



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**POLİPROPİLEN LİF KATKISININ UÇUCU KÜL İKAMELİ
YÜKSEK FIRIN CÜRUF ESASLI GEOPOLİMER
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**BUĞRA AYDIN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İlhami DEMİR**

KIRIKKALE-2025



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**POLİPROPİLEN LİF KATKISININ UÇUCU KÜL İKAMELİ
YÜKSEK FIRIN CÜRUF ESASLI GEOPOLİMER
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**BUĞRA AYDIN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. İlhami DEMİR**

KIRIKKALE-2025

KABUL VE ONAY SAYFASI

Buğra AYDIN tarafından hazırlanan “POLİPROPİLEN LİF KATKISININ UÇUCU KÜL İKAMELİ YÜKSEK FIRIN CÜRUF ESASLI GEOPOLİMER ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İlhami DEMİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,

İmza

Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Mehmet Mustafa ÖNAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,

İmza

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Özer SEVİM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,

İmza

Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 16/12/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Buğra AYDIN

16/12/2024

ÖZET

POLİPROPİLEN LİF KATKISININ UÇUCU KÜL İKAMELİ YÜKSEK FIRIN CÜRUF ESASLI GEOPOLİMER ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Buğra AYDIN

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlhami DEMİR

Ocak 2025, 94 Sayfa

Günümüzde, sudan sonra en fazla tüketilen malzeme betondur. Beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan en önemli bileşen çimentodur. Çimento üretimi sırasında CO₂ salınımı dünya genelinde %7 civarındadır. Bu nedenle çimento üretiminin sürdürülebilir olarak kullanımı mümkün gözükmemektedir. Sürdürülebilir olarak alternatif malzeme üretme tekniklerinin önemi büyüktür. Bu yapı malzemelerinden en önemlilerinden biri de geopolimerlerdir.

Bu çalışmanın üç farklı temel amacı vardır. Birincisi sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaşam için geopolimer harçları endüstriyel atık olan uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) ile kompoze edilmiş şekilde üretmektir. İkincisi %5-%10-%15-%20-%25 oranlarında UK ikame edilmiş YFC esaslı geopolimerleri düşük molaritede üretmektir. Üçüncüsü üretilen geopolimerleri ortam ısı küründe olgunlaştırarak lif katkısının etkisini incelemektir. Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan UK ve YFC ile birlikte alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Lif olarak polipropilen lif kullanılmıştır. Geopolimer üretiminde 4, 6 ve 8 molariteye sahip üç farklı alkali aktivatör konsantrasyonunda geopolimer harçlar üretilmiştir. UK ikameli YFC esaslı geopolimer harçlar 38±5 °C’de 3, 7 ve 28 gün dış ortam küründe olgunlaştırılmıştır. Geopolimer harçlara 3, 7 ve 28 günler sonunda eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca bu geopolimer harçlara civalı porozimetre ve mikroyapı analizi testleri uygulanmıştır.

Sonuç olarak, en yüksek eğilme ve basınç dayanımı, 28 gün boyunca kürlenmiş, alkali aktivatör olarak 8 molarite NaOH kullanılan, %100 YFC esaslı bağlayıcı içeren ve polipropilen lif katkısıyla üretilen geopolimer harçta elde edilmiştir. YFC bağlayıcılı UK ikamesiyle üretilen harçlarda lif katkısının eğilme ve basınç dayanım özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer; yüksek fırın cürufu; uçucu kül; polipropilen lif; molarite; eğilme ve basınç dayanımı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBER ADDITIVE ON THE PROPERTIES OF FLY ASH SUBSTITUTED BLAST FURNACE SLAG BASED GEOPOLYMER

Buğra AYDIN

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M.S. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlhami DEMİR

January 2025, 94 Pages

Today, concrete is the most consumed material after water. Cement is the most critical component used as a binder in concrete production. During cement production, approximately 7% of global CO₂ emissions are generated. Therefore, the sustainable use of cement production appears to be unfeasible. The importance of developing alternative sustainable material production techniques is significant. Among these construction materials, geopolymers are one of the most important alternatives.

This study has three primary objectives. The first is to produce geopolymer mortars for sustainable and environmentally friendly living by compositing them with industrial waste, such as fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS). The second is to produce GGBFS-based geopolymers with 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% FA substitution at low molarities. The third is to examine the effect of fiber addition by curing the produced geopolymers at ambient temperature. In the study, FA and GGBFS were used as binders, and sodium hydroxide (NaOH) was used as an alkaline activator. Polypropylene fibers were utilized as the reinforcing material. Geopolymer mortars were produced at three different alkaline activator concentrations of 4, 6, and 8 molarity. FA-substituted GGBFS-based geopolymer mortars were cured at ambient temperature (38 ± 5 °C) for 3, 7, and 28 days. These geopolymer mortars were subjected to flexural and compressive strength tests at the end of 3, 7, and 28 days. Additionally, mercury porosimetry and microstructure analysis tests were conducted on these geopolymer mortars.

As a result, the highest flexural and compressive strength was achieved in the geopolymer mortar produced with 100% GGBFS as the binder, cured for 28 days, using 8 molarity NaOH as the alkaline activator, and reinforced with polypropylene fibers. The results indicate that the addition of fibers improved the flexural and compressive strength properties of mortars produced with GGBFS binders and FA substitution.

Key Words: Geopolymer; ground granulated blast furnace slag; fly ash; polypropylene fiber; molarity; flexural and compressive strength.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından sonuna kadar her zaman yardım eden, desteğini esirgemeyen çalışmam boyunca tecrübelerini aktaran çalışma azmimi ve isteğimi artıran Sayın Prof. Dr. İlhami Demir hocama teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sürecimde tezime desteklerini sunan Prof. Dr. Mehmet Mustafa Önal hocama teşekkürlerimi iletirim.

Çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen fikirleriyle ve tecrübeleriyle destek veren Doç. Dr. Özer Sevim, Doç. Dr. Kenan Toklu ve Öğr. Gör. Serdar Korkmaz hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımda maddi manevi her konuda yanımda olan yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
SİMGELER DİZİNİ	XII
KISALTMALAR DİZİNİ.....	XII
1.GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	3
2. GEOPOLİMER LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Geopolimerin Tarihi	4
2.2. Geopolimerlerin Mineralojik Özellikleri	5
2.3. Geopolimerizasyon.....	5
2.4. Geopolimerlerin Uygulandığı Alanlar	7
2.5. Geopolimerlerin Avantajları ve Dezavantajları	10
2.6. Geopolimerlerin Mukavemetini ve Durabilitesini Etkileyen Faktörler	12
2.6.1. Büzülme.....	12
2.6.2. Aşınma.....	13
2.6.3. Alkali Aktivatörler.....	13
2.6.4. Kür Süresi ve Sıcaklığı	14
2.6.5. Geopolimerlerde Su Miktarı	15
2.6.6. Donma-Çözünme Etkisi	15
2.7. Lifli Geopolimerler	15
2.7.1. Lifli Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri	16
2.8. Geopolimerlerin Basınç Dayanımı.....	16
2.9. Yüksek Fırın Cürufu.....	18
2.9.1. Geopolimerlerde Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı.....	18
2.9.2. Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimerin Basınç Dayanımı	19

2.10. Uçucu Kül	19
2.10.1. Geopolimerlerde Uçucu Kül Kullanımı	20
2.10.2. Uçucu Kül Esaslı Geopolimerlerin Basınç Dayanımı	21
2.11. Yüksek Fırın Cürufu-Uçucu Kül Karışımı Geopolimerlerin Basınç Dayanımı	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM	23
3.1. Materyal	23
3.1.1. Agregat	23
3.1.2. Karışım Suyu	23
3.1.3. Lif	23
3.1.4. Sodyum Hidroksit.....	24
3.1.5. Bağlayıcı Malzemeler.....	25
3.1.5.1. Yüksek Fırın Cürufu.....	25
3.1.5.2. Uçucu Kül.....	25
3.2. Yöntem	26
3.2.1 Kalıpların Hazırlanması.....	27
3.2.2. Alkali Aktivatörün Hazırlanması.....	28
3.2.3. Geopolimer Harçların Hazırlanması.....	29
3.2.4. Geopolimer Harçların Kür Sıcaklığı ve Molaritesi	30
3.2.5. Geopolimer Harçlarda Yüksek Fırın Cürufuna Uçucu Kül İkameli Karışımlar	31
3.2.6 Geopolimer Harçların Kütleme İşlemi	32
3.2.7. Geopolimer Harçların Yayılma Deneyi.....	32
3.2.8. Eğilme Dayanımı Testi	33
3.2.9. Basınç Dayanımı Testi.....	33
3.2.10. Mikroyapı Analizi.....	34
3.2.11. Civalı Porozimetre Deneyi	35
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	36
4.1. Geopolimer Harçların Yayılma Deneyleri	36
4.2. Geopolimer Harç Örneklerinin Eğilme Dayanımları	37
4.3. Geopolimer Harç Örneklerinin Basınç Dayanımları.....	55
4.4. Geopolimer Harç Örneklerinin XRD Analiz Sonuçları	75
4.5. Geopolimer Harç Örneklerinin SEM Görüntüsü ve EDX Analiz Sonuçları ..	77
4.6. Geopolimer Harç Örneklerinin Civalı Porozimetre Analiz Sonuçları	81
5.SONUÇ ve ÖNERİLER	83

KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	94



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

2.1. Geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılan malzemeler	5
2.2. Geopolimer teknolojisi için yüksek performans uygulama alanları.	9
3.1. Kum granülometrisi ve sınır değerleri	23
3.2. Sodyum hidroksit kimyasal özellikleri	24
3.3. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kimyasal kompozisyonu.....	26
3.4. Farklı molaritelerdeki alkali aktivatör karışım oranları	31
3.5. Geopolimer harçların karışım oranları	32
4.1. Geopolimer harç yayılma deneyi verileri.....	36
4.2. Lifsiz geopolimer harçların eğilme dayanımı	37
4.3. Lifli geopolimer harçların eğilme dayanımı	38
4.4. Lifsiz geopolimer harçların basınç dayanımı	56
4.5. Lifli geopolimer harçların basınç dayanımı	56
4.6. XRD analizi yapılan geopolimer harçların bileşen değerleri.....	76
4.7. EDX analizi yapılan geopolimer harçların oksit miktarları	80
4.8. Referans örneklerin civalı porozimetre analiz sonuçları.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

2.1. Çözünmüş alüminosilikatların yeniden örgütlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşması ve jel formasyonu başlangıcı, (c) polimerizasyon.....	6
2.2. Geopolimerizasyon süreci.....	7
2.3. Geopolimerizasyon sürecinin bir diğer gösterimi.....	7
3.1. Polipropilen lif.....	24
3.2. Sodyum hidroksit.....	24
3.3. Yüksek fırın cürufu.....	25
3.4. Uçucu kül.....	26
3.5. Çalışma planı özeti.....	27
3.6. Geopolimer hazırlık süreci.....	27
3.7. Üretimde kullanılan kalıp.....	28
3.8. Alkali karışım.....	28
3.9. Laboratuarda kullanılan bazı cihazlar.....	30
3.10. Eğilme dayanımı test cihazı.....	33
3.11. Basınç dayanımı test cihazı.....	34
3.12. Afyon Kocatepe Üniversitesi SEM analiz cihazı.....	35
3.13. Rize RTEÜ civalı porozimetre cihazı.....	35
4.1. 4M geopolimer harçların 3 günlük eğilme dayanımları.....	38
4.2. 6M geopolimer harçların 3 günlük ortalama eğilme dayanımları.....	40
4.3. 8M geopolimer harçların 3 günlük ortalama eğilme dayanımları.....	41
4.4. 4M geopolimer harçların 7 günlük ortalama eğilme dayanımları.....	42
4.5. 6M geopolimer harçların 7 günlük ortalama eğilme dayanımları.....	44
4.6. 8M geopolimer harçların 7 günlük ortalama eğilme dayanımları.....	45
4.7. 4M geopolimer harçların 28 günlük ortalama eğilme dayanımları.....	46
4.8. 6M geopolimer harçların 28 günlük ortalama eğilme dayanımları.....	48
4.9. 8M geopolimer harçların 28 günlük ortalama eğilme dayanımları.....	49
4.10. Geopolimer harçların eğilme dayanımına alkali aktivatör molaritesi ve kür süresinin etkisi (a) lifsiz, (b) lifli.....	51

4.11. Geopolimer harçlarda lif kullanımının ortalama eğilme dayanımına etkisi (a) 4M, (b) 6M, (c) 8M.....	54
4.12. 4M geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları	57
4.13. 6M geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları	58
4.14. 8M geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları	60
4.15. 4M geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları	61
4.16. 6M geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları	63
4.17. 8M geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları	64
4.18. 4M geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları	66
4.19. 6M geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları	67
4.20. 8M geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları	69
4.21. Geopolimer harçların basınç dayanımına alkali aktivatör molaritesinin ve kür süresinin etkisi (a) lifsiz, (b) lifli.....	71
4.22. Geopolimer harçlarda lif kullanımının basınç dayanımına etkisi (a) 4M, (b) 6M, (c) 8M.....	74
4.23. 6M-Referans harcının XRD analiz grafiği.....	75
4.24. 6M-UK15 harcının XRD analiz grafiği	76
4.25. Geopolimer harçların 1000x SEM görüntüleri (a) 6M-Referans (%100 YFC), (b) 6M-UK15	77
4.26. Geopolimer harçların 2500x SEM görüntüsü	78
4.27. Geopolimer harçların 10000x SEM görüntüsü	78
4.28. EDX grafiği (a) 6M-Referans, (b) 6M-UK15	79
4.29. Geopolimer harç örneklerinin civalı porozimetre analizleri	81

SİMGELER DİZİNİ

°C	Santigrat derece
%	Yüzde
+	Toplama
/	Bölme
×	Çarpma
g	Gram
ml	Mililitre
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
nm	Nanometre

KISALTMALAR DİZİNİ

Al ₂ O ₃	Alümyum Oksit
AlO ₄	Alimünyum Tetrahedralleri
Ca(OH) ₂	Kalsiyum Hidroksit
CaO	Kalsiyum Oksit
C-A-S-H	Kalsiyum Alümina Silika Hidrat Jelleri
CO ₂	Karbondioksit
C-S-H	Kalsiyum Alümina Hidrat Jelleri
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
Fe ₂ O ₃	Demir (III) Oksit
H ₂ O	Su
K ₂ CO ₃	Potasyum Karbonat
K ₂ SiO ₃	Potasyum Silikat
K ₂ SO ₄	Potasyum Sülfat
KOH	Potasyum Hidroksit
M	Molarite
MPa	Megapaskal
Na ₂ CO ₃	Sodyum Karbonat
Na ₂ SiO ₃	Sodyum Silikat
Na ₂ SO ₄	Sodyum Sülfat
Na ₂ O	Sodyum Oksit

NaOH	Sodyum Hidroksit
N-A-S-H	Sodyum Alümina Silika Hidrat Jelleri
PÇ	Portland Çimento
PP	Polipropilen
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO ₂	Silisyum Dioksit
SiO ₄	Silikat Tetrahedralleri
UK	Uçucu Kül
XRD	X-ışını Kırınım Analizi
YFC	Yüksek Fırın Cürufu



1.GİRİŞ

Beton; agrega, kum, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddeleri eklenerek üretilen başlangıçta akıcı kıvamda olup yerleştirildiği kabın şeklini alan zamanla sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir. Beton inşaat sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemesi olup binalar, köprüler, barajlar ve yolların yapımında temel bir bileşen olarak yerini almaktadır. Beton bileşenlerinde bağlayıcı olarak çimento, mekanik özellikleri ve dayanımı artırmak için agrega, hidrasyon sürecini başlatmak için ve işlenebilirlik için su kullanılmaktadır.

Betonun standartlara uygun olup olmadığının kontrolü ve beton özelliklerini belirlemek için kabul edilen en önemli kriterlerden biri beton basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı, verilen beton karışımının belirtilen gereksinimleri karşılayıp karşılamadığını bilmek için gereklidir. Yapının sürdürülebilirliği için üretilen betonun basınç dayanımı gerekli standartları karşılaması gerekmektedir (Jha, Adhikari, Thapa, Kumar, Kumar ve Mishra, 2020). Beton standardının tespit edilmesi için standartlarda belirtilen boyutlarda kalıplara yerleştirilen beton numuneleri, yine standartlarda belirtilen süre kadar kür edildikten sonra basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmelidir (ASTM C 39/C 39M-04a, 2004; Unı, 2019).

Betonun basınç dayanımı, beton üretiminde kullanılan malzemelerden etkilenmektedir. Örneğin beton içerisindeki karışım suyu artışı beton basınç dayanımını azaltırken, karışım suyunun azaltılması basınç dayanımını artırmaktadır. Beton basınç dayanımını artırmak için yıllar boyunca birçok mineral ve kimyasal katkı denemeleri yapılmıştır (Malhotra, 1993; Sasatani, Torill ve Kawamura, 1995; Polder, 1996; Tan ve Pu, 1998; Bleszynski, Hooton, Thomas ve Rogers, 2002; Yazıcı, Yiğiter, Karabulut ve Baradan, 2008; Gesoğlu, Güneyisi ve Özbay, 2009; Ozturk, Sevim, Akgol, Unal ve Karaaslan, 2020; Nedunuri, Sertse ve Muhammad, 2020). Beton özelliklerini iyileştirmek için kullanılan mineral katkılar puzolan olarak isimlendirilir. Puzolanlar beton içerisinde kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan ya da çok az olan ancak çimento ile kullanıldığında bağlayıcılık özelliği gösteren doğal ve yapay

malzemelerdir (Nedunuri vd., 2020; Pasupathy, Berndt, Sanjayan, Rajeev ve Cheema, 2018). Ayrıca puzolan kullanımı ile aynı zamanda atıkların değerlendirilmesi gerçekleştirilmektedir (Malhotra, 1993). Puzolan kullanımı ile ilgili yeni yöntemler geliştirilmeye devam etmektedir (Malhotra, 1993). Bu yeni yöntemlerden biri de geopolimer konusudur. Günümüzde geopolimerler, çimentosuz bağlayıcı özelliğinden dolayı beton üretimi için çimentoya alternatif olarak görülmektedir (Pasupathy vd., 2018; Nazari, Bagheri, Sanjayan, Dao, Mallawa, Zannis ve Zumbo, 2019). Geopolimer beton, geleneksel çimento esaslı beton ile karşılaştırıldığında standartlarda kabul edilen basınç dayanımı kriterlerini sağlamaktadır (Pasupathy vd., 2018; Nazari, Bagheri, Sanjayan, Dao, Mallawa, Zannis ve Zumbo, 2019).

Geopolimer adı ilk kez Davidovits tarafından ortaya konulmuştur (Davidovits, 1989). Davidovits, bağlayıcıların jeolojik kökenli malzemelerin veya uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü gibi yan ürün malzemelerin, alkali sıvıların silikon ve alüminyum ile polimerik reaksiyonu ile üretilebileceğini öne sürmüştür (Davidovits, 1989). Bu bağlayıcıları da geopolimer olarak adlandırmıştır (Davidovits, 1989). Geopolimerler özellikle karbondioksit (CO_2) emisyonunun azaltılması için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Daha düşük CO_2 emisyonuna sahip bu malzemeler sürdürülebilirlik açısından da önem arz etmektedir. Düşük CO_2 emisyonundan dolayı karbon ayak izinin azaltılmasında etkili olacağı görülmüştür (Davidovits, 1991; Davidovits, 1994; Hardjito, Wallah, Sumajouw ve Rangan, 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006). Düşük CO_2 emisyonu ve çevresel sürdürülebilirlik ile birlikte uçucu kül bazlı geopolimerler dayanımlılık bakımından geleneksel çimentonun yerine tercih edilebilir bir malzeme olacağı görülmüştür (Davidovits, 2008; Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008; Li, Sun ve Li, 2010; Habert, De Lacaillerie ve Roussel, 2011; Lloyd ve Rangan, 2010; Habert, D'Espinose de Lacaillerie, Lanta ve Roussel, 2010; Olivia ve Nikraz, 2012). Günümüzde hem doğal kaynakların kıtlığı hem de beton ve çimento üretiminden kaynaklı ortaya çıkan CO_2 salınımı nedeniyle geopolimer bağlayıcıları geliştirmek üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Turner ve Collins, 2013; Nath ve Sarker, 2014; Singh, Ishwarya, Gupta ve Bhattacharyya, 2015; Part, Ramli ve Cheah, 2015; Sevim, Demir, Alakara ve Bayer, 2023; Alakara, Sevim, Demir ve Günel, 2022).

Geopolimer üretimi için bağlayıcı malzeme ve alkali aktivatör olmak üzere iki ana bileşen vardır. Bağlayıcı malzemeler alkali-silika içeriğine dayanmaktadır. Kil ve

kaolit gibi doğal malzemelerin yanı sıra alternatif olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silika dumanı da geopolimer üretiminde kullanılmaktadır. Alkali çözelti olarak sodyum veya potasyum bazlı malzemeler esas alınarak çözelti hazırlanmaktadır. Geopolimer üretiminde alkali aktivatör çözeltisi hazırlamak için yaygın olarak sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH), potasyum silikat ($\text{K}_2\text{O}_3\text{Si}$) ve kombinasyonları kullanılmaktadır (Murali, Meena, Sai ve Chaitanya, 2018).

Lifler düşük maliyetleri ve üstün özellikleri nedeniyle son yıllarda beton üretiminde yoğun olarak tercih edilmektedirler. Betonun zayıf olan çekme ve çatlak oluşumu direncinin lif katkısı ile geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Cam elyaf, polipropilen (PP), çelik, bazalt, karbon vb. lifler toplam beton hacminin yüzdesi olarak karışıma ilave edilmektedir (Dawood ve Ramli, 2011; Sabu ve Karthi, 2018; Reed, Lokuge ve Karunasena, 2014; Aswani ve Karthi, 2017).

Lifli geopolimer betonlar son yıllarda çalışma konusu olan konulardan bir tanesidir (Banthia ve Nandakumar, 2003). Lif kullanımından lif çapı, tipi, uzunluğu, boyutu gibi farklı parametreler beton özelliklerini etkilemektedir (Banthia ve Nandakumar, 2003).

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Yapılan bu tez çalışmasının amacı; inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılan çimentonun karbon salınımından dolayı çimento kullanılmadan daha çevre dostu üretilen lifli UK ikameli YFC esaslı geopolimer harçların mühendislik özelliklerinin incelenmesidir. Çalışmada silis-alümin kökenli puzolanik malzeme olan yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harçlar %100 YFC ile üretilmeye başlanıp sırasıyla %5-%10-%15-%20-%25 UK ikame edilerek karışımlar elde edilmiştir. Bu elde edilen karışımlar ilk olarak lif kullanılmadan üretilmiş olup daha sonra polipropilen lif kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen geopolimer karışımlar 4, 6 ve 8 molaritelerde hazırlanmıştır. Elde edilen geopolimer karışımlar 40x40x160 mm ebatlarındaki kalıplara dökülerek 38 ± 5 °C dış ortamda bekletilerek kür işlemi uygulanmıştır.

Daha sonrasında numunelere 3, 7 ve 28 günlerde eğilme ve basınç dayanımı testleri, 28 günde XRD, SEM+EDX ve civalı porozimetre analizleri yapılmıştır.

2. GEOPOLİMER LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Geopolimerin Tarihi

Geopolimer, alimünyum silikattan oluşan ve aktive edilerek kullanılan bir çimento türü olarak düşünülebilir. Alkali çözeltiler ve geopolimerler organik malzeme olarak kabul edilebilir (Joseph, 2015). 1940 yılında Purdon geopolimer bağlayıcılar ile ilgili yaptığı çalışmalar bu alanda yapılan çalışmalara katkı sağlamıştır (Purdon, 1940). 1960 yıllarına yaklaşırken Gluskhovsky eski tarihi yapılarda kullanılan antik Roma ve Mısır gibi bölgelerde kullanılan malzemeleri incelemiştir (Gluskhovsky, 1965). Bu incelemelerde bağlayıcılık sağlayan sodyum ve kalsiyum alümino-silikat hidratlarını çalışmalar sonucunda bulmuştur (Gluskhovsky, 1965).

Geopolimerler üzerine yapılan ilk çalışmalar 1970'lere kadar dayanmaktadır ve 1972 yılında Davidovits tarafından kaolinik killerin dönüşümüne dayanan bir yöntem geliştirilmiştir (Davidovits, 1972). Daha sonra ise 1975 yılında Davidovits kendi kurduğu laboratuvarında metakaolin ve çözünebilir alkali silikat esaslı geopolimerik bir likit bağlayıcı üretmeyi başarmıştır (Davidovits, 1976). Davidovits karışım esnasında oluşan reaksiyonların ekzotermik olduğunu ve ısı kürü uygulandığında reaksiyonların çok daha hızlı oluştuğunu ve 120 °C'de yaklaşık 2 dk'da üretilen bağlayıcının sertleştiğini ifade etmiştir (Davidovits, 1976). Kür işlemi farklı sıcaklıklarda ve farklı ortamlarda uygulanabilmektedir (Davidovits, 1991). Davidovits'in yaptığı çalışmalar doğrultusunda 1990 lardan sonra geopolimer beton ile ilgili çalışmalarda artış gözlemlenmiştir (Sasatani vd., 1995; Polder, 1996; Tan ve Pu, 1998). Son zamanlarda ise bu alan ile ilgili çalışmalara çok rağbet gösterilmektedir. Sevim vd., (2023) geopolimer betonla ilgili çalışmalar yapmışlardır. Alakara vd., (2022) yılında yaptığı çalışmalarla geopolimer alanına katkı sağlamışlardır. Bu çalışmalara bakıldığında, geopolimer beton üretimindeki artış hem fiziksel ve mekanik özelliklerinin avantajları hem de geleneksel portland çimentosunun çevreye verdiği zararı en aza indirmek amacıyla bu konuya olan ilgilinin fazla olduğu gözlemlenmektedir (Sevim vd., 2023; Alakara vd., 2022).

2.2. Geopolimerlerin Mineralojik Özellikleri

Dünya çapında karbon salınımı ve küresel ısınma hayatı olumsuz şekilde etkilemeye devam etmektedir. Çimento üretimi ise karbon salınımına yüksek miktarda katkı sağlamaktadır. Çimento üretimi karbon salınımından dolayı çevre dostu bir yapı malzemesi değildir. Çevresel olarak atık madde miktarı çok artmaktadır ve bunları yok etmek için çeşitli yollar denenmiştir (Mehta, 2001). Bu atıkları yok etmek yerine farklı şekillerde değerlendirip kullanılmak amaçlanmıştır. Bu doğrultuda geopolimer betonlarda atık malzemelerin kullanılmasında yeni bir yol olmuştur (Davidovits, 2008). Geopolimerler inorganik bağlayıcı sınıfındadır (Lloyd, Provis ve Van Deventer, 2009). Geopolimerler alüminosilikat kaynağının (uçucu kül vb.) hidroksit, silikat, alüminat veya karbonat içeren alkali aktivatörler ile ortam ya da yüksek sıcaklıklarda (90 °C gibi) karıştırılması ile sentezlenmektedir (Weerd, 2011). Reaksiyon ürünüde esas olarak 3D yapı oluşturan, birbirine bağlı SiO_4 ve AlO_4 tetrahedrallerinden oluşan alüminosilikat fazıdır (Weerd, 2011). Geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılan malzemeler Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılan malzemeler (Nodehi ve Taghvaei, 2022)

Al_2O_3 ve SiO_2 Kaynaklı Malzeme	Alkali Aktivatörler
Uçucu Kül	NaOH
Yüksek Fırın Cürufu	KOH
Silis Dumanı	Na_2SO_4
Metakoalin	K_2CO_3
Kırmızı Çamur	Na_2SiO_3
Volkanik Tüf	Na_2CO_3

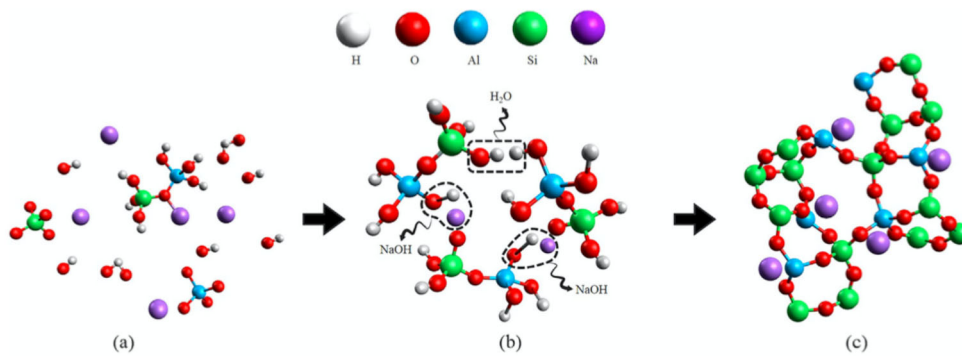
2.3. Geopolimerizasyon

Joseph Davidovits 1978 yılında yaptığı çalışmalar sonucunda ilk defa “geopolimer” terimini kullanarak literatürde yeni bir terim meydana getirmiştir (Davidovits, 1991). Geopolimerler alüminosilikat içeren bazı atık malzemeler ile (uçucu kül, metakoalin gibi) alkalilerin (OH içerikli) polikondensasyon reaksiyonu sonucu oluşan ürünler inorganik polimerlerdir (Lloyd vd., 2009). Geopolimerler amorf yapıdan SiO_4^{4-} ve AlO_4^{5-} tetrahedral kombinasyonu ile oluşturulan yarı kristalin alüminosilikat çerçeve

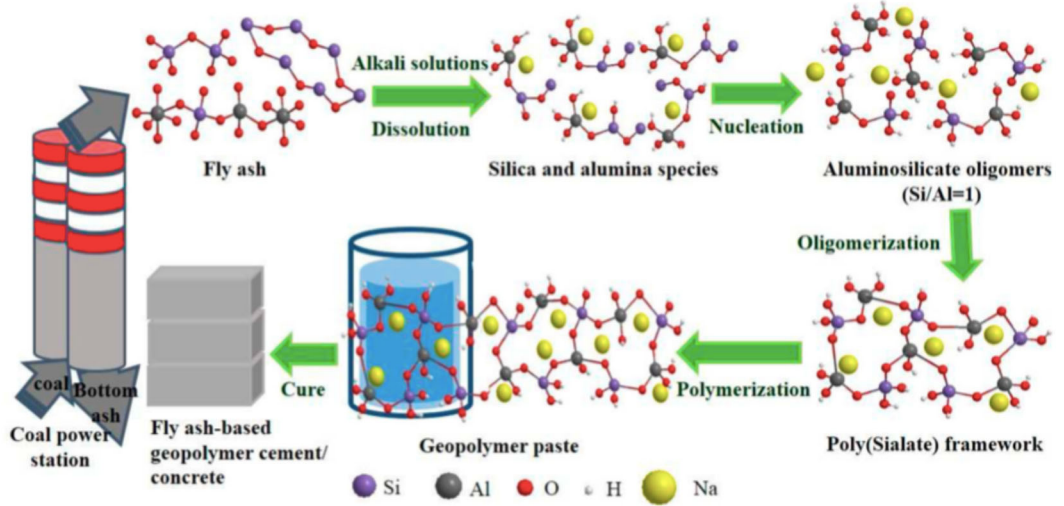
yapısıdır (Lloyd vd., 2009). Geopolimerizasyonda kimyasal yapı tetrahedral tabakadaki alüminyumun silisyuma ikamesi ile ve Na^+ iyonlarını varlığı ile elektriksel nötrlüğünü korumaktadır (Lloyd vd., 2009). Geopolimerizasyonun priz alma ve sertleşme mekanizması halen tamamıyla anlaşılmış değildir (Lloyd vd., 2009).

Geopolimerizasyon süreci yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi alümino-silika yapıdaki atık maddeler ile alkali aktivatörlerin düşük ısılarda bir araya getirilip tepkimeye girmeleri ile başlamaktadır (Davidovits, 2008). Bu tepkimeler sonucunda oluşan yeni ürün istenilen üretilme amacı doğrultusuna uygun fiziksel özellikleri karşılaması katı hammaddelerin birleşimi ile kullanılan kimyasal maddelerin yeterli molar oranlarda bir araya getirilmesi sonucu tepkimeye girmesi, ısıl kür uygulanması ya da kalsinasyon süresi ve kalsinasyonun ısı miktarına bağlı olarak farklılık gösteren moleküler yapısıyla bağlantılıdır (Davidovits, 2008).

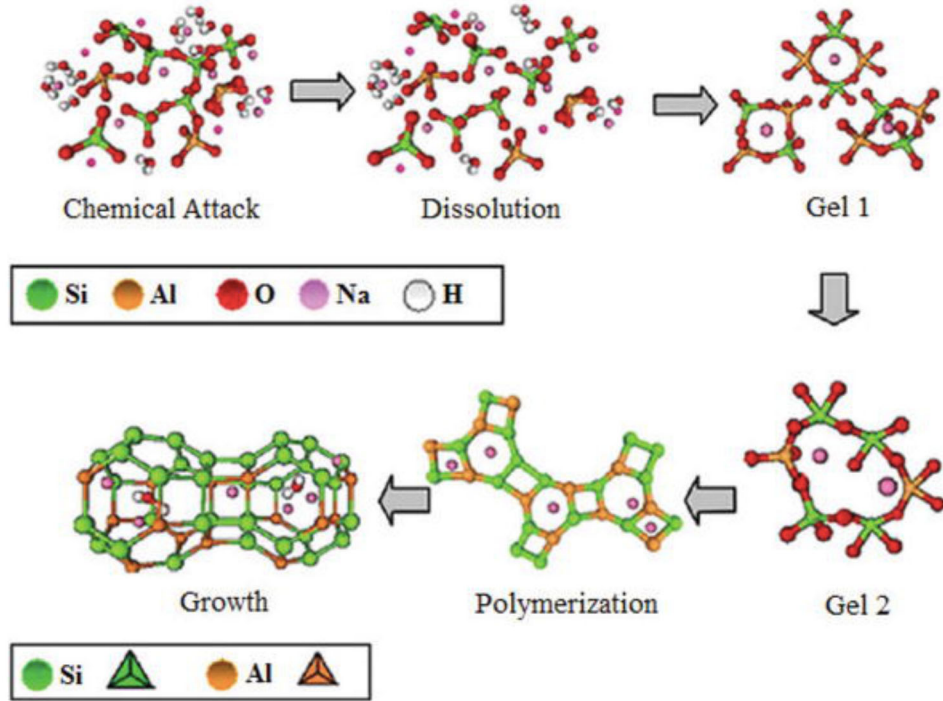
Geopolimerizasyon işlemi çözünme, yeniden düzenlenme veya organize olma, yoğunlaşma ve polimerizasyon süreçlerini kapsamaktadır (Provis ve Van Deventer, 2014). Çözünme ve yeniden örgütlenme birçok oligomer formu oluşturmaktadır (Xu ve Van Deventer, 2000). Oligomerler birbiri ile bağ kurarak büyük polimer zincirlerini meydana getirirler (Duxson, Provis, Lukey ve Van Deventer, 2007). Oligomerler birbirine bağlandığında OH grupları ile bir oksijen atomunu paylaşarak suyu serbest hale getirmektedir (Provis ve Bernal, 2014). Geopolimerizasyon şeması Şekil 2.1., 2.2. ve 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Çözünmüş alüminosilikatların yeniden örgütlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşması ve jel formasyonu başlangıcı, (c) polimerizasyon (Sing ve Middendorf, 2020)



Şekil 2.2. Geopolimerizasyon süreci (Sing ve Middendorf, 2020)



Şekil 2.3. Geopolimerizasyon sürecinin bir diğer gösterimi (Sing ve Middendorf, 2020)

2.4. Geopolimerlerin Uygulandığı Alanlar

Geopolimerlerin kullanıldığı birçok alan vardır (Davidovits, 2008). Bu alanlar :

- Isıya dayanıklı ahşap paneller
- İzolasyonlu panel ve duvarlar
- Dekoratif taş eserler

- Termal izolasyon için köpük taş paneller
- Düşük teknoloji inşaat malzemeleri
- Düşük enerjili seramik karolar
- Alüminyum döküm uygulamaları
- Geopolimer çimento ve beton
- Altyapı tamiri güçlendirme
- Yanmaz ileri teknoloji uygulamaları
- İleri teknoloji reçine sistemleri şeklinde sıralanmaktadır (Davidovits, 2008).

Geopolimer matris kompozit malzemesi çalışması 1982 yılında Davidovits ve Davidovicks tarafından geliştirme çalışmalarına başlanmıştır (Davidovits, 2008). Yapılan bu çalışmalarda ana amaç ağır döküm ve plastik endüstrilerinde ağır metal kalıpları kullanmak yerine geopolimer kalıplar oluşturmak ve kullanmaktır (Davidovits, 2008). Üretilen malzemelerin çalışma sıcaklık aralığı 200-350 °C arasında kullanılmıştır (Davidovits, 2008).

Yangına dirençli malzeme üretiminde uçakların kabinlerinin içinde yangına dirençli kompozitlerin üretilmesiyle ilgili 1990 yılında Amerika Federal Havacılık yönetimi bu malzemenin kullanılması için bir programı harekete geçirmiştir (Rajarajeswari ve Dhinakaran, 2016). Amerika Federal Havacılık yönetiminin düşüncesine göre uçakların yaptığı kazalarda kabin ve kargo bölümlerinde üretilen bu malzemenin yangını önleyeceği öngörülmektedir (Rajarajeswari ve Dhinakaran, 2016). Bu düşünceler doğrultusunda, yangıcı olmayan geopolimer kompozit malzemeyi Amerika Federal Havacılık yönetimi Uluslararası Uçak Yangın ve Kabin Güvenliği Araştırma Konferansı'nda tanıtmıştır (Davidovits, 2006).

Aynı zaman da Formula 1 araçlarında kullanmak üzere geopolimer-karbon kompozit malzeme yarış esnasında aracın ısınmasına yönelik 2-3 saatlik süre aralığında ve 600 dereceye kadar dayanabilecek şekilde geliştirilmiştir (Davidovits, 2008). Bu yapılan malzemeye benzer şekilde dizayn edilen bir geopolimer malzeme Amerika'da düzenlenen Indy-Car organizasyonunda mücadele eden takımlardan All American Racers tarafından tanıtımı olmuştur (Davidovits, 2011). Üretilen bu geopolimer-karbon malzeme sistemi düşünüldüğünden çok daha iyi ve mukavemetli olduğu ve tek bir

yarış için değil tüm sezonda ki bütün yarışlarda kullanılabileceği görülmüştür (Davidovits, 2008).

Geopolimer uygulamaları inşaat dışında farklı sektörlerde uygulamaları fazla olsa da inşaat alanında örnek ve uygulama olarak sayısı düşüktür (Sing ve Middendorf, 2020).

İnşaat olarak geopolimer malzeme kullanımını örneklerinde 1960'lı yıllarda Ukrayna'da 9 katlı bina uygulaması yapılmıştır (Cook, Hinczak ve Cao, 1987). Yapılan bu bina 50 yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır ve hala kullanılmaya devam etmektedir (Chi, 2012). Tamamen alkali kullanılarak aktive ederek portland çimentosu kullanılmadan yapılan ilk bina örneği Lieptsk'de ki 20 katlı binadır (Van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999).

Köprü tabliyelerinin üretiminde de geopolimer beton kullanılmıştır (Hardjito ve Rangan, 2005). Bunun örneği ise 2009 yılında Wagners Toowoomba köprü tabliye üretiminde kullanmıştır (Hardjito ve Rangan, 2005). Geopolimerler kanalizasyon ve demiryolları traverslerinde uygulanmıştır (Aldred ve Day, 2012).

Geopolimer teknolojisi ile ilgili yüksek seviyede performans uygulamaları Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Geopolimer teknolojisi için yüksek performans uygulama alanları (Vickers, Van Riessen ve Rickard, 2015).

İnşaat Alanında
• Kanalizasyon arıtma sistemleri, setler için kimyasal direnç, döşemelerin kaplanması • Güneş enerjisi ısı iletimi • Gaz ve petrol kuyularının çimentolaması • Portland çimentolu yapılar, ahşap ve çelik için ısı dayanım kaplamaları • Demiryolu ulaşımalarında • Yer altı kanalizasyon boruları • Asansör komponentleri, yüksek yapılarda yangın koruması • Tünel dış kaplamalarında
Askeri Alanda
• Yangına dayanıklı yakıt depolama yapılarında • Egzoz gazı termal yalıtımı, dikey kalkış ve iniş rampaları, zırhlanmış araçlar, askeri gemilerin türbin motor egzozu • Denizcilikte yangına dirençli bileşenler • Cephan depolama yapıları
Madencilik Alanında
• Kazı alanlarına tekrardan dolgu yapılması • Geotermal dolgu (grouting) • Tünellerde astarlama işlemi • Enerji üretimi için prefabrik yapılarda kimyasal ve yangın dirençli yapılar üretmede
Zararlı Atık Yönetimi Alanında
• Nükleer atıkların depolanması • Toksik metal enkapsülasyonu • Su saflaştırması

2.5. Geopolimerlerin Avantajları ve Dezavantajları

Dünyada son zamanlarda çevrenin korunmasına çok önem verilmektedir. Önem verilmesinin başlıca nedenleri küresel ısınma, sera gazı etkisi ve karbon salınımından dolayıdır (Turner ve Collins, 2013). İnşaat sektöründe üretilen portland çimentosunun çevreye karşı olumsuz etkileri fazladır ve karbon salınımı yüksek bir malzemedir (Turner ve Collins, 2013). Geopolimerler düşük karbon salınımı ile çevre dostu bir malzemedir. Hem düşük karbon salınımı hem de atık malzemeleri kullanarak çevredeki atık malzeme seviyesini azaltması bakımından çok olumlu bir yapı malzemesidir. Bu yüzden de yapı malzemesi olarak kullanımında gelecek için yüksek bir potansiyele sahiptir.

Rajarajeswari ve Dhinakaran (2016), ürettikleri yüksek fırın cürufu geopolimer betonu geleneksel üretilen beton ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmada hem üretim maliyetine hem de dayanım özelliklerine bakılmıştır. Ulaşılan sonuçlarda yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimerlerin geleneksel betondan dayanım özellikleri açısından yüksek bir değere sahip olduğu görülmüştür. Üretim maliyeti açısından da aynı şekilde olumlu sonuçlara ulaşılmıştır ve geopolimerlerin ortalama olarak %30 daha az üretim maliyetine sahip olduğu görülmüştür (Rajarajeswari ve Dhinakaran, 2016).

Küresel ısınmanın canlılar ve çevre üzerinde olumsuz etkileri açık bir şekilde görülmektedir. Portland çimentosu üretiminde havaya salınan sera gazı da küresel ısınmaya destek sağlayan başlıca etmenlerden biridir (Habert vd., 2011). Geopolimerler bu noktada portland çimentosuna göre çok daha çevre dostu bir malzemedir. Geopolimer üretiminde havaya salınan sera gazını geleneksel portland çimentosunda salınan sera gazına göre yaklaşık %85 azaltma imkanı sunmaktadır. Ayrıca geopolimerlerde farklı atık malzemeleri bağlayıcı olarak kullanabildiğimiz için sera gazı salınımını azaltmak dışında çevre kirliliği yaratan atık maddeleri de kullanma avantajına da sahip olabilmekteyiz (Duxson vd., 2007).

Bu doğrultuda çevresel atıkların hammadde olarak kullanılması, üretilen ürün maliyetlerinin düşük olması, dayanım değerlerinin iyi seviyede olması, CO₂ salınımının düşük olması, yangın direncinin yüksek olması, asit direncinin yüksek olması, çok fazla çatlak kontrolü gerektirmemesi gibi özellikler göz önüne alındığında geopolimerlerin avantajları oldukça fazladır.

Li vd., (2004) geopolimerlerin sağladığı avantajları şu şekilde açıklamıştır;

1. Geopolimer üretiminde kullanılan fabrika atıkları ve puzolan gibi bağlayıcı malzemeler yeryüzünde oldukça fazladır. Bu yüzden hammadde yeterince çoktur.
2. Geopolimer üretiminde portland çimentosuna göre çok daha az enerji tüketimi meydana gelir. Bu ısı enerjisi tüketimi yaklaşık %60 azdır. Bu şekilde CO₂ salınımı da azalmaktadır ve sera gazı daha az katkı sağlamaktadır.
3. Geopolimerler çok kolay şekilde hazırlanır ve kısa sürede güzel dayanım kazanır. Hazırlanması portland çimentoya benzerdir.
4. Geopolimerler yaklaşık %80 oranında portland çimentosuna göre daha az çatlak oluşumu görülür.
5. Geopolimerlerin karışımı doğru hazırlandığı takdirde erken dayanımı yüksektir.
6. Dayanımı yüksektir yıllar geçse de çevresel etkilere maruz kalsa da dayanımında çok bir kayıp yaşamaz.
7. Yangına karşı dayanımları yüksektir ve ısı iletkenlik seviyesi oldukça düşüktür. Yangına maruz kalsa da zehirli gazların salınımını yapmaz.
8. Asit dayanımları yüksektir (Li, 2004).

Geopolimerlerin avantajlarının yanı sıra uygulama yaparken olumsuz yönleri de vardır (Zerfu ve Ekaputri, 2016). Geopolimer üretiminde kullanılan atık malzemelerin hepsinin standart olmaması olumsuzluklardan biridir (Zerfu ve Ekaputri, 2016). Malzeme özellikleri farklı olduğunda üretilen üründe de farklılıklar çıkmaktadır. Bununla beraber geopolimer malzeme üretirken farklı dezavantajlarda ortaya çıkmaktadır (Zerfu ve Ekaputri, 2016).;

1. Geopolimer üretiminin maliyetinde alkali aktivatörlerin maliyeti en fazla alanı kapsamaktadır. Geopolimerlerde bağlayıcı olarak kullanılan çevresel atık maddeler ucuz olsa da oluşan maliyetin yaklaşık %60 ı alkali aktivatörden gelmektedir.
2. İnşaat sektöründe yıllardan bu yana portland çimentosu kullanıldığı için sektör içinde yeni yapı malzemesine karşı olumsuz bir tutum görülmektedir. Bu yüzden uygulama sayısı az olmaktadır.

3. Geopolimerler yüksek sıcaklıkta kürlenmeyi sevmektedir. Bu açıdan sıcaklığın düşük olduğu alanlarda kullanımında sorunlar yaşanılabilir.
4. Geopolimerler yüksek darbelere maruz kaldıklarında büyük bir alana yayılan çatlaklar oluşabilmektedir.
5. Geopolimer üretimi daha dikkat gerektiren bir süreçtir. Karışımları hazırlarken oranlara dikkat etmek gerekir. Bazı durumlarda kimyasallar kullanmak gerebilir bu da beklenmedik maliyetler ortaya çıkarabilir.
6. Geopolimerler geleneksel portland çimentosuna göre çok daha yeni bir malzeme olduğu için hakkında yeterli bilgi ve deneyim yoktur. Bu durumdan dolayı sahada uygulama yapılırken sıkıntı ve sorunlarla karşılaşılabilir.

2.6. Geopolimerlerin Mukavemetini ve Durabilitesini Etkileyen Faktörler

Betonlarda çevresel etkilerden dolayı durabilitesinde kayıplar meydana gelebilir. Bu kayıpların sebebi fiziksel ya da kimyasal etkiler olabilir. Çevresel etkilere sürekli maruz kalan betonlarda bazı olumsuz sonuçları da beraberinde getirmektedir. Beton yüzeyinde çatlaklar meydana gelebilir ve bu çatlaklar zamanla büyüyerek beton geçirimsizliğini artırabilir. Bu şekilde beton çok gözenekli bir yapı haline gelmektedir. Betonda bu etkilerden olumsuz etkilenir ve dayanıklılığı azalmaktadır. Sanayi bölgelerinde fabrikalarda sulara kimyasalların karıştığı durumlarda sulara pH dereceleri 4'ün altına düşmektedir (Sukmak, Horpibulsuk ve Shen, 2013). Bu tarz kimyasalları suları karışım suyu olarak kullanmak geopolimer betonların dayanımını düşürmektedir (Sukmak vd., 2013). Betonun çabuk bozulmasına sebebiyet vermekte ve betonun hizmet ömrünü azaltmaktadır. Fiziksel ve kimyasal olarak bu olumsuz durumları engelleyerek üretimlere devam etmek faydalı olacaktır.

2.6.1. Büzülme

Büzülme çevresel faktörlerden etkilenmeyen ve zaman içinde betonun hacmindeki azalma olarak tanımlanan bir etkidir. Hidrolik, termik, bünyesel ve plastik büzülme olarak ayrıştırabiliriz. Büzülmenin varoluşunun en önemli nedeni makro ve mikro olarak oluşan boşluklardan suyun yok olmasıdır. Ortamdaki suyun yok olmasıyla beton büzülmeye başlar. Betonda ki bu büzülmelerin sonucunda ise çatlaklar meydana gelmektedir. Taze betonlar kür süresi boyunca ilk 24 saat içinde çatlak oluşumuna çok

yatkındır. Taze betonda plastik büzülme görülme olasılığı yüksektir. Sertleşen betonda ise termal büzülme, hidrolik büzülme daha fazla meydana gelmektedir.

2.6.2. Aşınma

Aşınma kısa süreçte meydana gelmeyen belirli ve uzun bir s reye ihtiyaç duyan yavaş yavaş meydana gelen mekanik bir eylemdir. Aşınmada beton tekrarlı şekilde yüklenen kuvvetlere maruz kalabilir ve bu şekilde de yıpranır. Yıpranan betonun ise hizmet ömrü kısalmaktadır. Aşınmayı azaltmak hatta engelleyebilmek için uygun biçimde malzeme  retmeliyiz. Yüksek dayanıma sahip, az boşluklu, dayanıklı agrega kullanarak bu hedefe yaklaşabiliriz. Daha az boşluklu bir beton üretimi için ince taneli malzeme kullanımı ve iyi bir sıkıştırma gerekmektedir. İnce taneli malzemelerde geopolimerlerde bağlayıcı olarak kullandığımız yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi malzemelerdir. Bu tür malzemeleri kullanarak ve sıkıştırmasını iyi yaparak yıllar boyunca süregelen aşınmaya karşı dayanıklı bir yapı malzemesi üretebiliriz.

2.6.3. Alkali Aktivatörler

Geopolimer  retiminde geopolimerizasyon süreci kullanılan farklı aktivatörlerden, aktivatörlerin miktarı ve dozajından, aktivatörlerin karışımlarından etkilenmektedir (Palomo, Grutzeck ve Blanco, 1999). Geopolimer  retiminde sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum karbonat (Na_2CO_3), sodyum sülfat (Na_2SO_4), potasyum karbonat (K_2CO_3), potasyum sülfat (K_2SO_4) kullanılan alkali aktivat rlerdir. Bu aktivatörler yalnız başlarına veya birbirleriyle kombinasyon edilerek kullanılabilir. NaOH ve KOH aktivatörleri yalnız başına kullanıldığı gibi Na_2SiO_3 ile kombine edilerek kullanılabilir. Alkaliler yalnız başına kullanıldıklarında biraz daha düşük dayanımlı betonlar üretilmektedir (G rhan ve Kürklü, 2014). Na_2SiO_3 betonda dayanımı artıran bir etkiye sahip olmakla birlikte aynı zamanda üretilmesinde CO_2 salınımı fazladır. Bu da  evre dostu bir yapı malzemesi üretim amacından yapılan çalışmayı uzaklaştırmaktadır. Buna nazaran NaOH daha  evre dostudur çünkü CO_2 salınımı daha azdır (Davidovits, 2008). Geopolimerizasyonda alkali aktivatörlerin kombine edilmesinde en fazla sodyum hidroksit veya potasyum hidroksitin sodyum silikat veya potasyum silikat ile birleşmesiyle oluşur (Davidovits, 2008). Bu şekilde geopolimer beton üretilmesi daha fazla tercih edilmektedir.

2.6.4. Kür Süresi ve Sıcaklığı

Geopolimerlerin üretiminde içine konulan malzeme karışımı ne kadar önem teşkil ediyorsa üretilen betonun kürü de çok önemli bir konudur (Hardjito vd., 2004). İyi kürlenmiş bir betonun dayanımlarında olumlu etkiler görülmektedir. Ayrıca geopolimerde kullanılan düşük kalsiyumlu alümina silikat malzemelerin erken dayanım sürecinde dayanımlarının artmasında iyi bir kür uygulamak önemlidir (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2005). Bağlayıcı olarak kullanılan uçucu külün yüksek sıcaklıkta aktive olması geopolimerlere ısı kürü uygulanmasıyla dayanım kazanmasını sağlamaktadır (Bakharev, 2005). Fakat ısı kürünün olumlu tarafta kalmak için belirli sınırları vardır ve bu sınırlar aşıldığında betona sağladığı olumlu etkiler olumsuzla dönüşmektedir (Olivia ve Nikraz, 2011). Puzolanik malzemelerin kür sıcaklıkları genel olarak 100 °C olarak önerilmektedir. Ayrıca geopolimerler kürlenme işlemi başlamasından itibaren ilk 24 saatlik süre diliminde dayanım kazanma oranı fazla olmaktadır daha sonra ki süre dilimlerinde bu oran düşmektedir (Hardjito ve Rangan, 2005; Kantarcı, 2018).

Joseph ve Mathew (2012), yaptıkları çalışmada uçucu kül kullanarak ürettikleri geopolimer yapı malzemesini içeriğinde ki agreganın beton dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalarında NaOH ve Na₂SiO₃ alkali aktivatörleri kullanmışlardır. Üretilen priz almamış geopolimer beton numunelerini 72 saat boyunca 60 °C ila 120 °C ısı kürüne maruz bırakmışlardır. Kürlenme işlemi sonlandığında üretilen geopolimer numuneler 3, 7 ve 28 gün oda sıcaklığında tutulmuştur. Daha sonra 24 saat boyunca 100 °C’de küre tabii tutulan 28 günlük geopolimer numunelerin basınç dayanımı 58 MPa olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada ulaşılan sonuç geopolimerlerin erken mukavemet kazanımı için uygun kür ve sıcaklığın sağlanması önem arz etmektedir. Ayrıca 100 °C’de 24 saat ısı kürüne tabii tutulan 28 günlük geopolimer numunenin basınç dayanım değerinin %96,4’ünün 1 hafta içerisinde ulaşılabilir olduğu kaydedilmiştir. Bu çalışmada kür sıcaklığında 100 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda dayanım artışının azaldığı gözlemlenmektedir (Joseph ve Mathew, 2012).

Palomo, Grutzeck ve Blanco (1999), ise yapmış oldukları çalışmada üretilen numunelerin kür süresinin 2-5 saat aralığında olması gerektiğini vurgulamışlardır ve kür süresinin 24 saati geçmesi halinde betonda ki dayanımda önemli bir artışın

olmadığını belirtmişlerdir. Kür yapılırken ki sıcaklığın ise 85 °C olmasının uygun olduğu sonucuna karar vermişlerdir (Palomo, Grutzeck ve Blanco, 1999).

2.6.5. Geopolimerlerde Su Miktarı

Hem normal portland çimentolu betonlarda hem de geopolimerlerin karışım su miktarı çok önemlidir. Betonların şekil alması ve işlenebilirliğini artırmak için karışma gereğinden fazla su ilave edilmektir. Fakat gereğinden fazla su betonun dayanımını düşürmektedir (Malhotra ve Mehta, 1996). Nasıl ki geleneksel portland çimentosunda su/çimento oranına dikkat ediyorsak geopolimerlerde de su oranına dikkat etmeliyiz.

2.6.6. Donma-Çözünme Etkisi

Düşük sıcaklık etkisinde beton içindeki boşluklarda sular donar. Bu donma olayı hem geleneksel portland çimentosuyla üretilen malzemede hem de geopolimerlerle üretilen malzemelerde olur. Don olayı suyun hacmini genişlettiği için beton içindeki boşluğu büyütür. Sıcak hava olduğunda ise bu donan sular tekrar erimeye başlar. Tekrardan soğuk hava geldiğinde tekrar bu boşluklar artar ve bu tekrarlanan süreçte beton içindeki boşluk miktarı artmış olacaktır. Beton içinde artan boşluk ile betonun dayanımında olumsuz etkiler meydana gelebilmektedir. Aynı zaman da beton geçirimsizliği de artmaktadır.

2.7. Lifli Geopolimerler

Beton ne cam gibi gevrek ne de çelik gibi sünek bir yapı malzemesidir. Betona tamamen gevrek malzeme demek çok doğru bir tanımlama olmayabilir. Betona yarı gevrek bir malzeme dersek uygun olacaktır. Mühendislikte yapı malzemelerinin tokluk seviyesinin yüksek olmasını tercih ederiz. Bu doğrultuda betonun bu özelliğinden dolayı lif eklenmesi malzemenin sünekliğini, tokluğunu artırmaktadır. Betonu gevrek alandan çıkararak sünek alana geçmesini sağlamaktadır (Shaikh, 2013). Lifin betonda ki fiziksel, mekanik etkilerini ayrıca dayanıklılık ile ilgili beton davranışlarını gözlemlemek için geopolimerlerde hem farklı lifler kullanarak hem de kullanılan lif oranlarını yükseltip azaltarak lif kullanımındaki etkileri araştırmak amacıyla çalışmalarda bulunulmuştur (Al-mashhadani, Canpolat, Uysal ve Aygormez, 2018).

2.7.1. Lifli Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri

Yapı malzemesi olarak en çok kullanılan betonun çekme dayanımı basınç dayanımı kadar çok iyi değildir. Beton yarı gevrek bir malzeme olduğu için kırılğan bir yapıya sahiptir. Betonun çekme kuvvetini artırmak için farklı malzemelerle kombine edilerek kullanılır (Nematollahi, Sanjayan ve Shaikh, 2017). Bu malzemelerden biri de liflerdir (Nematollahi vd., 2017). Farklı lif kullanımları mevcuttur ve bu kullanımların olumlu sonuçları vardır. Bu çalışmaların sonuçları betona lif eklemenin basınç, kesme, eğilme ve çekme dayanımlarını artırdığı sonucuna varılmıştır (Millard, Molyneaux, Barnett ve Gao, 2010).

Lif kullanılmadan üretilen betonlarda kırılmalar meydana gelebilmektedir fakat lifli betonlar içindeki liflerin birbirlerine tutunması sayesinde bağ kurarak betonun mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapabilmektedir (Branston, Das, Kenno ve Taylor, 2016). Bununla birlikte farklı çalışmalarda betonun sünekliğini artırdığı yorulmaya karşı direnci yükselttiği görülmüştür (Nili ve Afroughsabet, 2010; Song, Hwang ve Sheu, 2005).

Yapılan çalışmalarda polipropilen lif ve naylon lifin betonla birleştirilmesinin mekanik özelliklere olumlu katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda polipropilen lif betonda çatlak oluşumunu engellemede iyi olduğu fakat basınç dayanımına çok fazla katkı sağlamadığı görülmüştür (Yap, Alengaram ve Jumaat, 2013; Zhang ve Li, 2013).

Betonda seramik lif kullanıldığında eğilme dayanımını %40 yükselttiği buna ek olarak karışıma silis dumanı eklendiğinde eğilme dayanımının %100'e kadar arttığı gözlemlenmektedir (Ma, Zhu ve Tan, 2005).

Geleneksel portland çimentosu ve lifsiz geopolimerlere nazaran cam lif kullanılan geopolimer numunelerde lifsiz numunelere göre dayanım açısından daha olumlu sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir (Bhalchandra ve Bhosle, 2013).

2.8. Geopolimerlerin Basınç Dayanımı

Beton türlerinde basınç dayanımı ana özelliklerden ve en önemli özelliklerinden biridir. Basınç dayanımını etkileyen farklı faktörler vardır (Rangan, 2008). Kür süresi, kür ısı, karışım suyu, malzeme kalitesi, sıkıştırma birçok faktörden bazılarıdır. Sıcaklık geopolimer numunede reaksiyonu artırır ve geopolimerde çözünmeyi artırır

(Bakharev, 2005c). Bunun sonucunda dayanımın yükselmesine yardımcı olmaktadır (Bakharev, 2005c). Geopolimerde farklı bağlayıcı malzemeler öğütülerek çok küçük hale getirilir ve yüzey alanı fazla malzeme elde edilir bunun amacı reaksiyon hızını artırmaktır ve güçlü şekilde bağ oluşturmaktadır (He, Jie, Zhang, Yu ve Zhang, 2013). Geopolimerlerde farklı bağlayıcı malzemeler kullanarak yapılan çok fazla çalışma vardır. Bu çalışmalarda kullanılan malzemenin farklılığı ile birlikte deneysel sonuçları da farklılık göstermiştir (Chandra Padmakar ve Sarath Chandra Kumar, 2017). Yüksek fırın cürufu ve metakaolin birlikte kullanılarak yapıldığı çalışmada en iyi basınç değeri elde edilmeye çalışılmıştır (Chandra Padmakar ve Sarath Chandra Kumar, 2017). Metakaolin miktarını azaltıp yüksek fırın cüruf miktarını artırınca geopolimer basınç dayanımında azalma meydana geldiğini sonucuna varılmıştır (Chandra Padmakar ve Sarath Chandra Kumar, 2017).

Silis dumanı, metakaolin ve kolemanit ile yapılan çalışmalarda silis dumanının geopolimerler içindeki boşluk miktarını azalttığı gözlemlenmektedir (Zhang, Provis, Reid ve Wang, 2014). Bunun sonucunda geopolimerlerin basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Silis dumanının fazla kullanımı sonucunda olumlu etkilerin dışında basınç dayanımında kayıpların meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır (Aygörmez, Canpolat, Al-mashhadani ve Uysal, 2020).

Wallah ve Rangan (2006), bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılan geopolimerlerin geleneksel portland çimentoyla hazırlanan betonlarla hemen hemen aynı kırılma etkilerinin olduğunu gözlemlemişlerdir (Wallah ve Rangan, 2006). Kullanılan uçucu külün tane boyutunun inceliği arttıkça geopolimer numunenin basınç mukavemetinde artış meydana geldiği görülmüştür (Al-Bakri, Kamarudin, Binhussain ve Nizar, 2011).

Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül bağlayıcılarının ikisinin bir arada kullanıldığı çalışmada farklı mol değerleri kullanılarak çalışılmıştır (Keerthy ve Kumar, 2017). 8 mol ve 10 mol için farklı karışım oranları kullanılmıştır (Keerthy ve Kumar, 2017). Yüksek fırın cürufunun oranı uçucu küle göre fazla olduğunda basınç dayanımında yüksek sonuçlara ulaşırken yüksek fırın cürufu miktarı azaltılıp uçucu kül miktarı artırıldığında basınç dayanımının olumsuz etkilendiği görülmüştür (Keerthy ve Kumar, 2017). Farklı molar kullanımının sonuçları ise 10 molarlık numuneler 8 molarlıklara göre daha güzel sonuçlar vermiştir (Keerthy ve Kumar, 2017).

2.9. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu demir-metal fabrikalarında üretimde atık ürün olarak meydana gelmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008). Genel olarak içerisinde silika ve metal oksitleri barındırmaktadır (Soutsos, Kou ve Leung, 2016). Üretimde 1 ton çelikten 250 kg civarında yüksek fırın cürufu oluşmaktadır (Europäischer Baustoff-Recycling Verband, 2013). Üretimde açığa çıkan atık malzemelerin çevreye zarar vermeden nereye atılacağı tartışma konusudur. Atık malzemeyi değerlendirmek için beton ve çimentoya katkı malzemesi olarak kullanılabilir (Bilgen, Kavak, Yıldırım ve Çapar, 2010). Yüksek fırın cürufu atık malzeme olmakla birlikte beton üretiminde betona dayanıklılık ve mukavemet kazandırmaktadır. Yüksek fırın cürufu içeriğinde CaO , SiO_2 ve Al_2O_3 barındırmaktadır. Cürufta CaO oranı yükseldikçe dayanımda olumlu sonuçlara ulaşılır. Bunun sebebi CaO 'nun cüruf içerisinde kendiliğinden bağlayıcılık özelliğinin olmasıdır (Keklik, 2020). Kalsiyum oranı dışında cürufların tane boyutu ve içeriğindeki camsı madde miktarı önemli etkilere sahiptir. Demir üretimi gerçekleşirken bu sırada meydana gelen atıklar cürufu oluşturur. Cüruf sıvı şekilde meydana gelmektedir. Cürufu kullanılabilir bir hale getirmek için hızlı bir soğutma yapılması gerekmektedir. Bu soğutma fırın çıkışlarında yüksek oranda su kullanarak yapılmaktadır. Soğutma işleminden sonraki adımlarda cürufa kurutma işlemi uygulanır. Kuruduktan sonra toz formuna dönüştürülür. Bu şekilde kullanılabilir hale gelmektedir.

2.9.1. Geopolimerlerde Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı

Yüksek fırın cürufuna bağlayıcılık özelliği kazanması için çalışmalarda bulunan Emin Langen ilk kez cürufta bağlayıcılık özelliğini 1862'de yaptığı çalışmalarla elde etmiştir (Engin, 2015). Cüruflar kullanım alanları farklı olduğu gibi cüruf özelliklerinin de hepsi aynı değildir. Özelliklerine göre farklı kullanım amaçları doğrultusunda çalışmalar yapılmaktadır (Shi ve Qian, 2000). Geopolimerlerde normal portland çimentolu betona göre çimentonun yerine kullanılmaktadır. Çimentonun yerine kullanılmasında çimento üretiminde ki olumsuz çevre etkileri ve yüksek enerji tüketimi göz önüne alındığında cüruf kullanımı CO_2 salınımını azaltmaktadır (Hardjito ve Rangan, 2005). Bu sayede sera gazının olumsuz etkilerinin önüne geçilmektedir. Aynı zamanda enerji tüketiminde de düşüş yaşanarak olumlu etkiler sağlamaktadır. Bu şekilde çevreye de yararlı bir yapı malzemesi üretilmiş olmaktadır. Beton içinde

yüksek fırın cürufu kullanımı içindeki su oranını artırmadan cüruf miktarını yükselterek kullanılabilir. Cüruf dayanımı artıran bir özelliğe sahiptir fakat dayanımda düşmeler meydana geliyorsa eklenen cürufun aktivitesiyle alakalı bir durumdan kaynaklanmaktadır (Cook, Hinczak ve Cao, 1987; Krivenko, 1994). Yüksek fırın cürufu betona olumlu özellikler kazandırmakta ve beton özelliklerini iyileştirmektedir (Palomo, Krivenko ve Garcia-Lodeiro, 2011). Aynı zamanda çevresel olarak olumlu dayanıklı ve dayanımı yüksek betonlar üretmeyi sağlamaktadır (Palomo vd., 2011).

2.9.2. Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimerin Basınç Dayanımı

Yüksek fırın cürufu bağlayıcı geopolimerlerin erken dayanımda yüksek mukavemet kazandığı gözlemlenmiştir (Bakharev, 2005). Yüksek fırın cürufu geopolimer numunelerin erken dayanımı 1 günde 60 MPa iken 1 yıllık dayanımı 100 MPa dayanımlara kadar çıkmaktadır (Provis ve Bernal, 2014). Yüksek fırın cürufu geopolimerleri yüksek ısı ile kürlendiklerinde olumlu sonuçlara ulaşılmaktadır (Lloyd ve Rangan, 2010). Oda sıcaklığında kürlenme işlemi yapılan geopolimer numuneye göre yüksek ısıyla kürlenme yapılan numuneler daha iyi erken dayanım almaktadır ve dayanımının yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Ding, Dai ve Shi, 2016).

Yüksek fırın cürufu geopolimer numunelerinin basınç dayanımı içeriğinde ki Na_2O miktarı yükseldikçe artış göstermektedir (Chi, 2012). Cürufu geopolimer numuneler su kütüne maruz bırakılınca yaklaşık 400 güne kadar basınç dayanımı artmaktadır (Collins ve Sanjayan, 2001). Mühürlü olan cürufu geopolimer numuneler de basınç dayanımı yaklaşık 90 güne kadar artış göstermektedir (Chindaprasirt, De Silva ve Sagoe-Crentsil, 2007). Fakat hava kütünde bırakılan cürufu geopolimer numunelerin geçen belirli bir süreden sonra basınç dayanımında olumsuz sonuçlar meydana geldiği görülmüştür (Ding vd., 2016).

2.10. Uçucu Kül

Ülkemiz 1. Jeolojik zamanda oluşan arazilere sahiptir (Erguvanlı ve Yılmaz, 1980). Bu zamanda ülkemizde taş kömürü yatakları meydana gelmiştir (Erguvanlı ve Yılmaz, 1980). Kömürün varlığı enerji üretimi bakımından bize çok büyük avantajlar sağlamıştır. Ülkemizde enerji üretiminde hammadde olarak büyük oranda kömür kullanılmaktadır (Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ), 2020). Ülkemizde termik

santrallerin birçoğu kömürle çalışmaktadır. Enerji kaynağı olarak kullanılan kömürün ülkemizde yılda 40 milyon tonun üzerinde yakıldığı bilinmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019). Kömürün yakılması sonucunda 15 milyon tondan fazla kül oluşmaktadır. Ortaya çıkan bu atık malzemeye uçucu kül denilmektedir (Gürbüz ve Durmuş, 2017). Yakılan kömürlerden oluşan küllerin bacalardan çevreye yayılmaması için elektronik filtreler kullanılır. Filtreler külü çeker ve toplanan küller depolarda istiflenir (Krivenko, 1997).

Uçucu külün özellikleri yanan kömürün özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Ayrıca içindeki katkılara yanma şekline göre de farklılıklar meydana çıkmaktadır (ASTM C618, 2003).

Uçucu küllerin renkleri genel olarak gri ve gri tonlarında değişmektedir (Aruntaş, 2006). Uçucu kül bileşenlerinde SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bulunmaktadır (Aruntaş, 2006; Tuyan, Boyacı, Andıç Çakır ve Ramyar, 2020). Uçucu kül ortalama boyutları 0.5-0.6 mikrondan başlayıp 200 mikrona kadar çıkmaktadır.

Uçucu küller 2 sınıfa ayrılırlar. Bunlar F tipi ve C tipi uçucu küllerdir (Tuyan vd., 2020). Bu sınıflandırmayı yaparken ASTM C618 standartlarına göre sınıflandırılmaktadır (ASTM C618, 2003). F tipi uçucu kül bitümlü kömür yakıldığında açığa çıkan atık malzemeye üretilmektedir. CaO yüzdesi %10'un altında olup, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 yüzdeleri %70 üzerinde bir değere denk gelmelidir (Malhotra ve Mehta, 1996). Puzolanik özellik göstermektedir. C tipi uçucu küller yarı bitümlü kömürden ya da linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilmektedir. C sınıfı uçucu küllerde CaO miktarı %10'un üstünde olup, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarı %50'in üzerinde olmalıdır. CaO miktarının fazla olmasıyla bağlayıcılık özelliği kazanmıştır. Uçucu Küllerin farklı bir sınıflandırması da TS EN 197-1 e göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırma ise V tipi uçucu küller ve W tipi uçucu küller vardır. V tipi uçucu kül silisli, W tipi uçucu kül kalkersi olarak ayrılmıştır (Türker, Erdoğan, Katnaş ve Yeğinoğlu, 2009).

2.10.1. Geopolimerlerde Uçucu Kül Kullanımı

Dünyada artan nüfus, gelişen teknoloji ve bunun getirdiği olumsuz etkilerle beraber yeni çevre dostu malzemelere yönelim başlamıştır (Provis ve Bernal, 2014). Aynı zaman da enerji temini içinde yapılan maliyetler çok fazladır. Bu maliyetleri en aza indirmek için çabalanmaktadır. Uçucu kül bu manada hem atıkları değerlendirmede

hem de malzemelerin maliyetini düşürmede faydalı bir ürün olmuştur (Banthia ve Nandakumar, 2003). Uçucu külü daha efektif kullanabilmek için uzmanlar laboratuvar ve arazilerde çalışmalarını sürdürüp daha da geliştirmektedirler. Uçucu küller betona mekanik olarak olumlu etkiler sağlamaktadır. Aynı zamanda ekonomiktir. Atık malzeme olduğu için kullanımında çevreye fayda sağlanmaktadır. Uçucu kül kullanılarak üretilen betonlar fazla suya ihtiyaç duymamaktadır ve işlenebilirliği kolay olmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda kürleme yapıldığında uçucu kül aktive olmaktadır. Uçucu kül içeren geopolimerler geleneksel portland çimentolu betonlara göre farklı bir tercih seçeneği olabilmektedir. Uçucu küllü geopolimerlerde ısıl kür önemli olduğu için yerinde yapılan uygulamalar için olumsuz bir etkisi olabilir (Adak, Sarkar ve Mandal, 2017). Uçucu kül kullanımında erken dayanımlar çok yüksek olmasa da geç dayanımlarda bağlayıcılık kazanarak dayanımı artırmaktadır.

2.10.2. Uçucu Kül Esaslı Geopolimerlerin Basınç Dayanımı

Uçucu külün aktive olabilmesi için güçlü bir enerji gerekmektedir (Duxson vd., 2007). Bu enerjiyle yüksek kür sıcaklıkları elde edilerek aktive olmaktadır (Duxson vd., 2007). Geopolimerler geleneksel betondan farklıdır fakat uçucu kül bağlayıcılı geopolimerler geleneksel portland çimentolu beton ile benzer özelliklere sahiptir (Hardjito ve Rangan, 2005). Bu benzerlik bağlantısı uçucu külle geopolimerlerin geleneksel betonda ki su/çimento oranıyla basınç dayanımları arasındadır. Uçucu kül yüksek enerjiyle aktive olduğundan kür sıcaklığı arttıkça geopolimerin dayanımında artış gözlemlenmektedir.

Ding ve arkadaşları (2016), yaptıkları çalışmada, uçucu kül bağlayıcılı üretilen geopolimerlerde kür sıcaklığı arttıkça dayanımında yükselme olduğunu görmüşlerdir. Fakat bu kür sıcaklığı 75-95 °C aralığında göze çarpan bir artışın olmadığını farketmişlerdir (Ding vd., 2016).

Uçucu külün yüksek sıcaklık ile küründe dayanım kazandığı sonuçlarına ulaşılmıştır aynı zamanda bu kürün süreside önem arz etmektedir (Bakharev, 2005). Kür süresi 2 günü aşarsa uçucu kül içeren geopolimerlerin dayanımlarında dikkate değer bir yükseliş olmamaktadır (Ding vd., 2016).

Uçucu kül bağlayıcılı geopolimerlerde düşük molaritelerde yüksek dayanım sonuçları vermemektedir (Lloyd vd., 2009). Molarite arttıkça dayanım değerleri de artmaktadır. Bununla birlikte yüksek dayanımda sodyum hidroksit kullanımında olumlu basınç dayanımı sonuçlarına ulaşılmaktadır (Lloyd vd., 2009). Bu dayanım yüksek bazik ortamda uçucu küllerde ki zincirlerin kırılmasıyla ve farklı reaksiyonlara girerek jel formuna geçişi ile açıklanmaktadır (Ding vd., 2016).

2.11. Yüksek Fırın Cürufu-Uçucu Kül Karışımli Geopolimerlerin Basınç Dayanımı

Geopolimer harçlarda dayanım içinde ki bağlayıcı oranlarına göre değişmektedir. Cüruf ve uçucu kül birlikte kullanılarak üretilen geopolimerlerde uçucu kül miktarı arttıkça dayanım düşmektedir (Provis ve Bernal, 2014). Yani karışım şekilde üretilen geopolimerlerde cüruf oranının artışı dayanımı olumlu etkilemektedir (Provis ve Bernal, 2014).

N.K.Lee ve H.K.Lee (2013), yaptıkları çalışmada yapılan cüruf-uçucu kül karışımında %10 cüruf olan karışımın basınç dayanımı 15 MPa iken %15 cüruf oranlı karışımın basınç dayanımı 23 MPa olmuştur (Lee ve Lee, 2013).

Yüksek fırın cürufu kullanılması içindeki kalsiyum oksitin yani sönmemiş kirecin içindeki jel yapısındaki sıkı bağ ve dayanım artışının artmasıdır (Kumar vd., 2010). Oda sıcaklığında cüruf aktive olurken 60 °C’de uçucu kül daha yoğun ve baskın şekilde aktive olmaktadır (Lee ve Lee, 2013; Kumar vd., 2010).

Cüruf-uçucu kül bağlayıcılı geopolimerlerde erken dayanım sağlayan ana etken cürufun içeriğinde bulunan kalsiyum olduğu gözlemlenmiştir (Lloyd vd., 2009).

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada geopolimer harçlar hazırlanırken agrega, karışım suyu, lif, sodyum hidroksit, yüksek fırın cürufu e uçucu kül kullanılmıştır.

3.1.1. Agrega

Geopolimer harçlarda TS EN 196-1 standartlarına uygun maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau standart kumu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kumun granülometrisi ve sınır değerleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kum granülometrisi ve sınır değerleri

	Tane Büyüklüğü					
	0,08	0,16	0,5	1,0	1,6	2,0
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Sınır (%)	99 ± 1	87 ± 5	67 ± 5	33 ± 5	7 ± 5	0

3.1.2. Karışım Suyu

Geopolimer harçlarda TS EN 196-1 standartlarında belirtilen uygunluk doğrultusunda şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.3. Lif

Geopolimer harçlarda lif olarak 30 mm polipropilen lif kullanılmıştır. Kullanılan lif Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Polipropilen lif

3.1.4. Sodyum Hidroksit

Geopolimer harçlarda aktivasyon için sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Farklı molaritelerde harçlar hazırlandığı için sodyum hidroksiti farklı miktarda suyla karıştırılarak çözelti elde edilmiştir. Hazırlanan çözelti kullanılan sodyum hidroksit Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sodyum hidroksit

Çizelge 3.2. Sodyum hidroksit kimyasal özellikleri

Özellikler	Sodyum Hidroksit
Molekül Formülü	NaOH
Molekül kütlesi (g/mol)	40
NaOH (%)	>97
Na ₂ CO ₃ (%)	<1
Cl (%)	<0.01
SO ₄ (%)	<0.01
Pb (%)	<0.002
Al (%)	<0.002
Fe (%)	<0.002

3.1.5. Bağlayıcı Malzemeler

3.1.5.1. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu demir üretim fabrikalarında üretim aşamasında atık ürün olarak meydana gelen farklı soğuma işlemleri uygulanarak puzolanik hale gelen malzemedir. Bu çalışmada üretilen geopolimer harçlarda Ereğli Demir Çelik İşletmesinden temin edilen yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Şekil 3.3.'te çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu gösterilmiştir. Çizelge 3.3.'de kullanılan yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu verilmiştir.



Şekil 3.3. Yüksek fırın cürufu

3.1.5.2. Uçucu Kül

Uçucu kül enerji sanayisinde termik santrallerin bacalarında birikme sonucu meydana gelen atık bir malzemedir. Puzolanik yapıdadır. Alkali aktivatörlerle bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır. Termik santrallerde yakılan kömüre göre farklılık gösterebilir. Bu çalışmada Sugözü Termik Santralinden temin edilmiş F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu külde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerleri %70'in üzerinde olduğu için ve CaO değeri %10'dan az olduğu için F sınıfı uçucu küldür. Şekil 3.4.'te çalışmada kullanılan uçucu kül gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Uçucu kül

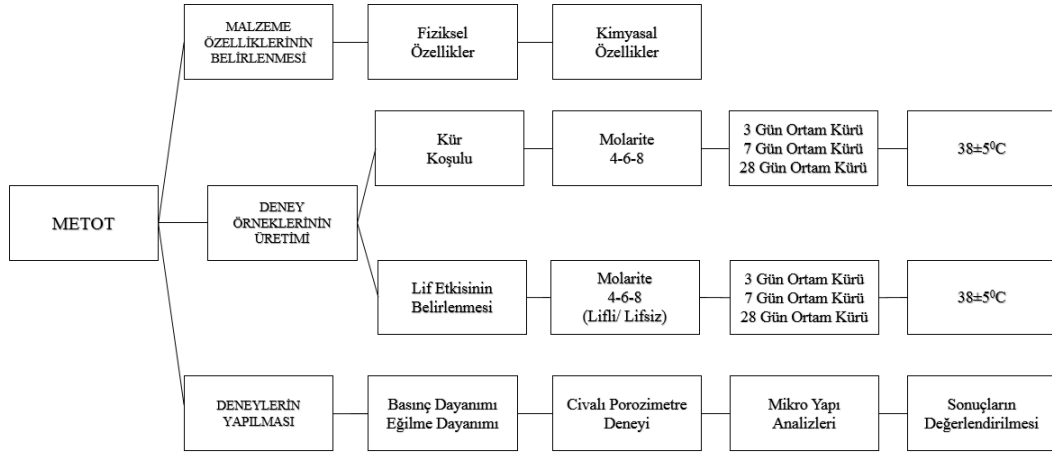
Çizelge 3.3.'te kullanılan yüksek fırın cürufu ve uçucu külün kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kimyasal kompozisyonu

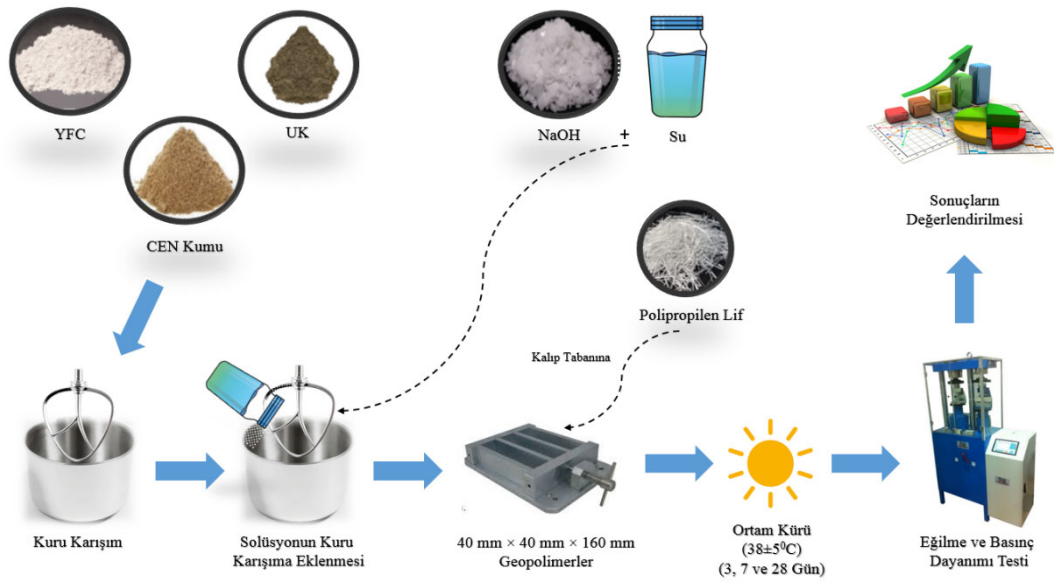
Oksit	Yüksek Fırın Cürufu (%)	Uçucu Kül (%)
SiO ₂	41,49	59,81
Al ₂ O ₃	16,34	19,56
Fe ₂ O ₃	0,61	8,02
CaO	29,26	3,30
MgO	7,68	1,27
SO ₃	1,90	0,12
Na ₂ O	0,80	0,52
K ₂ O	1,10	2,10
Cl-	0,01	-
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (Birimsiz)	2,82	2,28
Blaine İnceliği (cm ² /gr)	5160	2900
Kızdırma Kaybı (%)	0,17	3,15

3.2. Yöntem

Bu başlık altında geopolimer harç karışımlarının üretim süreçleri anlatılmıştır. Hazırlanan geopolimer harçların karışım oranları, kalıba yerleştirilmesi, farklı molaritelerin ayarlanması, geopolimer harçların kürlenmesi, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi bağlayıcılarla karışım yaparak harç üretilmesi, üretilen numunelere eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testlerinin yapılmasından söz edilmiştir. Şekil 3.5.'te çalışma planı özeti Şekil 3.6.'da geopolimer hazırlık süreci gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Çalışma planı özeti



Şekil 3.6. Geopolimer hazırlık süreci

3.2.1 Kalıpların Hazırlanması

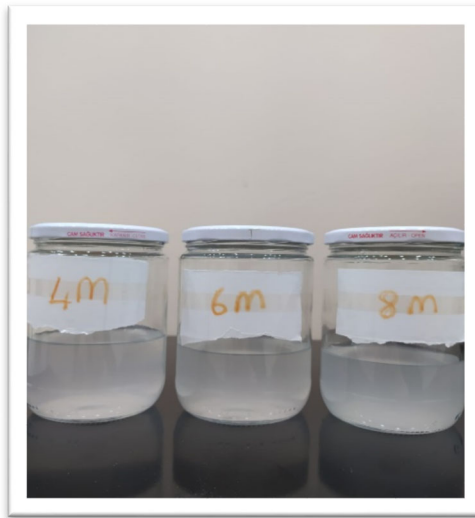
Geopolimer harçlar için 40×40×160 mm kalıplar kullanılmıştır. Geopolimer harç kalıba dökülmeden önce kalıpta kalıntılar varsa kalıp sökölür ve kalıbın içi temizlenir. Daha sonra temizlenen kalıplar tekrardan birleştirilip eski haline getirilir. Kalıba dökülen geopolimer harçlar priz aldıktan sonra rahat çıkabilmesi için döküm öncesinde kalıplar boşluk kalmayacak şekilde yağlanır. Şekil 3.7.'de üretimde kullanılan kalıp gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Üretimde kullanılan kalıp

3.2.2. Alkali Aktivatörün Hazırlanması

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. İsteğimiz molarite oranlarına göre alkali aktivatör ve su oranları ayarlanmıştır. Bir kaba NaOH ve su eklenip bir cisim yardımı ile elle karıştırılır. Sodyum hidroksit suyla karıştırıldığında hızlı bir şekilde tepkimeye girmektedir. Bu tepkime sonucunda dışarıya yüksek ısı yaymaktadır. Bu ısı yayıldığında geopolimer harç ile erkenden birleştirirsek olumsuz şekilde etki edebilmektedir. Bundan dolayı hazırlanan alkali karışım soğutulup daha sonrasında geopolimer harç ile karıştırılmıştır. Şekil 3.8.'de alkali karışım gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Alkali karışım

3.2.3. Geopolimer Harçların Hazırlanması

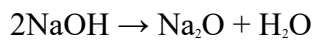
Üretilen geopolimer harçlarda kullanılan malzemeler terazi ile tartılmıştır ve ortak bir kaba alınmıştır. Kap içindeki malzemeler birbiri ile karıştırılıp karışım haline getirilmiştir. Daha önce hazırlanan sodyum hidroksit ve su çözeltisi karışım kabına eklenmiştir. İlk olarak elle hafif bir karıştırma işlemi yapılmıştır daha sonrasında mikserle alınarak 2 dakikaya yakın süre düşük devirde karıştırılmıştır. Ardından yüksek devirde 2 dakikaya yakın süre karıştırmıştır. Kalıplar harç dökülmeden önce yağlanmıştır. Kullanılacak lifler kalıplara dış katman olarak yerleştirilmiştir böylelikle harç döküldüğünde harcın etrafını sarmaktadır. Daha sonra hazırlanan karışımlar yağlanmış 40×40×160 mm boyutlara sahip kalıplara dökülmüştür. Kalıplara harç tamamen dolduracak şekilde değil yarı yarıya sıralı şekilde doldurulmuştur. İlk dolduruşta yarıya kadar doldurulup sarsma tablasında 60 vuruş uygulanarak homojen şekilde yayılması sağlanmıştır. Sarsma tablasında vuruş yapıldığında lifleri harç bir miktar içe çekip bütünleşmektedir. Daha sonra diğer yarıyı doldurulup tekrardan sarsma tablasında 60 vuruş uygulanarak homojen şekilde yerleştirilmiştir. Hazırlanan geopolimer harçlar 3, 7 ve 28 gün boyunca 38 ± 5 °C’de dış ortam ısı kürüne bırakılmıştır. Bu işlemler hem lifli şekilde hem de lifsiz şekilde uygulanıp numune üretilmiştir. Daha sonrasında 3, 7 ve 28 günlerde tek noktalı eğilme dayanımı testleri uygulanmıştır. Eğilme dayanımı testlerinden sonra basınç dayanımı testleri uygulanmıştır ve sonuçlar kaydedilmiştir. Şekil 3.9.’da laboratuarda kullanılan bazı cihazları gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Laboratuarda kullanılan bazı cihazlar

3.2.4. Geopolimer Harçların Kür Sıcaklığı ve Molaritesi

Hazırlanan geopolimer harçlar dış ortamda 3, 7 ve 28 gün 38 ± 5 °C sıcaklığında kür uygulanmıştır ve sodyum hidroksit molaritesi 4, 6 ve 8 molarite kullanılmıştır. Molarite hesapları aşağıda gösterilmiştir.



Molekül ağırlıkları $\rightarrow \text{Na}=23, \text{O}=16, \text{H}=1$

$$[2 \times (23 + 16 + 1)] \rightarrow [(2 \times 23) + 16] + [(2 \times 1) + 16]$$

80 gr $\rightarrow$ 62 gr + 18 gr bu sonuçta 80 gr NaOH'de 18 gr H₂O vardır.

4M için;

1000 gr çözelti 4M olabilmesi için $4 \text{ mol} \times \text{NaOH} = 4 \times 40 \text{ gr} = 160 \text{ gr NaOH}$ gerekir.

225 gr su için 1000 gr su için 160 gr NaOH ise 225 gr su için $[(225 \times 160) / 1000] = 36 \text{ gr NaOH}$ gereklidir.

80 gr NaOH ile 18 gr H₂O bulunduğundan 36 gr NaOH içerisinde $[(36 \times 18)/80]=8,1$ gr su muhteva eder. Toplam karışım suyundan NaOH içeriğinden gelen su çıkartılarak $225 - 8,1 = 216,9$ gr karışım için kullanılacak su hesaplanmış olur.

6M için;

1000 gr çözelti 6M olabilmesi için $6 \text{ mol} \times \text{NaOH} = 6 \times 40 \text{ gr} = 240 \text{ gr NaOH}$ gerekir.

225 gr su için 1000 gr su için 240 gr NaOH ise 225 gr su için $[(225 \times 240)/1000]=54$ gr NaOH gereklidir.

80 gr NaOH ile 18 gr H₂O bulunduğundan 54 gr NaOH içerisinde $[(54 \times 18)/80]=12,15$ gr su muhteva eder. Toplam karışım suyundan NaOH içeriğinden gelen su çıkartılarak $225 - 12,15 = 212,85$ gr karışım için kullanılacak su hesaplanmış olur.

8M için;

1000 gr çözelti 8M olabilmesi için $8 \text{ mol} \times \text{NaOH} = 8 \times 40 \text{ gr} = 320 \text{ gr NaOH}$ gerekir.

225 gr su için 1000 gr su için 320 gr NaOH ise 225 gr su için $[(225 \times 320)/1000]=72$ gr NaOH gereklidir.

80 gr NaOH ile 18 gr H₂O bulunduğundan 72 gr NaOH içerisinde $[(72 \times 18)/80]=16,2$ gr su muhteva eder. Toplam karışım suyundan NaOH içeriğinden gelen su çıkartılarak $225 - 16,2 = 208,8$ gr karışım için kullanılacak su hesaplanmış olur.

Farklı molaritelerde hazırlanan geopolimer harç karışımlarında kullanılan su miktarı ve sodyum hidroksit miktarı Çizelge 3.4.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Farklı molaritelerdeki alkali aktivatör karışım oranları

NaOH Molaritesi (M)	Su (gr)	NaOH (gr)
4M	216,9	36
6M	212,85	54
8M	208,8	72

3.2.5. Geopolimer Harçlarda Yüksek Fırın Cürufuna Uçucu Kül İkameli Karışımlar

Sadece yüksek fırın cürufu ile üretilen referans harçlara ek olarak uçucu kül ikame edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Bu harç yapımında da hem lifli hem de liffsiz şekilde numune üretilmiştir. Üretilen geopolimer harç karışımları Çizelge 3.5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Geopolimer harçların karışım oranları

Geopolimer harç kodu	Yüksek Fırın Cürufu (gr)	Uçucu Kül (gr)	Agrega	Kür Süresi (gün)	Kür Sıcaklığı (°C)	NaOH Molaritesi (M)
Referans	450	-	1350	3-7-28	38±5°C	4M
UK5	427.5	22.5	1350	3-7-28	38±5°C	
UK10	405	45	1350	3-7-28	38±5°C	
UK15	382.5	67.5	1350	3-7-28	38±5°C	
UK20	360	90	1350	3-7-28	38±5°C	
UK25	337.5	112.5	1350	3-7-28	38±5°C	
Referans	450	-	1350	3-7-28	38±5°C	6M
UK5	427.5	22.5	1350	3-7-28	38±5°C	
UK10	405	45	1350	3-7-28	38±5°C	
UK15	382.5	67.5	1350	3-7-28	38±5°C	
UK20	360	90	1350	3-7-28	38±5°C	
UK25	337.5	112.5	1350	3-7-28	38±5°C	
Referans	450	-	1350	3-7-28	38±5°C	8M
UK5	427.5	22.5	1350	3-7-28	38±5°C	
UK10	405	45	1350	3-7-28	38±5°C	
UK15	382.5	67.5	1350	3-7-28	38±5°C	
UK20	360	90	1350	3-7-28	38±5°C	
UK25	337.5	112.5	1350	3-7-28	38±5°C	

3.2.6 Geopolimer Harçların Kürleme İşlemi

Üretilen geopolimer harçlar kalıplara yerleştirilir. Kalıplara yerleşen harçlar 38±5 °C’de dış ortama bırakılır ve 3, 7 ve 28 gün boyunca ısı kürüne maruz bırakılır. Daha sonra ortam kürüne maruz kalan numuneler yapılacak deneyler ve analizlerin zamanına gelene kadar kuru ve düz bir zeminde bekletilir.

3.2.7. Geopolimer Harçların Yayılma Deneyi

Geopolimer harçlarda yayılma deneyi üretilen harcın akışkanlık ve işlenebilirliğini belirlemek için yapılan bir deneydir. Geopolimer harç hazırlandıktan sonra yayılma masasına koni şeklinde huni yerleştirilir. Geopolimer harç huni içerisine üç adımda yerleştirilir. Harç huniye her adımda 1/3 oranında yerleştirilir. Geopolimer harçların her adımda tokmak yardımı ile havası alınır ve sıkıştırma işlemi uygulanır. Huni tam kapasite dolduğunda üst katmanı düzlenir sonrasında huni yukarı doğru çekilir. Huni yukarı çekildiğinde geopolimer harç yayılmaya başlamaktadır. Yayılan geopolimer harcın masada ölçüsü alınır. Yayılma çapı dikey ve yatay şekilde ölçülür bu iki ölçümün ortalaması alınır ve not edilir.

3.2.8. Eğilme Dayanımı Testi

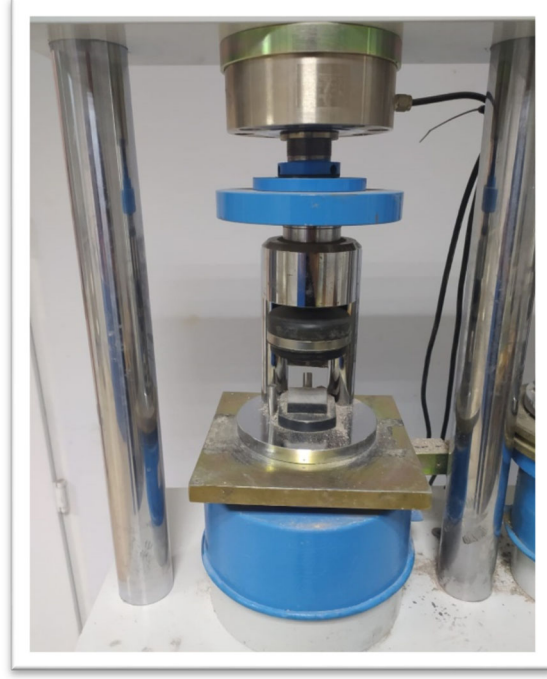
Hazırlanan numuneler kür süresini tamamladıklarında TS EN 196-1 standardına uygun şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. 3 ayrı numuneye uygulanan eğilme dayanımı testi ulaşılan sonuçların ortalaması alınarak not edilmiştir. Eğilme dayanım deneyleri 100 mm mesnet açılığı olan tek eksenli ve 0.05 kN/sn yükleme hızı olan eğilme dayanım cihazında yapılmıştır. Şekil 3.10.'da eğilme dayanım testi cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Eğilme dayanımı test cihazı

3.2.9. Basınç Dayanımı Testi

Basınç dayanım testleri TS EN 196-1'e uygun şekilde uygulanmıştır. Eğilme dayanımı testi sonucunda üç numunenin her biri 2 parçaya ayrılarak neydana gelen toplam 6 parçaya uygulanmıştır. Sonuçların ortalaması alınıp not edilmiştir. Basınç dayanım deneyleri 40×40 mm başlığa sahip 2.40 kN/sn yükleme hızı olan basınç dayanım test cihazında yapılmıştır. Şekil 3.11.'de basınç dayanım testi cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Basınç dayanımı test cihazı

3.2.10. Mikroyapı Analizi

Yapılan çalışmada örnek alınan katı numunelere SEM, EDX ve XRD analizleri yapılmıştır. SEM (taramalı elektron mikroskobu) numune yüzeyini yüksek çözünürlükte tarayan ve yüzey morfolojisini inceleyen bir mikroskop çeşitidir. Numuneye elektron demeti göndererek elde edilen görüntüleri sensöre yönlendirip sonuçlara ulaşmaktadır. EDX (enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi) ise SEM cihazına enegre bir analiz sistemidir ve malzeme yüzeyindeki elementel birleşimi inceler. SEM ve EDX amaçları betonun mikroyapısal özelliklerini ve morfolojik yapısını incelemek, çatlak oluşumlarını ve gözenek yapısını analiz etmek, elementel dağılımı analiz etmek ve matriste bulunan kalsiyum, silisyum, alüminyum gibi elementlerin dağılımını incelemektir. XRD (x-ray difraksiyon) malzemenin kristal yapısını incelemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. X-ışınları beton numuneye gönderilir, kristal yapıdaki atomlar tarafından belirli açılarda saçılma meydana gelir. Saçılan ışınlar dedektör tarafından toplanır ve difraktogram oluşturulur. XRD amacı beton içerisinde ki mineral fazlarını ve kristal yapıyı tanımlamak, hidratasyon ürünlerini tespit etmek, matriste oluşan kristal faz değişimlerini incelemek ve puzolan ya da diğer katkı malzemelerinin kristal yapısını incelemektir. SEM analiz cihazı Şekil 3.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Afyon Kocatepe Üniversitesi SEM analiz cihazı

3.2.11. Civalı Porozimetre Deneyi

Civalı porozimetre, numunedeki gözenek yapısını ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Numuneye artan basınçla civa enjekte edilir ve civanın nüfuz ettiği gözeneklerin boyutu ile hacmi belirlenir. Civalı porozimetre amacı betondaki gözenek boyutu dağılımı, gözenek hacmi, gözeneklilik yüzdesini incelemek, makro ve mikro gözenek oranını belirlemek ve beton geçirgenliğini, yoğunluğunu, su emme kapasitesini tespit etmektir. Şekil 3.13.'te civalı porozimetre cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Rize RTEÜ civalı porozimetre cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada; yüksek fırın cürufuna uçucu kül ikameli geopolimerler 4, 6 ve 8 molaritede lifli ve lifsiz şekilde üretilmiştir. Üretilen bu geopolimerlere yayılma deneyi, eğilme, basınç dayanımı deneyleri ve XRD, SEM+EDX, civalı porozimetre analizleri yapılmıştır.

4.1. Geopolimer Harçların Yayılma Deneyleri

4, 6 ve 8 molaritede üretilen geopolimer harçların yayılma deneyi verileri Çizelge 4.1.'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Geopolimer harç yayılma deneyi verileri

Harç Kodu	Molarite	[H ₂ O/(NaOH +YFC)]	Kum/YFC	H ₂ O/YFC	NaOH/YFC	Yayılma Çapı (cm)
Referans	4	0,446	3	0,48	0,080	25,25
UK5	4	0,467	3,16	0,50	0,084	25,35
UK10	4	0,491	3,33	0,53	0,088	26,40
UK15	4	0,518	3,53	0,56	0,094	26,80
UK20	4	0,547	3,75	0,60	0,100	27,25
UK25	4	0,580	4	0,64	0,106	27,50
Referans	6	0,422	3	0,47	0,120	24,75
UK5	6	0,442	3,16	0,49	0,126	25,50
UK10	6	0,463	3,33	0,52	0,133	25,75
UK15	6	0,487	3,53	0,55	0,141	26,15
UK20	6	0,514	3,75	0,59	0,150	26,50
UK25	6	0,543	4	0,63	0,160	27,00
Referans	8	0,40	3	0,46	0,160	23,50
UK5	8	0,418	3,16	0,48	0,168	24,50
UK10	8	0,437	3,33	0,51	0,177	25,25
UK15	8	0,459	3,53	0,54	0,188	25,50
UK20	8	0,483	3,75	0,58	0,200	26,00
UK25	8	0,509	4	0,62	0,213	26,45

Çizelge 4.1. incelendiğinde farklı molaritelerde ve farklı bağlayıcı oranlarıyla üretilen geopolimer harçların yayılma deneyi sonuçları görülmektedir. Molarite değeri arttıkça işlenebilirliğin azaldığı görülmektedir. Yayılma değerinin düşük olması harçların işlenebilirliğinin az olduğunun ve yüksek viskoziteye sahip olduğuna işaret

etmektedir. Geopolimer harçlarda aynı UK ikamesinde 8M olan harçlarda yayılmanın en az olduğu görülmektedir. Bu durum alkali aktivatör konsantrasyonunun artmasıyla ilişkilendirilebilir (Provis ve Bernal, 2014). %100 YFC ile üretilen referans harçlarda işlenebilirliğin en az olduğu görülmektedir. Harçlarda işlenebilirliğin az olmasının bir sebebi de yüksek fırın cürufunun ince taneli özellik göstermesinden kaynaklanabilmektedir (Rashad, 2013). Geopolimer harçlarda alkali aktivasyon sürecinde meydana gelen N-A-S-H ve C-A-S-H jelleride harçların erken sertleşmesine ve işlenebilirliğin azalmasına sebep olabilmektedir (Duxson vd., 2007).

4.2. Geopolimer Harç Örneklerinin Eğilme Dayanımları

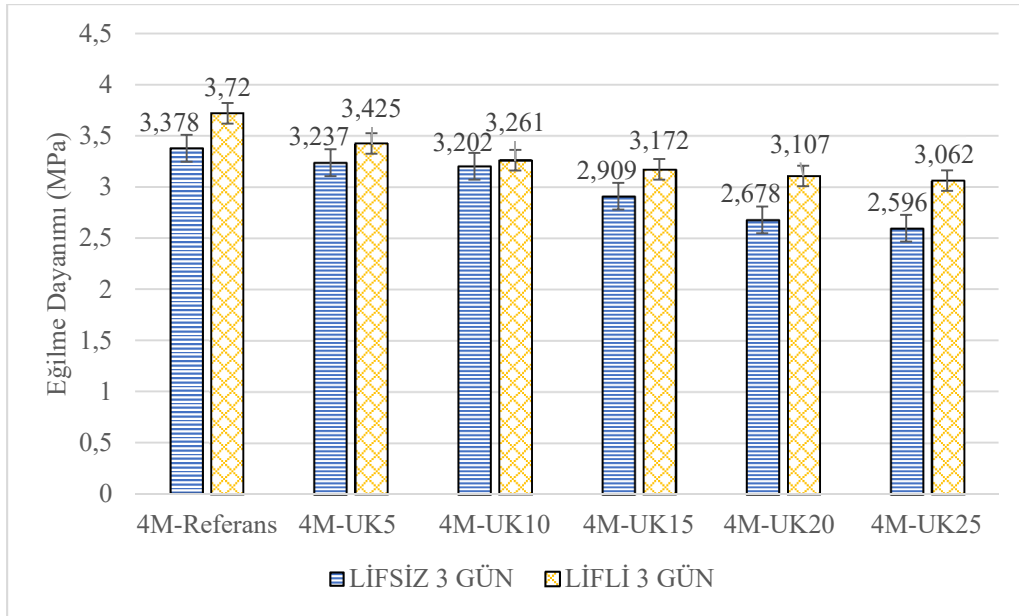
Lifli ve lifsiz şekilde 4, 6 ve 8 molaritede üretilen yüksek fırın cürufu bağlayıcılı ve uçucu kül ikameli geopolimer harçların 3, 7 ve 28. günlerdeki eğilme dayanımı test sonuçları verilmiştir. Eğilme dayanımları Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3., Şekil 4.4., Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7., Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da ise sonuçlar grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 4.2. Lifsiz geopolimer harçların eğilme dayanımı

Numune Adı	Molarite (M)	Eğilme Day. 3 Gün (MPa)	Eğilme Day. 7 Gün (MPa)	Eğilme Day. 28 Gün (MPa)
Referans	4	3,378	4,203	5,111
UK5	4	3,237	4,181	4,601
UK10	4	3,202	4,088	4,533
UK15	4	2,909	3,739	4,067
UK20	4	2,678	3,265	3,338
UK25	4	2,596	3,07	3,124
Referans	6	4,295	5,469	6,561
UK5	6	4,179	5,349	6,094
UK10	6	3,978	4,814	5,91
UK15	6	3,887	4,767	5,829
UK20	6	3,694	4,729	5,64
UK25	6	3,523	4,638	5,315
Referans	8	5,199	6,458	6,976
UK5	8	5,082	6,396	6,949
UK10	8	4,893	6,261	6,512
UK15	8	4,8	6,059	6,265
UK20	8	4,698	4,821	5,923
UK25	8	4,627	4,711	5,886

Çizelge 4.3. Lifli geopolimer harçların eğilme dayanımı

Numune Adı	Molarite (M)	Eğilme Day. 3 Gün (MPa)	Eğilme Day. 7 Gün (MPa)	Eğilme Day. 28 Gün (MPa)
L-Referans	4	3,72	4,658	5,314
L-UK5	4	3,425	4,475	4,772
L-UK10	4	3,261	4,381	4,623
L-UK15	4	3,172	3,987	4,599
L-UK20	4	3,107	3,896	4,195
L-UK25	4	3,062	3,857	4,027
L-Referans	6	5,295	6,361	6,621
L-UK5	6	4,845	5,954	6,294
L-UK10	6	4,515	5,608	6,027
L-UK15	6	4,35	5,575	5,995
L-UK20	6	4,192	5,115	5,859
L-UK25	6	4,156	4,907	5,643
L-Referans	8	5,608	6,8	7,23
L-UK5	8	5,561	6,628	7,199
L-UK10	8	5,539	6,541	7,139
L-UK15	8	5,228	6,061	7,092
L-UK20	8	4,709	5,196	6,199
L-UK25	8	4,651	5,009	5,91



Şekil 4.1. 4M geopolimer harçların 3 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.1.'de 3 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 4M sahip geopolimer harçların 3 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.1.'e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 4M UK25 harcında 2,596 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M Referans harcında 3,378 MPa olarak elde edilmiştir.

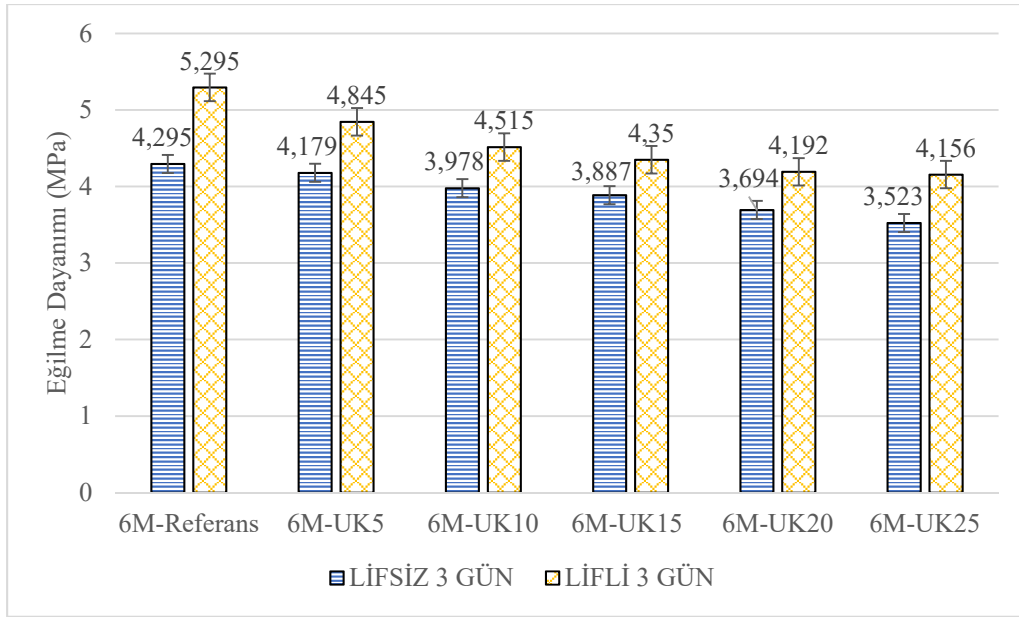
Çizelge 4.3. ve Şekil 4.1.'e göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 4M L-UK25 harcında 3,062 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M L-Referans harcında 3,72 MPa olarak elde edilmiştir.

Erken yaşlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 3 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla eğilme dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

3 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 3 günlük erken eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Literatür incelendiğinde lif kullanımının eğilme dayanımlarını artırdığı görülmüştür (Pacheco-Torgal vd., 2008). Bu durum bizim çalışmamızda da benzerlik göstermektedir.

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %15,22 oranında 4M UK25 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 3 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %9,15 azalma ile lifsiz 4M UK10 ile 4M UK15 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %23,14'tür. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %17,68'dir.



Şekil 4.2. 6M geopolimer harçların 3 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.2.'de 3 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 6M sahip geopolimer harçların 3 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.2.'ye göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 6M UK25 harcında 3,523 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M Referans harcında 4,295 MPa olarak elde edilmiştir.

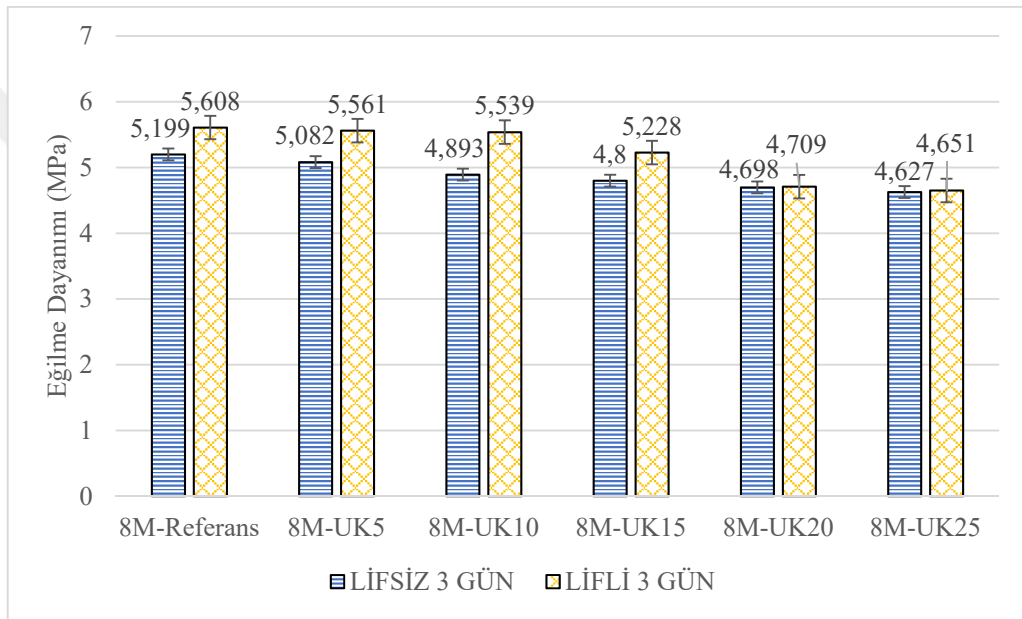
Çizelge 4.3. ve Şekil 4.2.'ye göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 6M L-UK25 harcında 4,156 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M L-Referans harcında 5,295 MPa olarak elde edilmiştir.

Bu zaman sürecinde YFC'nin dayanıma olan etkisi dayanımı daha fazla artırdığı görülmektedir. UK'nin etkisinin bu süreçte daha düşük kaldığı sonucuna varılmıştır (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

Lif kullanımı ile 3 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 6M harçlarda da 3 günlük erken eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %18,88 oranında 6M Referans harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 3 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %8,5 azalma ile lifli 6M L-Referans ile 6M L-UK5 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %17,97'dir. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %21.51'dir.



Şekil 4.3. 8M geopolimer harçların 3 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.3.'te 3 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 8M sahip geopolimer harçların 3 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.3.'e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 8M UK25 harcında 4,627 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M Referans harcında 5,199 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. ve Şekil 4.3.'e göre; Lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 8M L-UK25 harcında 4,651 MPa olarak görülmüştür, en

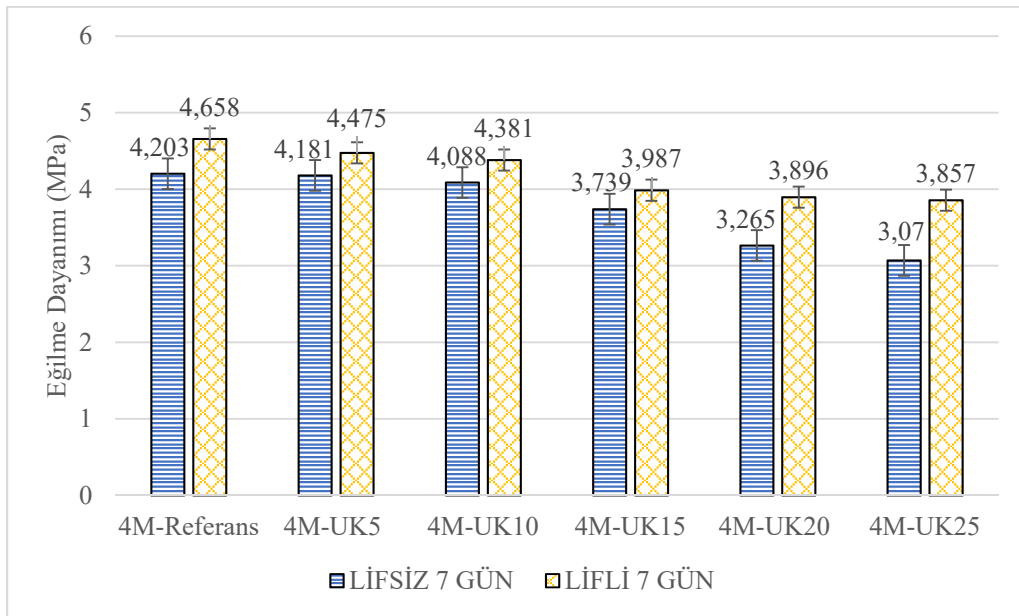
yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M L-Referans harcında 5,608 MPa olarak elde edilmiştir.

Bu zaman sürecinde YFC'nin dayanıma olan etkisi dayanımı daha fazla artırdığı görülmektedir. YFC oranı arttıkça dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. UK'nin etkisinin bu süreçte daha düşük kaldığı sonucuna varılmıştır (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

Lif kullanımı ile 3 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 8M harçlarda da 3 günlük erken eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %11,66 oranında 8M UK10 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 3 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %9,92 azalma ile lifli 8M L-UK15 ile 8M L-UK20 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %11'dir. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %17.06'dır.



Şekil 4.4. 4M geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.4.'te 7 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 4M sahip geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.4.'e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 4M UK25 harcında 3,07 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M Referans harcında 4,203 MPa olarak elde edilmiştir.

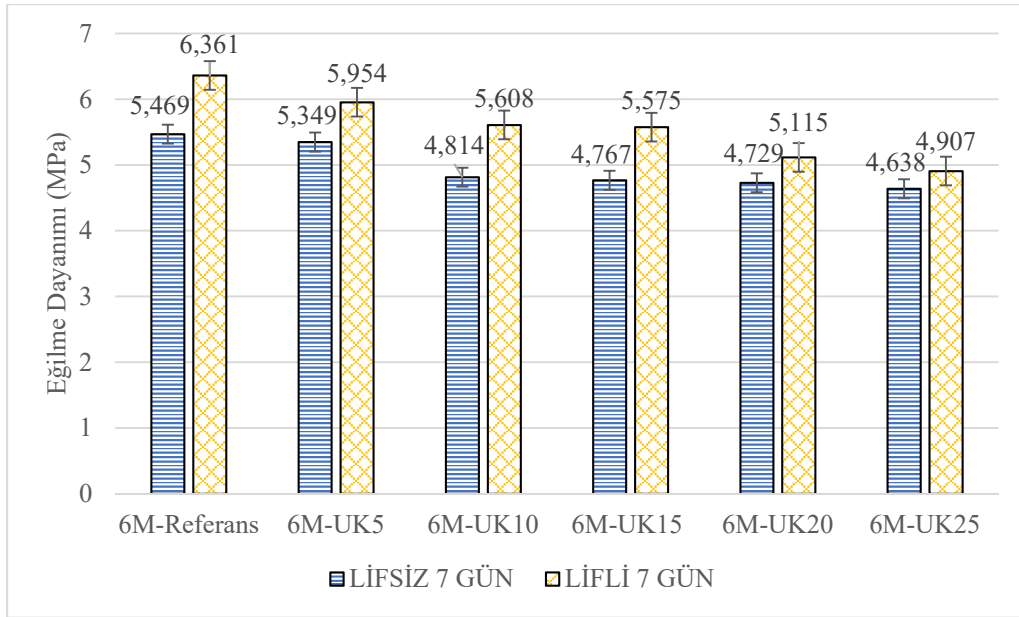
Çizelge 4.3. ve Şekil 4.4.'e göre; Lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 4M L-UK25 harcında 3,857 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M L-Referans harcında 4,658 MPa olarak elde edilmiştir.

YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 7 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla eğilme dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

Lif kullanımı ile 7 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 7 günlük eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %20,4 oranında 4M UK25 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 7 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %12,67 azalma ile lifsiz 4M UK15 ile 4M UK20 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm 7 günlük numunelerin dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %26,95'tir. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %17,19'dur.



Şekil 4.5. 6M geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.5.'te 7 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 6M sahip geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.5.'e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 6M UK25 harcında 4,638 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M Referans harcında 5,469 MPa olarak elde edilmiştir.

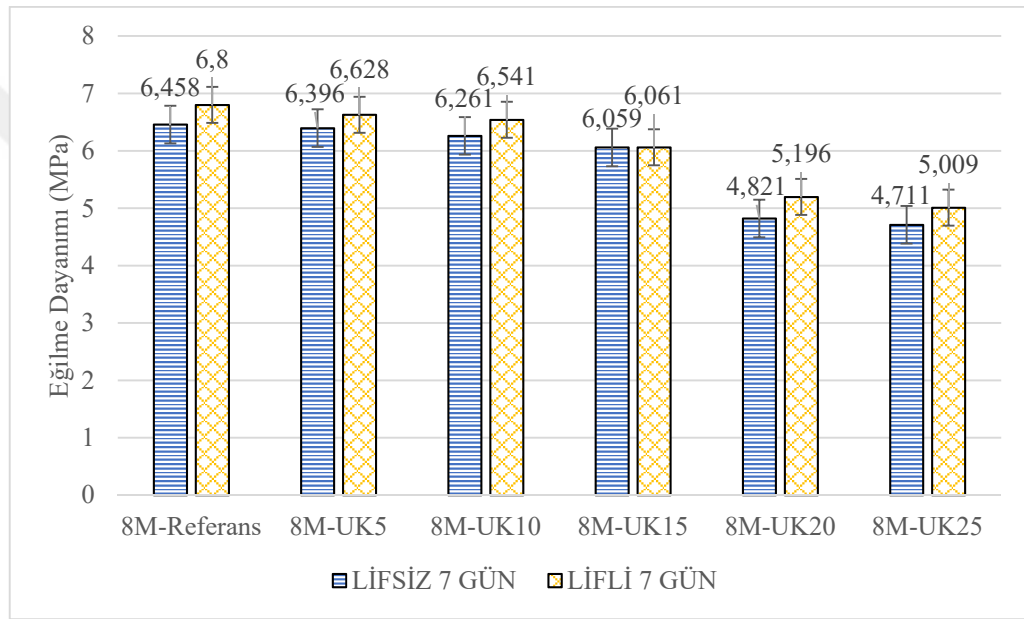
Çizelge 4.3. ve Şekil 4.5.'e göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 6M L-UK25 harcında 4,907 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M L-Referans harcında 6,361 MPa olarak elde edilmiştir.

YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 7 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla eğilme dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

Lif kullanımı ile 7 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 7 günlük eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Geopolimer harçlarda lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %14,02 oranında 6M Referans harcında elde edilmiştir.

Geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %10 azalma ile lifsiz 6M UK5 ile 6M UK10 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm 7 günlük numunelerin dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %15,19'dur. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %22.85'tir.



Şekil 4.6. 8M geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.6.'da 7 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 8M sahip geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.6.'ya göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 8M UK25 harcında 4,711 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M Referans harcında 6,458 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. ve Şekil 4.6.'ya göre; Lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 8M L-UK25 harcında 5,009 MPa olarak görülmüştür, en

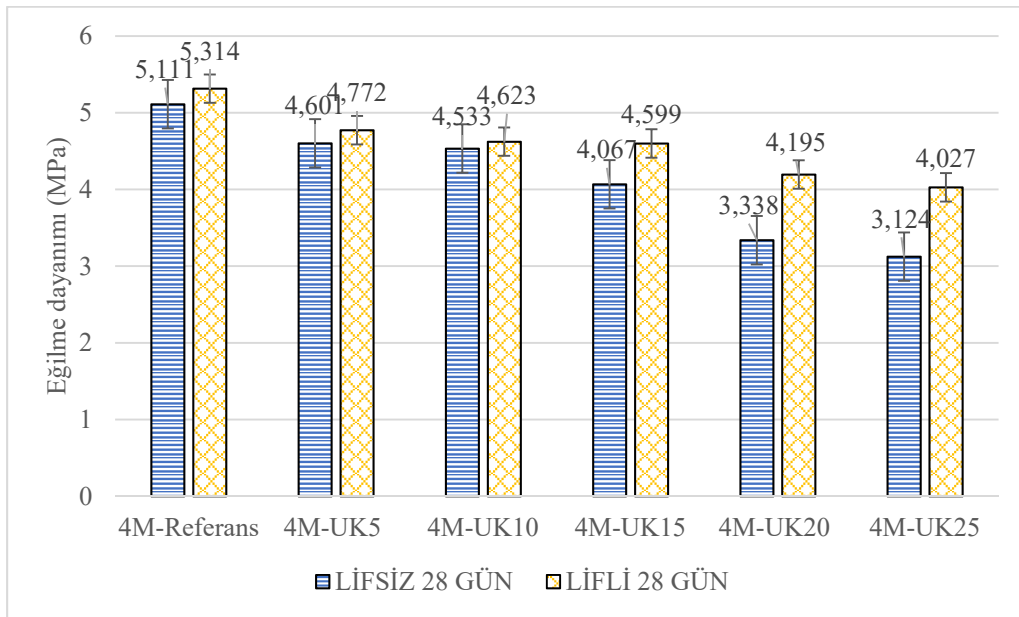
yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M L-Referans harcında 6,8 MPa olarak elde edilmiştir.

YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 7 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla eğilme dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

Lif kullanımı ile 7 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 7 günlük eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Geopolimer harçlarda lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %7,21 oranında 8M UK20 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %20 azalma ile lifsiz 8M-UK15 ile 8M-UK20 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm 7 günlük numunelerin dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %27,05'tir. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %26,33'tür.



Şekil 4.7. 4M geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.7.'de 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 4M sahip geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.7.'ye göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 4M UK25 harcında 3,124 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M Referans harcında 5,111 MPa olarak elde edilmiştir.

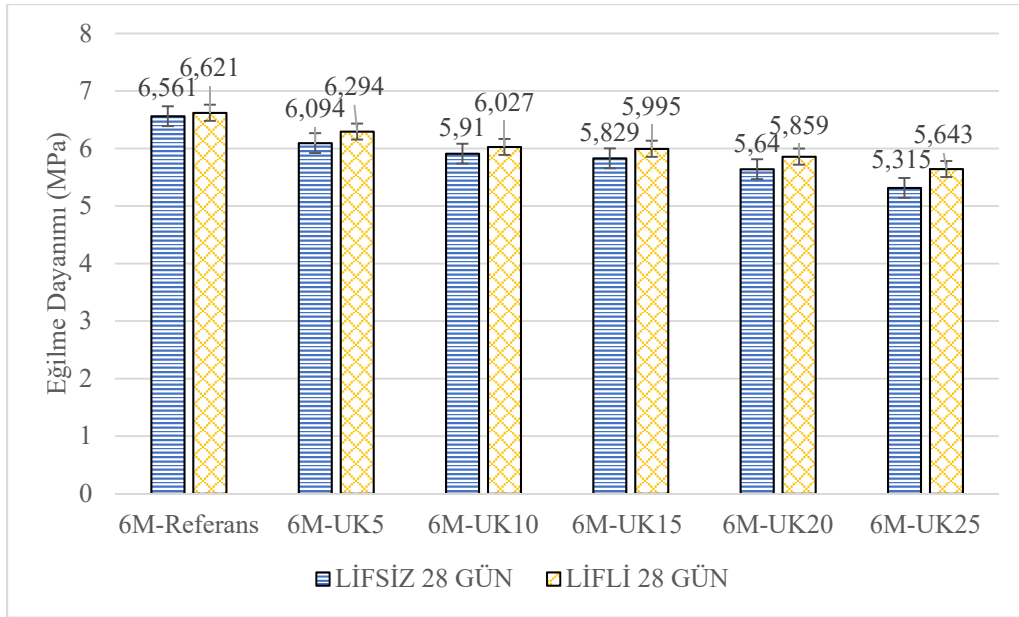
Çizelge 4.3. ve Şekil 4.7.'ye göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 4M L-UK25 harcında 4,027 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M L-Referans harcında 5,314 MPa olarak elde edilmiştir.

YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 28 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla eğilme dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

Lif kullanımı ile 28 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 28 günlük eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %22,42 oranında 4M UK25 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %17,92 azalma ile lifsiz 4M UK15 ile 4M UK20 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm 28 günlük numunelerin dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %38,87'dir. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %24,22'dir.



Şekil 4.8. 6M geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.8.'de 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 6M sahip geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.8.'e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 6M UK25 harcında 5,315 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M Referans harcında 6,561 MPa olarak elde edilmiştir.

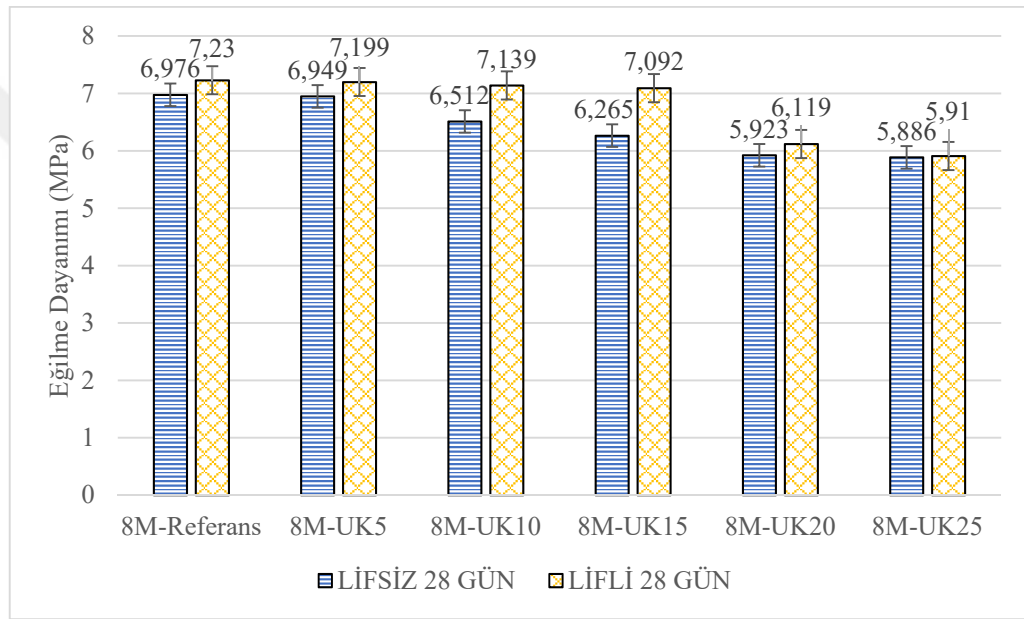
Çizelge 4.3. ve Şekil 4.8.'e göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 6M L-UK25 harcında 5,643 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M L-Referans harcında 6,621 MPa olarak elde edilmiştir.

YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 28 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla eğilme dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

Lif kullanımı ile 28 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 28 günlük eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %5,81 oranında 6M UK25 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %7,11 azalma ile lifsiz 6M Referans ile 6M UK5 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm 28 günlük numunelerin dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %19'dur. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %14.77'dir.



Şekil 4.9. 8M geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları

Çizelge 4.2., Çizelge 4.3. ve Şekil 4.9.'da 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 8M sahip geopolimer harçların 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.2. ve Şekil 4.9.'a göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 8M UK25 harcında 5,886 MPa olarak görülmüştür, en yüksek eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M Referans harcında 6,976 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. ve Şekil 4.9.'a göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük eğilme dayanımı 8M L-UK25 harcında 5,91 MPa olarak görülmüştür, en yüksek

eğilme dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M L-Referans harcında 7,23 MPa olarak elde edilmiştir.

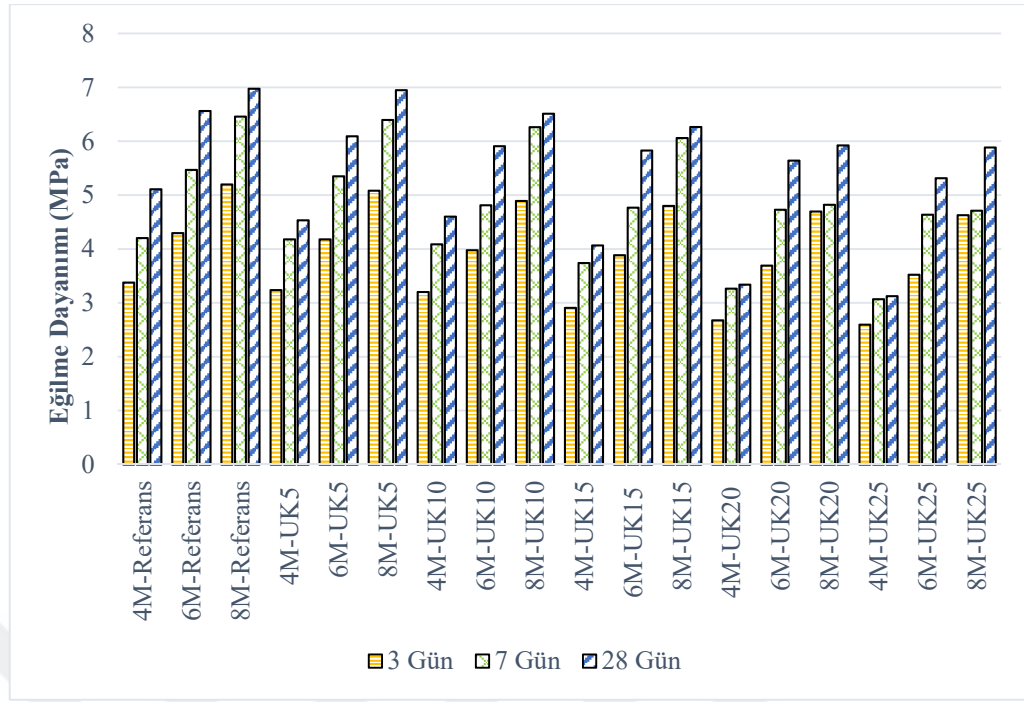
YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 28 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla eğilme dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006).

Lif kullanımı ile 28 günlük geopolimer harçların eğilme dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 28 günlük eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008).

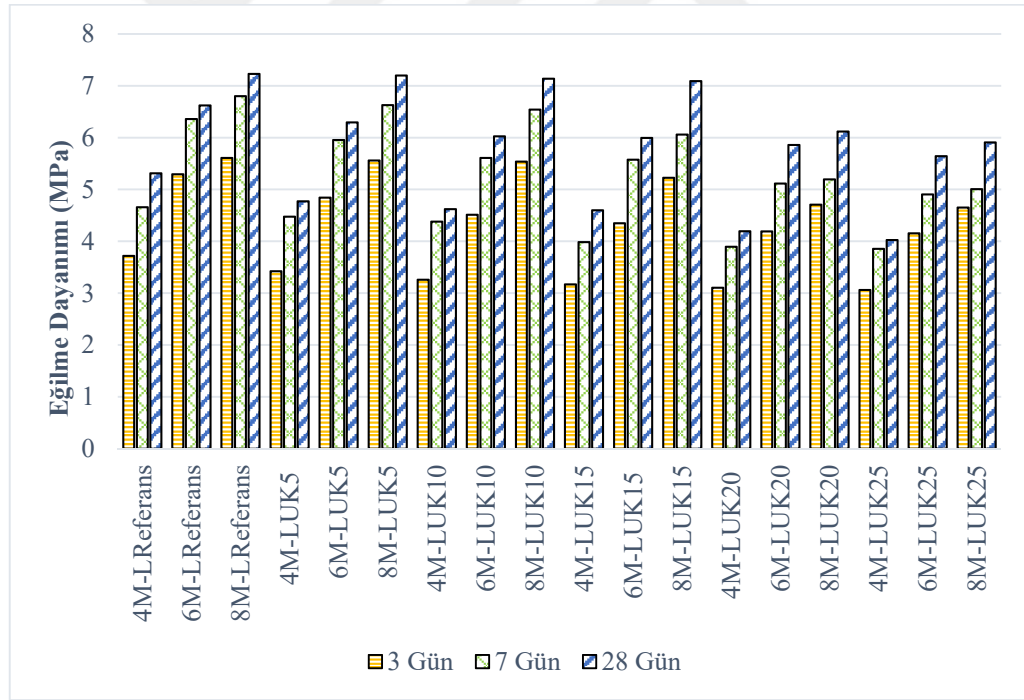
Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %11,66 oranında 8M UK15 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 28 günlük eğilme dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %13,72 azalma ile lifli 8M L-UK15 ile 8M L-UK20 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm 28 günlük numunelerin dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %15,62'dir. Lifli harçlarda en yüksek eğilme dayanımı ile en düşük eğilme dayanımı arasındaki azalma oranı %18.25'tir.

Şekil 4.10.'da geopolimer harçların eğilme dayanımlarına alkali aktivatör molaritesinin ve kür süresinin etkisi gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.10. Geopolimer harçların eğilme dayanımına alkali aktivatör molaritesi ve kür süresinin etkisi (a) lifsiz, (b) lifli

Şekil 4.10 (a) ve Şekil 4.10. (b)'de UK ikameli YFC'li geopolimer harçlar 3, 7 ve 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılmıştır. Bu geopolimer harçların eğilme dayanımlarına alkali aktivatör molaritesinin ve kür süresinin etkisi incelendiğinde;

Geopolimer harçların eğilme dayanımları alkali aktivatör molaritesinin değişmesi ile etkilenmiştir. Molarite; geopolimerizasyon sürecini ve reaksiyon hızını doğrudan etkileyerek mekanik özelliklerde değişiklikler meydana geldiği görülmüştür. (Davidovits, 2015; Hardjito vd., 2004).

Geopolimerlerde eğilme dayanımının molarite değeri arttıkça yükseldiği görülmektedir. Hardjito vd., (2004), yaptıkları çalışmada molaritenin artmasıyla eğilme dayanımında iyileşmeler meydana geldiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda bu artışın sürekli olmadığını belirli değerler aralığında olduğunu belirtmişlerdir. Davidovits (2008), geopolimerizasyon reaksiyonlarında aktivatör molaritesinin önemli bir görev aldığını, daha yüksek molaritelerin reaksiyonu hızlandırarak daha yoğun bir mikro yapı meydana geldiğini ve bundan dolayı eğilme dayanımında artışa sebep olduğunu belirtmiştir.

Rangan (2018), NaOH molaritesi arttıkça eğilme dayanımının da arttığını belirtmiştir. Molarite aralığının 8-12 arasında iyi sonuçlar verdiğini daha üst molaritelerde eğilme dayanımında azalmalar meydana gelebileceğini vurgulamıştır.

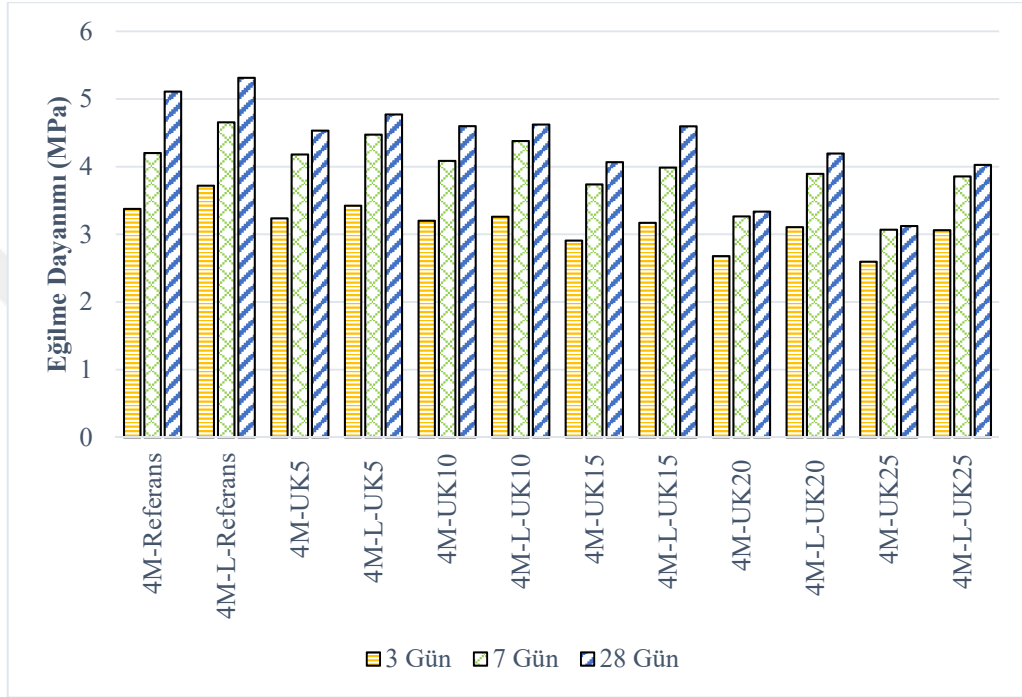
4, 6 ve 8 aktivatör molaritelerinde üretilen geopolimer harçlarda tüm molaritelerde kür süresi arttıkça dayanımların da olumlu yönde etkilendiği görülmektedir. Kür süresi arttığı zaman geopolimer harçlarda eğilme dayanımını olumlu etkilemesi beklenir. Bu artış geopolimerizasyonun tamamlanması ile bağlantılıdır ayrıca bağlayıcı fazlarının daha iyi gelişmesiyle de alakadır. Sonuçlara bakıldığında numunelerin kür süresi arttıkça her numunenin eğilme dayanımında artış meydana geldiği görülmektedir (Hardjito vd., 2004; Chindaprasirt vd., 2007).

Davidovits (2008), geopolimerlerde kür süresinin artmasıyla dayanımda gelişmeler meydana geldiği ve yüksek sıcaklık ile yapılan kürün geopolimerlerin mekanik dayanımını artırdığını belirtmiştir.

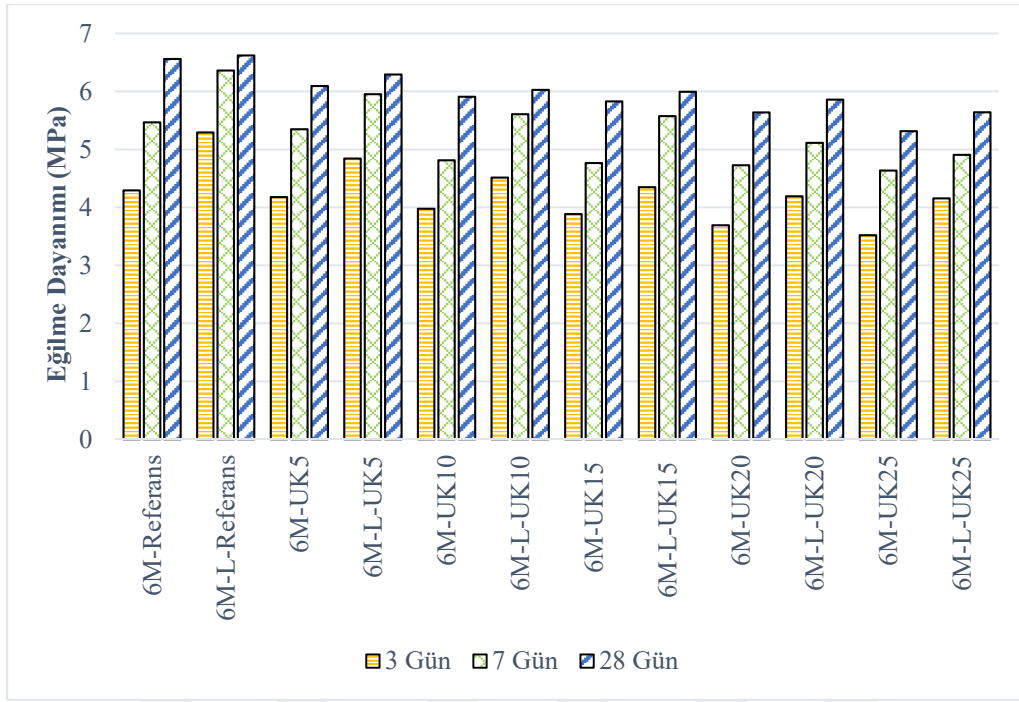
Turner ve Collins (2013), kür zamanının artmasıyla geopolimerlerin iç yapısında güçlenme meydana geldiği ve eğilme dayanımlarında artış ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Daha önce yapılan bazı çalışmalar ile bu çalışmada ulaşılan sonuçlar örtüştürüldüğünde aktivatör molaritesinin artışı eğilme dayanımında olumlu sonuçlar meydana getirmektedir. Kür süresinin de artması aynı şekilde geopolimer harçlarda eğilme dayanımına olumlu etkileri bulunmaktadır.

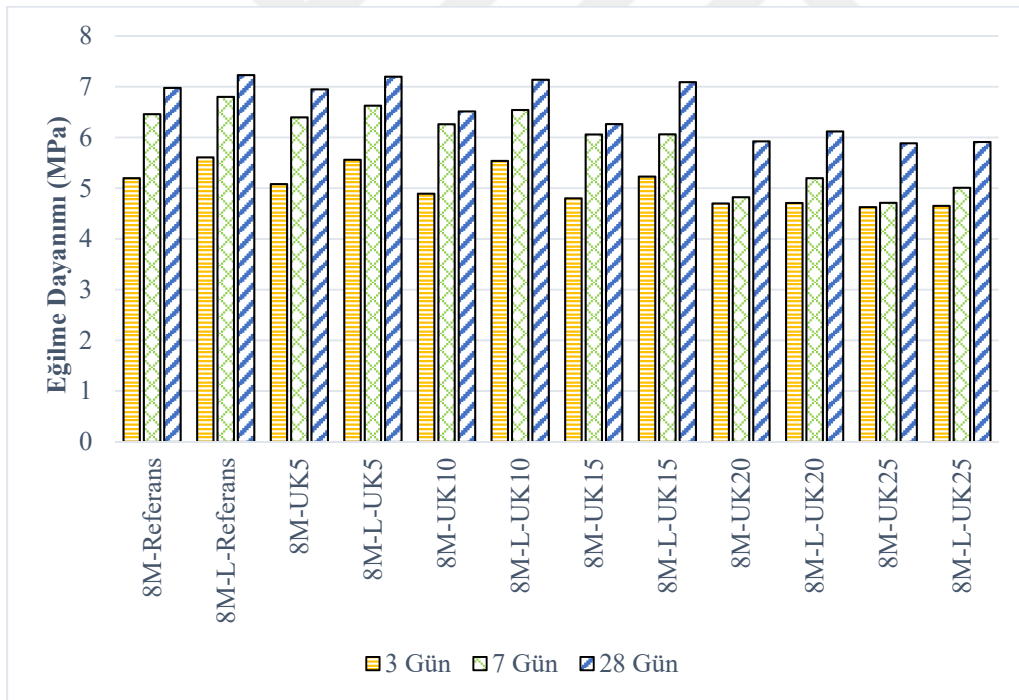
Şekil 4.11’de geopolimer harçların eğilme dayanımlarına lif kullanımının etkisi gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.11. Geopolimer harçlarda lif kullanımının eğilme dayanımına etkisi (a) 4M, (b) 6M, (c) 8M

Şekil 4.11 (a), Şekil 4.11. (b) ve Şekil 4.11. (c)'de UK ikameli YFC'li geopolimer harçlar 3, 7 ve 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılmıştır. Bu geopolimer harçların eğilme dayanımlarına lif katkısının etkisi incelendiğinde;

4, 6 ve 8 aktivatör molaritelerinde üretilen geopolimer harçlarda tüm molaritelerde lif kullanımı eğilme dayanımlarını olumlu yönde etkilendiği görülmektedir. Geopolimerlerde lif katkısıyla eğilme dayanımlarında artış meydana geldiği görülmektedir.

Pacheco-Torgal vd., (2008), lif katkısının geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerindeki iyileştirici etkisi üzerinde durmuştur ve polipropilen liflerin, çatlama direncini ve eğilme dayanımını artırmada önemli rol üstlendiğini belirtmiştir. Nematollahi vd., (2017), polipropilen liflerin geopolimer matrisindeki etkisini inceledikleri çalışmada, polipropilen liflerin eğilme dayanımını önemli ölçüde artırdığını ve betonun sünekliğini geliştirdiği sonucunu varmışlardır. Kurtz ve Balaguru (2000), polipropilen lif takviyesinin eğilme dayanımını olumlu etkileyip dayanımı artırdığı ve bununla birlikte yük taşıma kapasitesini artırıp çatlakları kontrol etmede de etkili olduğunu söylemişlerdir.

Daha önce yapılan bazı çalışmalar ile bu çalışmada ulaşılan sonuçlar örtüştürüldüğünde polipropilen lifler geopolimer harçlarda eğilme dayanımına olumlu etkileri bulunmaktadır. Bununla birlikte lif kullanımı yük taşıma potansiyelini artırıp mekanik performansı artırmaktadır.

Şekil 4.12.'de geopolimer harçların eğilme dayanım ortalamasının çizgi grafiği gösterimi verilmiştir.

4.3. Geopolimer Harç Örneklerinin Basınç Dayanımları

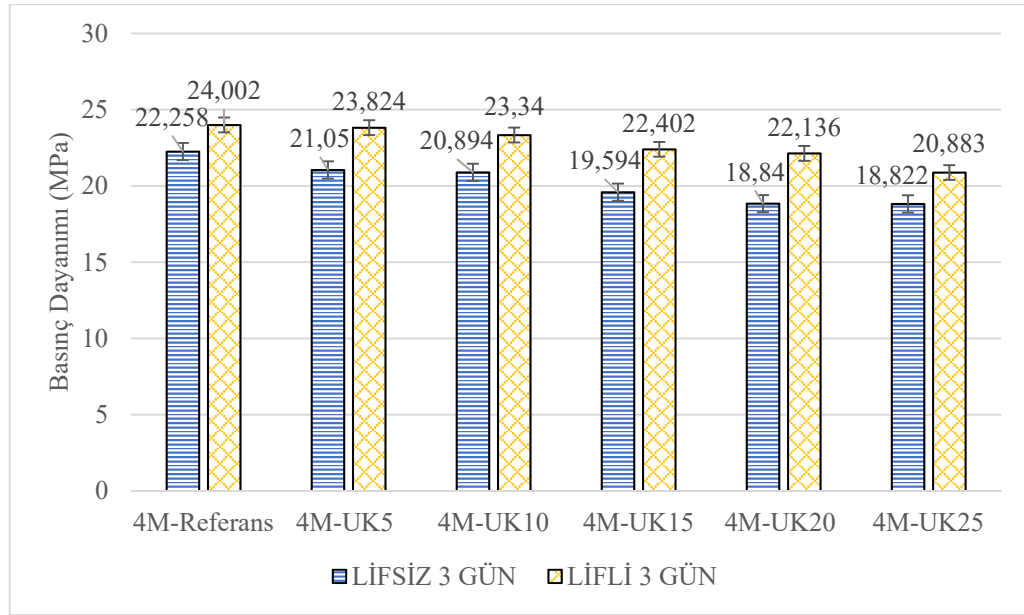
Lifli ve liffsiz şekilde 4, 6 ve 8 molaritede üretilen yüksek fırın cürufu bağlayıcılı ve uçucu kül ikameli geopolimer harçların 3, 7 ve 28. günlerdeki basınç dayanımı test sonuçları verilmiştir. Basınç dayanımları Çizelge 4.4. ve Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Şekil 4.12., Şekil 4.13., Şekil 4.14., Şekil 4.15., Şekil 4.16., Şekil 4.17., Şekil 4.18., Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.'de ise sonuçlar grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 4.4. Lifsiz geopolimer harçların basınç dayanımı

Numune Adı	Molarite (M)	Basınç Day. 3 Gün (MPa)	Basınç Day. 7 Gün (MPa)	Basınç Day. 28 Gün (MPa)
Referans	4	22,258	28,138	31,924
UK5	4	21,05	26,645	30,255
UK10	4	20,894	26,434	29,554
UK15	4	19,594	24,404	29,349
UK20	4	18,84	23,395	28,135
UK25	4	18,822	23,293	27,093
Referans	6	26,233	32,896	38,857
UK5	6	24,528	29,488	37,448
UK10	6	23,045	29,347	37,111
UK15	6	21,05	26,928	34,874
UK20	6	20,962	26,536	33,086
UK25	6	20,678	25,961	32,202
Referans	8	28,203	33,244	39,894
UK5	8	25,831	30,26	37,791
UK10	8	24,313	29,777	37,216
UK15	8	22,546	27,885	34,909
UK20	8	21,45	26,866	33,646
UK25	8	20,872	26,025	32,748

Çizelge 4.5. Lifli geopolimer harçların basınç dayanımı

Numune Adı	Molarite (M)	Basınç Day. 3 Gün (MPa)	Basınç Day. 7 Gün (MPa)	Basınç Day. 28 Gün (MPa)
L-Referans	4	24,002	30,376	33,164
L-UK5	4	23,824	29,791	31,401
L-UK10	4	23,34	29,417	30,901
L-UK15	4	22,402	28,507	30,716
L-UK20	4	22,136	28,275	30,169
L-UK25	4	20,883	26,508	30,005
L-Referans	6	27,518	34,962	40,135
L-UK5	6	25,532	33,233	39,509
L-UK10	6	24,079	30,369	38,906
L-UK15	6	23,15	29,143	38,151
L-UK20	6	22,364	27,628	36,676
L-UK25	6	21,576	26,57	35,442
L-Referans	8	29,992	35,706	41,62
L-UK5	8	25,949	34,076	40,078
L-UK10	8	24,808	31,548	39,167
L-UK15	8	23,72	30,037	38,336
L-UK20	8	22,807	28,874	37,064
L-UK25	8	21,747	27,28	36,06



Şekil 4.12. 4M geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Şekil 4.12.’de 3 gün 38 ± 5 °C’de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC’li ve 4M sahip geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.12.’ye göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 4M UK25 harcında 18,822 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M Referans harcında 22,258 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. ve Şekil 4.12.’ye göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 4M L-UK25 harcında 20,883 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M L-Referans harcında 24,002 MPa olarak elde edilmiştir.

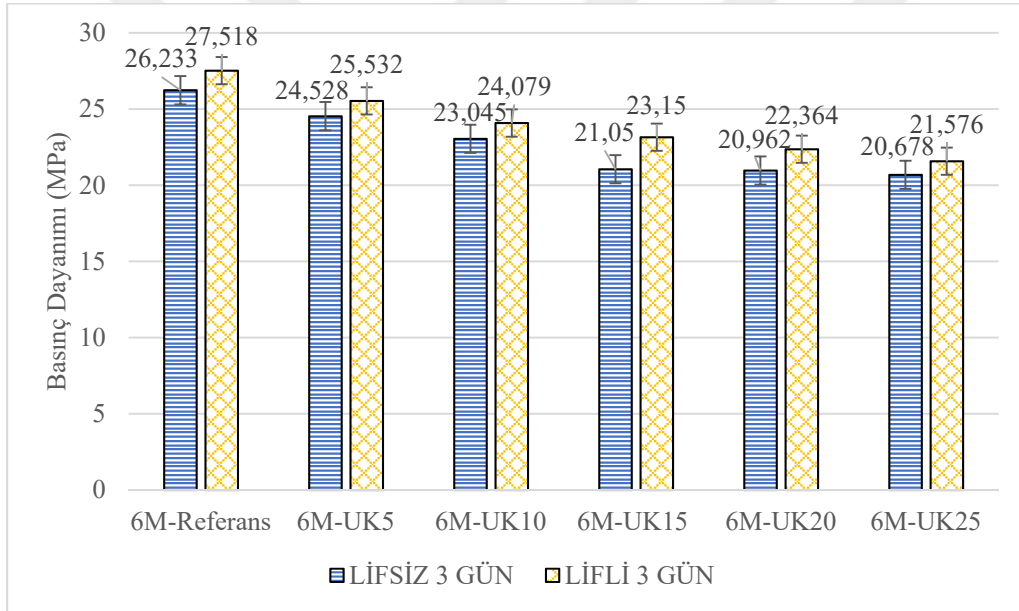
Erken yaşlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 3 günlük geopolimer harçlarda YFC’ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

Lif kullanımı ile 3 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 3 günlük erken basınç dayanımını

artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %14,89 oranında 4M UK20 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 3 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %5,66 azalma ile lifli 4M L-UK20 ile 4M L-UK25 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %15,43'tür. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %13'tür.



Şekil 4.13. 6M geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Şekil 4.13.'te 3 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 6M sahip geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.13.'e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 6M UK25 harcında 20,678 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M Referans harcında 26,233 MPa olarak elde edilmiştir.

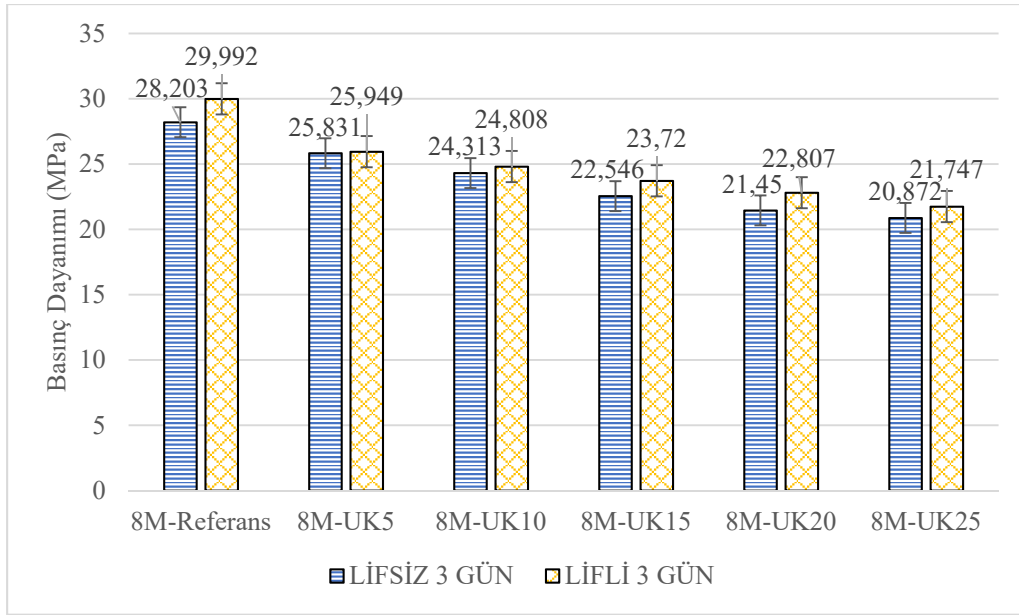
Çizelge 4.5. ve Şekil 4.13.'e göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 6M L-UK25 harcında 21,576 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M L-Referans harcında 27,518 MPa olarak elde edilmiştir.

Erken yaşlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 3 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

Lif kullanımı ile 3 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 3 günlük erken basınç dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %9,07 oranında 6M UK15 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 3 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %8,65 azalma ile lifsiz 6M UK10 ile 6M UK15 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %21,17'dir. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %21,59'dur.



Şekil 4.14. 8M geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Şekil 4.14.’te 3 gün 38 ± 5 °C’de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC’li ve 8M sahip geopolimer harçların 3 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.14.’e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 8M UK25 harcında 20,872 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M Referans harcında 28,203 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. ve Şekil 4.14.’e göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 8M L-UK25 harcında 21,747 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M L-Referans harcında 29,992 MPa olarak elde edilmiştir.

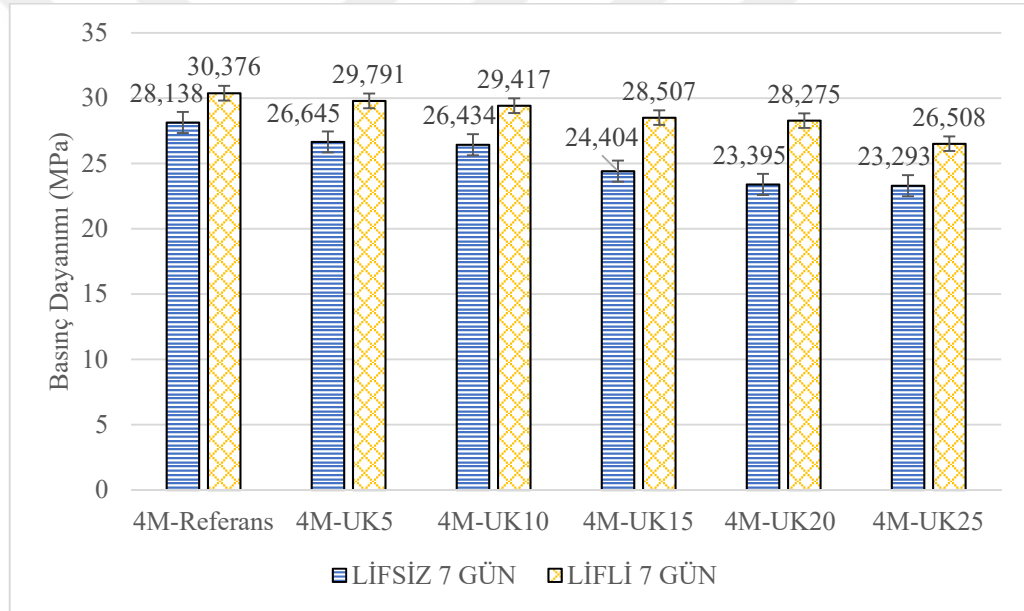
Erken yaşlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 3 günlük geopolimer harçlarda YFC’ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

Lif kullanımı ile 3 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 3 günlük erken basınç dayanımını

artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %5,96 oranında 8M Referans harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 3 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %13,48 azalma ile lifli 8M L-Referans ile 8M L-UK5 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %26'dır. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %27,49'dur.



Şekil 4.15. 4M geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Şekil 4.15.'te 7 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 4M sahip geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.15.'e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 4M UK25 harcında 23,293 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M Referans harcında 28,138 MPa olarak elde edilmiştir.

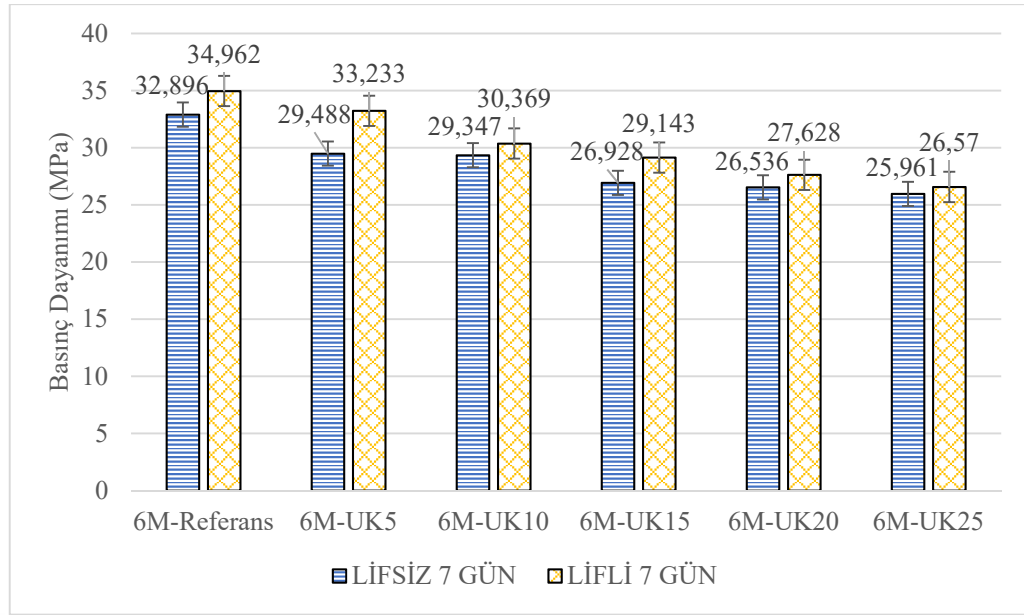
Çizelge 4.5. ve Şekil 4.15.'e göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 4M L-UK25 harcında 26,508 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M L-Referans harcında 30,376 MPa olarak elde edilmiştir.

Geopolimer harçlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 7 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

Lif kullanımı ile 7 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 7 günlük basınç dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %17,28 oranında 4M UK20 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %6,25 azalma ile lifli 4M L-UK20 ile 4M L-UK25 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %17,22'dir. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %12,73'tür.



Şekil 4.16. 6M geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Şekil 4.16.'da 7 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 6M sahip geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.16.'ya göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 6M UK25 harcında 25,961 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M Referans harcında 32,896 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. ve Şekil 4.16.'ya göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 6M L-UK25 harcında 26,57 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M L-Referans harcında 34,962 MPa olarak elde edilmiştir.

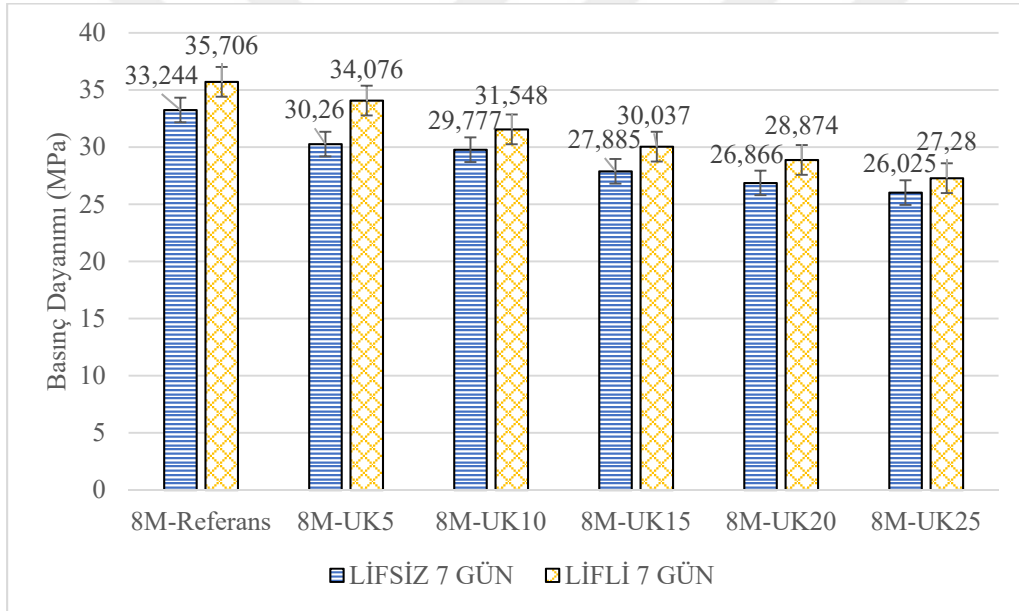
Geopolimer harçlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 7 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

Lif kullanımı ile 7 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 7 günlük basınç dayanımını artırdığı

gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %11,26 oranında 6M UK5 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %10,36 azalma ile lifsiz 6M Referans ile 6M UK5 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %21,08'dir. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %24'tür.



Şekil 4.17. 8M geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Şekil 4.17.'de 7 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 8M sahip geopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.17.'ye göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 8M UK25 harcında 26,025 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M Referans harcında 33,244 MPa olarak elde edilmiştir.

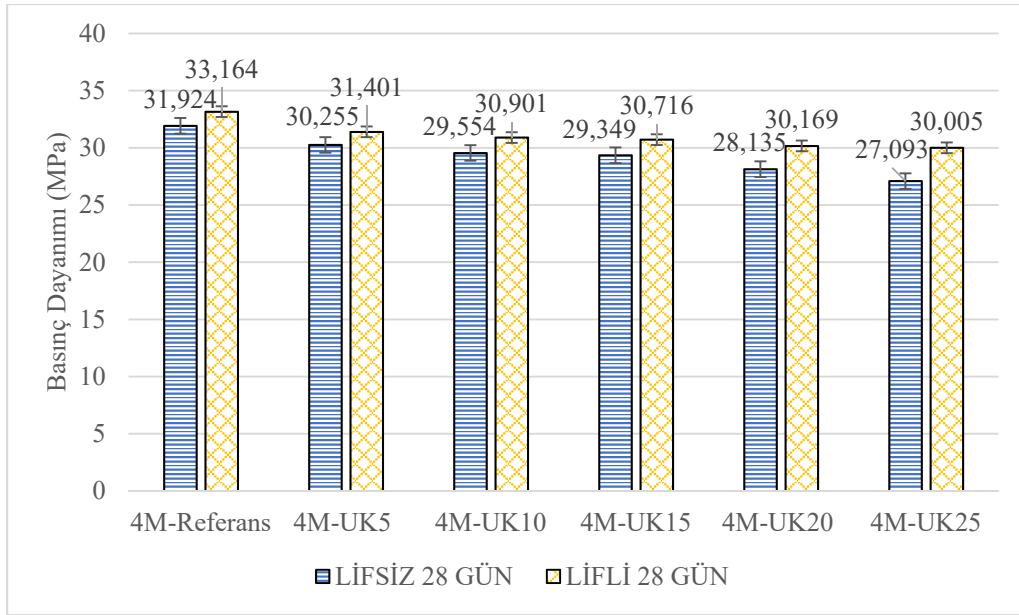
Çizelge 4.5. ve Şekil 4.17.'ye göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 8M L-UK25 harcında 27,28 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M L-Referans harcında 35,706 MPa olarak elde edilmiştir.

Geopolimer harçlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 7 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

Lif kullanımı ile 7 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 7 günlük basınç dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %11,2 oranında 8M UK5 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %8,97 azalma ile lifsiz 8M Referans ile 8M UK5 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %21,71'dir. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %23,6'dır.



Şekil 4.18. 4M geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.3., Çizelge 4.4. ve Şekil 4.18.'de 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 4M sahip geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.18.'e göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 4M UK25 harcında 27,093 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M Referans harcında 31,924 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. ve Şekil 4.18.'e göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 4M L-UK25 harcında 30,005 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 4M L-Referans harcında 33,164 MPa olarak elde edilmiştir.

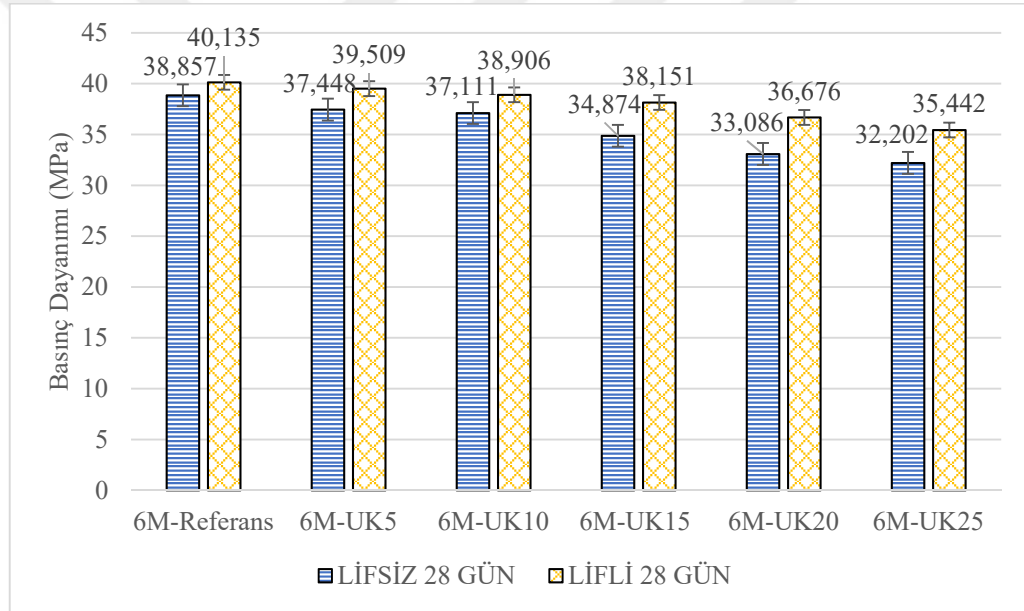
Geopolimer harçlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 28 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

Lif kullanımı ile 28 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 28 günlük basınç dayanımını artırdığı

gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %9,7 oranında 4M UK25 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %5,32 azalma ile lifli 4M L-Referan ile 4M L-UK5 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %15,13'tür. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %9,52'dir.



Şekil 4.19. 6M geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Şekil 4.19.'da 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 6M sahip geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.19.'a göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 6M UK25 harcında 32,202 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M Referans harcında 38,857 MPa olarak elde edilmiştir.

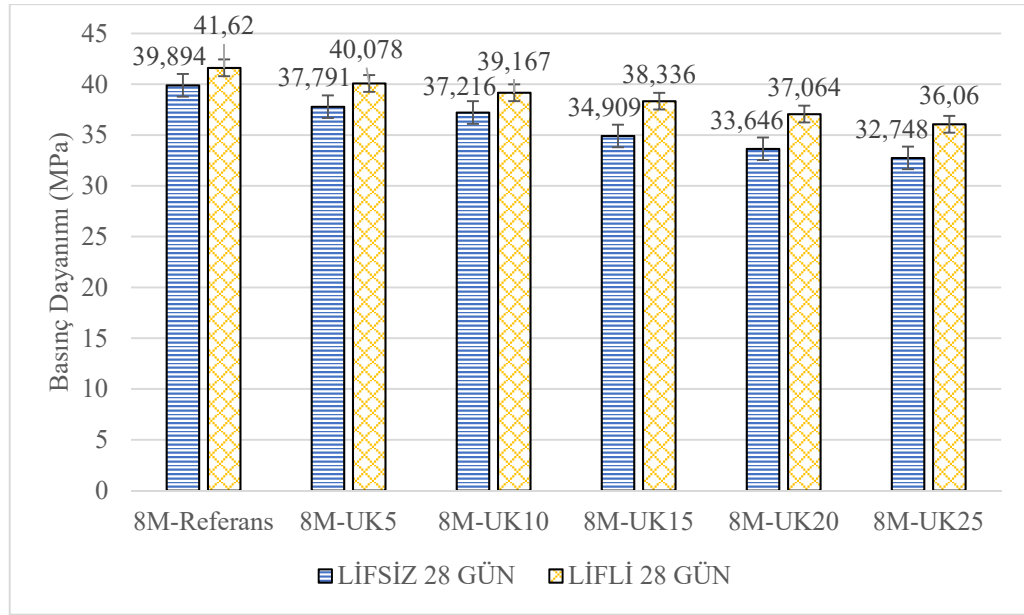
Çizelge 4.5. ve Şekil 4.19.'a göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 6M L-UK25 harcında 35,442 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 6M L-Referans harcında 40,135 MPa olarak elde edilmiştir.

Geopolimer harçlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 28 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

Lif kullanımı ile 28 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 28 günlük basınç dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %9,79 oranında 6M UK20 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %6,02 azalma ile lifsiz 6M-UK10 ile 6M-UK15 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %17,12'dir. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %11,7'dir.



Şekil 4.20. 8M geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları

Çizelge 4.4., Çizelge 4.5. ve Şekil 4.20.'de 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılan lifli ve lifsiz üretilen UK ikameli YFC'li ve 8M sahip geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde;

Çizelge 4.4. ve Şekil 4.20.'ye göre; lifsiz olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 8M UK25 harcında 32,748 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M Referans harcında 39,894 MPa olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. ve Şekil 4.20.'ye göre; lifli olarak üretilen numunelerde elde edilen en düşük basınç dayanımı 8M L-UK25 harcında 36,06 MPa olarak görülmüştür, en yüksek basınç dayanımı referans olarak kabul ettiğimiz %100 YFC ile üretilen 8M L-Referans harcında 41,62 MPa olarak elde edilmiştir.

Geopolimer harçlarda YFC aktivitesinin UK aktivitesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle 28 günlük geopolimer harçlarda YFC'ye UK ikamesinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Hardjito vd., 2004; Rangan, 2008; Wallah ve Rangan, 2006; Lloyd ve Rangan, 2010; Davidovits, 2008).

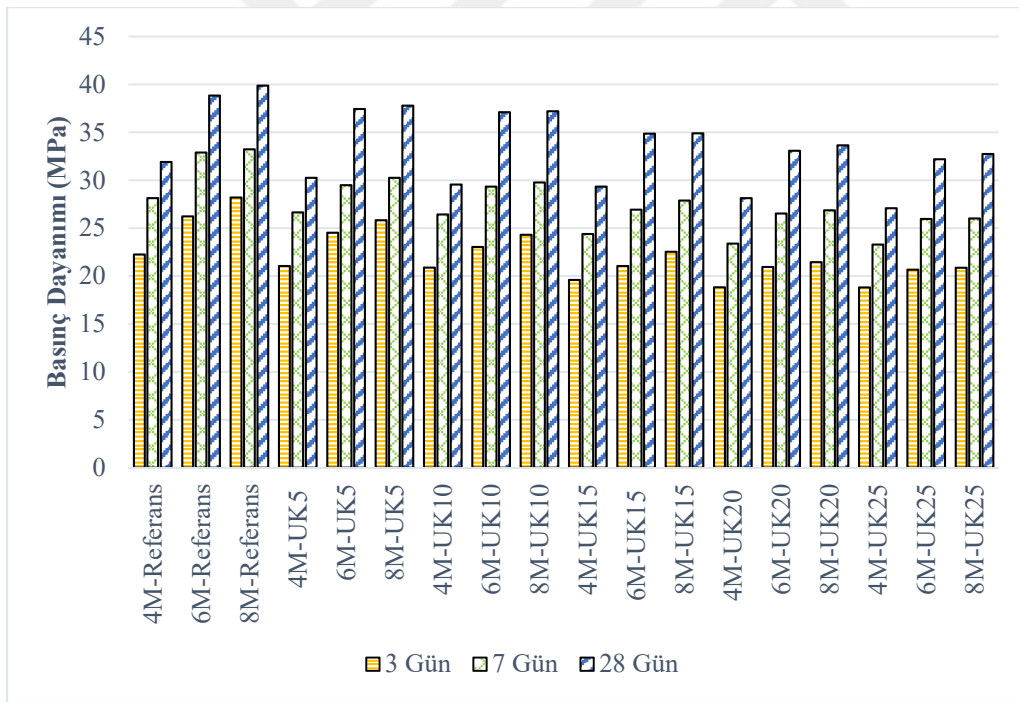
Lif kullanımı ile 28 günlük geopolimer harçların basınç dayanımı özelliğinde olumlu sonuçlar meydana gelmiştir. Lif kullanımının 28 günlük basınç dayanımını artırdığı

gözlemlenmiştir. Bu durum literatürle desteklenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008; Nematollahi vd., 2017; Kurtz ve Balaguru, 2000).

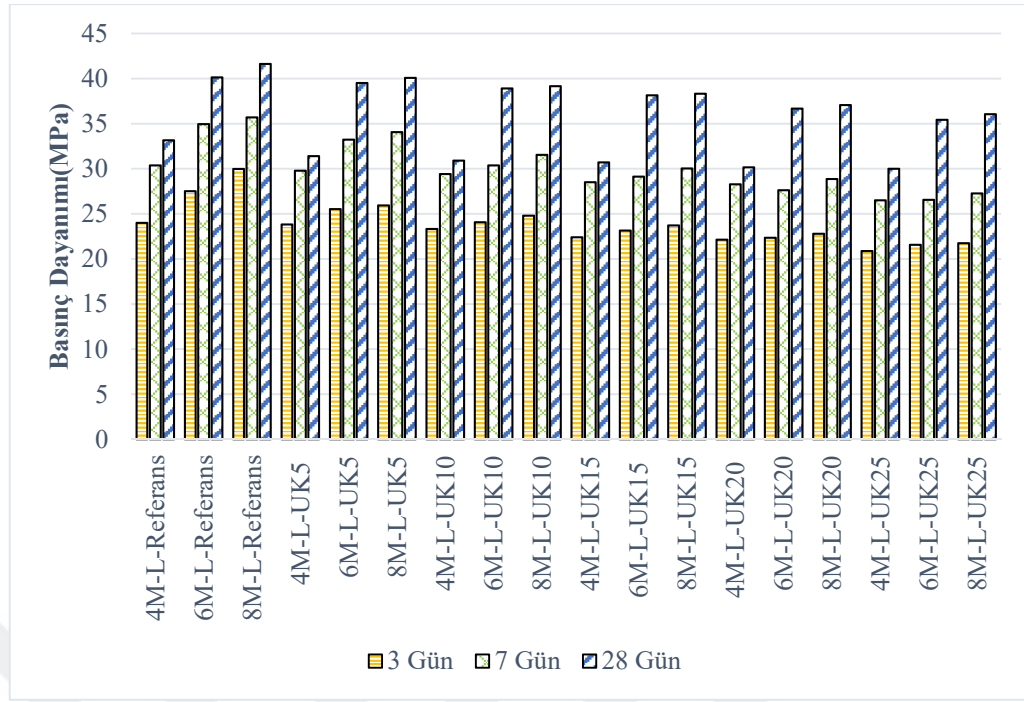
Geopolimer numunelerde lif kullanımı ile yüzdesel olarak en çok dayanım artışı %9,22 oranında 8M UK20 harcında elde edilmiştir.

Geopolimer numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarında en fazla dayanım düşüşü %5,27 azalma ile lifsiz 8M Referans ile 8M UK5 numunesi arasındaki geçişte olmuştur. Her %5 UK ikamesi sonucunda tüm numunelerdeki dayanımlar da azalma meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen bu azalmanın lifsiz harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %17,91'dir. Lifli harçlarda en yüksek basınç dayanımı ile en düşük basınç dayanımı arasındaki azalma oranı %13,36'dır.

Şekil 4.21.'de geopolimer harçların basınç dayanımlarına alkali aktivatör molaritesinin ve kür süresinin etkisi gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.21. Geopolimer harçların basınç dayanımına alkali aktivatör molaritesinin ve kür süresinin etkisi (a) lifsiz, (b) lifli

Şekil 4.21. (a) ve Şekil 4.21. (b)'de UK ikameli YFC'li geopolimer harçlar 3, 7 ve 28 gün 38 ± 5 °C'de ortam kürüne bırakılmıştır. Bu geopolimer harçların basınç dayanımlarına alkali aktivatör molaritesinin ve kür süresinin etkisi incelendiğinde;

Geopolimer harçların basınç dayanımları alkali aktivatör molaritesinin değişmesi ile etkilenebilir. Alkali aktivatör molaritesi arttıkça basınç dayanımının da arttığı gözlemlenmektedir. Bu sonuç literatürle desteklenmektedir. (Duxson vd., 2007; Chindaprasirt vd., 2007; Hardjito vd., 2004).

Chindaprasirt vd., (2007), çalışmalarında NaOH molaritesinin 12 M seviyesine kadar basınç dayanımını artırdığı, ancak 14 M ve üzerindeki molaritelerde dayanımın azaldığı gözlemlenmiştir. Yüksek molaritenin, viskoziteyi artırarak malzeme homojenliğini bozduğu belirtilmiştir (Chindaprasirt vd., 2007).

4, 6 ve 8 aktivatör molaritelerinde üretilen geopolimer harçlarda tüm molaritelerde kür süresi arttıkça dayanımların da olumlu yönde etkilendiği görülmektedir. Kür süresi arttıkça zaman geopolimer harçlarda basınç dayanımını olumlu etkilemesi beklenir. Bu artış geopolimerizasyonun tamamlanması ile bağlantılıdır ayrıca bağlayıcı fazlarının daha iyi gelişmesiyle de alakalıdır. Sonuçlara bakıldığında numunelerin kür süresi

arttıkça her numunenin basınç dayanımında artış meydana geldiği görülmektedir (Hardjito vd., 2004; Chindapasirt vd., 2007).

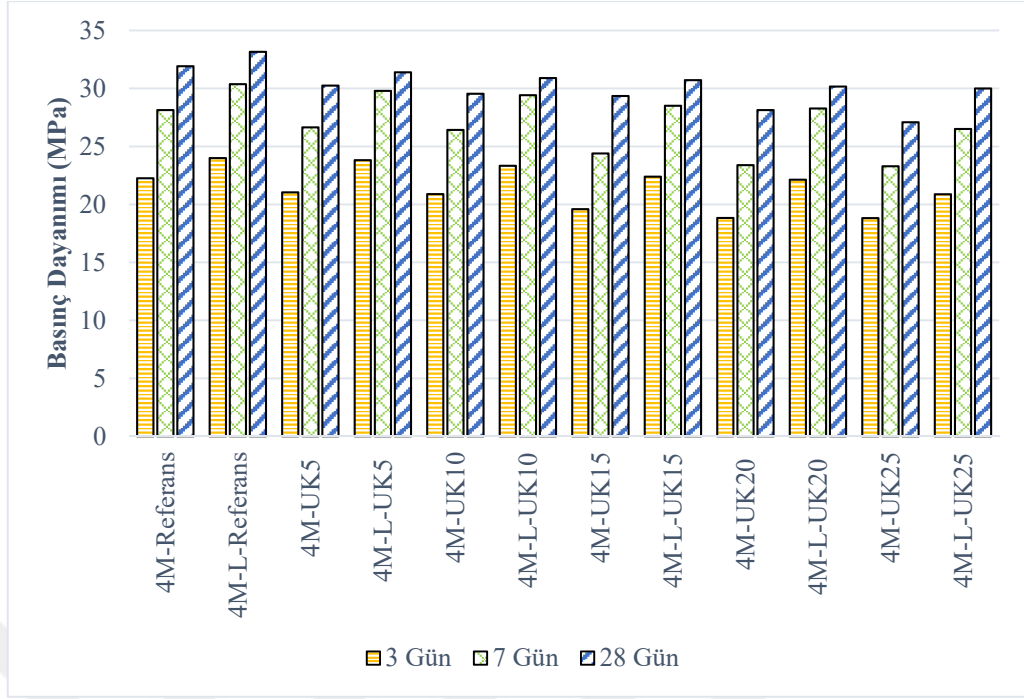
Turner ve Collins (2013), kür süresinin mekanik dayanımla doğrudan bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle ilk 7 güne bakıldığında dayanımda önemli derecede artışlar meydana gelmekte fakat 28 günden sonrasında artışın azaldığını gözlemlemişlerdir.

Pacheco-Torgal vd., (2008), kür süresiyle beraber kür sıcaklığına da vurgu yapmışlardır. Yüksek sıcaklıkta yapılan kür işlemlerinin düşük sıcaklıklara göre daha fazla dayanım artışı kazandırdığını belirtmişlerdir.

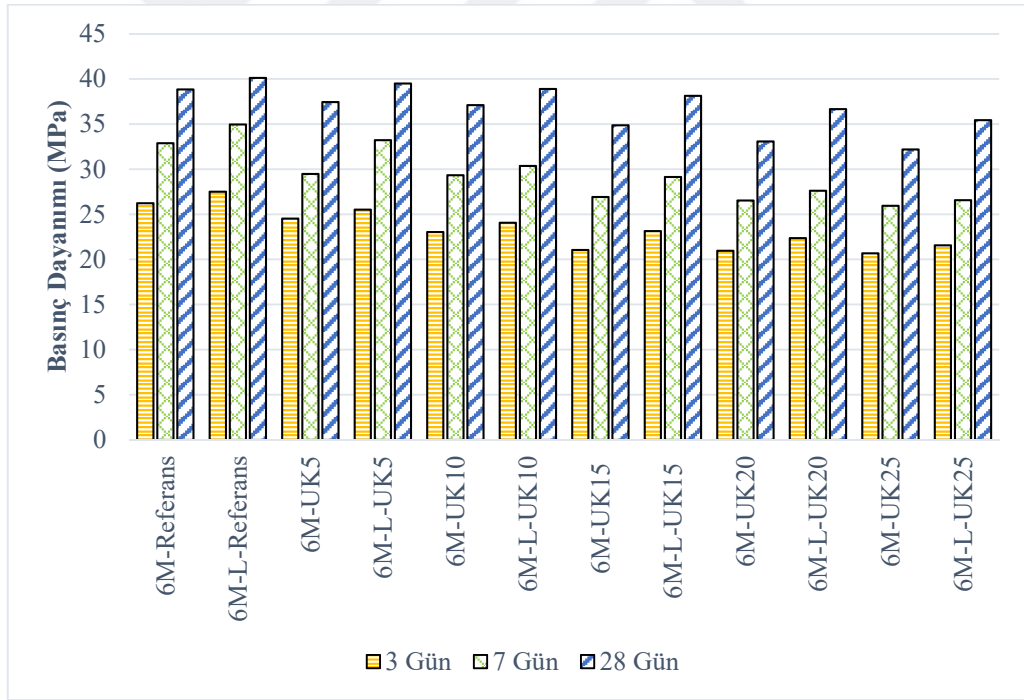
Habert vd., (2011), kür süresinin artışı ve enerji sarfıyatının artmasının dayanımda az da olsa artış sağlayacağını fakat ekonomik olarak olumsuz getirisi olacağını söylemişlerdir.

Daha önce yapılan yukarıdaki çalışmalara ve bu çalışmada bulunan sonuçlara bakılarak alkali aktivatörde molarite artışı basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Aynı zamanda geopolimer harçlarda kür süresinin da basınç dayanımını etkilediği ve kür süresi arttıkça dayanımın arttığı görülmüştür.

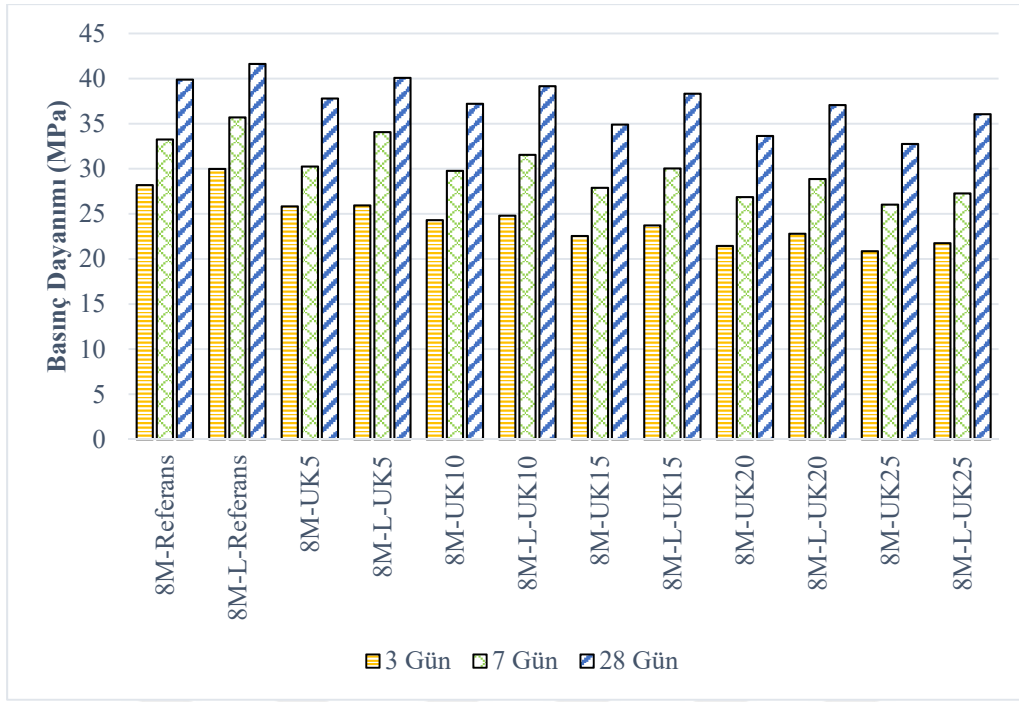
Şekil 4.22’de geopolimer harçların basınç dayanımlarına lif kullanımının etkisi gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.22. Geopolimer harçlarda lif kullanımının basınç dayanımına etkisi (a) 4M, (b) 6M, (c) 8M

Şekil 4.22 (a), Şekil 4.22. (b) ve Şekil 4.22. (c)'de UK ikameli YFC'li geopolimer harçlar 3, 7 ve 28 gün 38 ± 5 °C'de ısı kürüne bırakılmıştır. Bu geopolimer harçların basınç dayanımlarına lif kullanımının etkisi incelendiğinde;

4, 6 ve 8 aktivatör molaritelerinde üretilen geopolimer harçlarda tüm molaritelerde lif kullanımı dayanımların da olumlu yönde etkilendiği görülmektedir.

Geopolimer harçlarda lif katkısının basınç dayanımında olumlu etkiler yarattığı ve dayanımı artırdığı görülmüştür. Bu etkiyi liflerin betonda köprü görevi gördüğü ve çatlak oluşumunu engellediği ihtimalini göz önünde bulundurarak oluşturduğu söylenebilir (Dawood ve Ramli, 2011; Sabu ve Karthi, 2018). En uygun düzeyde lif kullanımı geopolimer betonda basınç dayanımını olumlu şekilde etkilediği ve artırdığı farklı çalışmalarla kanıtlanmıştır (Ranjbar ve Zhang, 2020; Mohseni, 2018; Moradikhrou vd., 2020). Bu sonuçlar literatürle desteklenmektedir.

Zhang vd., (2020), polipropilen liflerin beton içerisinde mikro çatlakları sınırlayarak beton içerisinde yük aktarımını daha iyi seviyeye getirebilmektedir. Eğilme dayanımına doğrudan etki etse basınç dayanımına doğrudan etki etmemektedir. Uygun oranda lif kullanımı beton matrisini yoğunlaştırmaktadır görüşünü bildirmişlerdir.

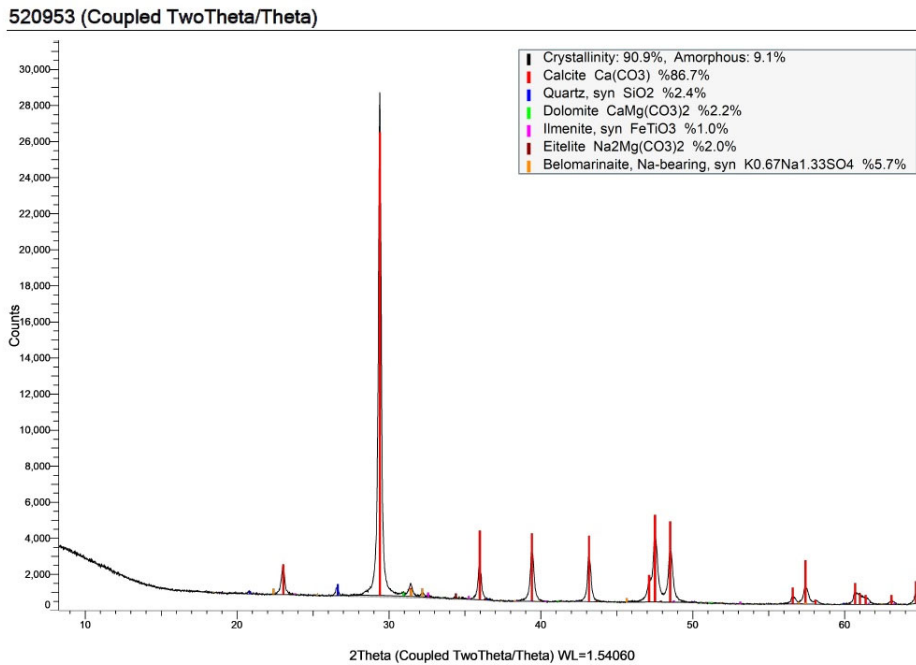
Nematollahi vd., (2017), polipropilen lif katkısının sünekliği artırarak çatlak kontrolüne katkı sağladığı bundan dolayı da basınç dayanımı üzerinde dolaylı da olsa olumlu etki sağladığını söylemişlerdir. Ayrıca lif kullanımının artışında işlenebilirlik azaldığından dolayı basınç dayanımında azalmalar görülebileceğini de belirtmişlerdir.

Kurtz ve Balaguru (2000), liflerin çatlak kontrolünde ortaya çıkan etkisiyle birlikte basınç dayanımı üzerinde olumlu etkilere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

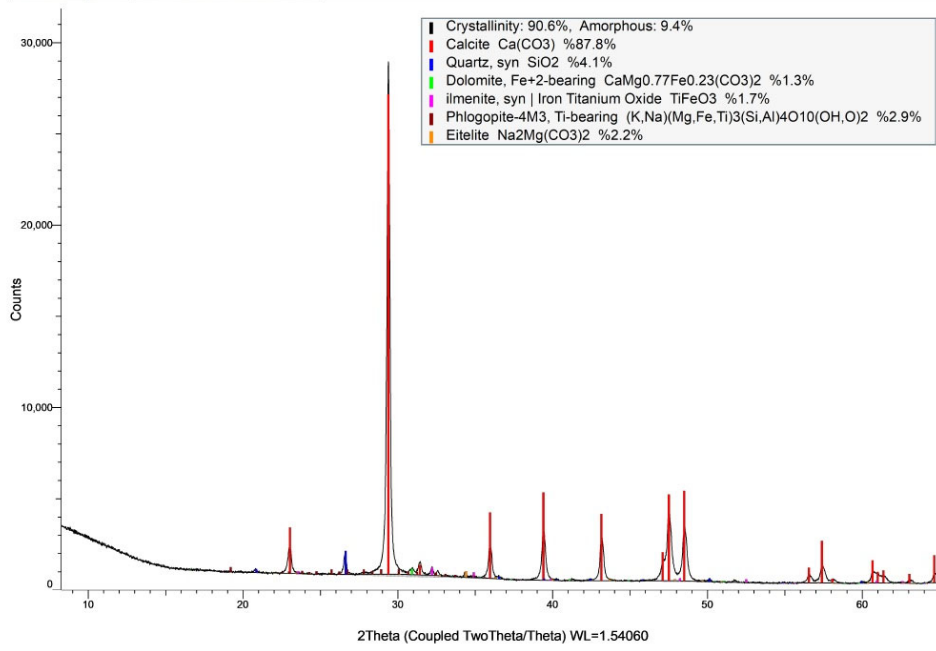
Daha önce yapılan yukarıdaki çalışmalara ve bu çalışmada bulunan sonuçlara bakılarak polipropilen lifler geopolimer betonlarda basınç dayanımına direkt olmasa da dolaylı yoldan olumlu etkilerde bulunmaktadır. Bununla birlikte çatlak kontrolünü sağlayarak betonda yük taşıma potansiyelini artırıp mekanik performansı artırmaktadır.

4.4. Geopolimer Harç Örneklerinin XRD Analiz Sonuçları

28 gün 38 ± 5 °C ortam kürüne bırakılan %100 YFC kullanılan 6M-Referans harcı ve 6M-UK15 harcının bileşenleri Çizelge 4.6.'da ve XRD analiz sonuçları Şekil 4.23. ve Şekil 4.24.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.23. 6M-Referans harcının XRD analiz grafiği



Şekil 4.24. 6M-UK15 harcının XRD analiz grafiği

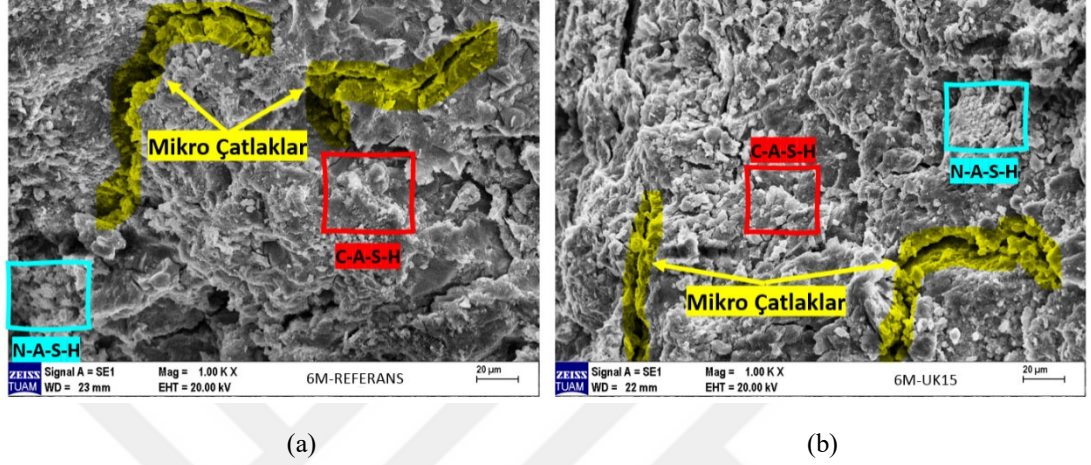
Çizelge 4.6. XRD analizi yapılan geopolimer harçların bileşen değerleri

	6M-Referans	6M-UK15
Kristalinlik (%)	90,9	90,6
Amorf Yapı (%)	9,1	9,4
Fazlar ve Oranlar (%)		
Kalsit (CaCO ₃)	86,7	87,8
Kuvars (SiO ₂)	2,4	4,1
Dolomit (CaMg(CO ₃) ₂)	2,2	1,3
İlmenit (FeTiO ₃)	1	1,7
Eitelit (Na ₂ Mg(CO ₃) ₂)	2	1,7
Belomarinait	5,7	-
Filogopit	-	2,9

Her iki geopolimer harçta yüksek kristalinlik göstermektedir (%90+), bu da harçların oldukça düzenli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Duxson vd., 2007). Kalsit her iki geopolimer harçta da baskın fazdır (%86,7 ve %87,8), bu durum geopolimer harcın kireç bazlı bileşenler içerdiğini işaret etmektedir (Rashad, 2013). Kuvars içeriği, 6M-UK15 harcında (%4,1) 6M-Referans harcına (%2,4) göre daha fazladır, bu da silikat içeriğinin arttığını göstermektedir (Duxson vd., 2007). Dolomit ve ilmenit oranları farklılık göstermektedir, bu da kullanılan hammaddelerin kaynaklarına bağlı olabilir.

4.5. Geopolimer Harç Örneklerinin SEM Görüntüsü ve EDX Analiz Sonuçları

28 gün 38 ± 5 °C ortam kürüne bırakılan %100 YFC kullanılan 6M-Referans harcı ve 6M-UK15 harcının SEM görüntüsü Şekil 4.25., Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.'de ve EDX analiz sonuçları Şekil 4.28. ve Çizelge 4.7.'de gösterilmiştir.



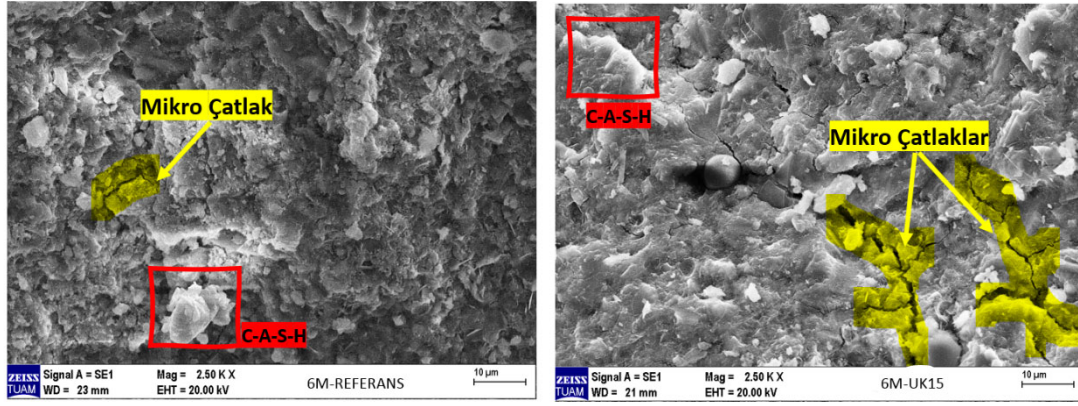
Şekil 4.25. Geopolimer harçların 1000x SEM görüntüleri (a) 6M-Referans (%100 YFC), (b) 6M-UK15

Şekil 4.25.(a) incelendiğinde; yüzeyde görülen pulumsu ve tabakalı yapılar vardır. Bu genel olarak hidratasyon ürünlerinin (C-A-S-H) yoğun şekilde olduğunu gösterir (Provis ve Bernal, 2014). Pulumsu yapıların oluşmasında yüksek miktarda kalsiyum içeren malzeme kullanımı veya puzolanik malzeme kullanımı etkili olabilmektedir (Provis ve Bernal, 2014). Görüntüde belirgin şekilde makro çatlak görülmemektedir. Bu numunenin mekanik olarak dayanıklı olduğunu işaret etmektedir. Fakat yüzeyde çok küçük boyutta mikro gözenekler mevcuttur. Bu numunenin su ve gaz geçirgenliğini etkileyebilir. Bu durumda betonun daha az geçirgen olduğunu ve hemen hemen yoğun bir yapıya sahip olduğunu düşünebiliriz.

Şekil 4.25.(b) incelendiğinde yüzeyde düzensiz, yoğun ve heterojen bir yapı görülmektedir. Pulumsu tabaka dikkat çekmektedir. Pulumsu tabaka genellikle hidratasyon ürünlerinden (C-A-S-H) meydana gelmektedir (Provis ve Bernal, 2014). Pulumsu ve katmanlı yapılar betonun yoğun olduğunu gösterir ve yüksek mekanik dayanım düşük geçirgenlik potansiyeline sahiptir (Provis ve Bernal, 2014). Gözenek yapısı merkezde ve bazı bölgelerde yuvarlak ve düzensiz boşluklar olarak görülmektedir. Bu gözenekler hidratasyon sürecinden kaynaklı hava boşlukları

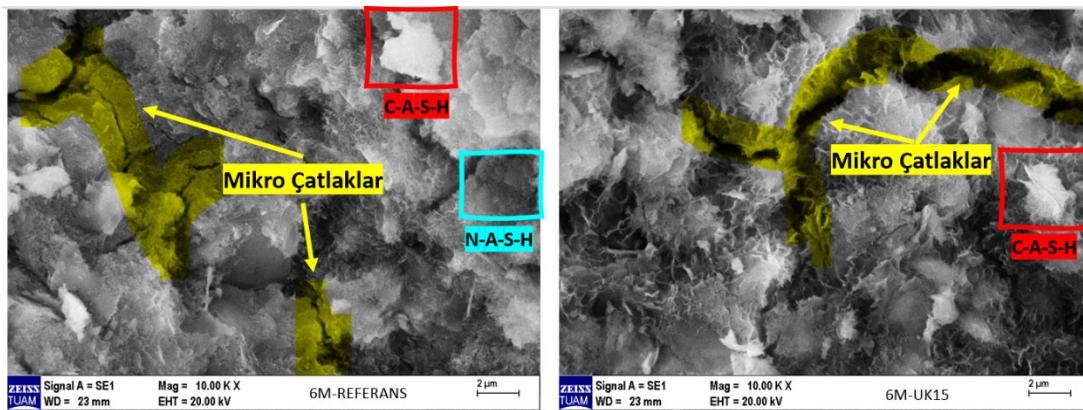
olabilir. Bu mikro gözenekler kapalı por olarak tanımlanabilir. Betondaki yoğun yapıya rağmen bu boşluklar su geçirgenliğinde etkili olabilir.

Geopolimer harçların Şekil 4.26.'da 2500x, Şekil 4.27.'de 10000x SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.26. Geopolimer harçların 2500x SEM görüntüsü

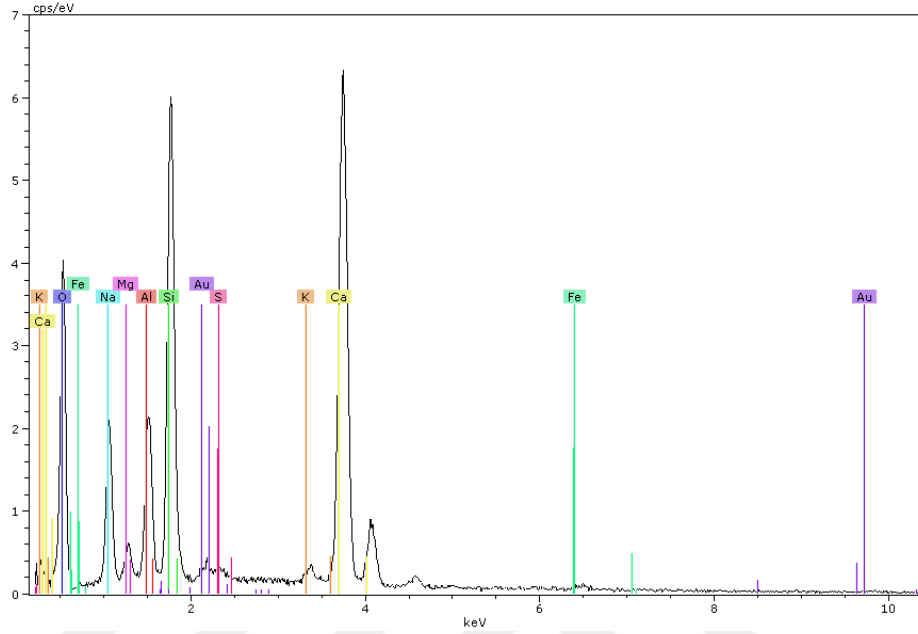
Şekil 4.26. incelendiğinde her iki geopolimer harçta da C-A-S-H ve mikro çatlaklar görülmektedir. Ayrıca 6M-UK15 numunesinde küresel formda UK görülmektedir. Oluşan C-A-S-H uçucu kül ve cürufun alkali aktivatörle reaksiyona girmesi sonucunda oluşmaktadır (Provis ve Bernal, 2014). C-A-S-H mekanik dayanımı artırdığı ve kimyasal dayanımı güçlendirdiği görülmüştür (Van Devender, vd., 2012). Mikro çatlakların 6M-UK15 harcında daha fazla olduğu görülmektedir. Mikro çatlakların artması dayanımda düşüşe sebep olmaktadır (Provis ve Bernal, 2014).



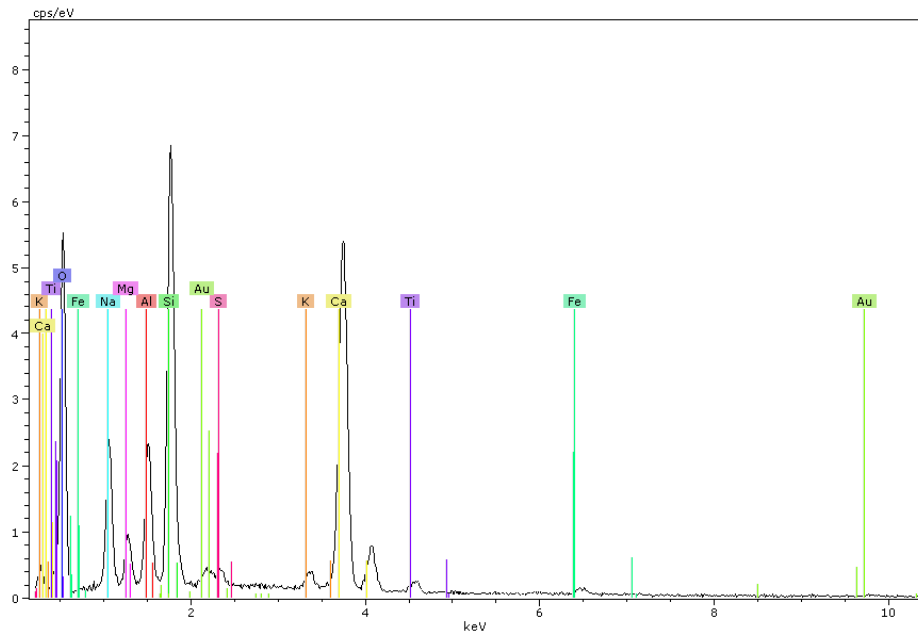
Şekil 4.27. Geopolimer harçların 10000x SEM görüntüsü

Şekil 4.27. incelendiğinde harçlarda C-A-S-H, N-A-S-H, mikro çatlaklar ve boşluk alanlar görülmektedir. C-A-S-H oluşumu alkali aktivatör ile cüruf ve uçucu külün reaksiyonuyla oluşmaktadır (Provis ve Bernal, 2014). N-A-S-H fazı

geopolimerizasyonun temel bağlayıcı ürünü olarak görülmektedir (Davidovits, 2008). 6M-UK15 harcında boşluk alanların fazla olduğu görülmektedir, bu da dayanımda olumsuz etkilere sebep olmaktadır (Provis ve Bernal, 2014). Dayanım sonuçları incelendiğinde meydana gelen sonuçları literatür desteklemektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.28. EDX grafiği (a) 6M-Referans, (b) 6M-UK15

EDX analizi yapılan geopolimer harçların oksit miktarları Çizelge 4.7.'de verilmiştir. Hidratasyon ürünlerinin temelini oluşturan C-A-S-H genel olarak Ca, O, Si ve Al içeriğinden oluşur. Geopolimer harçların bünyesinde Si oranının artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi YFC bağlayıcısından gelen Si miktarıdır. Çizelge 4.7. EDX analizi yapılan geopolimer harçların yüzde cinsinden oksit miktarları, basınç dayanımları, Si/Al ve Na/Al oranı verilerini içermektedir.

Çizelge 4.7. EDX analizi yapılan geopolimer harçların oksit miktarları

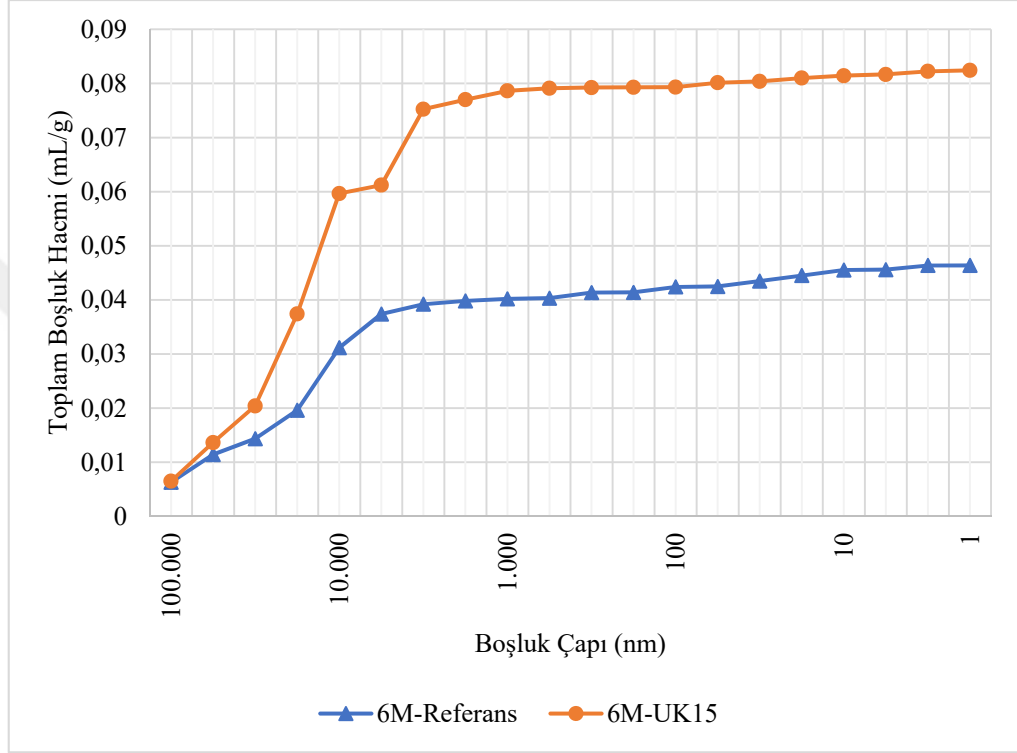
Numune Adı	Molarite (M)	Kür Süresi (Gün)	Kür Sıcaklığı (°C)	(%) Oksit İçeriği					Basınç Dayanımı (MPa)	Si/Al Oranı	Na/Al Oranı
				Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO			
6M-Referans	6	28	38±5°C	12,46	11,45	35,29	0,76	36,42	38,857	3,08	1,08
6M-UK15	6	28	38±5°C	10,44	10	33,14	1,11	33,32	34,874	3,31	1,04

Çizelge 4.7. incelendiğinde geopolimer harç örneklerinin oksit miktarları birbirine yakın olsa da basınç dayanımlarında fark oluşmuştur. 38±5 °C'de ortam kürü uygulanan 6M-Referans geopolimer harcının, 38±5 °C'de ortam kürü uygulanan 6M-UK15 geopolimer harcına göre basınç dayanımını daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi harç içeriğinde ki YFC miktarından kaynaklanmaktadır (Korkmaz, 2024). Cürufun içeriğinde bulunan kalsiyum oksitin (CaO) jele benzer bir yapıda reaksiyonlara girerek betonun bağlanma özelliklerini iyileştirmesidir. Ayrıca, cürufun kullanımı betonun erken dayanım kazanmasını ve uzun vadeli dayanım değerlerinin artmasını sağlar. Bununla birlikte, cürufun alkalilerle aktive edilmesi, reaksiyon mekanizmasını hızlandırarak basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etki yaratır (Shi, Krivenko ve Roy, 2006; Roy ve Idorn, 1982).

Bakharev, (2005), cürufu geopolimerlere ısı kürü uygulandığında mekanik dayanımlarında iyileştirmeler sağladığı aynı zamanda da uzun vadeli dayanım artışı sağladığı belirtilmiştir. Kumar vd., (2010), cürufun geopolimerlerde basınç dayanımını artıran etkileri üzerinde durmuşlardır. Cürufun özellikle geopolimerlerde erken dayanımı üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Bernal vd., (2011), yüksek fırın cürufunun geopolimerlerde dayanımını yükselten etkileri ve çevreye yönelik faydaları üzerinde durulmuştur.

4.6. Geopolimer Harç Örneklerinin Cıvalı Porozimetre Analiz Sonuçları

Cıvalı porozimetre deneyi ile örneklerin toplam boşluk hacmi ve boşluk çapları belirlenmiştir. Harçlar üzerinde yapılan analizlere bakıldığında, toplam boşluk hacmi fazla olan örneklerin basınç dayanımlarının düşük olduğu tespit edilmiştir (Korkmaz, 2024).



Şekil 4.29. Geopolimer harç örneklerinin cıvalı porozimetre analizleri

Şekil 4.29. incelendiğinde %100 YFC kullanılan 6M-Referans geopolimer harcında en büyük boşluk çapı 96.560,122 nm, en küçük boşluk çapı 1,0607 nm'dir. 6M-UK15 geopolimer harcında en büyük boşluk çapı 96.940,483 nm, en küçük boşluk çapı 1,0648 nm'dir.

Çizelge 4.8. Referans örneklerin cıvalı porozimetre analiz sonuçları

Numune Adı	Boşluk Çapı (nm)		Cıva Yoğunluğu (g/cc)	Porozite (%)	Basınç Dayanımı (MPa)
	En büyük	En küçük			
6M-Referans	96.560,122	1,0607	13,5	4,0272	38,857
6M-UK15	96.940,483	1,0648	13,5	8,2930	34,874

Porozimetre deneyinde ki referans örneklerin de boşluk oranı arttıkça basınç dayanımında azalma meydana geldiği görülmüştür. 38±5 °C'de ortam kürü uygulanan

6M-Referans geopolimer harcın basınç dayanımı 38,857 MPa elde edilirken, 38±5 °C’de ortam kürü uygulanan 6M-UK15 geopolimer harcın basınç dayanımı 34,874 MPa elde edilmiştir. Geopolimer harç örneklerinde UK oranı az, YFC oranı fazla olan harçta dayanım daha fazla çıkmıştır (Korkmaz, 2024). Geopolimer betonun boşluk oranı, karışımda kullanılan su/alkali aktivatör oranı, kür koşulları, malzeme oranları ve üretim sırasında oluşan gazların beton içinde hapsolması gibi faktörlerden etkilenir (Provis ve Van Deventer, 2014; Hardjito ve Rangan 2005). Referans olan geopolimer harçlarda UK ikamesi arttıkça geopolimer harçta boşluk oranının arttığı sonucuna varılmıştır. Hardjito ve Rangan, (2005), yaptıkları çalışmada uçucu kül bağlayıcılı geopolimerlerde boşluk oranı ve dayanım arasındaki ilişkiyi incelenmiştir. Boşluk oranında artış oldukça dayanımda düşüşler meydana geldiği görülmüştür. Provis ve Van Deventer, (2014), geopolimer malzemelerde mikro yapı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi detaylı bir şekilde incelemiştir. Boşlukların mekanik dayanımı olumsuz etkilediğini vurgulamıştır. Hanjitsuwan vd., (2014), boşluk oranının beton dayanımı üzerindeki etkileri ve bu boşluk oranını düşürme yöntemleri üzerinde durulmuştur.

5.SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada lifli ve lifsiz şekilde yüksek fırın cürufu bağlayıcılı uçucu kül ikameli üç farklı molaritede (4, 6 ve 8) geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen geopolimer harçlar üzerinde yayılma deneyi, eğilme ve basınç dayanımı testleri, XRD, SEM+EDX ve civalı porozimetre deneyleri uygulanmıştır. 38 ± 5 °C ortam kürü uygulanarak ve farklı NaOH molariteleri kullanılarak önce lifsiz olarak daha sonra lifli olarak yüksek fırın cürufuna farklı oranlarda uçucu kül ikame edilerek geopolimer harçlar üretilmiştir. Sonrasında 3, 7 ve 28 günlerde geopolimer harçlara TS EN 196-1'e uygun şekilde eğilme dayanımı testi uygulanmış ve ardından basınç dayanımı testi uygulanmıştır. 28 günlük harçlara XRD, SEM+EDX ve civalı porozimetre deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda ortam küründe farklı aktivatör molaritesi kullanımının, geopolimer harçta lif kullanımının ve harçlarda kullanılan farklı bağlayıcı miktarlarının geopolimer harç dayanımına etkileri incelenmiş aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- Üretilen geopolimer harçlarda NaOH molaritesi artmasıyla numunelerin eğilme ve basınç dayanımları artmıştır.
- Geopolimer harçlarda kür süresi arttıkça numunelerin eğilme ve basınç dayanımları artmıştır.
- UK ikameli YFC'li geopolimer harçlarda en iyi eğilme ve basınç dayanımını sağlayan NaOH molaritesi 8M olarak tespit edilmiştir.
- Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçlara uçucu kül ikame oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir.
- Geopolimer harçların dayanımlarında %10 ve %15 uçucu kül ikamesi sonrasında daha belirgin düşüşler meydana geldiği görülmüştür.
- Polipropilen lif katkısı kullanılan geopolimer harç dayanımları lifsiz üretilen geopolimer harç dayanımlarına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Lite

- 4M geopolimer harçlarda en yüksek eğilme dayanımına 28 günlük 4M-L-Referans (5,314 MPa) harcında, en yüksek basınç dayanımına 28 günlük 4M-L-Referans (33,164MPa) harcında elde edilmiştir.
- 6M geopolimer harçlarda en yüksek eğilme dayanımına 28 günlük 6M-L-Referans (6,621 MPa) harcında, en yüksek basınç dayanımına 28 günlük 6M-L-Referans (40,135 MPa) harcında elde edilmiştir.
- 8M geopolimer harçlarda en yüksek eğilme dayanımına 28 günlük 8M-L-Referans (7,23 MPa) harcında, en yüksek basınç dayanımına 28 günlük 8M-L-Referans (41,62 MPa) harcında elde edilmiştir.
- 4M geopolimer harçlarda en düşük eğilme dayanımına 3 günlük 4M-UK25 (2,596 MPa) harcında, en düşük basınç dayanımına 3 günlük 4M-UK25 (18,822 MPa) harcında elde edilmiştir.
- 6M geopolimer harçlarda en düşük eğilme dayanımına 3 günlük 6M-UK25 (3,523 MPa) harcında, en düşük basınç dayanımına 3 günlük 6M-UK25 (20,678 MPa) harcında elde edilmiştir.
- 8M geopolimer harçlarda en düşük eğilme dayanımına 3 günlük 8M-UK25 (4,627 MPa) harcında, en düşük basınç dayanımına 3 günlük 8M-UK25 (20,872 MPa) harcında elde edilmiştir.
- SEM+EDX analizlerinde geopolimer harçlarda uçucu kül ikamesiyle CaO azalmıştır. Bundan dolayı C-A-S-H jellerinde azalma meydana gelmiştir Bu geopolimer harçların basınç dayanımında düşüşe neden olmuştur.
- Civalı porozimetre analizlerinde yüksek fırın cürufu bağlayıcılı geopolimer harçlarda uçucu kül ikamesi arttıkça boşluk oranı artmıştır. Bunun sonucunda basınç dayanımında düşüş meydana gelmiştir.

Bu sonuçlar doğrultusunda NaOH molaritesinin geopolimer harçların dayanımı üzerinde önemli derecede etkisi olduğu net şekilde görülmüştür. 8M NaOH en iyi sonuçları vermiştir. Gelecekteki yeni araştırmalar için Na_2SiO_3 veya KOH gibi farklı alkali aktivatörler kullanılarak etkisi incelenebilir.

Yüksek oranda UK ikamesi eğilme ve basınç dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Özellikle %10-15 ikamelerde ki sınırlar üzerinde durulmalıdır. YFC aktivitesine daha uygun oranlar belirlenip ikame edilmeli ve metakaolin, nano-silika tarzı malzemelerle kombinlenerek değerlendirilebilir. Bununla birlikte C sınıfı UK ikamesi kullanılarak etkileri değerlendirilebilir.

Polipropilen lifin dayanımlarda artış sağladığı görülmüştür. Daha sonra yapılacak çalışmalarda farklı tip lifler kullanarak çelik, karbon ya da hibrit lif gibi türler betondaki mekanik özellikler ayrıntılı incelenebilir.

Geopolimerlerin çevresel sürdürülebilirliği ve ekonomik uygulanabilirliği göz önüne alındığında karbon ayak izini azaltan çevre dostu bir yapı malzemesi olduğu görülmektedir. Aynı zamanda atık malzemeleri de kullanarak çevre kirliliğini azaltma hedefleri olan bir malzemedir. Gelecekte yapılan çalışmalarda karbon ayak izini sıfıra indirebilmek için çalışmalarda YFC ve UK gibi daha fazla atık malzeme kullanımı olmalıdır. Bu olumlu özelliklerini dikkate aldığımızda ve bununla birlikte dayanımlı bir yapı malzemesi olması sebebiyle geopolimerler hayatımıza entegre etmemiz gereken aynı zamanda sürekli geliştirilmesi gereken bir konu olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adak, D., Sarkar, M. ve Mandal, S. (2017). Structural performance of nano-silica modified flyash based geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 135, 430–439.
- Alakara, E. H., Sevim, Ö., Demir, İ. ve Günel, G. (2022). Effect of waste concrete powder on slag-based sustainable geopolymer composite mortars. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 13(3), 101–106.
- Al-Bakri, Kamarudin, H., Binhussain, M. ve Nizar, K. (2011). Mechanism and chemical reaction of fly ash geopolymer cement- a review. *Journal of Asian Scientific Resarch*, 1(5), pp.247-253.
- Aldred, J. ve Day, J. (2012, August). Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete. In *Proceedings of the 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore* pp. 29-31.
- Al-mashhadani, M. M., Canpolat, O., Uysal, M. ve Aygormez, Y. (2018). Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, Cilt 167, pp. 505-513.
- Aruntaş, H. (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniveristesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, 1.
- ASTM C 39/C 39M-04a, (2004). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, American Standard Test Method, West Conshohocken, Penn, USA.
- ASTM C618 (2003). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- Aswani, E. ve Karthi, L. (2017). A literature review on fiber reinforced geopolymer concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(2), 408-411.
- Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M. M. ve Uysal, M. (2020a). Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 235.
- Bakharev, T. (2005). Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1224-1232.
- Bakharev, T. (2005c). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cem. Concr. Res.* 35 (4), 658-670.
- Banthia, N. ve Nandakumar, N. (2003). Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 3-9.
- Bernal, S. A., Provis, J. L. ve Rose, V. (2011). Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(4), 1031-1048.
- Bhalchandra, S. A. ve Bhosle, A. Y. (2013). Properties of glass fibre reinforced geopolymer concrete, 3, 2007–2010.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S. ve Çapar, Ö. (2010). Yüksek fırın cürufunun inşaat sektöründeki yeri ve önemi.2. *Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi, 1*, 506- 513. Mersin.
- Bleszynski, R., Hooton, R. D., Thomas, M. D. ve Rogers, C. A. (2002). Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag: laboratory and outdoor exposure site studies. *Materials Journal*, 99(5), 499-508.

- Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y. ve Taylor, C. (2016). Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 878–886.
- Chandra Padmakar, K. ve Sarath Chandra Kumar, B. (2017). An experimental study on metakaolin and GGBS based geopolymer concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(1), 544–557.
- Chi, M. (2012). Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, Cilt 35, pp. 240-245.
- Chindaprasirt, P., De Silva, P. ve Sagoe-Crentsil, K. (2007). Effect of curing conditions on the properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 21(3), 125-131.
- Collins, F. G. ve Sanjayan, J. G. (2001). Early age strength and durability of geopolymer concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 323-331.
- Cook, DJ. Hinczak, I. ve Cao, HT. (1987). ‘‘Heat of hydration, strength, and morphological development in blast-furnace/cement blends’’ *International Workshop on Granulated Blast-Furnace Slag in Concrete*, Toronto, Canada.
- Davidovits, J. (1972). *Process for manufacturing dense shaped articles from alumino-silicate and alkali metal silicate mixtures: French patent FR2305831A1*. French Patent Office.
- Davidovits, J. (1976). Geopolymer chemistry and properties: Terminology, applications, and potential. *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer Chemistry and Applications*, 19-21.
- Davidovits, J. (2011). Geopolymer composites for motorsport applications. *Geopolymer Institute Journal*, 34, 12-18.
- Davidovits, J. (1989). Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis*, 35(2), 429-441.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. *In First international conference on alkaline cements and concretes* (Vol. 1, pp. 131-149). Kiev, Ukraine: Kiev State Technical University.
- Davidovits, J. (2006.). Fire proof, heat resistant composites.
- Dawood, E. T. ve Ramli, M. (2011). Contribution of hybrid fibers on the properties of high strength concrete having high workability. *Procedia Engineering*, 14, 814-820.
- Ding, Y., Dai, J.-G. ve Shi, C.-J. (2016). Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, Cilt 127, pp. 68-79.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C. ve Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. *Cement and concrete research*, 37(12), 1590-1597.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2019). *Türkiye Kömür Sektörü Raporu*.
- Engin, Y. (2015). Yüksek Fırın Cüruflu Çimento Üretimi Özellikleri ve Etkisi, www.betonvecimento.com.
- Erguvanlı, K. Yılmaz, İ. (1980). *Türkiye’nin Jeolojik Yapısı ve Mineralleri*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları.

- Europäischer Baustoff-Recycling Verband (2013). *Steel Slag: Properties and Applications*.
- Fernández-Jiménez, A. ve Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1984-1992.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E. ve Özbay, E. (2009). Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and building materials*, 23(5), 1847-1854.
- Glushkovsky, V. D. (1965). *Investigation of ancient Roman and Egyptian construction materials*. Historical Construction Materials Journal, 7(3), 200-215.
- Görhan, G. ve Kürklü, G. (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B*. 58, 371-377.
- Gürbüz, H. ve Durmuş, A. (2017). Uçucu külün oluşumu ve kullanımı. *Çimento ve Beton Dünyası Dergisi*, 11(3), 112-125.
- Habert, G., D'Espinose de Lacaillerie, J. B., Lanta, E. ve Roussel, N. (2010). Environmental evaluation for cement substitution with geopolymers. In *Proceedings of the 2nd international conference on sustainable construction materials and technologies* (pp. 1607-1615).
- Habert, G., De Lacaillerie, J. D. E. ve Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of cleaner production*, 19(11), 1229-1238.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V. ve Chindapasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. *Cement and Concrete Composites*, 45, 9-14.
- Hanjitsuwan, S., Sata, V. ve Chindapasirt, P. (2014). Strength, permeability, and heat evolution of high calcium fly ash geopolymer concrete containing Portland cement as additive. *Construction and Building Materials*, 72, 241-247.
- Hardjito, D. ve Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. ve Rangan, B. V., (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y. ve Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cem. Concr. Compos.* 37, 108-118.
- J. Davidovits, (2008). *Geopolymer. Chemistry and Applications*, Ed, Institut Geopolymere, *Saint-Quentin, France*, ISBN-10: 2-9514820-3-5.
- Jha, A. K., Adhikari, S., Thapa, S., Kumar, A., Kumar, A. ve Mishra, S. (2020). Evaluation of factors affecting compressive strength of concrete using machine learning. In *2020 Advanced Computing and Communication Technologies for High Performance Applications (ACCTHPA)* (pp. 70-74). IEEE.
- Joseph, B. (2015). *Behaviour of geopolymer concrete exposed to elevated temperatures doctor of philosophy*. August.
- Joseph, B. ve Mathew, G. (2012). Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Cilt 19(5). Scientia Iranica*.

- Kantarcı, F. (2018). Nano silis, mikro silis ve polimer katkıları içeren volkanik tüf esaslı geopolimer beton üretimi ve özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi. *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya.
- Keerthy, V. ve Kumar, Y. H. (2017). Experimental studies on properties of geopolimer concrete with GGBS and fly ash. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(1), 602–609.
- Keklik, U. (2020). Silis dumanı içeren geopolimer betonların% 5 sülfürik asit etkisinde durabilite performanslarının incelenmesi. Master's thesis, *İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Korkmaz, S. (2024). Hibrit yüksek fırın cürufu ve toz perlit bağlayıcılı hafif geopolimer kompozitlerde manyetize suyun etkisi. Doktora Tezi. *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale.
- Krivenko, P. D. (1994). “Alkaline cements” *Paper presented at the first international conference on alkaline cements and concrete*, Kiev, Ukraine, 1114 October.
- Krivenko, P. V. (1997). Durability of geopolymers in construction applications. *Materials Science Journal*, 20(4), 215-225.
- Kumar, S., Kumar, R. ve Mehrotra, S. P. (2010). Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolimer. *J. Mater. Sci.*, Cilt 45, pp. 605-615.
- Kurtz, S. ve Balaguru, P. (2000). Comparison of inorganic and organic matrices for strengthening of RC beams with carbon sheets. *Journal of Structural Engineering*, 126(1), 7-16.
- Lee, N. K. ve Lee, H. K. (2013). Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials*, Cilt 47, pp. 1201-1209.
- Li, C., Sun, H. ve Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. *Cement and concrete research*, 40(9), 1341-1349.
- Li, G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cem. Concr. Res.* 34(6), 1043-1049.
- Lloyd, N. ve Rangan, V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. In *Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies* (pp. 1493-1504). UWM Center for By-Products Utilization.
- Lloyd, R. R., Provis, J. L. ve van Deventer, J. S. J. (2009). Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. 1: remnant fly ash particles. *J. Mater. Sci.*, Cilt 44, pp. 608-619.
- Ma, Y., Zhu, B. ve Tan, M. (2005). Properties of ceramic fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 296–300.
- Malhotra, V. M. ve Mehta, P. K. (1996). “Pozzolanic and Cementitious Materials, Gordon and Breach publishers, advances in concrete” technology, ISSN1024-5038.
- Malhotra, V. M. (1993). Fly ash, slag, silica fume, and rice husk ash in concrete: A review. *Concrete International*, 15(4), 23-28.
- Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International*, 23(10), 61-66.
- Mehta, P. K. ve Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

- Millard, S. G., Molyneaux, T. C. K., Barnett, S. J. ve Gao, X. (2010). Dynamic enhancement of blast-resistant ultra high performance fibre-reinforced concrete under flexural and shear loading. *International Journal of Impact Engineering*, 37(4), 405–413.
- Mohseni, E. (2018). Assessment of Na₂SiO₃ to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 186, 904-911.
- Moradikhou, A.B., Esparham, A. ve Avanaki, M.J. (2020). Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 25,118965.
- Murali, K., Meena, T., Sai, P. P. ve Chaitanya, S. T. (2018). An experimental study on factors influencing the compressive strength of geopolymer mortar. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9, 608-616.
- Nath, P. ve Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building materials*, 66, 163-171.
- Nath, P., Sarker, P. K. (2017a). Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(1), 1–12.
- Nazari, A., Bagheri, A., Sanjayan, J. G., Dao, M., Mallawa, C., Zannis, P. ve Zumbo, S. (2019). Thermal shock reactions of ordinary portland cement and geopolymer concrete: Microstructural and mechanical investigation. *Construction and Building Materials*, 196, 492-498.
- Nedunuri, S. S. S. A., Sertse, S. G. ve Muhammad, S. (2020). Microstructural study of portland cement partially replaced with fly ash, ground granulated blast furnace slag and silica fume as determined by pozzolanic activity. *Construction and Building Materials*, 238, 117561.
- Nematollahi, B., Sanjayan, J. ve Shaikh, F. U. A. (2017). Tensile properties of strain hardening geopolymer composites using different methods of curing. *Construction and Building Materials*, 131, 260-267.
- Nili, M. ve Afroughsabet, V. (2010). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 927–933.
- Nodehi, M. ve Taghvaei, V. M. (2022). Alkali-activated materials and geopolymer: A review of common precursors and activators addressing circular economy. *Circular Economy and Sustainability*, 2(1), 165-196.
- Olivia, M. ve Nikraz, H. (2011). Strength and water penetrability of fly ash geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials and Structures*, 44(5), 1015-1025.
- Olivia, M. ve Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design* (1980-2015), 36, 191-198.
- Ozturk, M., Sevim, U. K., Akgol, O., Unal, E. ve Karaaslan, M. (2020). Investigation of the mechanic, electromagnetic characteristics and shielding effectiveness of concrete with boron ores and boron containing wastes. *Construction and Building Materials*, 252, 119058.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. ve Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and building Materials*, 22(7), 1305-1314.

- Palomo, A., Grutzeck, M. W. ve Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.
- Palomo, A., Krivenko, P. ve Garcia-Lodeiro, I. (2011). Alkali-activated materials: alternative cements for a sustainable world. *Proceedings of the International Workshop on Alkali Activated Materials*.
- Part, W. K., Ramli, M. ve Cheah, C. B. (2015). An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 77, 370-395.
- Pasupathy, K., Berndt, M., Sanjayan, J., Rajeev, P. ve Cheema, D. S. (2018). Durability performance of precast fly ash-based geopolymer concrete under atmospheric exposure conditions. *Journal of materials in Civil Engineering*, 30(3), 04018007.
- Polder, R. B. (1996). The influence of blast furnace slag, fly ash and silica fume on corrosion of reinforced concrete in marine environment. *HERON-ENGLISH EDITION*-, 41, 287-300.
- Provis, J. L. ve Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- Provis, J. L. ve Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM*. Springer.
- Purdon, A. O. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59(9), 191-202. <https://doi.org/10.1002/jctb.5000590903>
- Rajarajeswari, A. ve Dhinakaran, G. (2016). Compressive strength of GGBFS based GPC under thermal curing. *Constr. Build. Mater.* 126, 552-559.
- Rangan, B. V. (2008). Fly ash-based geopolymer concrete.
- Ranjbar, N. ve Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498.
- Rashad, A. M. (2013). A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag – A guide for civil engineer. *Construction and Building Materials*, 47, 29-55.
- Reed, M., Lokuge, W. ve Karunasena, W. (2014). Fibre-reinforced geopolymer concrete with ambient curing for in situ applications. *Journal of materials science*, 49(12), 4297-4304.
- Roy, D. M. ve Idorn, G. M. (1982). Hydration, structure, and properties of blast furnace slag cements, mortars, and concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 79(6), 444-457.
- Sabu, A. ve Karthi, L. (2018). A review on strength properties of fibre and hybrid fibre reinforced geopolymer concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5, 1686- 1690.
- Sasatani, T., Torrilh, K. ve Kawamura, M. (1995). Five-year exposure test on long-term properties of concretes containing fly ash, blast-furnace slag, and silica fume. *Special Publication*, 153, 283-296.
- Sevim, Ö., Demir, İ., Alakara, E. H. ve Bayer, İ. R. (2023). Experimental evaluation of new geopolymer composite with inclusion of slag and construction waste firebrick at elevated temperatures. *Polymers*, 15(9), 2127. <https://doi.org/10.3390/polym15092127>
- Shaikh, F. U. A. (2013). Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, Cilt 43, pp. 37-49.

- Shi, C. ve Qian, J. (2000). High performance cementing materials from industrial slags—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 29(3), 195-207.
- Shi, C., Krivenko, P. V. ve Roy, D. M. (2006). *Alkali-activated cements and concretes*. CRC Press.
- Sing, N. S. ve Middendorf, B., (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 20 Mart. Issue 237.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M. ve Bhattacharyya, S. K., (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90.
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. ve Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124.
- Song, P. S., Hwang, S. ve Sheu, B. C. (2005). Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1546–1550.
- Soutsos, M. N., Kou, S. C. ve Leung, C. K. (2016). Geopolymer concrete with silica fume: A review. *Cement and Concrete Composites*, 65, 41-61.
- Sukmak, P., Horpibulsuk, S. ve Shen, S. L. (2013). Strength development in clay–fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 40, 566-574.
- Tan, K. ve Pu, X. (1998). Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag, and their combination. *Cement and concrete research*, 28(12), 1819-1825.
- Turner, L. K. ve Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and building materials*, 43, 125-130.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A. (2009). Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. Ankara: TÇMB.
- Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) (2020). *Enerji Üretiminde Kömür Kullanımı ve İstatistikler*. Enerji Bakanlığı Raporu.
- UNI, E. (2019). 12390-3: 2019; Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens. *European Committee for Standardization: Brussels, Belgium*.
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., ve Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89-104.
- Van Jaarsveld, J. G. S. ve Van Deventer, J. S. J. (1999). The potential use of geopolymeric materials for building applications. *Construction and Building Materials*, 13(6), 317-324.
- Vickers, L., van Riessen, A. ve Rickard, W. D. (2015). Geopolymer applications. *Fire-Resistant Geopolymers: Role of Fibres and Fillers to Enhance Thermal*. London: Springer, pp. 10-16.
- Wallah, S. ve Rangan, B. V. (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties.
- Weerdt, K. D. (2011). *Geopolymers – State of the art*, Oslo: SINTEF building and infrastructure.
- Xu, H. ve Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266.
- Yap, S. P., Alengaram, U. J. ve Jumaat, M. Z. (2013). Enhancement of mechanical properties in polypropylene- and nylon-fibre reinforced oil palm shell concrete. *Materials and Design*, 49, 1034–1041.

Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş. ve Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, 87(12), 2401-2407.

Zerfu, K. ve Ekaputri, J. J. (2016, February). Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete. *In Materials Science Forum* Vol. 841, pp. 162-169.

Zhang, H., Guo, X. ve Zhao, S. (2020). Mechanical properties and microstructure of fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Ceramics International*, 46(10), 15212-15227.

Zhang, P. ve Li, Q. F. (2013). Effect of silica fume on durability of concrete composites containing fly ash. *Science and Engineering of Composite Materials*, 20(1), 57–65.

Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A. ve Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56, 113-127.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Buğra AYDIN

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu : (Kurum ve Yıl)

Lisans : Erciyes Üniversitesi 2021

Yayınlar (Diğer) :

Aydın, B., Demir, İ., Alakara, E. H. & Günel, G. (2024). Uçucu Kül İkameli Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcı Geopolimer Harçlara Molaritenin Etkisi *3rd International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences. ICENCOS 24*. 16-17 May 2024, Konya Türkiye.

Aydın, B., Demir, İ., Sevim, Ö. & Bayer, İ. R. (2023) Uçucu Kül İkameli Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcı Geopolimer Harçlarda Eğilme Dayanımı Özellikleri *3rd International Conference on Innovative Academic Studies. ICIAS 23*. 26-28 September 2023, Konya Türkiye.