikli numunenin XRD grafiği	59
Şekil 4.11: %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin XRD grafiği	60
Şekil 4.12: %1,00 çelik lif içerikli numunenin a) 1000X b)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri.....	61
Şekil 4.13: %0,25 poliamid lif içerikli numunenin c) 1000X d)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri	62
Şekil 4.14: %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin e) 1000X f)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri	63
Şekil 4.15: %1,00 çelik lif içerikli numunenin EDS verileri	64

Şekil 4.16: %0,25 poliamid lif içerikli numunenin EDS verileri	65
Şekil 4.17: %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin EDS verileri.....	66
Şekil 4.18: Yüksek sıcaklık altındaki numunelerin basınç dayanımları	69
Şekil 4.19: Yüksek sıcaklık altındaki numunelerin eğilme dayanımları	70
Şekil 4.20: Yüksek sıcaklık altındaki numunelerin ultrases geçiş hızları	72
Şekil 4.21: Yüksek sıcaklık etkisindeki numunelerin ağırlık değişimi oranları	73
Şekil 4.22: Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	75
Şekil 4.23: Donma çözülme etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları	76
Şekil 4.24: Donma çözülme etkisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları.....	77
Şekil 4.25: Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimi oranları.....	78
Şekil 4.26: Donma çözülme deneyi sonrası %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin a) 1000X b)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri	79
Şekil 4.27: Donma çözülme deneyi sonrası %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin EDS verileri.....	80
Şekil 4.28: Donma çözülme deneyi sonrası %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin XRD grafığı.....	81
Şekil 4.29: Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları	83
Şekil 4.30: Sülfat etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları	85
Şekil 4.31: Sülfat etkisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları	87
Şekil 4.32: Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimi oranları	88
Şekil 4.33: Sodyum sülfat etkisi sonrası %1,00 polipropilen lif içerikli numunenin a) 1000X b)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri	89
Şekil 4.34: Sodyum sülfat etkisi sonrası %1,00 polipropilen lif içerikli numunenin EDS verileri.....	90
Şekil 4.35: Sodyum sülfat etkisi sonrası %1,00 polipropilen lif içerikli numunenin XRD grafığı.....	91

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Metakaolini oluşturan kimyasal bileşenler.....	31
Tablo 3.2: Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu oluşturan kimyasal bileşenler.....	32
Tablo 3.3: Uçucu külü oluşturan kimyasal bileşenler	33
Tablo 3.4: Kırmızı çamuru oluşturan kimyasal bileşenler.....	33
Tablo 3.5: Sodyum hidroksit yapısı	35
Tablo 3.6: Sodyum silikat yapısı	35
Tablo 3.7: Üretilen geopolimer harçları	44
Tablo 3.8: Üretilen geopolimer numunelerin karışım miktarı.....	45
Tablo 3.9: Lif katkısı oranları	45
Tablo 4.1: Numunelerin boşluk oranı, su emme oranı ve birim hacim ağırlık verileri	47
Tablo 4.2: Basınç dayanımı sonuçları	48
Tablo 4.3: Eğilme dayanımı sonuçları	50
Tablo 4.4: Yarmada çekme dayanım sonuçları	54
Tablo 4.5: Ultrases geçiş hızları sonuçları.....	56
Tablo 4.6: Yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan basınç dayanımları	69
Tablo 4.7: Yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan eğilme dayanımları.....	70
Tablo 4.8: Yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan ultrases geçiş hızları	71
Tablo 4.9: Donma çözülme etkisi sonucu oluşan basınç dayanımları.....	75
Tablo 4.10: Donma çözülme etkisi sonucu oluşan ultrases geçiş hızları	77
Tablo 4.11: Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımı sonuçları.....	83
Tablo 4.12: Sülfat etkisindeki numunelerin eğilme dayanımı sonuçları	85
Tablo 4.13: Sülfat etkisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları	86

SEMBOL VE KISALTMA LİSTESİ

σ	: Basınç dayanımı
σ_e	: Eğilme dayanımı
P	: Uygulanan kuvvet
A	: Kesit alanı
b	: Prizma kesitinin eni
d	: Prizma kesitinin yüksekliği
L	: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık
A	: Numunenin kuru haldeki ağırlığı
B	: Numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı
C	: Numunenin su içindeki ağırlığı
M	: Molarite
GPC	: Geleneksel Portland Çimentosu
PP	: Polipropilen Lif
SF	: Çelik Lif
PA	: Poliamid Lif
MK	: Metakaolin
ÖYFC	: Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
UK	: Uçucu Kül
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işını Kırınım yöntemi
CO₂	: Karbondioksit
SiO₂	: Silisyum Dioksit
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
SiO₂	: Silikon Dioksit
Al₂O₃	: Alüminyum Dioksit
Fe₂O₃	: Demir Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
SO₃	: Kükürt Trioksit
Na₂CO₃	: Sodyum Karbonat

ÖNSÖZ

Üniversite hayatım süresince eğlenceli ve bilgili ders anlatımlarıyla yapı malemelerine karşı ilgi duymamı sağlayan, tez çalışmamın konusunu belirleyen, deney sonuçlarımın değerlendirmesini yapan ve tez yazımında yaptığı büyük katkılarından dolayı çok kıymetli tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Arın Yılmaz’a,

Tezimin deney kısımlarında bana rehberlik eden, bilgi ve birikimini bana aktararak çalışmalarımı sonuca ulaştırmamı sağlayan Prof. Dr. Mücteba Uysal’a,

Çalışmalarım esnasında başımın sıkıştığı her konuda bana destek elini uzatan Sayın Prof. Dr. Orhan Canpolat’a ve Sayın Doç.Dr. Yurdakul Aygörmez’e,

Deney sürecimde bana kapılarını açıp gerekli tüm materyalleri sunan Yıldız Teknik Üniversitesi’ne,

saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Balıkesir, 2023

Bayram Seçkin Ergün

1. GİRİŞ

Beton düşük maliyeti, kolay şekil alabilmesi, yüksek dayanımı, durabilitesi ve tedarikinin kolay olması gibi birçok olumlu özelliği sayesinde inşaat endüstrisinde en çok tüketilen malzemedir. Betonun hazırlanmasında ise en çok kullanılan yapı malzemesi Portland Çimentosudur [1]. Geleneksel Portland Çimentosunun (GPÇ) üretimi aşamasında yüksek miktarda enerji tüketimi ve atmosfere sera gazı salınımı meydana gelmektedir [2]. Dünyadaki karbondioksit (CO_2) emisyonunun yaklaşık %7'si GPÇ üretimi esnasında oluşturmaktadır. Ayrıca endüstriyel alanda tüketilen enerjinin ~15% yine GPÇ üretimi endüstrisinde tüketilmektedir [3]. Portland çimentosunun üretilmesi aşamalarında bahsedilen problemler ile sürdürülebilir enerji stoğu ve CO_2 emisyonu sonucu oluşan çevre kirliliği dünyamız için önemli tehdit oluşturmaktadır.

Dünya nüfusunun artışına bağlı olarak şehirleşme faaliyetlerinin ilerlemesi inşaat sektöründe GPÇ içerikli beton kullanımının da artmasına sebep olmaktadır. Bu da beton sektöründe yeni sürdürülebilir, daha az GPÇ katkılı malzemelerin kullanımına ve arayışına ivme kazandırmıştır. Portland çimentosuna ikame edebilecek yeni tür bağlayıcı araştırmalarında en çok dikkat çeken malzeme ise geopolimerler olmuştur [4].

1970'li yıllarda ilk kez Davidovits tarafından literature kazandırılan geopolimerler, alümina silikat bazlı malzemelerin alkali silikatlar ile reaksiyona girmesi sonucunda ortaya çıkan alkali alümina silikat bağlayıcılar olarak adlandırmıştır. Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında daha düşük karbondioksit emisyonu yapan geopolimerler bu özelliği sayesinde çevre kirliliği oluşumunda önüne geçmektedir [4]. Günümüze kadar yapılan çalışmalar sonucunda alüminasilikat bazlı geopolimer malzemelerin alkali aktivatörler ile reaksiyona sokularak yeni tür bağlayıcı malzeme üretilmesinin inşaat sektöründe kullanılabileceğini ve oluşturulan bu bağlayıcının Portland Çimentosuna benzer davranış sergileyebileceğini ortaya çıkarmıştır [5].

Yeni nesil yapı malzemesi olarak adlandırılan geopolimerin üretimi aşamasında oldukça düşük seviyede karbondioksit salınımı meydana gelmesi, ihtiyaç duyulan enerjinin çok az olması ve doğal kaynaklar yerine alkali silikat içerikli endüstriyel atıkların kullanılması inşaat sektöründe kullanımı açısından oldukça elverişli duruma getirmektedir. Ayrıca

endüstriyel atıkların kullanımı ile birlikte stoklama sorunlarının da önüne geçilmektedir. Portland çimento içerikli betonlara kıyasla geopolimer ile üretilmiş betonların hidratasyon ısısı daha düşük, donatı korozyonuna karşı daha etkili ve asit saldırılarına karşı daha dirençlidir. Ayrıca erken yaşlarda daha güçlü dayanım özellikleri sergilemektedir [6].

Sonuç olarak GPC yerine geopolimerlerin kullanılmasındaki ana etkenler atık ürün stoklarını azaltma, doğal kaynakların azalmasının önüne geçme ve çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımında kayda değer bir düşüş sağlama kabiliyeti olmuştur [7].

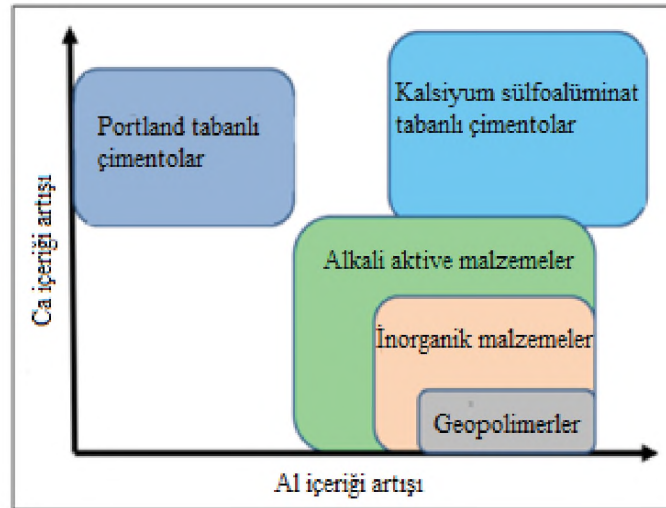
Bu çalışmada, çimentonun alternatifi olabilecek bir yapı malzemesi üretmek için bir geopolimer geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak endüstriyel mineral atıklar olan %40 metakaolin ve eşit oranlarda diğer mineral katkıları (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kırmızı çamur) kullanılmıştır. Alkali aktivatör seçiminde ise 12M sodyum hidroksit ile sodyum silikat solüsyonu tercih edilmiştir. Sodyum hidroksit/Sodyum silikat oranı ağırlıkça 1:2 olarak belirlenmiştir. Agregata olarak eşit oranlarda (~%50) geri dönüşüm agregası ve mermer tozu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında lif katkısının etkisini incelemek için farklı lifler (Polipropilen lif (PP), Poliamid lif (PA), Çelik lif (SF)) ve farklı lif oranları kullanılarak oluşturulan numunelerin mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Geopolimer

İlk kez Joseph Davidovits ile ortaya atılan geopolimerler çimento içermeyen yapı malzemesi olarak tanıtılmıştır. Alümino-silikat ürünlerinin alkali aktivatörler ile (sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı ya da potasyum hidroksit ve potasyum silikat karışımı) yüksek sıcaklıklarda reaksiyona sokulmalı işlemi sonucu Si-O-Al-O bağları içeren bir yapıya sahip üç boyutlu polimer zinciri üretir [8].

Geopolimerizasyon işleminde kullanılan alümino-silikat ürünleri bir veya birden fazla malzemenin kombinasyonundan oluşabilir [9]. Kimyasal açıdan sınıflandırılması yapılan bağlayıcılar Şekil 2.1’de sunulmaktadır. Yüksek kalsiyum düşük alüminyum içeren malzemeler Portland tabanlı çimento olarak gruplandırılırken düşük kalsiyum yüksek alüminyum içerikli malzemeler geopolimer olarak gruplandırılmıştır. Yüksek alüminyum ve kalsiyum içerikli malzemeler ise Alkali aktive malzeme olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2.1: Malzeme içeriğine göre geopolimerlerin gruplandırılması [10]

Günümüzde çevreye salınan karbondioksit emisyonunu azaltmak ve enerji tasarrufu oluşturmak adına geopolimerler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Araştırmalar sonucunda

geopolimerlerin, portland çimentosu ile karşılaştırıldığında dayanım ve dayanıklılık açısından iyi bir alternatif olabileceği görülmüştür [11].

21. yüzyılda geopolimer malzemelerinin inşaat sektöründe araştırılması ve geliştirilmesinde önemli ölçüde mesafe katedilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu düşük maliyetli, aranan özellikleri taşıyan geopolimer malzemelerin üretimi sağlanmıştır. Geopolimer beton ile çevrenin korunması, enerjinin verimli kullanımı, endüstriyel atıklardan faydalanılması gibi avantajları bulunmaktadır. Bununla birlikte yüksek dayanımlı geopolimer beton üretilererek sürdürülebilir bir malzeme çeşidi olarak kullanılması amacıyla çalışmalar sürdürülmektedir [12].

Geopolimerin endüstriyel mineral atıklar ile üretilmesi sayesinde düşük maliyetli olması ve çevre kirliliğinin önüne geçilmesi; alkali aktivasyonu sonucu hızlı basınç dayanımı kazanması, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük enerji tüketimi sağlaması, ayrıca geopolimerizasyon reaksiyonunun da oda sıcaklığında meydana gelebilmesi önemli avantajlarıdır, bu özelliklerle beraber geopolimer üretimi artışı karbondioksit salınımını önemli ölçüde azaltmaktadır [13].

Oluşturulan geopolimer yapısının kullanılan malzemeler ve ortam şartlarına bağlı olarak prizlenme zamanı, üst düzey dayanım performansı, sülfat veya asit saldırılarına mukavemet, endüstriyel mineral atıkların kullanımı, yüksek sıcaklık ve donma-çözünme etkilerine karşı direnç gibi çeşitli alanlarda kullanılabilme özellikleri gösterebilmektedir. Hazırlanan geopolimerler belirtilen tüm özellikleri aynı anda karşılayamayabilir. Fakat aranan özellikleri gerekli karışımlar ve üretim şartları oluşturarak yakalamak mümkündür [12].

2.2 Geopolimerizasyon

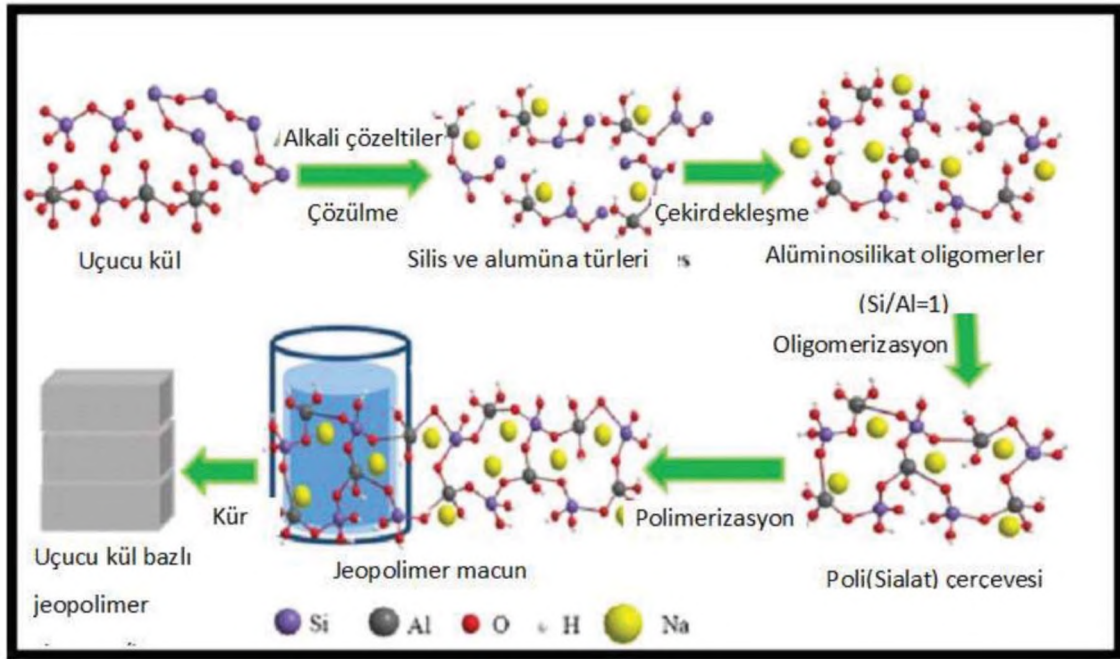
Geopolimerizasyon olayı yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi endüstriyel mineral atık malzemelerin, volkanik tüf, doğal başkalaşım kayalar, kaolinit kili gibi alkali silikat ve tuzların düşük ısıda tepkime yapmasıyla başlamaktadır. Elde edilecek ürünün istenilen amaca uygun fiziksel özelliklerini sağlaması; katı hammadde kompozisyonu, ilgili kimyasalların gerekli molar oranlarda karıştırılarak tepkimeye sokulması, uygulanan ısıl kür ya da kalsinasyon işlemi ısısı ve süresine bağlı olarak değişkenlik gösteren molekül yapısına bağlıdır [14].

Geopolimer basitçe fırınlanmış kil içinde bulunan aluminatlar ile silikatların oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile kovalent bağlı bileşik oluşturması sentezine dayanır. Silikat (SiO_2) mineralleri son derece kararlı bileşiklerdir. Alkali aktifleştircilerin SiO_2 monomerlerinin üç boyutlu ağ yapısını zayıflatması ilerleyen tepkime sürecinde geopolimer ana bileşiği olan Si-O-Al ürünlerinin oluşumunu sağlar [14].

Geopolimer yapısı genel olarak Si/Al molar oranına dayanır ve aşağıdaki gibi kimyasal yapılarına göre sınıflandırılır.

- Poli (sialat) Si/Al = 1, tekrarlayan birim olarak $[-\text{Si-O-Al-O-}]$.
- Poli (sialat-silokso) Si/Al = 2, tekrarlayan birim olarak $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-}]$.
- Poli (sialat-disilokso) Si/Al = 3, tekrarlayan birim olarak $[-\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}]$.

Geopolimerizasyon işlemi çözünme, yeniden düzenlenme ya da organize olma, yoğunlaşma ve polimerizasyon aşamalarından oluşmaktadır. Çözünme ve yeniden örgütlenme birçok oligomer formu oluşturmaktadır. Oligomerler bağlanarak büyük polimer zincirlerini oluştururlar. Oligomerler bağlandığında OH grupları ile bir oksijen atomunu paylaşarak suyu serbest bırakmaktadır. Geopolimerizasyon şeması Şekil 2.2 ve 2.3'te gösterilmektedir [15].



Şekil 2.2: Geopolimerizasyon süreci [15]

Literatürde alkali aktivatörlerin çimento endüstrisinde kullanılması ilk olarak Hans Kühn tarafından yapılmıştır. Alman araştırmacı cüruf ile potasyum hidroksiti karıştırarak priz süresi üzerine çalışma yapmıştır. Daha sonra L. Chassevent, öğütülmüş cüruflar üzerine yaptığı çalışmada sodyum hidroksit ve potasyum hidroksiti kullanarak oluşan tepkimeyi incelemiştir. Kil ve kalker içermeyen toz malzemeler üzerine yapılan ilk detaylı çalışma, 1940 yılında A.O. Purdon tarafından cüruf ve alkali karışımları üzerine gerçekleştirilmiştir [18-19].

Glukhovsky, 1957 yılında ilk olarak kalsiyum içermeyen veya kalsiyum içeriği düşük olan killeri alkali metal çözeltileriyle bir araya getirerek bağlayıcı üretilmesinin mümkün olduğunu keşfetmiştir. Ürettiği bu bağlayıcılara "toprak çimentoları" ve bu bağlayıcılarla ürettiği betonlara ise "toprak silikatları" adını vermiştir. Glukhovsky tarafından gerçekleştirilen çalışmalardan sonra alkali aktive çimentolar üzerine birçok araştırma yapılmış ve ilerlemeler kaydedilmiştir. 1981'e gelindiğinde Fransız bilim insanı Davidovits, alkalileri pişirilmiş kaolin, kireçtaşı ve dolomit karışımıyla bir araya getirerek bir tür alkali aktive çimento üretmiştir. Polimerik yapıya sahip olmalarından ötürü bu bağlayıcıya geopolimer adını vermiştir [20].

2.4 Geopolimer Bileşenleri

2.4.1 Metakaolin

Saflaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin ısı işlem sonucu toz halinde elde edilmesiyle oluşan metakaolin, açık renge sahip amorf yapıya sahip bir alümina silikattır. Kil mineralleri yaklaşık 200°C'de sahip olduğu suyu serbest bırakır. Kaolin kilinin dehidrolize olarak suyunu bıraktığı sıcaklık ise 550–800 °C mertebesinde. Bu sıcaklıktan sonra kaolin içinde barındırdığı suyun yaklaşık %12-14'ünü kaybederek metakaolini oluşturur. Bu dönüşümün ardından alümino silikat ve kristalize yapıya düzenini yitirir. Bu sayede kaolinler kimyasal açıdan reaktif bir ürüne dönüşür. Doğru yapılan kalsine işlemi sonucunda amorf yapıya sahip ve güçlü puzolanik özellik taşıyan metakaolin (MK) oluşumu sağlanır. İnşaat sektöründe MK kullanımı ilk kez 1962 yılında Brezilya'da bulunan bir barajının yapımında görülmüştür. Bu yıldan itibaren metakaolinin inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılmasında gözle görülür bir artış olmuştur. Günümüze gelindiğinde ise başta yüksek dayanımlı beton uygulamalarında olmak üzere kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Betonda

optimum seviyede metakaolin kullanımına yönelik yapılan çalışmalar devam etmektedir. Yapılan çalışmaların önemli bir kısmını Portland çimentosunun belli oranlarda ikamesi olarak kullanılan metakaolinin beton üzerinde oluşturduğu etkilerin belirlenmesine yöneliktir. [21-22].

Metakaolin, çimentonun kıvamında artışa neden olur. Bu etkisi metakaolinin kökeni ve inceliğine bağlıdır. Oluşan kıvam artışı su ihtiyacını artırır, fakat agrega segregasyonu riskini arttırmaz. Hızlı dayanım kazanması ve alkali aktivatörler ile iyi reaksiyon oluşturması sebebiyle metakaolin geopolimerin ana malzemelerinden biri olarak görülmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda metakaolinin, betonun ileri yaştaki birçok özelliğini olumlu olarak etkilediği gözlemlenmiştir ve bu duruma bağlı olarak betonda kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır [22-23].

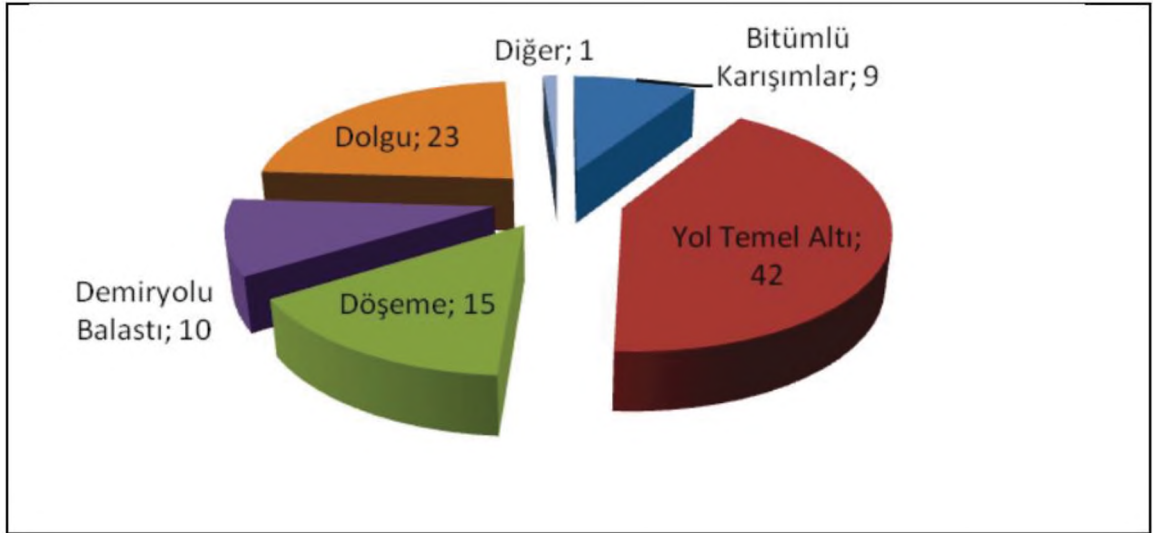
2.4.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Cüruflar, çelik üretilirken yan atık ürün olarak açığa çıkan bir çeşit mineraldir. Cüruf, demir cevheri içeren kaya yapılarının 1400-1600 °C’de sıcaklığa maruz bırakılıp ve bu sıcaklıkta demir filizlerinin eritilmesiyle elde edilir. Eriyen demir filizleri akkor halinde akmaya başlar. Yüksek sıcaklık sonucu demir cevherinin ayrışmasıyla ortamda kayaç kalıntıları kalır. Daha sonra ortam sıcaklığında soğumaya bırakılan bu kayaç kalıntıları 2-4 mm arasında tane boyutunda toz halde bir yapıya sahip olur. Oluşan bu son ürün Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC) olarak adlandırılır [24].

1862 yılında Langens’in öğütülmüş yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı özellik taşıdığını gözleminin ardından, İlk olarak 1865 yılında yüksek fırın cürufu ve kireç karışımından elde edilen bağlayıcılar piyasaya sürülmeye başlamıştır. 1883 yılına gelindiğinde Öğütülmüş yüksek fırın cürufları, çimentonun hammaddesi olarak kullanımına geçilmiştir. Portland çimentosu klinkeri yüksek fırın cürufu ile birlikte öğütülerek Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentosunun üretimi de ilk kez 1892 yılında Almanya’da olmuştur. Öğütülmüş yüksek fırın cürufları, Stutterheim tarafından yapılan çalışmalar sonucunda ise betonda katkı maddesi olarak kullanımına başlanmıştır [27].

Cüruf katkılı betonların çeşitli özellikleri çok sayıda araştırmaya konu olmuştur. Yüksek fırın cürufu içeren betonların aşınma direnci ve mekanik özellikleri üzerine yürütülen çalışmalarda elde edilen sonuçlar, mukavemet gelişimleri göz önüne alındığında, granüle yüksek fırın cüruflarının beton içerisinde kısmen çimento yerine kullanılabileceği, buna karşılık, cürufllu betonların aşınmaya karşı dirençlerinin kontrol betonlarınkine oranla daha düşük olduğu rapor edilmiş. Cürufun kimyasal kompozisyonu geleneksel çimentoya diğer mineral katkılardan daha fazla benzerlikler göstermektedir. Boşlukların doldurulması, uzun vadeli dayanım, betonun sülfat ve alkali silika reaksiyonu direnci, geçirimsizlik ve hidrasyon prosesi esansında ısı üretimi gibi özellikler için cüruf kullanılabilmektedir. Ayrıca betonda cüruf kullanımı taze betonun priz süresini uzatmaktadır ve işlenebilmeyi artırmaktadır. Betondaki terlemeyi azaltmaktadır ve hidrasyon ısını azaltmaktadır. Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır ve sülfat direncini artırmaktadır [25].

Cüruflar inşaat endüstrisi, demiryolu zemin döşemesi, yalıtım malzemesi, cam sanayi, tarım ve çevre uygulamaları gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Cürufun ABD’de kullanım oranları ile birlikte kullanım yerleri 2.4’de verilmiştir [24].



Şekil 2.4: ABD’de Cürufun kullanım alanları [24]

Çimento yüksek fırın cürufu ile %30-%40 oranında ikame edilebilmektedir. Yapılan çalışmalarda çimento yerine ikame edilmiş yüksek fırın cürufu katkılı betonlarda erken yaştaki dayanımlarında düşüşler görülmüştür. Ancak, ilerleyen dönemlerde puzolanik

reaksiyonun gelişmesiyle birlikte 28 günlük dayanımlarda bu farkın kapandığı görülmektedir. Daha uzun sürede ise dayanımlar katkısız beton ile aynı ya da daha yüksek olabilmektedir. Yüksek fırın cürufu içeren betonlar suda ve sülfatta bekletildiğinde, genleşmelerin azaldığı ve standart limitlerinin sağlandığı görülmüştür [26].

2.4.3 Uçucu Kül

Termik santrallerin elektrik enerjisi üretimi esnasında atık yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu küller ince taneli bir mineral çeşididir. Yapay puzolan olan uçucu küller kendi başlarına bağlayıcılık özelliği taşımadığı halde, sönmüş kireçle hidratasyona girerek sertleşebilen bir malzemedir [22]. Elektrik üretimi sırasında kullanılan kömürlerin ısıtılarak yakılması sonucu yukarıya yükselen küllerin elektro filtreler yardımıyla tutularak atmosfere salınımı önlenir. Tutulan 1-300 µm boyutlarındaki bu küller uygun yer ve koşullarda depolanması gereklidir [28]. Oluşacak çevre kirliliğini önüne geçmek adına atmosfere salınımı önlenen küller, zamanla birikir ve geniş alanları kaplamaya başlar. Biriken bu küller herhangi bir amaçla kullanılmadığı takdirde çevre için ciddi bir problem oluşturma riski meydana getirir [31].

Elektrik üretimi için kullanılan kömürün özellikleri ve yakılma işlemi, uçucu küllerin önemli ölçüde özelliklerini belirlemektedir. Yapısında bulunan alümin ve silis içeriği sayesinde puzolanik özellik gösterebilme yeteneğine sahip olması çimento ile birlikte veya direk betonda katkı malzemesi olarak kullanımına olanak sağlar. İnce taneli ve geometrik yapısı dolayısıyla taze betonda işlenebilirliği arttırmaktadır. Çimentonun su ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan kireçle tepkimeye sokularak ilave bağlayıcı malzeme oluşturur. Geometrik şekli sebebiyle segregasyonu azaltması, taze betonda işlenebilirliği arttırması, hidratasyon ısısının düşük olması sayesinde erken yaştaki çatlak oluşumunu azaltması, çimento içerisinde oluşan boşlukları doldurması ve erken yaştaki dayanım özelliklerini olumlu yönde etkilemesi betonda uçucu küllerin kullanımı arttırmaktadır. Belirtilen bu özellikler ile birlikte beton yapılarında dayanıklılık ve kalıcılık yeteneğinde iyileşme sağlanmış olmaktadır [32-33].

Uçucu külün çimento ile birlikte inşaat sektöründe en çok kullanıldığı alan, beton üretimidir. Uçucu kül hem normal ve hafif betonda hem de giderek kullanımı yaygınlaşan hazır beton üretiminde gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül kullanımı en düşük su/bağlayıcı oranında kullanıldığında dayanım ve durabilite açısından

daha iyi sonuçlar vermektedir [32]. Uçucu küllerin puzolanik özelliğe sahip oluşu çimentonun ikamesi olarak kullanımı açısından daha faydalıdır. Uçucu küller ince taneli yapısı ve yüksek özgül yüzey alanına sahip olmasıyla bağlayıcı miktarının artışına ve çimentodan tasarruf yapılmasına olanak sağlar. Yapılan çalışmalar yaklaşık olarak %20 seviyesinde çimentoya ikame edilen UK'ların betonun ileri yaştaki dayanım performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Fakat betonun erken yaştaki eğilme ve basınç dayanımları bir miktar düşürdüğü ayrıca, priz alma süresini uzattığı görülmüştür. Uçucu kül katkısı ile betonda hidrasyon ıslısının düşmesi termik rötre kaynaklı oluşan çatlakları azalttığı dolayısıyla kütle betonlarında kullanıma uygun olduğu anlaşılmaktadır [29-30].

Uçucu küllerin yapısında bulunan ana bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO ürünleridir. Uçucu külde bulunan bu bileşenlerin miktarlarına bağlı olarak uçucu külün sınıfı belirlenmektedir. ASTM C 618 standardı uçucu külleri iki grupta sınıflandırmıştır. Bitümlü kömür yakımından elde edilen uçucu küller F sınıfı uçucu küller sınıfına girmektedir ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazladır. Ayrıca bu küllerde CaO oranı %10'un altındadır. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptir. Linyit kömürünün yakılma işlemiyle elde edilen küller ise C sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50 ile %70 arasındadır. Ayrıca C sınıfı uçucu küllerde CaO yüzdesi %10'un üzerinde olduğu için, bu küllere yüksek kireçli uçucu kül denilmektedir [24].

2.4.4 Kırmızı Çamur

Alüminyum üretimi esnasında ortaya çıkan bir atık yan ürün olan kırmızı çamur, Boksit malzemesinin Bayer işlemine tabi tutulması sonucu ortaya çıkmaktadır. Alümina üretmek için kullanılan boksit cevherinin işlenmesi ile yaklaşık olarak %40 seviyelerinde kırmızı çamur meydana gelmektedir. İçeriğinde bulunan sodyum hidroksit sebebiyle çevreye zarar verme potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca depolama sorununu da beraberinde getirmektedir.

Yapısında bulunan ürünlerin bileşen özellikleri sayesinde farklı endüstriyel alanlarda kullanımı söz konusu olabilen kırmızı çamurlar, yapılan araştırmalar sonucu inşaat sektöründe de kullanılabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışmalar ile betonda kırmızı çamur kullanımının betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde iyileşme sağladığı görülmüştür [34].

Kırmızı çamur geometrik şekli ve inceliği sayesinde betonda boşluk oranını düşürdüğü ve bu sayede malzemenin basınç mukavemetini arttırdığı anlaşılmıştır. Günümüzde yapılan çalışmalar sonucu kırmızı çamurun yapıdaki boşluk oranını azaltması sayesinde geçirimsiz zemin uygulamalarında kullanılabileceği tespit edilmiştir [34-35].

Yang ve diğ. kırmızı çamur katkılı numuneler üzerinde yaptıkları çalışmada, beton numunelerin 7. gündeki basınç dayanımlarının kırmızı çamur oranı arttıkça arttığını fakat 28. gündeki basınç dayanımlarında hacimce %33 kırmızı çamur içerikli numunelerin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu bu değerden sonra kırmızı çamur oranındaki artışın basınç dayanımında kayıp oluşturduğu raporlanmıştır [34-36].

Liu ve diğ. kırmızı çamurun yapısında bulunan demir elementinin çeşitli ayrıştırma yöntemleriyle ortamdaki uzaklaştırıldığında kalan malzemenin betonun basınç dayanımını daha çok yükselttiğini belirtmiştir [34-37].

Yapılan bir başka çalışmada ise, çimentonun ikamesi olarak %20 oranında kırmızı çamur kullanımının çimento priz süresini arttırdığı, betonun işlenebilirliğini azalttığı ve kırmızı çamurun çatlak ve deformasyon oluşumunu engellediği ortaya konulmuştur [34-38].

2.4.5 Mermer Tozu

Mermer, günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Kalkerlerin yapısında meydana gelen bozulmalar sonucu malzemenin yeniden kristalleşmesiyle meydana gelen mermer genel olarak inşaat malzemesi ve dekoratif amaçlı kullanımı mevcuttur. Mermer ocaklarından çıkarılarak işlenen mermer, işlenme esnasında yaklaşık olarak %50 oranında mermer atığı oluşturmaktadır. Oluşan bu atıklar uygun çeşitli yerlerde depolanır. Zamanla biriken bu mermer kalıntıları doğada olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Mermer atölyelerinde ortaya çıkan mermer atıkların geri dönüştürülebilmesi endüstriyel anlamda kazanç sağlayarak oluşturduğu çevresel sorunların önüne geçilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple mermer kalıntılarının kullanılabilirliği konusunda bulunabilecek alternatif yöntemler, mermer işletmecilerine ve ülke ekonomisine kaynak sağlamakla birlikte mermer fabrikalarının çevreye verdiği olumsuz etkilerinin de önüne geçecektir. Son zamanlarda

seramik ve inşaat sektöründen bazı araştırmacılar, mermer tozunun ikame şeklinde veya katkı maddesi olarak kullanımına büyük ilgi göstermişlerdir. Mermer tozunun geri dönüştürülerek kullanılması sadece mermer kullanımının çevresel olumsuz etkilerini azaltmakla kalmayarak, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmayı sağlayıp diğer doğal kaynakların kullanımındaki azalmayı önleyerek birden çok alanda iyileşmeyi sağlamaktadır. [39].

Mermer atıklarının çeşitli kullanım alanları mevcuttur. Bunlar; kâğıt sanayisi, boya ve plastik endüstrisi, seramik, cam, tarım sektörü, hayvan yemi üretimi, kireç ve çelik üretimi şeklinde sıralamak mümkündür. Belirtilen alanlarda kullanılan mermer tozu atıklarını çok düşük seviyededir. Bu sebeple mermer atıklarının farklı sektörlerde kullanımı belirtilen olumsuz etkilerinin önüne geçilmesi adına oldukça elzem bir konudur. Üstelik inşaat endüstrisi dışında diğer tüm alanlarda kimyasal ve fiziksel yöntemlerin kullanılması maliyeti arttırmaktadır. Mermer tozunun çimento içerikli malzemelerde kullanılmadan önce kurutularak daha sonra toz haline getirilerek, inşaat sektöründe kullanımı ekonomik açıdan oldukça elverişlidir. Mimari amaçlı kullanılan yapı malzemeleri elemanlarda mermer tozu kullanımı oldukça yaygındır. Mermer tozu kalıntıları sıvaların katkı malzemesi, çimento üretiminde katkı malzemesi, kireç ve kalsine dolomit üretiminde, ateşe dayanıklı malzeme olarak inşaat sanayinde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır [40].

2.4.6 Alkali Aktivatörler

Alüminat ve silikat içeren hammaddeler çeşitli alkali içerikli malzemeler ile reaksiyona sokulabilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kaolinitik kil, kırmızı çamur, silis dumanı, zeolit ve kaolin gibi ısıtılma işlemi uğramamış maddelerin kullanımı üzerinde durulmuştur. Alümino-silikat ürünlerinin kimyasal yapısı alkaliler ile aktive edilmiş ürünlerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri belirlemektedir [42].

Alümin ve silikat içerikli toz malzemelerin alkaliler ile reaksiyona sokulup aktifleştirilerek geleneksel çimento ile karşılaştırılması ilk kez 1908 yılında Alman bilim insanı Kühl tarafından yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre Kühl, alkali aktive ürünlerin geleneksel çimentoya benzer davranış sergilediğini göstermiştir. Daha sonra 1940'lı yıllara gelindiğinde Purdon tarafından alkali aktive bağlayıcıların inşaat sektöründe kullanımına yönelik çalışmalar bilim dünyasına sunulmuştur [42].

Günümüzde geopolimer üretiminde en çok tercih edilen alkali aktivatörler, NaOH ile NaSi_2O_3 veya KOH ile KSi_2O_3 karışımlarından oluşan çözeltilerdir. Alkali çözeltinin geopolimer üretimindeki amacı, yapıda bulunan alümin ve silika ürünlerini aktive etmektir. Reaksiyonun miktarı ortamdaki silikat varlığıyla birlikte artış gösterir. Bu sebeple NaSi_2O_3 veya KSi_2O_3 ürünlerin kullanımı, aktivasyonu arttırırken ekonomik tasarruf sağlar. Silikat içermeyen ve aktivatör olarak yalnızca NaOH veya KOH kullanılması durumunda OH^- iyonların miktarında azalma oluşup Si^{4+} ve Al^{3+} iyonları bağlayıcı malzemeden tamamen ayrılmaktadır. Alkalilerdeki görülen azalma ile birlikte yapının polimerizasyonunu tamamlayamamasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak reaksiyona girmeyen bağlayıcı ürünler oluşup dayanım kayıplarına yol açmaktadır [13,41].

2.4.6.1 Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit, sodyum karbonattan elde edilen kimyasal gösterimi NaOH şeklinde olan ve piyasada kostik olarak adlandırılan kimyasal bir bileşiktir. Kolay temin edilebilmesi ve düşük maliyeti sayesinde sodyum hidroksitler, endüstriyel alanlarda en çok tercih edilen malzemelerden biridir. Sabun ve deterjan yapımında, tekstil endüstrisinde ve çeşitli kimyasal maddelerin üretimde kullanılmaktadır. Sodyum hidroksitler beyaz renkli ve toz şeklinde bir yapıya sahiptir. Ayrıca kolayca reaksiyona girebilmektedir. 13,5 pH değerine sahip olmasıyla kuvvetli bazik özellik gösterir. Ortamdaki su varlığıyla beraber ayrışma göstererek yapısında bulunan OH^- iyonlarını serbest bırakır. Daha sonra sulu ortamda karbondioksit ile tepkimeye girerek karbonatlaşma gösterir. Geopolimer üretimi için yaygın olarak kullanılan alkali aktivatörlerden biri sodyum hidroksittir. Hazırlanan karışımdaki molarite ve yoğunluk üretilen harcın dayanımını belirlemektedir. Çözeltide kullanılan sodyum hidroksit oranını arttırmak kimyasal çözünmeyi arttırmaktadır. Bu sebeple erken yaştaki dayanım özelliklerinde artış görülür. Fakat yoğun miktarda kullanılmış sodyum hidroksit, istenilmeyen seviyede OH^- iyonu oluşturarak yapıda düzensizliğe sebebiyet verir. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen harçların kimyasal yapısının daha kuvvetli olduğu görülmüştür. Bu sayede asit ve sülfat saldırılarına karşı direnci arttırmaktadır. Ayrıca NaOH kullanımı geopolimerin ana bileşenleri olan C-S-H ürünlerinin oluşmasına olanak sağlamaktadır. Son olarak NaOH oranının artmasıyla ısı üretiminde de artış olmaktadır [42].

2.4.6.2 Sodyum Silikat

Sodyum silikat, $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ formülü ile ifade edilen inorganik bir bileşendir. Piyasada su camı ifade edilen bu malzemeler, katı halde ya da sulu çözelti şeklinde kullanılabilir. Saf sodyum silikat renk içermeyen veya beyaz renkte bulunabilir fakat endüstriyel ve kimyasal alanlarda kullanıldığında içine katılan yabancı malzemeler ile birlikte renkleri yeşil veya mavi şeklinde de görülebilir. Sodyum silikat başlıca inşaat sektörü, tekstil sanayi, madencilik faaliyetleri, su arıtma tesisleri ve temizlik alanlarında kullanılır. Sodyum silikat, silikon dioksit ve sodyum karbonat ürünlerinin ısıtma işlem sonucu tepkimeye sokulması sonucu elde edilmektedir. Ayrıca tepkime sonucu karbondioksit açığa çıkmaktadır [42].

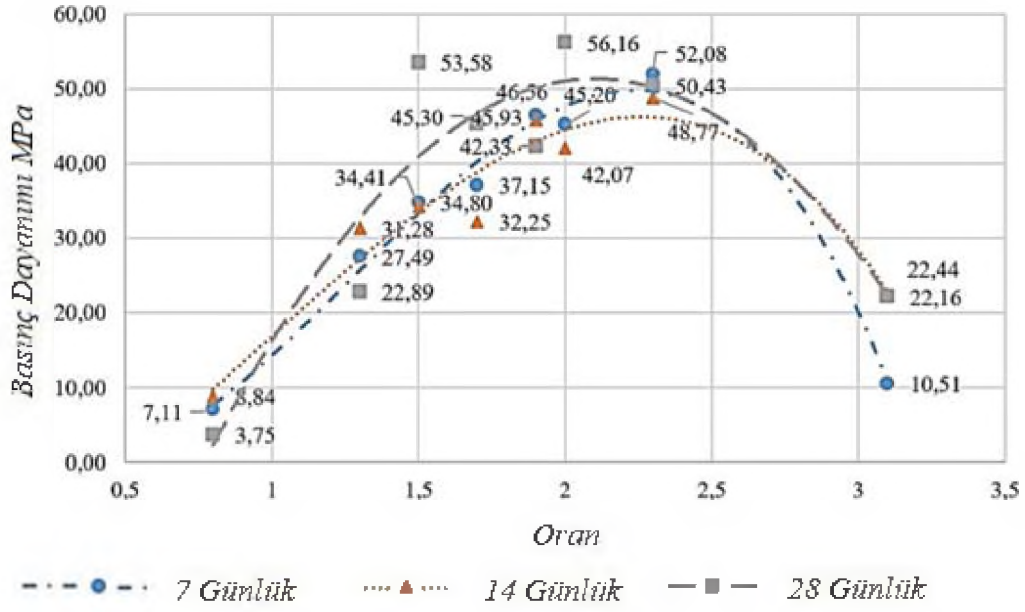
2.5 Geopolimer Özelliklerini Etkileyen Unsurlar

2.5.1 SiO_2 / Na_2O Oranı

SiO_2 / Na_2O oranı geopolimer basınç dayanımını etkileyen parametrelerden biridir. SiO_2 / Na_2O oranı, alkalisilikat çözeltisinde bulunan alkalilerin polimerleşme düzeyini yüksek seviyede etkileyerek hazırlanan geopolimer harçlarının dayanım ve durabilite özelliklerini önemli ölçüde belirlemektedir [43].

Bocullo ve diğ. [44], farklı oranlarda SiO_2 / Na_2O 'ten oluşan 8 çeşit geopolimer harcı üretmiştir. Numunelere 7, 14 ve 28 günlerde oda koşullarında uygulanan kür işleminin ardından basınç dayanımları araştırılmıştır. 8 karışım arasında SiO_2 / Na_2O oranı 2 olan seriler, en iyi basınç dayanımını sergilemiştir. Diğer numunelerin dayanımlar şekil 2.5'te gösterilmiştir.

Revathi v.d. [45], yaptığı çalışmada SiO_2 / Na_2O oranı ile kür koşullarının geopolimer numuneler üzerinde basınç mukavemetine etkisini araştırmıştır. 60°C fırın kürü ile buhar kürü uygulanması sonucu numuneler teste sokulmuştur. İncelenen çalışma verilerine göre 1,0 SiO_2 / Na_2O oranına sahip numune örneklerinin daha yüksek basınç mukavemeti gösterdiği rapor edilmiştir.



Şekil 2.5: Farklı SiO₂/Na₂O oranına sahip numunelerin basınç dayanımları [44]

2.5.2 Su İçeriği

Geopolimerlerin dayanımını etkileyen bir başka unsur karışımdaki su oranıdır. Geopolimer karışımlarında su içeriğini arttırmak karışımların işlenebilirliği artırabilir fakat su/bağlayıcı oranı arttıkça geopolimerlerin basınç dayanımında azalma görülür. Su içeriği oranı yüksek olan geopolimer harçlarında yapı içerisindeki gerilmeler artar. Artan gerilmeler sonucu boşluklar oluşur ve oluşan boşluklar durabilitayı düşürdüğü gibi geopolimerin dayanım özelliklerini de negatif şekilde etkiler [46].

Patankar [47], bağlayıcı konsantrasyonu oranının geopolimerlerde işlenebilirlik ve dayanım özelliklerini incelemek adına yaptıkları çalışmada su/bağlayıcı oranının artırılmasıyla betonda işlenebilirliğin arttığı görülmüştür. Fakat bu oranın artışıyla birlikte basınç dayanımında azalma olduğu ifade edilmiştir.

Xu ve diğ. [48], sodyum hidroksit ve sodyum silikat tarafından aktifleştirilen fırın cürufu ve uçucu kül karışımlarıyla üretilen geopolimerlerin basınç dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Hazırlanan numunelerde su/bağlayıcı oranını düşürüldüğünde basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

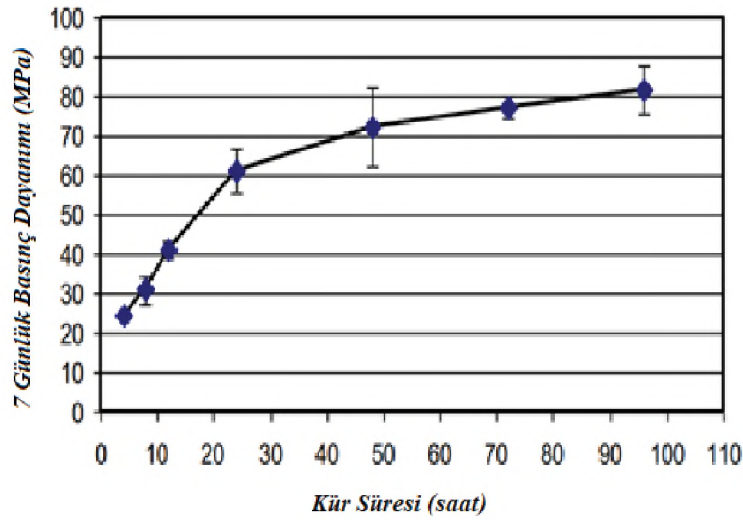
2.5.3 Kür Süresi ve Sıcaklık

Kürleme, harç karışımlarının priz alma süresi boyunca sertleşmesi sırasında ısı işlem, nemlendirme gibi etkilere tabi tutma işlemlerini içerir. Geopolimerlere uygulanan kür işlemleri, malzemenin dayanım ve dayanıklılık özelliklerine oldukça etki etmektedir. Yapılan araştırmalar, 100 °C'ye kadar uygulanan sıcaklık kürünün geopolimerizasyon sürecinde olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir. Birçok araştırma kürleme esnasında sıcaklık artışının basınç dayanımını da artırdığını belirtmiştir. Fakat belirli bir sıcaklığın üzerine çıkılarak uygulanan kür işleminin dayanıma etkisi olmadığı bilinmektedir. Geopolimerin bağlayıcı çeşidi olarak metakaolin kullanılarak yapılan çalışmalarda 70°C üzerindeki uygulanan sıcaklık kürünün dayanıma olumsuz yönde etki ettiği görülmüştür. Kür işleminin yüksek sıcaklıklarda uygulanması ani prize sebep olan reaktiviteyi meydana getirmektedir. Farklı tip alümino silikat içeren bağlayıcı türlerinde değişkenlik gösterebilirken sıcaklık kürü genel olarak 100°C'yi geçmemesi uygun kabul edilir. [49].

Geopolimer betonlarda sıcaklık kürü uygulaması oldukça önemlidir. Oda sıcaklığında kürlenmiş geopolimerlerin, geopolimerleşme sonucu dayanım kazanma sürelerinin oldukça uzun olduğu bilinmektedir. Bu nedenden ötürü geopolimerizasyon sürecini hızlandırmak adına sıcaklık kürü uygulanmaktadır. Sıcaklık kürü, geopolimerin yapısındaki alümino silikatların aktivasyonu hızlandırmak için gerek duyulan bir işlemdir. Aksi halde özellikle uçucu kül içerikli geopolimerler ile kısa süre içerisinde yüksek dayanım sağlanması oldukça güçtür. Kısa sürede yüksek dayanım elde etmek amacıyla geopolimer numunelere 50 °C'nin üzerinde ve en az 24 saat olacak şekilde sıcaklık kürü uygulanmaktadır. Belli düzeyde sıcaklık kürü zamanını ve derecesini arttırmak dayanımın da gelişmesine olanak sağlar. Sıcak kürü uygulamasından sonra bile geopolimer betonların dayanım kazanımı yavaşça artmaya devam etmektedir. Geçmiş çalışmalar incelendiğinde daha uzun kür zamanının polimerleşme reaksiyonunu hızlandırdığını ve daha yüksek eğilme ve basınç dayanımı sağladığını göstermiştir [50].

Rangan ve diğ. [51], yaptıkları çalışmada kür sıcaklığının uçucu kül tabanlı geopolimer numuneler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre kül tabanlı geopolimer numunelerde 60°C kür sıcaklığının dayanım açısından en iyi sonuçları verdiğini ortaya koymuştur.

Lloyd ve Rangan [52], yaptıkları çalışmada geopolimerlerin kürleme süresindeki artışın polimerizasyon üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonuçlarına göre kürleme süresindeki artışın basınç dayanımında gözle görülür bir artış sağladığı görülmüştür. 24 saat uygulanan kür süresinin optimum kürleme süresi olduğu vurgulanmıştır. 24 saatin üzerinde yapılan sıcaklık kürü ile basınç dayanımındaki artış ivmesinin azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca uzun süreli kürleme işlemiyle yoğun enerji tüketimi yapılarak maliyetin arttığı ortaya konulmuştur. Kürleme süresindeki artış geopolimer betonun yapılardaki kullanımını da oldukça zorlaştırmaktadır. Kürleme süresinin numuneler üzerindeki basınç dayanımı etkisi şekil 2.6’da belirtilmiştir.



Şekil 2.6: Kürleme süresinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi [52]

2.5.4 Alkali Aktivatör Oranları

Alkali aktive edilerek hazırlanan geopolimer betonlarda mekanik davranışlarının belirlenmesinde etkili bir rol oynayan bir başka konu hazırlanan aktivatördeki Sodyum silikat / Sodyum hidroksit oranıdır. Bu oran geopolimerlerin dayanım özelliklerine etkisi olduğu gibi yapının kimyasal dış etkilere karşı davranışını da belirlemektedir. Geopolimer beton ile oluşturulmuş yapıların hizmet ömrünü istenilen düzeye çıkarmak için belirlenecek sodyum silikat / sodyum hidroksit oranı son derece önemlidir.

Niş [53], yaptığı çalışmada, farklı NaOH konsantrasyonlarının (6M, 10M ve 14M) ve çeşitli Na_2SiO_3 / NaOH oranlarının (1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5) alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül/cüruf betonunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçları NaOH konsantrasyonunun ve Na_2SiO_3 / NaOH oranının numuneler üzerinde mekanik özelliklerine oldukça fazla etki ettiğini göstermiştir. NaOH konsantrasyonu 14 molar olan seriler en yüksek basınç dayanımı performansı gösterirken NaOH konsantrasyonu 6 molar olan seriler en düşük basınç dayanımı performansı göstermiştir. Aynı şekilde Na_2SiO_3 / NaOH oranı 2.0 olarak belirlenmiş seriler en yüksek basınç dayanımı performansı gösterirken Na_2SiO_3 / NaOH oranı 2.5 olarak belirlenmiş seriler en düşük basınç dayanımı performansı göstermiştir. NaOH konsantrasyonunun artışı geopolimerlerin basınç dayanıma olumlu yönde etki ederken Na_2SiO_3 / NaOH oranının 2.0 değerinin üzerine çıkarılması basınç dayanımına olumsuz yönde etki etmiştir.

2.6 Geopolimerin Genel Özellikleri

2.6.1 İşlenebilirlik

Sathonsaowaphak ve diğ. [54], yaptıkları çalışmada geopolimer bağlayıcısı olarak linyit atığı olan alt küllerini kullanmıştır. Aktivatör olarak ise sodyum hidroksit ile sodyum silikat karışımları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında aktivatör solüsyonunun bağlayıcılara oranı, bağlayıcının inceliği, sodyum hidroksit konsantrasyonu ve sodyum silikatın sodyum hidroksite oranının geopolimer üzerine etkilerini incelemiştir. Ayrıca ilave su miktarı ve süperakışkanlaştırıcıların işlenebilirlik ve dayanım üzerindeki etkilerine çalışılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre sodyum hidroksit miktarını arttırmak, geopolimer harçların dayanımını etkilemezken işlenebilirliği ise artırdığı gözlenmiştir.

Nath ve diğ. [55], uçucu kül bazlı geopolimer betona granüle yüksek fırın cürufu ilave edilerek hazırlanan karışımlar üzerine çalışma yapmıştır. Uçucu kül aktivasyonu için ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımları kullanılmıştır. Araştırma kapsamında numunelerin erken yaştaki dayanım, işlenebilirlik ve priz sürelerini incelemiştir. Sonuçlar, yüksek fırın cürufu miktarı, alkali aktivatör miktarı ve sodyum silikatın sodyum hidroksite oranını parametrelerinden karşılaştırılmıştır. Uçucu kül bazlı geopolimer karışımındaki granüle yüksek fırın cürufunun artması, işlenebilirliği ile priz süresini azaltmıştır. Bununla

birlikte, alkali sıvı içeriği arttırıldığında, işlenebilirlik ve priz süresi artmış, erken yaştaki basınç dayanımında azalma görülmüştür. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2.5 olarak belirlenen alkalın aktivatör solüsyonuna sahip karışımlar, 1.5 ve 2.0 olanlara göre daha az çökme ve sertleşme süresi göstermiştir.

Hadi ve diğ. [56], yaptıkları çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içerikli numuneler üzerinde alkali/bağlayıcı oranı ve ilave su etkilerini araştırmak için çeşitli geopolimer karışımlarını incelemiştir. Alkali/bağlayıcı oranının artışının basınç dayanımını azalttığı fakat işlenebilirliği arttırdığını göstermiştir.

Mehta ve diğ. [57], geopolimer betonun farklı NaOH molaritesinde ve farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarında işlenebilirliğini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda geopolimer betonun işlenebilirliğine NaOH molaritesinin büyük ölçüde etkilendiği görülmektedir.

Yapılan araştırmalar sonucu geopolimerlerde işlenebilirliğinin birçok faktöre bağlı olduğunu görülmüştür. Başlıca alkali solüsyonu/bağlayıcı oranı, bağlayıcı malzeme inceliği, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı, sodyum hidroksitin molaritesi ve ilave su miktarı gibi parametreler işlenebilirliğin değişiminde önemli rol oynamaktadır.

2.6.2 Basınç Dayanımı

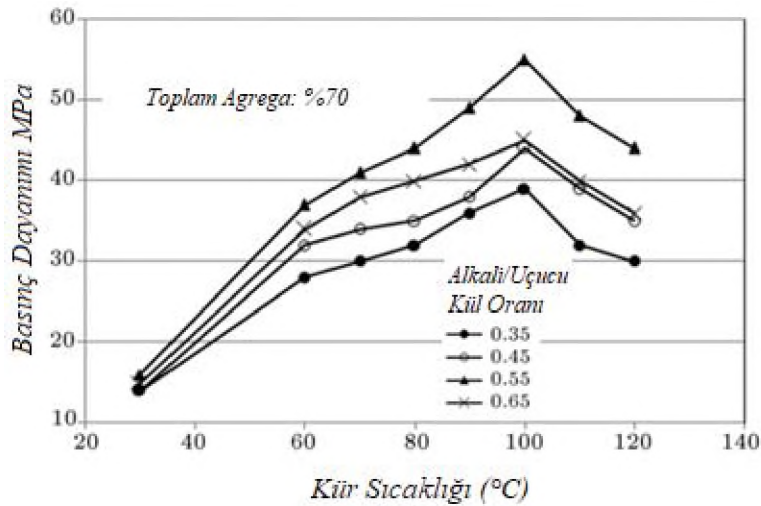
Betonda basınç dayanımı, malzemenin kalitesinin belirlenmesinde en önemli parametrelerden biridir. Kullanılan alkali aktivatörün ve bağlayıcı malzemelerinin özellikleri, alkali aktivatörün miktarı, aktivatör/bağlayıcı oranı, kürleme koşulları, bağlayıcı malzemelerin fiziksel yapısı, alkalilerin kullanım şekli gibi etkenler geopolimerlerin fiziksel ve kimyasal yapısının belirlenmesinde rol oynayan faktörlerdir. Bağlayıcı malzemenin ince taneli yapısı ve yüksek özgül yüzey alanına sahip olmasıyla geopolimerleşme miktarını ve hızını arttırarak daha kuvvetli bir yapı oluşmasına olanak sağlamaktadır [58].

Uygulanan kür süresi ve kür sıcaklığındaki artış basınç dayanımını arttırmaktadır. 60 °C ile 90 °C aralığındaki kür sıcaklığı arttıkça uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç dayanımı da artmaktadır. 24 ile 72 saat aralığındaki kürlenme süresi, uçucu kül bazlı geopolimer betonunda daha yüksek basınç dayanımı sağlar. Bununla birlikte, 48 saatten sonraki kürleme süresi dayanımı önemli ölçüde etkilemez [59].

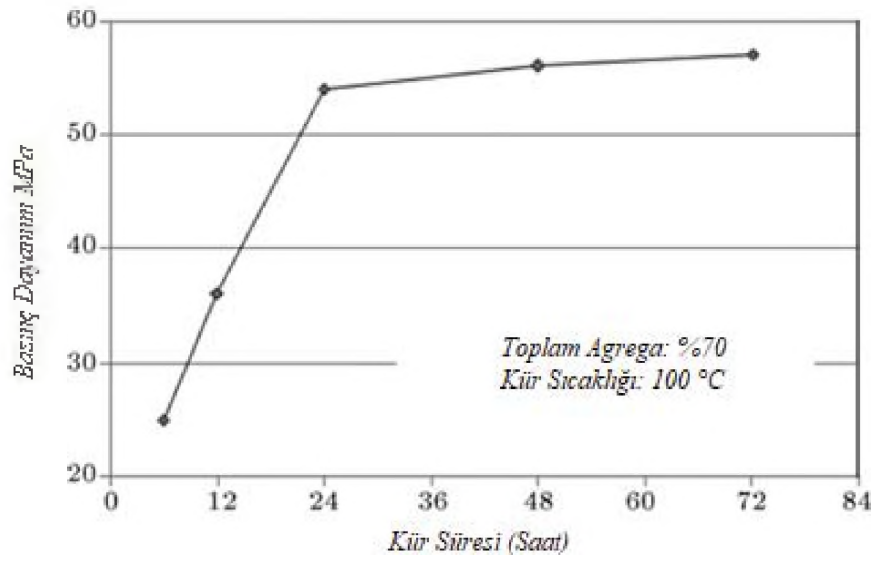
Portland çimentolu betondaki su/çimento oranı ile betonun basınç dayanımı arasında ters ilişki mevcuttur. Geopolimer betonda su/bağlayıcı oranın basınç dayanımına etkisi araştırılmış ve benzer ilişkinin olduğu belirlenmiştir [60].

Nuaklong ve diğ. [61], uçucu kül tabanlı geopolimere geri dönüşüm agregası ilave ederek oluşturulan betonun dayanım özelliklerini incelemiştir. Alkali aktivatör olarak farklı konsantrasyonlarda (8 M, 12 M ve 16 M) hazırlanmış sodyum hidroksit solüsyonu kullanılmıştır. Araştırma sonuçları incelendiğinde yüksek seviyede basınç dayanımı için optimum NaOH değerinin 12 molar olduğunu sonuçlarında göstermişlerdir.

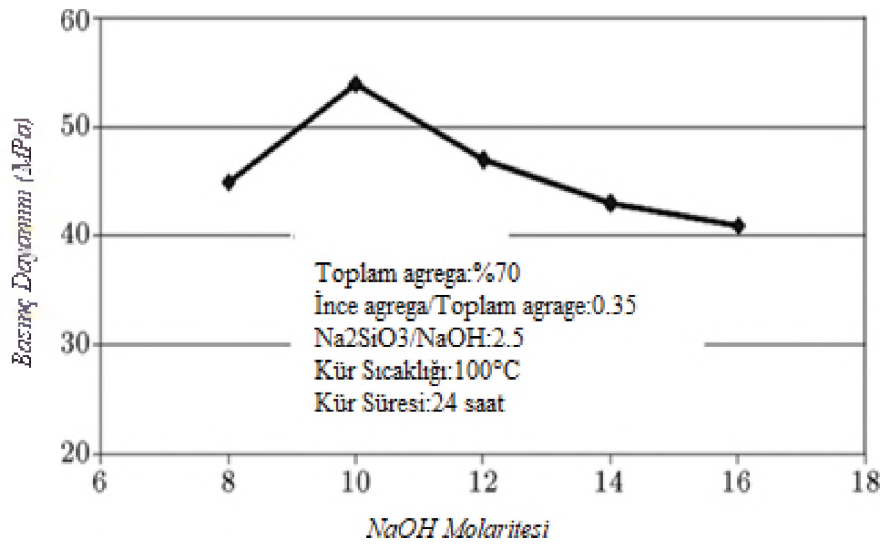
Joseph ve diğ. [62], uçucu kül tabanlı geopolimer numunelerin özellikleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Araştırmada, alkali aktivatör seçiminde sodyum silikat ile sodyum hidroksit solüsyonu tercih edilen geopolimer numuneleri incelenmiştir. Sonuç olarak geopolimer betonun basınç dayanımı kür sıcaklığındaki artışla 100 °C'ye kadar artış göstermiş ve daha sonra azalmıştır. Kür saatleri üzerine yapılan deneylerde ise numunelerin 24 saate kadar basınç dayanımların ciddi şekilde arttığı daha sonraki saatlerde bu artış ivmesinin oldukça düştüğü görülmüştür. Geopolimer betonun basınç dayanımının NaOH molaritesi karşılaştırmasında en iyi sonucu 10 molarite değerinde gösterdiği, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranında ise tüm numunelerin 2.5 değerinde en iyi sonuçları verdiği gösterilmiştir. Sonuçlar şekil 2.7, şekil 2.8, şekil 2.9 ve şekil 2.10'da gösterilmiştir.



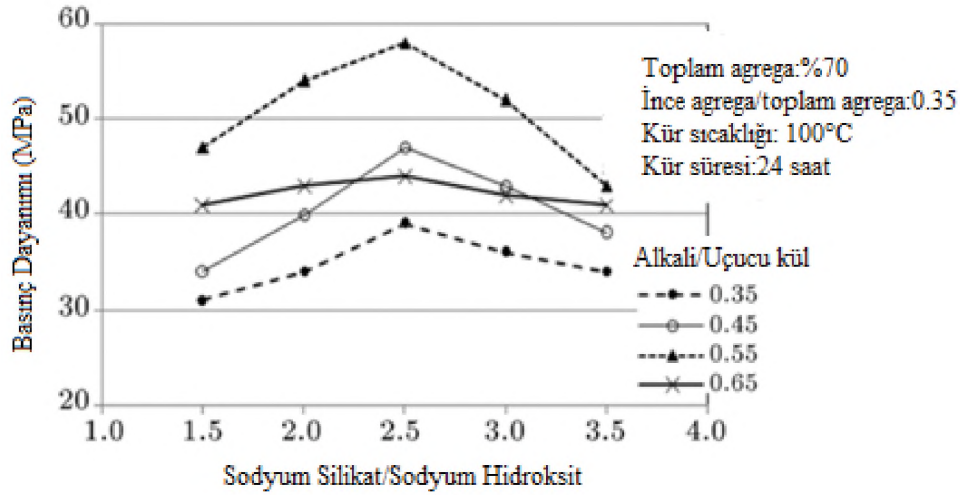
Şekil 2.7: Geopolimer betonun basınç dayanımının kür sıcaklığı ile değişimi [62]



Şekil 2.8: Geopolimer betonun basınç dayanımının sıcaklık kür süresi ile değişimi [62]



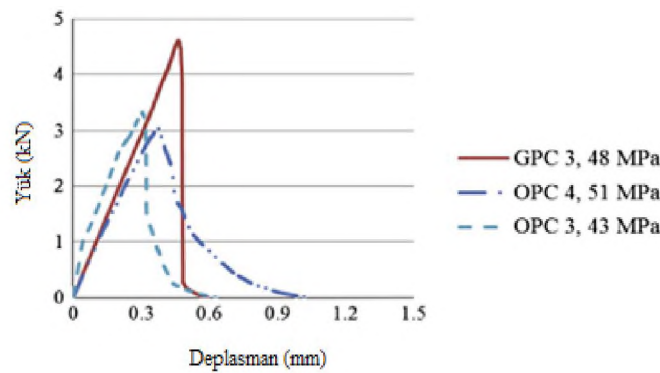
Şekil 2.9: Çeşitli NaOH molaritesi ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları [62]



Şekil 2.10: Geopolimer betonun basınç mukavemetinin sodyum silikat/sodyum hidroksit oranıyla değişimi [62]

2.6.3 Eğilme Dayanımı

Sarker ve diğ. [63] Uçucu kül esaslı geopolimer beton ile ilgili yaptıkları bir çalışmada yük-deplasman kontrolünü incelemiş ve uçucu kül esaslı geopolimer betonunun pik yükünün portland çimentolu betona göre yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca uçucu kül esaslı geopolimer betonun yük-deplasman eğrisindeki post-peak davranışının portland çimentolu betonlara kıyasla daha dik ve hızlı düşen bir davranış gösterdiğini belirtmektedirler. Uçucu kül esaslı geopolimer beton ve geleneksel Portland çimentolu betonun yük-deplasman eğrisi altındaki davranış farkları şekil 2.11’de verilmiştir [15].

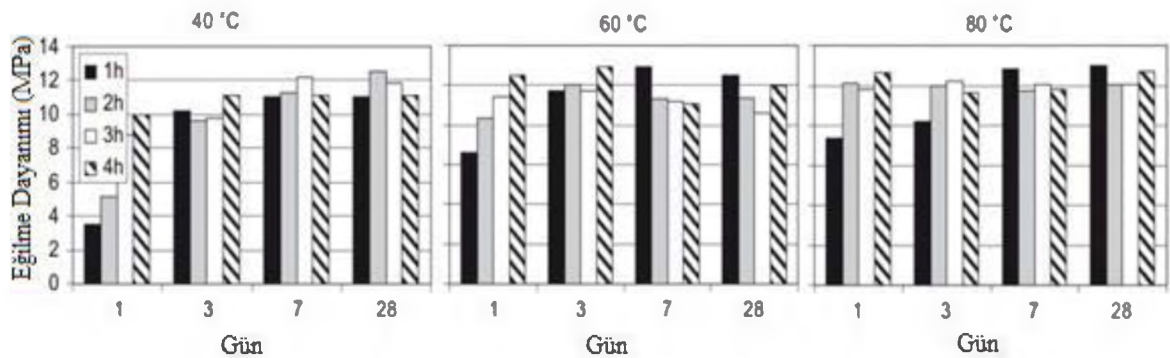


Şekil 2.11: Uçucu kül esaslı geopolimer beton (şekilde GPC) ve geleneksel Portland çimentolu betonun (şekilde OPC) yük-deplasman eğrisi altındaki davranış farkları [63].

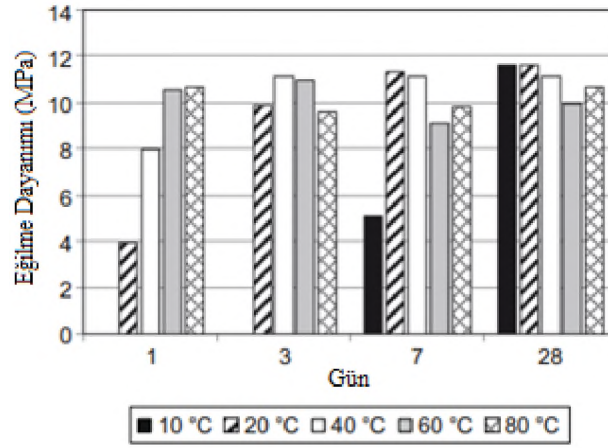
Olivia ve diğ. [64], Hazırladıkları uçucu kül içerikli geopolimer betonların dayanım ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Kürlenme yöntemi, agrega tipi, sodyum silikatın sodyum hidroksite oranı gibi parametrelerin, üretilen geopolimer betonlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 9 farklı geopolimer karışımı üzerinde yapılan eğilme dayanımı deneyi sonuçlarına göre geopolimer betonların eğilme dayanımları Portland çimentolu betonlara kıyasla %40'a kadar daha yüksek dayanım performansı sergilediği görülmüştür. Fakat geopolimer betonlar, Portland çimentolu betona göre %14,9-28,8 oranında daha düşük elastisite modülü sonucu göstermiştir.

Torgal ve diğ. [65], metakaolin tabanlı geopolimer harçların mekanik dayanımları üzerine yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit yoğunluğunun artışıyla birlikte eğilme mukavemetlerinin de arttığı görülmüştür.

Rovnanik [66], kürlenme sıcaklığının ve yüksek sıcaklıklarda kürlenme süresinin metakaolin bazlı geopolimerlerde basınç ve eğilme dayanımlarının zaman içindeki gelişimi üzerinde çalışma yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kür süresi ve sıcaklığının geopolimer numunelerde erken ve nihai dayanım performansını büyük ölçüde etkilediğini vurgulamıştır. Kürlenme sıcaklığını ve süresini arttırmak erken eğilme dayanımı kazanılmasını sağlamıştır. Fakat 28 günlük dayanım sonuçları incelendiğinde yüksek sıcaklıkta kürlenmiş serilerin dayanımında düşüşler olduğu görülmüştür. Bu durumun temel nedeni ise yüksek sıcaklıkta hızlı priz alan serilerin gözenek boyutu ve sayısını çoğaltarak istenen yapıyı oluşturamamasıdır. Çalışma sonuçları Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Farklı kürlenme süreleri ve sıcaklıklarında kürlenmiş geopolimerlerin eğilme dayanımları [66]



Şekil 2.13: Geopolimerlerin farklı kür sıcaklıklarında eğilme dayanımı gelişimi [66]

2.6.4 Donma Çözülme Etkisi

Donma çözünme olayı betonun durabilitesini tehdit eden en önemli unsurlardan biri olarak kabul edilir. Donma etkisine maruz kalmış suya doygun betonların, iç yapılarında bulunan suyun donmasıyla %9' luk oranda genleşme meydana gelir. Daha sonra betonun bulunduğu ortamın ısınmasıyla çözülme olayı gerçekleşir. Tekrarlı şekilde devam eden donma çözülme döngüleri sonucunda betonun iç yapısında oluşan genleşmeler artarak devam eder. Oluşan bu durum bir önceki donma çözülme döngüsünde meydana gelen çatlaklara biriken suların tekrar donması sonucu genişleyerek büyümesi şeklinde açıklanabilir. Bu nedenle uzun süreli donma etkisine kıyasla tekrarlı donma çözünme döngüleri betona daha çok zarar verir. Donma çözülme etkisinin sonucunda oluşan gerilmelerin derecesi betonun çekme dayanımının üzerine çıkması halinde betonlarda çatlak oluşumu, kabuk atma, ufalanma şeklinde bozulmalar görülmektedir [67].

Değirmenci [68], sodyum silikatın sodyum hidroksite oranının, doğal ve atık alüminosilikatlar kullanılarak üretilen geopolimer harçların donma-çözülme direncine etkisini araştırmıştır. Toplam 18 harç karışımı üretilmiş olup sodyum silikatın sodyum hidroksite oranı 1, 2 ve 3 olarak belirlenmiştir. 25 donma-çözülme çevriminden sonra numunelerde görsel bir hasar oluşmadığını ancak önemli basınç dayanımı kayıpları görüldüğünü raporlamıştır. Bu basınç dayanımı kayıplarının 1, 2 ve 3 sodyum silikat/sodyum hidroksit oranlı aktivatör ile hazırlanan zeolit esaslı harçlarda sırası ile %73.9, %63.3 ve %50.1; uçucu kül esaslı harçlarda ise %17.9, %14.5 ve %10.3 olduğu

raporlanırken yüksek fırın cürufu esaslı harçların neredeyse hiç dayanım kaybı yaşamadığı bildirilmiştir. Ayrıca aynı alüminosilikat ile üretilen harçlarda sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının yükselmesi ile donma-çözülme çevrimlerinde yaşanan dayanım kayıplarının azaldığı bildirilmiştir.

Shamsa ve diğ. [69], yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve metakaolin tabanlı geopolimer betonlardaki donma çözülme direncini araştırmıştır. Çalışmada 8 mol derişimli sodyum hidroksit çözeltisi kullanılmıştır. Numuneler etüvde 24 saat kürlenmiş ve kalıplarından çıkartılan numuneler 48 saat daha etüv kürüne tabi tutulmuştur. Etüv küründeki sıcaklıklar, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül için 65°C, metakaolin için ise 45°C'dir. Etüv kürü tamamlanan numuneler 28. güne kadar oda sıcaklığında bekletilmiş ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu esaslı betonlardaki basınç dayanımlarının sırası ile 58.8, 25.6 ve 49.5 MPa olduğu bildirilmiştir. Araştırmacılar; 100, 200 ve 300 donma-çözülme çevriminden sonra tüm çevrim sayılarında en az ağırlık kaybı yaşayan betonun uçucu kül esaslı olduğu; 300 çevrim sonrasında uçucu kül, metakaolin ve yüksek fırın cürufu esaslı betonlardaki ağırlık kayıplarının sırası ile %1.75, %9.88, %4.03; basınç dayanımı kayıplarının ise %23.4, %34.3 ve %26.2 olduğunu raporlamıştır.

Zhao ve diğ. [70], farklı oranlarda yüksek fırın cürufu ikamesi içeren uçucu kül esaslı geopolimer betonların donma-çözülme direncini incelemiş ve sonuçları geleneksel beton ile kıyaslamıştır. Çalışma kapsamında alüminosilikat olarak uçucu küller ile cüruf; aktivasyon olarak ise 12 mol derişimli sodyum hidroksit ile sodyum silikat kullanılmıştır. Uçucu küle ağırlıkça %10, 30 ve 50 oranlarında yüksek fırın cürufu ikamesi yapılarak 3 farklı geopolimer beton üretilmiştir. %10 ve 50 cüruf içeren geopolimer betonların 28 günlük basınç dayanımlarının 80 MPa, %30 cüruf içeren geopolimer betonun basınç dayanımının yaklaşık olarak 70 MPa, geleneksel betonun basınç dayanımının ise yaklaşık olarak 65 MPa olduğu bildirilmiştir. Araştırmacılar, %10 ve %30 cüruf içeren geopolimer betonların donma-çözülme çevrimlerine karşı çok hassas olduklarını, %10 cüruf içeren geopolimer betonun sadece 5 çevrimde dayanımının %25'ini kaybettiğini, 50 çevrimde ise tamamen parçalandığını; %30 cüruf içeren betonun ise 50 çevrimde dayanımının önemli bölümünü yitirdiğini raporlamıştır. %50 cüruf içeren karışımın basınç dayanımı kayıplarının 125 çevrimde %4'ü, 225 çevrimde %25'i ve 300 çevrimde %60'ı geçtiği; geleneksel betonun ise 300 çevrim sonrasında dayanımının %70'inden fazlasını koruduğu ifade edilmiştir.

2.6.5 Sülfat Etkisi

Sülfat iyonları ile beton bileşenleri arasında gerçekleşen reaksiyon sonucu beton yapısında bozulmalar meydana gelir. Bu olay sülfat saldırısı olarak ifade edilir. Beton yapıların yapısal bütünlüğünü bozan en önemli sorunlardan biri de sülfat saldırılarıdır. Doğada potasyum sülfat, sodyum sülfat, magnezyum sülfat gibi alkalilerle bileşik oluşturmuş tuz şeklinde bulunmaktadır. Alkaliler ile bileşik oluşturmuş sülfat iyonları mineralce zengin topraklar, yeraltı suları ve deniz sularında bol miktarda görülmektedir. Sülfat iyonları beton yapılarının toprak, yeraltı suları ve deniz suları içinde bulunan bölümlerinde (iskele, köprü, temel gibi) beton yapısının içerisine nüfus ederek çatlama, genleşme ve bozulma oluşmasına neden olur [71].

Çimentonun ana bileşeni olan kalsiyum alüminat ve çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ürünleri betonun sülfat saldırılarına karşı direncini belirleyen bileşenlerdir. Sülfat iyonlarının kalsiyum alüminat ile reaksiyonu sonucu etrenjit oluşmaktadır. Sülfat etkisi sonucu kalsiyum hidroksit ürünleri ise sülfat iyonlarıyla reaksiyonu sonucunda piyasada alçıtaşı olarak bilinen kalsiyum sülfat oluşmaktadır. Etrenjit ve kalsiyum sülfat oluşumu esnasında hacimde artış meydana gelmektedir. Hacimde oluşan bu artış sınırlandırılmadığı takdirde betonun yapısında çatlak ve bozulma oluşumuna sebep olmaktadır. Çimento bileşenlerinin miktarı, beton geçirgenliği, sülfat iyonlarının derişimi ve sülfat etkisinde geçirilen süre sülfat saldırısının etkisini belirlemektedir [72].

Günümüze kadar yapılan araştırmalarda, alkali aktive edilmiş bağlayıcıların, sülfat saldırılarına karşı iyi bir direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ganeshan ve diğ. [73], tarafından yapılan araştırmada, lif içerikli ve uçucu kül tabanlı geopolimer numunelerinin sülfat direncini incelemişlerdir. Numuneler %5'lik sodyum sülfat çözeltisine 30, 60, 90 ve 120 gün süreyle daldırılmıştır. Sonuç olarak geopolimer betonun Portland çimento içerikli betonlara göre daha yüksek dayanıklılık performansına sahip olduğu ortaya konulmuştur.

Elyamany ve diğ. [74], kür sıcaklığı, sodyum hidroksit konsantrasyonu, alkali aktivatör solüsyonu / bağlayıcı miktarı ve alüminosilikat bağlayıcılar çeşidinin geopolimer numunelerde magnezyum sülfat ataklarına karşı direncini incelemiş ve portland çimentolu numuneler ile geopolimer numunelerin kıyaslamasını yapmışlardır. 48 hafta %10 magnezyum sülfat çözeltisine daldırılan numunelerde kürlenme sıcaklığının 30 °C sıcaklıktan 90 °C sıcaklığa ve sodyum hidroksit molaritesinin 10 M'dan 16 M'a çıkarılması,

su emme ve boşluk oranlarının azalmasına dolayısıyla geopolimer harçların magnezyum sülfat direncini artmasına olanak sağladığı görülmüştür. Alkali çözelti / bağlayıcı oranını 0,35'ten 0,50'ye çıkarmak, su emme ve boşluk oranını artırmış ve geopolimer harçların magnezyum sülfat direncini azaltmıştır. Sonuç olarak, geopolimer harçlarda uygun bağlayıcı türü, kütleme sıcaklığı, NaOH molaritesini ve alkali çözelti/bağlayıcı oranı kullanarak boşluk oranını düşürmek geleneksel portland çimentolu harçlardan daha iyi magnezyum sülfat direnci sağlamıştır.

Değirmenci [75], öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve doğal zeolit içerikli geopolimer harçların sülfat ve asit performansına ilişkin deneysel bir çalışma yapmıştır. Numunelerin sodyum silikatın sodyum hidroksite oranı 1.0, 2.0 ve 3.0 ve sodyum hidroksitin molarite değeri 10 molar olarak belirlenmiştir. Geopolimer harçları, 24 hafta %5 ve %10 konsantrasyonda sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletilmiştir. Sodyum silikatın sodyum hidroksite oranının sülfat etkisindeki geopolimer harçlarda basınç dayanımı üzerinde etkisinin olduğu sonucu çıkarılmıştır. Yüksek seviyedeki sodyum silikatın sodyum hidroksite oranının, daha üstün basınç dayanımı performansı sergilediği gösterilmiştir.

Bakharev [76], tarafından yapılan çalışmada, alkali aktivatörler ile aktive edilmiş uçucu kül içeren numunelerin sülfat direnci incelenmiştir. Konsantrasyonu %5,0 olan magnezyum sülfat, %5,0 sodyum sülfat ve her çözeltinin konsantrasyonu %5,0 olacak şekilde magnezyum sülfat ile sodyum sülfat karışımlarına konulan numunelerin basınç dayanımları incelenmiştir. Numunelerin basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında deney süresi boyunca kararsız davranış sergilediği görülmüştür. En iyi performansı ise konsantrasyonu yüksek olan %5,0 magnezyum sülfat + %5,0 sodyum sülfat çözeltisine bırakılan numuneler göstermiştir. Sülfat saldırısı sonucu oluşan basınç dayanımı kayıpları numunelerdeki alkali ürünlerin sülfat iyonlarıyla reaksiyon oluşturmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca yapılan mikro analizler incelendiğinde sülfat etkisindeki alkali ile aktive edilmiş numunelerin alüminosilikat jeli miktarında artış olduğu görülmüştür. Alkali aktivatörlerden potasyum hidroksit yerine sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanmış numunelerde, sülfat saldırılarına karşı daha üstün bir direnç gösterdiği anlaşılmıştır.

2.6.6 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Beton ürünlerinin durabilitesine etki eden en önemli fiziksel bozulma proseslerinden biri yüksek sıcaklık etkisidir [77]. Yapılan çalışmalar geopolimer betonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki özellikleri açısından geleneksel portland çimentolu betonlara nazaran daha üstün performans sergilediğini göstermiştir [11].

Shaikh ve Hosan [78], iki tip alkali aktivatörün (sodyum ve potasyum bazlı), çelik lif takviyesi ile birlikte yüksek sıcaklık etkisindeki geopolimer betonlar üzerinde mekanik etkilerini araştırmışlardır. 200, 400, 600 ve 800°C olmak üzere farklı yüksek sıcaklık etkilerine tabi tutulan numunelerin deney sonuçları incelendiğinde, hacimce %0,5 çelik lif içerikli geopolimer numuneler hacimce %0,5 çelik lif içerikli çimento numunelerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı performansı sergilemiştir. Hacimce %0,75 çelik lif içerikli geopolimer numunelerin basınç dayanımlarında 400°C seviyesinde kayda değer kayıp yaşanmazken, 400°C değerinin üzerinde basınç dayanımı kayıpları oldukça ivmelenmiştir. Sodyum hidroksit içeren geopolimer numunelerin elastisite modülü değeri, potasyum hidroksit içeren geopolimer numunelerin elastisite modülü değerine göre daha yüksek olduğu raporlanmıştır.

Aygörmez [10], metakaolin bazlı geopolimer harçlar üzerine yaptığı araştırmasında, kolemanit, silis dumanı ve polipropilen lif katkılı geopolimer harç numunelerin dayanım ve kalıcılık özelliklerini üzerine çalışmıştır. Çalışma kapsamında lif katkılı ve lif katkısız olmak üzere geopolimer ve çimento harç numuneleri üretilmiştir. 300, 600 ve 900°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan serilerin dayanım ve kalıcılık sonuçları incelendiğinde geopolimer harç numunelerin, çimento harç numunelerinden daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Kong ve diğ. [79], konsantrasyonu 7 M olan potasyum hidroksit ile sodyum silikat solüsyonu kullanarak aktive ettikleri uçucu kül-metakaolin içerikli geopolimerlerin fiziksel özelliklerini ve dayanım performansını incelemiştir. 24 saat su banyosunda kürlen numuneler daha sonra etüve konularak 80°C sıcaklıkta sıcaklık kürü uygulanmıştır. Geopolimer numunelere 800 °C yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımı deneyleri ve SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizleri sonucu uçucu kül içeren geopolimer numunelerinin metakaolin içeren geopolimer numunelerinde rastlanmayan mikro gözenek yapısına sahip olduğu görülmüştür. Uçucu külün oluşturduğu bu mikro gözenekli yapı ile

yüksek sıcaklık etkisi sonrası numunenin içinde bulunan nem için çıkış yolu sağlanarak matrisin zarar görme potansiyeli azaltılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine tabi tutulan uçucu kül ve metakaolin içerikli geopolimer numunelerin basınç dayanımı sonuçları ise; uçucu kül içerikli geopolimer numunelerinde %6,5 oranında artış, metakaolin içerikli geopolimer numunelerinde %34,0 oranında kayıp olarak sonuçlanmıştır. Basınç dayanımında görülen bu farkın sebebi ise uçucu kül içerikli geopolimer numunelerinin oluşturduğu mikro gözenek yapısı şeklinde yorumlanmıştır.

Fan ve diğ. [80], uçucu külleri, potasyum hidroksit ve sodyum silikat solüsyonu ile aktifleştirdikleri geopolimer örneklerinin yüksek sıcaklıklar altındaki özelliklerini araştırmışlardır. Numunelerin 1 günlük oda sıcaklığı kürlenmesinin ardından 60°C ile 80°C sıcaklık kürü uygulanmıştır. Hazırlanan tüm geopolimer serileri 500°C ve 800°C yüksek sıcaklık etkisine tabi tutulmuştur. Su/bağlayıcı oranı, kürleme yöntemleri, soğutma yöntemleri ve sızdırmazlık derecesinin geopolimer ürünlerin basınç dayanımı ve termal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına bakıldığında, yüksek sıcaklık etkisi sonrası en yüksek basınç dayanımı performansını 0,20 ile en düşük su/bağlayıcı oranına sahip numuneler göstermiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan geopolimer numunelerin basınç dayanımları; oda sıcaklığı kürünün ardından 114 MPa, 500°C yüksek sıcaklık etkisi sonrası 96 MPa ve 800°C yüksek sıcaklık etkisi sonrası 12 MPa olarak ölçülmüştür. Ayrıca Su/bağlayıcı oranı 0,20 olan geopolimer numunelerin 500°C yüksek sıcaklık etkisi sonrası %2,0 800°C yüksek sıcaklık etkisi sonrası %9,4 oranında boyca kısalma yaşadığı tespit edilmiştir.

3. MALZEMELER VE DENEY YÖNTEMLERİ

Bu çalışma kapsamında çimentonun alternatifi olabilecek bir yapı malzemesi üretmek için farklı tip geopolimer araştırılması yapılmıştır. Geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak ~%40 metakaolin ve eşit oranlarda (~%20) mineral katkıları (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kırmızı çamur) kullanılmıştır. Alkali aktivasyonu için 12M sodyum hidroksit ile sodyum silikat solüsyonu kullanılmıştır. Sodyum hidroksit/Sodyum silikat oranı ağırlıkça 1:2 olarak belirlenmiştir. Agregası olarak eşit oranlarda (~%50) geri dönüşüm agregası ve mermer tozu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında farklı lifler ve farklı lif oranları kullanılarak oluşturulan numunelerin dayanım ve kalıcılık özellikleri araştırılmıştır. Bu bölümde ise kullanılan malzeme ve materyallerin özellikleri, üretilen geopolimer harçların hazırlanması ve deneysel çalışmaların detayları anlatılmaktadır.

3.1 Malzemeler

3.1.1 Metakaolin

Kaolin Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. A.Ş. firması tarafından tedarik edilen metakaolin, yapılan bu deneyde ana bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Metakaolinin özgül ağırlığı ise 2.53 g/cm^3 'tür. Malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1: Metakaolini oluşturan kimyasal bileşenler

Bileşen (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma Kaybı
Malzeme	54.22	42.23	0.85	0.55	0.17	0.18	0.53	0.23	1,02



Şekil 3.1: Metakaolin

3.1.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Çalışma kapsamında bağlayıcı malzemelerden biri olan öğütülmüş yüksek fırın cürufun tedariki Bolu Çimento Sanayi firmasından sağlanmıştır. Malzemenin özgül ağırlığı 2.90 g/cm^3 olup kimyasal özellikleri Tablo 3.2’de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu oluşturan kimyasal bileşenler

Bileşen (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma Kaybı
Malzeme	44.48	11.77	1.12	0.67	35,27	5.29	0.52	0.79	0,03

3.1.3 Uçucu Kül

ASTM C618 standardına göre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ ve $\text{CaO} > \%10$ olan uçucu küller F tipi olarak isimlendirilmektedirler. Çalışma kapsamında kullanılan uçucu külün kimyasal bileşimindeki SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oksitleri toplam bileşimin %70’inden fazlasını oluşturmaktadır. Ayrıca CaO içeriği toplam bileşimin %10’undan daha azdır. Bu sebeple

çalışmada kullanılan uçucu kül ASTM C618 standardına göre F tipi uçucu kül sınıfına girmektedir. Bu Çalışma için kullanılan uçucu kül Çatalağzı Termik Santrali tarafından tedarik edilmiştir. Uçucu külün özgül ağırlığı 1.96 g/cm^3 'tür. Uçucu külün kimyasal bileşimleri Tablo 3.3'de gösterilmektedir.

Tablo 3.3: Uçucu külü oluşturan kimyasal bileşenler

Bileşen (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Kızdırma Kaybı
Malzeme	57.72	25.83	6.66	0,11	1.74	2.44	3.69	0.60	1,12

3.1.4 Kırmızı Çamur

Yapılan çalışmada Seydişehir Alüminyum Fabrikası tarafından tedariki sağlanan kırmızı çamur kullanılmıştır. Malzemenin özgül ağırlığı 1.31 g/cm^3 'tür. Kırmızı çamurun kimyasal bileşimleri Tablo 3.4 'te gösterilmektedir.

Tablo 3.4: Kırmızı çamuru oluşturan kimyasal bileşenler

Bileşen (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Malzeme	17,64	24,28	36,79	4,51	3,18	0,42	0,43	11,39



Şekil 3.2: Kırmızı çamur

3.1.5 Mermer Tozu

Bu çalışmada agrega olarak kullanılan mermer tozu; İstanbul-Alibeyköy bölgesinde bulunan Türkan şirketinden tedarik edilmiştir. Mermer tozu, 2.70 g/cm^3 'lük özgül ağırlığa sahiptir. Mermer tozu, etüvde 105°C sıcaklıkta kurutulmuş ve malzeme kuruduktan sonra öğütülmüştür. Kurutulup öğütülmüş olan mermer tozu 4 mm'lik elek ile eleme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.3: Mermer tozu

3.1.6 Alkali Aktivatörler

Çalışmada boyunca alkali aktivatör seçiminde sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_2) belirlenmiştir. Malzemeler As Kimya Sanayi ve Tic. Firmasından temin edilmiştir. Katı olarak tedarik edilen sodyum hidroksit parçaları 12 molarlık çözelti ile karışımın oluşturulmasından 24 saat önce hazırlanıp laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisinin özellikleri Tablo 3.5-3.6 verilmektedir.

Tablo 3.5: Sodyum hidroksit yapısı

NaOH (%)	Na_2CO_3 (%)	Cl (%)	SO_4 (%)	Al (%)	Fe (%)
99.1	0.3	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.002	≤ 0.002

Tablo 3.6: Sodyum silikat yapısı

Na_2O (%)	SiO_2 (%)	Yoğunluk (g/ml) (20°C)	Fe (%)	Ağır metaller (Pb gibi) (%)
8.2	27.0	1.360	≤ 0.005	≤ 0.005

3.1.7 Kullanılan Lifler

Beton, gevrek davranışa sahip bir yapı malzemesidir. Betonun sünek malzeme davranışı göstermesi amacıyla içerisine sürekli veya kısa lif eklenilmesi çekme, çekme uzaması, tokluk gibi özelliklerinin iyileşmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada ise geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, aşınma direnci, sülfat etkisi direnci, donma-çözülme direnci ve yüksek sıcaklık direnci özelliklerini araştırmak amacıyla polipropilen, poliamid ve çelik lifler kullanılmıştır.

3.2 Deneysel Çalışmalar

Tüm deneysel çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvar'ında yapılmıştır. Yapılan deneyler için 5x5x5 ve 7x7x7 cm boyutlarında küp numuneler, 4x4x16 cm boyutlarında prizma numuneler ve 10x20 cm boyutlarında silindir numuneler hazırlanmıştır. Üretilen geopolimer numunelerin fiziksel özelliklerini belirlemek adına su emme, birim hacim ağırlık ve boşluk oranı hesaplanmıştır. Ayrıca hazırlanan geopolimer numunelerin dayanım performansını incelemek için basınç, eğilme yarmada çekme dayanımı testleri ve ultrases geçiş hızı testleri uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi, sülfat etkisi, donma çözünme etkisi ve aşındırma testleri yapılarak numunelerin kalıcılık özellikleri araştırılmıştır. Son olarak X-Işını kırınım yöntemi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılarak harçları mikroyapısı incelenmiştir.

3.2.1 Basınç Dayanımı

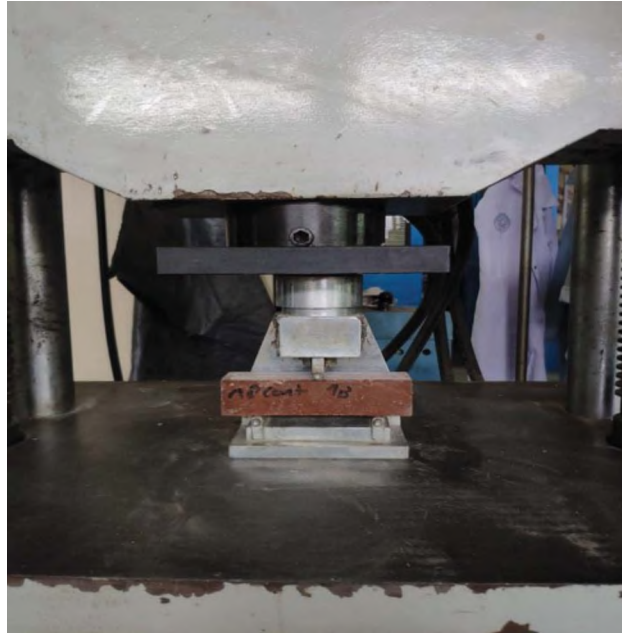
5x5x5 cm küp ve 4x4x16 cm prizma boyutlarındaki numunelere basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Basınç dayanımı testleri 7. gün, 28. gün ve 56. günlerde olmak üzere küp numunelere direk olarak prizma numunelere ise eğilme dayanımı testi sonrası iki blok olarak ayrılan harçlara uygulanmıştır. Kalıptan çıkarılan numunelerin pürüzlü üst yüzeyleri makinenin kuvvet uyguladığı yüzeyine denk gelmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Basınç dayanımı sonuçları her seri için üçer adet üretilen numunelerin ortalama basınç dayanımları baz alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.4: Basınç dayanımı uygulaması

3.2.2 Eğilme Dayanımı

Üretilen 4x4x16 cm prizma boyutlarındaki geopolimer harç numunelerine dayanım performansını belirlemek için 7. gün, 28. gün ve 56. günlerde eğilme dayanımı testleri uygulanmıştır. Numunelere, malzeme test makinesi üzerinde tek nokta yükleme yapılarak eğilme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Kalıptan çıkarılan numunelerin pürüzlü üst yüzeyleri makinenin kuvvet uyguladığı yüzeyine denk gelmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Eğilme deneyi yapılırken kullanılan aparatın mesnetleri arasındaki mesafe 10 cm olup numunelerin orta noktasına kuvvet uygulanmıştır. Eğilme dayanımı sonuçları her seri için üçer adet üretilen numunelerin ortalama eğilme dayanımları baz alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.5: Eğilme dayanımı deneyi

3.2.3 Yarmada Çekme Dayanımı

Yarmada çekme deneyinde kullanılan geopolimer harç numunelerin dayanım sonuçlarını belirlemek için 100x200 mm boyutlarında silindir numuneler kullanılmıştır. Uygulanan test ile numunelerde dolaylı çekme gerilmeleri oluşturulmuş ve eksen boyunca yarıma gözlenmesi beklenmiştir. Uygulanan metot ile test numunelerinde numune kesitinin orta

bölgesinde üniform çekme gerilmeleri oluşturulması sağlanmıştır. Deney süresince pres cihazının tablalarının silindir geopolimer numunelere göre dikey bir düzlemde tutulması sağlanmıştır. Yardamada çekme dayanımında her bir harç karışımı 28. günde teste tabi tutulmuş ve ortalama dayanım sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 3.6: Yarmada Çekme Deneyi

3.2.4 Boşluk Oranı, Su Emme ve Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

5x5x5 cm küp numunelere fiziksel özellikleri tespiti amacıyla boşluk oranı, su emme ve birim hacim ağırlık değerlerinin tespiti deneyleri yapılmıştır. Etüv kurusu ağırlığının tespiti için numuneler 48 saat boyunca etüvde 105 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Ardından 48 saat süreyle su banyosunda 20 °C'deki suyun içinde bekletildikten sonra bez yardımıyla yüzeyi silinerek doymuş kuru yüzey ağırlığı tartılmıştır. Son olarak Arşimed terazisi yardımıyla su içerisindeki ağırlığı bulunmuştur. Boşluk oranı, su emme ve birim hacim ağırlık deneylerinin sonuçları denklem (3.1), (3.2) ve (3.3) kullanılarak elde edilmiştir.

$$\text{Birim Ağırlık } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = \frac{\text{Etüv kuru ağırlığı}}{\text{Etüv kuru ağırlığı} - \text{Arşimed Ağırlığı}} \quad (3.1)$$

$$\text{Boşluk Oranı (\%)} = \frac{\text{Doygun kuru yüzey ağırlığı} - \text{Etüv kuru ağırlığı}}{\text{Doygun kuru yüzey ağırlığı} - \text{Arşimed ağırlığı}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{Su Emme} = \frac{\text{Doygun kuru yüzey ağırlığı} - \text{Etüv kuru ağırlığı}}{\text{Etüv kuru ağırlığı}} \times 100 \quad (3.3)$$

3.2.5 Böhme Aşınma Dayanımı

71x71x71 mm küp numunelere Böhme aşınma deneyi uygulanmıştır. 30 ± 1 devir/dk hızla dönmesi sağlanan yaklaşık 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş döner bir aşındırma diski üzerine konulmuştur (Şekil 3.7). Deneylerde $20 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ zımpara tozu (korundum) sürtünme şeridi üzerine serpilip çelik manivela aracılığı ile $294 \pm 3 \text{ N}$ ile yüklenmiştir. 22 devir sonunda otomatik olarak duran disk üzerinden zımpara tozu ve numune atıkları temizlenmiştir. Yeniden $20 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ zımpara tozu sürtünme şeridi üzerine serpilip numune düşey eksen etrafında 90° çevrilmiştir. Her numune için 22 devirden meydana gelen deney, numuneye 16 defa uygulanmıştır. Deney numunesi iyice temizlendikten sonra numune boyutları 0.01 mm hassasiyetle olan kumpas ile ölçülüp ve numune hassas terazide tartılır.



Şekil 3.7: Böhme aşınma deneyi

3.2.6 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Geopolimer harç serilerinin ultrases dalgalarının numune içerisindeki geçiş süresinin tespit edilmesi hedefiyle ultrases geçiş hızı testleri uygulanmıştır. Ultrases geçiş hızı testleri basınç deneyi için yapılacak bütün karışım serisindeki küp numuneler için yapılmıştır. Her bir küp numune için 2 farklı okuma değeri alınmış ve bu değerlerin ortalama sonucu hesaplanmıştır. Numunelerin pürüzlü olan yüzeylerine vazelin sürülmüştür. Cihazın başlıklarının dik ve etkili temas yapılmasına dikkat edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Test öncesi cihaza ölçümdeki cihaz başlıkları arasındaki mesafe girilmiştir. Ultrases geçiş hızı verileri m/sn cinsinden hesaplanmıştır. Ölçümler için kullanılan cihaz Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Ultrases geçiş hızı testinde kullanılan cihaz

3.2.7 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Uygulanan bu deney ile geopolimer beton numunelerinin yüksek sıcaklıktaki basınç dayanımı performansı incelenmiştir. Deney öncesi numuneler etüvde 24 saat kurutulmuştur. Deney tüm numunelere 56. günde uygulanmıştır. Numuneler 300 ve 600 °C sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Kül fırını dakikada 5°C sıcaklık artışını sağlanacak şekilde ayar girilmiştir. Belirlenen sıcaklığa ulaşılan numuneler 1 saat süreyle hedef sıcaklıkta bekletilmiştir. Numunelerin termal şoktan dolayı herhangi bir patlama, kırılma gibi etkilere maruz kalmaması adına kül fırınının içerisinde oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Oda

sıcaklığına ulaşan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası değişimini belirlemek için ağırlıkları ölçülerek ultrases geçiş hızı, ağırlık kaybı ve basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık için kullanılan cihaz şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3.9: Kül fırınına yerleştirilen numuneler

3.2.8 Donma Çözülme Etkisi

Geopolimer numuneler 56. günden sonra iklimlendirme kabinine sokularak donma çözülme testleri uygulanmıştır (Şekil 3.10). İklimlendirme kabinindeki geopolimer numuneler, bir döngü için 12 saat $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 12 saat $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bekletilerek donma çözünme döngüsü yaptırılmıştır. 180 donma çözünme döngüsüne maruz bırakılan geopolimer numunelerin fiziksel değişimleri incelenmiştir. Mekanik deneyler kapsamında basınç ve eğilme dayanımları, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılarak sonuçlar 56. günde alınan veriler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.10: Donma-çözülme deneyi

3.2.9 Sülfat Etkisi

Üretilen geopolimer numuneler 56. günün ardından oda sıcaklığı koşullarında ağzı kapalı plastik bir kaptaki %10 Sodyum Sülfat ve %10 Magnezyum Sülfat çözeltilerine 180 gün boyunca maruz bırakılmıştır. Ayrıca çözeltinin etkisinin zamanla azalması nedeniyle her 60 günde bir çözelti yenilenmiştir. Daha etkili bir sonuç için deneyden önce numuneler 24 saat süresince 105°C sıcaklığında etüvde kurutulmuştur. Ardından basınç ve eğilme dayanımları, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı deneyleri uygulanmıştır.



Şekil 3.11: Sülfat etkisindeki numuneler

3.2.10 SEM ve EDS Analizleri

Taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımı spektroskopisi analizleri Yıldız Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yaptırılmıştır. SEM ve EDS analizleri, üretilen geopolimer numunelerinin parçacık boyutları ve ana bileşenlerini belirlemek amacıyla uygulanmıştır.

3.2.11 XRD Analizi

Yıldız Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı tarafından gerçekleştirilen X-Işını kırınım yöntemiyle üretilen geopolimer numunelere mikro analizler yapılmıştır. XRD analizleriyle toz tanelerindeki mineral fazların dağılımı incelenmiştir.

3.3 Geopolimer Harçların Üretimi

Çeşitli lif çeşitleri ve oranlarında üretilen geopolimer harç numunelerinin sertleşmiş halde mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada 13 farklı numune karışımı hazırlanmış ve özellikleri incelenmiştir. Bağlayıcı malzeme çeşitleri ve oranları %40 metakaolin + %20 uçucu kül, + %20 yüksek fırın cürufu, ve + %20 kırmızı çamur belirlenmiştir. Agrega olarak ise eşit oranlarda (~%50) 2 mm çapındaki elekten geçen geri dönüşüm agregası ve mermer tozu kullanılmıştır. Üretilen numuneler lifsiz kontrol karışımı, polipropilen lif, poliamid lif ve çelik lifli karışımlar olmak üzere üretilmiştir. Her lif sınıfında hacimce %0.25, %0.50, %0.75, ve %1.00 olmak lif oranları kullanılmıştır. Numune karışım kodları Tablo 3.7'de gösterilmektedir.

Tablo 3.7: Üretilen geopolimer harçları

Kod	Bağlayıcı	Alkali Aktivatör	Agrega	Lif Çesidi ve Oranı
C	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	-
25SF	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.25 çelik lif
50SF	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.50 çelik lif
75SF	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.75 çelik lif
100SF	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %1.00 çelik lif
25PA	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.25 poliamid lif
50PA	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.50 poliamid lif
75PA	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.75 poliamid lif
100PA	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %1.00 poliamid lif
25PP	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.25 polipropilen lif
50PP	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.50 polipropilen lif
75PP	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %0.75 polipropilen lif
100PP	%40 MK, %20 KÇ, %20 UK,%20 YFC	NaOH+ Na ₂ SiO ₃	%50 GDA, %50 MT	Hacimce %1.00 polipropilen lif

3.3.1 Üretim Aşamaları

Hazırlanan tüm geopolimer karışımları için oranlar; alkali aktivatör karışımı/bağlayıcı 1,3 ve agrega/bağlayıcı 2,5 olarak belirlenmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit oranı %33, sodyum silikat oranı %66 olan solüsyon hazırlanmıştır. Deneyde belirlenen sodyum hidroksit molaritesi 12M'dir. Bu molaritenin oluşturulabilmesi için ise her 1 litrelik saf suya 480 g NaOH malzemesi ilave edilmiştir. Sodyum hidroksit karışımı üretim gününden 1 gün önce hazırlanmıştır. Daha sonra üretim anında sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı oluşturulup üretim yapılmıştır. Her bir seri geopolimer harçları için karışım miktarları Tablo 3.8-3.9'da verilmektedir.

Tablo 3.8: Üretilen geopolimer nummunelerin karışım miktarı

MK (g)	UK (g)	YFC (g)	KÇ (g)	GDA (g)	MT (g)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)
1800	900	900	900	5625	5625	1950	3900

Tablo 3.9: Lif katkısı oranları

Lif Çeşitleri	%0,25 için (g)	%0,50 için (g)	%0,75 için (g)	%1,00 için (g)
Çelik Lif	150	300	450	600
Poliamid Lif	30	60	90	120
Polipropilen Lif	30	60	90	120

Çalışma kapsamında hazırlanan tüm numuneler 24 saat boyunca oda sıcaklığında kalıpta bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler 60 °C' ye ayarlanmış fırında 72 saat süreyle sıcaklık kürü uygulanmıştır. Sıcaklık kürünün daha etkin bir şekilde gerçekleşmesi için tüm numuneler fırın poşetine konulmuştur.



Şekil 3.12: Üretilen tüm geopolimer harçları

4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

4.1 Boşluk Oranı, Su Emme ve Birim Hacim Ağırlık Değerleri

Üretilen numunelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi maksadıyla yapılan birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve su emme deneyi sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir. Genel olarak, kullanılan lif cinsi ve lif oranını numunelerin fiziksel özelliklerinde değişiklik göstermiştir. Lif varlığı su emme açısından hafif bir iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır. Lif takviyesi, liflerin su emme kapasitesi nedeniyle su emiliminin nispeten azaltılmasına yardımcı olur. Böylece liflerin varlığı matris tarafından emilen su miktarını azaltır [81]. Numunelerin üretilirken kullanılan mermer tozunun su emme özelliği oldukça fazladır. Buna bağlı olarak mineral katkılı betonların aksine mermer tozu katkılı betonlarda porozite ile basınç dayanımı arasında zıt bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Yani betonda mermer tozu kullanılması durumunda dayanımda azalma görülürken boşluk oranı değeri artmaktadır [82].

Birim hacim ağırlık açısından incelenen numunelerin referans numune (C) ile karşılaştırıldığında %-1,70 ile %2,98 oranında değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Hacimce %1,00 çelik lif içeren numuneler (100SF) en yüksek birim hacim ağırlık değerini gösterirken hacimce %1,00 polipropilen lif içerikli numunelerde (100PP) en düşük birim hacim ağırlık değeri görülmüştür. Sonuç olarak çelik lif içerikli numuneler en yüksek, polipropilen içerikli numuneler ise en düşük birim hacim ağırlık değerini vermiştir.

Hacimce %0,75 polipropilen lif ile üretilen numuneler (75PP) boşluk oranı açısından referans numune (C) ile karşılaştırıldığında %-4,66 oranında azalış gösterirken hacimce %0,25 polipropilen lif ile üretilen numuneler (25PP) ise referans numuneye kıyasla %2,09 oranında artış göstermiştir. Genel olarak lif kullanımı geopolimer serilerinin boşluk oranını düşürmüş ve lifsiz referans geopolimer numunesine kıyasla iyileştirme sağladığı anlaşılmıştır. Lifler arasında ise çelik lif içerikli numuneler en düşük boşluk oranlarını vererek diğer serilere nazaran oldukça iyi performans sergilemiştir.

Lif katkılı geopolimer harç numunelerin su emme özelliği değerlendirildiğinde genel olarak lif varlığının su emme oranını düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Lifsiz referans numune (C) ile karşılaştırıldığında lifli serilerin %-4,34 ile %4,03 arasında olduğu görülmektedir. Su emme oranı açısından çelik lif içerikli serilerin en düşük buna karşılık olarak poliamid içerikli serilerin ise en yüksek orana sahip olduğu raporlanmıştır. Boşluk oranı ve su emme değerleri arasında uyumluluk görülmektedir.

Tablo 4.1: Numunelerin boşluk oranı, su emme oranı ve birim hacim ağırlık verileri

Seri	Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	Boşluk Oranı (%)	Su emme oranı (%)
C	2,43	31,48	18,91
25SF	2,44	31,35	18,73
50SF	2,43	30,84	18,35
75SF	2,42	30,56	18,16
100SF	2,47	31,39	18,51
25PA	2,42	31,73	19,23
50PA	2,41	31,31	18,90
75PA	2,43	31,91	19,29
100PA	2,41	31,90	19,42
25PP	2,41	32,13	19,67
50PP	2,41	31,85	19,38
75PP	2,37	30,01	18,09
100PP	2,36	30,11	18,28

4.2 Basınç Dayanımları

Yapılan çalışmada tüm serilerin 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı deneyleri yapılarak basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Serilerin basınç dayanımları sonuçları ve referans

numuneye göre basınç değerlerindeki değişim oranları Şekil 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir. Genel olarak sonuçlar, lifsiz referans numune (C) ile kıyaslandığında lif içerikli numunelerin 7. gün ve 28. gün basınç dayanımlarının daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. 56. günde ise lif içerikli serilerin referans numuneye kıyasla önemli kayıplar yaşadığı sonucuna varılmaktadır. Ayrıca tüm seriler teker teker irdelendiğinde 7. günde 34,33 MPa basınç dayanımıyla ve %21,09’lık değişim oranıyla %1,00 polipropilen lif içerikli seri (100PP), 28. günde 36,47 MPa basınç dayanımıyla ve %26,86’lık değişim oranıyla %0,75 poliamid lif içerikli seri (75PA) ve son olarak 56. günde 38,50 MPa basınç dayanımıyla ve %4,78’lik değişim oranıyla %0,75 polipropilen lif içerikli seri (75PP) en yüksek basınç dayanımı değerlerini vermiştir.

Tablo 4.2: Basınç dayanımı sonuçları

Seri	7. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	28 Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	56. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)
C	28,35	-	28,75	-	36,74	-
25SF	30,38	7,16	32,21	12,04	34,81	-5,25
50SF	29,74	4,90	30,21	5,10	35,81	-2,53
75SF	31,18	9,96	32,31	12,40	30,92	-15,85
100SF	30,52	7,64	31,13	8,28	37,50	2,07
25PA	30,30	6,86	31,56	9,78	32,84	-10,63
50PA	28,46	0,39	32,90	14,45	33,23	-9,55
75PA	32,21	13,62	36,47	26,86	38,50	4,78
100PA	30,86	8,85	34,48	19,93	34,08	-7,24
25PP	27,25	-3,90	30,89	7,46	32,84	-10,62
50PP	32,12	13,30	33,34	15,97	33,94	-7,62
75PP	28,17	-0,63	33,04	14,92	33,44	-8,98
100PP	34,33	21,09	36,06	25,45	37,38	1,73



Şekil 4.1: Basınç dayanımı sonuçları

4.3 Eğilme Dayanımları

Üretilen tüm geopolimer seriler için 7. ve 56. günlerde yük-deplasman kontrolüne bakılmaksızın eğilme dayanım deneyleri yapılmıştır. 28. günde ise serilerin yük-deplasman verilerinin elde edilmesi adına bir test cihazına yerleştirilmiş ve eğilme dayanımı-deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Yük-deplasman kontrolü için kullanılan cihaz Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



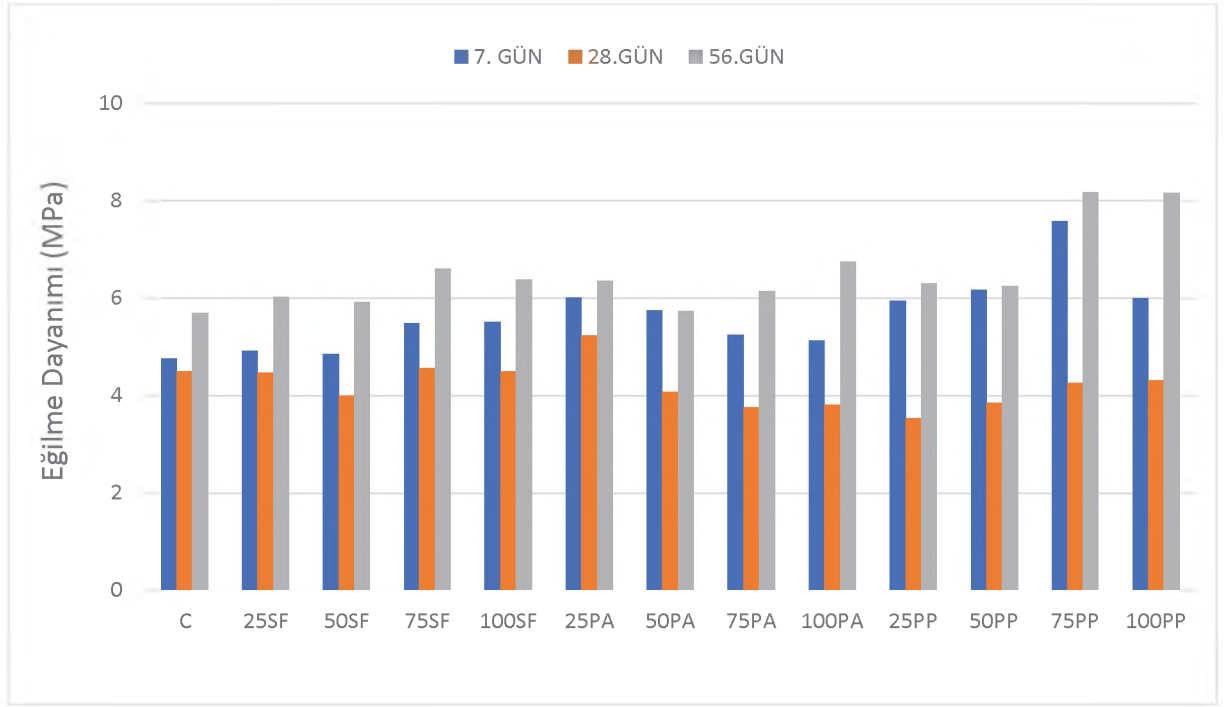
Şekil 4.2: Yük-deplasman kontrolü

7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.3'te ve Tablo 4.3'te gösterilmektedir. Genel olarak bakıldığında yapılan çalışmadaki eğilme dayanımları incelendiğinde literatür ile uyumlu ve sonuçlar olduğu anlaşılmaktadır [10-81].

7 ve 56 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde lif katkısının eğilme dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmektedir. %0,75 polipropilen lif katkılı seriler (sırasıyla 7,57 MPa ve 8.17 MPa olmak üzere) en büyük eğilme dayanımı sonuçlarını vermiştir. Üretilen geopolimer numunelerinde genel olarak lif oranının artışı eğilme dayanımını olumlu yönde etkilemiştir.

Tablo 4.3: Eğilme dayanımı sonuçları

Seri	7. Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	28 Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	56. Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)
C	4,76	-	4,50	-	5,70	-
25SF	4,92	3,45	4,47	-0,77	6,02	5,76
50SF	4,85	1,97	4,00	-11,19	5,92	3,91
75SF	5,48	15,27	4,56	1,42	6,60	15,84
100SF	5,51	15,76	4,50	0,04	6,38	11,93
25PA	6,01	26,35	5,23	16,31	6,35	11,52
50PA	5,75	20,94	4,08	-9,28	5,73	0,62
75PA	5,25	10,34	3,76	-16,40	6,14	7,82
100PA	5,13	7,88	3,82	-15,13	6,75	18,52
25PP	5,94	24,88	3,54	-21,44	6,30	10,70
50PP	6,16	29,56	3,86	-14,32	6,25	9,67
75PP	7,57	59,11	4,26	-5,41	8,17	43,42
100PP	6,00	26,11	4,31	-4,15	8,16	43,21

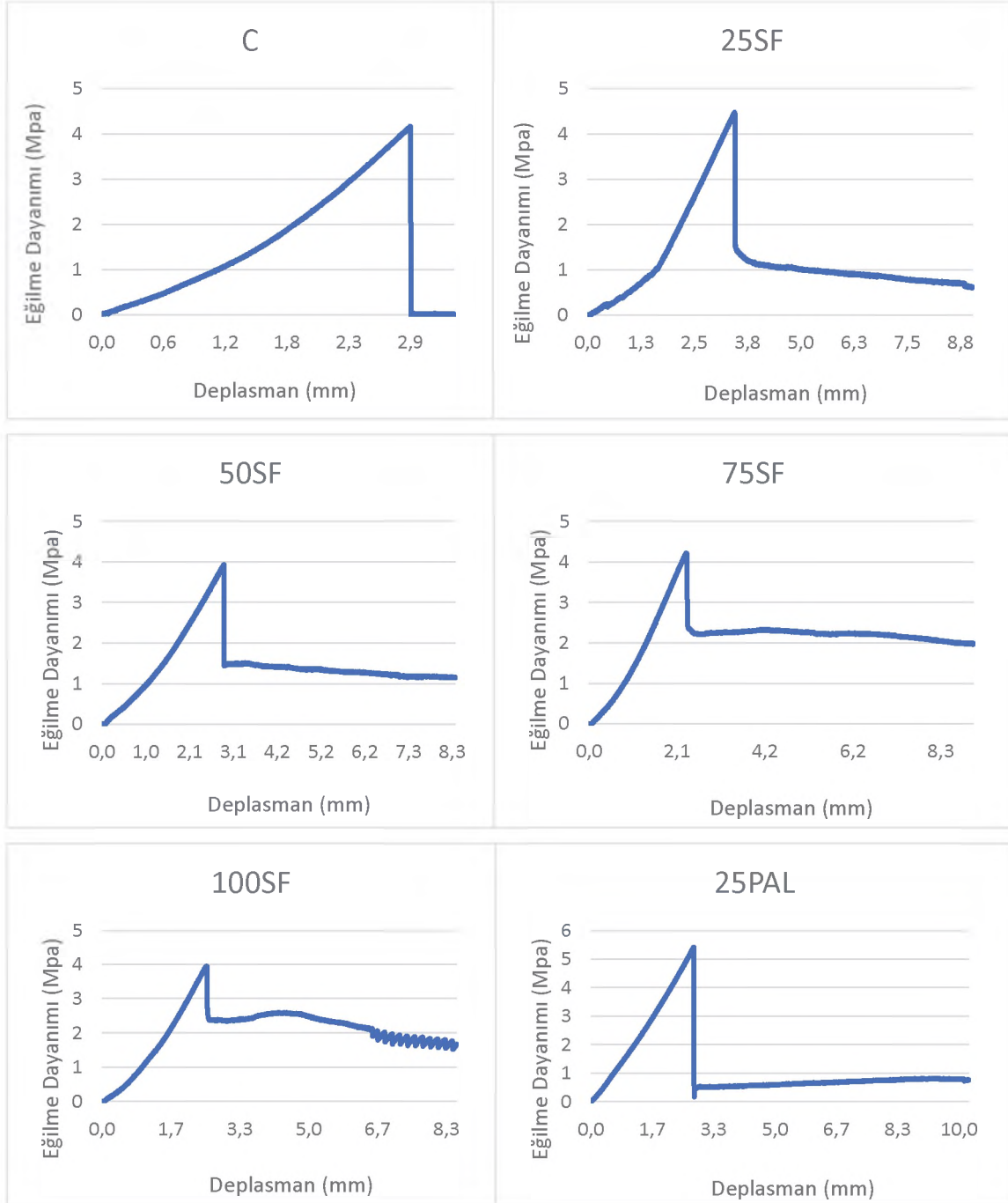


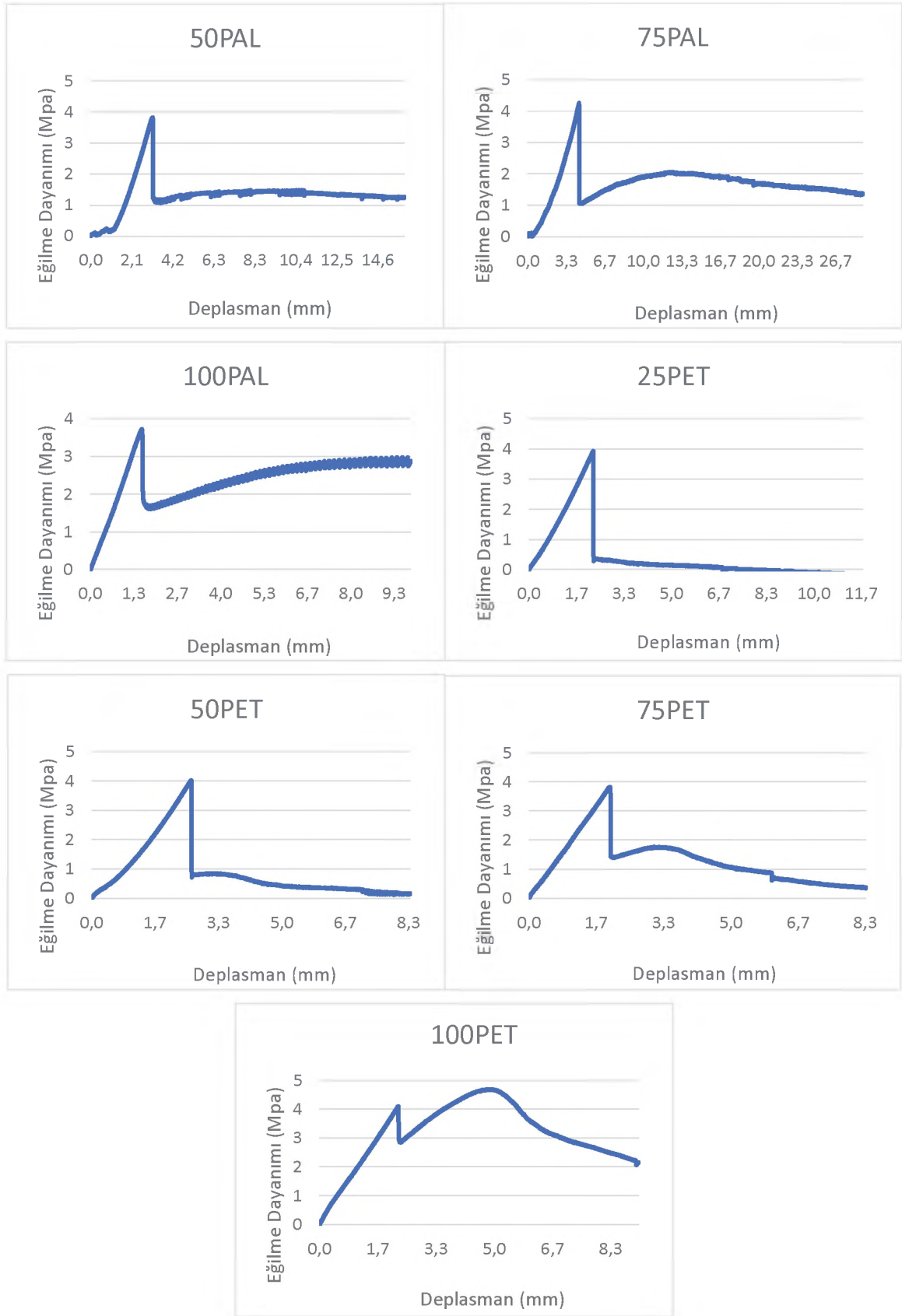
Şekil 4.3: Eğilme Dayanımı Sonuçları

4.3.1 Eğilme Dayanımı-Deplasman İlişkisi

28. günde deplasman kontrollü eğilme dayanımı testi uygulanan geopolimer serilerinin eğilme dayanımı-deplasman grafikleri Şekil 4.4'te verilmektedir. Polipropilen lif içerikli seriler diğer serilere nazaran daha yüksek deplasman özelliği göstermiştir. Polipropilen lif içerikli seriler ilk çatlama noktasından sonra lif etkisini göstererek yük almaya devam etmiş ve deplasman gelişimini arttırmıştır. Örneğin 100PP serisi, seriler arasında en iyi eğilme dayanımı-deplasman davranışı özelliği göstererek ilk çatlama noktası olan 2,25 mm değerinde 4,0 MPa olan eğilme dayanımı değerinden 4,6 MPa dayanım değerine çıkıp tekrardan 4,0 MPa değerlerine gelerek 5,65 mm deplasman performansı sergilemiştir. Polipropilen lif içerikli serilerin eğilme dayanımı altındaki gösterdikleri bu davranış modeli enerji yutma kapasitelerinin yüksek oluşu ile ilişkilendirilebilir. Lif katkılı tüm serilerde lif oranı artışının eğilme dayanımı-deplasman grafiği üzerinde olumlu etki ettiği anlaşılmaktadır. Hacimce %0,75 ve %1,00 lif içerikli tüm seriler ilk çatlamadan sonra artan ivme ile yük almaya devam ederken, %0,25 ve %0,50 lif içerikli serilerde bu durum söz konusu değildir.

Deney sonucunda elde edilen veriler ışığında bir genelleme yapılarak lif oranı artışının ilk çatlak anındaki deplasmanı düşürdüğü söylenebilir. Ayrıca lif oranındaki artış her lif çeşidi için geçerli olmak üzere daha yüksek seviyede enerji tutma kapasitesi sağlamaktadır. %1,00 polipropilen lif içerikli seriler dışında hiçbir seri ilk çatlak anındaki dayanımın üstüne çıkamamışlardır.





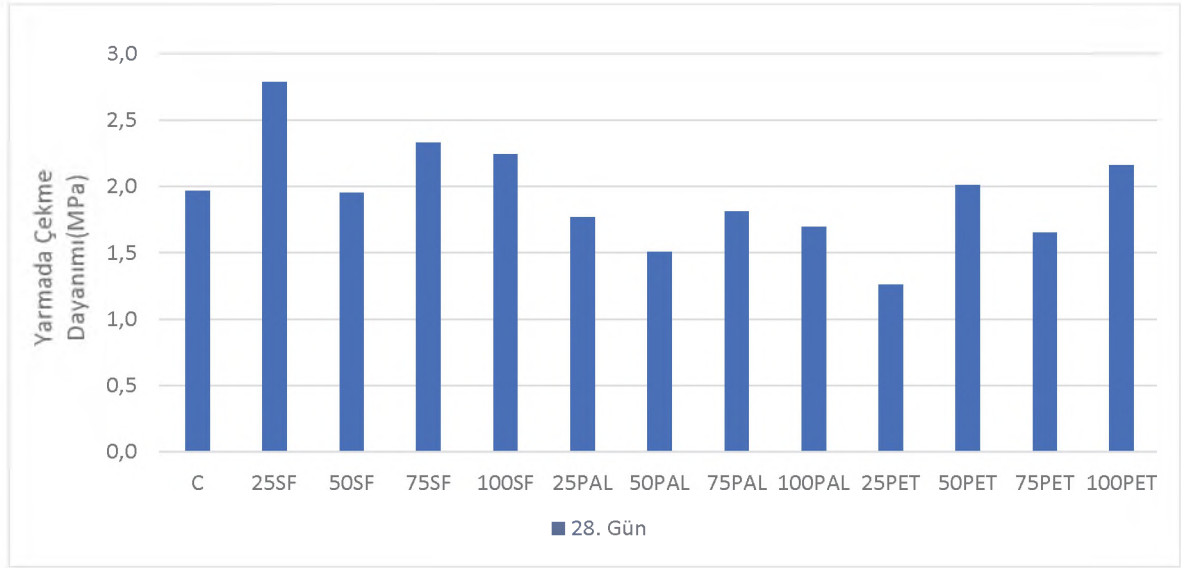
Şekil 4.4: Eğilme dayanımı-deplasman grafikleri

4.4 Yarmada Çekme Dayanımları

28. günde üretilen tüm seriler için yarmada çekme dayanımı testi uygulanmıştır. Serilerin yarmada çekme dayanımı sonuçları ve lifsiz kontrol numunesine kıyasla değişim oranları Şekil 4.5'te ve Tablo 4.4'te gösterilmektedir. Yarmada çekme performansına göre çelik lif içerikli seriler en iyi sonuçları sergilemişlerdir. Polipropilen ve poliamid lif içerikli seriler ise kontrol serisine göre daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür. Örnek vermek gerekirse hacimce %0,25 çelik lif içerikli numune (25SF) 2,79 MPa ve %41,59'luk artış oranıyla en iyi performansı sergilerken hacimce %0,25 polipropilen lif içerikli numune (25PP) 1,26 MPa ve %36,08'lik kayıp oranıyla en düşük performansı sergilemiştir. Seriler içerisinde lif kullanımının artışı çelik lifler için olumsuz sonuçlar verirken poliamid ve polipropilen lifler için bu durum söz konusu değildir. Sonuçlar ışığında lif kullanım oranında optimum bir değer belirlenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Tablo 4.4: Yarmada çekme dayanım sonuçları

Seri	Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)	Değişim Oranı (%)
C	1,97	-
25SF	2,79	41,59
50SF	1,95	-0,81
75SF	2,33	18,61
100SF	2,24	14,08
25PA	1,77	-10,03
50PA	1,51	-23,46
75PA	1,81	-7,93
100PA	1,70	-13,75
25PP	1,26	-36,08
50PP	2,01	2,27
75PP	1,65	-16,02
100PP	2,16	9,71



Şekil 4.5: Yarmada çekme dayanımı sonuçları

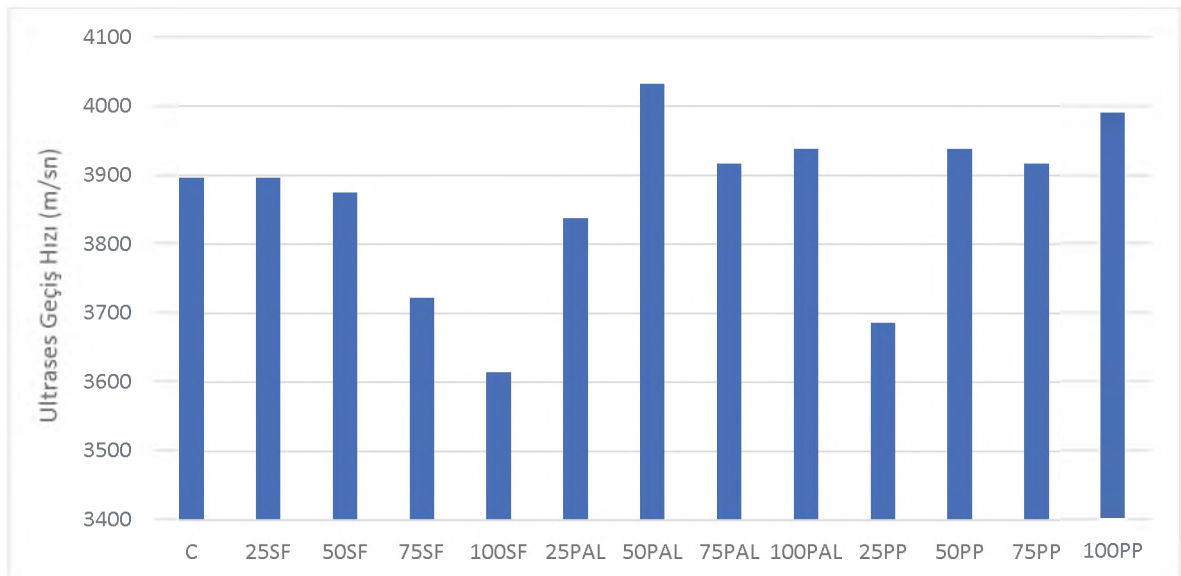
4.5 Ultrases Geçiş Hızı

Üretilen geopolimer harçların içindeki kusurları ve harçların içyapısındaki homojenliği görebilmek amacıyla ultrases geçiş hızı deneyi gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.5'te ve Şekil 4.6'da geopolimer serilerin 56. gündeki ultrases geçiş hızı deney sonuçları gösterilmektedir.

Çelik lif içerikli seriler referans seriye kıyasla ultrases geçiş hızında daha düşük bir performans sergilediği görülmektedir. Polipropilen ve poliamid lifli seriler ise referans seriye nazaran ultrases geçiş hızında zayıf bir iyileşme performansı gösterdiği söylenebilir. Hacimce %0,50 poliamid lif içerikli seri (50PAL) 4032 m/s ve %3,50'lik artış oranıyla en iyi performansı gösterirken, hacimce %1,00 çelik lif içerikli seri (100SF) 3614 m/s ve %7,22'lik düşüş oranıyla en kötü performans sergilemiştir. 28 günlük serilerin ultrases geçiş hızı sonuçlarına bakıldığında liflerin varlığı sonuçlarda anlamlı bir farklılık göstermemiştir [83].

Tablo 4.5: Ultrases geçiş hızları sonuçları

Seri	56 Günlük Ultrases geçiş hızları (m/s)	Değişim Oranı (%)
C	3896	-
25SF	3896	0,00
50SF	3875	-0,53
75SF	3722	-4,46
100SF	3614	-7,22
25PA	3837	-1,50
50PA	4032	3,50
75PA	3916	0,53
100PA	3938	1,08
25PP	3686	-5,39
50PP	3938	1,08
75PP	3916	0,53
100PP	3990	2,42

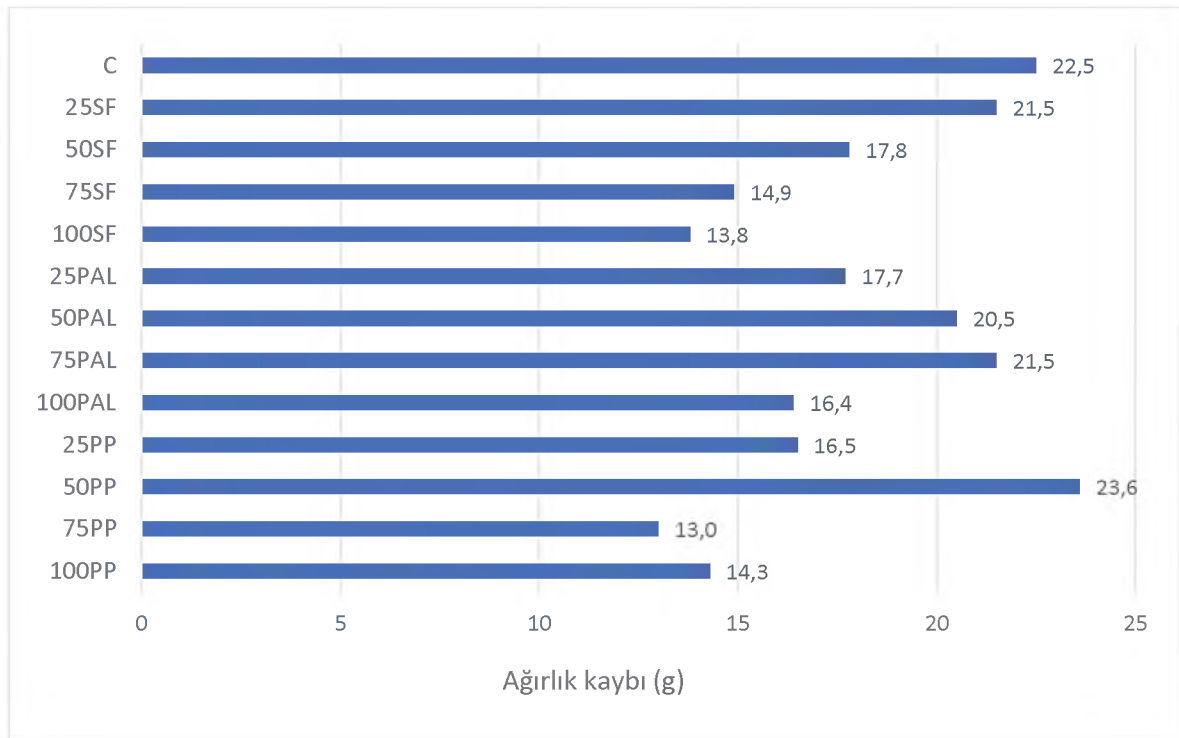


Şekil 4.6: Ultrases geçiş hızları sonuçları

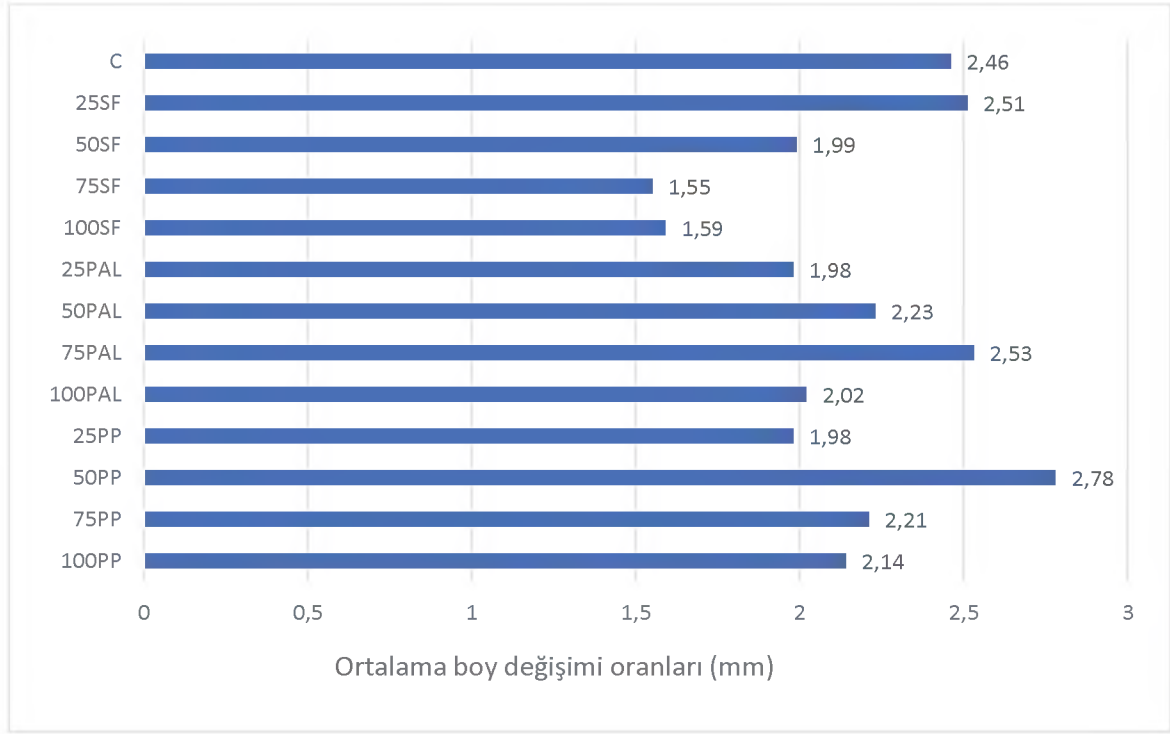
4.6 Aşınma Dayanımı

Bu çalışmada üretilmiş olan geopolimer harçların aşınmaya bağlı olarak boy ve ağırlık kayıpları sonuçları Şekil 4.7’de ve Şekil 4.8’de verilmiştir. Deney kapsamında ortaya çıkan sonuçlar incelendiğinde geopolimer numunelerde lif kullanımı aşınma direncini oldukça arttırmıştır. İncelenen numunelerin tamamında 3 mm'den daha az bir boy değişimi ve 25 g'dan daha az bir ağırlık kaybı olmuştur. Numunelerde kullanılan lif içeriğin artışı hem boy değişiminde hem de ağırlık kaybında iyileşme sağladığı görülmüştür. Bu durum, liflerin varlığının, aşınmaya daha fazla direnç göstermesiyle açıklanabilir. Deney sonuçları incelendiğinde önceki çalışmalar ile paralellik göstermektedir [84].

Çelik ve polipropilen lif içerikli numunelere nazaran poliamid lif içerikli numuneler daha düşük aşınma direnci performansı sergilemiştir. Numunelerin boy değişimi incelendiğinde 1,55 mm ile %0,75 çelik lif katkılı serilerin en düşük boyca kısalma gösterdiği, ağırlık kaybı incelendiğinde 13,0 g ile %0,75 polipropilen lif katkılı numunenin en az ağırlık kaybına uğradığı görülmüştür.



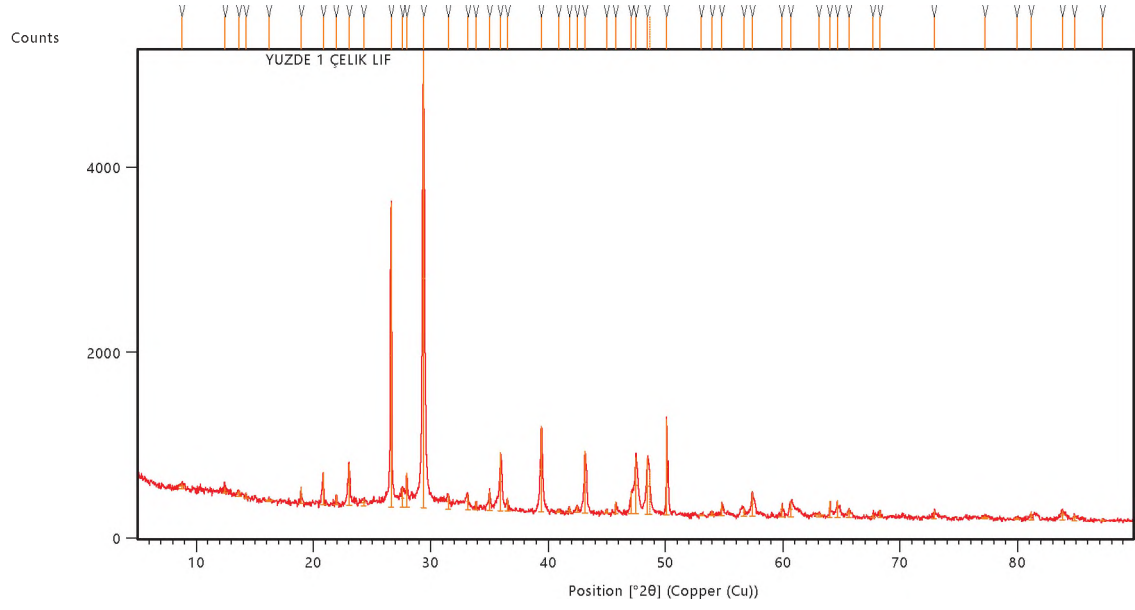
Şekil 4.7: Serilerinin aşındırma sonrası ağırlık kayıpları



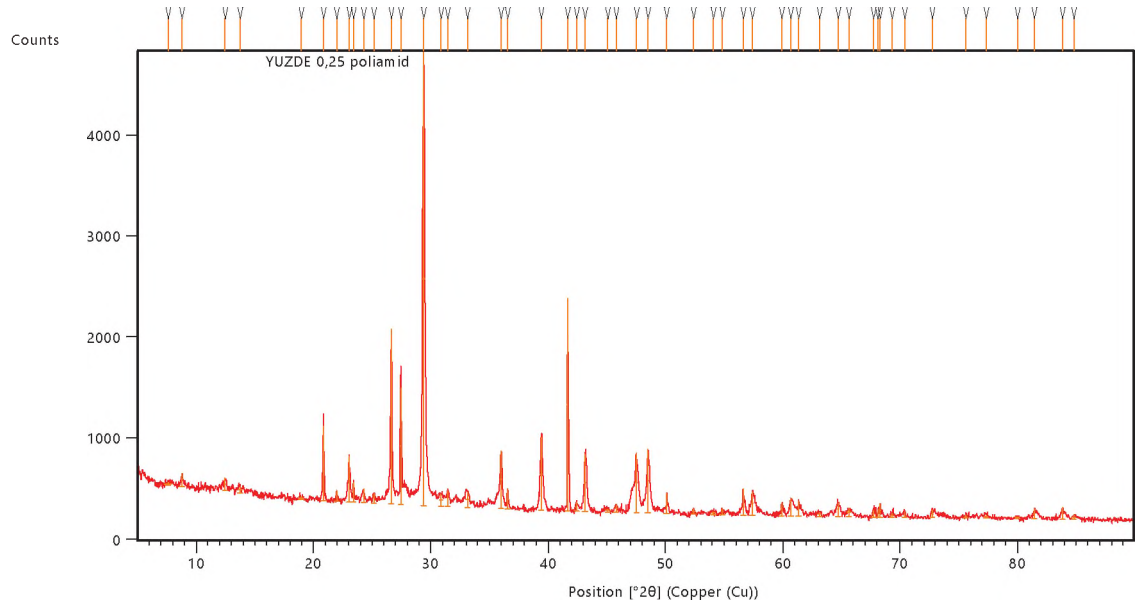
Şekil 4.8: Serilerinin aşınma nedeniyle ortalama boy kayıpları

4.7 XRD Analizleri

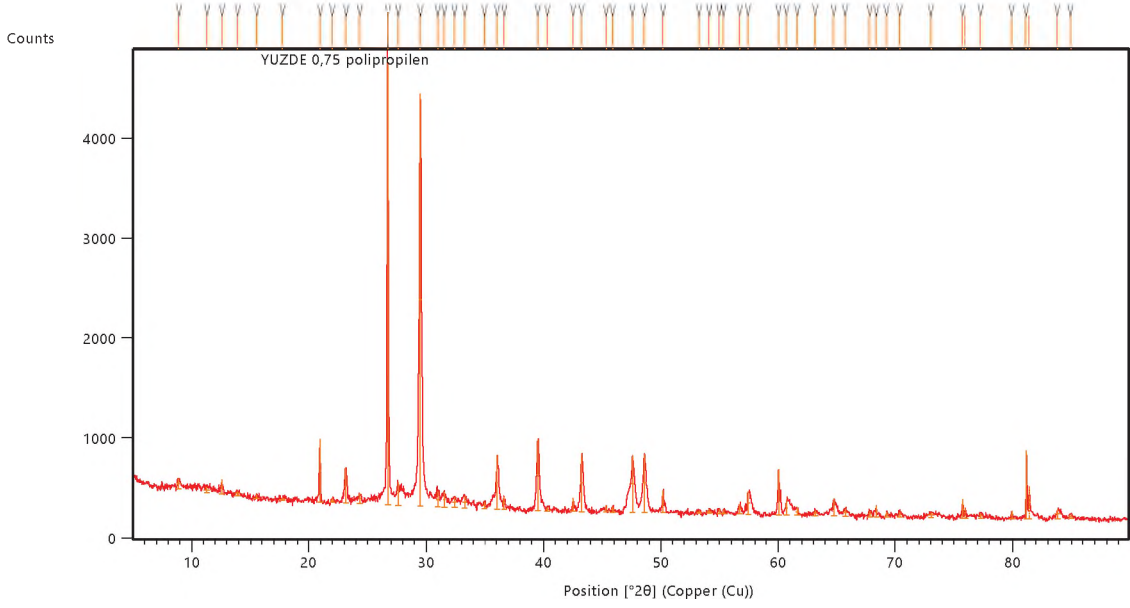
Tez kapsamında geopolimer serilerin mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesinde XRD analizi kullanılmıştır. Örneklerdeki amorf ve kristal yapılar hakkında bilgi edinilmiştir. Hazırlanan seriler içerisinde her lif çeşidi arasından eğilme dayanımı baz alındığında en iyi sonuçları veren numuneler belirlenerek XRD analizleri yapılmıştır. Çelik lif içerikli seriler arasında %1,00 çelik lif içerikli seri, poliamid lif içerikli seriler arasında %0,25 poliamid lif içerikli seri ve son olarak polipropilen lif içerikli seriler arasında ise %0,75 polipropilen lif içerikli serilerin XRD analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.9-4.11 arasında gösterilmiştir. Geopolimerizasyon işleminin ana bileşikleri, kuartz ve mullit olduğunu görülmüştür. Serilerin piklerinde kuartz varlığını saptanmış ve 29° - 30° arasında 2θ 'daki tipik amorf geopolimer jel fazına karşılık gelen geniş bant tespit edilmiştir. Alınan sonuçların önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür [10].



Şekil 4.9: %1,00 çelik lif içerikli numunenin XRD grafiği



Şekil 4.10: %0,25 poliamid lif içerikli numunenin XRD grafiği

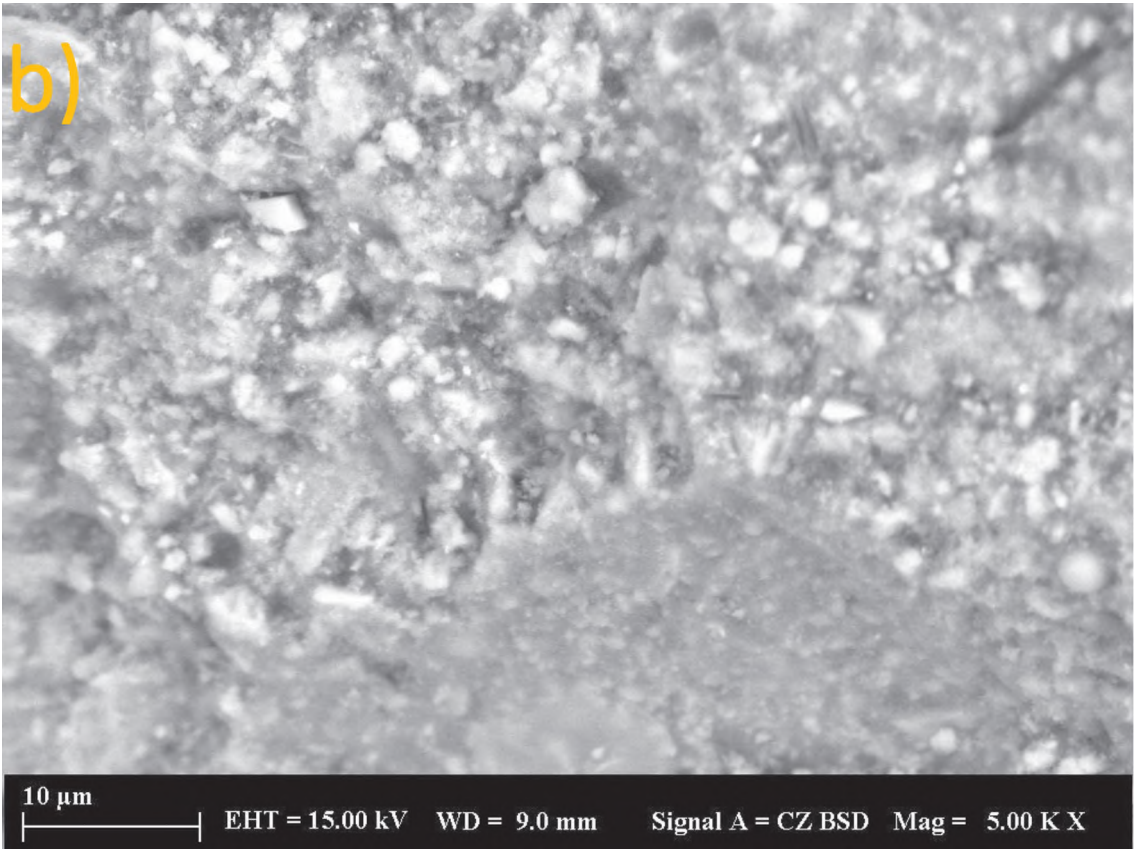
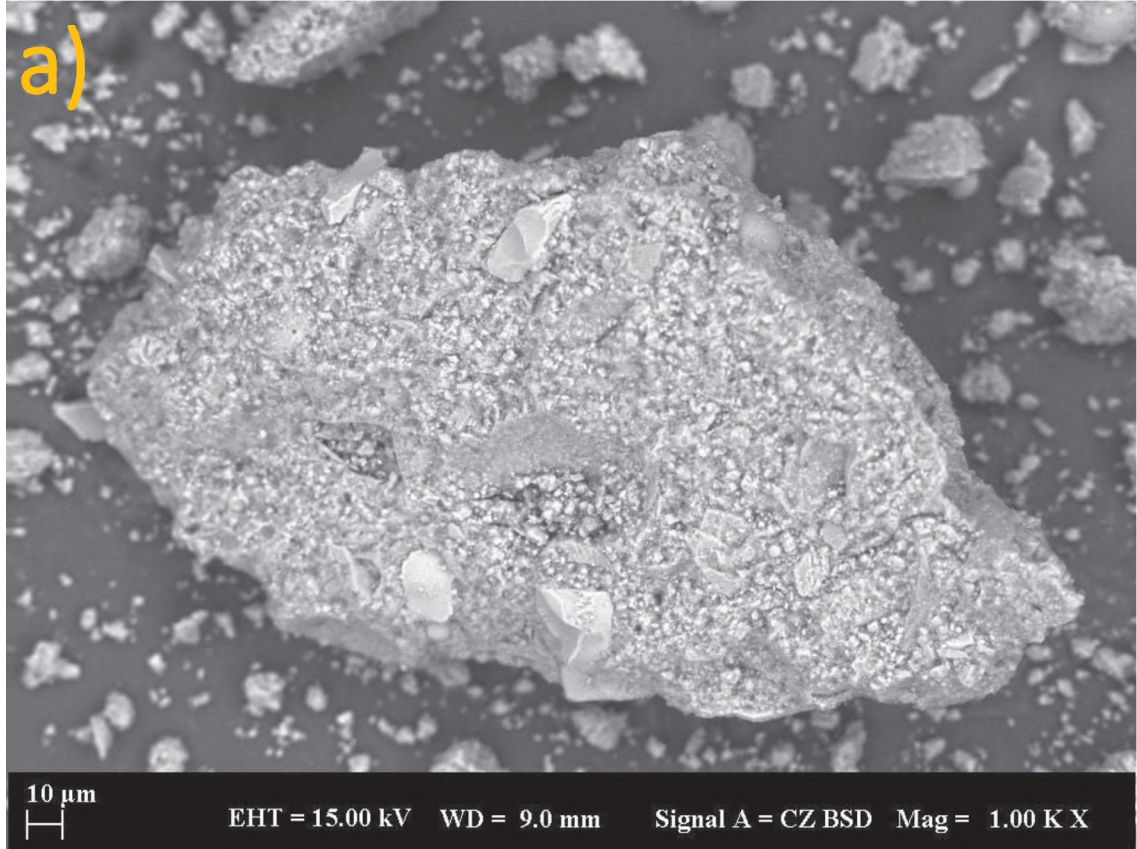


Şekil 4.11: %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin XRD grafiği

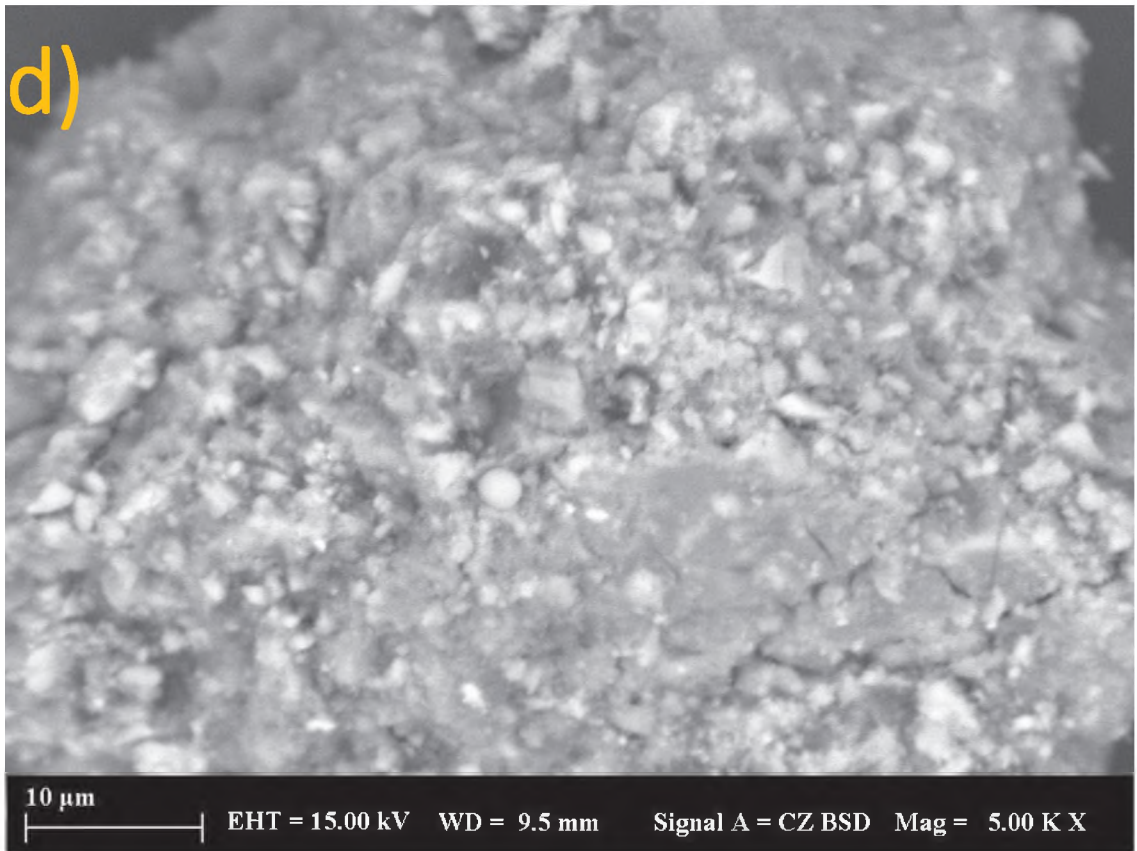
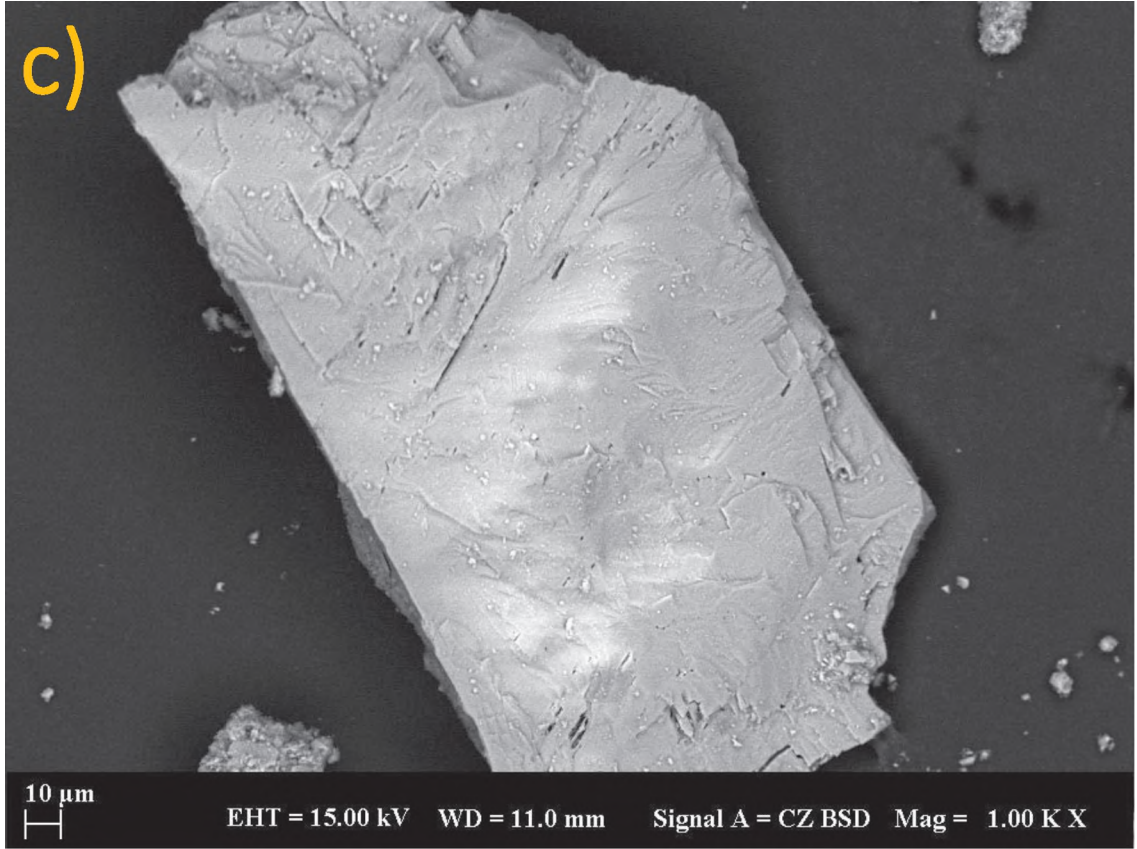
4.8 SEM Analizleri

Hazırlanan geopolimer harç numunelerin mikroyapısını incelemek, ve geopolimer yapısı ile lifler arasındaki bağlanma derecesi hakkında bir fikir edinebilmek amacıyla eğilme dayanımı açısından en iyi sonuçları veren 100SF, 25PAL ve 75PP numunelerine taramalı elektron mikroskobu analizleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.12-4.14 gösterilmiştir. Genel olarak tüm numunelerin kompakt, çatlak içermeyen ve homojen bir içyapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, matrisin bileşenler arasında iyi derecede bağlandığı gözlemlenmiştir. 5000X kadar büyütülmüş şekillerdeki SEM görüntülerinde geopolimer matrisin iyi derecede homojen olduğu anlaşılmaktadır.

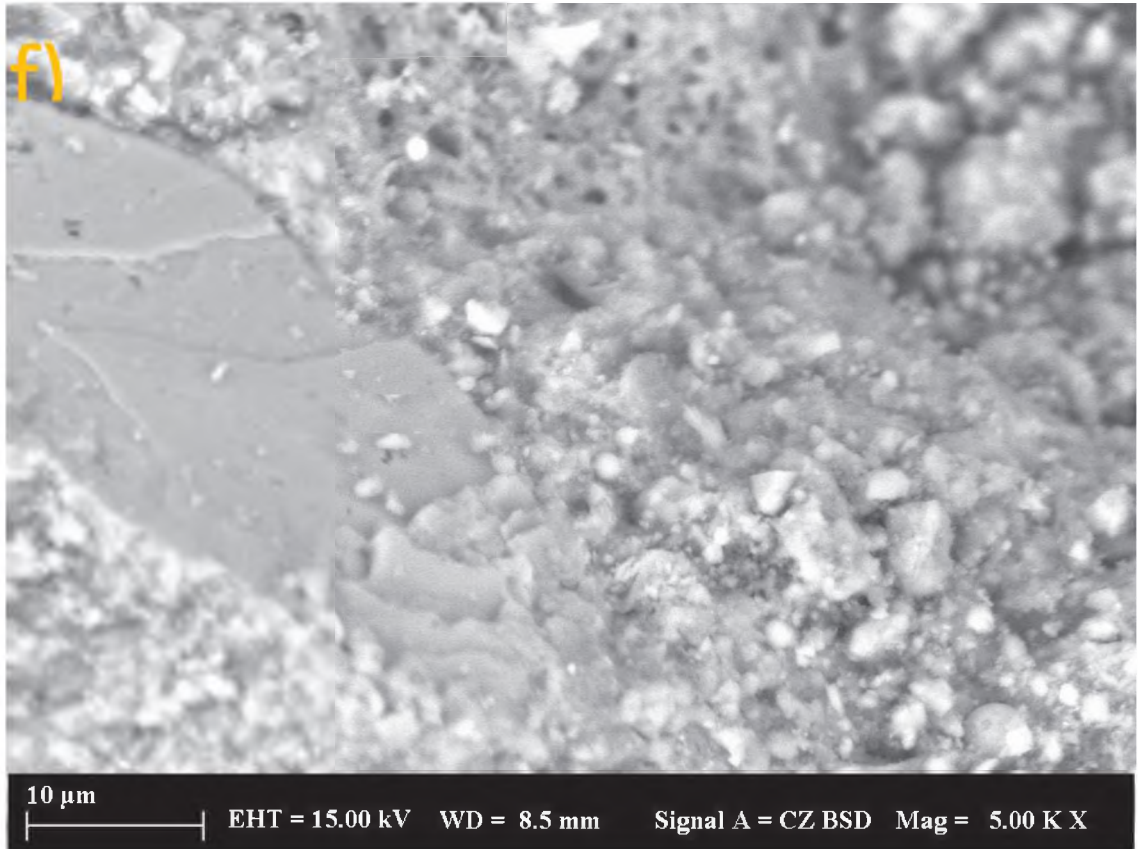
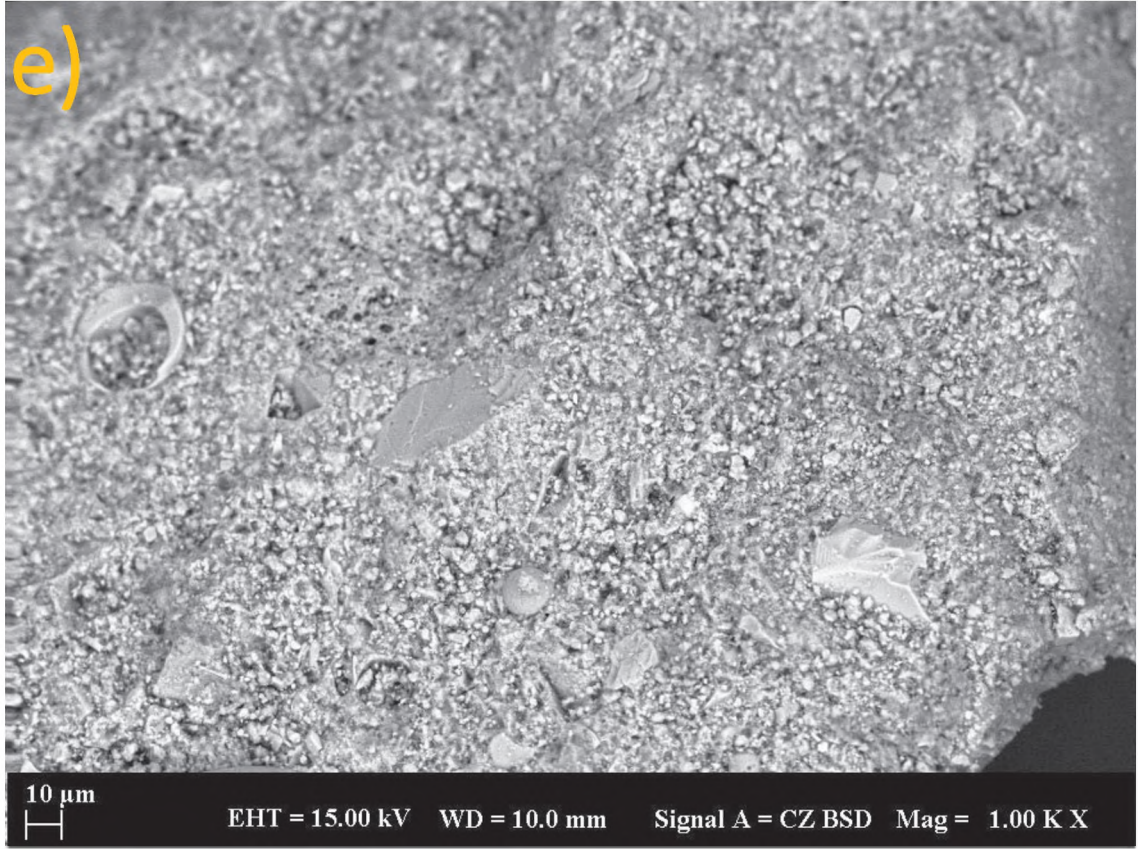
SEM analizinin dışında matrislerin içindeki elementlerin dağılımının belirlenmesi maksadıyla EDS analizleri uygulanmıştır. Matristeki ana ürünler Si ve Al' dir. Ayrıca sonuçlarda belirtilen silis yoğunluğu, kuartz varlığının bir işaretidir ve bu sonuç XRD analizlerinde verilen sonuçlarla uyumludur. Analizler Şekil 4.15-4.17' de gösterilmiştir.



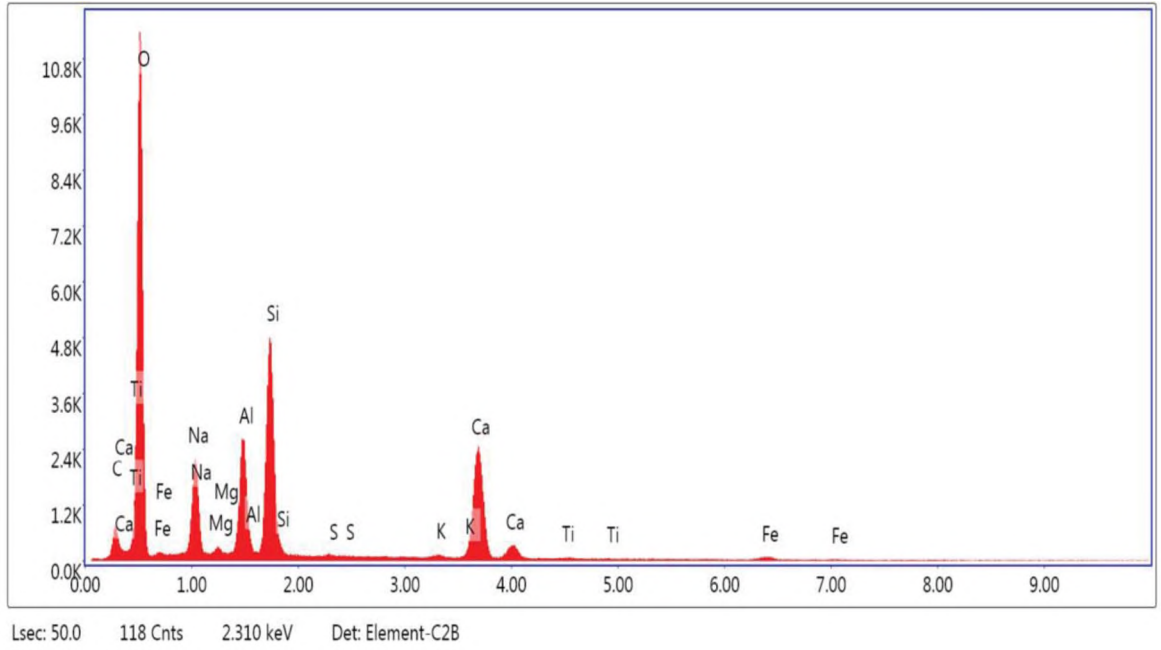
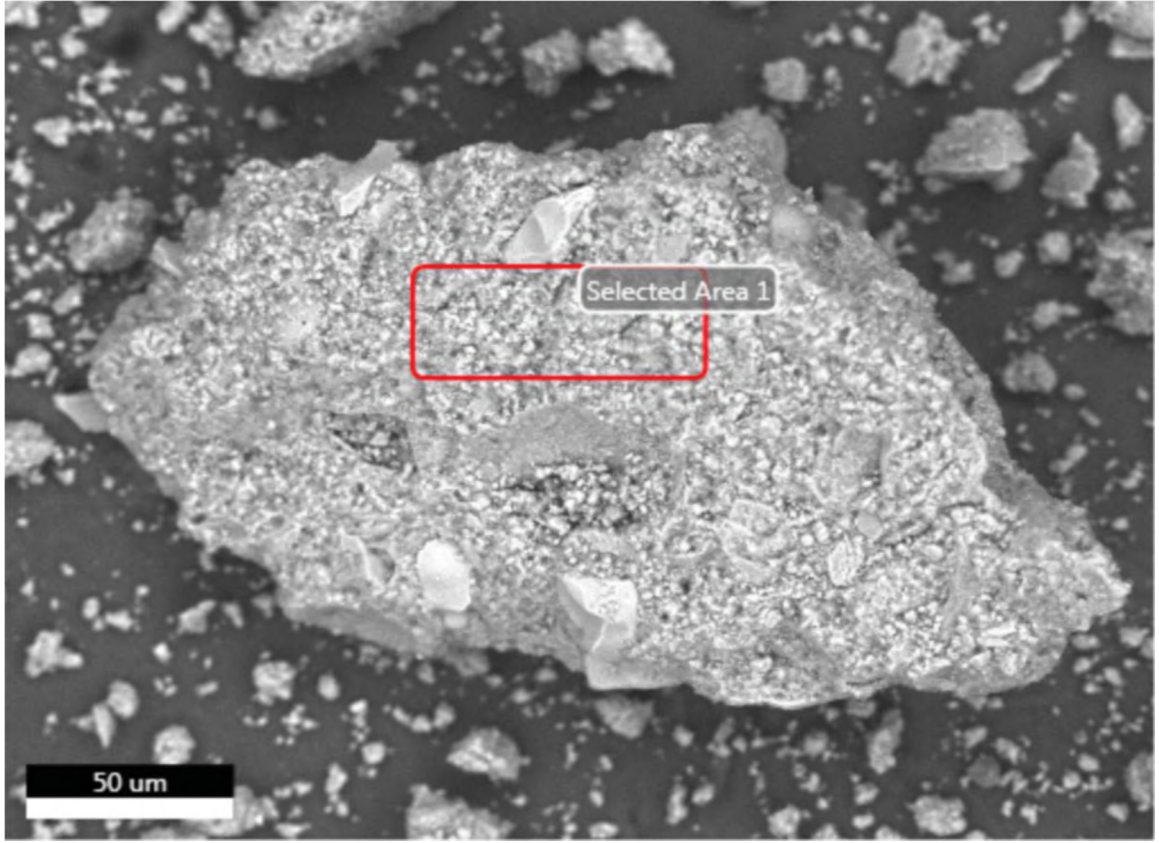
Şekil 4.12: %1,00 çelik lif içerikli numunenin a) 1000X b)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri



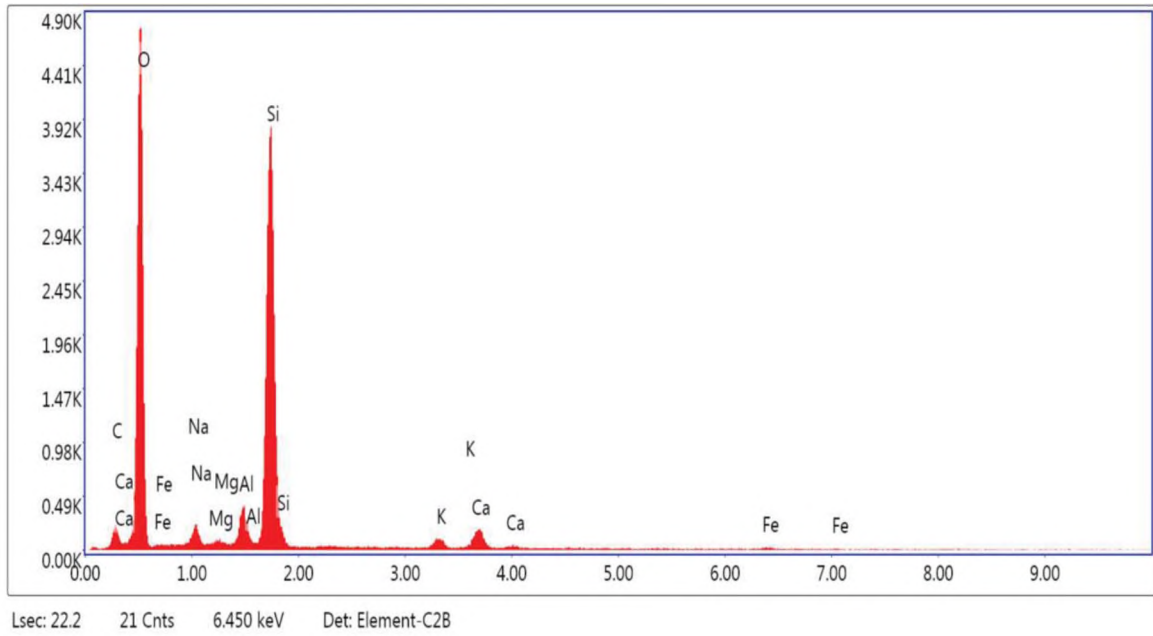
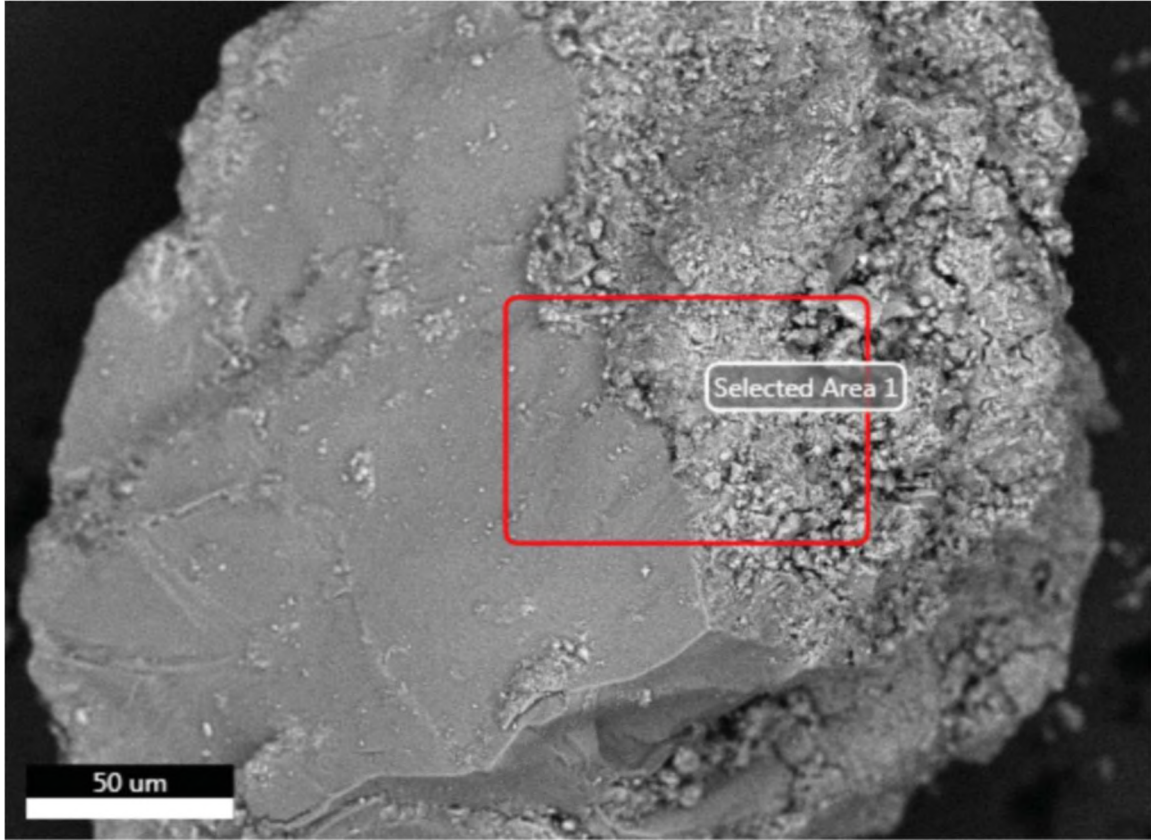
Şekil 4.13: %0,25 poliamid lif içerikli numunenin c) 1000X d)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri



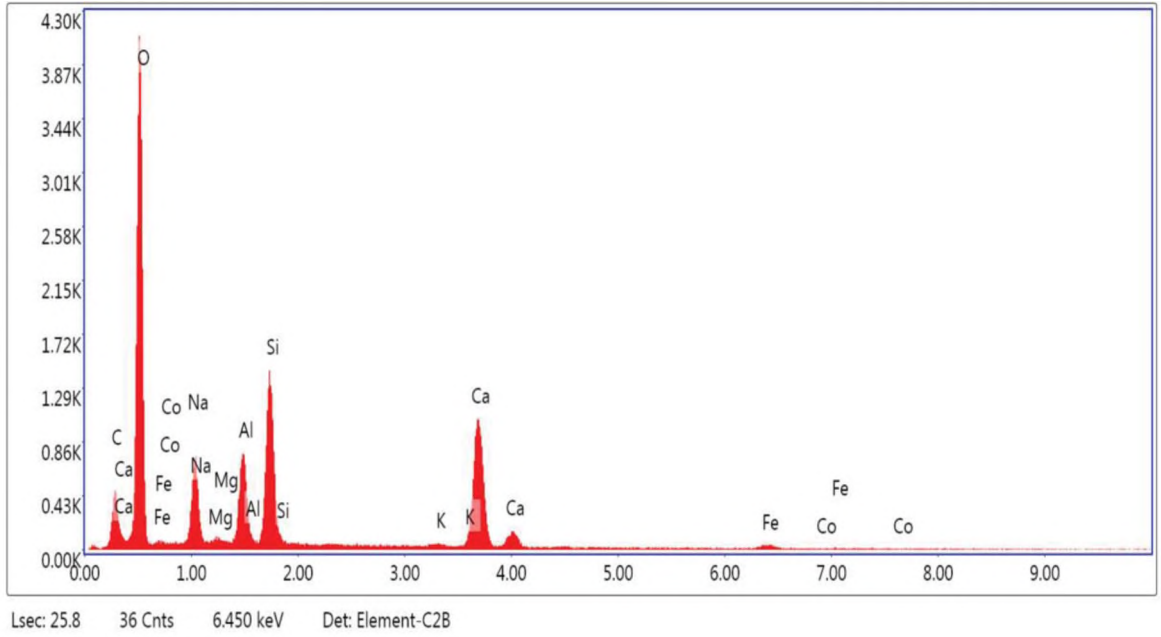
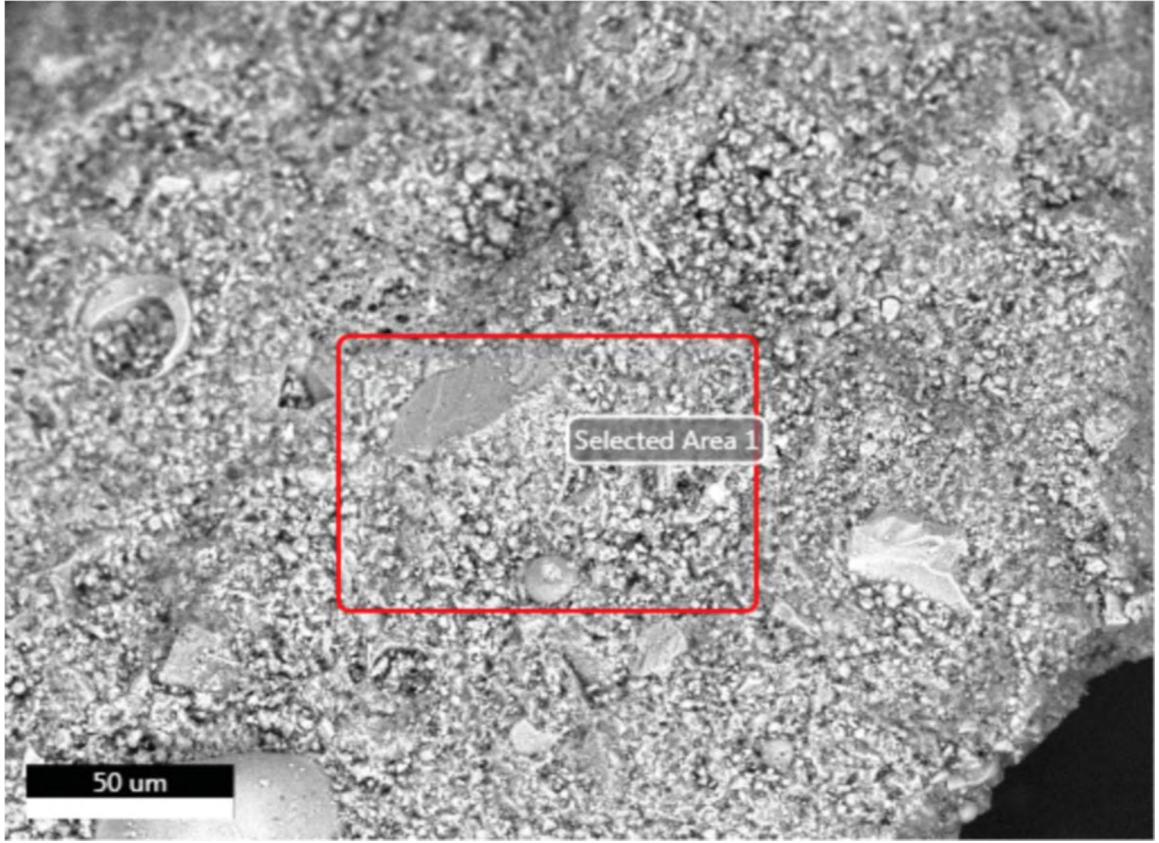
Şekil 4.14: %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin e) 1000X f)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 4.15: %1,00 çelik lif içerikli numunenin EDS verileri



Şekil 4.16: %0,25 poliamid lif içerikli numunenin EDS verileri



Şekil 4.17: %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin EDS verileri

4.9 Yüksek Sıcaklık Deneyleri

Üretilmiş geopolimer harç numuneleri 56. gün sonunda 105°C derecede 24 saat kurutulmak üzere etüvde bekletilmiştir. Numuneler kurutma işleminin ardından 300°C ve 600°C’lerde olmak üzere yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Deney sonrası numuneler soğumak üzere oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numunelerin soğumasının ardından basınç mukavemeti, eğilme mukavemeti, ultrases geçiş hızları ve ağırlık değişim oranları hesaplanmıştır. Yapılan deneyde 5x5x5 cm boyutlarında küp ve 4x4x16 cm boyutlarında prizma harçları kullanılmıştır.

4.9.1 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımı Gelişimi

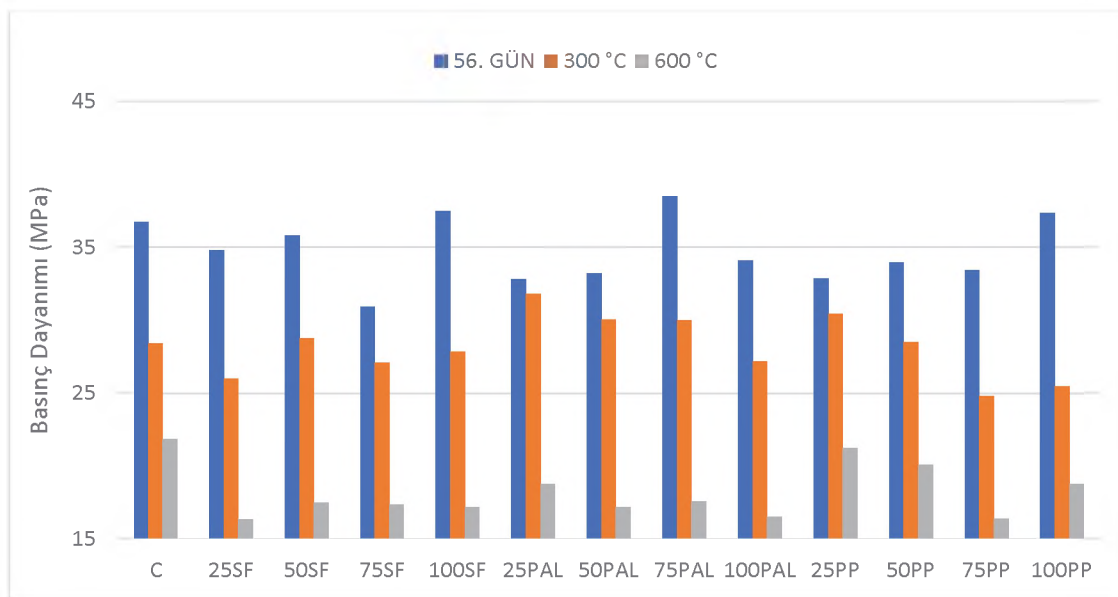
Numunelerin yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan basınç ve eğilme dayanımı verileri, 56 günlük veriler ile kıyaslaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.6’da ve Tablo 4.7’de gösterilmektedir. Her iki yüksek sıcaklık değerinde de basınç ve eğilme dayanımlarında yüksek seviyelerde düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle 600 °C’de basınç ve eğilme dayanımlarında kayda değer bir kayıp olduğu anlaşılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.18-4.19’da gösterilmektedir. Yüksek sıcaklık deneyinde, 600 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra numunelerde oluşan dehidrasyon ve akabinde suyun buharlaşması ve liflerin erimesi sonucu basınç ve eğilme dayanımlarının oldukça azaldığı anlaşılmaktadır. Deneye tabi tutulan tüm numunelerin yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan eğilme dayanımındaki azalışın, basınç dayanımındaki azalıştan daha fazladır. Eğilme dayanımında görünen bu büyük kayıp, yüksek sıcaklık sonucu yapıdaki mikro düzeydeki çatlakları büyümesi ve yeni mikro çatlaklar oluşu şeklinde açıklanmıştır [85]. Numunelerin dayanımlarının azalmasının en önemli sebeplerinden biri ise yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerin içerdiği alüminosilikat jel yapısının kristalleşmesidir. Akabinde yüksek sıcaklığın neden olduğu kristalleşmeden dolayı gerilme oluşur ve gerilme sonucunda numunelerin içyapısında ayrışmalar oluşur. Bu ayrışmalar, numunelerde çatlakların oluşmasına neden olmuştur [86].

Basınç dayanımı sonuçları irdelendiğinde tüm serilerde 56. gündeki dayanımlara kıyasla kayıplar görülmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış lifsiz kontrol numunesinin 300°C ve 600°C’de dayanım kayıpları sırasıyla %22,62 ve %40,42 olmuştur. Fakat bir genelleme yapılarak lifsiz kontrol numunesinin lifli numunelere kıyasla nispeten iyi bir performans gösterdiği görülmektedir. Elde edilen veriler ışığında yüksek sıcaklık etkisindeki geopolimer harçlarında lif kullanımının basınç dayanımına etkisinin oldukça sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. Polipropilen lif içerikli seriler, çelik ve poliamid lif içerikli serilere nazaran daha iyi performans göstermiştir. Polipropilen lif içerikli seriler 300°C’de gösterdiği basınç dayanımı kayıpları %7,31 ile %31,86, 600°C’de gösterdiği basınç dayanımı kayıpları %35,23 ile %50,84 arasındadır. Tüm seriler içerisinde 300°C en iyi basınç dayanımı performansını %3,11’lik kayıpla 25PA, 600°C en iyi basınç dayanımı performansını %35,23’lük kayıpla 25PP sergilemiştir. Polipropilen lifler 170°C’de eriyip harç içinde nem için kaçış yolu oluşturması ile birlikte yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımı arttırmıştır.

Eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında 56. gündeki dayanımlara göre önemli seviyelerde kayıplar görülmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış lifsiz kontrol numunesinin 300°C ve 600°C’deki dayanımı sırasıyla %1,40’lık artış ve %65,61’lik kayıp şeklinde olmuştur. Geopolimer harç numunelerinde lif kullanımının eğilme dayanımı oldukça düşürdüğü anlaşılmaktadır. Çelik lif içerikli seriler, polipropilen ve poliamid lif içerikli serilere nazaran daha iyi performans göstermiştir. Çelik lif içerikli seriler 300°C’de gösterdiği eğilme dayanımı kayıpları %14,78 ile %31,52, 600°C’de gösterdiği basınç dayanımı kayıpları %55,07 ile %60,76 arasındadır. Tüm seriler içerisinde 300°C en iyi eğilme dayanımı performansını %1,40’lık artışla C, 600°C en iyi eğilme dayanımı performansını %55,07’lik kayıpla 50SF sergilemiştir.

Tablo 4.6: Yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan basınç dayanımları

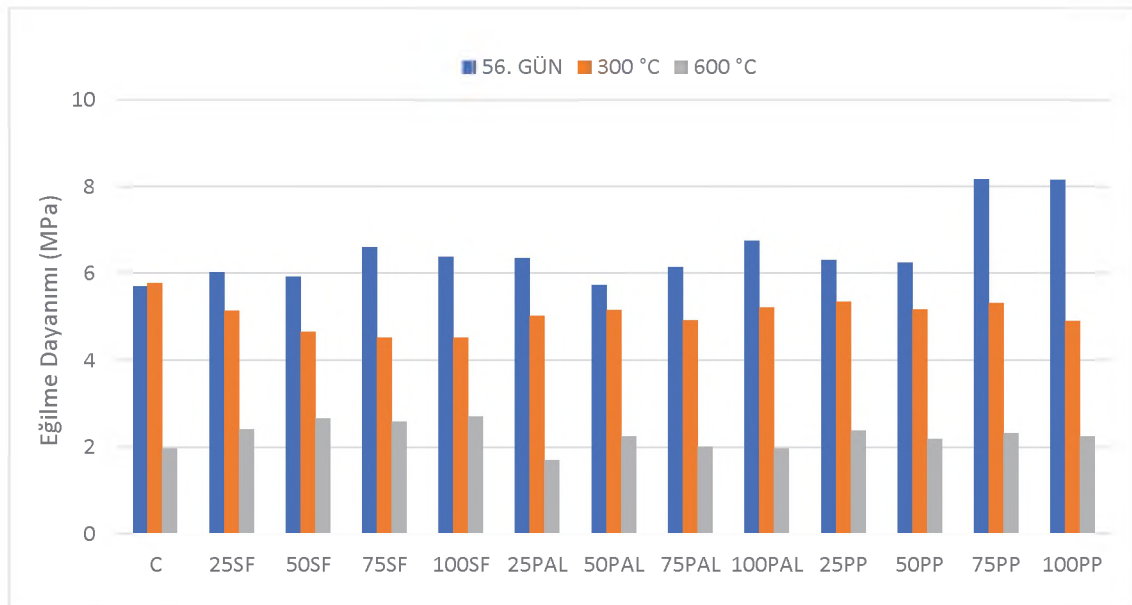
Seri	56. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	300 °C Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	600 °C Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)
C	36,74	28,43	-22,62	21,89	-40,42
25SF	34,81	26,01	-25,28	16,37	-52,97
50SF	35,81	28,78	-19,63	17,54	-51,02
75SF	30,92	27,09	-12,39	17,37	-43,82
100SF	37,50	27,85	-25,73	17,20	-54,13
25PA	32,84	31,82	-3,11	18,82	-42,69
50PA	33,23	30,03	-9,63	17,23	-48,15
75PA	38,50	30,02	-22,03	17,62	-54,23
100PA	34,08	27,21	-20,16	16,58	-51,35
25PP	32,84	30,44	-7,31	21,27	-35,23
50PP	33,94	28,51	-16,00	20,11	-40,75
75PP	33,44	24,83	-25,75	16,44	-50,84
100PP	37,38	25,47	-31,86	18,80	-49,71



Şekil 4.18: Yüksek sıcaklık altındaki numunelerin basınç dayanımları

Tablo 4.7: Yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan eğilme dayanımları

Seri	56. Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	300 °C Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	600 °C Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)
C	5,70	5,78	1,40	1,96	-65,61
25SF	6,02	5,13	-14,78	2,40	-60,13
50SF	5,92	4,65	-21,45	2,66	-55,07
75SF	6,60	4,52	-31,52	2,59	-60,76
100SF	6,38	4,52	-29,15	2,71	-57,52
25PA	6,35	5,02	-20,94	1,70	-73,23
50PA	5,73	5,14	-10,30	2,24	-60,91
75PA	6,14	4,92	-19,87	2,00	-67,43
100PA	6,75	5,21	-22,81	1,97	-70,81
25PP	6,30	5,34	-15,24	2,38	-62,22
50PP	6,25	5,17	-17,28	2,18	-65,12
75PP	8,17	5,32	-34,88	2,32	-71,60
100PP	8,16	4,90	-39,95	2,24	-72,55



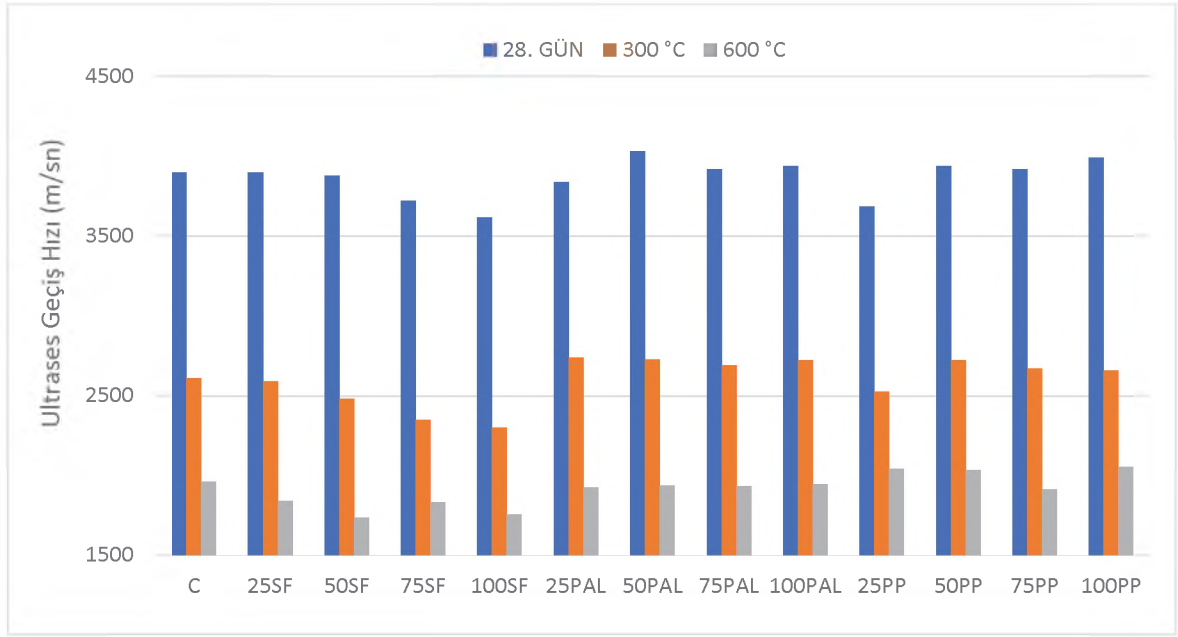
Şekil 4.19: Yüksek sıcaklık altındaki numunelerin eğilme dayanımları

4.9.2 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Ultrases Geçiş Hızları

Yüksek sıcaklık deneyine maruz kalmış geopolimer numunelerdeki suyun buharlaşması ve dolayısıyla gözenek yapısının büyümesi sonucu boşluklar oluşmaktadır. Bu oluşan boşlukların etkisinden dolayı ultrases geçiş hızlarının değerlerinde bir azalma söz konusu olmuştur [87]. Tablo 4.8 ve Şekil 4.20’de geopolimer harç numunelerinin 300°C sonrası, 600°C sonrası ve 56 gündeki ultrases geçiş hızları gösterilmektedir. Tablo 4.8’de ayrıca her bir serinin deney öncesi ve deney sonrasında ultrases geçiş hızı değişim oranı da gösterilmektedir. Serilerin sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızlarında ciddi azalmalar olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca lifsiz referans numuneye göre lif içerikli numunelerin ultrases geçiş hızı kayıplarının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Geopolimer numunelerde ultrases geçiş hızı sonuçlarında 300°C sıcaklıkta %28,59 ile %36,84 arasında azalma ve 600°C sıcaklıkta %44,44 ile %55,10 arasında azalma meydana gelmiştir.

Tablo 4.8 Yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan ultrases geçiş hızları

Seri	28 Günlük ultrases geçiş hızları (m/s)	300 °C Sonrası ultrases geçiş hızları (m/s)	Değişim Oranı (%)	600 °C Sonrası ultrases geçiş hızları (m/s)	Değişim Oranı (%)
C	3896	2611	-32,98	1966	-49,54
25SF	3896	2591	-33,50	1845	-52,64
50SF	3875	2485	-35,87	1740	-55,10
75SF	3722	2351	-36,84	1839	-50,59
100SF	3614	2305	-36,22	1764	-51,19
25PA	3837	2740	-28,59	1929	-49,73
50PA	4032	2729	-32,32	1942	-51,84
75PA	3916	2692	-31,26	1940	-50,46
100PA	3938	2725	-30,80	1949	-50,51
25PP	3686	2529	-31,39	2048	-44,44
50PP	3938	2725	-30,80	2039	-48,22
75PP	3916	2671	-31,79	1917	-51,05
100PP	3990	2660	-33,33	2058	-48,41

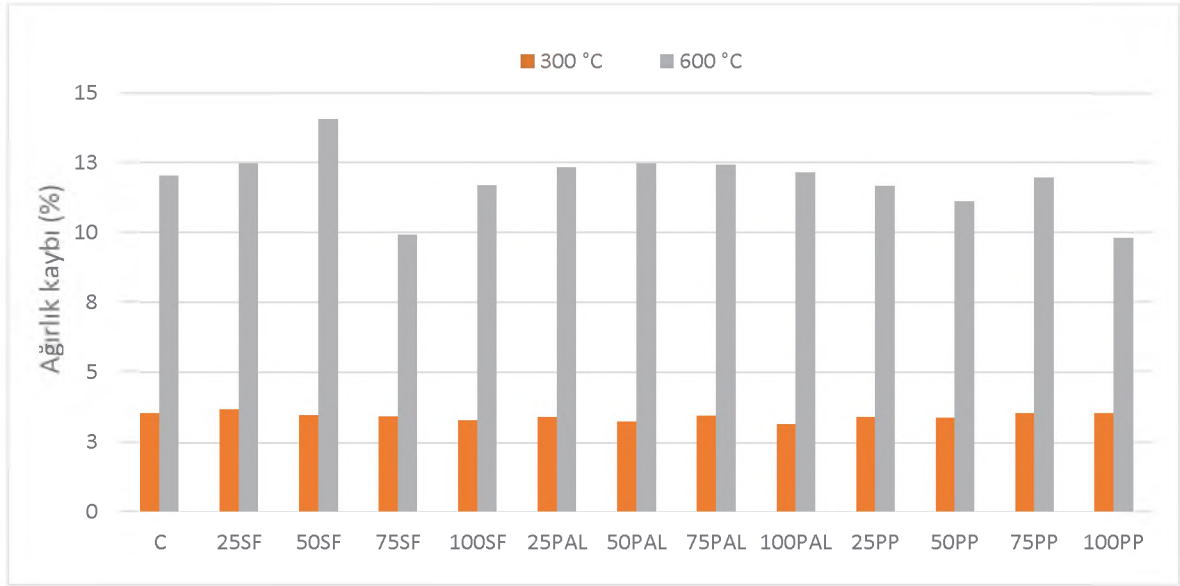


Şekil 4.20: Yüksek sıcaklık altındaki numunelerin ultrases geçiş hızları

4.9.3 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Ağırlık Değişimleri

Yüksek sıcaklıkların etkisi sonucu ağırlık kayıp yüzdeleri Şekil 4.21’de gösterilmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte ağırlık kaybı oranında da artış olduğu görülmüştür. Lifli geopolimer harçlarda lifsiz kontrol numunesi karşılaştırıldığında anlamlı bir değişim olmazken poliamid lifli harçların nispeten en kötü performansı gösterdiği, polipropilen lifli harçların ise nispeten en iyi sonucu verdiği söylenebilir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış kontrol numunesinin 300°C’deki ağırlık kaybı %3,55 olurken 600°C’deki ağırlık kaybı %12,04 olmuştur. Tüm seriler incelendiğinde yüksek sıcaklık etkisindeki geopolimer harçlarda 300°C sıcaklıkta ağırlık kaybı oranları %3,15 ile %3,68 arasında ve 600°C sıcaklıkta ağırlık kaybı oranları %9,81 ile %14,05 arasında olduğu görülmüştür.

Sıcaklık seviyesinin yükselmesi ile birlikte geopolimer örneklerinde dehidrasyon reaksiyonu oluşarak nem kaybı görülür. Oluşan reaksiyon sonucu yapıda çeşitli bozulmalara ve dolayısıyla ağırlıkta azalmalara sebebiyet verir [79].



Şekil 4.21: Yüksek sıcaklık etkisindeki numunelerin ağırlık değişimi oranları

4.10 Donma Çözülme Deneyi

180 donma çözülme döngüsüne tabi tutulan geopolimer harç numuneler donma çözülme kabininin içine yerleştirilmiştir. Her döngü 12 saat -20 °C ve 12 saat +20 °C donma-çözülme etkisine maruz bırakılarak tamamlanmıştır. Döngüler tamamlandığında kabinden alınan numunelerin eğilme ve basınç dayanımı ultrases geçiş hızları ve ağırlık kaybı deneyleri yapılmıştır.

4.10.1 Donma Çözülme Etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımı Gelişimi

180 döngülük donma çözülme etkisine maruz bırakılan geopolimer numunelerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Tablo 4.9'da gösterilmektedir. Donma çözünme etkisine maruz bırakılan numuneler, 56 günlük numuneler ile karşılaştırması yapılmıştır. Genel olarak bakıldığında geopolimer harçlarda kullanılan liflerin hem lif çeşidi açısından hem de lif oranı açısından donma çözünme dayanımlarını anlamlı bir şekilde etkilemediği sonucu çıkarılmıştır.

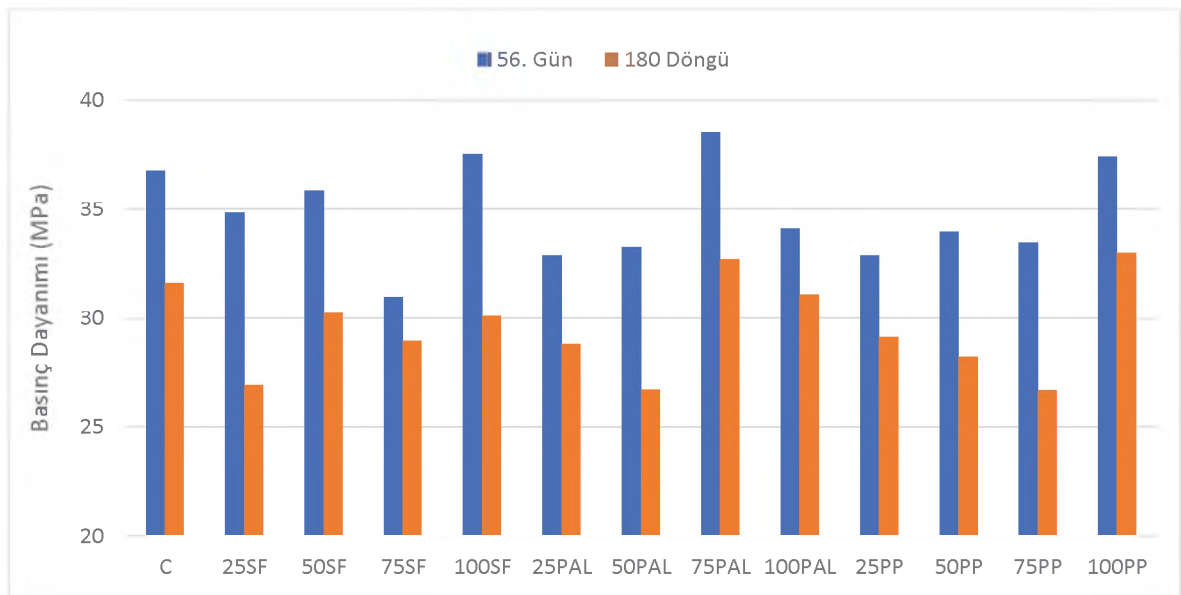
Deney sonucunda alınan değerlere göre üretilen geopolimer numunelerin donma-çözülme etkisine karşı kabul edilebilir bir davranış gösterdiği söylenebilir. Geopolimer numunenin kompakt olması ve adezyon seviyesinin iyi olması nedeniyle donma çözülme etkisine karşı dirençli olduğu görülmüştür. Geopolimer numunelerde 180 döngüye rağmen basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde azalma sınırlı olmuştur.

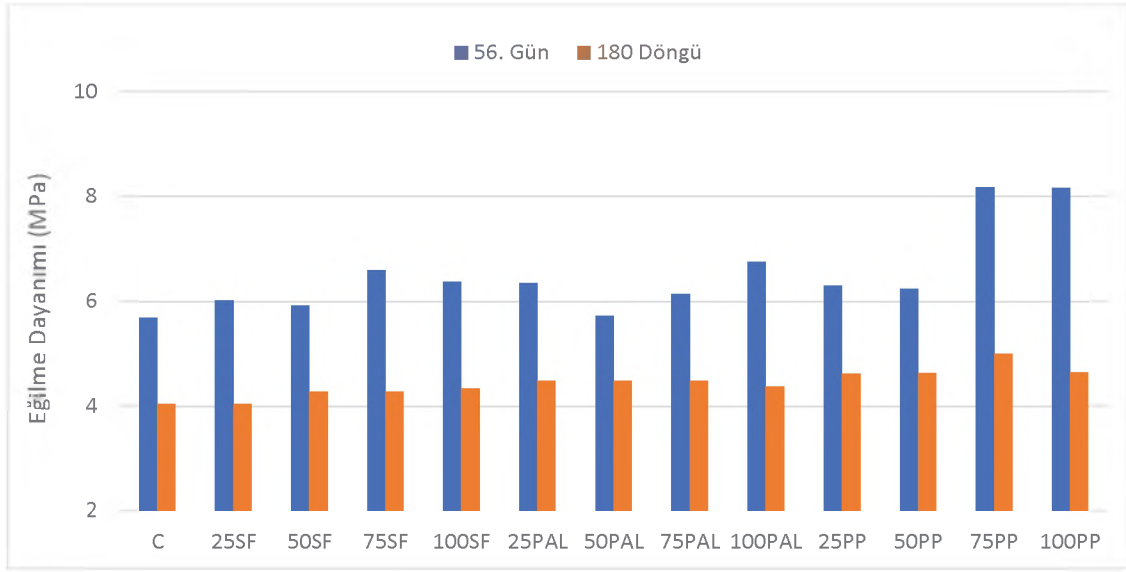
Geopolimer numunelerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde ve 56 günlük basınç dayanımı değerleri ile kıyaslandığında her seri için bir miktar kayıp olduğu görülmüştür. Lifsiz kontrol numunesi 31,58 MPa basınç dayanımıyla %14,04 oranında bir kayıp yaşamıştır. 25SF serisi 26,90 MPa basınç dayanımı değeriyle yaşadığı %22,74 oranında kayıpla en kötü performansı sergilemiştir. Seriler arasında en iyi performansı ise 75SF numunesi sergilemiştir. 75SF numunesi deney sonucunda 28,95 MPa basınç dayanımıyla %6,37 oranında bir kayıp göstermiştir. Elde edilen sonuçlar daha önceki çalışmalar ile uyumludur [88-89].

Geopolimer numunelerin eğilme dayanım sonuçları incelendiğinde basınç dayanımındaki azalmadan daha yüksek seviyede bir azalma görülmüştür. Donma çözünme etkisine maruz kalan numunelerin içinde barındırdığı su buza dönüşerek hacimce %9 oranında genişleme gösterebilmektedir. Numunelerin içindeki suyun genleşmesiyle birlikte matrisin sınırlarını zorlayıp mikro çatlaklıkların oluşmasına veya büyümesine yol açabilir. Oluşan bu mikro çatlakların eğilme dayanımını basınç dayanımından daha fazla etkilemesi sonucu eğilme dayanımındaki azalma daha fazla olmuştur [90]. Lifsiz kontrol numunesi 4,05 MPa eğilme dayanımıyla %28,81 oranında bir kayıp göstermiştir. 4,49 MPa eğilme dayanımı değeriyle %21,62 oranında kayıp yaşayan 50PA numunesi incelenen seriler arasında en iyi performansı sergilemiştir. Seriler arasında en kötü performansı ise 4,65 MPa eğilme dayanımıyla %42,92 oranında kayıp yaşayan 100PP göstermiştir.

Tablo 4.9: Donma çözülme etkisi sonucu oluşan basınç ve eğilme dayanımları

Seri	56. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	180 Döngü Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	56. Gün Eğilme Dayanımı (MPa)	180 Döngü Sonrası Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)
C	36,74	31,58	-14,04	5,70	4,05	-28,81
25SF	34,81	26,90	-22,74	6,02	4,05	-32,68
50SF	35,81	30,21	-15,64	5,92	4,29	-27,52
75SF	30,92	28,95	-6,37	6,60	4,29	-34,99
100SF	37,50	30,08	-19,79	6,38	4,35	-31,80
25PA	32,84	28,78	-12,35	6,35	4,49	-29,34
50PA	33,23	26,70	-19,65	5,73	4,49	-21,68
75PA	38,50	32,67	-15,14	6,14	4,49	-26,91
100PA	34,08	31,06	-8,88	6,75	4,38	-35,07
25PP	32,84	29,11	-11,36	6,30	4,63	-26,58
50PP	33,94	28,21	-16,88	6,25	4,64	-25,70
75PP	33,44	26,67	-20,25	8,17	5,00	-38,74
100PP	37,38	32,95	-11,84	8,16	4,65	-42,96

**Şekil 4.22:** Donma çözülme etkisindeki numunelerin basınç dayanımları



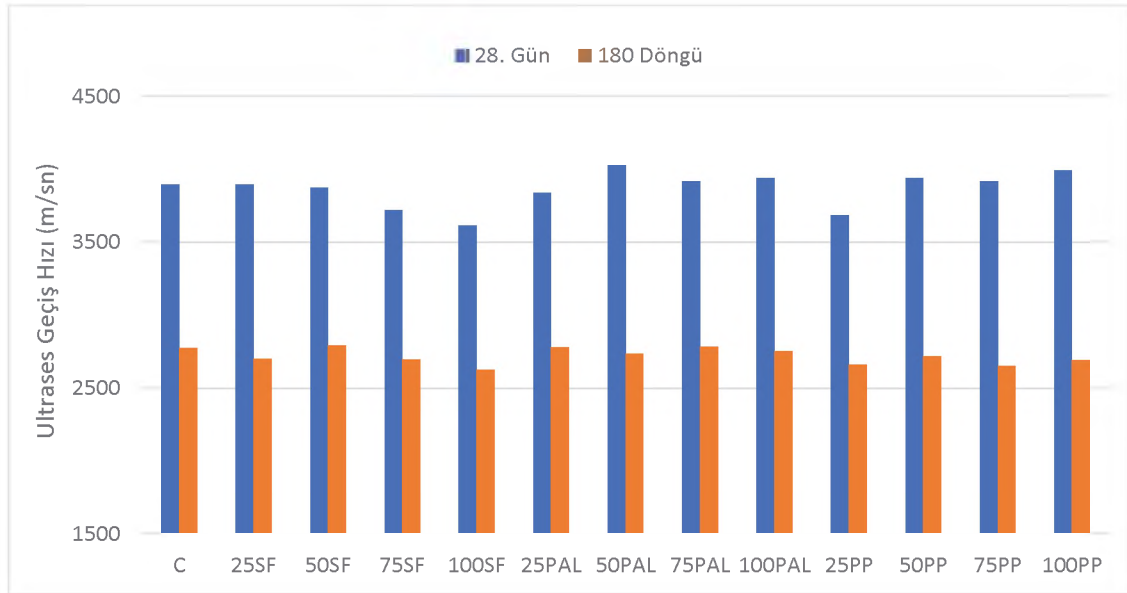
Şekil 4.23: Donma çözülme etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları

4.10.2 Donma Çözülme Etkisinde Ultrases Geçiş Hızları

Donma çözülme deneyi sonrası elde edilen ultrases geçiş hızı verileri Tablo 4.10 ve Şekil 4.24'te gösterilmektedir. Donma çözülme deneyi sonrasında gerçekleştirilen ultrases geçiş hızı testi sonucunda 28 Günlük ultrases geçiş hızı değerleri ile kıyaslandığında önemli seviyede bir düşüş gözlenmiştir. Ultrases hız testinin çalışma mantığına baktığımızda, ultrases dalgalarının kaynaktan alıcıya ulaşma süresi hesaplandıktan sonra, dalgaların geçtiği mesafenin süreye bölünmesiyle hız bulunmuş olur. Numune içerisinde çatlak veya boşluklar oluşması durumunda yol uzayacağı için hız azalmış olacaktır. Bu durumdan yola çıkacak olursak, hız değerleri düştüğü için donma çözülme deneyinden sonra numunelerin içerisinde çatlaklar veya boşluklar oluşmuş olabileceği çıkarımını yapabilmektedir. Lifsiz kontrol numunesi 2775 m/s hızıyla %28,76 oranında bir kayıp göstermiştir. Donma çözülme etkisi ardından 75PA numunesi en yüksek, 100SF numunesi en düşük ultra ses geçiş hızı değeri göstermiştir. Numunelerden sırasıyla 2786 m/s ve 2629 m/s ölçümü alınmıştır.

Tablo 4.10: Donma çözülme etkisi sonucu oluşan ultrases geçiş hızları

Seri	28 Günlük ultrases geçiş hızları (m/s)	180 Döngü Sonrası ultrases geçiş hızları (m/s)	Değişim Oranı (%)
C	3896	2775	-28,76
25SF	3896	2700	-30,69
50SF	3875	2793	-27,92
75SF	3722	2696	-27,58
100SF	3614	2629	-27,27
25PA	3837	2782	-27,51
50PA	4032	2736	-32,14
75PA	3916	2786	-28,86
100PA	3938	2755	-30,03
25PP	3686	2664	-27,73
50PP	3938	2717	-31,00
75PP	3916	2653	-32,25
100PP	3990	2692	-32,54

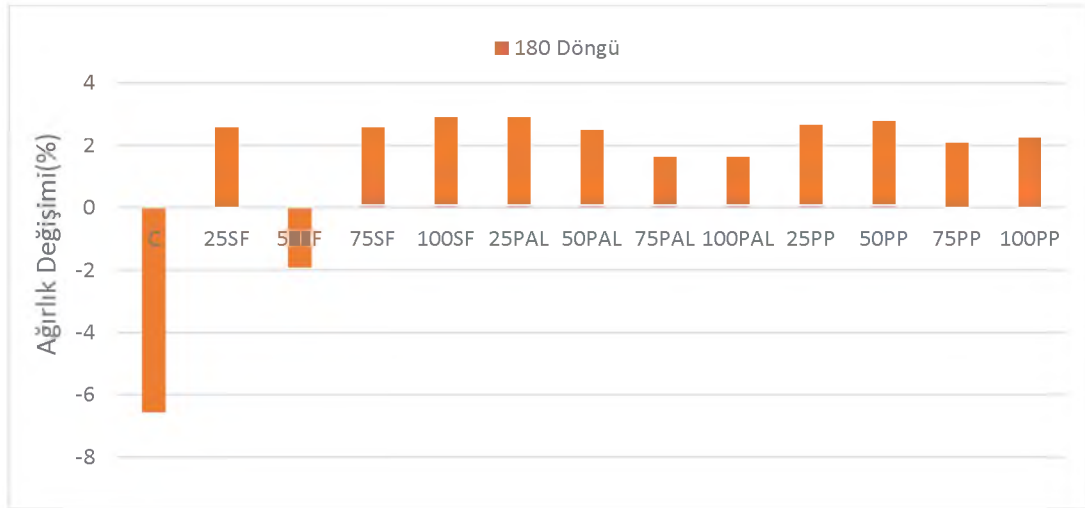


Şekil 4.24: Donma çözülme etkisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları

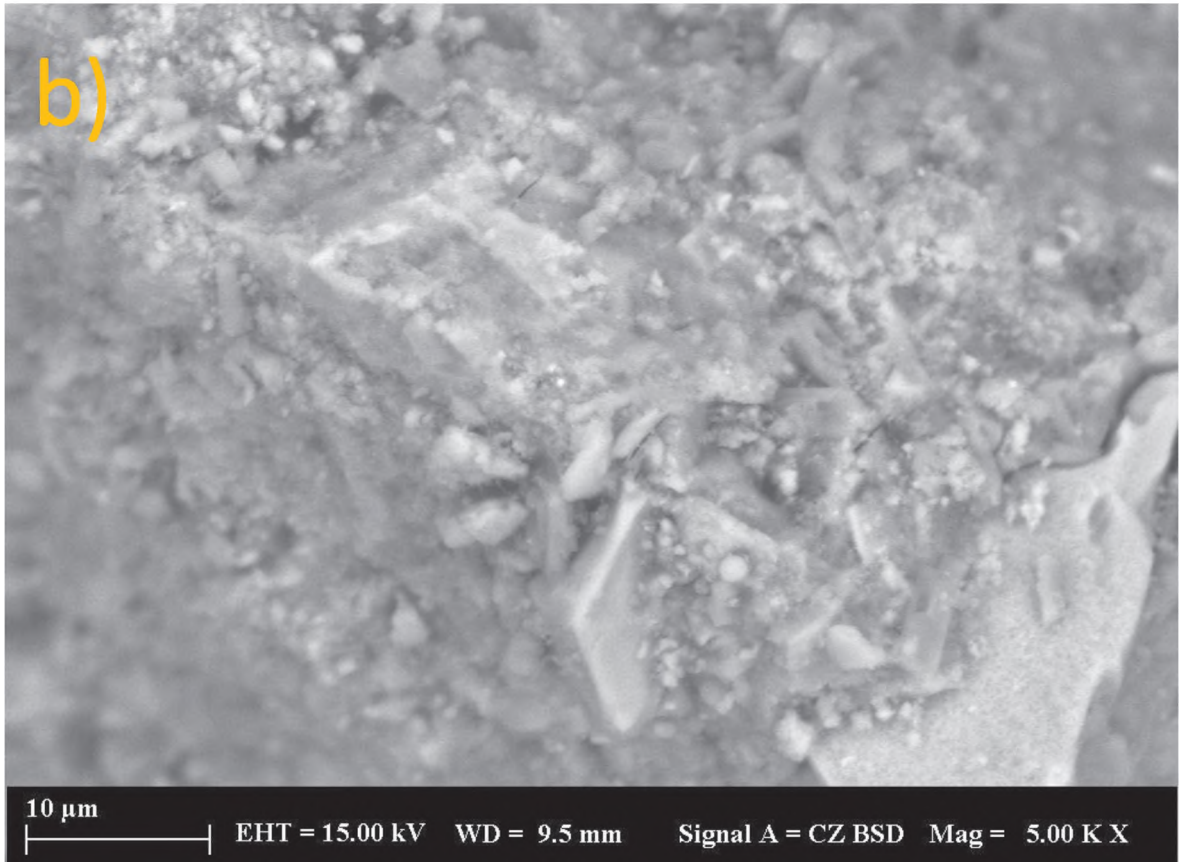
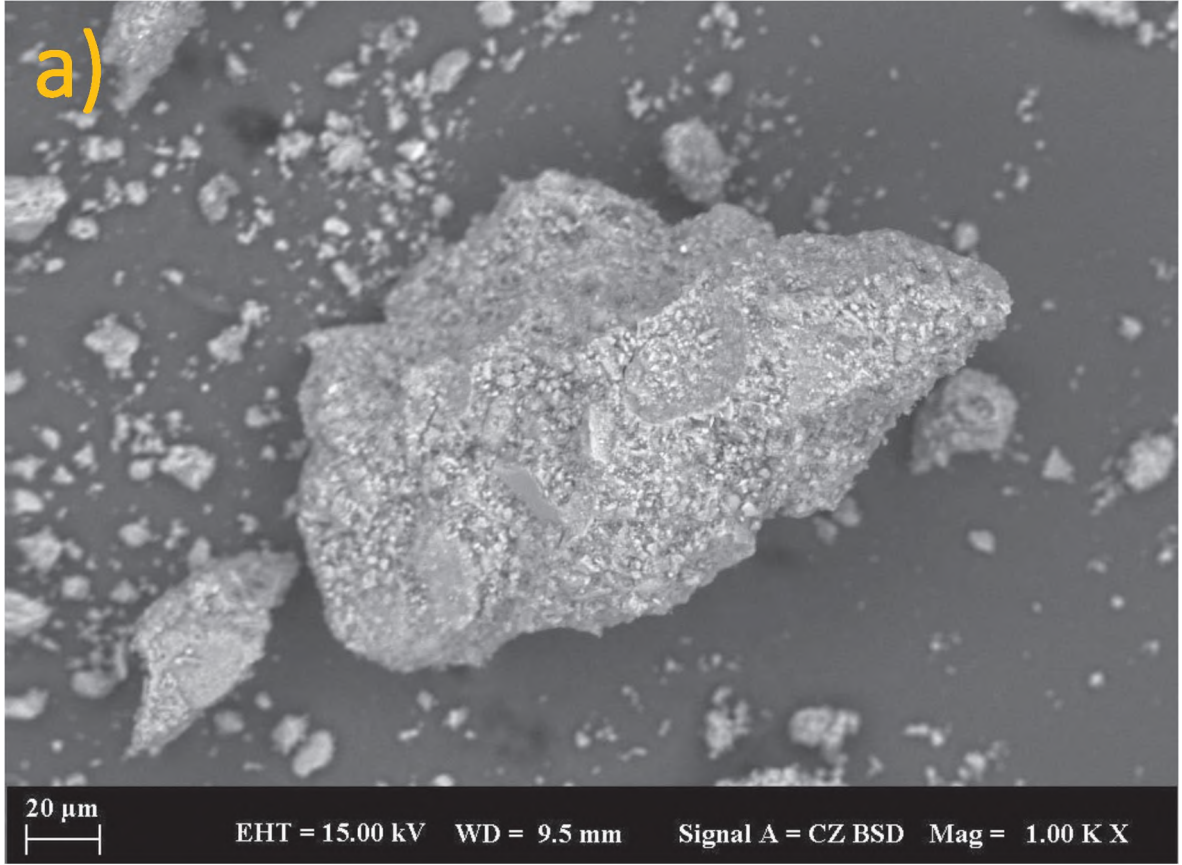
4.10.3 Donma Çözülme Etkisinde Ağırlık Değişimleri ve Analizleri

Donma çözülme çevrimlerinin etkisi ile oluşan ağırlık kaybı yüzdeleri Şekil 4.25'te verilmiştir. Yapılan deneyin sonuçlarına bakıldığında geopolimer numunelerinin ağırlıklarında artış olduğu görülmüştür. Oluşan bu artışın sebebi ise deney esnasında ortamdaki nemin numune boşluklarına nüfus ederek doldurmasıyla açıklanabilir. Lifsiz kontrol numunesi %6,55 oranında ağırlık kaybı göstererek en fazla ağırlık kaybı yaşayan numune olmuştur. 100SF numunesi ise %2,92 oranında ağırlık artışı göstererek en fazla ağırlık kazanan numune olmuştur.

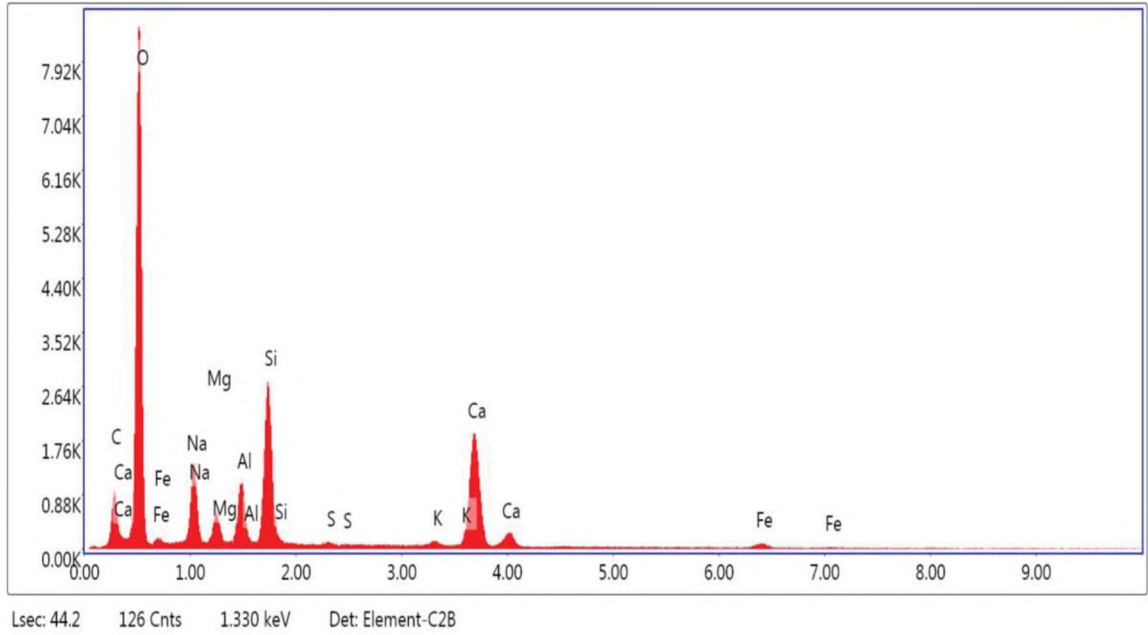
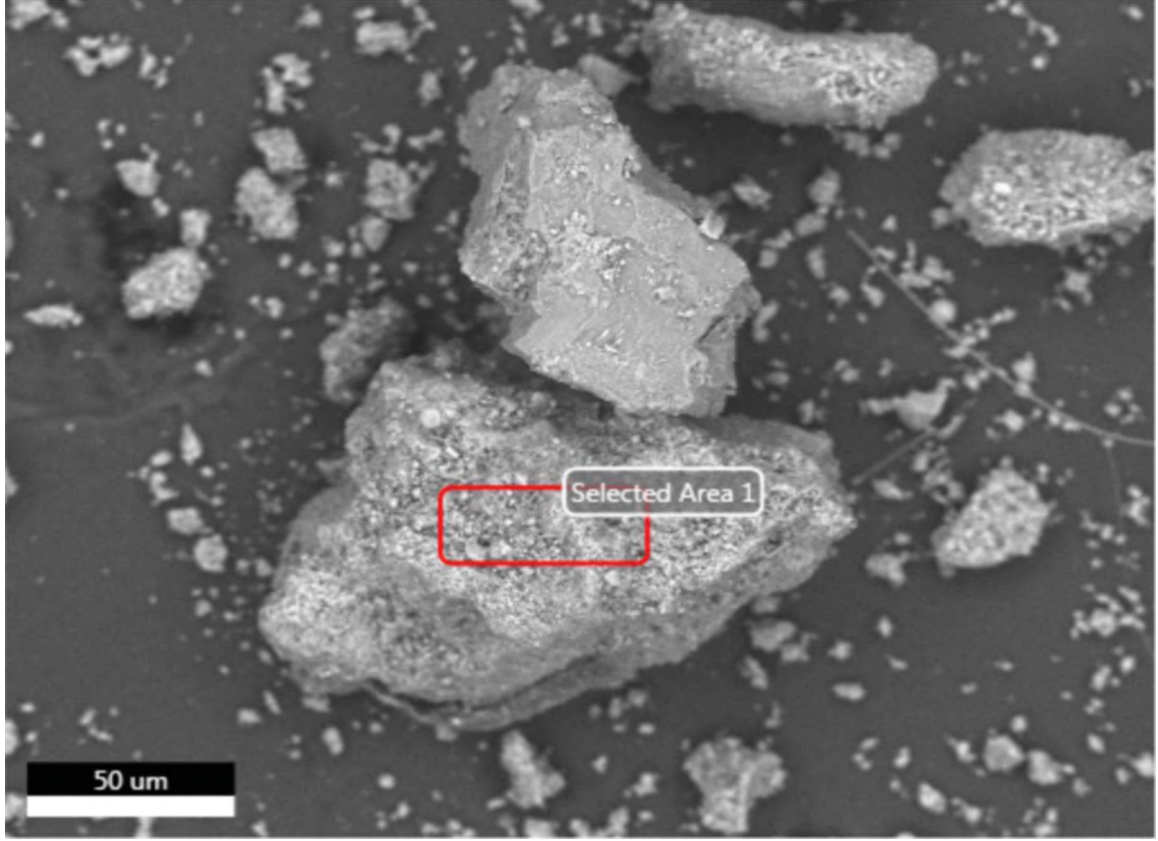
180 döngüden oluşan donma çözülme etkisinden sonra eğilme dayanımı açısından en yüksek sonuçları gösteren 75PP numunesinin mikro analiz görüntüleri 4.26-4.27-4.28'de verilmiştir. Donma çözülme deneyi öncesinde ve sonrasında yapılan SEM, EDS ve XRD analizleri incelendiğinde ciddi farklar ile karşılaşılmamıştır. Alınan bu sonuçlara göre 180 çevrime sokulan geopolimer numunelerin donma çözülme etkisine karşı dirençli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



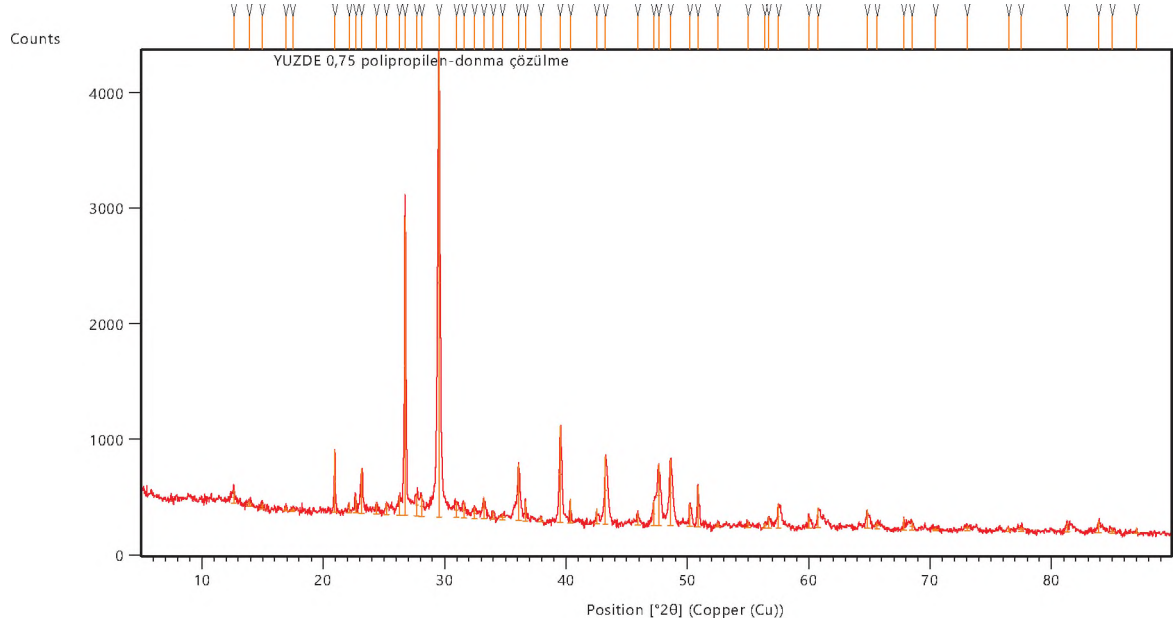
Şekil 4.25: Donma çözülme etkisindeki numunelerin ağırlık değişimi oranları



Şekil 4.26: Donma çözülme deneyi sonrası %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin a) 1000X b)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 4.27: Donma çözülme deneyi sonrası %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin EDS verileri



Şekil 4.28: Donma çözülme deneyi sonrası %0,75 polipropilen lif içerikli numunenin XRD grafiği

4.11 Sülfat Etkisi Deneyleri

Geopolimer harç numuneleri 28. günün ardından 180 gün boyunca 10% Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) ve 10% Magnezyum Sülfat (MgSO_4) çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Ayrıca çözeltinin etkisinin zamanla azalması nedeniyle her 60 günde bir çözelti yenilenmiştir. 180 gün sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımı, basınç dayanımı ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı sonuçları elde edilmiştir.

4.11.1 Sülfat Etkisinde Basınç ve Eğilme Dayanımları

180 günlük sodyum sülfat ve magnezyum sülfat saldırısına maruz bırakılan geopolimer numunelerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.29-4.30 ve Tablo 4.11-4.12’de gösterilmektedir. Sülfat saldırısına maruz bırakılan numuneler, 56 günlük sonuçlar ile karşılaştırması yapılmıştır.

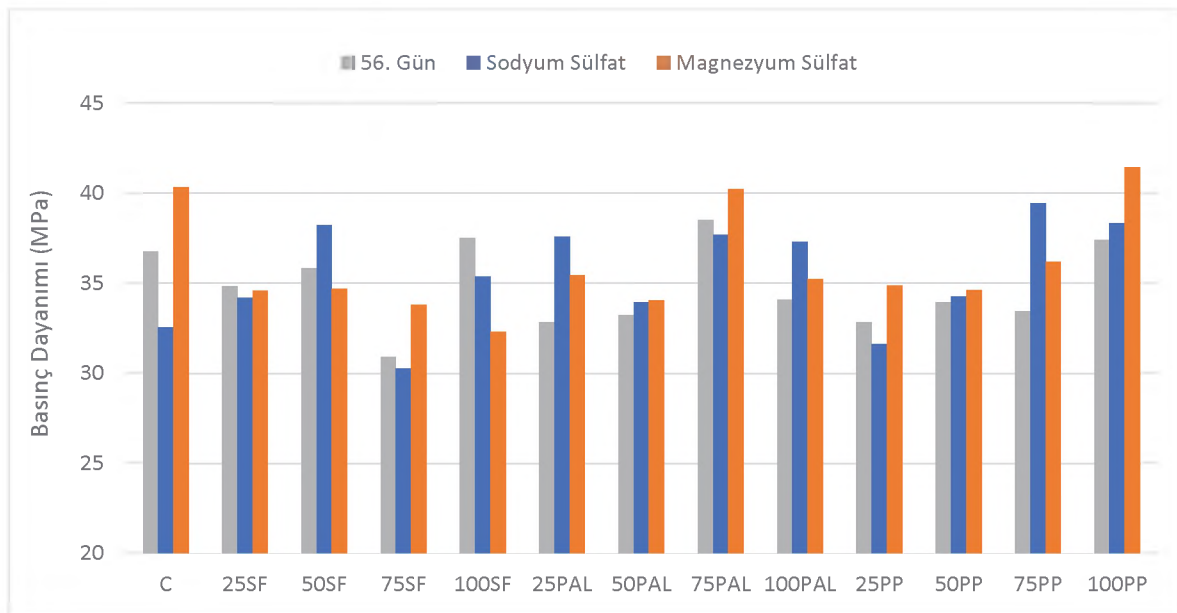
Sülfat etkisine maruz bırakılmış geopolimer numunelerin büyük bir kısmında basınç dayanımı değeri artmıştır. Basınç dayanımlarındaki artış, numunelerin sülfat etkisine karşı 180 güne kadar dirençli olmasıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca sülfat çözeltilerine bırakılan numunelerin basınç dayanımı artışı, geopolimer serilerinin iç yapısına nüfus eden sülfat ürünlerinin geopolimerleşme reaksiyonuna katılarak kristalleşme göstermesiyle desteklenebilir. Geopolimer malzemelerin sülfatlara karşı mükemmel direnci daha düşük bir Ca içeriğine bağlı alüminosilikat polimer yapısına sahip olan kaynak malzemeye bağlıdır. Ayrıca geopolimerizasyon sonucu oluşan ürünler, Portland çimento hidratasyonu sonucu oluşan ürünlere göre sülfat saldırılarına karşı daha dirençlidir [91].

180 gün sonunda lifsiz kontrol numunesinin sodyum sülfat etkisinde basınç dayanımı 32,54 MPa ile %11,45 oranında kayıp şeklinde olmuştur. 75PP numunesi 39,44 MPa dayanım göstererek %17,94 oranında basınç dayanımı artışıyla en iyi performansı sergilerken lif içerikli numuneler arasında en kötü performansı ise 35,35 MPa basınç dayanımıyla %5,75 oranında kayıp gösteren 100SF numunesi göstermiştir. Lif içerikli numuneler kontrol numunesiyle kıyaslandığında daha üstün performans göstermiştir. Özellikle polipropilen ve poliamid lifli numuneler kontrol numunesine nazaran daha yüksek basınç dayanımı performansı göstermiştir.

Magnezyum sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımı sonuçların genel olarak artış söz konusu olmuştur. Magnezyum sülfat etkisindeki lifsiz kontrol numunesinin basınç dayanımı, sodyum sülfat etkisindeki lifsiz kontrol numunesinin aksine artış göstermiştir. Ayrıca numunelerin magnezyum sülfat çözeltilisine karşı dirençleri, sodyum sülfat çözeltilisine gösterdikleri dirençten daha düşük olmuştur. 100PP numunesi 41,40 MPa ile %10,77 oranında basınç dayanımı artışıyla en iyi performansı sergilemiştir. Lif içerikli numuneler arasında en kötü performansı ise 32,30 MPa basınç dayanımıyla %13,87 oranında kayıp gösteren 100SF numunesi göstermiştir. Lif içerikli numuneler kontrol numunesine kıyasla daha düşük performans sergilemişlerdir. Fakat 56. gündeki sonuçlarla kıyaslandığında numunelerdeki lif varlığının magnezyum sülfat direncini arttırdığı özellikle polipropilen ve poliamid lif içerikli serilerin tamamında basınç dayanımı artışı olduğu görülmüştür.

Tablo 4.11: Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımı sonuçları

Seri	56. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Na ₂ SO ₄ Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	MgSO ₄ Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)
C	36,74	32,54	-11,45	40,31	9,72
25SF	34,81	34,17	-1,84	34,59	-0,65
50SF	35,81	38,21	6,69	34,68	-3,17
75SF	30,92	30,26	-2,13	33,80	9,32
100SF	37,50	35,35	-5,75	32,30	-13,87
25PA	32,84	37,59	14,47	35,42	7,87
50PA	33,23	33,94	2,12	34,04	2,44
75PA	38,50	37,68	-2,13	40,20	4,42
100PA	34,08	37,27	9,36	35,21	3,30
25PP	32,84	31,62	-3,71	34,87	6,17
50PP	33,94	34,27	0,97	34,63	2,02
75PP	33,44	39,44	17,94	36,16	8,12
100PP	37,38	38,32	2,53	41,40	10,77

**Şekil 4.29:** Sülfat etkisindeki numunelerin basınç dayanımları

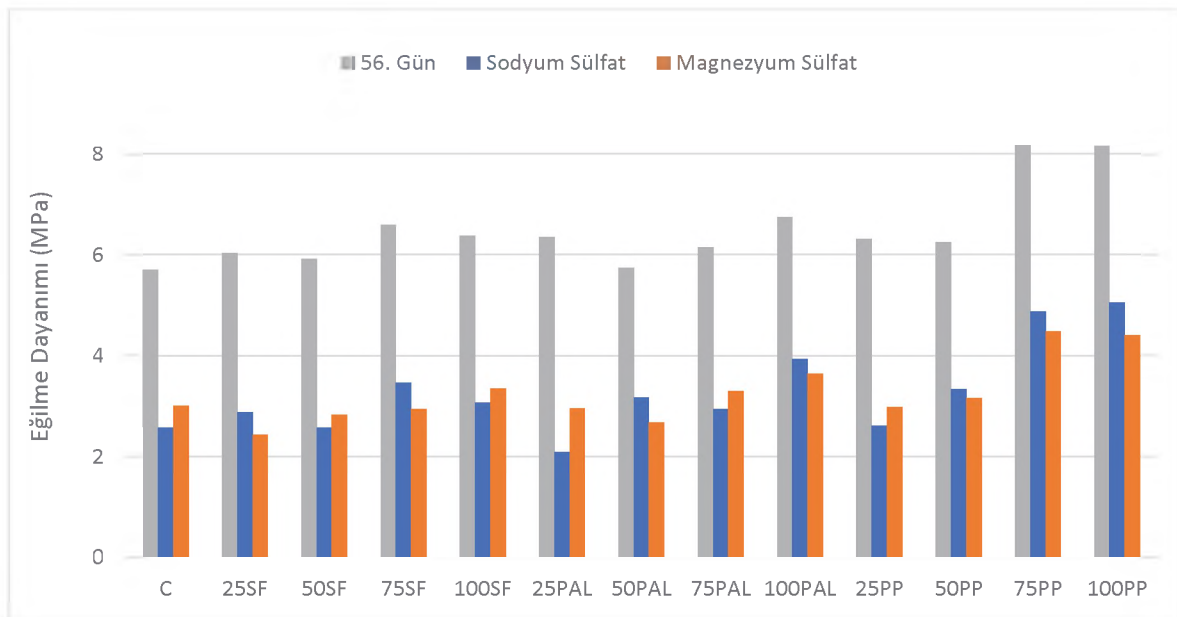
Geopolimer numunelerinin sodyum sülfat ve magnezyum sülfat etkisine maruz bırakılarak eğilme mukavemeti sonuçları elde edilmiştir. 56 günlük eğilme dayanımı sonuçlarıyla karşılaştırıldığında basınç dayanımının aksine kayda değer seviyelerde kayıplar olduğu görülmüştür.

Tüm numuneler göz önüne alındığında sodyum sülfat etkisine karşı en iyi performans sergileyen serinin 100PP serisi olduğu görülmektedir. Seri 5,05 MPa eğilme dayanımıyla %38,07 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir. 25PA serisi ise sodyum sülfat etkisi altında en kötü performans sergileyen seri olduğu yapılan bu deneysel çalışmada ortaya konmuştur. Seri 2,09 MPa eğilme dayanımı ile %67,16 oranında azalma yaşamıştır. Sodyum sülfat etkisine maruz bırakılmış lifsiz kontrol numunesi ile diğer lifli numunelerin karşılaştırılması yapıldığında ise anlamlı farklılıklar görülmemiş lif çeşidi ve oranı numuneler üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır.

Tüm numuneler göz önüne alındığında magnezyum sülfat etkisine karşı en iyi performans sergileyen serinin 75PP serisi olduğu görülmektedir. Seri 4,48 MPa eğilme dayanımıyla %45,19 oranında azalma olduğu gözlemlenmiştir. 25SF serisi ise magnezyum sülfat etkisi altında en kötü performans sergileyen seri olduğu yapılan bu deneysel çalışmada ortaya konmuştur. Seri 2,44 MPa eğilme dayanımı ile %59,53 oranında azalma yaşamıştır. Sodyum sülfat etkisine maruz bırakılmış lifsiz kontrol numunesi ile diğer lifli numunelerin karşılaştırılması yapıldığında ise lifli serilerin daha düşük bir performans sergilediği görülmektedir. Bilindiği üzere magnezyum sülfat çözeltisi, sodyum sülfat çözeltisine göre daha agresiftir. Bu sebeple magnezyum sülfat etkisinin lifli serileri olumsuz etkileyerek matrisin içindeki kılcal boşlukları arttırıp eğilme dayanımını düşürmüştür.

Tablo 4.12: Sülfat etkisindeki numunelerin eğilme dayanımı sonuçları

Seri	56. Gün Basınç Dayanımı (MPa)	Na ₂ SO ₄ Sonrası Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)	MgSO ₄ Sonrası Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim Oranı (%)
C	5,70	2,58	-54,73	3,00	-47,33
25SF	6,02	2,88	-52,14	2,44	-59,53
50SF	5,92	2,57	-56,63	2,82	-52,28
75SF	6,60	3,46	-47,60	2,94	-55,42
100SF	6,38	3,07	-51,84	3,35	-47,43
25PA	6,35	2,09	-67,16	2,95	-53,51
50PA	5,73	3,16	-44,79	2,67	-53,37
75PA	6,14	2,94	-52,10	3,29	-46,37
100PA	6,75	3,94	-41,67	3,64	-46,01
25PP	6,30	2,61	-58,55	2,98	-52,79
50PP	6,25	3,33	-46,72	3,15	-49,53
75PP	8,17	4,88	-40,32	4,48	-45,19
100PP	8,16	5,05	-38,07	4,41	-45,98

**Şekil 4.30:** Sülfat etkisindeki numunelerin eğilme dayanımları

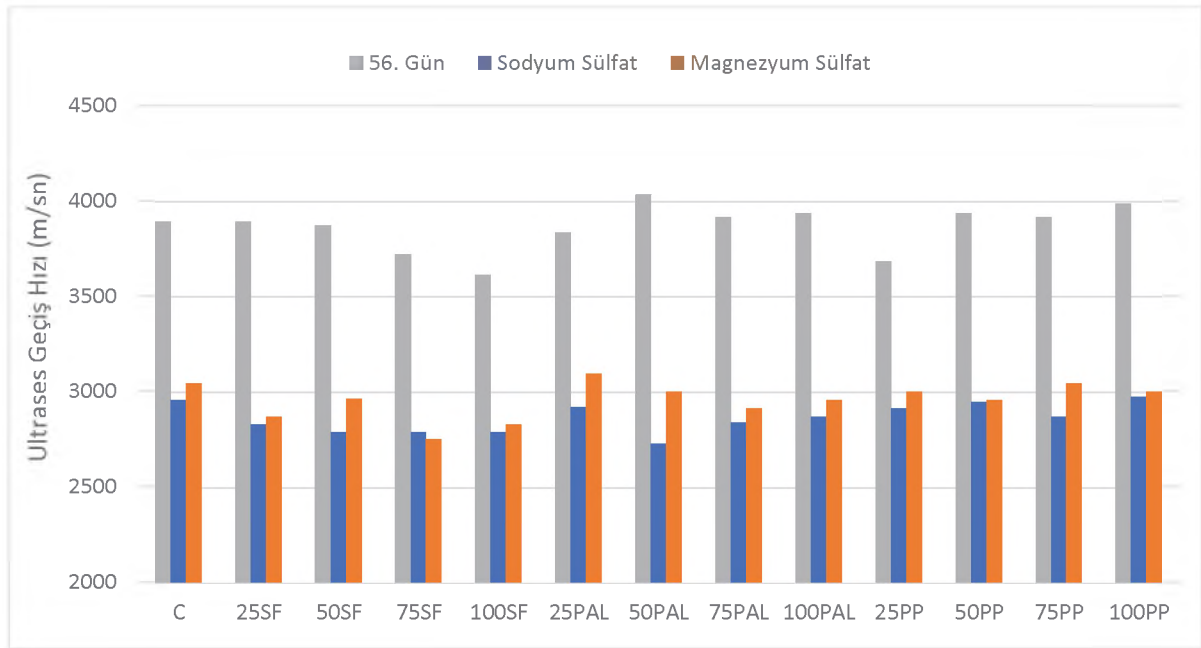
4.11.2 Sülfat Etkisinde Ultrases Geçiş Hızları

Sülfat etkisi deneyi sonrası elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 4.13 ve Şekil 4.31’de gösterilmektedir. Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarına bakıldığında tüm numunelerin hızlarında kayıp olduğu görülmektedir. Deney sonrası hızların düşme sebebi olarak ultrases cihazının çalışma prensibi göz önünde bulundurulduğunda numunelerin içerisinde magnezyum sülfat etkisinden dolayı boşluk ve çatlaklar oluşması olarak açıklanabilmektedir.

180. günlük sülfat saldırısı sonunda geopolimer örneklerde ultrases geçiş hızı kayıp oranları sodyum sülfat için %20,87 ile %32,24, magnezyum sülfat için %18,50 ile %26,23 arasında olmuştur. Lif içerikli numuneler lifsiz kontrol numunesine kıyasla daha fazla kayıp yaşamıştır.

Tablo 4.13: Sülfat etkisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları

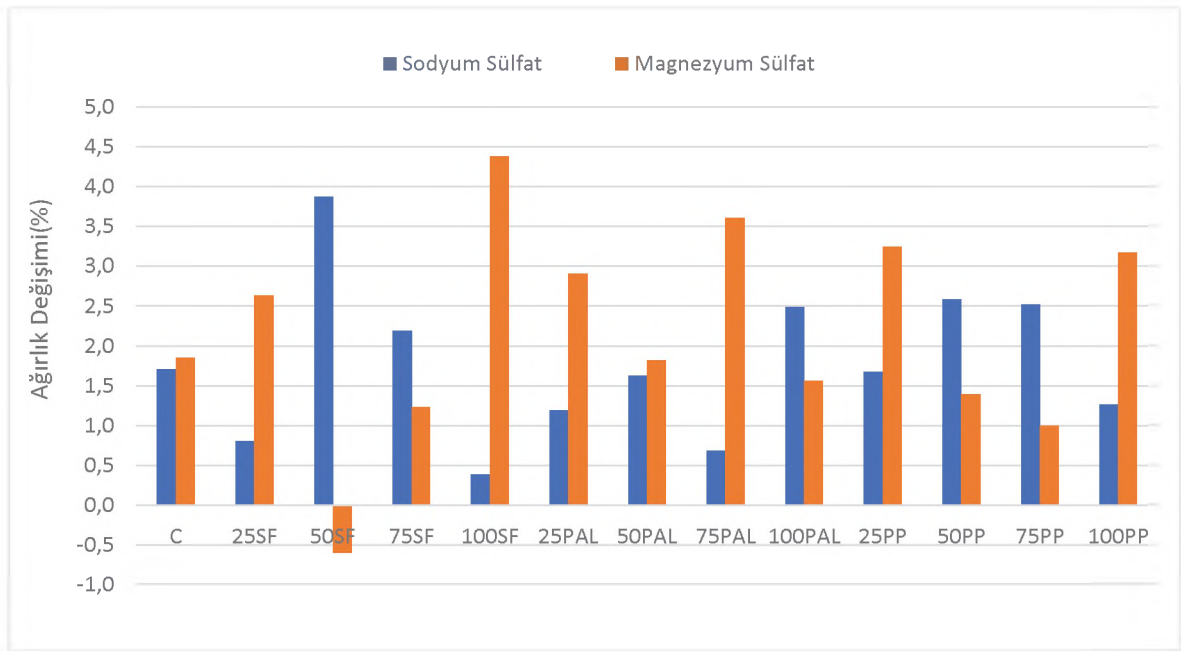
Seri	28 Günlük ultrases geçiş hızları (m/s)	Na ₂ SO ₄ Sonrası ultrases geçiş hızları (m/s)	Değişim Oranı (%)	MgSO ₄ Sonrası ultrases geçiş hızları (m/s)	Değişim Oranı (%)
C	3896	2959	-24,04	3049	-21,73
25SF	3896	2834	-27,27	2874	-26,23
50SF	3875	2793	-27,92	2968	-23,42
75SF	3722	2793	-24,96	2755	-25,98
100SF	3614	2793	-22,72	2834	-21,60
25PA	3837	2925	-23,79	3097	-19,29
50PA	4032	2732	-32,24	3004	-25,50
75PA	3916	2841	-27,46	2917	-25,53
100PA	3938	2874	-27,01	2959	-24,85
25PP	3686	2917	-20,87	3004	-18,50
50PP	3938	2949	-25,11	2962	-24,79
75PP	3916	2874	-26,62	3049	-22,15
100PP	3990	2976	-25,41	3004	-24,71



Şekil 4.31: Sülfat etkisindeki numunelerin ultrases geçiş hızları

4.11.3 Sülfat Etkisinde Ağırlık Kaybı ve Analizleri

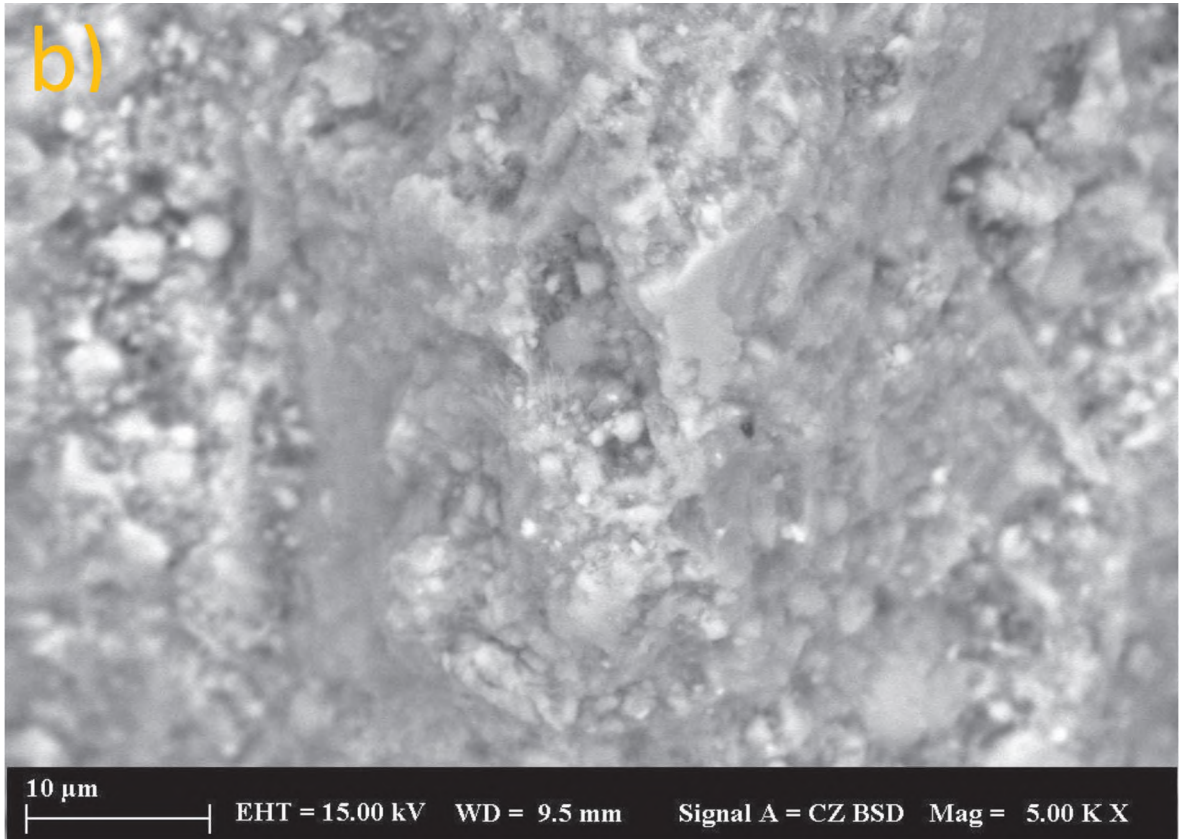
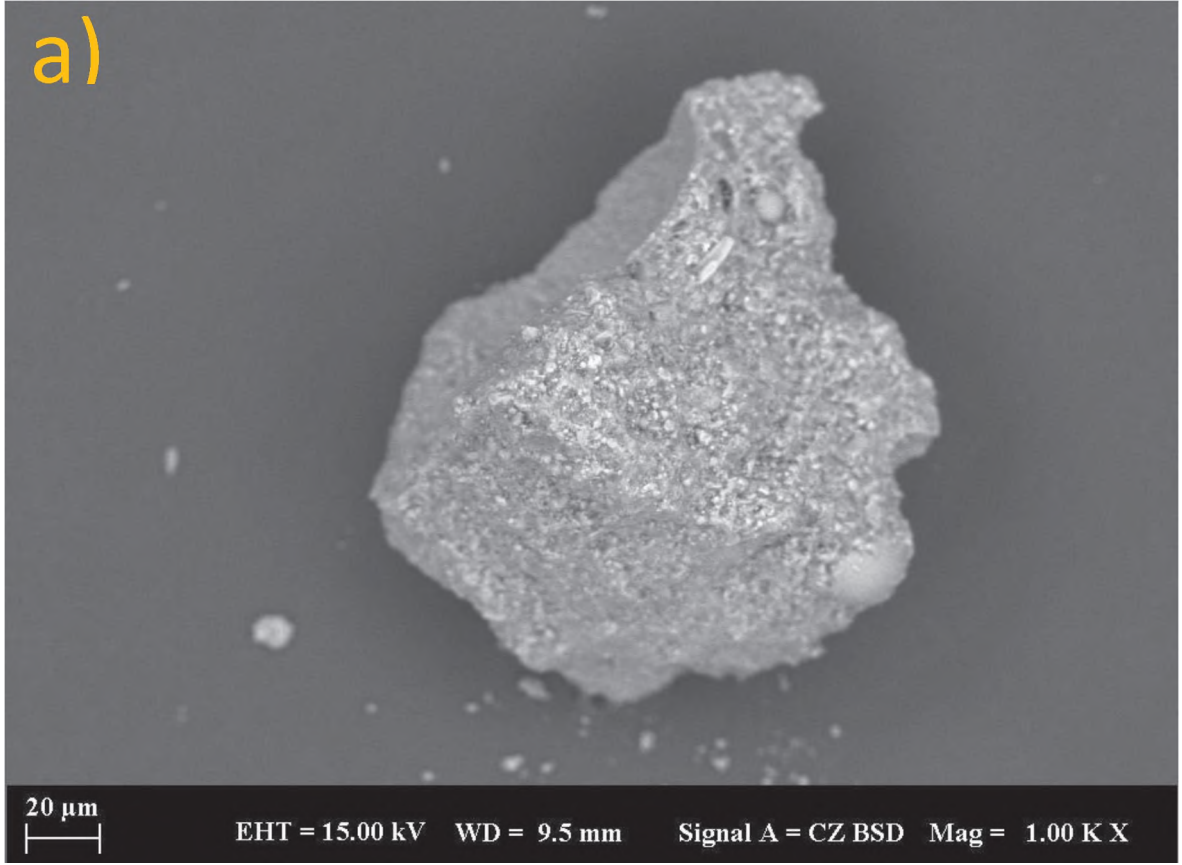
Şekil 4.32'de görüldüğü gibi 180 gün boyunca magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinde bırakılan numunelerin ağırlıkları elde edilmiş ve numunelerin magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerine bırakılmadan önceki ağırlıkları ile karşılaştırılarak ağırlık değişim yüzdeleri bulunmuştur. Genel olarak, sülfat çözeltilerinde bırakılan numunelerin ağırlıklarında bir miktar artış görülmüştür. Bu artışın sebebi ise boşlukların çözelti etkisiyle sülfat tuzları ve hidratasyon ürünleri ile dolmasından kaynaklanmaktadır. Sodyum sülfat etkisi sonunda üretilen örneklerde görülen ağırlık artışı %0,39-%3,87 aralığında olduğu görülmüştür. En büyük ağırlık artışı 50SF numunesinde görülürken en düşük ağırlık artışı 100SF numunesinde görülmüştür. Magnezyum sülfat etkisi sonunda üretilen örneklerde görülen ağırlık artışı %-0,59-%4,38 aralığında olduğu görülmüştür. En büyük ağırlık artışı 100SF numunesinde görülürken tüm numuneler içerisinde tek başına ağırlık kaybı yaşayan 50SF numunesi olmuştur.



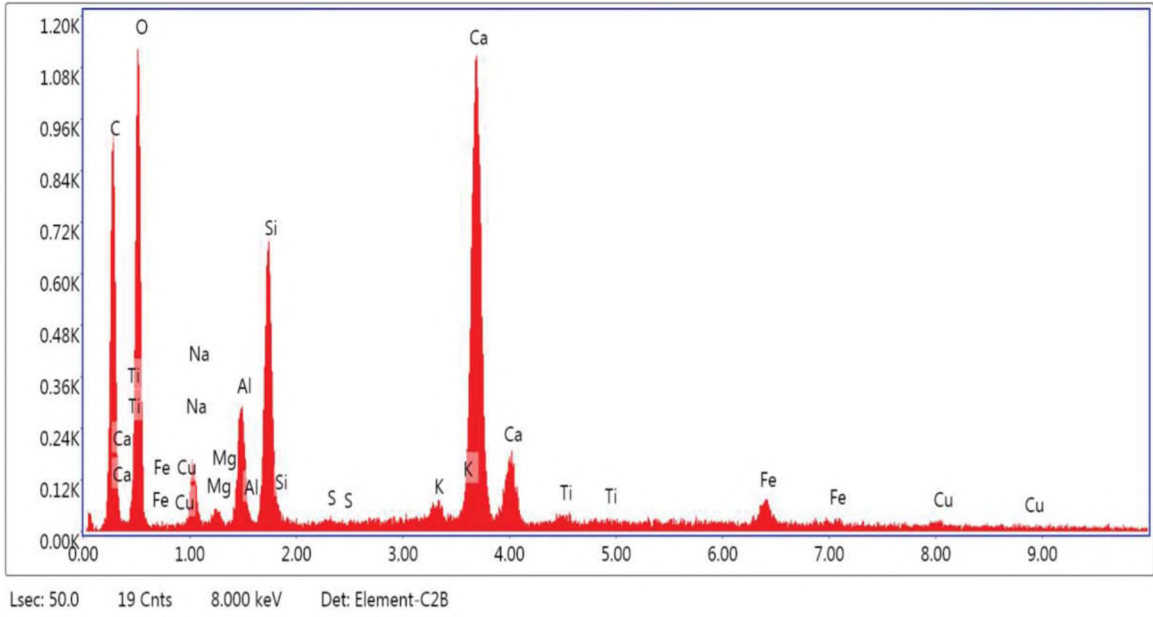
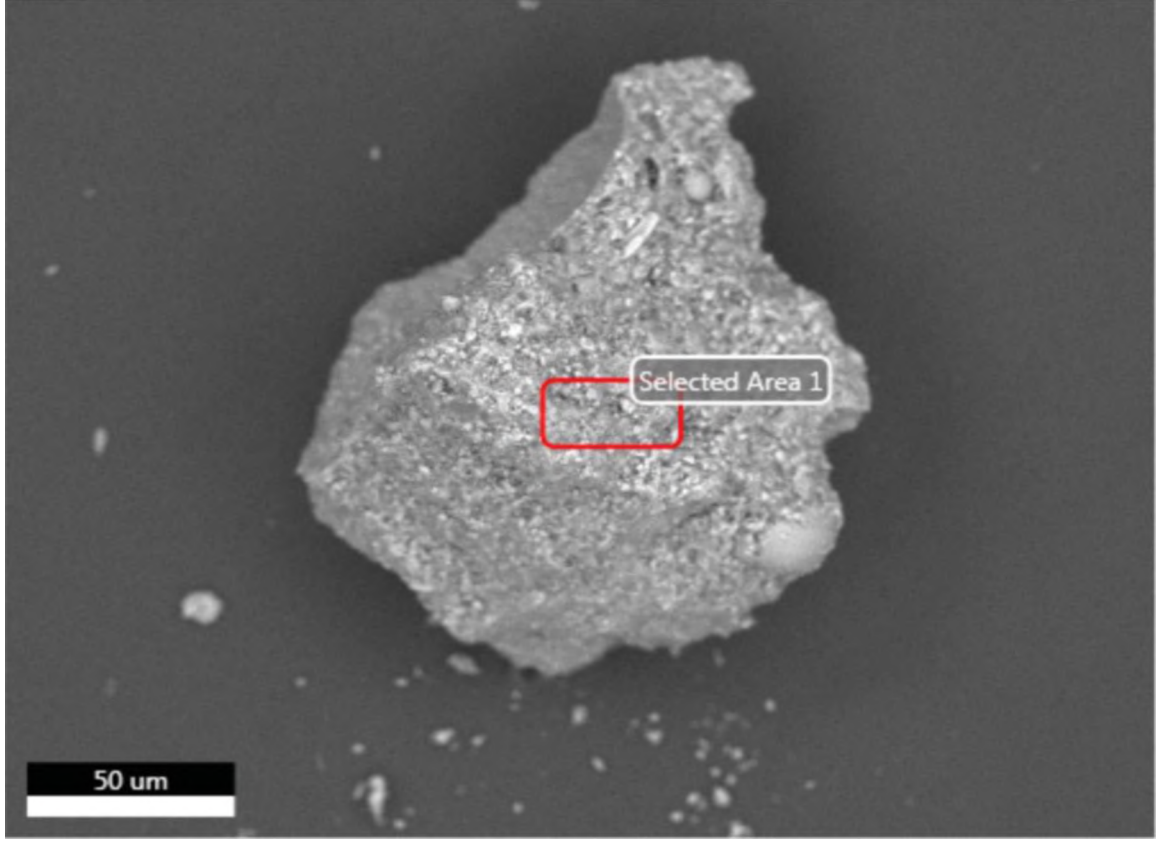
Şekil 4.32: Sülfat etkisindeki numunelerin ağırlık değişimi oranları

Sülfat etkisine maruz bırakılan geopolimer numunelerin deney öncesi ve sonrası görsel incelemesi yapılmıştır. Deney sonrası numunelerde gözle görünür çatlama, patlama veya bozulma olmadığı fakat özellikle sodyum sülfat etkisindeki numunelerin yüzeylerinde beyazlaşma olduğu görülmüştür. Deney sonrası numune yüzeyinde zamanla sertleşme olduğu hissedilmiştir.

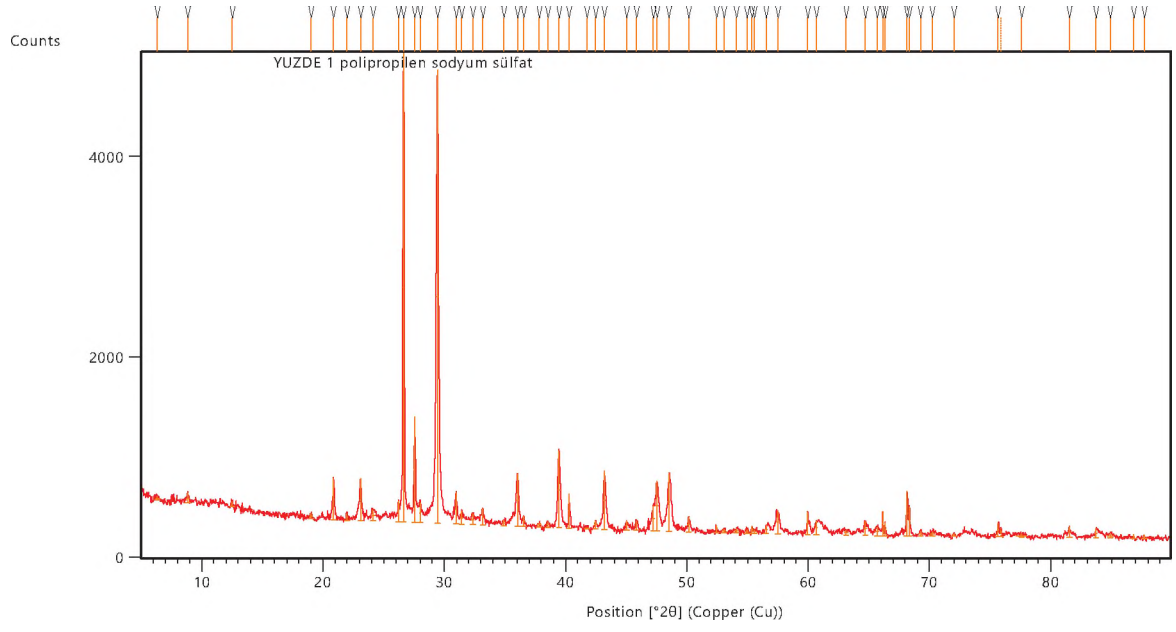
Sülfat çözeltisinde bırakılan yüksek Ca içerikli numunelerin matrislerindeki bulunan Ca ürünleri; Na_2SO_4 ile reaksiyona girmesi, yeni alçıtaşı fazı üretilmesi ve C-A-S-H jellerinin ayrışmasına neden olmuştur. C-A-S-H ayrışmasından oluşan Ca ve Na_2SO_4 , XRD ve SEM analizleri sonucu ortaya çıktığı görülmüştür. Sonuçlar SEM analizi dışında yapılan EDS spektroskopisinde de görülmektedir (Şekil 4.33-4.34-4.35). Sodyum sülfat etkisinde kuartz piklerin varlığı görülmüştür. Görünen kuartz pikleri, geopolimer numunelerine nüfus eden sülfat iyonlarının oluşturduğu reaksiyon sonucu ortaya çıkan kristalleşmeyi temsil etmektedir



Şekil 4.33: Sodyum sülfat etkisi sonrası %1,00 polipropilen lif içerikli numunenin a) 1000X b)5000X kadar büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 4.34: Sodyum sülfat etkisi sonrası %1,00 polipropilen lif içerikli numunenin EDS verileri



Şekil 4.35: Sodyum sülfat etkisi sonrası %1,00 polipropilen lif içerikli numunenin XRD grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİ

Yapılan bu çalışmanın temel amacı çimentonun alternatifi olabilecek bir yapı malzemesi üretmek için geopolimer geliştirilmesi hedeflenmesidir. Geopolimer üretiminde bağlayıcı malzeme olarak %40 metakaolin ve eşit oranlarda diğer mineral katkıları (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kırmızı çamur) kullanılmıştır. Alkali aktivatör seçiminde 12M sodyum hidroksit ile sodyum silikat solüsyonu belirlenmiştir. Sodyum hidroksit/Sodyum silikat oranı ağırlıkça 1:2 olarak belirlenmiştir. Agregata olarak eşit oranlarda (~%50) geri dönüşüm agregası ve mermer tozu kullanılmıştır. Liflerin geopolimer malzemeler ile birlikte sergilediği davranışı incelemek adına farklı tipte lifler (Çelik lif, poliamid lif ve polipropilen lif) ve farklı lif oranlarıyla (%0-0,25-0,50-0,75-1,00) kullanılmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı gibi mekanik deneylerin yanında yüksek sıcaklık etkisi, donma-çözülme etkisi ve sülfat etkisi gibi durabilite deneyleri de yapılarak üretilen geopolimer numunelerin davranışları incelenmiştir. Ayrıca geopolimerin kısa ve uzun vadeli davranışını belirlemek için testler 7-28-56. günlerde yapılmıştır.

5.1 Sonuç

- Geopolimer numunelerinde boşluk oranı ve su emme oranının oldukça yüksek olması dikkat çekicidir. Lifsiz kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında çelik ve polipropilen lif içerikli numuneler daha düşük boşluk oranı ve su emme oranı değerlerini vermiştir. En yüksek birim ağırlık değerini ise 100SF numunesi vermiştir.
- Lif içerikli numuneler lifsiz kontrol numunesi ile kıyaslandığında 7 ve 28. günlerde daha iyi basınç dayanımı sonuçları verirken 56. gündeki basınç dayanımlarında bir miktar düşüş yaşamıştır. Genel olarak numunelerdeki lif çeşidi ve lif oranı anlamlı farklar ortaya çıkarmamıştır. Kullanılan lifler basınç dayanımından ziyade eğilme dayanımında iyileştirme gösterdiği görülmüştür.
- Eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında, tüm serilerde büyük oranda bir artış olduğu görülmüştür. 56. gün eğilme dayanımı sonuçlarında 75PP ile 100PP numuneleri sırasıyla 8,17 MPa ve 8,16 MPa eğilme dayanımıyla %43,42 ve %43,21 artış oranı göstermiştir. En yüksek iyileşme oranı ise polipropilen lif içerikli seriler göstermiştir. Ayrıca

lif varlığı ile birlikte oluşan kırılmaların sünekleştiği ve kırılma sonrası bile numunelerin belli bir seviyede yük taşımaya devam ettiği görülmüştür.

- Aşınma etkisine karşı lif içerikli geopolimer numuneler önemli bir gelişme göstermiştir. Aşınma etkisinde kontrol edilen ağırlık kaybı ve boy değişim oranlarının lif varlığıyla birlikte daha düşük olduğunu bununla beraber liflerin geopolimer numunenin aşınma direncini arttırdığı görülmüştür.

- Hem 300°C, hem de 600°C değerinde basınç ve eğilme dayanımlarında ciddi seviyelerde düşüş gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımında yaşanan kayıplar basınç dayanımında yaşanan kayıplara nazaran daha yüksek seviyededir. Yüksek sıcaklık etkisi sonucu matriste oluşan çatlaklar ultrases geçiş hızı sonuçlarını olumsuz yönde etkilemiştir. Özellikle 600°C’de numunelerin yüksek seviyede ağırlık kaybı yaşadığı görülmüştür. Neredeyse tüm lifli seriler 600°C yüksek sıcaklık sonrası lifsiz seriye kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı sonuçları göstermiştir. Özellikle çelik lif içerikli seriler en iyi eğilme dayanımı performansı sergilemiştir.

- Geopolimer numunelerin donma çözülme etkisi sonrası basınç ve eğilme dayanımlarında bir miktar kayıp gözlemlenmiştir. 180 döngü sonrası yaşanan dayanıp kayıplarının sınırlı olması geopolimer numunelerinin donma çözülme etkisine karşı direnç göstermesiyle açıklanabilir. Donma çözülme etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçlarında anlamlı farklar görülmezken eğilme dayanımları incelendiğinde özellikle polipropilen lif içerikli serilerin en büyük eğilme dayanımı performans sergilediği görülmüştür. Lifli numunelerde deney sonrası görülen ağırlık artışı deneyin yapıldığı ortamdaki nemi liflerin tutması ile ilişkilendirilmiştir.

- Geopolimer numuneler, magnezyum sülfat ve sodyum sülfat saldırısına maruz bırakıldığında basınç dayanımlarında küçük bir miktar artış görülürken eğilme dayanımlarında ciddi azalmalar olmuştur. Sülfat iyonlarının geopolimer harçların iç yapısına nüfuz edip geopolimerleşme reaksiyonuna katkı sağlaması basınç dayanımını arttırırken devam eden süreçte oluşan mikro çatlaklar eğilme dayanımını düşürmüştür.

Geopolimer harçların üretim planlaması yapılırken özellikle atık malzemelerin kullanılması tercih edilmiştir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur gibi alümino-silikat bazlı ürünler seçilerek hem ekonomik açıdan yarar sağlanması amaçlanmış hem de atıkların depolanması gibi sorunların önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca depreme dayanıklı bina projeleri kaynaklı kentsel dönüşüm çalışmalarında gözlenen artış ile geri dönüşüm agregalarının değerlendirilmesi gerekmektedir.

Günümüze kadar yapılan bu konudaki çalışmalarda genellikle geopolimer bazlı betonlar geleneksel çimento bazlı betonlara göre daha gevrek kırılma yaşamaktadırlar. Bu çalışmada lif kullanılmasının amacı oluşan kırılmanın daha sünek davranış ile oluşmasının hedeflenmesidir. Eğime dayanımı sonuçları incelendiğinde liflerin kullanım amacına hizmet ettikleri görülmektedir. Yapılan çalışma sonuçları incelendiğinde geopolimer harçlarda lif kullanımı basınç dayanımından ziyade eğilme dayanımını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Lif çeşitleri arasında ise özellikle polipropilen lif içerikli seriler en iyi performansı sergilemişlerdir.

Yukarıda belirtilen bu olumlu özelliklerinin yanında geopolimer malzemelerin bazı olumsuz özellikleri sebebiyle ticarileşme faaliyetlerine geçilememektedir. Bunlar; özel üretim (yüksek sıcaklık kürü, alkali aktivatör solüsyonu oluşturulması gibi) ihtiyaçları ile birlikte oluşturulması son derece hassasiyet gerektirmesi, insanlara zararlı olabilecek sodyum hidroksit gibi kimyasalların kullanılması, üretimdeki tehlikeleri nedeniyle piyasada sadece ön döküm veya ön karışım malzemesi olarak satışı, üretimindeki parametreler nedeniyle aşırı değişken olmasıyla aynı özelliklerde malzeme üretilmesinde istikrarlı olmayışı gibi nedenler sıralanabilmektedir.

5.2 Öneri

- Geopolimer malzemesin ana bileşenleri olabilecek yüksek fırın cürufu ve uçucu kül atıklarının geri dönüştürülmesi, ekonomik ve çevresel avantajlarının gözetilmesi adına geopolimer bağlayıcı çalışmaları çoğaltılabilir.
- Geopolimerin dayanım kazanması adına yapılan ısı kürünün hem uygulaması hem de maliyeti düşünüldüğünde farklı bir kürleme yöntemi geliştirilebilir.
- Araştırma kapsamında kullanılan geri dönüşüm agregası, ülkenin kentsel dönüşüm projelerinde oluşacak atıkların geri kazandırılması adına çalışmalar geliştirilebilir.
- Lif katkısının geopolimer betonlarda dayanım ve durabilite üzerindeki etkisi daha uzun süreli ve detaylı araştırılabilir. Özellikle kullanılan liflerin boyutsal yapısının dayanım ve durabiliteye olan etkisi incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Shaikh, F. U. A., "Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates." *International Journal of Sustainable Built Environment* 5.2 (2016): 277-287.
- [2] Maholtra, V., "Introduction: sustainable development and concrete technology", *ACI Concrete International*, 24(7): 1-22, (2002).
- [3] Madloul, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., Rahim, N. A., "A critical review on energy use and savings in the cement industries." *Renewable and sustainable energy reviews* 15.4 (2011): 2042-2060.
- [4] Boyacı, Ö., "Farklı Kaolenlerin Metakaolen ve Spinel Yapılarda Geopolimer Davranışı", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, (2018).
- [5] Al Bakri, A., Mohammed, H., Kamarudin, H., Niza, I.K., Zarina, Y., "Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement." *Journal of engineering and technology research* 3.1 (2011): 1-4.
- [6] Bingöl, Ş., "Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması", Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, (2018).
- [7] Arslan, A. A., "Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçlara Farklı Kür Koşullarının Etkisinin İncelemesi", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2019).
- [8] Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and Applications*, 3rd edition, St. Quinten, Institut Geopolymere, (2008).
- [9] Gümüş, A., "Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, (2016).
- [10] 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).
- [11] Hassan, A., Arif, M., Shariq, M., "Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment–A review of mechanical properties and microstructure." *Journal of cleaner production* 223 (2019): 704-728.

- [12] Güzelkçük, S., "Isı yalıtım kabiliyetine sahip perlit esaslı geopolimer bağlayıcı harçların geliştirilmesi.", Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, (2020).
- [13] Çelik, A., "Sentetik liflerle güçlendirilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı ve mekanik özellikleri.", (2019).
- [14] Zeybek, O., "Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2009)
- [15] Kuranlı, Ö., "Farklı Bağlayıcı ve Lif İçeren Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2020)
- [16] Çelik, A., " Sentetik liflerle güçlendirilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı ve mekanik özellikleri ", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, (2019)
- [17] Akman, M., "Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi." Türkiye Mühendislik Haberleri, 2003(4): 30-36.
- [18] Shi, C., Roy, D., Krivenko, P., Alkali-activated cements and concretes. CRC press, 2003.
- [19] Davidovits, J., "Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process." U.S. Patent No. 4,472,199, (1984).
- [20] Karaaslan, C., "Su Yapılarında Kullanılabilir Pomza Esaslı Geopolimer Betonların Geliştirilmesi", Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, (2021).
- [21] Barness, P., Bensted, J., "Structure and Performance of Cements. Chapter 15: Metakaolin as a pozzolanic addition to concrete." TR Jones. Florance, KY, USA: Routledge, p372, (2001).
- [22] Hamalı, Y., "Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2007).
- [23] Vu, D. D., "Strength properties of metakaolin-blended paste, mortar and concrete." (2004): 0222-0222.
- [24] Yılmaz, Y., "Beton üretiminde uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmasının etkileri ve maliyet analizi", Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, (2014).

- [25] Beycioğlu, A., Başıyigit, C., Subaşı, S., "Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanımı ile geri kazanılması ve çevresel etkilerinin azaltılması", Çevre ve Sorunları Sempozyumu, Kocaeli, (2008), 1386: 1394.
- [26] Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S.T., Çapar, Ö.F., "Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi, 2" Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi Bildirileri 1 (2010): 506-513.
- [27] Saran, A. G., "Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [28] Aruntaş, H. "Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli." Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 21.1 (2006).
- [29] Topçu, İ. B., Canbaz, M., "Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri." Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi 14.2 (2001): 11-23.
- [30] Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y., Wu, X. "Studies on blended cement with a large amount of fly ash." Cement and Concrete Research 32.7 (2002): 1153-1159.
- [31] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğınobalı, A., "Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri." Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği 20 (2009): 34.
- [32] Demir, İ., "Aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi", International Journal of Engineering Research and Development 1.2 (2009): 1-7.
- [33] Topcu, I. B., & Sarıdemir, M., "Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural networks and fuzzy logic." Computational Materials Science 41.3 (2008): 305-311.
- [34] Köse, E. T., Akyıldız, A., "Kırmızı çamurun çimento bazlı solidifikasyon / stabilizasyonu: Ağır metallerin sızma özellikleri." Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 23.6 (2017): 741-747.
- [35] Kalkan, E., "Utilization of red mud as a stabilization material for the preparation of clay liners." Engineering geology 87.3-4 (2006): 220-229.
- [36] Yang, J., & Xiao, B., "Development of unsintered construction materials from red mud wastes produced in the sintering alumina process." Construction and Building Materials 22.12 (2008): 2299-2307.

- [37] Liu, W., Yang, J., Xiao, B., "Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues." *Journal of hazardous materials* 161.1 (2009): 474-478.
- [38] Özgün, M. A. "Kırmızı çamur üretimi ve değerlendirme olanakları." Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta (2012).
- [39] Tansel, T., "Farklı Tür Atık Malzemeler Kullanılarak Üretilen Geopolimer Harçların Mekanik ve Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, (2021).
- [40] Tansel, T., "Mermer Atıklarından Köpük Beton Blok Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, (2018).
- [41] Yip, C.K., Lukey, G.C., Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J., "Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation." *Cement and Concrete Research* 38.4 (2008): 554-564.
- [42] Kaya, M., "Farklı Tür Uçucu Küller Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Sakarya, (2016).
- [43] Rilem, Draft Recommendation. "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams." *Materials and structures* 18.106 (1985): 285-290.
- [44] Bocullo, V., "The influence of the silica/sodium ratio on the fly ash geopolymer binder." *Chemical Technology* 68.1 (2017): 23-28.
- [45] Revathi, V., Saravanakumar R., Thaarrini J., "Effect of molar ratio of $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio and curing mode on the compressive strength of ground bottom ash geopolymer mortar." *International Journal of Earth Sciences and Engineering* 7.4 (2014): 1511-1516.
- [46] Hillerborg, A., "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete.", *Materials and structures* 18.4 (1985): 291-296.
- [47] Patankar, Subhash V., Yuwaraj M. Ghugal, and Sanjay S. Jamkar. "Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar." *Indian Journal of Materials Science* 2014 (2014).

- [48] Xu, A., Shayan, A., "Effect of activator and water to binder ratios on setting and strength of geopolymer concrete", In: ARRB Conference, 27th, 2016, Melbourne, Victoria, Australia. 2016.
- [49] Altındal, İ., "Değişik geopolimer beton numunelerin farklı kür koşulları altında basınç dayanımının değişimi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2020).
- [50] Khaleel Rashid, R., "Uçucu Küllü Geopolimer Betonlarda Gecikmiş Isı Kürünün Dayanım ve Durabilite Özelliklerine Etkisi ", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2021).
- [51] Rangan B.V., Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J, Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Faculty of Engineering and Computing, Curtin University of Technology, (1987).
- [52] Lloyd, N., Rangan, V., "Geopolymer concrete with fly ash" In: Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies. UWM Center for By-Products Utilization, (2010). p. 1493-1504.
- [53] Niş, A., "Compressive strength variation of alkali activated fly ash/slag concrete with different NaOH concentrations and sodium silicate to sodium hydroxide ratios." Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies 4.2 (2019): 351-360.
- [54] Sathonsaowaphak A, Chindaprasirt P, Pimraksa K., "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar." J Hazard Mater (2009), 168:44–50.
- [55] Nath, P., Sarker, P. K., "Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition." Construction and Building materials, (2014), 66: 163-171.
- [56] Hadi, M.N., Zhang, H., Parkinson, S., "Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability. ", Journal of Building engineering, (2019), 23: 301-313.
- [57] Mehta, A., Siddique, R., Singh, B. P., Aggoun, S., Łagód, G., Barnat-Hunek, D., "Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method", Construction and Building Materials 150 (2017): 817-824.
- [58] He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G., "Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites." Cement and Concrete Composites 37 (2013): 108-118.

- [59] Van Chanh, N., Trung, B. D., Van Tuan, D., "Recent research geopolymers concrete", In: The 3rd ACF international conference-ACF/VCA, Vietnam. 2008. p. 235-241.
- [60] Olivier, J. G., Peters, J. A., Janssens-Maenhout, G., "Trends in global CO2 emissions. 2012 report." (2012).
- [61] Nuaklong, P., Sata, V. Chindaprasirt, P., "Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymers concrete properties." *Journal of Cleaner Production* 112 (2016): 2300-2307.
- [62] Joseph, B., Mathew, G., "Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymers concrete", *Scientia Iranica* 19.5 (2012): 1188-1194.
- [63] Sarker, P. K., Haque, R., Ramgolam, K. V., "Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymers concrete", *Materials & Design*, (2013), 44, 580-586.
- [64] Olivia, M., & Nikraz, H., "Properties of fly ash geopolymers concrete designed by Taguchi method" *Materials & Design* (1980-2015), (2012). 36, 191-198.
- [65] Pacheco-Torgal, F., Moura, D., Ding, Y., Jalali, S., "Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars", *Construction and Building Materials*, (2011), 25(9), 3732-3745.
- [66] Rovnaník, P., "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymers." *Construction and building materials* 24.7 (2010): 1176-1183.
- [67] Özdal, M., "Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme dayanıklılığının araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, (2019).
- [68] Değirmenci, F. N. "Freeze-Thaw and fire resistance of geopolymers mortar based on natural and waste pozzolans." *Ceramics-Silikaty*, (2018), 62(1):41-49pp.
- [69] Shamsa, M.H., Al-Shathr, B.S., Al-Attar, T.S., "Performance of geopolymers concrete exposed to freezing and thawing cycles", *Engineering and Technology Journal*, (2019), 37(A3):78-84pp.
- [70] Zhao, R., Yuan, Y., Cheng, Z., Wen, T., Li, J., Li, F., Ma, Z. J., "Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymers concrete" *Construction and Building Materials*, (2019), 222, 474-483.
- [71] Al-Akhras, N. M., "Durability of metakaolin concrete to sulfate attack." *Cement and concrete research* 36.9 (2006): 1727-1734.

- [72] Özcan, A., "Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit, tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2018).
- [73] Ganeshan, M. Sreevidya V., "Durability and microstructural studies on fly ash blended self-compacting geopolimer concrete." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 25.11 (2021): 2074-2088.
- [74] Elyamany, H. E., Abd Elmoaty, M., Elshaboury, A. M., "Magnesium sulfate resistance of geopolimer mortar." *Construction and Building Materials* 184 (2018): 111-127.
- [75] Değirmenci, F. N., "Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on durability of geopolimer mortars containing natural and artificial pozzolans." (2017).
- [76] Bakharev, T., "Resistance of Geopolimer materials to acid attack", *Cement and Concrete Research*, (2005a), 35: 1233-1246.
- [77] Aydın, S., "Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice." *Fire safety journal* 43.8 (2008): 610-617.
- [78] Shaikh, F. U. A., Hosan, A., "Mechanical properties of steel fibre reinforced geopolimer concretes at elevated temperatures." *Construction and building materials* 114 (2016): 15-28.
- [79] Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., Sagoe-Crentsil, K., "Comparative performance of geopolimers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures." *Cement and concrete research* 37.12 (2007): 1583-1589.
- [80] Fan, F., Liu, Z., Xu, G., Peng, H., Cai, C. S., "Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolimers." *Construction and Building Materials* 160 (2018): 66-81.
- [81] 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 geopolimer composites reinforced with synthetic fibers", *Construction and Building Materials*, 187, (2018): 1190–1203.
- [82] Ünal, O., Uygunoğlu, T., "Afyon Mermer Tozu ve Soma Uçucu Kül Katkılı Betonların Donma-Çözülme Özellikleri ve Ekonomik Değerlendirilmesi" *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu* 83 (2004): 88.
- [83] Topçu, İ.B., Demirel, O.E. Uygunoğlu, T., "Polipropilen lif katkılı harçların fiziksel ve mekanik özellikleri." *Politeknik Dergisi* 20.1 (2017): 91-96.
- [84] 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, (2018): 271–282.
- [85] Zhang, Y.J., Li, S., Wang, Y.C. ve Xu, D.L., “Microstructural and strength evolutions of geopolymer composite reinforced by resin exposed to elevated temperature”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358, (2012): 620–624.
- [86] Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L., Qi, S. L. "Comparative thermal and mechanical performance of geopolymers derived from metakaolin and fly ash." *Journal of Materials in Civil Engineering* 28.2 (2016): 04015092.
- [87] Topçu, İ. B., Demir, A., "Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özelliklerine etkisi, 7." *Ulusal Beton Kongresi* (2007): 455-463.
- [88] Chakkor, O., “Kırmızı Çamur ve Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi”, *Doktora Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2021).*
- [89] Tammam, Y., “Farklı Tür Mineral Katkıların Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi”, *Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, (2021).*
- [90] Basheer, L., Kropp, J., Cleland, D. J., "Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review." *Construction and building materials* 15.2-3 (2001): 93-103.
- [91] Salami, B.A., Johari, M.A.M., Ahmad, Z.A., Maslehuddin, M., "Durability performance of palm oil fuel ash-based engineered alkaline-activated cementitious composite (POFA-EACC) mortar in sulfate environment." *Construction and Building Materials* 131 (2017): 229-244.