

**UÇUCU KÜL VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI
GEOPOLİMER KOMPOZİT MALZEME ÖZELLİKLERİNE
POLİPROPİLEN LİF KATKISININ ETKİSİ**

PROJE NO: 19.FEN.BİL.47

Proje Yürütücüsü: Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

Yardımcı Araştırmacısı: Fazlullah DANİSHYAR

Fen Bilimleri

Nisan 2021

Afyonkarahisar

Bu tez çalışması 19.FEN.BİL.47 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇUCU KÜL VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI
GEOPOLİMER KOMPOZİT MALZEME ÖZELLİKLERİNE
POLİPROPİLEN LİF KATKISININ ETKİSİ

Fazlullah DANİSHYAR

Danışman

Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Nisan 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Fazlullah DANISHYAR tarafından hazırlanan “Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Kompozit Malzeme Özelliklerine Polipropilen Lif Katkısının Etkisi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 21/04/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

Başkan : Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fak.

Üye : Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ
Afyon Kocatepe Ün., Mühendislik Fak.

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

21/04/2021



Fazlullah DANISHYAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UÇUCU KÜL VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER KOMPOZİT MALZEME ÖZELLİKLERİNE POLİPROPİLEN LİF KATKISININ ETKİSİ

Fazlullah DANİSHYAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

Bu çalışmada, uçucu kül (UK) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) esaslı geopolimer kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Polipropilen lif ilaveli (ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5) karışımlardaki uçucu kül (UK) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), 10 M sodyum hidroksit (NaOH) ve farklı silikat modülü (2 ve 3 modül) değerlerine sahip sodyum silikat (Na_2SiO_3) solüsyonları ile aktive edilmiştir. Geopolimer kompozit örnekler, 4 x 4 x 16 cm boyutlarındaki metal kalıplara titreşimli sehpa yardımıyla yerleştirilmiştir.

İlgili örnekler sıcaklığı 90 °C olan laboratuvar tipi etüvde 5 saat süreyle ısı kürüne tabi tutulduktan sonra 7 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Ardından fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ilgili örnekler su tankında 24 saat bekletilmiş akabinde de Arşimet prensibine göre örneklerin ağırlıkça su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ardından örneklerin eğilme ve basınç dayanım değerleri belirlenmiştir. Elde edilen fiziksel ve mekanik özellikler değerlendirilmiş ve ideal değerleri sağladığı düşünülen örnek grupları (% 50 UK ve % 50 ÖGYFC içerikli geopolimer harçlar) üzerinden deneylere devam edilmiştir. Bu örnek grupları üzerinde XRD analizleri ile faz içerikleri, SEM-EDX analizleri ile de yüzey morfolojisi ve donma-çözünme, yüksek sıcaklık ve sülfatlı ortamlara (% 5 NaSO_4 ve % 5 MgSO_4 çözeltileri ile) maruz kalma gibi durabilite testlerinden elde edilen bulgularla örnek özellikleri incelenmiştir.

Lifsiz (referans) örneklerin eğilme dayanımları; 0.1 MPa - 5.6 MPa, lif katkılı örneklerde ise eğilme dayanımları 2.4 MPa - 11.4 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Referans örneklerin basınç dayanım değerleri ise 15.3 MPa - 60.9 MPa arasında değişkenlik gösterirken, lif katkılı örneklerde bu değer 21.4 MPa - 77.60 MPa arasında değişmiştir. Dolayısıyla karışımalardaki lif oranının artmasıyla örneklerin mekanik özelliklerinde olumlu gelişimler gerçekleştiği görülmüştür.

Sonuç olarak hazırlanan geopolimer kompozit malzeler içerisinde elde edilen tüm bulgular değerlendirildiğinde; % 50 UK ve % 50 ÖGYFC ile hazırlanan karışımların 3 modül sodyum silikat solüsyonunu ve 10 M NaOH ile aktifleştirilmeleri durumunda en ideal sonuçların alındığı tespit edilmiş ve yapılarda kullanılabilir oldukları kanaatine varılmıştır. Bu sebeple aynı içeriğe sahip örnekler durabilite testlerinde ve deneylerinde de kullanılmıştır. Durabilite deneylerinden elde edilen bulgular değerlendirildiğinde ise % 1.5 PP lif ilaveli geopolimer kompozit harçlarının daha iyi dayanıklılık özelliklerine sahip oldukları düşünülmektedir.

2021, xi + 92 sayfa

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, Geopolimer, Kompozit, Polipropilen lifi.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBER ADDITIVE ON FLY ASH AND BLAST FURNACE SLAG BASED GEOPOLYMER COMPOSITE MATERIAL PROPERTIES

Fazlullah DANISHYAR

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan GÖRHAN

In this study, mechanical and physical properties of geopolymer composites based on fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) were investigated. Fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mixtures with polypropylene (PP) fiber addition by weight (0.5 %, 1.0 % and 1.5 %) were activated by 10 M sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate solutions (Na_2SiO_3) (2 and 3 module). Geopolymer composite samples were placed in 4 x 4 x 16 cm metal molds with the help of a vibrating table.

The relevant samples were subjected to heat curing for 5 hours in a laboratory oven at 90 °C, and then stored at room temperature for 7 days. Subsequently, in order to determine their physical properties, the relevant samples were kept in the water tank for 24 hours, and then the physical properties of the samples such as water absorption by weight, apparent porosity, unit volume weight and apparent density were determined according to Archimedes principle. Then the flexural and compressive strength values of the samples were determined. The obtained physical and mechanical properties were evaluated and experiments were continued on the sample groups (geopolymer mortars with 50 % FA and 50 % GGBFS content), which were thought to provide ideal values. On these sample groups, phase contents with XRD analysis, surface morphology with SEM-EDX analysis, and sample properties were examined with findings obtained from durability tests such as freezing-thawing, exposure to high temperature and sulphated

environments (with 5 % of NaSO₄ and 5 % of MgSO₄ solutions).

Flexural strength of reference samples varied between 0.1 MPa - 5.6 MPa, and between 2.4 MPa - 11.4 MPa in fiber reinforced samples. The compressive strength values of the reference samples varied between 15.3 MPa - 60.9 MPa, while this value varied between 21.4 MPa - 77.60 MPa in fiber reinforced samples. Therefore, it has been observed that positive developments occurred in the mechanical properties of the samples with the increase in the fiber ratio in the mixtures.

Consequently, when all the findings obtained in the prepared geopolymer composite materials are evaluated; It has been determined that mixtures prepared with 50 % FA and 50 % GGBFS are activated with 3 modules of sodium silicate solution and 10 M NaOH, and it has been concluded that they can be used in structures. For this reason, samples with the same content were also used in durability tests and experiments. When the findings obtained from the durability tests are evaluated, it is thought that 1.5 % PP fiber added geopolymer composite mortars have better durability properties.

2021, xi + 92 pages

Keywords: Fly ash, Geopolymer, Composite, Polypropylene fiber.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Gökhan GRHAN hocama, laboratuvar çalışmalarında bana yardım eden laboratuvar sorumlusu Bülent YEŐİLAY'a teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 19.FEN.BİL.47 numaralı BAPK proje ile maddi destek sağlayan Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Fazlullah DANİSHYAR
AFYONKARAHİSAR 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Uçucu Kül	5
2.1.1 Uçucu Külün Sınıflandırılması	6
2.1.2 Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri.....	7
2.1.3 Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri	8
2.1.4 Uçucu Küllerin Kullanım Alanları.....	10
2.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	11
2.2.1 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	13
2.2.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kullanım Alanları ve Etkileri	15
2.2.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Genel Kullanım Alanları	16
2.3 Lifler	19
2.3.1 Polipropilen Lif (PP).....	22
2.4 Geopolimerler	26
2.4.1 Geopolimerlerin Kullanımı	31
3. MATERYAL ve METOT	35
3.1 Kullanılan Malzemeler	35
3.2 Numunelerin Hazırlanması	37
3.3 Fiziksel ve Mekanik Testler.....	39
3.4 Durabilite Deneyleri	40
3.4.1 Donma-çözünme deneyi	40

3.4.2 Yüksek Sıcaklık Deneyi.....	40
3.4.3 Sülfat Deneyi.....	41
3.5 SEM-EDX ve XRD Analizleri.....	42
4. BULGULAR	44
4.1 Geopolimer Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özellikleri	44
4.2 Geopolimer Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	51
4.3 Durabilite Deneylerinden Elde Edilen Bulgular	57
4.4 SEM – EDX ve XRD Analizleri.....	62
5. SONUÇLAR.....	78
6. KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	92

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

NaOH	Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum silikat
CO ₂	Karbondioksit
MPa	Megapaskal
SiO ₂	Silisyum dioksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit

Kısaltmalar

EDX	Enerji dağılımı spektrometresi
ÖGYFC	Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
UK	Uçucu kül
XRD	X-Işınları difraktometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Küresel uçucu kül parçacıklarını gösteren SEM görüntüsü	5
Şekil 2.2 F ve C sınıfı uçucu külün SEM görüntüleri	9
Şekil 2.3 Uçucu külün taranması elektron mikroskobu görüntüleri.....	9
Şekil 2.4 Yüksek fırın cürufunun üretim akışı	13
Şekil 2.5 Yüksek fırın cürufu	15
Şekil 2.6 Cürufun asfalt malzemesi olarak kullanımıyla ilgili bir görüntü	17
Şekil 2.7 Polipropilen ve sentetik lifler	19
Şekil 2.8 Siloxo Si - birimlerinin sayısına göre farklı geopolimer sistemler	27
Şekil 2.9 Uçucu külün geopolimerlere / betona dönüştürülmesi	33
Şekil 3.1 Kullanılan malzemelerin XRD grafikleri.....	36
Şekil 3.2 Hazırlanan örnekler.....	37
Şekil 3.3 Basınç dayanım testi.	39
Şekil 3.4 Dondurucu dolapta ve normal hava şartlarında su bulunan kaptaki bekletilen örnekler.....	40
Şekil 3.5 Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir numunenin basınç dayanım testi.....	41
Şekil 3.6 MgSO ₄ ve NaSO ₄ çözeltilerinin kapında bulunan örnekler.....	42
Şekil 3.7 Etüvde kurutulmuş, sülfata uğramış örnekler.	42
Şekil 3.8 Örnek tutucu üzerinde bulunan örnekler ve SEM cihazı bilgisayarını	43
Şekil 4.1 Harç numunelerinin (7 günlük) görünen porozite oranları.	45
Şekil 4.2 Harç numunelerinin (7 günlük) su emme oranları.	47
Şekil 4.3 Harç numunelerinin (7 günlük) birim hacim ağırlık (kg/m ³) değerleri.....	49
Şekil 4.4 Harç numunelerinin (7 günlük) görünür yoğunluk (kg/m ³) değerleri.....	51
Şekil 4.5 Harç numunelerinin (7 günlük) eğilme dayanımı (MPa) değerleri.....	54
Şekil 4.6 Harç numunelerinin (7 günlük) basınç dayanım (MPa) değerleri.	57
Şekil 4.7 Örneklerin donma - çözünme sonrasında meydana gelen ağırlık kaybı oranları (%)......	58
Şekil 4.8 Örneklerin donma - çözünme sonrasındaki basınç dayanım değerleri (MPa). 58	
Şekil 4.9 Örneklerin yüksek sıcaklık sonrasında meydana gelen ağırlık kaybı oranı (%)......	59

Şekil 4.10 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan örneklerin basınç dayanım (MPa) değerleri.....	60
Şekil 4.11 Örneklerin sülfat etkilerine maruz kaldıktan sonraki ağırlık değişim oranları (%).	61
Şekil 4.12 Örneklerin sülfat etkisine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanım değerleri (MPa).	62
Şekil 4.13 FR3 kodlu numunenin SEM görüntüleri.....	63
Şekil 4.14 FR3 kodlu numune için SEM ve EDX grafiği.	63
Şekil 4.15 FR6 kodlu numunenin SEM görüntüleri.....	64
Şekil 4.16 FR6 kodlu numune için SEM görüntüsü ve EDX grafiği.	64
Şekil 4.17 FUK55 kodlu numune için SEM görüntüleri.....	65
Şekil 4.18 FUK55 kodlu numune için EDX ve SEM görüntüleri.....	66
Şekil 4.19 2FUK55 kodlu numune için SEM görüntüleri.....	67
Şekil 4.20 2FUK55 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri.....	67
Şekil 4.21 FUK510 kodlu numune için SEM görüntüleri.....	68
Şekil 4.22 FUK510 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri.....	68
Şekil 4.23 2FUK510 kodlu numune için SEM görüntüleri.....	69
Şekil 4.24 2FUK510 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri görüntüsü.....	69
Şekil 4.25 FUK515 kodlu numune için SEM görüntüleri.....	70
Şekil 4.26 FUK515 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri.....	71
Şekil 4.27 2FUK515 kodlu numune için SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.28 2FUK515 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri.....	72
Şekil 4.29 FR3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	73
Şekil 4.30 FR6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	74
Şekil 4.31 FUK55 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	74
Şekil 4.32 2FUK55 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	75
Şekil 4.33 FUK510 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	75
Şekil 4.34 2FUK510 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	76
Şekil 4.35 FUK515 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	76
Şekil 4.36 2FUK515 kodlu numuneye ait XRD grafiği.	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Türkiye'deki UK'nın kimyasal bileşimi	8
Çizelge 2.2 Farklı ülkelerdeki öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği (%)	14
Çizelge 2.3 Lif tipleri ve özellikleri	22
Çizelge 3.1 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun özellikleri	35
Çizelge 3.2 Uçucu küle ait XRF kimyasal analiz değerleri (%)	35
Çizelge 3.3 PP'nin genel özellikleri	36
Çizelge 3.4 Geopolimer kompozit örneklerinde kullanılan aktivatörlerin kimyasal bileşim oranları	37
Çizelge 3.5 Geopolimer kompozit numunelerindeki malzemelerin karışım miktarları (3 modül).	38
Çizelge 3.6 Geopolimer kompozit numunelerindeki malzemelerin karışım miktarları (2 Modül).	38
Çizelge 4.1 FR3 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen element oranları.	63
Çizelge 4.2 FR6 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen element içerikleri.	65
Çizelge 4.3 FUK55 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen element içerikleri.	66
Çizelge 4.4 2FUK55 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen element içerikleri.	67
Çizelge 4.5 FUK510 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen sonuçlar.	69
Çizelge 4.6 2FUK510 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen sonuçlar.	70
Çizelge 4.7 FUK515 kodlu geopolimer kompozit numunesi için EDX analizinden elde edilen sonuçlar.	71
Çizelge 4.8 2FUK515 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen sonuçlar.	72

1. GİRİŞ

Geopolimer kompozit malzemeler uygun maliyetli, çevre dostu, nispeten az miktarda enerji gerektiren, ısıya karşı oldukça dirençli, iyi bir basınç dayanımı ve dayanıklılık gibi özelliklere sahip olduğu için son yıllarda çimentolu yapı malzemelerine göre daha popüler hale gelmiştir (Korniejenko vd. 2016).

Normal Portland çimentosu 2019 yılında yaklaşık 4.2 milyar tonluk üretimle inşaat sektöründe kullanılan en popüler yapı malzemesidir. Ancak çimento üretimi çevreye olumsuz yönde etkilemektedir. Çimento üretiminden kaynaklanan CO₂ salınımı, toplam sera gazı emisyonunun yaklaşık % 7'sini oluşturmakla birlikte küresel ısınmanın artmasından da yaklaşık olarak % 4'ünden sorumlu olduğu belirtilmektedir. Öte yandan, uçucu kül (UK) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) gibi endüstriyel yan ürünlerin bertarafı edilmesi büyük problem oluşturmaktadır. Suya ve ya toprağa atılmaları toprak kirliliğine neden olmaktadır. Dolayısıyla endüstriyel yan ürünleri kullanılarak geopolimer kompozit gibi alternatif bir yapı malzemesi üretilebilir ve bahsedilen sorunların üstesinden gelebilecek malzeme oluşturmak mümkün olabilir (Ganesh ve Muthukannan 2021).

Geopolimer terimi ilk olarak Joseph Davidovits tarafından 1970'lerde Portland çimentosuna yeni bir alternatif bağlayıcı malzeme olarak tanıtıldı. Geopolimerik reaksiyon, organik bir polimerik zincire benzer bir kimyasal reaksiyondur, nihai üründe bağlayıcı özelliği olan bir alümina-silika zinciri oluşturmaktadır. Geopolimerlerin reaksiyonu, camsı silika ve alümina arasında, yüksek pH'lı, güçlü bir alkali katalizör (sodyum hidroksit ve/veya sodyum silikat) ortamında gerçekleşir. Reaksiyon aynı zamanda alkali aktivasyonu olarak adlandırılır ve kaynak maddenin camsı bileşimlerini güçlü bir bağlama özelliğine sahip katı bir bileşik maddeye dönüştürebilmektedir (Durak vd. 2021).

Genel olarak geopolimer malzemelerin reaksiyon işleyişi, çimento esaslı malzemedeki hidrasyon reaksiyonuna göre farklılık göstermektedir. Bir geopolimer bağlayıcıda, alüminosilikat öncülleri alkali çözeltileri ile aktive edilir. Bu reaksiyon işlemi sırasında,

alüminosilikat bileşenleri önce alkali çözelti içinde çözülür ve sonraki aşamada, alüminat ve silikat farklı türlerin oluşum dengesi, jelleşme, yeniden düzenleme, polimerizasyon ve sertleşmeye maruz kalır. Geopolimerin özellikleri, alüminosilikat kaynaklarının bileşiminden ve alkalın aktivatörlerin tipinden çok fazla etkilenmektedir (Awoyera ve Adesina 2019).

Alkali, hem kimyasal reaktiflerden hem de çimento fırını tozu gibi yüksek pH'lı atık malzemelerden elde edilebilmektedir (Li vd. 2020). Ayrıca, geopolimer beton üretimi de normal Portland çimentosu betonuna karşılaştırıldığında çok düşük maliyetli olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla yerel öncüler, geopolimer malzemelerin üretiminde optimum aktivatör dozajı kullanılarak elde edilebilir (Pasupathy vd. 2021). Geopolimer betonunun mekanik özelliklerinin uçucu kül karışımındaki cüruf içeriği ile arttığı bildirilmiştir (Awoyera ve Adesina 2019). Bununla birlikte alkali çözelti geopolimerlerin mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynar. Yüksek aktivatör konsantrasyonu, kaynak materyalde alüminosilikat partiküllerinin çözünürlüğüne neden olur, bu da geopolimerizasyon oranını artırır ve geopolimerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etki yaratır (Vargas vd. 2011).

Geopolimerler genellikle düşük sıcaklıklarda aktive olan uçucu külden oluşur. Uçucu kül, termik santrallerden elde edilen ve beton yapımında çimento yerine kullanılan puzolanik özelliklere sahip endüstriyel bir atıktır. Uçucu kül içerisindeki SiO_2 ve Al_2O_3 Portland çimentosunun hidrasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek puzolanik reaksiyon başlatır. Bu nedenle Portland çimentosu yerine uçucu kül kullanılabilir. Uçucu külden alkali çözelti ile temas ettiğinde silikatlar çözülmeye başlar. Uçucu kül, geopolimerlerin üretiminde kaynak malzeme olarak kullanılabilir çünkü geopolimerizasyon esasen alümina-silikat zincirine dayanmaktadır. Bununla birlikte, alkali çözeltinin türü ve konsantrasyonu uçucu külden çözülmesinde önemli bir rol oynar. Sodyum hidroksit çözünürlüğündeki Al^{+3} ve Si^{+4} iyonlarının çözünürlüğü, potasyum hidroksit çözeltisine göre daha yüksektir (Görhan ve Kürklü 2014b).

Ayrıca geopolimer malzemelerde uçucu külden (UK) dışında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), pirinç kabuğu külden, ferrokrom külden vb kullanılmaktadır. Kalsiyum

içeren bir diğer endüstriyel katı atık olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), yüksek fırın ergitme demirinden üretilmektedir. Çoğu ÖGYFC, bir geopolimer matrisin iç sıcaklığını iyileştirmek için etkili bir hammadde olan bol miktarda CaO içerir. Bu nedenle, bu katı atığın dahil edilmesi, kaynak kullanımını ve geopolimer oluşumunu iyileştirmektedir (Das vd. 2020).

Birçok araştırmacı tarafından, çimento betonuna bağlayıcı bir malzeme olarak ÖGYFC'nin eklenmesinin, sadece karışık malzemelerin mühendislik özelliklerini iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda atığı ekonomik olarak geri dönüştürdüğü de belirtilmektedir. Betona öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun ilave edilmesiyle betonun akışkanlık, priz süresi ve sızdırma kapasitesi gibi reolojik performansını iyileştirebileceği bildirilmiştir (Wang vd. 2021).

Günümüzde, alkali ile aktive edilmiş malzemeler bazında üretilenler de dahil olmak üzere lif takviyeli kompozit malzemeler, endüstrinin birçok dalında, örneğin havacılık, otomotiv endüstrisinde, denizcilik mimarisinde ve kara taşımacılığında kullanılan ileri teknolojik çözümlerde önemli rol oynamaktadır. Liflerin eklenmesi, kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için etkili bir yöntemdir. Liflerin varlığı çatlamanın genel etkisini azaltır, meydana gelen çatlakların genişlikleri (mikro çatlakların yayılmasının örnek olarak azaltılması), tüm kırılma tokluğu bastırarak sünekliği artırır. Bu sayede çatlama kaynaklı hasarlar hafifletilebilir. Lif takviyesi kullanmanın bir diğer nedeni ise kompozitlerin eğilme mukavemetinin artırılmasıdır. Lifler ayrıca enerji absorbe ve deformasyona karşı direnç ile ilişkili geopolimerlerin özelliklerini de geliştirebilmektedir (Korniejko vd. 2016).

Ranjbar vd. (2016), polipropilen (PP) lifin geopolimerlere dâhil edilmesi durumunda, erken yaşlarda işlenebilirliğin azalacağını bildirilmiştir. Ayrıca, polipropilen (PP) lifin bünyeye eklenmesi, erken mukavemet gelişimi için yararlı değildir, hatta polipropilen lif ile matris arasındaki zayıf yüzey uyumluluğundan ötürü dayanım gelişimini geciktirir. Bununla birlikte malzemenin tokluğu ve enerji emilimini geliştirmektedir (Ranjbar vd. 2016).

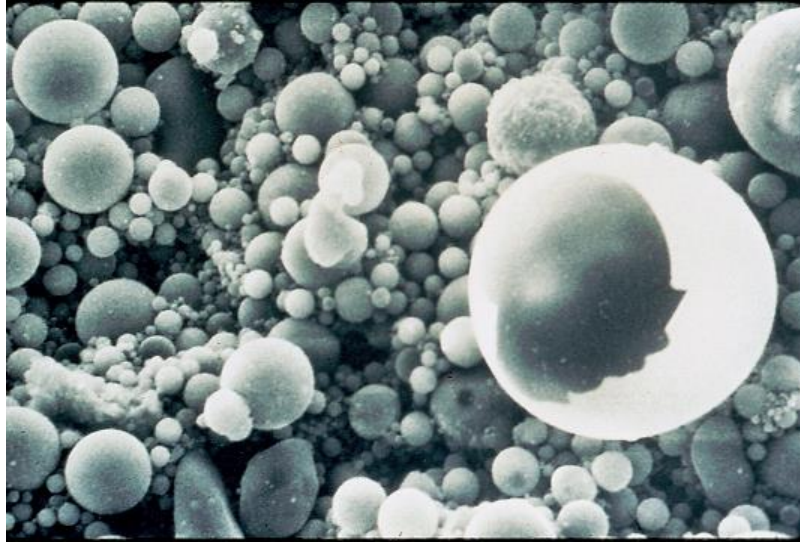
Bu tez çalışmasının amacı ise polipropilen (PP) lif ilaveli uçucu kül ve öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer kompozit malzeme üretiminde, alkali aktifleştirme prosesinde kullanılan sodyum silikat solüsyonlarındaki (Na_2SiO_3) farklı silikat modüllerinin geopolimer malzeme özelliklerinde meydana getirdiği değişimlerin araştırılmasıdır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Uçucu Kül

Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte enerji tüketimi de artmaktadır. Elektrik enerjisi üreten termik santrallerinden elde edilen uçucu kül çevreye zararlı olmasıyla birlikte; toplanması, depolanması ve imha edilmesi maliyet açısından uygun değildir. Dolayısıyla, çimento yerine doğal bağlayıcıların kullanılması her zaman, hem çevresel hem de ekonomik nedenlerden araştırmacıların konusu olmuştur (Uzbaş 2019).

Bundan dolayı uçucu külün geri dönüşümünün hem betonun özelliklerini iyileştirmesi hem de çevre sorununun azaltılmasıyla insanlığa büyük avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. 1930'larda elektrik enerjisi endüstrisinin gelişmesiyle birlikte uçucu kül terimi ortaya çıkarak Portland çimentosunda uçucu külün kullanımı başlamıştır (Özcan 2020). Küresel uçucu kül parçacıklarının SEM görüntüsü Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1 Küresel uçucu kül parçacıklarını gösteren SEM görüntüsü (Thomas 2007).

Uçucu kül (Şekil 2.1), elektrik enerjisi üretimi santrallerinde pülverize kömürün yakılmasıyla bir yan ürün olarak tanımlanmaktadır. Özel olarak, baca gazları tarafından kazandaki yanma bölgesinden uzaklaştırılan ve daha sonra mekanik veya elektrostatik filtrelerle toplanan yanmamış atıklardır. Daha ağır yanmamış malzeme fırının tabanına düşer ve taban külü olarak adlandırılır. Bu malzeme genellikle beton için çimentolu bir

malzeme olarak kullanım için uygun değildir. Bununla birlikte beton duvar bloğu imalatında kullanılabilir (Thomas 2007).

Daha önce yapılmış bir çalışmaya göre, uçucu kül üretimi 2008 yılında 900×10^6 ton olduğu ve mevcut şartların korunması durumunda 2020 yılına kadar 2000×10^6 tona yükselebileceği ifade edilmektedir. Bu hammaddelerin yaklaşık % 45'i beton ve çimento üretimi için kullanılırken, geri kalanı ise yüksek maliyetlerle depolama lagünleri ve düzenli depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Bu nedenle, uçucu külün geopolimer üretimi için hammadde olarak kullanılması, depolama lagünlerinin ve düzenli depolama alanlarının korunması ve bu atık ürünün yararlı bir hale dönüştürülmesi gibi faydalar sağlayabilecektir (Li vd. 2021).

En yaygın kömür yakan fırın türü kuru tabanlı fırındır. Ayrıca elektrik hizmetleri endüstrisinde kullanılan kömürle çalışan üç tür kazan fırını vardır (Upadhyay ve Kamal 2007). Bunlar;

- Toz haline getirilmiş kömür kuru küllü, kuru tabanlı bir kazanda yakıldığında, tüm külün yaklaşık yüzde 80'i baca gazına eklenen uçucu kül olarak fırından çıkar.
- Toz haline getirilmiş kömür bir ıslak tabanlı fırınında yakıldığında, külün yüzde % 50'si fırında tutulur, geri kalan yüzde 50 ise baca gazında tutulur.
- Yakıt olarak ezilmiş kömürün kullanıldığı bir siklon fırınında, külün % 70 - 80'i kazan cürufu olarak tutulur ve yalnızca % 20 - 30'u baca gazında kuru kül olarak fırından çıkar.

2.1.1 Uçucu Külün Sınıflandırılması

Uçucu küller, endüstriyel uygulamalarda genellikle çimento ve beton üretimi için dünya çapında ASTM C618'e göre F ve C sınıfı olmak üzere ikiye ayrılır. F tipi uçucu külde % 70'den fazla $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriğine sahip olup C tipi uçucu külde ise yukarıda listelenen oksitlerin % 50 - 70 aralığında bir toplama sahip olması gereklidir. Düşük

kalsiyumlu F Sınıf uçucu küller genellikle yüksek dereceli bitümlü kömürlerin ve antrasitlerin (taşkömürü) yakılmasıyla üretilir. Bu uçucu küller doğada puzolaniktir. Öte yandan, yüksek kalsiyumlu C Sınıfı uçucu küller normalde düşük dereceli linyitlerin ve alt bitümlü kömürlerin yakılmasıyla üretilir ve bu uçucu küller hem çimentolu (su ile reaksiyona girdiğinde kendiliğinden sertleşen) hem de puzolanik özelliklere sahip olduğu ifade edilmektedir (Vassilev ve Vassileva 2007).

Uçucu küllerin her sınıfının özelliklerinde büyük farklılıklar vardır. ASTM C 618'de F Sınıfı ve C sınıfı uçucu küllerin üretildiği kömür sınıflarına referansta bulunmasına rağmen, belirli bir uçucu kül sınıfının belirli bir kömür türünden belirli bir uçucu kül sınıfı elde etme zorunluluğu yoktur. Örneğin F Sınıfı uçucu kül, bitümlü olmayan kömürlerden de ortaya çıkabilir ve bitümlü kömürlerden F Sınıfı olmayan uçucu küller de elde edilebilir (Nizar vd. 2014).

TS EN 197-1'e göre uçucu küller V ve W olarak iki sınıfa ayrılmıştır. V Sınıf (silisli) uçucu küller, çoğunlukla reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 olmak üzere küresel parçacıklardan ve demir oksit ve diğer bileşenlerden oluşan puzolanik ince tuz halinde bulunan küllerdir. W sınıfı UK, esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten ve demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenlerden meydana gelen, hidrolik ve / veya puzolanik özelliğe sahip ve ince tuz halde bulunan küllerdir. Bu tür uçucu küllerde reaktif kireç (CaO) oranı % 10'dan ve reaktif silis miktarı % 25'ten fazla olmalıdır (Özcan 2020).

2.1.2 Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

Uçucu kül içerisinde 316 ayrı mineral ve 188 mineral grubu tanındığından, özellikleri bakımından en karmaşık malzemelerden biridir. Bununla birlikte tüm uçucu kül, kömür içeren kaya tabakalarındaki ana mineral bileşikleri, önemli miktarda silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) içerir. PH değeri ve kalsiyum / kükürt oranına bağlı olarak, uçucu küller asidik kül (pH 1.2 - 7), hafif alkali kül (pH 8-9) ve güçlü alkali kül (pH 11 - 13) olarak sınıflandırılmaktadır (Bhatt vd. 2019).

Kimyasal olarak aktif bir malzeme olan uçucu kül, diğer reaktif bileşenlerle kimyasal

reaksiyondan kaynaklanan bağlama özellikleri için kullanılır. Genel olarak, uçucu külden gelen silika, kireç gibi alkali bileşiklerle reaksiyona girerek çimentolama eylemlerine neden olur. Silisik asit formunda reaksiyona girmiş olan silika, puzolanik materyalleri karakterize etmek için kullanılır. Çoğunlukla yüksek silika içeriği asidik olarak adlandırılır ve tercih edilir (Gupta ve Chaudhary 2020). Tipik bir UK kimyasal içeriği Çizelge 2.1’de görülebilmektedir.

Çizelge 2.1 Türkiyedeki UK’nın kimyasal bileşimi (Bhatt vd. 2019).

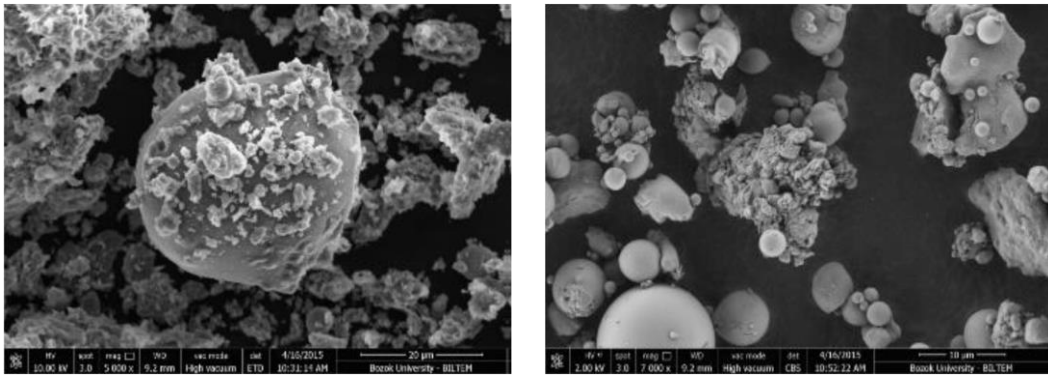
Bileşen (Oksit)	%
SiO ₂	37.9 - 57
Al ₂ O ₃	20.5 - 24.3
Fe ₂ O ₃	4.1 - 10.6
CaO	0.2 - 27.9
K ₂ O	0.4 - 3.5
MgO	1 - 3.2
SO ₃	0.6 - 4.8
TiO ₂	0.6 - 1.5
Na ₂ O	0.1 - 0.6
P ₂ O ₅	0.2 - 0.3
MnO	0
LOI	0.4 - 2.7

2.1.3 Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri

Uçucu kül, katı veya içi boş ve çoğunlukla şekilsiz yapıya sahip, ağırlıklı olarak küresel şekilli ince toz parçacıklardan oluşur. Genel olarak, kömür küllerinin özgül ağırlığı 2.0 civarındadır, ancak büyük ölçüde 1.6 - 3.1 arasında değişir. Bu değişim, partikül şekli, derecelendirme ve kimyasal bileşim gibi birkaç faktörün kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Tane boyutu dağılımına göre uçucu küller kumlu siltten, siltli kuma kadar sınıflandırılabilir. Uçucu kül, yüksek özgül yüzey alanına ve düşük kütle yoğunluğuna sahiptir. Yanmamış karbon ve demir miktarı uçucu külün rengini etkiler ki turuncudan koyu kırmızıya, kahverengiye veya beyazdan sarıya değiştirebilmektedir (Bhatt vd. 2019). UK, nem tutma kapasitesi ve elektriksel iletkenliği yüksektir, ancak normal toprağa göre daha düşük katyon değişim kapasitesine sahiptir (Ram ve Mastro 2014).

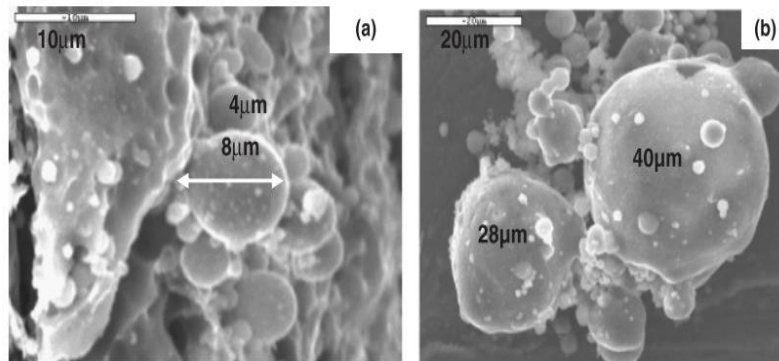
Kireç miktarı az olan küllerde, parçacıklar tamamen küresel ve içlerinde boşluk yoktur.

Genel olarak bu küllerin şekil dağılımına bakıldığında homojen mikro yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Ancak kireç oranı daha fazla olan küllerde, mikro yapıda düzensiz, hem köşeli hem de küresel şekillerin bir araya gelmeleri nedeniyle homojen olmayan bir şekil dağılımı vardır. Ayrıca, küresel tanelerin yüzeyi, düşük kireçli küller kadar pürüzsüz değildir. Partikül şekli ve boyut dağılımı, taze betonun performans (işlenebilirlik) ve su ihtiyacı gibi reolojik özelliklerine etki etmektedir (Özcan 2020). F sınıfı uçucu kül ve C sınıfı uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şelil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 F ve C sınıfı uçucu külün SEM görüntüleri (Özcan 2020).

Uçucu kül (Şekil 2.3) tanecikleri genellikle çimento kadar incedir ve camsı, küresel partiküllerin yanı sıra soğutma sırasında oluşan kuvars, mullit, hematit, manyetit, kömür ve diğer kristal fazların kalıntılarından oluşur. Uçucu kül partiküllerinin çoğu camsı ve katıdır, bununla birlikte içi boş (merkez küreler) ve küre şeklindedir (Kaur 2016).



Şekil 2.3 Uçucu külün taranması elektron mikroskobu görüntüleri (Kaur 2016).

2.1.4 Uçucu Küllerin Kullanım Alanları

Uçucu külün geleneksel aktif karbona çok iyi bir alternatif olduğu ve maliyeti en aza indirmek için birçok işlemde aktif karbonun yerini alabileceği sonucuna varılabilir. İnşaat ürünlerinin üretiminde uçucu külün ikame edilmesiyle çimento kullanımı azaltılabilir. Çimento kullanımından tamamen kaçınılamazken, fayans gibi bazı ürünlerde ikame miktarı % 50'ye kadar çıkabilir (Patil vd. 2013).

Uçucu kül aynı zamanda alçakta yatan alanların iyileştirmesi için de kullanılmaktadır ve bu da verimli üst toprağın tasarrufunu sağlamaktadır (Tiwari vd. 2016).

Uçucu küller; tuğla imalatı, seramik imalatı, yol yapımı, beton üretimi ve diğer faaliyetlerde de kullanılabilir. Uçucu kül kullanımının en önemli alanları, geleneksel beton veya geopolimer beton üretimidir. Uçucu külün çimento, beton ve diğer çimentolu kompozitlerde kullanımını bulmak için birçok araştırma yapılmıştır (Ghazali vd. 2019).

Alkali aktivasyon sürecinde UK kullanımı aynı zamanda doğal hammaddelerin kullanımının azaltılmasına da katkıda bulunur, ayrıca yapı malzemelerinin özellikleri ve kalitesi açısından inşaat sektörünün daha karmaşık ihtiyaçlarını karşılamaktadır (Komljenović vd. 2010).

Betona uçucu kül eklenmesi ekonomik, ekolojik ve teknik açıdan fayda sağlar. SiO_2 ve Al_2SiO_3 içeriği Portland çimentosuna göre çok benzerlik gösterdiğinden uçucu kül, Portland puzolan çimentosunun üretiminde puzolanik malzeme olarak çimento endüstrileri tarafından kullanılmaktadır. Ortamda nem varlığı ve oda sıcaklığında kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona girerek çimentolu özelliklere sahip bileşikler uçucu kül ile elde edilebilir. Teknik olarak Portland çimento ile birlikte uçucu kül kullanımı, çimentonun hidrasyonu sırasında oluşan Ca(OH)_2 tüketimine katkıda bulunur ve çimentolu ürünlerin oluşumuna yol açar. Uçucu kül ve kalsiyumun camsı fazı oluşturulan hidroksit, ek C-S-H jel oluşumuna yol açar ve daha yüksek yoğunluk ve mukavemet ile sonuçlanır (Ghazali vd. 2019).

Barajların yapımı sırasında ve betonda hidrasyon sıcaklığını düşürmek için önemli miktarda uçucu kül kullanılmıştır. İlk olarak 1940'larda Amerika Birleşik Devletleri'nde Hoover Barajı'nda kullanıldı. Türkiye'de 1960 yılında Gökçekaya ve Badger'de baraj inşaatında kullanılması amaçlanmıştır. Daha sonraki yıllarda, uçucu külün betona katılmasıyla, betonda daha kolay işlenebilirlik, geçirimsizlik ve ekonomik özellikleri gösterdiğinden kullanımı dünya çapında yaygın olmuştur (Luga 2015).

Hafif yapı ürünlerinin imalatında yan ürün agregası olarak uçucu külün kullanımı, birçok nedenden ötürü mantıklı bir kullanım süreci olarak kendini göstermektedir. Başlıca avantajı, ağırlığın bir faktör olduğu durumlarda hafif olmayan ürüne kıyasla, bitmiş ürünün nakliyesinin taşıma maliyetlerinin düşmesiyle bağlantılı olarak üreticiye ekonomik tasarruftur. Azalan maliyet, özellikle tuğla gibi ürünler düşünüldüğünde belirgindir (Ahmaruzzaman 2010).

2.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), bir yüksek fırında termo-kimyasal indirgeme ile sıcak metal üretimi sırasında oluşmaktadır. Demir cevheri, peletleri yanı sıra kireç taşı veya dolomit gibi eritkenler sürekli işlem sırasında, ısıtılmış havanın varlığında indirgeyici koşullar altında ısıtılır. Kok ve diğer indirgeme faktörleri (örneğin enjekte edilmiş kömür), demir cevherini veya peletleri sıvı sıcak metale indirgeyen karbon monoksit üretmek için yakılır. Demir cevherinin eritkenleri, karbon kaynağından tortular ve metalik olmayan bileşenler kimyasal olarak birleştirilir ve metalik olmayan sıvı halindeki yüksek fırın cürufu ile sonuçlanır. Daha az yoğun cüruf erimiş demirin üzerinde bir tabaka oluşturur ve sıyırıcı (skimmer) içinde ayrılabilir. Yüksek fırın cürufunun dağılma/akıtma sırasında sıcaklığı 1500 °C civarındadır. Cüruf fırından çıktığında, çeşitli yollarla işleme tabi tutulur. Yavaşça havanın soğuduğu çukurlara veya zemin koylarına yönlendirildiği takdirde hava soğutmalı yüksek fırın cürufu olarak adlandırılan kristal yapılı kaya benzeri bir kütle oluşturacaktır (İnt.Kyn.1).

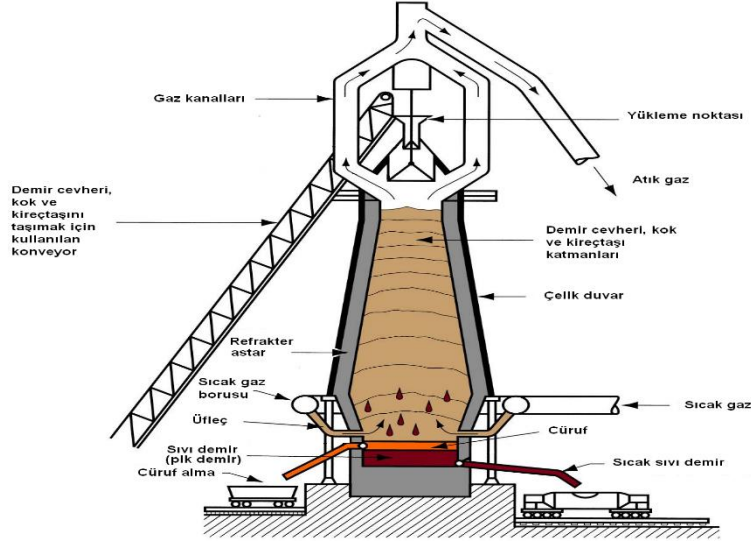
Kimyasal bileşimleri çimentonunkinden farklı olmasa da, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları kendileri çimentolu bileşikler değildir, ancak kireç gibi alkali bir malzeme

eklendiğinde gizli hidrolik özelliği kazanır. (Sherwood 1993) 'e göre, genel olarak cüruf, nasıl soğutulduklarına bağlı olarak üç şekilde aşağıda verildiği gibi mevcut olabilir (Abdullah 2019);

- Hava soğutmalı yüksek fırın cürufu; Yüksek fırından çıktıktan sonra cüruf açıkta yavaş yavaş soğumaya bırakılabilir, bu durumda kırılmaya uygun kristalize cüruf üretilir.
- Genleşmiş veya köpüklü yüksek fırın cürufu; Sıcak cüruf soğuduğunda buhar üretir ve belirli koşullar altında genleşmiş cüruf üretilir.
- Granüle yüksek fırın cürufu veya Peletlenmiş Sıcak cürufu; Sıcak cüruf, camsı cürufu oluşturmak için su, hava ile söndürülebilir veya aniden soğutulabilir. Su ile söndürme, granül yüksek fırın cürufu üretirken, peletlenmiş cüruf, hava ile söndürülerek üretilir.

Granüle edilmiş cüruf, kimyasal bileşime, söndürme sırasındaki sıcaklığa ve soğutma hızına bağlı olarak gevrek, patlamış mısır benzeri bir yapıdan yoğun bir cama benzeyen küçük, kum boyutlu tanelere kadar değişebilmektedir (Lewis 2000).

Şekil 2.4'de görüldüğü gibi, yüksek fırın cürufu hava, soğutmalı cüruf ve granül cüruf olarak ikiye ayrılır. İlki, erimiş cürufun açık çukurlarda veya bahçelerde soğumasına izin verilerek üretilir ve ikincisi, erimiş cürufu su jeti ile hızla soğutarak; ilki kırma taş, ikincisi ise kuma benziyor. Beton karışımı için yüksek fırın cürufu iri agrega olarak kullanılması, hava soğutmalı cürufun kırılması ve ardından eleklerle ayırmasıyla üretilir; ince agrega olarak, tane boyutunu kontrol etmek için granüle cürufun hafifçe ezilmesi ve ardından ayırmasıyla üretilir (Miyamoto vd. 2015).



Şekil 2.4 Yüksek fırın cürufunun üretim akışı (İnt.Kyn.2).

2.2.1 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), metalürjik cüruf türlerinden biri olup demir yapımının bir yan ürünü olarak belirtilmektedir. Ana bileşenler SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ; MgO , FeO içermekte olup, CaS , MnS ve FeS şeklindeki sülfidler ikinci derecede bileşenlerdir. Aktif öğütülmüş yüksek fırın cürufunun reaksiyonları Portland çimentosunun reaksiyonlarına benzerdir (Václavík vd. 2012).

Cürufun reaktivitesi büyük ölçüde bileşimine bağlıdır. Genel olarak, cüruf ne kadar bazik olursa, alkali aktivatörlerin varlığında hidrolik reaktivitesi o kadar büyüktür. Camsı faz, kireç, alümina ve magnezya içerikleri ne kadar yüksekse, hidrolik reaktivite o kadar yüksek olur. Pek çok şartnamelerde bazlık niceliksel olarak ($\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) ile bazlık faktörü olarak bilinen SiO_2 toplamı arasındaki kütle oranı olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, Almanya'da harmanlanmış çimentolarda kullanılmak üzere cürufları değerlendirmek için bazlık faktörü ≥ 1 kullanılır. Bazı Kuzey Amerika cüruflarında yüksek MgO içeriği bazen genişleyen parçacıkların oluşumu için endişe kaynağı olabilir (İslam vd. 2011).

Hidrolik bağlayıcılık özelliklerini tayin etmek için öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun (ÖGYFC) kimyasal muhtevasını bilmek önemli rol oynar. $\text{CaO} / \text{SiO}_2$

bağlayıcılık oranının belirli bir sınır değere yükselmesi ile bu değer artarken, sınır değeri aşıldıktan sonra granülasyon zorlaşır ve hidrolik özellik azalmaya başlar. CaO / SiO₂ oranı sabit olduğunda ve Al₂O₃ miktarını arttırmak cürufun aktivitesini artırır. Cürufu MgO içeriği % 10'a kadar olduğunda mukavemeti olumsuz yönde etkilemez, ancak % 10'dan yüksek oranlar mukavemeti azaltabilir. Ayrıca cüruf içerisinde demir ve mangan oksitlerin bulunmaları dayanım üzerine etkileri olumsuz oldukları belirtilmektedir (Bingöl 2018). Farklı ülkelerde ortaya çıkan öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının kimyasal özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Farklı ülkelerdeki öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriği (%) (Bingöl 2018).

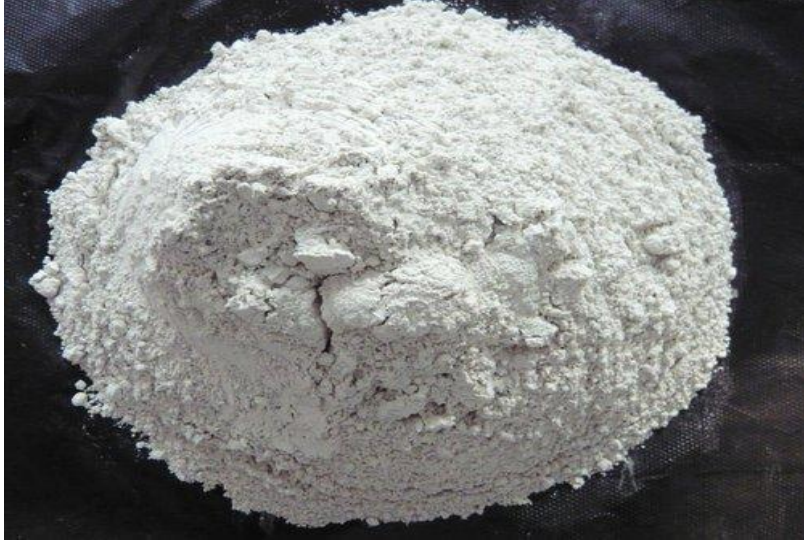
Oksit	ABD	Güney Afrika	Avustralya	Türkiye	Portland Çimentosu
CaO	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe ₂ O ₃	0.1-0.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6
MgO	0-19	8-21	1-3	3.5-7	0.1-4
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1-2.5	-
S	0-0.2	1-16	0.6-0.8	1-2	-
SO ₃	-	-	-	-	1-3

Cürufların aktivasyon kolaylığı ve hidrasyonu, temel olarak cürufun mineralojik bileşimi, inceliği ve kullanılan alkali aktivatörün tipine bağlıdır. Alkali ilavesi cürufun çözünmesini ve dolayısıyla önemli miktarda alüminyum (C-(A)-S-H) içeren kalsiyum silikat hidratlar, hidrotalsit benzeri faz ve stratlingit içeren hidrasyon ürünlerinin oluşumunu canlandırmaktadır (Haha vd. 2011).

Avrupa Standardı ENV 197-1: 1992 ve İngiliz Standartlarına göre, yüksek fırın cürufunda CaO + MgO kütlesinin SiO₂ kütlesine oranı 1.0'i aşmalıdır. Cam içeriği, cürufun gizli hidrolik özelliği için önemli bir parametre olarak kabul edilir. BS EN 15167-1: 2006 standardında, yüksek fırın cürufundaki cam fazının içeriği % 67'den büyük olduğunda çimento klinkeri yerine kullanılabilir olduğu belirtilmektedir (Liu vd. 2020).

Şekil 2.5'de görüldüğü gibi öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) rengi

beyazımsıdır ve renk yapısı Portland çimentosuna kıyasla daha açıktır. Tetrakalsiyum aluminoferrit (C_4AF) bileşenlerinin çimento içerisinde bulunmasından dolayı çimentonun rengi gridir ancak ÖGYFC’de bu bileşen oluşmamaktadır. Dolayısıyla beton üretimi yapıldıktan sonra de renk değişikliği ortaya çıkmaktadır. Böylelikle öğütülmüş granüle yüksek fırından üretilen betonların brüt yüzeylerinin daha estetik görünmesini sağlar ve bu nedenle bu tür betonların kullanılması üstün olarak tutulmaktadır. Çimentonun ilk yaşlardaki dayanımı etkileyen trikalsiyum silikat (C_3S), YFC’de oluşmadığı için YFC’li betonların erken yaşlardaki dayanımı düşük ancak nihai dayanımı yüksek çıkmaktadır (Mollaismailoğlu 2020).



Şekil 2.5 Yüksek fırın cürufu (İnt.Kyn.3).

2.2.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kullanım Alanları ve Etkileri

Beton katkı maddesi olarak kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, büyük ölçüde mikro agrega etkisine bağlı olarak mükemmel mekanik özellikler, zamanla küçük çökme kaybı ve düşük hidrasyon ısı gibi avantajlara sahiptir. Şu anda beton katkı maddesi olarak kullanılabilen malzemeler arasında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu en kapsamlı performansa sahiptir. Bu yapay mineral, sınırlı kaynaklara sahip bir hammaddedir (He vd. 2021).

Aslında cüruf katkı maddesinin hazırlanması, depolama, sınıflandırma, nakliye, öğütme

ve karıştırma dahil olmak üzere birçok toz görevinin entegrasyonudur. Bol miktarda araştırma, betonun çimentosunda katkı maddesi olarak kullanılmak üzere cürufun 400 m² / kg'dan daha büyük spesifik bir yüzey alanına sahip olması gerektiğini göstermiştir. Cüruf ne kadar ince olursa performans o kadar iyi olur (He vd. 2021).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) tipik olarak betondaki Portland çimentosunun % 35 - 65 arasında yerini almaktadır. Bu nedenle, her bir ton Portland çimentosunun % 50 oranında değiştirilmesi, yaklaşık olarak 500.000 ton CO₂ azalması ile sonuçlanacaktır (Song ve Saraswathy 2006).

Genel olarak, inşaatın hizmet ömrünü uzatmak için normal Portland çimentosuna cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi farklı mineral katkı türlerinin eklenmesi ve normal Portland çimentosunda puzolanların eklenmesi düşünülmektedir (Li vd. 2018).

Ekonomik ve ekolojik olarak, beton karışımlarında fırın cürufunun kullanılması, cürufun yan ürün malzemelerinin kümülatif ve artan yığınlarını azaltmak için önemlidir. Ayrıca beton karışımındaki çimento gibi pahalı bir malzemenin yerine ucuz bir yan ürün malzemesinin kullanılması ekonomik olarak etkilidir (Al-Bajjat ve Sarireh 2019).

Ayrıca öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu betonun mekanik özelliklerini ve zayıf asitlere ve tuzlara karşı direncini iyileştirmektedir (Václavík vd. 2012).

2.2.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Genel Kullanım Alanları

Yüksek fırın cürufunun gizli hidrolik özellikleri ve alkali aktivasyona sahip olduğu için toprak stabilizasyonunda da faydalıdır. Kireç ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun bir kombinasyonu Güney Afrika ve Avustralya'da toprak stabilizasyonu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Topraktaki sülfatın stabilize kilde ciddi şişmeye neden olabileceği bilinmektedir. Sülfatla ilgili bu şişme etrenjit oluşumu ile ilişkilidir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu çimentosunun bu tür genişleme ve şişmeye karşı dirençli olduğu bilinmektedir (Grubeša vd. 2016).

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanımının yaklaşık % 24'ü yol yapımındadır. Esas olarak, asfalt ve beton karışımlarında agrega olarak veya bağlayıcı olmayan taban ve alt taban tabakası olarak kullanılmaktadır. Bunun başlıca nedeni, pürüzlü yüzeyi ve yüksek gözenekli bir yapıya sahip olmasındandır dolayısıyla son derece kararlı katmanlarla sonuçlanmaktadır. Su içeriği değişiminden neredeyse hiç etkisi olmadığından inşaat sırasında avantajlıdır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun temel avantajları, dolgu veya toprak setinde agrega olarak kullanılırsa, yüksek stabilite ve sürtünme açısı (40 - 45°) olmasıdır (Grubeša vd. 2016). Şekil 2.6'de öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufun asfalt malzemesi olarak kullanıldığını göstermektedir.



Şekil 2.6 Cürufun asfalt malzemesi olarak kullanımıyla ilgili bir görüntü (Mollaismailoğlu 2020).

Yüksek fırın cürufu, harçta ince agrega olarak ikame edilerek kullanılabilir. İnce agreganın % 25 - 75'inin yüksek fırın cürufu ile değiştirilmesi harcın basınç ve gerilme mukavemetini arttırabilir (Grubeša vd. 2016).

Bununla birlikte, ince agregaların yüksek fırın cürufu ile kısmen değiştirilmesi, karışımların mikro yapısındaki iyileşmenin bir sonucu olarak sülfat direncini önemli ölçüde arttırabilir ve hızlı klorür geçirgenliğini azaltabilir (Humam ve Siddique 2013). Bununla birlikte, ince agrega ikamesi (doğal kum) olarak kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu oranının arttırılması, harç akışının azalmasına neden olur (Nataraja vd. 2013). Uygun konsantrasyonda kimyasallar ve süperplastikleştirici (% 0.5 - 1.0) kullanılarak akış korunabilir ve sıradan Portland çimento harcına yakın işlenebilirlik

sağlanabilir (Grubeša vd. 2016).

Cüruf, betonda bağlayıcı veya agrega olarak kullanılabilir. Agrega olarak kullanılan cüruf genellikle ince daneli agreganın yerini alır ve betonun özelliklerini iyileştirebilir. Yüksek fırın cürufu ile çimento değişimi daha işlenebilir beton ile sonuçlanır ve bir bağlayıcı olarak, Portland çimentosunda ağırlıkça yaklaşık % 70 - 80 arasında ikame edilebilir. Ayrıca değiştirilen Portland çimentosunun her % 10'u için beton üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarında % 9 - 10 oranında azalma sağlar. Yüksek fırın cürufu betonun bu geliştirilmiş dayanıklılığı, su geçirmez özellikleri bodrum katları, barajlar, deniz yapıları, köprüler, telekomünikasyon kuleleri ve çevreleme yapıları gibi özel uygulama alanlarında kullanılmasını kolaylaştırır (Grubeša vd. 2016).

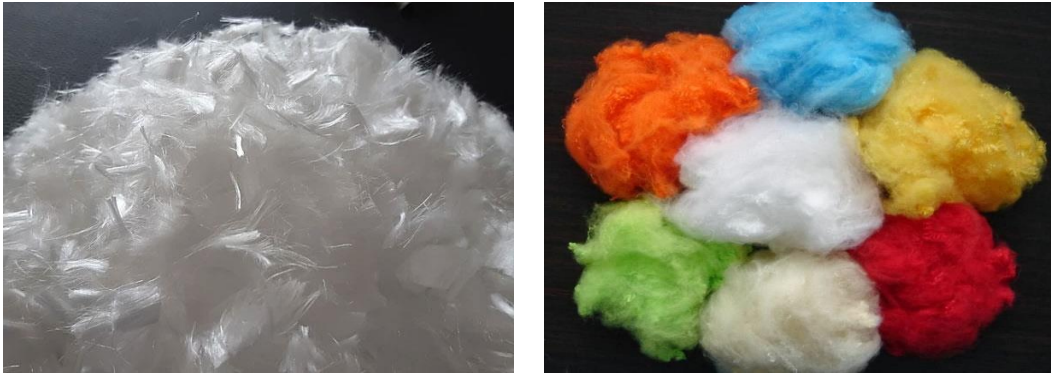
Öte yandan sıcaklığın yüksek olduğu hava şartlarında, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılan betonların geçirgenliğinin, sadece su kürlenmesi durumunda Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Basınç dayanımı farklı olmayan cürufu ve cürufsuz betonların korozyona karşı performansı bakıldığında, cüruf miktarının artmasıyla karbonatlaşma derinliği ile korozyon hızı ve aynı zamanda potansiyelinde önemli ölçüde azalmaya neden olduğu belirtilmiştir (Saran vd. n.d.). Bununla birlikte cürufunun betonda kullanım alanları şunlardır (Siddique 2008);

- Betona gelişmiş işlenebilirlik, pompalanabilirlik ve sıkıştırma özellikleri kazandırmak.
- Artan dayanım gücü ve dayanıklılık özellikleri.
- Betonun geçirgenliğini azaltmak.
- Klorür penetrasyonuna karşı yüksek direnç.
- Sülfat saldırısına karşı yüksek direnç göstermek.
- Çok düşük hidrasyon ısısı.
- Kimyasal olarak daha istikrarlı.
- Çiçeklenmeyi önlemek.
- Beton yapıların yaşam döngüsünün iyileştirilmesi.
- Bakım ve onarım maliyetlerinde azalma.
- Ömür boyu inşaat maliyetlerini düşürür.

- Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun üretimi, neredeyse sıfır CO₂ emisyonu içerir ve SO₂ ve NO_x emisyonu içermez.

2.3 Lifler

Lifler, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi bir boyutu diğer boyutuna göre çok uzun olan, doğal olarak oluşan veya insan yapımı, mukavemet ve elastisite modülleri aynı malzemenin ana şekli ile karşılaştırıldığında çok yüksek olan malzemeleri tanımlamaktadır. (Sarı 2013).



Şekil 2.7 Polipropilen ve sentetik lifler (İnt.Kyn.4), (İnt.Kyn.5).

Liflerin kullanım alanları ve farklı mekanik özellikleri bakımından birçok çeşiti vardır. Bu lifler genel olarak aşağıda verildiği gibi sınıflandırılmaktadır (Sarı 2013);

- Sentetik lifler (polimer lifler, metalik lifler, seramik lifler).
- Doğal lifler.

Sentetik liflere iyi bir örnek, plastik gıda kapları, halılar, battaniyeler ve kumaşlardan elde edilen termoplastik polimerler olan polipropilen (PP) ve poliamid (PA) liflerdir. Liflerin, yorulmaya karşı, fiziksel hasara karşı ve aşınma direncine karşı iyi bir dirence sahip olduğu belirtilmektedir. Ayrıca liflerin ısı yalıtımı özelliklerinin de tatmin edici seviyelerde olduğu bilinmektedir (Onochie ve Balkis 2021).

Doğal liflerin, otomobiller, demiryolu vagonları ve havacılık, askeri, inşaat endüstrileri, paketleme, tüketici ürünleri ve tavan kaplaması, bölme panoları vb. alanlarda sentetik

liflere alternatif olduğu kanıtlanmıştır. Doğal lifler, sentetik lif kompozitler yerine daha parlak kompozit malzemeler sunarken, her ikisi de benzer seviyede mekanik özelliklere sahiptir. Doğal lifler biyolojik olarak parçalanabilir ve sentetik liften daha düşük boşaltma hızına sahiptir. Doğal lifli polimer kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, kimyasal işlemlerle daha da geliştirilebilmektedir (Mahir vd. 2019) .

Le Duigou et al., tarafından yapılan çalışmaya göre; genel olarak, doğal lif ilavelerinin kompozitlerin sertliğini geliştirdiği ancak gerilme mukavemetlerini geliştirmediği gözlemlenmiştir.(Le Duigou vd. 2020).

Lifler yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu için betonda meydana gelebilecek çatlakların başlangıcını ve yayılmasını önler. Lifler, çatlak sonlarına bitişik olduklarından matristeki gerilmelerin üzerlerinden geçmesini ve böylece daha önce çatlamamış beton kesitlerinin de dayanımından yararlanılmasını sağlamaktadır (Sarı 2013).

Daha önceleri yapı malzemelerinde kullanılan lifler genellikle bitkisel kökenli olurken günümüzde polimer esaslı, cam ve çelik lifleri gibi lifler kullanım alanı bulmuştur. Alkali ortamlarda cam liflerin kullanılması durabilite açısından sorun teşkil ettiği için günümüzde beton içerisinde çelik ve polimer esaslı liflerin kullanılması tercih edilmektedir (Topçu vd. 2017).

Betonların mekanik özellikleri polimer lifli olmaları durumunda bağlayıcıların özelliklerinden etkilendikleri belirtilmektedir. Betonun performansının önemli yönde gelişebilmesi için polimerin doğru seçilmesi önemlidir (Akkaş vd. 2010).

Daha yüksek gerilme mukavemetine ve daha yüksek elastik modülüne sahip liflerin betonun mekanik performansını önemli ölçüde artırabileceğini ifade edilmektedir (Hannawi vd. 2016).

Betonun çekme dayanımı düşük olduğundan karışımlara lif ilavesi yapılması durumunda betonların çekme mukavemeti arttırılabilmektedir. lif katkılı betonlarda liflerin genel olarak; homojen, kısa ve süreksiz bir şekilde dağılması gerekmektedir. Romualdi ve

Batson tarafından beton kırılma mekanizmasının incelendiği çalışma, lif ile güçlendirilmiş betonlar konusunda yapılan ilk çalışmalardan biridir (Hussin 2018).

Yaygın olarak lif takviyeli kompozitler, lifler ve bir matristen oluşmaktadır. Lifler, takviye ve ana güç kaynağı iken, matris tüm lifleri şekil olarak birbirine yapıştırır ve takviye lifleri arasında gerilimleri aktarır. Lifler, yükleri uzunluk istikametinde taşır. Bazen, üretim sürecini kolaylaştırmak, kompozitlerin özelliklerini etkilemek ve / veya ürün maliyetini düşürmek için matrise dolgu eklenebilmektedir (Chandramohan ve Marimuthu 2011).

Lifin verimliliği, lifin hacim içeriği, lif uzunluğu, en - boy oranı ve gerilme mukavemeti gibi faktörlere bağlıdır. Bununla birlikte küçük miktarlarda lif ilavesi bile geliştirme aşamasında çatlakan betonun mukavemetinde önemli bir artış sağlamaktadır. Çatlak genişliğindeki azalma ve korozyona karşı artan direnç, olumsuz etkileri olabilecek kimyasalların ve suyun nüfuz etmesini durdurarak lif betonun uzun süreli hizmet verilebilirliğini geliştirmektedir (Saidani vd. 2016).

Genel olarak mukavemet ve elastisite modülü yüksek olan liflerden yapılan iplikler, yükleri taşımak için veya yüksek darbe kuvvetlerine karşı olduğu yerlerde kullanılmaktadır. İpliğin yüksek başlangıç modülüne sahip olması, başlangıç deformasyonuna olan dayanımını ve bükülme rijitliğini gösterir. Liflerin elastikiyet özellikleri de oldukça önemli bir parametredir; çünkü mukavemet ile birlikte elastikiyet, ürünün şok absorblama kapasitesini belirleyen değerlerdir. Liflerin elastik toparlanma yeteneği, özellikle spor giyim, elastik bantlar ve teknik ürünler (dağcılıkta kullanılan ipler, bungee jumping, şok absorblama ağları vb.) açısından önem taşır. Ayrıca elastik toparlanma yeteneğine sahip olan liflerden üretilen kumaşlar, çok defa kullanımlardan sonra da yüksek boyutsal stabilite gösterirler. Lifler veya lif kombinasyonları, üründen beklenen performansa bağlı olarak seçilirler. Karbon ve cam lifleri sürünme özelliği göstermez; aramid lifleri çok az sürünme özelliği gösterir; fakat polipropilen ve polietilen lifleri için sürünme ciddi bir sorundur (İnt.Kyn.6).

Çizelge 2.3'de görüldüğü gibi liflerin arasında cam lifleri en yüksek çekme

mukavemetine sahiptir. Bununla birlikte Polietilen liflerin çekme dayanımı diğer liflere göre daha düşük olduğu belirtilmektedir (Pekdemir 2020).

Çizelge 2.3 Lif tipleri ve özellikleri (Pekdemir 2020).

Lif tipi	Çekme dayanımı (MPa)	Young modülü (10^3 MPa)	En yüksek uzama (%)	Özgül ağırlık (gr/cm^3)
Akrilik	207 - 414	2.07	25 - 45	1.1
Asbest	552 - 966	82.8 - 138	0 - 0.6	3.2
Pamuk	414 - 690	4.83	3 - 10	1.50
Cam	1035 - 3795	6.90	1.5 - 3.5	2.50
Naylon	759 - 828	4.14	16 - 20	1.10
Polyester	725 - 862	8.28	11 - 13	1.40
Polietilen	0 - 690	0.14 - 0.414	0 - 10	0.95
Polipropilen	552 - 690	3.45	0 - 25	0.90
Suni İpek	414 - 621	6.90	10 - 25	1.50
Taş Yünü	483 - 759	69 - 117,3	0 - 0.6	2.70
Çelik	276 - 2760	200.10	0.5 - 35	7.80

2.3.1 Polipropilen Lif (PP)

Polipropilen lif (PP) teknik açıdan saf propilen gazının katalizör kullanılmasıyla basınç altına tutularak polimerize olup ortaya çıkmaktadır. Günlük hayatta polimerin hammaddelerinin yaklaşık yarısını bu malzeme teşkil etmektedir. Polipropilen hammadde olarak farklı ürünlerin üretiminde değişik oranlarda ve biçimlerde diğer malzemelerin içerisine katılmasıyla kullanılmaktadır. Bu sebeple, inşaat mühendisliğinde de çok geniş kullanım alanı görülmüştür (Pekdemir 2020).

PP, plastik ve tekstil sanayilerde geniş çaplı bir polimer olarak kullanılmaktadır. PP liflerin hafif, yüksek dayanım, kimyasal direnci yüksek, az maliyetli olduklarından dolayı tercih edilmektedir ve günümüzde oldukça geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bu alanlardan bazıları şunlardır; (Pekdemir 2020);

- Tekstil sanayilerinde kullanılması.
- Ambalaj torbalarında.
- İnşaat (sıcak su tesisat borusu, yağmur suyu olukları, cam lifi vb) sektöründe kullanılması.

- Ev araçları.
- Tampon ve çeşitli iç aksam.
- Barajlarda yüksek dayanımlı ve geniş çaplı boruların yerine kullanılması.
- İnşaat mühendisliği malzemesi olarak kullanılması (lif).

Polipropilen lifler hem tekil hem de hamur halde bulunur. Bu tür lifler uzunluk olarak 3 - 50 mm arasında değişmektedir. Genel olarak kısa lifler hamur, uzun lifler tekil şekilde bulunur. Polietelen hamurunun dayanımı polipropilen hamurunun dayanımından daha yüksektir. Polipropilen lifler alkenler dizisinden olup C_nH_{2n} esas bileşiminden oluşan parçacıkların polimerizasyon reaksiyon sonucunda meydana gelmektedir (Pekdemir 2020).

Polipropilen lifler aynı zamanda sentetik hidrokarbon polimerdir. Propilen lifler beton ve kompozitlerin erken dönemlerdeki çatlaklarını önler ve üç yönlü bir ağ kurarak betonun içindeki agregaların, yer çekimine karşı asılı kalmasını sağlar. Bu ağ betonun plastik büzülme esnasında çekme mukavemetini artırır. Ayrıca herhangi bir yangın esnasında, betonun içinde eriyerek, uçucu buhar basıncı yaratır ve böylece betonun patlama eğilimini engeller (İnt.Kyn.7).

Polipropilen liflerin avantajları / özellikleri şunlardır;

- Yüksek bağlayıcılık özelliği.
- Sorunsuz karıştırma.
- Alkali direnci.
- Yüksek aderans yüzeyi inceliğinden ve özel yüzey dokusundan dolayı, beton veya harç içinde kolayca dağılması ve yoğun bir matris temin etmesi.
- Büzülme çatlakları ve terlemeyi azaltır.
- Aşınma direncini artırır.
- Yangın hasarına karşı betonun direncini artırır.
- Betonun su geçirimsizliğini artırır.
- Betonun donma - çözölmeye karşı direncini artırır.
- Betonun köşe ve kenarlarındaki kırılmalara karşı direncini artırır.

- Kalıp sökümü sırasında oluşan kırılmaları azaltır.
- Betonun kohezyonunu artırdığı için inşaatın hızını ve kalitesini artırır (İnt.Kyn.8).

Polipropilen lifler, herhangi bir doğal veya sentetik lif arasında en düşük termal iletkenliğe sahiptir (yün için 7.3'e kıyasla 6.0, viskon için 11.2 ve pamuk için 17.5). PP lifleri daha uzun süre daha fazla ısı tutar, giysilerde mükemmel yalıtım özelliklerine sahiptir ve hidrofobik doğası ile birlikte kullanıcıyı kuru ve sıcak tutar. Polipropilen lifler, 150 °C civarında bir yumuşama noktasına ve 160 - 170 °C'de erime noktasına sahiptir (İnt.Kyn.9).

Polipropilen lif düşük erime sıcaklığına sahiptir ve bu nedenle ütüleme (ütüleme, yıkama ve kurulama düşük ısıda yapılmalıdır) sırasında ekstra özen gerektirir. Önemli işlem ve modifikasyon haricinde imalattan sonra boyanması zor, PET ve Naylon ile karşılaştırıldığında zayıf esneklik, Polipropilen daha düşük olması nedeniyle sürünmeye uğrar (İnt.Kyn.10).

Polipropilen lifler yeni nesil kimyasal liflerdir. Geniş çapta üretilirler ve polyester, poliamidler ve akriliklerden sonra dördüncü büyük hacme sahiptirler. Dünyada yılda yaklaşık 4 milyon ton polipropilen lif üretilmektedir. Daha sonra, polipropilen lif daha da geliştirilmiş ve günümüzde lif takviyeli beton üretimi için kısa süreksiz fibrilize malzeme olarak veya ince tabaka bileşenlerinin üretimi için sürekli bir mal olarak kullanılmaktadır (Madhavi vd. 2014).

Polipropilen lifler inşaat uygulamalarında uzun yıllardır takviye maddesi olarak kullanılmaktadır. Betonda PP lif genel olarak çok farklı inşaat uygulamalarında özellikle zemin kat döşemelerinde kullanılır. PP lifler betonun eğilme dayanımını, basınç mukavemeti, yapışma mukavemeti, dinamik performansını etkili bir şekilde geliştirmiştir ve aşınmaya bağlı olarak su nüfuzünü ve kütle kaybını azaltırken, betonun yorulma ömrünü de uzatır. Polipropilen liflerin çimento matriksinde daha yoğun ankrajına fiziksel ve kimyasal modifikasyonla ulaşılır. Yeterli katkı maddesinin eklenmesi, liflerin matriste sürekli olarak sabitlenmesini sağlar. Bu, silika kompozitlerini oluşturmak ve yüklemek için deformasyon enerjisinin iletilmesi ve emilmesi ile ilgili olarak PP liflerinin

işlevselliğinin anlamlı bir şekilde gelişmesine yol açar (Horbanová vd. 2010).

Betona eklenen takviye lifleri çatlak büyümesine engellemek ile birlikte kompozitin sünekliğini arttırmaktadır. Ancak yapısal elemanların statik olarak gerekli takviyesinin yerini alamazlar. Polipropilen liflerin geometrisinin plastik büzülme nedeniyle betonun çatlama üzerindeki etkisini araştırıldığında, polipropilen lif takviyesinin betondaki meydana gelen çatlakları sınırlamada çok etkili olduğu bulunmuştur. Polipropilen liflerin eklenmesiyle genellikle genişlik ve çatlak sayısının azaldığını öne sürerler. Onlara göre daha ince lifler kalın liflerden daha etkilidir ve daha uzun lifler ise kısa liflere göre daha etkilidir (Saje vd. 2011).

PP liflerinin gelişimi, yeterli miktarda temel hammadde, düşük fiyat, kolay lif oluşturma ve ev tekstili, teknik tekstil ve giyim alanlarında geniş uygulama sağlayan fizikomekanik özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Jambrich ve Hodul 1999).

PP'nin işleme sırasındaki en önemli termal analiz parametresi erime noktasıdır. Çoğu PP için bu 170 °C civarındadır. Zincirdeki kısa etilen zinciri dizileri kristal boyutunu sınırlayacaktır. Enjeksiyon kalıplamada eriyik sıcaklıkları 220 - 250 °C arasındadır ve kalıp sıcaklığı oda sıcaklığı ile 65 °C arasındadır. Kalıp sıcaklığı, polimerin soğuma oranını, dolayısıyla ürünün son kristalliğini belirleyecektir. Ekstrüzyonda, boğaz ve ön kısım arasındaki sıcaklık 200 - 230 °C arasındadır, ancak döküm filmler ve lifler için bu sıcaklık daha yüksektir. lif üretiminde eriyik sıcaklıkları enjeksiyonlu kalıplamadan biraz daha yüksektir, bu nedenle ürün bozulmaya karşı daha da hassastır.(Menyhárd vd. 2020).

Bu tür lifler (polipropilen lifler) genellikle plastik atık ürünlerden elde edilir. Bu lifin kullanımı ile çekme çatlaklarının oluşması engellenebilir ve ayrıca toprak malzemesinin ısı iletkenliğinin, kırılabilirliğinin ve ayrıca toplam ağırlığının azalmasına yardımcı olur. (Onochie ve Balkis 2021) tarafından yapılan çalışmada sürdürülebilir toprak üretimi için , özellikle basınç ve eğilme mukavemeti olmak üzere mukavemet özelliklerini daha da geliştirmek için Alker'i stabilize etmek için % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 polipropilen lif oranlarının kullanımını kapsamaktadır. Alker numunelerinin üretiminde PP lif, alçı ve kireç gibi atıkların kullanılması nedeniyle mekanik özelliklerinin üzerinde etkisi

olumusuz olmamıştır (Onochie ve Balkis 2021).

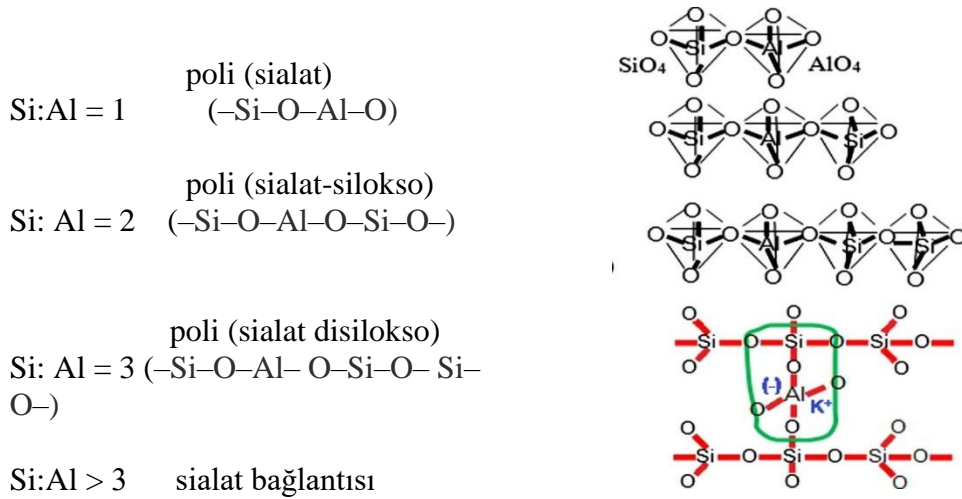
2.4 Geopolimerler

Geopolimer terimi, 1978'de Fransız Profesör Davidovits tarafından inorganik moleküllerin zincirleri veya ağları ile karakterize edilen geniş bir malzeme yelpazesini temsil etmek için icat edilmiştir (Aleem ve Arumairaj 2012). "Geo" ön eki, bağlayıcı oluşturmak için polikondansasyon reaksiyonu sonucu alkali bir çözelti ile reaksiyona giren jeolojik esaslı inorganik alüminosilikatları temsil etmektedir (Yun-Ming vd. 2016). Geopolimerler, metakaolinit gibi termal olarak aktive edilmiş olan doğal malzemelere veya silisyum (Si) ve alüminyum (Al) kaynağını sağlayan uçucu kül veya cüruf gibi endüstriyel yan ürünlere bağlıdır (Aleem ve Arumairaj 2012).

Geopolimer araştırmacıların araştırma konusu ve ilgi odağı haline gelen ve bu nedenle birçok bilimsel çalışma ortaya çıkaran iki ana neden vardır. Birincisi, geopolimer çevre dostu bir malzemedir. İkincisi, endüstriyel uygulamalar için yüksek potansiyel veren fiziko - kimyasal özelliklerine sahiptir (Majdoubi vd. 2021).

Normal Portland çimentosu yüksek düzeyde mühendislik performansları ile yüzyıllardır yaygın olarak kullanılmasına rağmen, normal Portland çimentosu üretimi dünya çapında CO₂ salımına % 5 - 8 oranında katkıda bulunur. Geopolimer malzemeleri, normal Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılması ümit verici potansiyeli nedeniyle son on yılda artan bir ilgi çekmiştir (Li vd. 2019). Geopolimerler, düşük sıcaklıklarda sentezlenen çevre dostu malzemelerdir. Çimento üretimi ile karşılaştırıldığında, sentezleme işlemi için gereken enerji miktarı ve tüketilen CO₂ hacmi oldukça düşüktür. Sentez olayları, alkali bir ortamda alüminosilikatlar ve polisilikatlar arasındaki reaksiyon sonucu meydana gelirken yapıları, Al⁺³, K⁺¹, Mg⁺² ve diğerleri gibi iyon değiştirilebilen katyonlarla dengelenmektedir (Gasca-Tirado vd. 2017). Xu ve Deventer, tarafından geopolimerlerin, tüm oksijen atomlarını paylaşarak üç boyutlu formda dönüşümlü olarak birbirine bağlanmış silisyum ve alüminyum tetrahedral ile polimerik Si-O-Al çerçevesi olduğunu belirtilmektedir (Kumar ve Revathi 2016). Geopolimerler kimyasal bileşimi zeolitlere benzerlik gösterirken, benzer hidrotermal

sentez koşulları gerektirmektedir. Bununla beraber, reaksiyon süreleri oldukça hızlıdır ve son derece kristal ve düzenli zeolitik yapılarla karşılaştırıldığında amorf ila yarı kristal matris sonuçları görülmektedir (Xu ve Van Deventer 2000). Katı ve aktivatör bileşenler birbiri ile temas kurduğunda, suya dirençli olan amorf tan tam kristal olmayan alüminosilikata değişen bir alüminosilikat ağının oluşması sonucu sertleşme meydana gelir. Bu nedenle geopolimerler, zeolitlerin amorf öncüleri olarak da değerlendirilebilir (Buchwald vd. 2011). Şekil 2.8’de görüldüğü gibi geopolimerler Si / Al oranına bağlı olarak poli (sialat), poli (sialat-silokso) ve poli (sialat-disilokso) olmak üzere üç temel formda tanımlanmaktadır (Yun-Ming vd. 2016).



Şekil 2.8 Siloxo Si - birimlerinin sayısına göre farklı geopolimer sistemler (Yun-Ming vd. 2016).

Rui Wang ve arkadaşları yaptığı çalışmada, moleküler modelinde Al atomunun azalması ile geopolimer jelinin enerjisi arttığı, enerji ve sıcaklığın denge durumuna ulaşmak için daha uzun bir süreye ihtiyacı duyulmaktadır. Dolayısıyla $SiO_2/Al_2O_3 = 1$ olan geopolimerin daha düşük enerji durumuna ulaştığını ve moleküler yapının daha kararlı olduğunu göstermiştir. Radyal dağılım fonksiyonu (RDF) analizine göre, SiO_2/Al_2O_3 oranının yükselmesiyle birlikte geopolimerin Si-O ve Al-O bağlarının ortalama bağ uzunlukları artmıştır. Atomlar arasındaki etkileşimin zayıflamasına ve moleküler yapısının daha kolay parçalanmasına neden olduğu görülmüştür. Geopolimer için simüle edilmiş elastik modülün hesaplama sonuçlarına göre, SiO_2/Al_2O_3 oranı arttığında, elastik modülü kademeli olarak azalmıştır (Wang vd. 2020).

Genel olarak geopolimerler, alüminosilikatın konsantre alkali hidroksit veya alkalin silikat vasıtasıyla ile karıştırılıp oluşturulan inorganik polimerlerdir. Oda sıcaklığında veya 20 - 100 °C aralığında biraz daha yüksek sıcaklık kütleme işlemiyle takip edilmektedir. Geopolimer oluşumunun reaksiyonuna geopolimerizasyon reaksiyonu denilmektedir (Yun-Ming vd. 2016).

Geopolimerizasyon teknolojisinde katı hammadde olarak kaolinit, feldispat gibi çeşitli alüminosilikat malzemeler, uçucu kül, metalürjik cüruf, maden atıkları vb gibi endüstriyel katı kalıntılar kullanılmaktadır. Alüminosilikat kaynaklarının reaktivitesi, kimyasal yapılarına, mineralojik bileşimlerine, morfolojilerine, inceliğine ve camsı faz içeriğine bağlıdır. Alüminosilikat malzemeleri aktive etmek için sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) gibi alkali çözeltiler kullanılmaktadır. NaOH ile KOH arasında potasyum hidroksit daha yüksek bir alkalinite seviyesine sahiptir. Ancak gerçekte, NaOH'nin silikat ve alüminat monomerleri serbest bırakmak için daha büyük kapasiteye sahip olduğu bulunmuştur (Singh vd. 2015).

Ayrıca, tek başına NaOH kullanımı, özellikle düşük NaOH konsantrasyonunda, biraz daha düşük mukavemetli bir geopolimer ile sonuçlanır, bununla birlikte Na_2SiO_3 kullanımı, aslında alüminosilikat kullanımına bağlı olarak mukavemette önemli bir artış sağlamaktadır (Tekin 2016).

Geopolimer yapımında kullanılan hammadde olan alüminosilikatlar, alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) açısından zengindir, yer kabuğunda bol miktarda bulunmaktadır. Bu kaynak malzemeler, bağlayıcı sistemde Al^{+3} ve Si^4 iyonlarının önemli bir kaynağı olarak geopolimer oluşumunda önemli katkı bulunmaktadır (Yun-Ming vd. 2016) .

Dolayısıyla, silika moleküllerinin zincir bağlarından oluşmuş silokson ya da silikat moleküllerinin (AlO_4) alüminat molekülleri ile oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile elde edilen polisialatların keşfi ile geopolimer kimyasının temelleri atılmıştır (Görür 2015).

Geopolimerizasyon işlemi bir füzyon sinterleme işleminden ötürü polimerleşme basamağıdır. Bununla birlikte monomerlerin Si–Al–Mg–Ca–P–K–Na gibi mineral molekülleri içermektedir. Geopolimerler özellikle bu monomerlerin polikondensasyon işlemi neticesinde kovalent kompleks zincir bağlı polimerler kurması ile meydana gelir. Geopolimerlerin basit formülasyonu $(Xq[-(SiO_2)_a-AlO_2]_q.nH_2O)$ şeklindedir, X metal kationu (Ca^{+2} , K^+ or Na^+), a 1, 2 veya 3, q ise çoklu yoğunlaşma derecesidir (Top 2019).

Normal Portland çimentosunun aksine, geopolimerler yapısal mukavemetlerini kalsiyum silikat hidrat jelinin gelişiminden değil polikondensasyondan alırlar. Davidovits'e göre, geopolimerler söz konusu olduğunda "bir ton bağlayıcı başına yaklaşık 0.184 ton CO_2 üretilmektedir (Chowdhury vd. 2020).

Genel olarak, geopolimerizasyon, kürlenme süresi ve kürlenme sıcaklığı ($90\text{ }^\circ C$ 'ye kadar) ile artar. Daha yüksek alkali konsantrasyonları geopolimerizasyonu artırır, halbuki alkalilerin türü de süreci etkilemektedir. H_2O-Na_2O , Su / geopolimer, Na_2O / SiO_2 oranlarının artmasıyla, basınç dayanımındaki meydana gelen düşüşler daha az geopolimerizasyona işaret etmektedir. Geopolimerizasyon sürecini etkileyen önemli faktörlerden bazıları aşağıda verilmiştir (Bahadur 2018);

- Alüminosilikat içeren hammadde türleri.
- Katı hammaddelerin yüzey alanı.
- Hammaddede camsı faz içeriği.
- Alüminyum ve reaktif silikon miktarı.
- Uçucu külde demir, kalsiyum ve inert partiküllerin varlığı.
- Kür sıcaklığı ve basıncı.
- Kürlenme süresi.
- Kürlenme türü (geleneksel ısıtma veya mikrodalga ısıtma).
- Alkali türü ve konsantrasyonu.
- Alkali sıvı-hammadde oranı.
- H_2O-Na_2O molar oranı.
- Su / geopolimer katı oranı.

Si / Al oranı geopolimer bağlayıcıların özellikleri üzerinde asıl etkiye sahip olmasıyla, aşağıda verilen birkaç faktöre bağlıdır (Buchwald vd. 2011);

- Farklı hammaddeler, tepkimeye girme zarfında Si / Al oranının genel değişimiyle ile nitelendirilmektedir. Bu nedenle, gözenekli solüsyonlerde (alkali çözelti) ortaya çıkan Si / Al oranı değişir. Farklı Si / Al oranlarının sertleşmiş bağlayıcının mukavemetini ve diğer özelliklerini nasıl etkilediğini kestirmek, bir malzemede farklı Si / Al oranları (aynı ölçüde ve çözülme kinetiği) kullanılmadığı sürece zordur. Bu nedenle, zaman zaman alüminosilikat jel modelleri üzerine araştırmalar yapılmıştır.
- Kısaca, bir hammadde karışımı Si / Al oranını değiştirir, tüm Si / Al oranı yerel olarak ve zamanla değişmektedir.
- Si / Al oranı, genel olarak sertleştirilmiş geopolimerin mukavemetini artıran silikat çözeltilsinin eklenmesiyle değişebilir. Bu çoğunlukla geopolimer matrisindeki mikro yapısal değişikliklerinden kaynaklanmaktadır.

Geopolimerlerin sentezinde en yaygın kullanılan iki alüminosilikat öncüsü metakaolin ve uçucu kömür külüdür. Metakaolin, kaolinit minerali $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$, çok az miktarda kuvars ve diğer mineraller içeren doğal olarak oluşan bir kil olan kaolinin termal ayrışmasıyla elde edilen susuz bir alüminosilikattır. Özellikle endüstriyel yan ürünlerinin ve atıkların farklı amaçlarla uygulanabilecek malzemelerin sentezi için kullanılması önemlidir. Örneğin, uçucu kül de dahil olmak üzere kömür yakma ürünlerinin küresel üretimi 2010 yılında 780 milyon tondu ve kullanım oranı % 50 civarındaydı. Bu nedenle, uçucu kül bazlı geopolimerlerin hazırlanması, yan ürünün kaldırılması için sürdürülebilir bir yol sağlamaktadır. Ek olarak dünya çapında bir zorluk olmaya devam etmektedir. Geopolimer sentezi için kullanılan diğer endüstriyel yan ürünler; kırmızı çamur, cüruf ve biyokütle uçucu külüdür (Rožek vd. 2019).

2.4.1 Geopolimerlerin Kullanımı

Geopolimer malzemeler, çok sayıda parametreye bağılı olmak üzere, yüksek mukavemet, yangına dayanıklılık, asit direnci, ısı kararlılık, iyi toksik ve tehlikeli madde hareketsizleştirme kapasitesi gibi önemli özelliklere sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu parametreler genel olarak şunlardır: öncüllerin tipi, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı, alkali aktivatör konsantrasyonu, kurlenme süresi ile kür sıcaklığı, su/katı oranı ve pH değeri. Bu özelliklere sahip olduğundan geopolimer malzemeler dekoratif taş eserleri, ısı yalıtımı, düşük refrakter malzemeler, dökümhane uygulamaları, çimento, uçak içi ve otomobilleri güçlendiren yüksek teknoloji altyapılar için kompozitler, yüksek teknoloji reçine sistemleri, radyoaktif ve toksik atık muhafazası gibi alanlarda geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Mabroum vd. 2020).

Çimento betonu ateşe maruz kaldığında, kalsiyum hidroksit grupları daha düşük bir sıcaklıkta ayrışmaya başlar. Normal çimento betondaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 300 – 400 °C'de ayrışır; CaCO_3 700 °C'de ayrışır ve 800 °C'de erir. Temuujin ve diğerleri tarafından yapılmış çalışmalarda UK ve MK geopolimer kaplamalar 800 °C'de iyi alev direncinde mükemmel olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca, Cheng ve Chiu, MK geopolimer panelinin düşük ısı transfer verimliliğine sahip olduğunu kanıtlamışlardır (He vd. 2020).

Geopolimerler, çevre dostu ve Portland çimentosunun ikamesi olma beklentisiyle inşaat ve yapı malzemeleri olarak kullanılabilir. Geopolimerle stabilize edilmiş agrega bazları, esnek kaplama uygulamalarında stabilize edici etkenler olarak de kullanılabilir. Geopolimerlerin bir diğer önemli uygulama alanı, gözenekli yapıları ve alüminyum tetrahedra üzerinde bulunan negatif yüklerin varlığından kaynaklanan ağır metal ve boyaların adsorpsiyonun yanı sıra mekanik stabilite, maliyet etkinliği, çevre dostu olmaları ve yüksek verimlilikleridir (Rožek vd. 2019).

Bununla birlikte düşük maliyetleri, düşük sera gazı emisyonları ve sentezleri sırasında düşük enerji tüketimlerinde çok daha fazlasıyla ortaya çıkıyor. Bu avantajlar ve özelliklerle geopolimerler, çimento tuğlaları, seramikler, kompozitler, plastikler ve diğer birçok geleneksel mineral bazlı malzemeler gibi çeşitli inşaat malzemelerinin yerini

alabilirler (Aziz vd. 2021).

Uçucu kül esaslı geopolimerlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri ;uçucu külün ince partikül içeriği (43 µm'den küçüğü) geopolimerin basınç dayanımına önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Buna göre her durumda, en yüksek harç basınç dayanımı, maksimum ince parçacık miktarına sahip olan uçucu külü göstermiştir (Komljenović vd. 2010).

Borges vd., çelik ve polipropilen liflerle takviye edilmiş uçucu kül bazlı geopolimer kompozitlerin eğilme davranışına ilişkin bir çalışmada, ısıyla kurleminin makrolif takviyeli geopolimer kompozitlerin mukavemet özelliklerini geliştirdiğini ve polipropilen liflerin ilavesi basınç dayanımı bakımından önemli bir gelişme göstermediğini bulmuştur. Ancak dolaylı çekme ve eğilme dayanımı açısından. küçük bir gelişme gösterdiği de ifade edilmiştir (Al-Mashhadani vd. 2018).

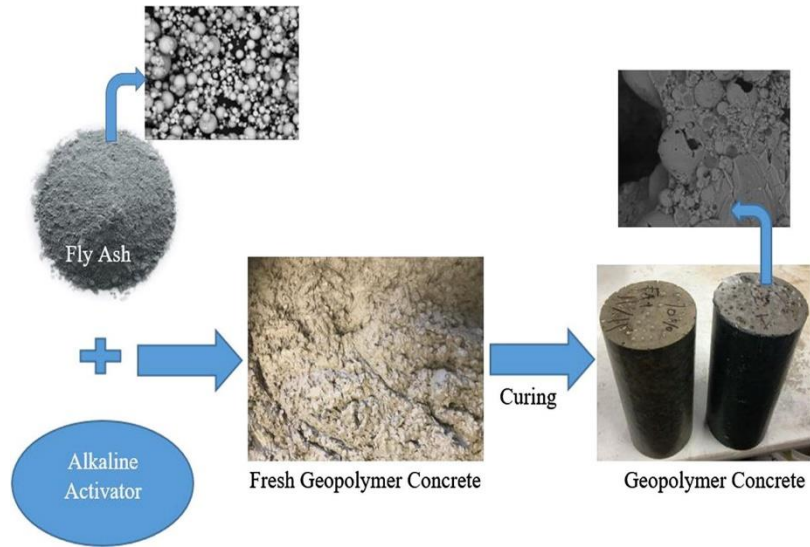
Geopolimer betonun bileşenleri, bir bağlayıcı malzeme, aktivatörler, agregalar ve gerekli katkılardan oluşur. Geopolimer betonda kullanılan olan malzemeler aşağıda sırayla verilmiştir (Chowdhury vd. 2020);

- Çimento esaslı malzemeler .
- Alkali aktivatörler (NaOH, KOH, Na₂SiO₃, K₂SiO₃); alkali aktivatörler tarafından polimerizasyon reaksiyonunun hızında ve dolayısıyla betonun mukavemet kazanımında hayati bir rol oynamaktadır.
- İri Agrega
- İnce agrega
- Katkılar; Süperplastikleştiriciler, betonun işlenebilirliğini arttırmak için kullanılır.

Geopolimer betonun basınç dayanımı, bileşenlerin çeşitli faktörleri ve oranları tarafından yönetilir, yine de geopolimer betonun basınç dayanımının, normal Portland çimento betonuna göre yüksek veya benzer olduğu söylenebilir. Geopolimer betonun elastisite modülü, aynı basınç dayanımına sahip normal bir Portland çimento betonunun % 90'i olarak bulunmuştur. Aktivatör çözeltilerinde silikat iyonlarının varlığı nedeniyle bir

geopolimer betonunun esneklik modülü artar (Chowdhury vd. 2020).

Geçmişte geopolimer beton, çeşitli avantajları nedeniyle araştırmacıların dikkatini çekmiştir; yan ürün, kullanımı, CO₂ emisyonlarının azaltılması, erken yaşta mukavemet artışı, ve yeni alkali aktif çimentolu malzemeler. Son on yılda, uçucu kül veya granüle yüksek fırın cürufundan yapılan geopolimer macunun özelliklerini belirlemek için geniş araştırmalar yapılmaktadır. Geopolimer beton, daha yüksek basınç dayanımı nedeniyle altyapı geliştirmesinde eşsiz özelliklere sahiptir. Düşük gerilme mukavemeti nedeniyle gevrek bir davranışa sahip olmasına rağmen, bu sorunu çözmek için lif eklemek umut verici bir çözümdür. Hızla yayılan ve yük taşıma kapasitesinde hızlı bir kayba neden olan tek büyük bir çatlak bulunan geopolimer betonun aksine, lifli geopolimer beton, pik sonrası performans, tokluk ve darbe dayanımında önemli bir artış sergilemektedir (Asrani vd. 2019). Uçucu kül bazlı geopolimerlerin / beton oluşumunun şematik gösterimi Şekilde 2.9'de gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Uçucu külün geopolimerlere / betona dönüştürülmesi (Farhan vd. 2019).

Silika ve alüminanın varlığı, geopolimer betonun bağlayıcılık mukavemetini artırır. Çeşitli araştırma çalışmaları, geopolimerik reaksiyonlarla oluşturulan malzemelerin yüksek mekanik ve dayanıklılık özelliklerine ve ayrıca sıcaklık ve kimyasal reaktiflere karşı gelişmiş dirence sahip olduğunu göstermiştir. Geopolimer betonla ilgili en büyük sorunlardan biri kürlenme sıcaklığıdır. Bu malzemeler 60 – 90 °C arasındaki sıcaklıklarda kürlenirse daha iyi mukavemet geliştirir. Molar oranı ve NaOH konsantrasyonu da

geopolimer betonunun mukavemet gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Geopolimer betonun tasarım karışımı için araştırmacılar tarafından farklı yaklaşımlar da geliştirilmiştir (Gupta 2021).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Malzemeler

Geopolimer kompozit malzemelerin hazırlanmasında hammadde olarak; uçucu kül (UK) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) kullanılmıştır. Karışımlarda UK ve ÖGYFC, sodyum hidroksit (NaOH) ve iki farklı modül değerlerine sahip sodyum silikat (Na_2SiO_3) (SS) solüsyonu kullanılarak aktifleştirilmiştir. Bununla birlikte geopolimer karışımlarında 3 farklı oranda ve toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında polipropilen lif katkısı kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu Bolu Çimentodan, uçucu kül ise Kolsan Hazır Beton (Afyonkarahisar) tesislerinden temin edilmiştir. Hazır beton tesisinden elde edilen UK, Tunçbilek termik sanitarinden getirilen uçucu küldür. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun özellikleri Çizelge 3.1’de, uçucu küle ait kimyasal özellikler ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

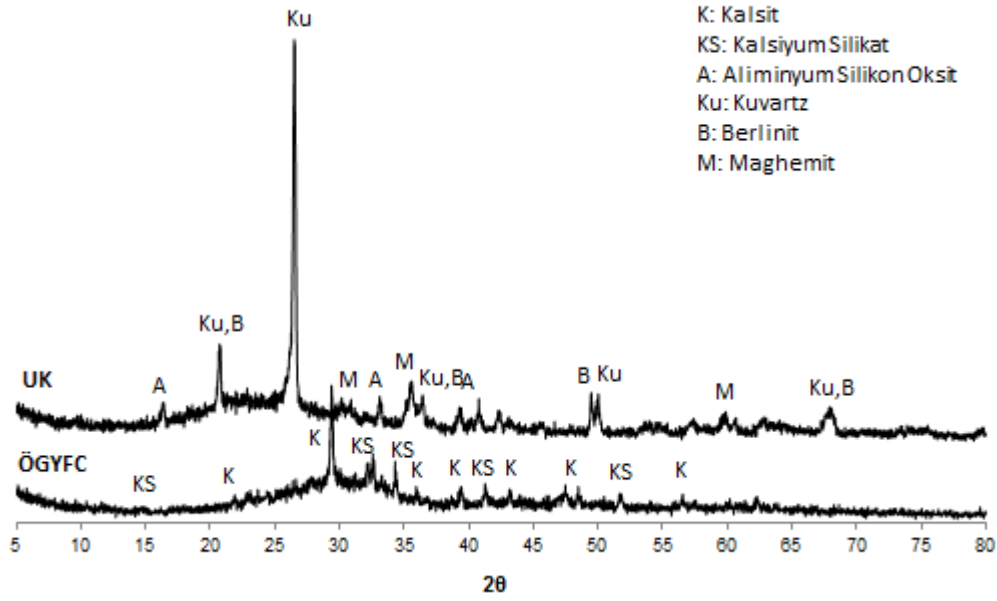
Çizelge 3.1 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun özellikleri (İnt.Kyn.11).

CaO (%)	33.0
SiO ₂ (%)	34.0
Al ₂ O ₃ (%)	14.0
Fe ₂ O ₃ (%)	4.0
MgO (%)	7.0
Yoğunluk (gr / cm ³)	3.0
S.Yüzey (cm ² / gr)	5000
Aktivite (%)	87.0

Çizelge 3.2 Uçucu küle ait XRF kimyasal analiz değerleri (%) (Şinik 2019).

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	LOI
UK	54.37	21.86	9.59	4.09	0.32	2.39	0.71	3.18	1.52

Geopolimer üretiminde kullanılan hammaddelerden olan UK ve ÖGYFC’na ait XRD grafikleri Şekil 3.1’de verilmiştir. Geopolimer üretiminde kullanılan uçucu küllerde; alüminyum silikon oksit, kuvars, berilit ve maghemit gibi mineraller tespit edilmiş olup, ÖGYFC bünyesinde ise kalsiyum silikat ve kalsit gibi mineraller tespit edilmiştir.



Şekil 3.1 Kullanılan malzemelerin XRD grafikleri.

Örneklerin üretiminde kullanılan polipropilen lif “Atlas1” firmasından temin edilmiştir. İlgili lifler soğuk çekmeli çelik telden üretilmektedir. Geopolimer örneklerin hazırlanmasında kullanılan polipropilen (PP) liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir (İnt.Kyn.12).

Çizelge 3.3 PP’nin genel özellikleri (İnt.Kyn.12).

Standart	ASTM CIII6 CE 14889-2BBA 92 / 2830
Görünüm	Doğal beyaz lif
Tip	Polipropilen
Safılık	% 100 Saf
Yoğunluk	0.91g / cm ³
Uzunluk	6 mm
Kesit& Çap	Dairesel, 18 µm
Çekme mukavemeti	450 - 700 N / mm ² (MPa)
Elastisite modülü	3000 - 3500 N/mm ² (MPa)
Erime noktası	162 °C

Geopolimer malzemelerin hazırlanmasında kullanılan NaOH ve Sodyum Silikat solüsyonlarına ait özellikler ise Çizelge 3.4’de tedarikçi firma tarafından beyan edilen bilgiler aracılığıyla verilmiştir.

Çizelge 3.4 Geopolimer kompozit örneklerinde kullanılan aktivatörlerin kimyasal bileşim oranları

Sodyum silikat solüsyonu (2 Modül)	Sodyum silikat solüsyonu (3 Modül)	Sodyum hidroksit (NaOH)
Na ₂ O: 11.50 - 13.50 (%)	Na ₂ O:7.4 - 9.4 (%)	M:40
SiO ₂ : 24.0 - 26.0 (%)	SiO ₂ : 24.6 - 28.0 (%)	NaOH ≥ 99.0 (%)
Yoğunluk:1.38 - 1.42 (g/cm ³)	Yoğunluk: 1.33 - 1.36 (g/cm ³)	

3.2 Numunelerin Hazırlanması

Karışımların hazırlanmasında hammadde olarak uçucu kül (UK) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC), alkali aktivatör olarak ise 10 M sodyum hidroksit (NaOH) ve iki farklı silikat modülüne (2 ve 3 modül) sahip sodyum silikat (Na₂SiO₃) kullanılmıştır. Sodyum hidroksit (NaOH) peletleri, malzemelerin hazırlanmasından 24 saat önce saf su kullanılarak çözelti haline getirilmiştir. NaOH çözeltisi kuru karışımlara eklenmeden önce sodyum silikat solüsyonu ile karıştırılarak kuru karışımlara ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlara ayrıca 6 mm uzunluğunda PP lifleri ağırlıkça % 0.5, % 1.0 ve % 1.5 oranlarında eklenmiştir. Tüm bileşenler otomatik programlanabilir çimento mikserinde 4 dakika süreyle karıştırılmıştır. Geopolimer kompozit malzeme örnekleri 4 x 4 x 16 cm boyutlarında metal kalıplarda ve titreşimli sehpa kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin ısı kütür işlemlerinin yapılabilmesi için laboratuvar tipi etüvde 90 °C sıcaklıkta 5 saat süre ile ısı kütürüne tabi tutulmuştur (Şekil 3.2). Kütür işleminin tamamlanmasından sonra örnekler 24 saat laboratuvar ortamında bekletildikten sonra kalıplardan alınmış ve testlerin yapılacağı güne kadar (7 gün) yine laboratuvar ortamında bekletilmiştir.



Şekil 3.2 Hazırlanan örnekler.

Çizelge 3.5 Geopolimer kompozit numunelerindeki malzemelerin karışım miktarları (3 modül).

Numune	UK (%)	UK (gr)	ÖGYFC (gr)	PP lif (gr)	NaOH (10 M)	SS (3 modül)
FR1	100	1000	-	-	150	300
FR2	75	750	250	-	150	300
FR3	50	500	500	-	150	300
FR7	25	250	750	-	150	300
FR9	0	-	1000	-	150	300
FUK5	100	1000	-	5	150	300
FUK10	100	1000	-	10	150	300
FUK15	100	1000	-	15	150	300
FUK75	75	750	250	5	150	300
FUK710	75	750	250	10	150	300
FUK715	75	750	250	15	150	300
FUK55	50	500	500	5	150	300
FUK510	50	500	500	10	150	300
FUK515	50	500	500	15	150	300
FUK25	25	250	750	5	150	300
FUK210	25	250	750	10	150	300
FUK215	25	250	750	15	150	300
FY5	0	-	1000	5	150	300
FY10	0	-	1000	10	150	300
FY15	0	-	1000	15	150	300

Çizelge 3.6 Geopolimer kompozit numunelerindeki malzemelerin karışım miktarları (2 Modül).

Numune	UK (%)	UK (gr)	ÖGYFC (gr)	PP lif (gr)	NaOH (10 M)	SS (2 modül)
FR4	100	1000	-	-	150	300
FR5	75	750	250	-	150	300
FR6	50	500	500	-	150	300
FR8	25	250	750	-	150	300
FR10	0	-	1000	-	150	300
2FUK5	100	1000	-	5	150	300
2FUK10	100	1000	-	10	150	300
2FUK15	100	1000	-	15	150	300
2FUK75	75	750	250	5	150	300
2FUK710	75	750	250	10	150	300
2FUK715	75	750	250	15	150	300
2FUK55	50	500	500	5	150	300
2FUK510	50	500	500	10	150	300
2FUK515	50	500	500	15	150	300
2FUK25	25	250	750	5	150	300
2FUK210	25	250	750	10	150	300
2FUK215	25	250	750	15	150	300
2FY5	0	-	1000	5	150	300
2FY10	0	-	1000	10	150	300
2FY15	0	-	1000	15	150	300

Geopolimer kompozit numunelerinde yer alan malzemelerin miktarı ve karışım oranları Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’da verilmiştir. Numunelerin kodlamaları öncelikle karışımında bulunan UK’nın yüzdesine ve ardından ilave edilen PP lifin miktarına göre yapılmıştır. Ayrıca referans örnekler haricindeki geopolimer kodlarının önünde bulunan “2” rakamı, 2 modül SS solüsyonu ile aktifleştirilen örnekleri temsil etmektedir.

3.3 Fiziksel ve Mekanik Testler

Kür işlemi tamamlanan tüm örneklerin fiziksel özelliklerini belirlemek için Arşimet prensibine göre; görünür porozite, su emme, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri tespit edilmiştir. Örneklerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sırasında; örnekler su tankından alınarak, su içerisinde asılı ağırlıkları ve suya doygun yüzey kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Ardından ilgili örnekler etüvde + 105 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Bu değerler yardımıyla örneklerin porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri TS EN 772-4’e (TS EN 772-4, 2000) göre su emme değerleri ise TS EN 771-1’e göre (TS EN 771- 1, 2005) hesaplanmıştır.

Mekanik özelliklerden olan eğilme ve basınç dayanımı deneyleri ise TS EN 196-1 (TS EN 196-1, 2009) nolu standarda göre otomatik bilgisayar kontrollü basınç presinde, 7 günlük örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm testlerde her bir seriden üç örneğin ortalaması alınarak değerler elde edilmiştir.



Şekil 3.3 Basınç dayanım testi.

3.4 Durabilite Deneyleri

Tüm örneklerin fiziksel ve mekanik özellikleri bir arada değerlendirildiğinde en ideal geopolimer kompozit karışımının % 50 UK + % 50 ÖGYFC olduğu kanaatine varılmıştır. Dolayısıyla geopolimer kompozitlerin durabilitesini belirlemek için; % 50 UK + % 50 ÖGYFC içerikli karışımlardan üretilen örnekler donma-çözünme, sülfat ve yüksek sıcaklık deneylerinde kullanılmıştır.

3.4.1 Donma-çözünme deneyi

Donma – çözünme olayı bir malzemeyi etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu çalışmada donma – çözünme deneyi için -20°C 'ye kadar soğutma yapabilen dondurucu dolap kullanılmıştır. Dondurucu dolapta örnekler 2 saat bekletilmiş ardından örnekler dolaptan çıkartılarak $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki suda 1 saat süreyle çözülmeye bırakılmıştır. 25 donma - çözünme döngüsü sonunda örneklerde meydana gelen ağırlık kayıpları ve basınç dayanımı değişimleri deneysel olarak saptanmıştır. Örneklerin ağırlık kayıplarını bulmak için donma - çözünme döngüsüne girmeden önce ve girdikten sonraki ağırlıkları alınarak kıyaslanmıştır. Şekil 3.4'de, dondurucu dolapta bekletilen örnekler görülmektedir.



Şekil 3.4 Dondurucu dolapta ve normal hava şartlarında su bulunan kaptaki bekletilen örnekler.

3.4.2 Yüksek Sıcaklık Deneyi

Literatürde konut yangınları için belirtilen sıcaklık aralığı $600 - 900^{\circ}\text{C}$ olarak belirtildiği için bu çalışmada üretilen geopolimer kompozit malzemeler yüksek sıcaklık etkisinde

800 °C’de belli bir süre kalması kararlaştırılmıştır. Üretilen örneklerin 7 gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra yüksek sıcaklığa (800 °C) maruz bırakılmıştır. 800 °C’de örnekler bir saat bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık deneyi tamamlandıktan sonra örnekler fırından çıkartılmıştır. İlgili örneklerin (Şekil 3.5) üzerinde yapılan tartım işlemleri ve basınç testinden elde edilen bulgular değerlendirilerek yüksek sıcaklık sonrası örneklerin ağırlık kayıpları ve sahip olduğu basınç dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 3.5 Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir numunenin basınç dayanım testi.

3.4.3 Sülfat Deneyi

Üretilen geopolimer kompozit örneklerin sülfata karşı direncini değerlendirmek için $MgSO_4$ ve $NaSO_4$ çözeltileri kullanılmıştır. Bu çalışmada sülfat etkisini incelemek için ASTM C1012’göre 50 gr / lt’lik sodyum sülfat ($NaSO_4$) ve magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltileri hazırlanmıştır. Örnekler dökümden 7 gün sonra hazırlanan çözeltiler içerisine yerleştirilmiş ve 28. güne kadar $MgSO_4$ ve $NaSO_4$ çözeltileri bulunan kapalı kapta bekletilmiştir. Akabinde örnekler kaptan çıkartılarak sülfat çözümlerinde bulduklarını süre boyunca ağırlık değişimi ve ardından da basınç dayanım kaybını incelemek üzere +105 °C sıcaklıkta etüvde kurutulduktan sonra tartılmış ve basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7).



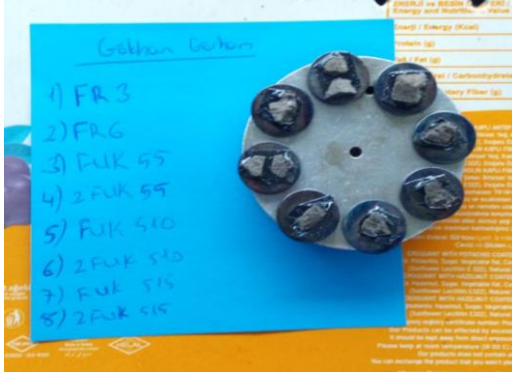
Şekil 3.6 MgSO₄ ve NaSO₄ çözeltilerinin kapında bulunan örnekler.



Şekil 3.7 Etüvde kurutulmuş, sülfata uğramış örnekler.

3.5 SEM-EDX ve XRD Analizleri

Geopolimer örnekler içerisinde; FR3, FR6, FUK55, 2FUK55, FUK510, 2FUK510, FUK515 ve 2FUK515 numuneleri üzerinde SEM-EDX (Şekil 3.8) ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan geopolimer kompozit örneklerin SEM-EDX ve XRD analizleri AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Bruker Marka D8 Advance Model cihazı yardımıyla yapılmıştır. Bununla birlikte örneklerde XRD analizi uygulamak için seçilmiş olan örnekler havanda iyice öğütülmüştür. Daha sonra öğütülmüş olan örnekler özel paketlerde saklanıp, AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine gönderilmiştir.



Şekil 3.8 Örnek tutucu üzerinde bulunan örnekler ve SEM cihazı bilgisayarı

4. BULGULAR

4.1 Geopolimer Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özellikleri

Geopolimer kompozit harçların görünen porozite oranları, referans örneklerde % 12.3 - 27.8 arasında değişkenlik göstermiştir. Karışımdaki ÖGYFC miktarının % 25 ve % 50 olduğu örneklerde, ÖGYFC miktarının artmasına bağlı olarak görünen porozite oranlarında düşüşler gözlenmiştir. Bununla birlikte matristeki ÖGYFC miktarının % 75 ve % 100 oranlarına çıkmasıyla birlikte görünen porozite oranlarında kısmi artışlar gerçekleşmiştir. Dolayısıyla referans örneklerde en düşük porozite (gözeneklilik) oranları, % 50 UK + % 50 ÖGYFC içerikli harçlarda elde edilmiştir.

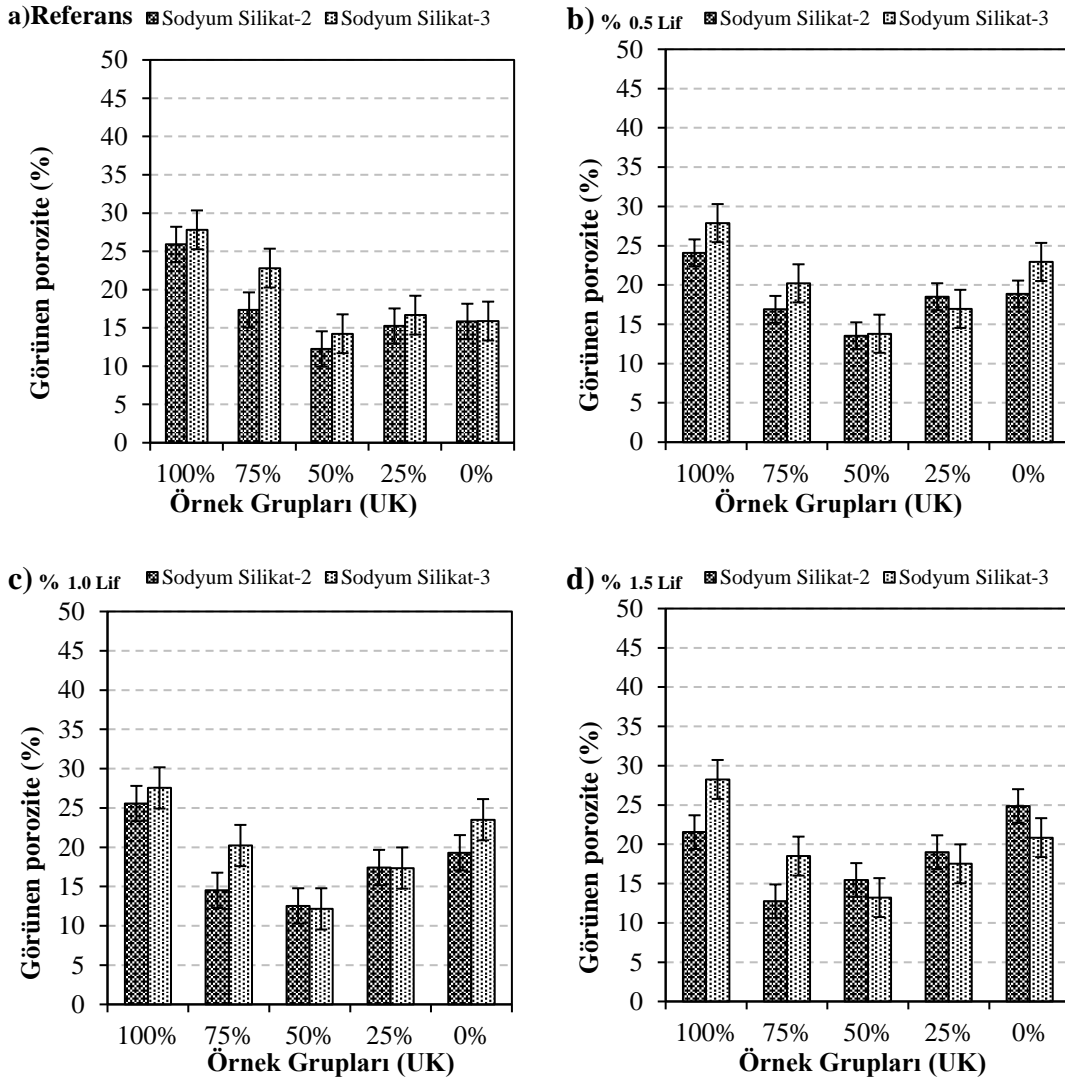
Geopolimer harçların üretiminde kullanılan yüksek modüllü (3 modüllü) sodyum silikat solüsyonlarının ise görünen poroziteyi bir miktar arttırdığı tespit edilmiştir. Bu noktada sadece % 100 ÖGYFC esaslı geopolimer harçlarda kullanılan sodyum silikat solüsyonlarının modül değerinin görünen porozite üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Lif ilaveli geopolimer harç örneklerinde bünyeye ilave edilen polipropilen lif katkılarının görünen porozite değerleri üzerinde değişken sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Lif içeriğinin % 0.5 olduğu örneklerde görünen porozite oranları % 13.5 - % 27.9 arasında değişkenlik gösterirken, % 1.0 lifli örneklerin porozite değerleri % 12.5 - % 27.5 aralığında olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte lif miktarı % 1.50 olduğunda elde edilen porozite oranları % 12.7 - % 28.3 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Lifli karışımda ÖGYFC'nin olmadığı örneklerin porozite oranları lineer olamayan bir şekilde, nispeten artış göstermiştir. ÖGYFC'nin karışımda, % 25 olarak kullanımı porozite oranları kısmı olarak azaltırken, % 50 olarak kullanıldığında çok fazla etkisi olmamıştır.

Genel olarak artan lif ilavesinin değerler üzerinde doğrusal bir etkisi olmadığı da görülmüştür. Lif oranı % 0.50 olan uçucu kül esaslı ve % 25 ÖGYFC katkılı karışımlarda,

3 modüllü sodyum silikatlı örneklerin porozite oranları 2 modüllü sodyum silikat örneklerine göre daha yüksek çıkmıştır. % 50 ÖGYFC içerikli örneklerinde sodyum silikat solüsyonu tipinin görünen porozite oranları üzerinde hemen hemen aynı etkiyi yaptığı, matris içerisinde yer alan ÖGYFC miktarının arttığı geopolimer harçlarda ise özellikle % 1.5 lif ilaveli örneklerde 2 modüllü sodyum silikat solüsyonun kullanılması durumunda bünyedeki gözenekliliğin artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.1 Harç numunelerinin (7 günlük) görünen porozite oranları.

Bununla birlikte karışımlarda ÖGYFC'nin % 75 olarak kullanıldığı karışımlarda, örneklerin görünen porozite oranları lineer bir şekilde azalmıştır. Lif ilaveli geopolimer harçlarda görünen porozite oranları % 12.2 - % 28.3 arasında değişkenlik göstermektedir.

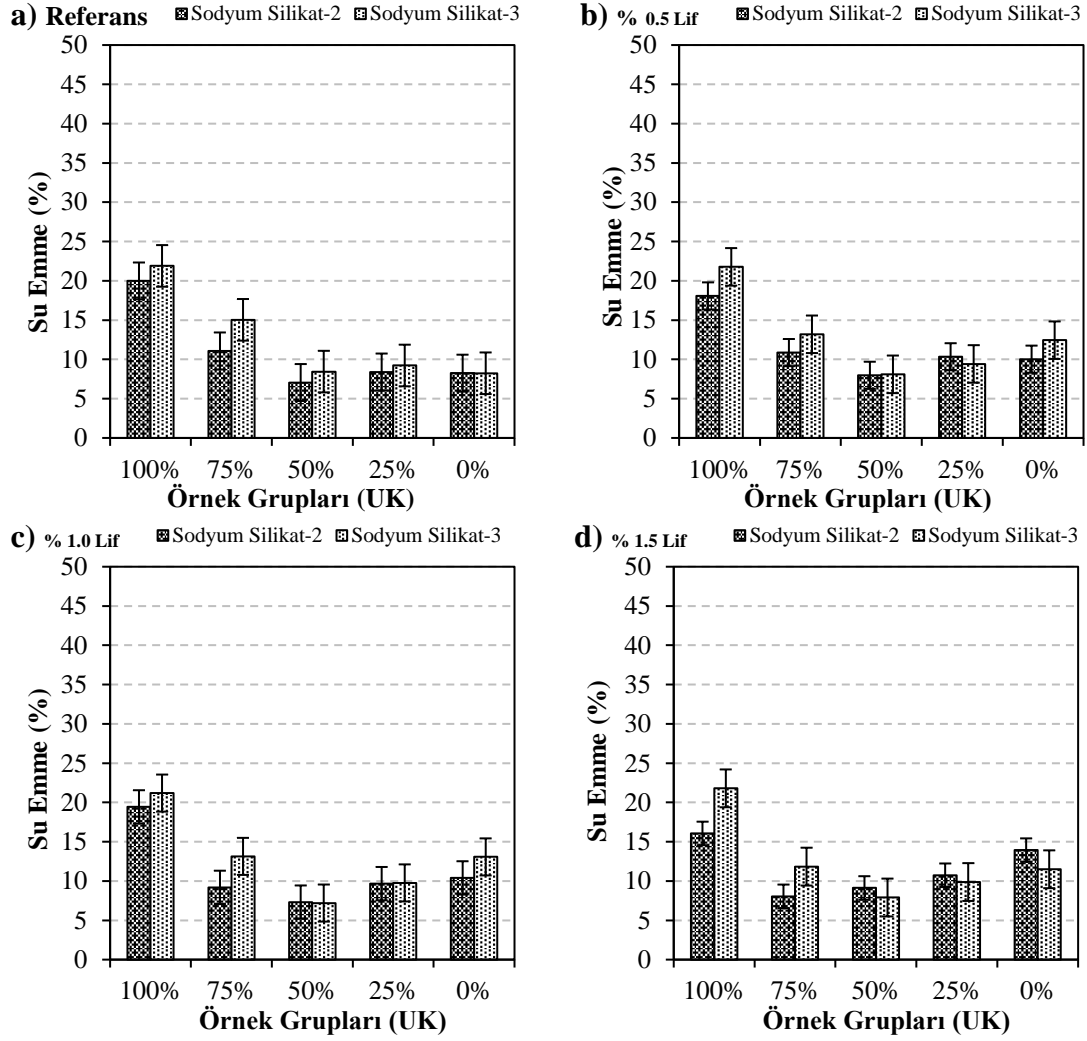
Referans örneklerle kıyaslandığında ise bünyeye ilave edilen liflerin bünye içerisindeki gözenekliliği önemli oranda etkilemediği düşünülmektedir. Geopolimer kompozit örneklerle ait görünen porozite oranları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Su emme testi, boşluk içeriğinin artmasıyla, artan geopolimer kompozit geçirgenliğini belirleyen bir diğer önemli testtir (Jindal vd. 2020). Referans örneklerde su emme oranları % 7.1 ile % 21.9 arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca referans harçlarda, en yüksek su emme oranı % 100 UK esaslı geopolimer kompozitlerde elde edilmiştir. Geopolimer harçta ÖGYFC’nun % 25 - 50 oranında kullanılmasıyla, elde edilen su emme oranlarında düşüşler meydana gelmiştir. Karışımlardaki ÖGYFC % 75 olduğunda, su emme oranı artarken, % 100 olarak ikame edildiğinde, su emme oranı nispeten düşük çıkmıştır. Bununla birlikte sodyum silikat solüsyonun 2 modül’den 3 modül’e yükselmesinin, örneklerin su emme oranları daha yüksek değerler vermiştir. % 100 ÖGYFC esaslı örneklerde sodyum silikat solüsyon modülünün değişmesiyle su emme oranında herhangi bir değişkenlik olmamıştır.

% 0.5 lif oranına sahip geopolimer karışımların su emme oranları % 8.0 – % 21.8 arasında, % 1.0 lif oranına sahip örneklerin su emme oranları % 7.2 - 21.2 arasında, değişkenlik göstermiştir. Karışımlardaki lif oranı % 1.5’e çıkmasıyla su emme oranları % 7.9 - % 21.8 arasında değiştiği kaydedilmiştir. Lif katkılı karışımlarda ÖGYFC’nin % 25 ve % 50’e çıkmasıyla su emme oranlarında düşüşler gözlenmiştir. Bunun yanında karışımlardaki ÖGYFC’nin % 75 ve % 100 olarak kullanıldığında elde edilen su emme oranları doğrusal olmayan bir şekilde artış göstermiştir. Genel olarak lif katkılı karışımlarda elde edilen su emme oranları çok fazla değişkenlik gösterdiği tespit edilmiş olup su emme oranlarının % 7.2 - % 21.8 arasında değiştiği görülmüştür.

Lif oranı % 0.5 olduğu karışımlarda sodyum silikat modülünün yükselmesiyle, örneklerin su emme oranları doğrusal bir şekilde yükselirken, ÖGYFC’nin oranı % 75 olduğu örneklerde su emme oranları % 0.1 düşüş göstermiştir. Bununla birlikte % 1.0 lif ilaveli örneklerin sodyum silikat modülünün 2’den, 3’e çıkmasıyla su emme oranı artmıştır. Ancak %50 UK + % 50 ÖGYFC içerikli örneklerin su emme oranında % 0.1 azalma görülmüştür. Lif oranının % 1.50 olduğu karışımlarda, yüksek modüllü sodyum silikat

içerikli örneklerin su emme oranları yüksek çıkmıştır. Bunun yanında ÖGYFC'nin % 50 ve % 75 ikame edildiği örneklerin su emme oranlarında düşüşler tespit edilmiştir. Genel olarak geopolimer kompozit örneklerinde PP lif kullanımı, su emme oranında çok fazla etkili olmadığı belirlenmiştir. Numunelerin su emme oranları Şekil 4.2'de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 4.2 Harç numunelerinin (7 günlük) su emme oranları.

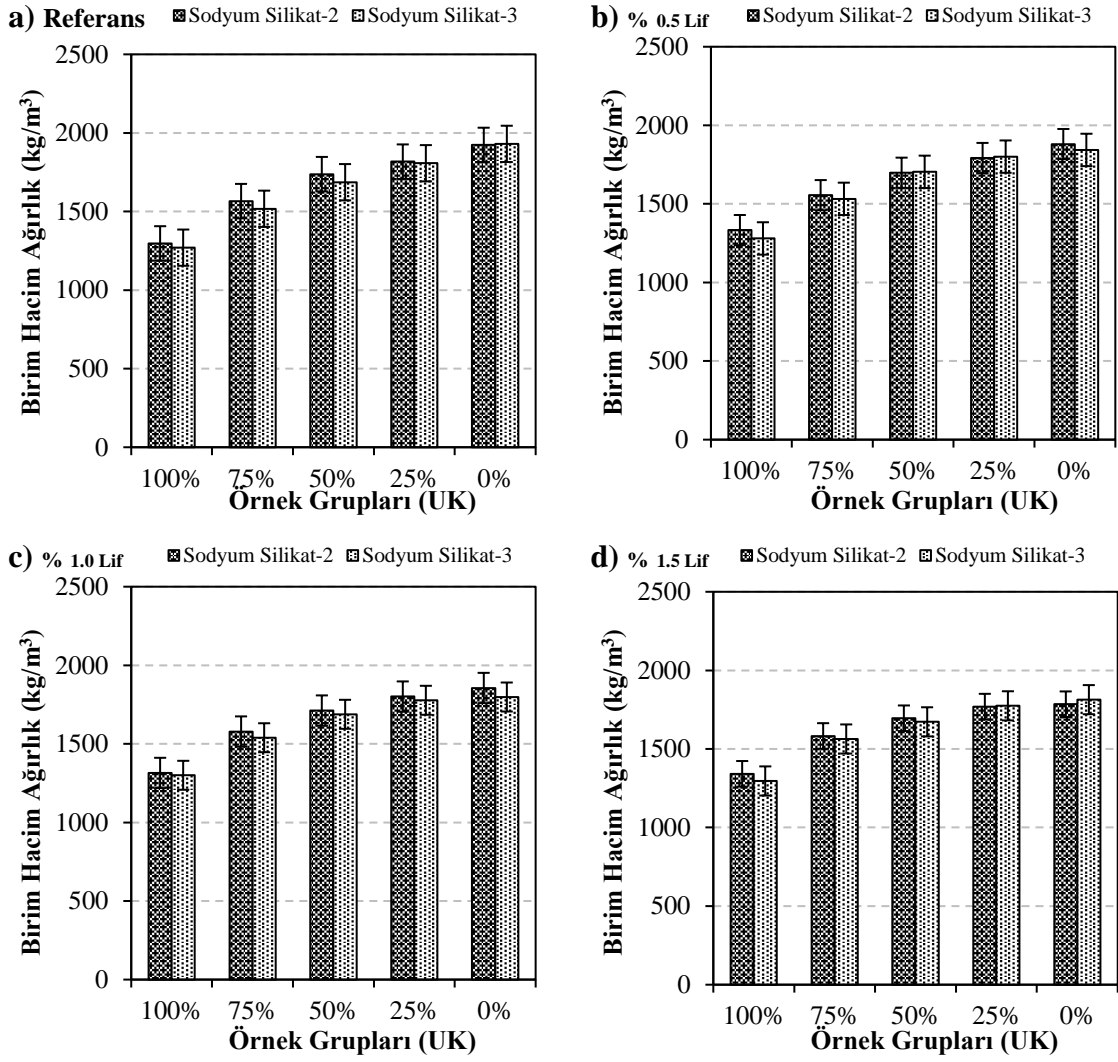
Geopolimer kompozit harçların birim hacim ağırlık değerleri Şekil 4.3' de gösterilmektedir. Geopolimer kompozit harçların birim ağırlıkları, referans örneklerde 1270 kg/m^3 - 1930.4 kg/m^3 arasında değişim göstermiştir. Karışımlardaki ÖGYFC'nin artmasına bağlı olarak birim hacim ağırlıklar lineer bir şekilde artış göstermiştir. Bununla birlikte karışımlardaki sodyum silikat modülünün yükselmesiyle (3 modül), örneklerin

birim ağırlıkları kısmı bir şekilde azalmıştır. Yalnız bu noktada % 100 ÖGYFC içerikli karışımlarda 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren örneklerin, 2 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren örneklere göre birim hacim ağırlıkları % 0.36 artış göstermiştir.

Lif katkılı örneklerinde birim ağırlıkları $1280 - 1880 \text{ kg/m}^3$ arasında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Tüm lif ilaveli (% 0.5, 1.0, 1.50) karışımlarda ÖGYFC'nin artmasıyla, örneklerin birim ağırlıkları kademeli olarak artış eğilimi göstermiştir. Lif içeriği % 0.5 olduğu örneklerde birim ağırlıklar $1280.2 \text{ kg/m}^3 - 1880.5 \text{ kg/m}^3$ arasında değişkenlik gözlenmiştir. Karışımlardaki lif oranı % 0.5 olarak kullanıldığında, UK esaslı ve % 25 ÖGYFC içerikli örneklerin sodyum silikat solüsyonun modül değerinin 2'den 3'e yükselmesiyle birim hacim ağırlıkları daha düşük değerler vermiştir. Bununla birlikte % 50 UK + 50 ÖGYFC, % 25 UK + % 75 ÖGYFC içerikli karışımlarda sodyum silikat solüsyonu modül değerinin yükselmesiyle birlikte örneklerin birim ağırlıkları artmıştır. Bu noktada karışımlarda % 100 olarak ÖGYFC ve 2 modüllü sodyum silikat solüsyonu içerikli örneklerin birim ağırlıkları nispeten yüksek çıkmıştır.

Lif oranı % 1.0 olduğu karışımlarda, örneklerin birim hacim ağırlıkları $1299.9 \text{ kg/m}^3 - 1855.3 \text{ kg/m}^3$ arasında değiştiği gözlenmiştir. Bununla birlikte % 1.0 lif içeriğine sahip geopolimer kompozit örneklerinde sodyum silikat modülünün yükselmesiyle, örneklerin birim hacim ağırlıkları lineer olarak düşüş göstermiştir.

Lif içeriğinin % 1.50 olduğu örneklerin birim hacim ağırlıkları ise $1296.3 \text{ kg/m}^3 - 1813.5 \text{ kg/m}^3$ arasında değişkenlik göstermiştir. Genel olarak geopolimer kompozit karışımlarda PP lif aşamalı olarak ilave edilmesi örneklerin birim hacim ağırlıklarının kademeli olarak düşmesine yol açmıştır.



Şekil 4.3 Harç numunelerinin (7 günlük) birim hacim ağırlık (kg/m^3) değerleri.

Geopolimer kompozitlerin görünür yoğunluk değerleri Şekil 4.4'de sunulmuştur. Geopolimer kopolit karışımlarda, ÖGYFC'nin oranı arttıkça örneklerin görünür yoğunluk değerleri doğrusal olarak artış göstermiştir. Referans örneklerin görünür yoğunluk değerleri 1750.2 kg/m^3 - 2295.1 kg/m^3 arasında tespit edilmiştir. Karışımdaki yüksek modül (3 modül) sodyum silikat solüsyonu kullanımının örneklerin görünür yoğunluk sonuçlarında artışlar elde edilmiştir. Bununla birlikte % 50 UK + % 50 ÖGYFC içerikli karışımlarda 2 modül sodyum silikat solüsyonu kullanıldığı örneklerin görünür yoğunluk değerleri yüksek çıkmıştır.

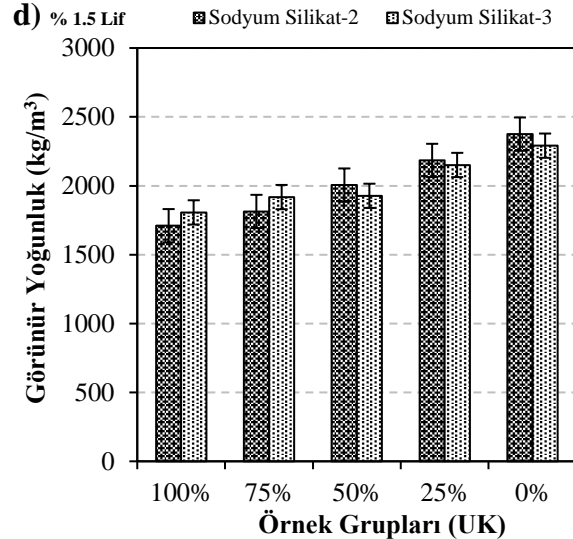
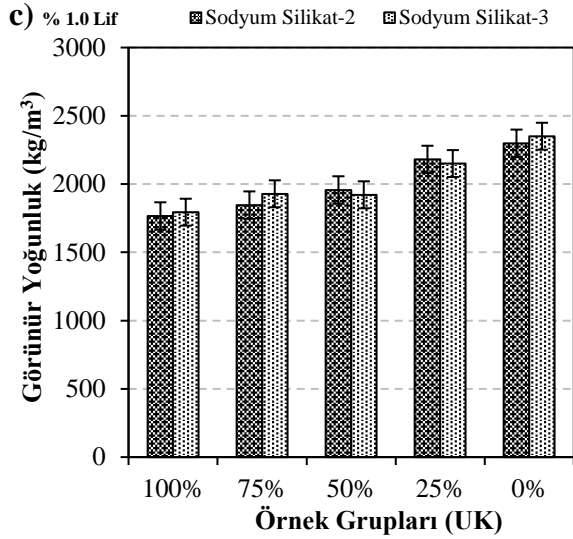
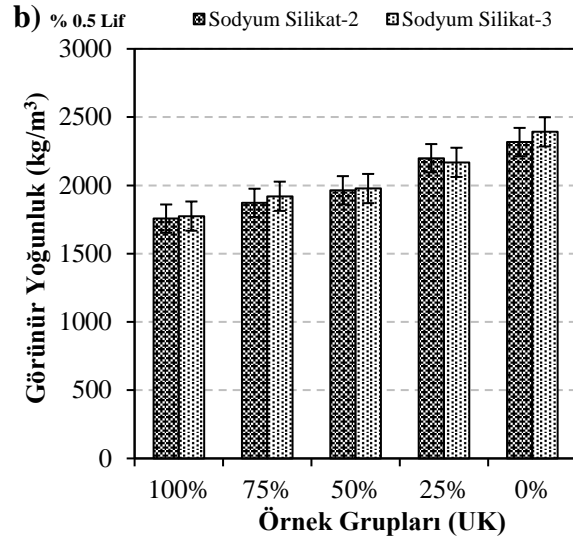
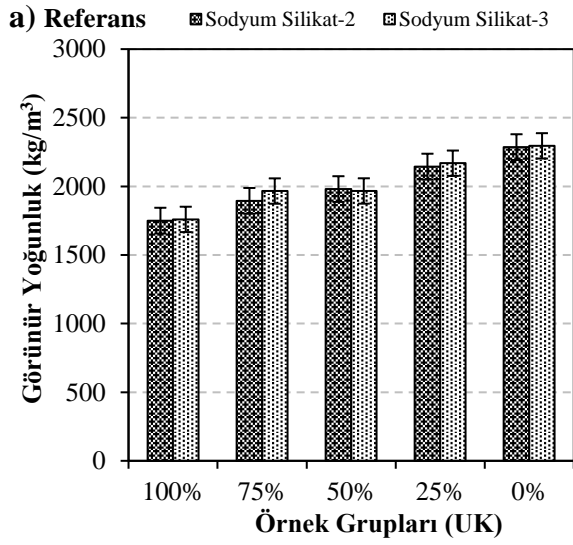
Lif takviyeli geopolimer kompozit karışımlarda, örneklerin minimum görünür yoğunluk değeri 1710.1 kg/m^3 ve maksimum değer 2392.0 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Ağırlıkça

% 0.5, % 1.0, % 1.50 lif oranları ile takviye edilmiş geopolimer kompozit örneklerin ÖGYFC'nin artmasına bağlı olarak görünür yoğunluk değerlerinin doğrusal bir şekilde artış eğiliminde olduğu belirlenmiştir.

Lif oranının % 0.5 olduğu örneklerin görünür yoğunluk değerlerinin 1756.5 kg/m^3 - 2392 kg/m^3 arasında değiştiği görülmüştür. Bununla birlikte karışımlarda 3 modül sodyum silikat solüsyonu kullanımı, örneklerin görünür yoğunluk değerlerini lineer olarak arttırırken, % 25 UK + % 75 ÖGYFC içerikli örneklerde bu değer (görünür yoğunluk) azalış göstermiştir.

Karışımlardaki lif oranı % 0.5 olduğunda görünür yoğunluk değerleri 1766.2 kg/m^3 - 2350.5 kg/m^3 arasında elde edilmiştir. Karışımlardaki sodyum silikat solüsyonun modül değeri 3'e yükselmesiyle, sırasıyla % 100 UK , % 75 UK + % 25 ÖGYFC, % 0 UK + % 100 ÖGYFC içerikli örneklerin görünür yoğunluk değerleri bir miktar artmıştır. Ayrıca % 50 UK + % 50 ÖGYFC, % 25 UK, % 75 ÖGYFC içerikli örneklerde 2 modül sodyum silikat solüsyonu kullanıldığında örneklerin görünür yoğunluk değerleri azalış göstermiştir

Lif içeriği % 1.50 olduğu karışımlarda 1710.1 kg/m^3 – 2375.1 kg/m^3 arasında değişkenlik göstermiştir. Görüldüğü gibi ÖGYFC içeriği olmadığı ve % 75 UK + % 25 ÖGYFC içerikli karışımlarda 3 modül sodyum silikat solüsyonunun kullanımıyla örneklerin görünür yoğunluk değerleri yüksek çıkmıştır ancak % 50 UK + % 50 ÖGYFC, % 25 UK + % 75 ÖGYFC ve ÖGYFC içeriğinin % 100 olduğu karışımlarda 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu kullanımı, örneklerin görünür yoğunluk değerlerinde azalmalar meydana getirmiştir. Genel olarak geopolimer kompozit karışımlarda, artan lif içeriği ile örneklerin görünür yoğunluk değerleri bir miktar artmıştır.



Şekil 4.4 Harç numunelerinin (7 günlük) görünür yoğunluk (kg/m^3) değerleri.

4.2 Geopolimer Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Geopolimer kompozit malzemelerin eğilme dayanımları Şekil 4.5’de sunulmuştur. Referans örneklerin eğilme dayanımları 0.1 MPa - 5.6 MPa arasında değişiklik göstermiştir. Karışımlardaki ÖGYFC’nin artışına bağlı olarak referans örneklerin eğilme dayanımlarının lineer bir şekilde azaldığı da görülmüştür. Karışımlardaki sodyum silikat solüsyonunun 2 modülden 3 modüle çıkarılmasıyla % 100 UK esaslı örneklerin eğilme dayanımları 4.8 MPa’dan, 5.6 MPa’a yükselmiştir. Benzer şekilde UK esaslı geopolimer kompozitlerde % 25, % 50 ÖGYFC eklenmesi ve sodyum silikat solüsyon modül değerinin yükselmesi eğilme dayanımlarında artışa neden olmuştur. Karışımlardaki UK,

% 75 ve % 100 gibi yüzdelerde ÖGYFC ile yer değiştirilmesiyle ve soydum silikat solüsyonun modül değerinin yükselmesi ile örneklerin eğilme dayanımlarında hafif bir azalış yaşandığı görülmüştür. Karışımlardaki 3 modül sodyum silikat solüsyonun kullanımıyla birlikte UK içeriği % 100, % 75 UK + % 25 ÖGYFC içerikli örneklerin eğilme dayanımları aynı (5.6 MPa) çıkmıştır. Karışımlardaki 3 modül sodyum silikat solüsyonu kullanımının önemli etkisi % 25 ÖGYFC içerikli örneklerin eğilme dayanımları 3.3 MPa'dan 5.6 MPa'a yükseltmesiyle görülmüştür. Referans örneklerde minimum eğilme dayanımı 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren ve ÖGYFC'nin % 100 olarak ikame edildiğinde, maksimum eğilme dayanımı ise 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren ve % 25 ÖGYFC içerikli örneklerde tespit edilmiştir.

Literatürde yapılan bir çalışmada, karışımdaki ÖGYFC'nin oranı % 0'dan % 20'ye yükseldiğinde, numunenin eğilme dayanımında önemli ölçüde artış yaşandığı tespit edilmiştir. Numuneler 3 günlük süreyle kürlenme yaşında, kontrol örneklerin eğilme dayanımı 8.4 - 7.1 MPa, % 10 ÖGYFC'li çimentonun 13.3 - 10.9 MPa ve % 20 ÖGYFC'li çimentonunki 10.5 – 8.7 MPa olarak belirlenmiştir. Nitekim, erken yaşta karışımda % 10 ÖGYFC ilave edilmesinin, % 20 ÖGYFC ilave edilmesine göre daha iyi bir sonuç gösterdiği tespit edilmiştir (Wang vd. 2021).

Lif ilaveli geopolimer kompozit örneklerinde eğilme dayanımları 2.4 MPa - 11.4 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Lif oranı % 0.5 olduğu geopolimer kompozit karışımlardaki bünyeye ilave edilen ÖGYFC'nin artmasıyla örneklerin eğilme dayanımları değişken (lineer olmayan) bir şekilde azalış eğilimi göstermiştir. Bu tür karışımlardaki eğilme dayanım değerleri 2.4 - 6 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. Bununla birlikte karışımlardaki yüksek modüllü (3 modül) sodyum silikat solüsyonun kullanımı eğilme dayanımlarında bir miktar artış meydana gelirken, ÖGYFC'nin oranı % 75 olduğu örneklerde bu değer azalış göstermiştir. Ayrıca ÖGYFC esaslı (ÖGYFC oranı = %100) örneklerde sodyum silikat solüsyonun modül değerinin değişmesi eğilme dayanımında herhangi bir etkisi olmamıştır. En düşük eğilme dayanımı ÖGYFC'nin miktarı % 100 olduğu örneklerde gözlenmiştir. Lif içeriği % 0.50 olduğu örneklerde en düşük eğilme dayanımı 2 - 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren ve ÖGYFC'nin oranı % 100 olduğu ve en yüksek eğilme dayanımı ise ÖGYFC içermeyen, UK esaslı

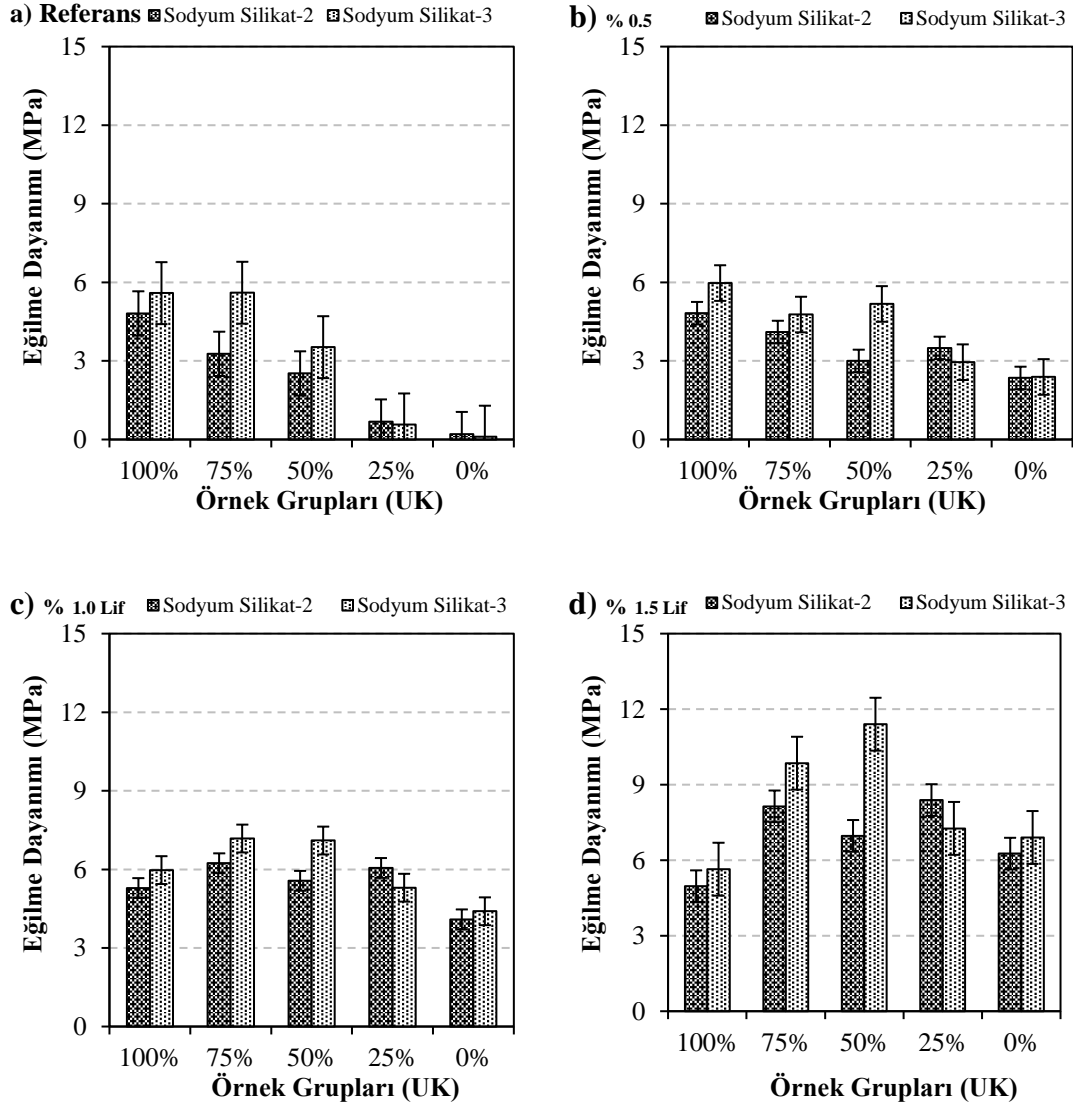
örneklerde görülmüştür.

Lif içeriği % 1.0 olduğu örneklerin eğilme dayanımları 4.1 MPa - 7.2 MPa arasında değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Karışımlardaki ÖGYFC'nin oranı % 25 ve % 50 olduğunda, örneklerin eğilme dayanımları kısmı olarak artmıştır. Bununla birlikte ÖGYFC'nin miktarı % 75 ve % 100 olduğunda örneklerin eğilme dayanım değerlerinde kısmı azalmalar gerçekleşmiştir. Ayrıca en düşük eğilme dayanımı ÖGYFC'nin oranı % 100 olduğu örneklerde görülmüştür. Karışımlardaki sodyum silikat solüsyonun modül değerinin yükselmesiyle örneklerin eğilme dayanımları bir miktar artış gösterirken, ÖGYFC'nin miktarı % 75 olduğu örneklerde bu değer azalış göstermiştir. 2 modüllü sodyum silikat solüsyonu ve % 100 ÖGYFC içeriğine sahip olan örneklerinde en düşük eğilme dayanımı çıkmışken en yüksek eğilme dayanımı ise 3 modüllü ve % 25 ÖGYFC içerikli örneklerde gözlenmiştir.

Lif oranı % 1.50 olduğu geopolimer kompozit karışımlarda, örneklerin eğilme dayanımları 5.0 MPa – 11.4 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Karışımlardaki ÖGYFC'nin % 25'e çıkmasıyla eğilme dayanımlarında artış görülmüştür. Ancak karışımlardaki ÖGYFC'nin % 50, % 75, % 100 olduğunda, örneklerin eğilme dayanımlarında doğrusal olmayan bir şekilde azalış gerçekleşmiştir. Bununla birlikte sodyum silikat solüsyonun modül değerinin 2'den 3'e yükselmesi örneklerin eğilme dayanımları artmıştır. Bu noktada sadece ÖGYFC'nin % 75 olduğu örneklerde bu değer azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla minimum eğilme dayanımı (5.0 MPa) 2 modüllü sodyum silikat solüsyonu ile üretilen ve maksimum eğilme dayanımı (11.4 MPa) 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu ile üretilen örneklerde tespit edilmiştir. Genel olarak lifli geopolimer kompozit örnekleri, referans (lifsiz) örnekler ile karşılaştırıldığında lif katkılı örneklerin eğilme dayanımlarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Ayrıca lifli karışımlardaki, lif içeriğinin artmasıyla örneklerin eğilme dayanımları da artmıştır.

Daha önce yapılmış bir çalışmada, geopolimer karışımdaki lif içeriğinin % 0.4, % 0.8 ve % 1.2 olarak kullanıldığında 7 günlük örneklerin eğilme dayanımı sırasıyla 9.026 MPa, 9.176 MPa, 9.221 MPa olarak artış göstermiştir. Diğer taraftan, polipropilen lif katkılı geopolimer harçların eğilme mukavemeti, lif içeriğinin artmasıyla, çelik ve polivinil alkol

lif takviyeli geopolimer harçlara kıyaslandığında olumlu sonuçlar vermediği bildirilmiştir (Al-Mashhadani vd. 2018). Çünkü PP liflerin daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan kaynaklanabilir (Bhutta vd. 2017).



Şekil 4.5 Harç numunelerinin (7 günlük) eğilme dayanımı (MPa) değerleri.

Referans (lifsiz) ve lif katkılı geopolimer kompozit örneklerin basınç dayanımının test edilmesinin sonuçları Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Geopolimer kompozit karışımlardaki, referans örneklerin basınç dayanımları 15.3 MPa - 60.9 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Karışımlardaki ÖGYFC'nin oranı % 25 ve % 50 olarak artmasıyla örneklerin basınç dayanımları artarken, ÖGYFC'nin % 75 ve % 100 olduğunda örneklerin basınç dayanımları art arda azalış göstermiştir. Bununla birlikte

karışımlardaki yüksek modüllü (3 modül) sodyum silikat solüsyonun kullanımı örneklerin basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. Fakat bu noktada ÖGYFC'nin oranı % 100 olduğu karışımlardaki, sodyum silikat solüsyonun modül değerinin yükselmesi ile örneklerin basınç dayanımları artmıştır. Ayrıca referans örneklerde en düşük basınç dayanımı ÖGYFC'nin olmadığı ve 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren örneklerde ve en yüksek basınç dayanımı ise ÖGYFC'nin % 50 ve 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren örneklerde gözlenmiştir.

Bu noktada literatürde yapılan bir çalışmada ise, karışımda ÖGYFC % 10, % 20, % 30, % 40 ve % 50 oranlarında katılmıştır. Karışımdaki ÖGYFC'nin oranı artmasıyla 7 günlük geopolimer harcın basınç dayanımı da artmıştır. 16 M sodyum hidroksit çözeltisi ile % 50 ÖGYFC içeren geopolimer örneklerde en yüksek basınç dayanımı 78.2 MPa olarak elde edilmiştir (Saha ve Rajasekaran 2017).

Lif katkılı örneklerin basınç dayanımları 21.4 MPa - 77.60 MPa arasında değişiklik göstermiştir. Genel olarak lif katkılı örneklerin, referans örneklerde olduğu gibi ÖGYFC'nin oranı % 25 ve % 50 arttığında basınç dayanımları artış gösterirken, ÖGYFC'nin oranı % 75 ve % 100'e çıktığında basınç dayanımları düşüş göstermiştir. Bu noktada sadece lif içeriği % 1.50 ve 3 modüllü sodyum silikat içeren karışımlarda ÖGYFC'nin oranı % 75'e çıkması örneklerin basınç dayanımlarında artış meydana gelirken, ÖGYFC'nin oranı % 100 olduğunda basınç dayanımlarında tekrar düşüş gözlenmiştir.

Lif içeriği % 0.5 olduğu karışımlarda örneklerin basınç dayanımları 21.4 MPa - 66.8 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. ÖGYFC içeriği olmayan ile birlikte ÖGYFC'nin % 50 ve % 75 ikame eden karışımlardaki örneklerin, sodyum silikat solüsyonun modül değerinin yükselmesiyle (3 modül) basınç dayanımlarında bir miktar artışlar gözlenmiştir. Ayrıca ÖGYFC'nin oranı % 25 ve % 100 olduğu karışımlarda sodyum silikat solüsyonun modül değerinin yükselmesi örneklerin basınç dayanımları üzerinde zıt rol oynadığı tespit edilmiştir. Lif oranı % 0.50 olduğu karışımlarda en düşük basınç dayanımı 2 modüllü sodyum silikat solüsyonu ve ÖGYFC içermeyen örneklerde ve en yüksek basınç dayanımı 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu ve % 50 UK + % 50 ÖGYFC

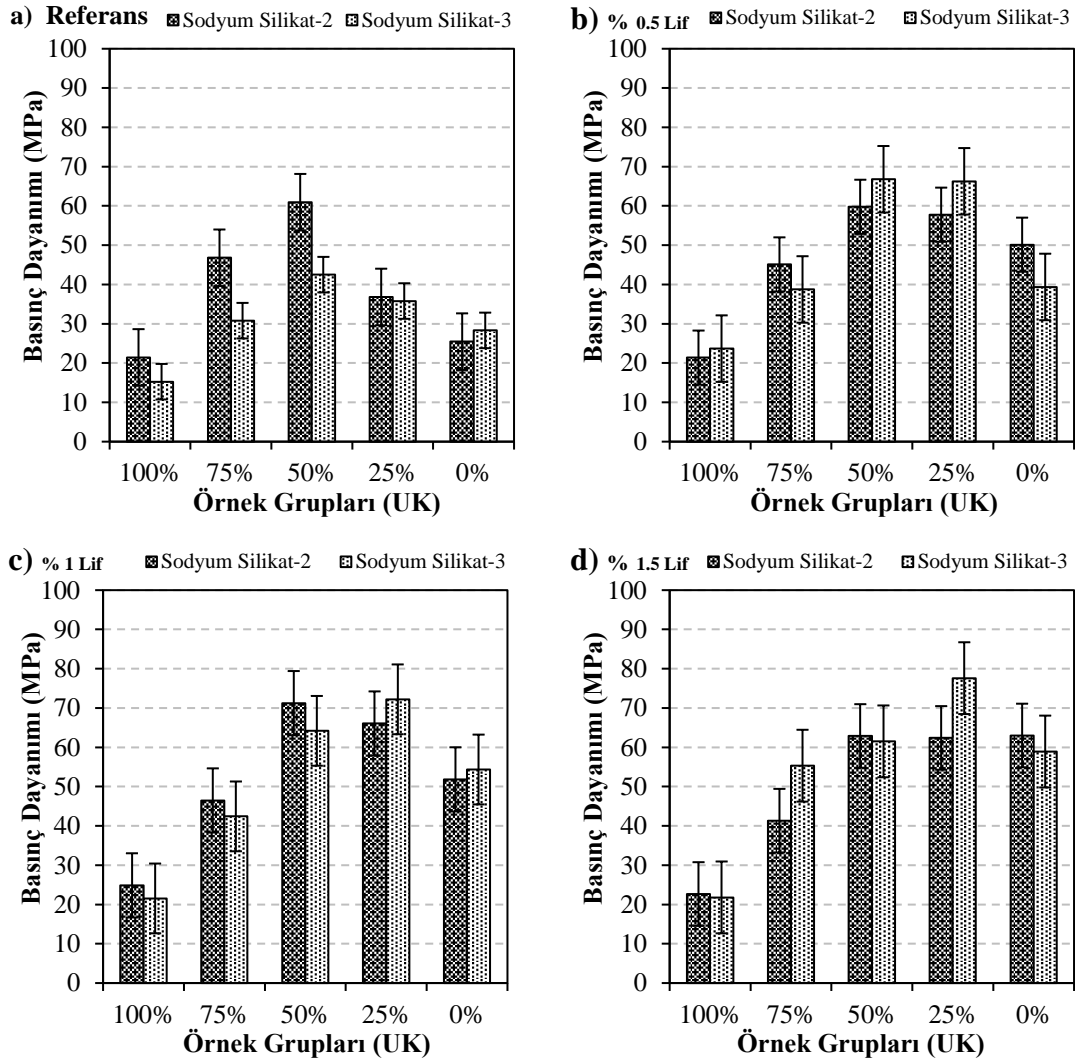
içerikli örneklerde tespit edilmiştir.

Diğer araştırmalarda, % 0,5 PP lif ve % 1,5 Ca(OH)₂ ağırlıkları ile takviye edilmiş kompozit numunenin basınç dayanımı, diğer örneklere kıyaslandığında basınç dayanımında önemli bir artış olduğu tespit edilmiştir (Baykara vd. 2020).

% 1.0 lif içerikli örneklerde basınç dayanımları 21.5 MPa - 72.2 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Bununla birlikte ÖGYFC içeriği olmayan, % 25 ve % 50 ÖGYFC içerikli örneklerde sodyum silikat modülünün 2'den 3' değiştirilmesi örneklerin basınç dayanım değerlerinde azalış meydana gelirken, ÖGYFC'nin % 75 ve % 100 olduğu örneklerde bu değerler bir miktar artış göstermiştir. Ayrıca % 1.0 lif katkılı örneklerde en düşük basınç dayanımı 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren, % 100 UK esaslı örneklerde ve en yüksek basınç dayanımı % 25 UK + % 75 ÖGYFC olduğu örneklerde tespit edilmiştir.

Lif oranı % 1.50 olduğu karışımlardaki örneklerin basınç dayanımları 21.80 MPa - 77.6 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Üretilen karışımlarda % 25, % 75 ikameli ÖGYFC olduğu örneklerin basınç dayanımları kullanılan sodyum silikat solüsyonun modül değerinin yükselmesiyle artışlar gözlenmişken, % 100 UK esaslı ve ÖGYFC'nin % 50 ve % 100 ikame eden örneklerde sodyum silikat solüsyonun modül değerinin yükselmesi örneklerin basınç dayanımlarında olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Son olarak en düşük basınç dayanımı 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu kullanılan ve % 100 UK esaslı örneklerde gözlenmişken, en yüksek basınç dayanımı ise % 25 UK + % 75 ÖGYFC içerikli örneklerde gözlenmiştir.

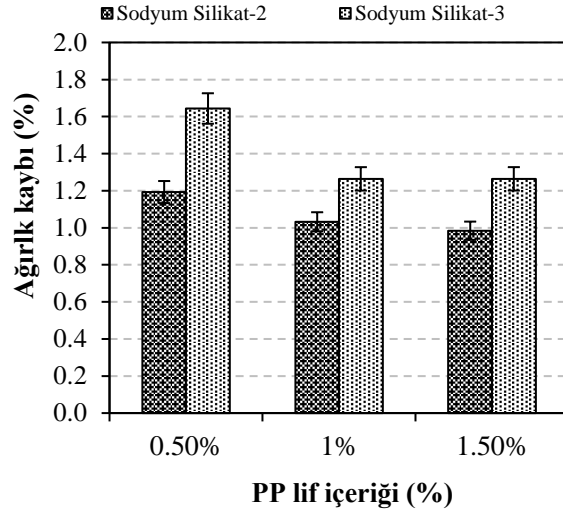
Genel olarak 6 mm PP lif uzunluğuna sahip lif takviyeli geopolimer kompozit örneklerin, lifsiz örneklerle karşılaştırıldığında basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.6 Harç numunelerinin (7 günlük) basınç dayanım (MPa) değerleri.

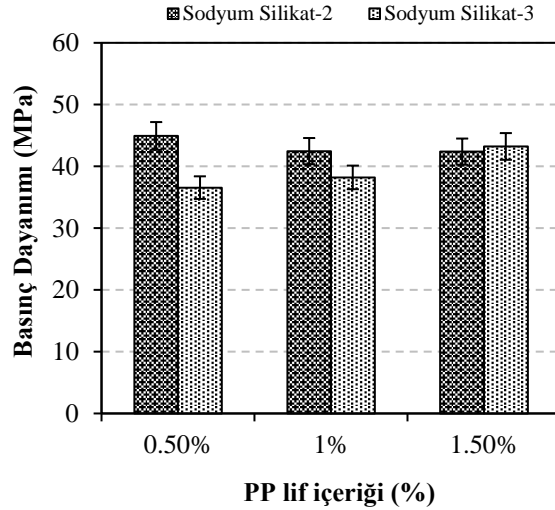
4.3 Durabilite Deneylerinden Elde Edilen Bulgular

Geopolimer kompozit örneklerin durabilitesi; donma – çözünme, yüksek sıcaklık ve sülfat dayanıklılığı gibi etkiler altında incelenmiştir. Şekil 4.7’de gösterildiği gibi PP lifin yüzdesi arttığında, 25 döngüden sonra kütle kaybının doğrusal bir şekilde hem 2 modüllü hem de 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren örnekler için azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla geopolimer kompozit karışımlarda, donma - çözünme etkisi sonrası en yüksek ağırlık kaybı % 1.64 ile % 0.5 lif içerikli örneklerde elde edilirken, en düşük ağırlık kaybı lif içeriğinin % 1.50 olduğu örneklerde tespit edilmiştir. Ayrıca % 1.0 ve % 1.50 lif katkılı örneklerde aynı seviyede ağırlık kaybı belirlenmiştir.



Şekil 4.7 Örneklerin donma - çözünme sonrasında meydana gelen ağırlık kaybı oranları (%).

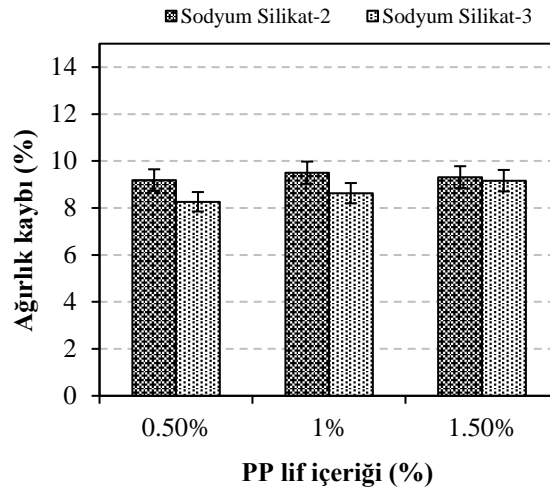
Donma - çözünme olayına maruz kalan örneklerin basınç dayanım değerleri referans örnekler ile kıyaslandığında değerlerin azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.8). Bu noktada en yüksek basınç dayanım kaybı, lif içeriği % 0.5 ve sodyum silikat solüsyonun modül değeri 3 olan örneklerde tespit edilmiştir. 2 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren örneklerin lif içeriğinin artmasıyla, donma - çözünme etkisinde maruz kaldıktan sonra basınç değerleri lineer olarak azalmıştır. bununla birlikte sodyum silikat solüsyonu modül değerinin 3'e yükselmesiyle basınç dayanım değerlerinin kademeli olarak arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.8 Örneklerin donma - çözünme sonrasındaki basınç dayanım değerleri (MPa).

Uçucu kül esaslı geopolimer kompozit örneklerin yüksek sıcaklık deneyi sonrası elde

edilen bulguları Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Karışımdaki lif oranının artmasıyla, sodyum silikat solüsyonunun modül değeri 2 olan örneklerde ağırlık kayıp yüzdesi değişken bir şekilde artarken, sodyum silikat modül değeri 3 olan örneklerde bu değer lineer bir şekilde arttığı görülmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan örneklerin referans örnekler ile karşılaştırıldığında, en fazla ağırlık kaybı (% 9.50), lif oranı % 1.0 ve 2 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren örneklerde gözlenmiştir. Bununla birlikte lif oranının % 0.5 ve 3 modüllü sodyum silikat solüsyonu kullanıldığında en düşük ağırlık kaybı belirlenmiştir.



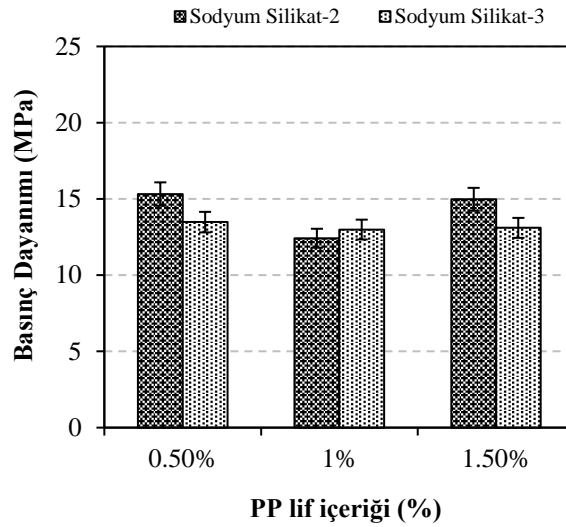
Şekil 4.9 Örneklerin yüksek sıcaklık sonrasında meydana gelen ağırlık kaybı oranı (%).

Literatürde, uçucu kül esaslı geopolimer kompozitler 600 °C sıcaklığa kadar maruz kaldığında kararlı ve bunun üstündeki sıcaklıklara maruz kalması durumunda numunenin yapısında önemli bozulmaların meydana geldiği belirtilmektedir. Bununla birlikte 300 °C sıcaklık etkisinde bırakıldığında dayanım kazancı oluşacağıda belirtilmektedir (John vd. 2021).

Geopolimer kompozit harçların yüksek sıcaklık etkisi sonucunda referans örneklere göre belirgin bir şekilde basınç dayanım kaybına uğramıştır. Bununla birlikte çok fazla basınç dayanım kaybı lif oranı % 1.0 ve 2 modüllü sodyum silikat kullanılan örneklerde tespit edilmiştir. Bu noktada basınç dayanım değeri referans örnekte 71.2 MPa ve yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan örnekte 12.42 MPa olarak elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık altında, sodyum silikat solüsyonunun modül değeri 2 ve 3 olan karışımlarda, lif oranının % 0.5’den % 1.0’e çıkmasıyla örneklerin basınç dayanımı bir miktar azalmıştır, ancak lif

oranın % 1.5 olduğunda örneklerin basınç dayanım değeri bir miktar artış göstermiştir. Şekil 4.10'da yüksek sıcaklığa maruz kalan örneklerin basınç dayanımları verilmiştir.

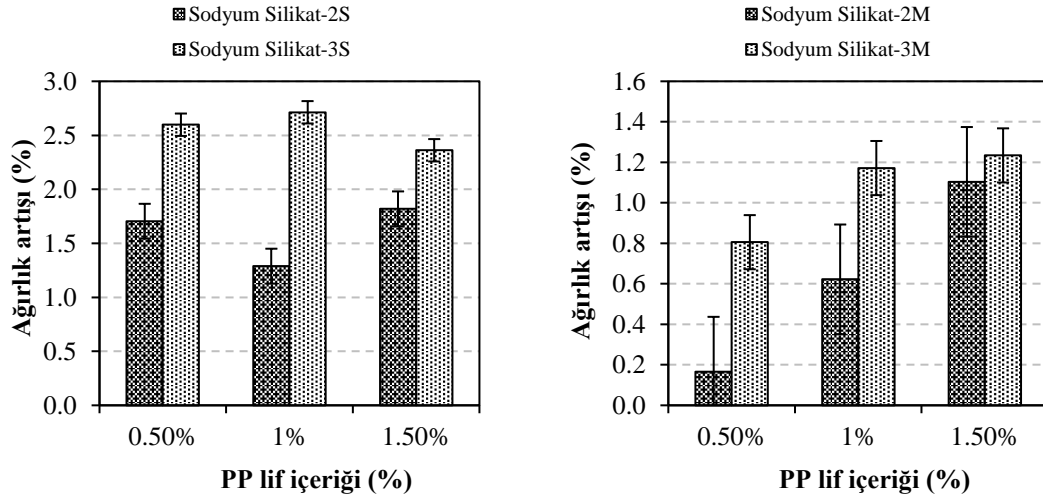
Literatürde ise polipropilen lif takviyeli metakaolin geopolimer kompozit örneklerin 600 - 900 °C sıcaklıklara maruz bırakıldığında, basınç dayanımında önemli kayıplar ve yapıda çatlakların varlığı tespit edilmiştir. Ancak sıcaklığın 900 °C' üstüne çıktığında geopolimer kompozitlerde önemli ölçüde renk değişikliği gözlenmiştir (Aygörmez vd. 2020).



Şekil 4.10 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan örneklerin basınç dayanım (MPa) değerleri.

Sülfat deneylerinden elde edilen bulgulara göre örneklerin sodyum sülfat (NaSO_4)'a karşı daha direçli olduğu görülmektedir. Çünkü NaSO_4 çözeltisine maruz kaldıktan sonra olan örneklerin yüzeylerinde herhangi bir hasar veya sülfat kalıntıları gözlenmemektedir. Ancak bu durum MgSO_4 çözeltisi için geçerli değildir.

Şekil 4.11'de geopolimer kompozit harçlarda sülfat saldırısına karşı direncini değerlendirmek için örneklerin ağırlık kaybı ve basınç dayanımı değişimi görülebilmektedir. Ayrıca en yüksek ağırlık artışı sodyum sülfat (NaSO_4) çözeltisine maruz kalmış, % 1.0 lif içeriği ve 2 modüllü sodyum silikat solüsyonuna sahip olan örneklerde meydana gelmiştir. Bu noktada minimum ağırlık artışı magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltisinin etkisine maruz kalmış, lif içeriği % 0.5 ve 2 modüllü sodyum silikat solüsyonu içeren örneklerde tespit edilmiştir.



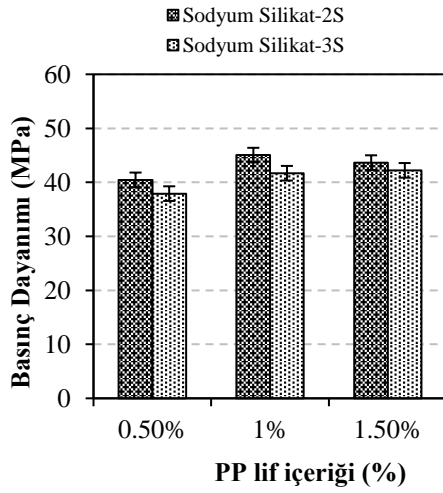
(a) NaSO₄ çözeltisine maruz kalan

(b) MgSO₄ çözeltisine maruz kalan

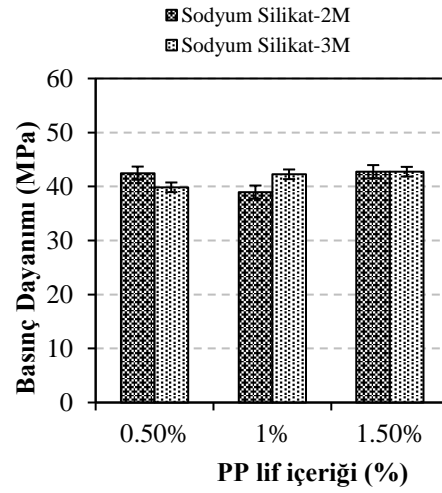
Şekil 4.11 Örneklerin sülfat etkilerine maruz kaldıktan sonraki ağırlık değişim oranları (%).

NaSO₄ ve MgSO₄ çözeltilerinin geopolimer kompozit örneklerin basınç dayanımına etkisi irdelendiğinde, referans örneklere göre basınç dayanım kaybı gözlenmiştir. Bununla birlikte 2 modüllü sodyum silikat solüsyonlu karışımdaki lif oranının % 1.0'e çıkmasıyla, NaSO₄ çözeltisine maruz kalan örneklerin basınç dayanımları artış gösterirken, lif oranı % 1.50 olduğunda basınç dayanımı tekrar bir miktar düşüş olduğu gözlenmiştir. Ancak aynı örnek, MgSO₄ çözeltisinin etkisine maruz bırakıldığında karışımdaki lif oranı % 1.0 olduğunda dayanımda düşüş ve lif oranı % 1.50'e çıktığında basınç dayanımında bir miktar artış tespit edilmiştir.

Karıışımdaki sodyum silikat solüsyonum modül değerinin 3'e yükselmesiyle birlikte lif oranının arttığında NaSO₄ ve MgSO₄ çözeltilerine maruz kalan örneklerin basınç değerleri lineer olarak artış eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak maksimum basınç dayanım kaybı lif oranı % 0.50 ve 3 modüllü sodyum silikat solüsyonlu örneklerin NaSO₄ çözeltisine maruz kaldığında tespit edilmiştir. Bununla birlikte lif oranının % 1.0 ve 3 modüllü sodyum solüsyonlu örneklerin basınç dayanımı daha yüksek çıkmasıyla sülfat çözeltilerine karşı daha güçlü olduğu anlaşılmaktadır. Geopolimer kompozit örneklerin sülfat etkisine maruz kaldıktan sonra, elde edilen basınç dayanım değerleri Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



(a) Na₂SO₄ çözeltisine maruz kalan



(b) MgSO₄ çözeltisine maruz kalan

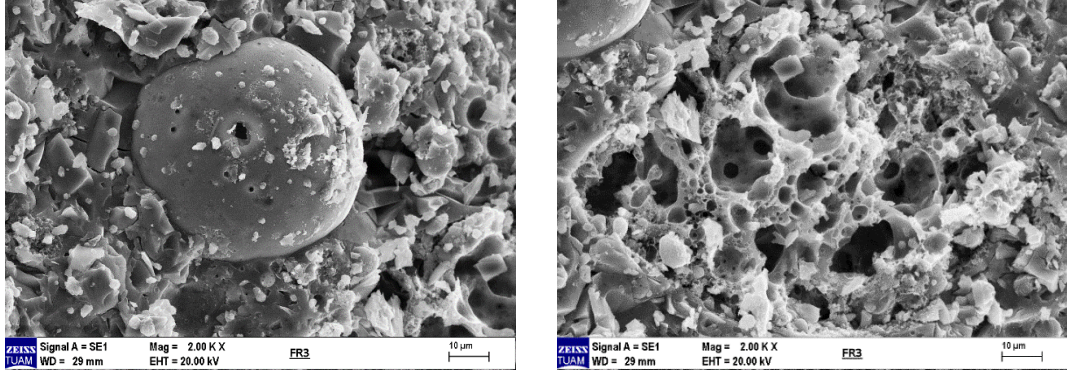
Şekil 4.12 Örneklerin sülfat etkisine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanım değerleri (MPa).

Genel olarak örneklerin durabilitesi incelendiğinde en fazla yüksek sıcaklıktan etkilenmiş olduğu tespit edilmiştir. Çünkü hem örneklerin basınç dayanımında hem de ağırlığında yüksek oranda kayıplar meydana gelmiştir.

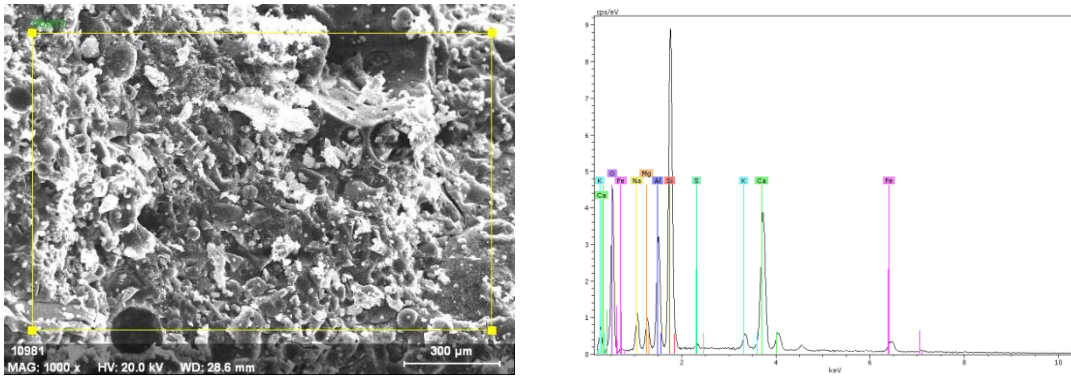
4.4 SEM – EDX ve XRD Analizleri

UK esaslı geopolimer kopolimer harçlarından referans (FR3, FR6) ve lif katkılı (FUK55, 2FUK55, FUK510, 2FUK510, FUK515, 2FUK515) örnekleri seçilip taramalı elektron mikroskobu SEM - EDX analizlerine tabi tutulmuştur. Böylelikle örneklerin içyapıları incelenmiştir.

7 günlük FR3 numunesi için tipik mikro yapıları Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi uçucu kül parçacığı gözlemlenebilir. Bunun başlıca nedeni, zayıf bağların oluşumuna yol açan düşük NaOH konsantrasyonunda UK'ün düşük çözünmesidir (Wong vd. 2020). Bununla birlikte numunenin yapısında birçok küçük ve büyük gözeneklerin olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.13 FR3 kodlu numunenin SEM görüntüleri.



Şekil 4.14 FR3 kodlu numune için SEM ve EDX grafiği.

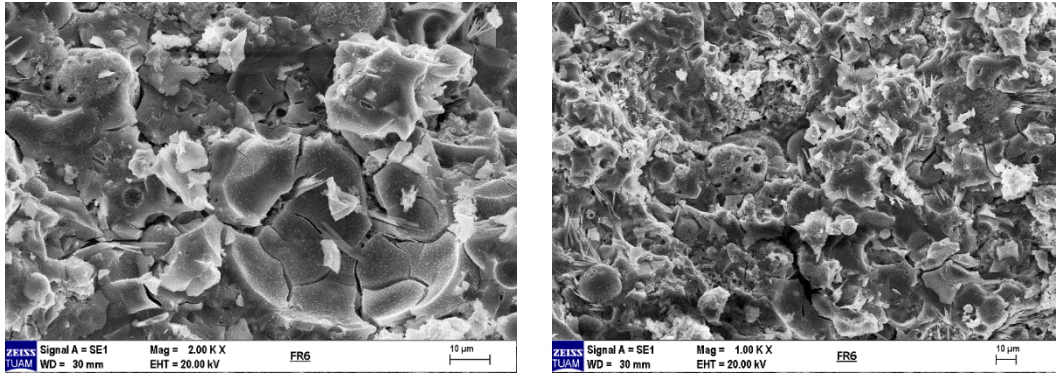
FR3 kodlu (referans örneği) SEM ve EDX analizlerinde elde edilen verilere göre sodyum, magnezyum, alüminyum, silikon, kükürt, potasyum, kalsiyum, demir ve oksijen gibi elementlerin bulunduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.1’de FR3’e ait EDX analizleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 FR3 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen element oranları.

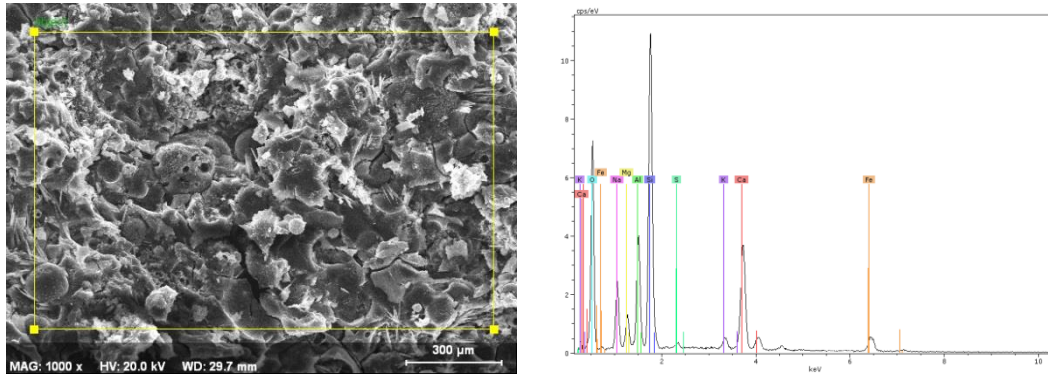
Element	Unn. C [ağırlıkça.- %]	Norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	3.18	3.15	2.79	Na ₂ O	5.29
Magnezyum	1.98	1.96	1.64	MgO	2.44
Alüminyum	6.57	6.51	4.92	Al ₂ O ₃	15.34
Silikon	19.36	19.18	13.94	SiO ₂	51.17
Kükürt	0.19	0.18	0.12	SO ₃	0.57
Potasyum	1.15	1.14	0.6	K ₂ O	1.72
Kalsiyum	11.49	11.38	5.8	CaO	19.85
Demir	2.05	2.03	0.74	Fe ₂ O ₃	3.62
Oksijen	54.95	54.46	69.45		25.23

FR6 kodlu geopolimer kompozit numunenin SEM görüntüleri Şekil 4.15'de gösterilmektedir. FR6 kodlu numunenin yüzeyinde çatlaklar olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında ikinci şekli incelendiğinde açık gözenekler ve tanecikler bulunmaktadır.

Boşluklar, ilk karıştırma sırasında, karışıma nüfuz etmiş olabilecek hava kabarcıklarının varlığından kaynaklanıyor olabilir veya bunlar ısı ayarının neden olduğu buharlaşmadan sonra boşluk olarak kalmış, daha önce su dolu boşluklardan de kaynaklanabilir. Bununla birlikte her durumda yapıdaki çatlakların bulunması, geopolimer dayanım özelliklerinin azalmasına neden olmaktadır (Mehta ve Siddique 2018).



Şekil 4.15 FR6 kodlu numunenin SEM görüntüleri.



Şekil 4.16 FR6 kodlu numune için SEM görüntüsü ve EDX grafiği.

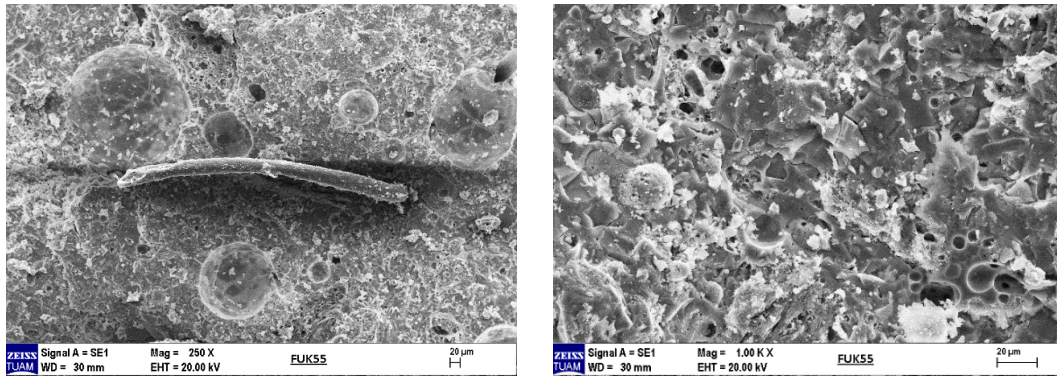
Genel olarak olarak FR6 (2 modüllü sodyum silikat) ve FR3 (3 modüllü sodyum silikat) birbirlerine karşılaştırıldığında sodyum silikat içeriğinin modül değerinin 2 olan numunelere göre yüzey morfolojisinde daha fazla bozulmaların olduğu gözlenmektedir. Ayrıca FR6'de sodyum silikat solüsyonu modül değerinin azaldığı için silisyum ve kalsiyum oksit miktarının azaldığı ve sodyum oksitlerin miktarının arttığı tespit

edilmiştir. Çizilge 4.2’de FR6 numunenin yapısında bulunan elementlerin oranları verilmiştir.

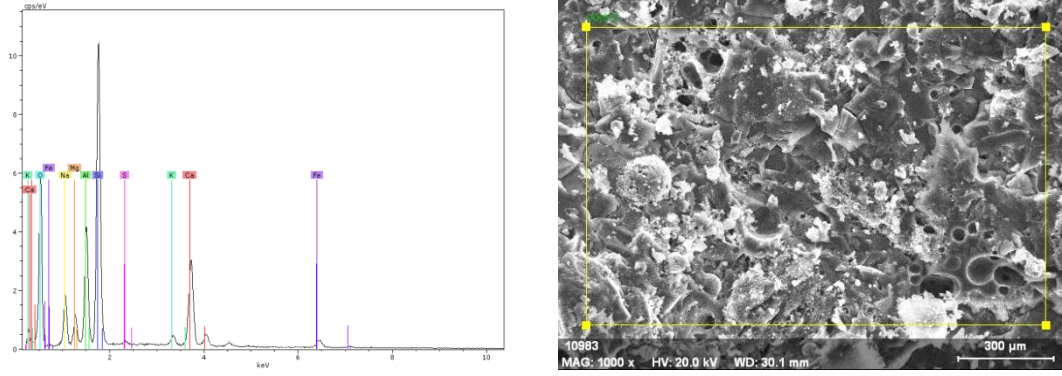
Çizelge 4.2 FR6 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen element içerikleri.

Element	Unn. C [ağırlıkça.- %]	Norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.- %]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	7.1	6.31	5.64	Na ₂ O	10.16
Magnezyum	2.66	2.36	2	MgO	2.82
Alüminyum	7.64	6.79	5.17	Al ₂ O ₃	15.33
Silikon	21.49	19.09	13.97	SiO ₂	48.81
Kükürt	0.36	0.32	0.21	SO ₃	0.96
Potasyum	0.93	0.82	0.43	K ₂ O	1.19
Kalsiyum	10.13	9	4.62	CaO	15.05
Demir	3.74	3.33	1.22	Fe ₂ O ₃	5.68
Oksijen	58.48	51.97	66.74		20.94

Lif katkılı geopolimer kompozit olarak FUK55 numunesi için SEM ve EDX görüntüleri Şekil 4.17’de gösterilmektedir. İlgili numunenin SEM görüntüsünü incelendiğinde çok sayıda reaksiyona girmeyen UK partikülleri ve açık gözenekler görülmektedir. Bununla birlikte FUK55 numunenin yapısında ufak çatlakların olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.17 FUK55 kodlu numune için SEM görüntüleri.



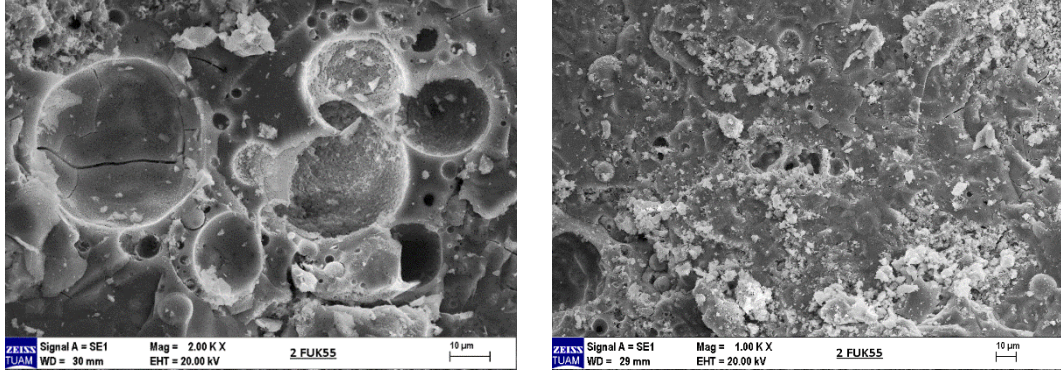
Şekil 4.18 FUK55 kodlu numune için EDX ve SEM görüntüleri.

EDX analizinden elde edilen verilere göre FUK55 bünyesinde yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 içerikleri bulunmaktadır. Çizelge 4.3’den elde edilen bilgilere göre referans örneklerle kıyaslandığında bünyesinde daha fazla silisyum dioksit oksit (SiO_2) olduğu görülmüştür.

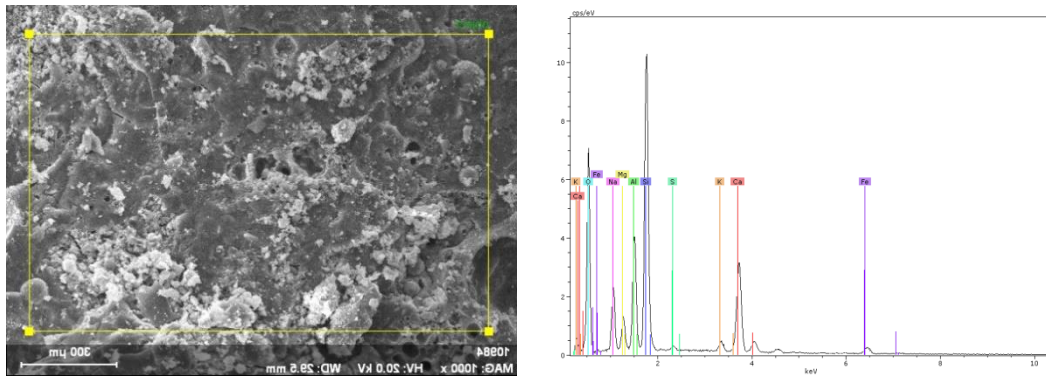
2FUK55 lifli geopolimer kompozit numunenin Şekil 4.19’da gösterildiği gibi matris içerisinde tepkimeye girmeyen UK tanecikleri ve taneciklerin yüzeylerinde kırılmalar görülmektedir. Ayrıca numunenin mikro yapısında nispeten pürüzlü yüzey ve boşlukların olduğu da gözlenmektedir.

Çizelge 4.3 FUK55 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen element içerikleri.

Element	Unn. C [ağırlıkça.- %]	Norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.- %]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	5.56	5.14	4.55	Na_2O	8.29
Magnezyum	2.38	2.2	1.84	MgO	2.63
Alüminyum	8.39	7.76	5.85	Al_2O_3	17.54
Silikon	22.01	20.37	14.75	SiO_2	52.12
Kükürt	0.26	0.24	0.15	SO_3	0.72
Potasyum	0.86	0.8	0.42	K_2O	1.15
Kalsiyum	9.04	8.37	4.25	CaO	14
Demir	2.23	2.07	0.75	Fe_2O_3	3.54
Oksijen	57.34	53.06	67.45		20.86



Şekil 4.19 2FUK55 kodlu numune için SEM görüntüleri.



Şekil 4.20 2FUK55 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri.

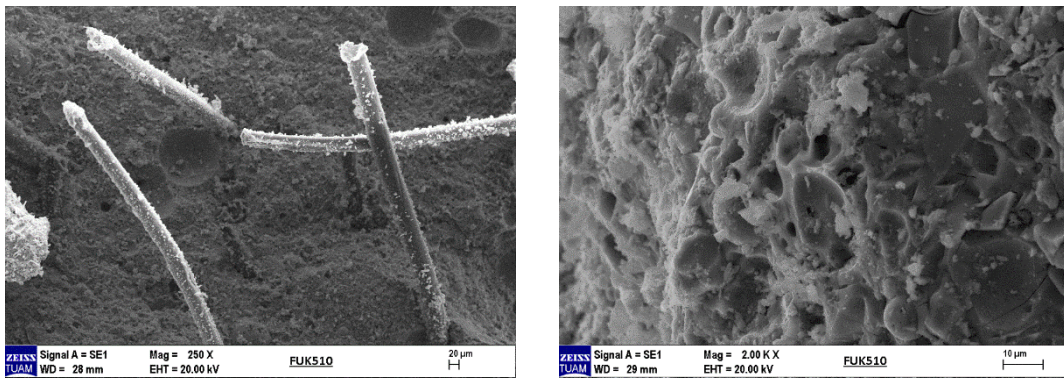
2FUKK55 kimyasal bileşenleri incelendiğinde, Çizilge 4.4'de görüldüğü gibi yüksek oranda Silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) bulunmaktadır.

Çizelge 4.4 2FUK55 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen element içerikleri.

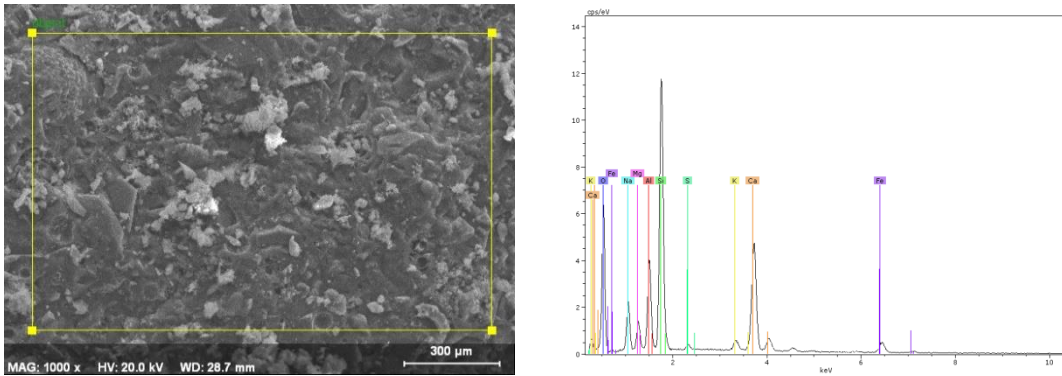
Element	Unn. C [ağırlıkça.- %]	Norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.- %]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	7.19	6.4	5.64	Na_2O	10.36
Magnezyum	2.9	2.58	2.15	MgO	3.1
Alüminyum	8.43	7.5	5.64	Al_2O_3	17.04
Silikon	22.09	19.66	14.2	SiO_2	50.56
Kükürt	0.35	0.32	0.2	SO_3	0.95
Potasyum	0.85	0.76	0.39	K_2O	1.1
Kalsiyum	9.63	8.57	4.34	CaO	14.41
Demir	1.63	1.45	0.53	Fe_2O_3	2.49
Oksijen	59.31	52.78	66.91		21.31

Referans örneklerde olduğu gibi lifli örneklerde genel olarak sodyum silikat solüsyonun modül değerinin düşmesiyle silisyum oksitlerinin bir miktar azaldığı ve sodyum oksitlerin attığı gözlemiştir. Bununla birlikte 2FUK55 numunesinde kalsiyum oksit nispeten artış göstermiştir.

FUK510 lif katkılı geopolimer kompozitin SEM görüntüleri Şekil 4.21'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi her hangi çatlak bulunmamaktadır. FUK510 için ikinci resme bakıldığında az sayıda küçük çatlakların oluşu da gözlenmektedir.



Şekil 4.21 FUK510 kodlu numune için SEM görüntüleri.



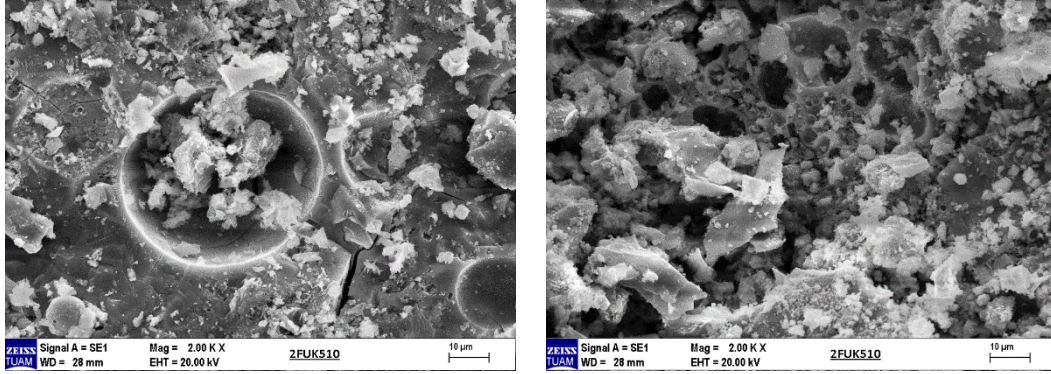
Şekil 4.22 FUK510 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri.

FUK510 için EDX sonuçları Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. EDX grafiğine bakıldığında FUK510'un kimyasal bileşenlerinde fazla miktarda silisyum dioksit (SiO_2) ve ardından ve kalsiyum oksit (CaO) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) yer almaktadır.

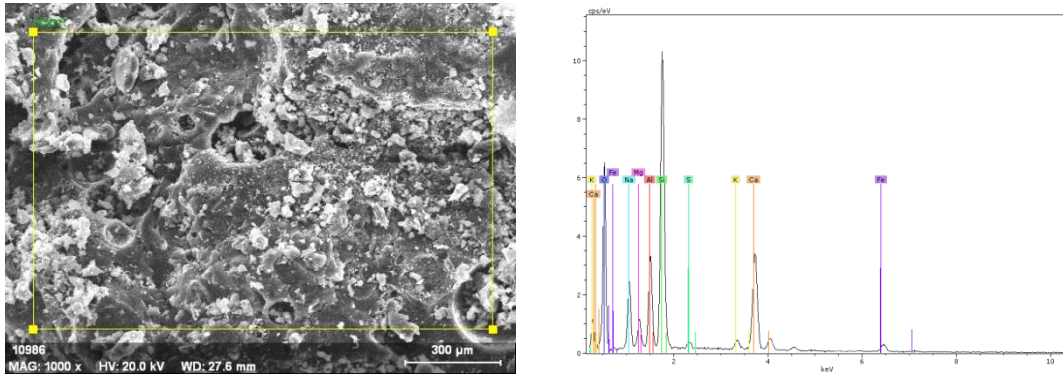
Çizelge 4.5 FUK510 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen sonuçlar.

Element	Unn. C [ağırlıkça.- %]	Norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.- %]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	5.63	5.28	4.74	Na ₂ O	8.43
Magnezyum	2.36	2.21	1.88	MgO	2.62
Alüminyum	6.76	6.34	4.85	Al ₂ O ₃	14.2
Silikon	21.04	19.73	14.51	SiO ₂	50.06
Kükürt	0.38	0.35	0.23	SO ₃	1.05
Potasyum	0.93	0.87	0.46	K ₂ O	1.24
Kalsiyum	11.21	10.51	5.42	CaO	17.44
Demir	3.11	2.92	1.08	Fe ₂ O ₃	4.95
Oksijen	55.22	51.79	66.84		20.24

7 günlük 2FUK510 lifli geopolimer kompozit numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir. İlgili numunenin yüzeylerinde az sayıda büyük çatlakların olduğu gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.23 2FUK510 kodlu numune için SEM görüntüleri.



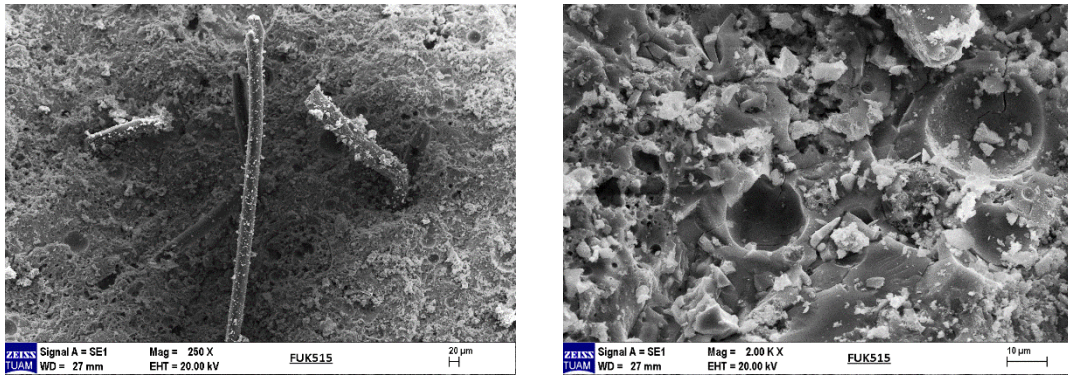
Şekil 4.24 2FUK510 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri görüntüsü.

2FUK510 numune için Çizelge 4.6’da EDX analiz sonuçları verilmiştir. Bununla birlikte yapının bileşiminde yüksek miktarda silisyum dioksit (SiO_2) ve ikinci sırada kalsiyum oksit (CaO) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) bulunmaktadır.

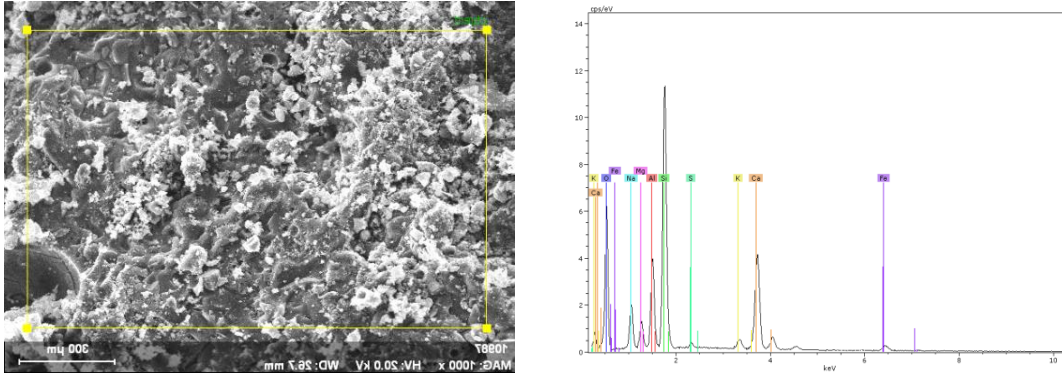
Çizelge 4.6 2FUK510 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen sonuçlar.

Element	Unn. C [ağırlıkça.- %]	Norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.- %]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.-%]
Sodyum	7.92	7.12	6.31	Na_2O	11.55
Magnezyum	2.56	2.3	1.93	MgO	2.77
Alüminyum	6.89	6.19	4.68	Al_2O_3	14.08
Silikon	21.77	19.57	14.19	SiO_2	50.38
Kükürt	0.53	0.48	0.3	SO_3	1.44
Potasyum	0.77	0.7	0.36	K_2O	1.01
Kalsiyum	10.15	9.12	4.64	CaO	15.36
Demir	2.21	1.98	0.72	Fe_2O_3	3.41
Oksijen	58.42	52.53	66.86		21.49

FUK515 örneğinin SEM görüntüleri alınmış ve Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Genel bir gözlem olarak, PP lif ile geopolimerik matrisin bileşenleri arasında iyi bir mikroyapısal bağ olduğu görülmektedir. İlgili numunenin SEM görüntüsüne bakıldığında mikroyapılarında çatlakların ve boşlukların azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.25 FUK515 kodlu numune için SEM görüntüleri.



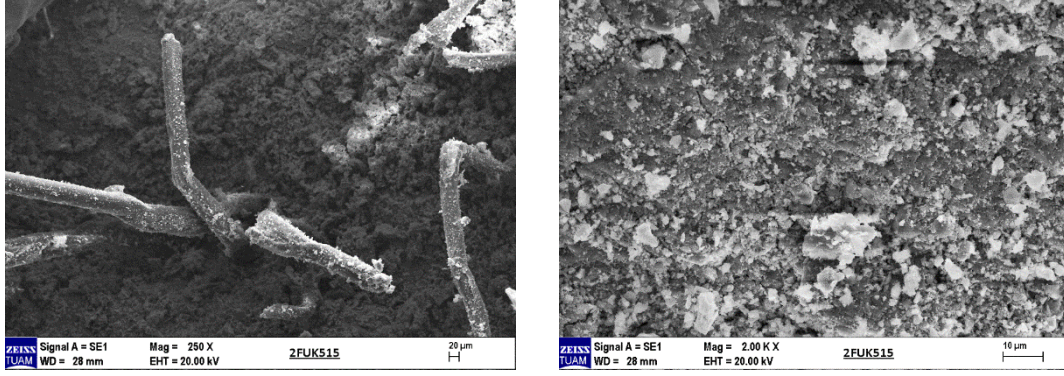
Şekil 4.26 FUK515 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri.

FUK515 ait EDX sonuçları Çizilge 4.7’de verilmiştir. Örnek yapısında; sodyum, magnezyum, alüminyum, silikon, kükürt ve diğer elementlerin varlığı belirlenmiştir. EDX grafiği incelendiğinde FUK515 numunenin bünyesinde yüksek oranda silisyum, kalsiyum ve alüminyum oksitlerin varlığı tespit edilmiştir.

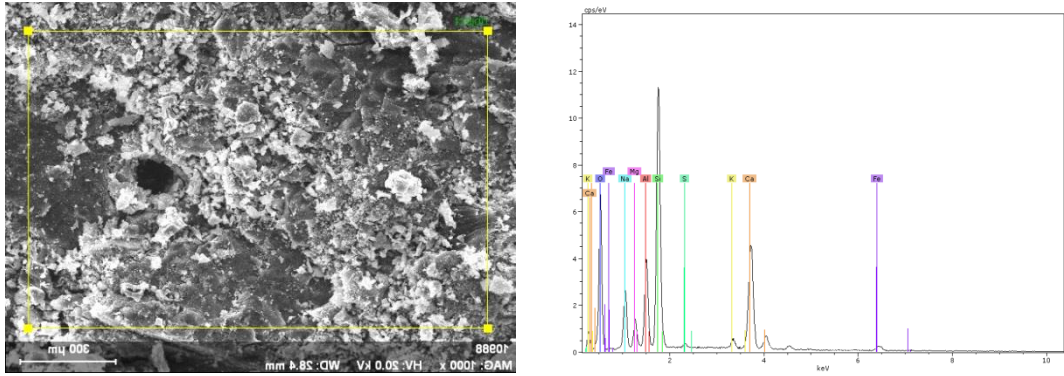
Çizelge 4.7 FUK515 kodlu geopolimer kompozit numunesi için EDX analizinden elde edilen sonuçlar.

Element	Unn. C [ağırlıkça.- %]	Norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.- %]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	5.75	5.34	4.75	Na ₂ O	8.57
Magnezyum	2.47	2.29	1.93	MgO	2.73
Alüminyum	7.36	6.84	5.18	Al ₂ O ₃	15.38
Silikon	21.64	20.1	14.64	SiO ₂	51.18
Kükürt	0.44	0.41	0.26	SO ₃	1.22
Potasyum	0.89	0.83	0.43	K ₂ O	1.18
Kalsiyum	11.29	10.49	5.35	CaO	17.47
Demir	1.44	1.33	0.49	Fe ₂ O ₃	2.27
Oksijen	56.4	52.37	66.96		20.45

2FUK515 ait SEM görüntüleri Şekil 4.27’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi lif miktarının artmasıyla martiste ağlar arasında daha sağlam bağ oluşmakla birlikte çatlakların sayısı ve genişliği azalmıştır. Bu numunede lifin artışıyla boşluklar ve açık gözeneklerin azaldığı da gözlemlenmektedir.



Şekil 4.27 2FUK515 kodlu numune için SEM görüntüleri.



Şekil 4.28 2FUK515 kodlu numune için SEM ve EDX görüntüleri.

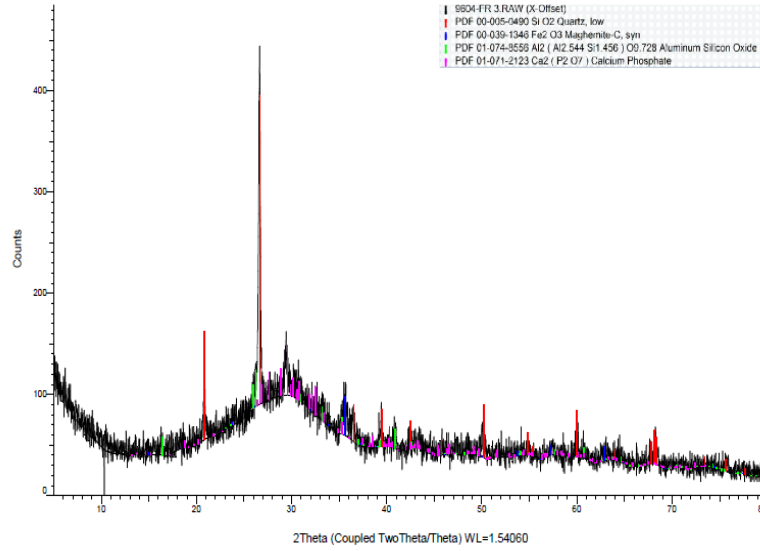
Çizilge 4.8’de görüldüğü gibi. EDX sonuçlarına göre 2FUK515 numunenin diğer numunelere göre silisyum oksitleri azalış gösterirken kalsiyum oksitleri nispeten artış göstermiştir.

Çizelge 4.8 2FUK515 kodlu geopolimer kompozit numunesi için, EDX analizinden elde edilen sonuçlar.

Element	Unn. C [ağırlıkça.- %]	Norm. C [ağırlıkça.- %]	Atom. C [at.- %]	Oksit	Oksit C [ağırlıkça.- %]
Sodyum	6.91	6.47	5.73	Na ₂ O	10.63
Magnezyum	2.4	2.24	1.88	MgO	2.73
Alüminyum	6.7	6.27	4.73	Al ₂ O ₃	14.44
Silikon	20.3	18.99	13.78	SiO ₂	49.54
Kükürt	0.27	0.25	0.16	SO ₃	0.77
Potasyum	0.8	0.74	0.39	K ₂ O	1.09
Kalsiyum	11.79	11.03	5.6	CaO	18.81
Demir	1.22	1.14	0.42	Fe ₂ O ₃	1.99
Oksijen	56.51	52.86	67.31		22.88

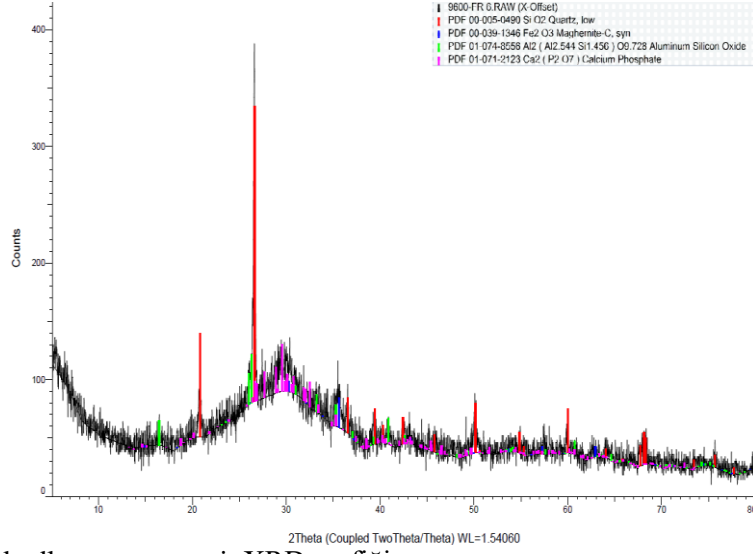
EDX analizi yardımıyla lifli geopolimer kompozit örneklerinde sodyum silikat modül değerinin azalmasıyla silisyum oksitlerinin miktarı azalırken, sodyum oksitlerinin miktarında ise artış gözlenmiştir.

Referans geopolimer kompozit örneklerde, FR3'e ait XRD analizi Şekil 4.29'da verilmiştir. Lifsiz (FR3) numunelerde kuvars, maghemit, alüminyum silikon oksit ve kalsiyum fosfat oluşumları gözlenmiştir.



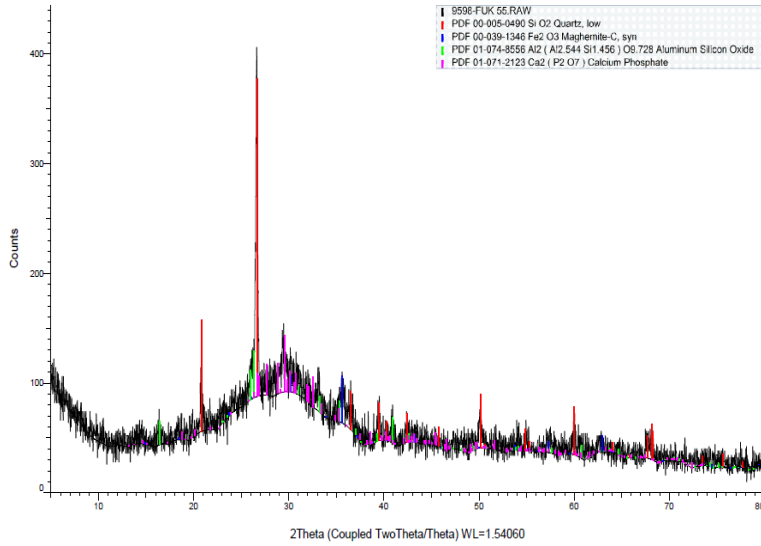
Şekil 4.29 FR3 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

FR6 numunesine ait XRD analiz sonuçları Şekil 4.30'da gösterilmiştir. XRD analizinden elde edilen verilere göre; kuvars, maghemit, alüminyum silikon oksit ve kalsiyum fosfat gibi mineraller tespit edilmiştir.



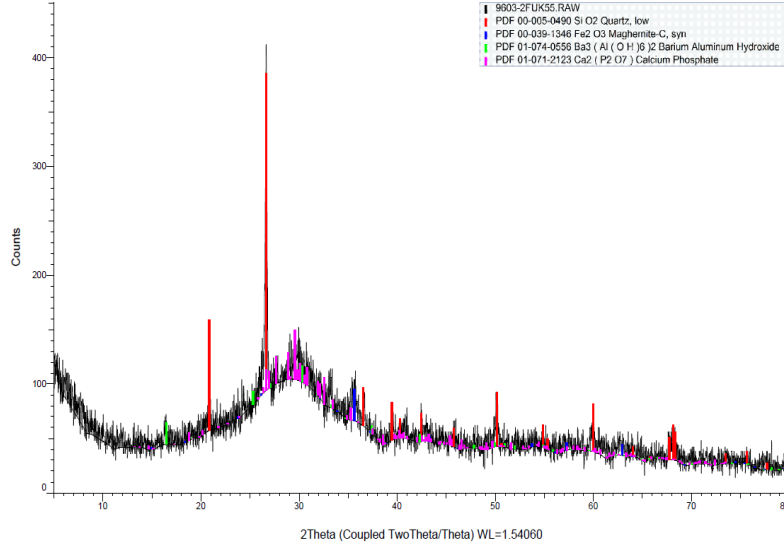
Şekil 4.30 FR6 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

FUK55 numunesine ait XRD grafiği incelendiğinde numunenin bileşiminde; kuvars, maghemit, alüminyum silikon oksit ve kalsiyum fosfat tespit edilmiştir (Şekil 4.31).



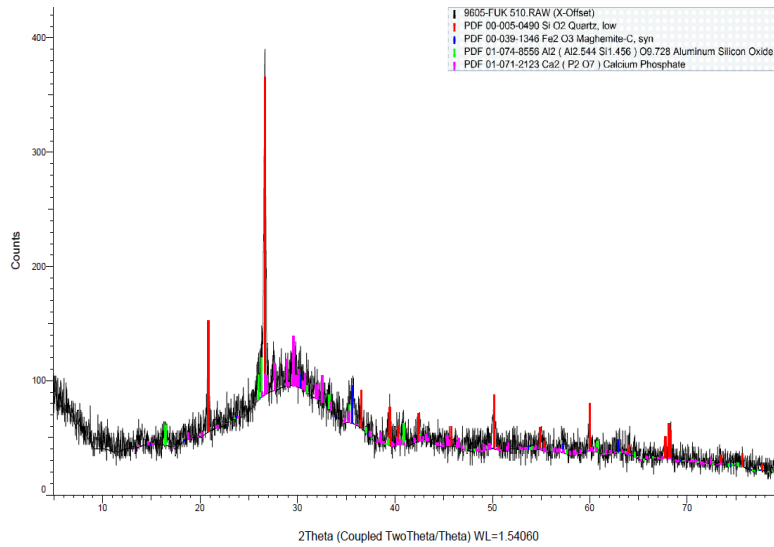
Şekil 4.31 FUK55 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

2FUK55 numunesine ait XRD analiz grafiği Şekil 4.32'de verilmiştir. 2FUK55 bünyesinde; kuvars, maghemit, alüminyum silikon oksit ve kalsiyum fosfat gibi minerallerin bulunduğu tespit edilmiştir.



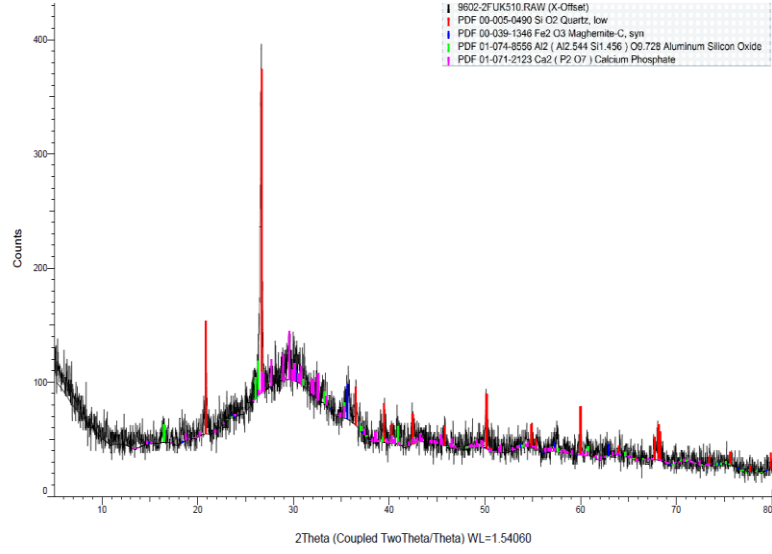
Şekil 4.32 2FUK55 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

FUK510 numunesine ait XRD analizi Şekil 4.33’de gösterilmiştir. XRD analizinden elde edilen sonuçlara göre bu örneklerde kuvars, maghemit, alüminyum silikon oksit ve kalsiyum fosfat oluşumları gözlenmiştir.



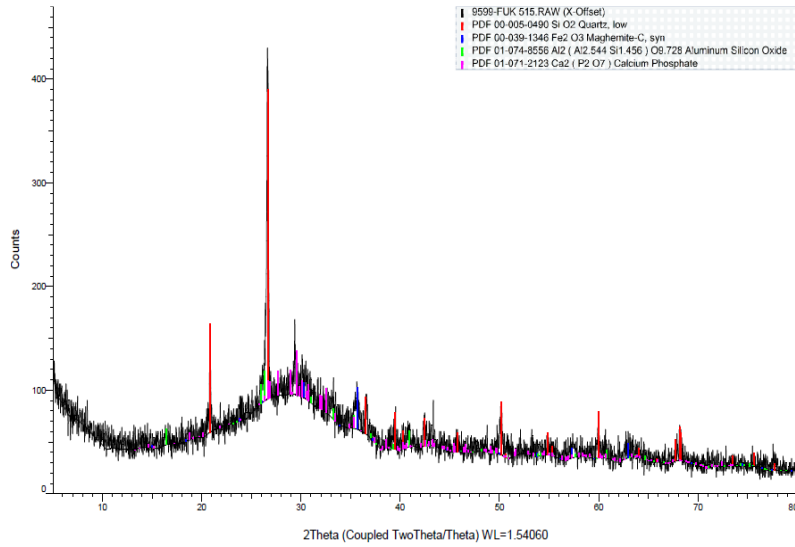
Şekil 4.33 FUK510 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

2FUK510 numunesinin XRD grafiği Şekil 4.34’de gösterilmiştir. XRD analizine göre numunenin yapısında; kuvars, maghemit, alüminyum, silikon oksit, kalsiyum ve fosfat gibi mineraller bulunmaktadır.



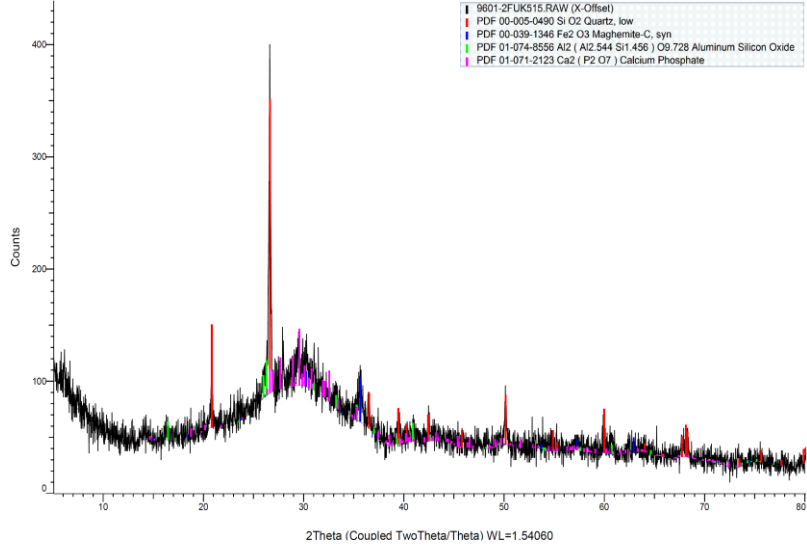
Şekil 4.34 2FUK510 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

FUK515 numunesinin XRD analizleri irdelendiğinde yapı bileşiminde; kuvars, maghemit, alüminyum silikon oksit ve kalsiyum fosfat gibi minerallerin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.35).



Şekil 4.35 FUK515 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

Şekil 4.36'da görüldüğü gibi 2FUK515 ait XRD grafiği incelendiğinde numunenin bünyesinde; kuvars, maghemit, alüminyum silikon oksit ve kalsiyum fosfat gibi mineraller tespit edilmiştir.



Şekil 4.36 2FUK515 kodlu numuneye ait XRD grafiği.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer kompozitlerin mekanik özellikleri ve mikroyapısal bileşimi üzerine, farklı oranlarda (% 0.5, % 1.0, % 1.50) polipropilen lif eklenmesi ve sodyum silikat modül (2 modül, 3 modül) değerinin değişmesinin etkileri incelenmiş ve aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

Geopolimer harçların üretiminde kullanılan yüksek modüllü (3 modüllü) sodyum silikat solüsyonlarının görünen poroziteyi bir miktar arttırdığı tespit edilmiştir. Artan lif ilavesinin ise değerler üzerinde doğrusal bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Sodyum silikat solüsyon modül değerinin 2'den 3'e yükselmesi, örneklerde su emmenin yükselmesine neden olmuştur. Bununla birlikte PP lif kullanımının, su emme oranlarında önemli etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte karışımlarda ÖGYFC oranının artmasına paralel olarak görünen porozite ve su emme oranlarında düşüşler gözlemlenmiştir.

Geopolimer kompozit karışımlarda artan PP lif miktarı ve yüksek modüllü sodyum silikat solüsyonun kullanılmasıyla örneklerin birim hacim ağırlıkları azalmıştır. Bununla birlikte karışımlardaki ÖGYFC oranının artması ile örneklerin birim hacim ağırlıkları lineer bir şekilde artmıştır.

Karışımlardaki 3 modüllü sodyum silikat solüsyonun kullanımı 2 modüle göre daha yüksek görünür yoğunluk değerleri ortaya çıkarmıştır. Aynı zamanda artan lif içeriği ile örneklerin görünür yoğunluk değerleri bir miktar artmıştır. Genel olarak karışımlardaki ÖGYFC oranının artmasına bağlı olarak örneklerin birim hacim ağırlıkları ve görünür yoğunluk değerleri artış göstermiştir.

Karışımlardaki 3 modül sodyum silikat solüsyonun kullanımı, örneklerin eğilme arttırmıştır. Bununla birlikte referans örneklerde 3 modüllü sodyum silikat solüsyonunun kullanılmasıyla basınç dayanımlarında düşüş gözlemlenirken lifli örneklerde ise basınç

dayanımlarının artmasına neden olmuştur. Referans geopolimer kompozit örneklerin eğilme dayanımları; 0.1 MPa - 5.6 MPa arasında ve lifli örneklerde 2.4 MPa - 11.4 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Geopolimer kompozit karışımlardaki, referans örneklerin basınç dayanımları 15.3 MPa - 60.9 MPa arasında ve lifli örneklerde 21.4 MPa - 77.60 MPa değişkenlik göstermiştir. Genel olarak lifli geopolimer kompozit örnekleri referans (lifsiz) örnekler ile karşılaştırıldığında lif katkılı örneklerin eğilme ve basınç dayanımlarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Ayrıca lifli karışımlardaki, lif içeriğinin artmasıyla örneklerin eğilme ve basınç dayanımları da artmıştır.

Geopolimer harçlarda 3 modül sodyum silikat solüsyonunun kullanımı ve PP lif oranının artmasıyla örneklerin daha iyi ve yoğun bir morfolojiye sahip oldukları gözlenmiştir.

Sonuç olarak hazırlanan geopolimer kompozit malzeler içerisinde elde edilen tüm bulgular değerlendirildiğinde; % 50 UK ve % 50 ÖGYFC ile hazırlanan karışımların 3 modül sodyum silikat solüsyonunu ve 10 M NaOH ile aktifleştirilmeleri durumunda en ideal sonuçların alındığı tespit edilmiş ve yapılarda kullanılabilir oldukları kanaatine varılmıştır. Bu sebeple aynı içeriğe sahip örnekler durabilite testlerinde ve deneylerinde de kullanılmıştır. Durabilite deneylerinden elde edilen bulgular değerlendirildiğinde ise % 1.5 PP lif ilaveli geopolimer kompozit harçlarının daha iyi dayanıklılık özelliklerine sahip oldukları düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdullah A B, 2019, Investigating Geotechnical Properties Of Soils Using Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash, and Lignosulfonates. Hasan Kalyoncu University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.D. Thesis, 94p, Gaziantep.
- Ahmaruzzaman M, 2010, A Review On the Utilization of Fly Ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 327–363.
- Akkaş A, Alpaslan L, Arabaci S, Başığit C, 2010, Polipropilen Lif Katkılı Yarı Hafif Betonların Basınç Dayanımı Özellikleri. *SDU International Technologic Science*, 2, 9–14.
- Al-Baijat H, Sarireh M, 2019, The Use of Fine Blast Furnace Slag in Improvement of Properties of Concrete. *Open Journal of Civil Engineering*, 9, 95–105.
- Al-Mashhadani M M, Canpolat O, Aygörmez Y, Uysal M, Erdem S, 2018, Mechanical and Microstructural Characterization of Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer Composites. *Construction and Building Materials*, 167, 505–513.
- Aleem M I A, Arumairaj P D, 2012, Geopolymer Concrete- A Review. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 1, 118–122.
- Asrani N P, Murali G, Parthiban K, Surya K, Prakash A, Rathika K, Chandru U, 2019, A Feasibility of Enhancing the Impact Resistance of Hybrid Fibrous Geopolymer Composites: Experiments and Modelling. *Construction and Building Materials*, 203, 56–68.
- Awoyera P, Adesina A, 2019, A Critical Review on Application of Alkali Activated Slag As a Sustainable Composite Binder. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00268.
- Aygörmez Y, Canpolat O, Al-Mashhadani M M, Uysal M, 2020, Elevated temperature,

- freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 235, 117502.
- Aziz A, Stocker O, El Amrani El Hassani I E, Laborier A P, Jacotot E, El Khadiri A, El Bouari A, 2021, Effect of Blast-Furnace Slag on Physicochemical Properties of Pozzolan-Based Geopolymers. *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123880.
- Bahadur S N, 2018, Fly Ash-Based Geopolymer Binder: a Future Construction Material. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 8, 1–21.
- Baykara H, Cornejo M H, Espinoza A, García E, Ulloa N, 2020, Preparation, Characterization, and Evaluation of Compressive Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Geopolymer Mortars. *Heliyon*, 6.
- Bhatt A, Priyadarshini S, Mohanakrishnan A A, Abri A, Sattler M, Techapaphawit S, 2019, Physical, Chemical, and Geotechnical Properties of Coal Fly Ash: A Global Review. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00263.
- Bhutta A, Borges P H R, Zanotti C, Farooq M, Banthia N, 2017, Flexural Behavior of Geopolymer Composites Reinforced With Steel and Polypropylene Macro Fibers. *Cement and Concrete Composites*, 80, 31–40.
- Bingöl Ş, 2018, Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 132s, Kayseri.
- Buchwald A, Zellmann H D, Kaps C, 2011, Condensation of Aluminosilicate Gels-Model System For Geopolymer Binders. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357, 1376–1382.
- Chandramohan D, Marimuthu K, 2011, A Review on Natural Fibers. *IJRRAS*, 8, 194–206.
- Chowdhury S, Mohapatra S, Gaur A, Dwivedi G, Soni A, 2020, Study Of Various

Properties of Geopolymer Concrete – a Review. *Materials Today: Proceedings*. Retrieved from 35

Das S K, Mishra J, Singh S K, Mustakim S M, Patel A, Das S K, Behera U, 2020, Characterization and Utilization of Rice Husk Ash (RHA) In Fly Ash – Blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete For Sustainable Future. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5162–5167.

Durak U, İlkentapar S, Karahan O, Uzal B, Atış C D, 2021, A New Parameter Influencing the Reaction Kinetics and Properties of Fly Ash Based Geopolymers: a Pre-Rest Period Before Heat Curing. *Journal of Building Engineering*, 35, 102023.

Farhan N A, Sheikh M N, Hadi M N S, 2019, Investigation of Engineering Properties of Normal And High Strength Fly Ash Based Geopolymer and Alkali-Activated Slag Concrete Compared to Ordinary Portland Cement Concrete. *Construction and Building Materials*, 196, 26–42.

Ganesh A C, Muthukannan M, 2021, Development of High Performance Sustainable Optimized Fiber Reinforced Geopolymer Concrete and Prediction of Compressive Strength. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124543.

Gasca-Tirado J R, Manzano-Ramírez A, Reyes-Araiza J L, 2017, The Potential Use of Geopolymer For Cleaning Air. In *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites* (pp. 221–233). 494p, Woodhead Publishing.

Ghazali N, Muthusamy K, Ahmad S W, 2019, Utilization of Fly Ash in Construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 601.

Görhan G, Kürklü G, 2014a, Alkali Tuz İçeriğinin Geopolimer Cephe Kaplama Malzemesi Özelliklerine Etkisi. In *7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*. Beşiktaş - İstanbul.

Görhan G, Kürklü G, 2014b, The Influence of The NaOH Solution on The Properties of the Fly Ash-Based Geopolymer Mortar Cured at Different Temperatures.

Composites Part B: Engineering, 58, 371–377.

Görür E B, 2015, Alkali ile Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 140s, Kayseri.

Grubeša N I, Barišić I, Fucic A, Bansode S S, 2016, Application of Blast Furnace Slag in Civil Engineering: worldwide studies. In Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction (pp. 51–66). 187p, Woodhead Publishing.

Gupta A, 2021, Investigation of the Strength of Ground Granulated Blast Furnace Slag Based Geopolymer Composite With Silica Fume. Materials Today: Proceedings, 44, 23–28.

Gupta S, Chaudhary S, 2020, Use of Fly Ash For the Development of Sustainable Construction Materials. In New Materials in Civil Engineering (pp. 677–690). 1104p, Butterworth-Heinemann.

Haha M B, Lothenbach B, Le S G., Winnefeld F, 2011, Influence of Slag Chemistry on the Hydration of Alkali-Activated Blast-Furnace Slag - Part I: Effect of MgO. Cement and Concrete Research, 41, 955–963.

Hannawi K, Bian H, Prince-Agboodjan W, Raghavan B, 2016, Effect of Different Types of Fibers on the Microstructure and the Mechanical Behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. Composites Part B: Engineering, 86, 214–220.

He R, Dai N, Wang Z, 2020, Thermal and Mechanical Properties of Geopolymers Exposed to High Temperature: a Literature Review. Advances in Civil Engineering, 2020, 17.

He T, Li Z, Zhao S, Zhao X, Qu X, 2021, Study on the Particle Morphology, Powder Characteristics and Hydration Activity of Blast Furnace Slag Prepared By Different Grinding Methods. Construction and Building Materials, 270, 121445.

- Horbanová Ľ, Ujhelyiová A, Ryba J, Lokaj J, Michlík P, 2010, Properties of Composite Polypropylene Fibers For Technical Application. *Acta Chimica Slovaca*.
- Humam T, Siddique R, 2013, Properties of Mortar Incorporating Iron Slag. *Leonardo Journal of Sciences*, 23, 53–60.
- Hussin K A, 2018, Cam Elyaf, Bazalt Elyaf ve Çelik Elyaf Tel ile Takviyelendirilmiş Beton Blokların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 59s, Kayseri.
- Islam M M, Islam S, Rahman A, Das A, 2011, Strength Behavior of Mortar Using Slag as Partial Replacement of Cement. *MIST Journal: GALAXY (DHAKA)*, 3, 1970.
- Jambrich M, Hodul P, 1999, Textile Applications of Polypropylene Fibers. In *Polypropylene* (pp. 806–812). 966p, Springer, Dordrecht.
- Jindal B B, Jangra P, Garg A, 2020, Effects of Ultra Fine Slag as Mineral Admixture on the Compressive Strength, Water Absorption and Permeability of Rice Husk Ash Based Geopolymer Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 32, 871–877.
- John S K, Nadir Y, Girija K, 2021, Effect of Source Materials, Additives on the Mechanical Properties and Durability of Fly Ash and Fly Ash-Slag Geopolymer Mortar: a Review. *Construction and Building Materials*, 280, 122443.
- Upadhyay A, Kamal M, 2007, Characterization and Utilization of Fly Ash. *Characterisation and Utilization of fly ash*. Department Of Mining Engineering National Institute Of Technology Rourkela, Orissa.
- Kaur A, 2016, The Effect of Properties of Fly Ash on Strength and Microstructure Development of Mortars. Department Of Civil Engineering Indian Institute Of Technology, Ph.D. Thesis, 189p, Delhi Delhi.
- Komljenović M, Bašćarević Z, Bradić V, 2010, Mechanical and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181, 35–42.

- Korniejenko K, Frączek E, Pytlak E, Adamski M, 2016, Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced With Natural Fibers. *Procedia Engineering*, 151, 388–393.
- Le Duigou A, Correa D, Ueda M, Matsuzaki R, Castro M, 2020, A Review of 3D and 4D Printing of Natural Fibre Biocomposites. *Materials and Design*, 194, 108911.
- Lewis D W, 2000, Properties and Use of Iron and Steel Slags (pp. 1–11).
- Li F, Liu L, Yang Z, Li S, 2021, Physical and Mechanical Properties and Micro Characteristics of Fly Ash-Based Geopolymer Paste Incorporated With Waste Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes (Mwcnts). *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123339.
- Li G, Zhang A, Song Z, Liu S, Zhang J, 2018, Ground Granulated Blast Furnace Slag Effect on the Durability of Ternary Cementitious System Exposed to Combined Attack of Chloride and Sulfate. *Construction and Building Materials*, 158, 640–648.
- Li Z, Zhang S, Zuo Y, Chen W, Ye G, 2019, Chemical Deformation of Metakaolin Based Geopolymer. *Cement and Concrete Research*, 120, 108–118.
- Li Z, Fei M E, Huyan C, Shi X, 2020, Nano-Engineered, Fly Ash-Based Geopolymer Composites: an Overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105334.
- Liu J, Qin Q, Yu Q, 2020, The Effect Ofsize Distribution Ofslag Particles Obtained in Dry Granulation on Blast Furnace Slag Cement Strength. *Powder Technology*, 362, 32–36.
- Kumar M L, Revathi V, 2016, Metakaolin Bottom Ash Blend Geopolymer Mortar - a Feasibility Study. *Construction and Building Materials*, 114, 1–5.
- Luga E, 2015, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 187s, Kayseri.
- Mabroum S, Moukannaa S, Machi A E, Taha Y, Benzaazoua M, Hakkou R, 2020, Mine

- Wastes Based Geopolymers : A Critical Review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100014.
- Madhavi T C, Raju L S, Deepak M, 2014, Polypropylene Fiber Reinforced Concrete- A Review. In *International Journal of Applied Engineering Research*, 4, 2250–2459.
- Mahir F I, Keya K N, Sarker B, Nahiun K M, Khan R A, 2019, A Brief Review on Natural Fiber Used as a Replacement of Synthetic Fiber in Polymer Composites. *Materials Engineering Research*, 1, 88–99.
- Majdoubi H, Haddaji Y, Mansouri S, Alaoui D, Tamraoui Y, Semlal N, Hannache H, 2021, Thermal, Mechanical and Microstructural Properties of Acidic Geopolymer Based on Moroccan Kaolinitic Clay. *Journal of Building Engineering*, 35, 102078.
- Mehta A, Siddique R, 2018, Sustainable Geopolymer Concrete Using Ground Granulated Blast Furnace Slag And Rice Husk Ash: Strength and Permeability Properties. *Journal of Cleaner Production*, 205, 49–57.
- Menyhárd A, Menczel J D, Abraham T, 2020, Polypropylene fibers. In *Thermal Analysis of Textiles and Fibers* (pp. 205–222). 416p, Woodhead Publishing.
- Miyamoto T, Torii K, Akahane K, Sachiko H, 2015, Production and Use of Blast Furnace Slag Aggregate For Concrete. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*.
- Mollaismailoğlu A, 2020, Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Yüksek Oranda Ögütülmüş Yüksek Firin Cürufu Kullaniminin Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 69s, Kocaeli.
- Nataraja M C, Kumar P G D, Manu A S, Sanjay M C, 2013, Use of Granulated Blast Furnace Slag as fine Aggregate in Cement Mortar. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 2, 59–68.
- Nizar I K, Al Bakri A M M, Rafiza A R, Kamarudin H, Alida A, Zarina Y, 2014, Study on Physical and Chemical Properties of Fly Ash From Different Area in Malaysia.

Key Engineering Materials, 985–989.

Onochie K K, Balkis A P, 2021, Polypropylene Fiber Reinforced Alker as a Structurally Stable and Sustainable Building Material. *Journal of Cleaner Production*, 279,123600.

Özcan Z, 2020, Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Kül Tabanlı Harçların Özellikleri. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 201s, Kayseri.

Pasupathy K, Cheema D S, Sanjayan J, 2021, Durability Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Buried in Saline Environment For 10 Years. *Construction and Building Materials*, 281, 122596.

Patil S V, Nawle S C, Kulkarni S J, 2013, Industrial Applications of Fly ash : A Review. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2, 1659–1663.

Pekdemir N R, 2020, Polipropilen Lif Oraninin Betonun Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımına Etkisi. Gümüşhane Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 63s, Gümüşhane.

Ram L C, Masto R E, 2014, Fly Ash For Soil Amelioration: A Review on the Influence of Ash Blending with İnorganic and Organic Amendments. *Earth-Science Reviews*, 128, 52–74.

Ranjbar N, Mehrali M, Behnia A, Javadi Pordsari A, Mehrali M, Alengaram U J, Jumaat M Z, 2016, A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer. *PLOS ONE*, 11, e0147546.

Rożek P, Król M, Mozgawa W, 2019, Geopolymer-Zeolite Composites : A review. *Journal of Cleaner Production*, 230, 557–579.

Saha S, Rajasekaran C, 2017, Enhancement of The Properties of Fly Ash Based Geopolymer Paste By Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag.

- Construction and Building Materials, 146, 615–620.
- Saidani, M., Saraireh, D., & Gerges, M, 2016, Behaviour of Different Types of Fibre Reinforced Concrete Without Admixture. *Engineering Structures*, 113, 328–334.
- Saje D, Bandelj B, Šušteršič J, Lopatič J, Saje F, 2011, Shrinkage of Polypropylene Fiber-Reinforced High-Performance Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23.
- Saran A G, Doğan Ü A, Özkul M H, (n.d.), Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Klorür Etkisinde Korozyona Karşı Performansı, 212, 281–290.
- Sarı M, (2013), Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Rafat S, 2008, Waste Materials and By-Products in Concrete. Punjab.
- Singh B G I, Gupta M, Bhattacharyya S K, 2015, Geopolymer Concrete: a Review Of Some Recent Developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78–90.
- Song H W, Saraswathy V, 2006, Studies on the Corrosion Resistance of Reinforced Steel in Concrete With Ground Granulated Blast-Furnace Slag-an Overview. *Journal of Hazardous Materials*, 138, 226–233.
- Tekin I, 2016, Properties of NaOH Activated Geopolymer with Marble, Travertine and Volcanic Tuff Wastes. *Construction and Building Materials*, 127, 607–617.
- Thomas M, 2007, Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. Portland Cement Association.
- Tiwari M K, Bajpai S, Dewangan U K, 2016, Fly Ash Utilization: A Brief Review in Indian Context. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3, 949–956.
- Top S, 2019, Termik Santral ve Metalurjik Tesis Artıklarından Yapay Zeolit ve Geopolimer Malzemelerin Eldesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

Doktora Tezi, 199s, Adana.

Topçu İ B, Demirel O E, Uygunoğlu T, 2017, Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. *Journal of Polytechnic*, 20, 91–96.

TS EN 196-1, 2009, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım, TSE, Ankara.

TS EN 771- 1, 2005, Kâgir birimler-Özellikler-Bölüm 1: Kil kâgir birimler (tuğlalar), TSE, Ankara.

TS EN 772-4, (2000). Kâgir birimler-Deney metotları-Bölüm 4: Tabii taş kâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini, TSE, Ankara.

Uzbaş B, 2019, Çimento Esaslı Silis Dumanlı Uçucu Küllü Kompozitlerin Sem ve XRD Destekli Görsel Analizlerin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 273s, Kayseri.

Václavík V, Dirner V, Dvorský T, Daxner J, 2012, The Use of Blast Furnace Slag. *Metalurgija*, 51, 461–464.

De Vargas A S, Molin D C C D, Vilela A C F, Da Silva F J, Pavão B, Veit H, 2011, The Effects of Na₂O/SiO₂ Molar Ratio, Curing Temperature and Age on Compressive Strength, Morphology and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash-Based Geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 33, 653–660.

Vassilev S V, Vassileva C G, 2007, A New Approach For the Classification of Coal Fly Ashes Based on Their Origin, Composition, Properties, and Behaviour. *Fuel*, 86, 1490–1512.

Wang H Y, Wang W C, Wang J C, Chen Y W, 2021, Evaluation of the Engineering Properties and Durability of Mortar Produced Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Stainless Steel Reduced Slag. *Construction and Building Materials*, 280, 122498.

- Wang M, Wang C, Yu J, Li Y, Wen P, Fan Q, 2021, Investigation of The Grouting Effect of Blast Furnace Slag-Based Mortar on Void Road Bases Based on The Grouting Simulation Test. *Construction and Building Materials*, 282, 122567.
- Wang R, Wang J, Dong T, Ouyang G, 2020, Structural and Mechanical Properties of Geopolymers Made of Aluminosilicate Powder with Different SiO₂/Al₂O₃ Ratio: Molecular Dynamics Simulation and Microstructural Experimental Study. *Construction and Building Materials*, 240, 117935.
- Wong C L, Mo K H, Alengaram U J, Yap S P, 2020, Mechanical Strength and Permeation Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Containing Recycled Brick Powder. *Journal of Building Engineering*, 32, 101655.
- Xu H, Van Deventer J S J, 2000, The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59, 247–266.
- Yun-Ming L, Cheng Yong H, Mustafa A B M, Hussin K, 2016, Structure And Properties of Clay-Based Geopolymer Cements: a Review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.euroslag.com/products/absgbs/>, 23.11.2020
- 2- https://kalitelicelikciler.tr.gg/DEM%26%23304%3BR_%C7EL%26%23304%3BK--Ue-RET%26%23304%3BM%26%23304%3B.htm, 17.3.2020
- 3- <https://www.indiamart.com/proddetail/ground-granulated-blast-furnace-slag-12294766291.html>, 23.11.2020
- 4- <https://fiberelyaf.com/polipropilen-elyaf/?v=20c2e993f481>, 11.11.2020
- 5- <https://tekstilsayfasi.blogspot.com/2012/12/sentetik-lifler-cesitleri-ozellikleri.html>, 11.11.2020
- 6- <http://www.tekniktekiller.com/articles/teknik-liflerin-ozellikleri/>, 11.11.2020
- 7- <https://docplayer.biz.tr/63597069-T-c-milli-egitim-bakanligi-tekstil-teknolojisi.html>, 11.03.2021

- 8- <http://www.rifay.com.tr/tr/ricon>, 28.10.2020
- 9- <https://rilonfibers.com/blog/polypropylene-fiber/>, 03.11.2020
- 10- <https://www.slideshare.net/OsamaMusharraf/polypropylene-fibers-87216693>,
03.11.2020
- 11- http://balcilarinsaat.com/katalog/796285bolu-cimento-curufllu_cimento_bolu-pdf.pdf, 03.01.2021
- 12- <https://www.atlas1.com.tr/p-p-elyaf>, 05.01.2021

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fazlullah DANİSHYAR
Doğum Yeri ve Tarihi : Afghanistan, 26.04.1995
Yabancı Dili : İngilizce, Farsça
İletişim (Telefon / e-posta) : 05525759695, dfaz5633@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Zukur Markaz Bandar Lisesi (2008 – 2012).
Lisans :Kırıkkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
(2014-2018).
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, (2018-2021).